



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL



# **ADENSAMENTO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO DE UMA BARRAGEM PARA CONTENÇÃO DE REJEITOS DE OURO**

**AUTOR: BRASILEU AGNALDO PEREIRA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ROMERO CÉSAR GOMES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, agosto de 2006.



*Dedico esta dissertação de Mestrado aos meus pais, Gerônimo e Maria Tita, àqueles que tiveram um papel importante para esta vitória e, em especial, minha digníssima esposa Queila, com quem aprendi a buscar o melhor de mim, fazendo com que esta trajetória ficasse mais fácil.*

“Queremos um significado em nossas vidas. Quando elevamos nossa visão, lutamos para obter mérito, nos dedicamos às mais altas metas de nossa sociedade, nos alistamos numa causa antiga e significativa – a luta perene do homem para realizar o melhor que há nele.”

Jonh W. Gardner

*“É a dedicação ao trabalho que distingue um indivíduo de outro; Não acredito em talentos.”*

*Euryclides de Jesus Zerbini*

## AGRADECIMENTOS

Sempre a Deus.

Aos meus familiares, especialmente aos meus irmãos, sobrinhos, cunhados, tios, etc.

Ao professor e orientador Dr. Romero César Gomes pela paciência e contribuição que me foi passada e pelos conhecimentos que o pertence.

Ao professor e amigo Saulo Gutemberg pelo apoio, incentivo e contribuição, não só neste trabalho, como também durante todos os momentos que precisei.

Aos professores e amigos Luís Fernando Martins Ribeiro, Waldyr Lopes de Oliveira Filho, Rodrigo Pelucci e a Prof<sup>a</sup> Milena Sabino Lana pelo apoio, atenção e contribuição que proporcionaram e vêm proporcionando pelo ótimo trabalho, observado por todos, na preparação das aulas lecionadas.

Aos amigos Rodrigo Rodrigues, Edmar, Priscila, Helba, Emanuel, Frank, Deilton, Felipe, Johanna, Júnior (Manjuba) e Róvia.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A ANGLOGOLD ASHANTI MINERAÇÃO LTDA , na pessoa dos Srs Murilo Costa e Altair Souza, por permitir a realização deste trabalho, nos enviando as informações necessárias.

E, em especial, a Fundação Gorceix, que através de seu Presidente Prof. Dr. Cristovam e sua Superintendente Dr<sup>a</sup> Telma que confiaram em meu trabalho, dando-me uma oportunidade de somar à equipe desta instituição, mesmo estando no período mais difícil desta dissertação e mais uma vez aquela que tem contribuído muito em minha vida... Queila, eu te amo.

# RESUMO

Em projetos de disposição de rejeitos de mineração por via úmida, as análises da capacidade de estocagem do reservatório demandam o conhecimento das características de compressibilidade e adensamento dos resíduos lançados, função primária da natureza e da granulometria do material. No caso de rejeitos finos, com elevadas proporções de partículas da fração argila, como ocorrem no caso de rejeitos de ouro, a previsão do comportamento dos resíduos e a formulação de um modelo deposicional consistente não podem ser baseados em ensaios convencionais.

No projeto de sistemas de contenção de rejeitos finos (como no caso de minerações de ouro), um aspecto extremamente relevante é a determinação das propriedades tecnológicas dos materiais em termos de compressibilidade e adensamento nos reservatórios, de forma a se quantificar a vida útil de tais empreendimentos. De uma maneira geral, o material é lançado de forma quase aleatória, não sendo estabelecido nenhum controle das variáveis que influenciam o processo de deposição. O conhecimento dos mecanismos de deposição hidráulica resultaria em um maior entendimento do comportamento destes aterros sob o ponto de vista geotécnico e, desta forma, poder-se-ia controlar a qualidade do processo construtivo, mesmo que, durante a construção, as variáveis de descarga e lançamento fossem alteradas

O trabalho consiste na avaliação das propriedades constitutivas do adensamento de rejeitos de ouro de uma mineração de ouro (Anglogold Ashanti, antiga Morro Velho), com a utilização do Ensaio de Adensamento Hidráulico (HCT com bomba de fluxo), disponível no Laboratório de Geotecnia da UFOP. Estes dados subsidiarão análises de simulação numérica do processo de enchimento da estrutura de contenção destes rejeitos, mediante a aplicação do programa CONDES0.

# ABSTRACT

In projects of disposition of mining tailings for humid road, the analyses of the capacity of stock of the reservoir demand the knowledge of the compressibility characteristics and consolidation of the thrown residues, primary function of the nature and of the granulometry of the material. In the case of fine tailings, with high proportions of particles of the fraction clay, as they happen in the case of tailings of gold, the forecast of the behavior of the residues and the formulation of a model consistent depositional they cannot be based on conventional rehearsals.

In the project of systems of contention of fine tailings(as in the case of minings of gold), an extremely important aspect is the determination of the technological properties of the materials in compressibilityterms and consolidationin the reservoirs, in way quantifying the useful life of such enterprises. In a general way, the material is thrown in an almost aleatory way, not being established any control of the variables that you/they influence the deposition process. The knowledge of the mechanisms of hydraulic deposition would result in a larger understanding of the behavior of these embankments under the point of view geotechnicaland, this way, the quality of the constructive process could be controlled, even if, during the construction, the discharge variables and release they were altered.

The work consists of the evaluation of the constituent properties of the consolidationof tailings of gold of a mining of gold (Anglogold Ashanti), with the use of the Rehearsal of Hydraulic Consolidation Test (HCT with flow bomb), available in the Geotechnia Laboratory of University Federal of Ouro Preto. These data will subsidize analyses of numeric simulation of the process of stuffing of the structure of contention of these tailings, by the application of the program CONDES0.

# ÍNDICE

página

Lista de tabelas.....	X
Lista de figuras.....	XI
Lista de símbolos.....	XV

## **CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO**

1.1 Modelo Depositional de Rejeitos Finos .....	1
1.2 Modelagem Numérica e Experimental do Problema.....	2
1.3 Justificativa e Objetivos do Trabalho .....	5
1.4 Estrutura da Dissertação .....	6

## **CAPÍTULO 2- MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FINOS**

2.1 Introdução .....	8
2.2 Formulação da Equação Geral de Fluxo.....	9
2.3 Teoria do Adensamento Unidimensional a Grandes Deformações.....	11
2.4 Equação Diferencial do Adensamento a Grandes Deformações.....	15
2.5 Modelos Constitutivos Unidimensionais .....	19
2.6 Ensaios de Laboratório para a Determinação das Propriedades Constitutivas do Adensamento.....	25
2.6.1 Ensaio de Adensamento Tipo CRD.....	25
2.6.1.1 Princípios e Equipamentos de Ensaio .....	25
2.6.1.2 Procedimentos do Ensaio .....	27
2.6.1.3 Metodologias de Análise .....	28
2.6.2 Ensaio de Adensamento Tipo HCT .....	31
2.6.2.1 Princípios e Equipamentos de Ensaio .....	31
2.6.2.2 Ensaio de Adensamento por Percolação Induzida .....	38
2.6.2.3 Ensaio de Permeabilidade Saturada .....	42

2.7 Simulação Numérica do Processo de Adensamento Unidimensional a Grandes Deformações pelo programa CONDES0.....	43
2.7.1 Fundamentos e Condições de Contorno do Programa CONDES0 .....	43
2.7.2 Parâmetros de Entrada e de Saída do Programa CONDES0 .....	46

### **CAPÍTULO 3- CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS**

3.1 Introdução .....	51
3.2 Amostragem dos Rejeitos .....	52
3.3 Resultados dos Ensaios de Caracterização .....	54
3.4 Resultados dos Ensaios HCT com Bomba de Fluxo .....	55
3.4.1 Rejeitos de Flotação e em Pasta .....	56
3.4.2 Rejeitos de Flotação e de Backfill .....	59
3.5 Análises dos Resultados dos Ensaios HCT com Bomba de Fluxo.....	62
3.6 Resultados dos Ensaios Especiais em Rejeitos em Pasta .....	63

### **CAPÍTULO 4- ESTUDO DE CASO – BARRAGEM DE CUIABÁ**

4.1 Introdução .....	67
4.2 Geração de Rejeitos na Planta de Queiroz.....	68
4.3 Concepção e Projeto da Barragem de Cuiabá.....	72
4.4 Análises da Estabilidade da Barragem de Cuiabá.....	77

### **CAPÍTULO 5- ESTUDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO**

5.1 Introdução .....	80
5.2 Procedimentos de Calibração do Modelo Numérico.....	81
5.3 Parâmetros e Premissas da Simulação Numérica.....	83
5.4 Curvas de Enchimento do Reservatório .....	84
5.4.1 Curvas de Enchimento e de Enchimento Nominal.....	85
5.4.2 Curvas de Enchimento Corrigidas.....	87
5.5 Simulações Numéricas do Enchimento do Reservatório.....	88
5.5.1 Enchimento Instantâneo do Reservatório .....	89
5.5.2 Enchimento Escalonado do Reservatório .....	90



5.5.2.1 Enchimento Escalonado com Curva Nominal Não Corrigida.....	90
5.5.2.2 Enchimento Escalonado com Curva Nominal Corrigida .....	93

## **CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS**

6.1 Introdução .....	105
6.2 Conclusões Principais.....	106
6.3 Sugestões para Pesquisas Complementares .....	109

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>110</b>
---	------------

<b>ANEXO.....</b>	<b>115</b>
-------------------	------------

## **LISTA DE TABELAS:**

### **CAPÍTULO 1**

Tabela 2.1 - Equações usadas na análise do ensaio CRD (Lee et al., 1994) .....	30
--	----

### **CAPÍTULO 2**

Tabela 2.2 - Tabela para entrada de dados (Yao e Znidarcic, 1997).....	48
--	----

### **CAPÍTULO 3**

Tabela 3.1- Índices físicos dos rejeitos estudados .....	54
Tabela 3.2 - Dados de entrada para o programa SICTA .....	62
Tabela 3.3 - Parâmetros de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos analisado	63
Tabela 3.4 – Classificação dos rejeitos de flotação da Planta do Queiroz (PCCE, 2004)	66

### **CAPÍTULO 4**

Tabela 4.1 – Produção anual de rejeitos da flotação do minério de ouro de Cuiabá .....	72
Tabela 4.2 - Parâmetros de resistência dos materiais da barragem (tensões efetivas)....	78

### **CAPÍTULO 5**

Tabela 5.1 - Resultados do experimento x simulação numérica (ensaio de proveta)....	82
Tabela 5.2 - Resultados do experimento x simulação numérica (ensaio HCT) .....	83
Tabela 5.3 - Parâmetros das simulações numéricas por estágio (enchimento escalonado)	91
Tabela 5.4 - Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida pela linearização da curva cotas x volumes .....	100

## **LISTA DE FIGURAS:**

### **CAPÍTULO 1**

Figura 1.1 Estágios de deposição de rejeitos em reservatórios (Imai, 1979 modificado).2

### **CAPÍTULO 2**

Figura 2.1 – Volume elementar sujeito a fluxo nas direções x, y e z.....9

Figura 2.2 - Coordenadas lagrangeanas e eulerianas: (a) configuração no tempo inicial; (b) configuração no tempo t..... 13

Figura 2.3 - Relação entre os sistemas de coordenadas lagrangeanas, eulerianas e reduzidas: (a) configuração inicial,  $t=0$  e (b) configuração no tempo t.. ..... 14

Figura 2.4 - Camada de argila saturada e homogênea para análise do adensamento (Xie and Leo, 2004, modificado). ..... 17

Figura 2.5 – Esquema geral de um equipamento de adensamento tipo CRD.....26

Figura 2.6 - Montagem geral do equipamento tipo CRD .....27

Figura 2.7 – Diagrama esquemático do equipamento para realização do ensaio de adensamento por percolação induzida.....34

Figura 2.8 – Diagrama esquemático do equipamento para realização do ensaio de permeabilidade saturada .....34

Figura 2.9 - Representação dos diferentes estágios de enchimento de um reservatório (Yao e Znidarcic, 1997).....48

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3.1- Amostrador utilizado para a retirada do material dos galões .....53

Figura 3.2- Amostragem dos galões, após a retirada do material via amostrador. ....53

Figura 3.3 - Amostra homogeneizada para a moldagem dos corpos de prova .....53

Figura 3.4 - Curvas granulométricas para os rejeitos ensaiados .....54

Figura 3.5 – Esquema convencional do Ensaio HCT com bomba de fluxo .....56

Figura 3.6 - Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação - Fase de Adensamento.....57

Figura 3.7- Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação  
– Ensaio de Permeabilidade.....57

Figura 3.8 - Resultados do Ensaio HCT para o rejeito em pasta	
– Fase de Adensamento.....	58
Figura 3.9 - Resultados do Ensaio HCT para o rejeito em pasta	
– Fase de Adensamento.....	58
Figura 3.10 – Esquema modificado do Ensaio HCT com bomba de fluxo.....	59
Figura 3.11 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de backfill	
– Fase de Adensamento.....	60
Figura 3.12 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de backfill	
– Fase de Permeabilidade.....	60
Figura 3.13 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação	
– Fase de Adensamento.....	61
Figura 3.14 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação	
– Fase de Permeabilidade.....	61
Figura 3.15 - Curvas de compressibilidade dos rejeitos ensaiados.....	64
Figura 3.16 - Curvas de permeabilidade dos rejeitos ensaiados .....	64
Figura 3.17 – Classificação dos rejeitos totais de flotação.....	65
Figura 3.18 – Classificação dos rejeitos do overflow de flotação .....	66

## **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1 – Localização Prevista para a Barragem de Cuiabá (Costa, 2006) .....	67
Figura 4.2 – Fluxograma da Planta Industrial do Queiroz (Costa, 2006).....	68
Figura 4.3 – Vista geral das barragens de Calcinados e de Rapaunha .....	70
Figura 4.4 – ‘Slump Test’ do overflow de flotação .....	71
Figura 4.5 – Microfotografia do underflow de flotação.....	71
Figura 4.6 - Alteamentos previstos para a Barragem de Cuiabá (CMEC, 2005).....	73
Figura 4.7 – Curva cotas x volumes para a Barragem de Cuiabá (CMEC, 2006) .....	73
Figura 4.8 – Sistema de drenagem interna da barragem para os três alteamentos.....	75
Figura 4.9 – Dique de contenção de sedimentos.....	75
Figura 4.10 – Locação e geometria do vertedor da barragem (CMEC, 2005) .....	75
Figura 4.11 – Sistema de drenagem superficial do talude de jusante .....	76
Figura 4.12 – Instrumentação da barragem (medidores de NA e medidor de vazão).....	77

Figura 4.13 – Posição da Linha Freática para as Análises de Estabilidade.....	78
Figura 4.14 – Análise da Estabilidade da Barragem de Cuiabá.....	79

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Experimento em proveta para avaliar os parâmetros de compressibilidade e de adensamento do rejeito: (a) enchimento instantâneo antes do adensamento; (b) após o adensamento.....	81
Figura 5.2 - Curva de compressibilidade do rejeito de flotação .....	83
Figura 5.3 - Curva de permeabilidade do rejeito de flotação .....	84
Figura 5.4 - Curva cotas x volumes da Barragem de Cuiabá .....	85
Figura 5.5 – Arranjo geral e alteamentos previstos para a Barragem de Cuiabá.....	86
Figura 5.6 - Curvas de enchimento e de enchimento nominal do reservatório .....	86
Figura 5.7- Variações das alturas do reservatório considerando enchimento instantâneo	89
Figura 5.8 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento com enchimento instantâneo	90
Figura 5.9 - Curvas de enchimento e enchimento nominal e curva de nível final dos rejeitos pós-adensamento (enchimento escalonado sem correção da curva nominal) ....	92
Figura 5.10 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento c/ enchimento escalonado	92
Figura 5.11 – Curva cotas x volumes com seções constantes .....	93
Figura 5.12 – Curva cotas x volumes com geometria qualquer.....	94
Figura 5.13 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida por intervalos de tempo .....	95
Figura 5.14 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida para os primeiros 4 intervalos de tempo (primeiros 4 anos da série analisada).....	96
Figura 5.15 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento para a curva nominal corrigida por intervalos de tempo .....	97
Figura 5.16 – Estágios de enchimento correspondentes à simulação numérica pela linearização da curva cotas x volumes.....	99
Figura 5.17 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida por subdivisão em trechos lineares.....	101
Figura 5.18 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida para os primeiros 5 trechos lineares (primeiro ano de enchimento) .....	102
Figura 5.19 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento para cada etapa	

(curva nominal corrigida pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares)	102
Figura 5.20 - Perfis dos teores de sólidos pós-adensamento para cada etapa	
(curva nominal corrigida pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares)	103
Figura 5.21 – Perfis das poropressões geradas pós-adensamento e para cada etapa	
(curva nominal corrigida pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares) .....	103

## **CAPÍTULO 6**

Figura 6.1 – Correlações entre projeto e simulações numéricas (três alteamentos) .....	108
Figura 6.2 – Alternativa de projeto pelas simulações numéricas (dois alteamentos) ...	108

## **LISTA DE SÍMBOLOS:**

A	área
A	parâmetro
a	parâmetro
a	área do piezômetro
$a_v$	coeficiente de compressibilidade
B	parâmetro
C	parâmetro
Cc	índice de compressão do solo
$c_v$	coeficiente de adensamento
D	parâmetro
E	parâmetro
e	índice de vazios
$e_i$	índice de vazios para o instante i
$e_{00}$	índice de vazios para tensão efetiva nula
F	parâmetro
$G_s$	densidade das partículas sólidas
g	aceleração da gravidade
H	altura
$H_f$	altura final da amostra
$H_o$	altura inicial
$H_s$	altura de sólidos
h	carga hidráulica total
$h_o$	carga total no topo
i	gradiente hidráulico
j	força de percolação
k	coeficiente de permeabilidade
$k_o$	coeficiente de permeabilidade inicial
$k_x$	coeficiente de permeabilidade na direção x

$k_y$	coeficiente de permeabilidade na direção y
$k_z$	coeficiente de permeabilidade na direção z
L	comprimento na direção do fluxo
LL	limite de liquidez
LP	limite de plasticidade
M	massa
$M_s$	massa de sólidos
$M_w$	massa de água
$M_x$	massa na direção x
$M_y$	massa na direção y
$M_z$	massa na direção z
m	parâmetro
N	parâmetro
n	porosidade
P	peso de sólidos
p	parâmetro
$p_{atm}$	pressão atmosférica
Q	volume de água que flui através do solo
q	vazão de fluxo
r	raio do tubo capilar
S	grau de saturação
S superfície específica	
$T_s$	tensão superficial
t	tempo
$t_i$	tempo inicial
$t_f$	tempo final
u	poropressão da água
$u_0$	poropressão estática da água
$u_a$	pressão de ar
$u_b$	poropressão na base
$u_w$	poropressão total da água



$V$	volume
$V_s$	volume de sólidos
$V_t$	volume total
$V_v$	volume de vazios
$V_w$	volume de água
$v$	velocidade de descarga ou superficial ou de percolação de Darcy
$v_s$	velocidade de fluxo dos sólidos
$v_z$	velocidade de fluxo aparente ou velocidade superficial de fluxo
$v_w$	velocidade absoluta de percolação da água
$\bar{v}_x$	componente da velocidade de fluxo na direção x
$\bar{v}_y$	componente da velocidade de fluxo na direção y
$\bar{v}_z$	componente da velocidade de fluxo na direção z
x, y e z sistema de coordenadas cartesianas	
$Z$	parâmetro
$z$	coordenada reduzida
$W_d$	peso seco
$w$	teor de umidade
$\alpha$	parâmetro
$\alpha_{\text{exp}}$	parâmetro ajustável para o modelo exponencial
$\alpha_{\text{vg}}$	parâmetro ajustável para o modelo de van Genuchten
$\Delta H$	altura do elemento de solo
$\Delta h$	perda de carga ao longo da amostra
$\Delta u$	poropressão gerada
$\Delta t$	intervalo de tempo
$\Delta \sigma$	variação de tensão total
$\epsilon$	deformação
$\gamma$	peso específico
$\gamma_d$	peso específico seco
$\gamma_s$	peso específico dos sólidos
$\gamma_w$	peso específico da água

$\gamma_t$	peso específico total
$\gamma'$	peso específico submerso
$\eta$	viscosidade
$\eta_T$	viscosidade na temperatura T°C
$\eta_w$	viscosidade dinâmica
$\xi$	sistema de coordenadas euleriano
$\psi$	carga de pressão
$\rho$	massa específica
$\rho_r$	massa específica relativa
$\rho_s$	massa específica dos sólidos
$\rho_w$	massa específica da água
$\sigma$	tensão total
$\sigma'$	tensão efetiva
$\sigma_b$	tensão total na base
$\sigma'_0$	tensão efetiva inicial
$\sigma'_b$	tensão efetiva na base
$\sigma'_t$	tensão efetiva de topo
$\sigma'_u$	tensão efetiva na face não-drenada

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 – Modelo Depositional de Rejeitos Finos**

As atividades de mineração, em desenvolvimento intenso e crescente, têm propiciado um aumento expressivo na geração de resíduos (estéreis e rejeitos). Este aumento vem ocasionando a necessidade de maiores áreas para estocagem e o desenvolvimento de sistemas de grande porte para a contenção destes resíduos. A exploração de ouro, por exemplo, demanda o beneficiamento de enormes volumes de materiais para obtenção de algumas poucas gramas do mineral. Em outra concepção, estes condicionantes críticos têm demandado a busca por técnicas alternativas de disposição, incluindo o desague prévio e a produção de rejeitos em pasta.

No Brasil, entretanto, a técnica comumente adotada para a contenção de rejeitos de mineração consiste na implantação de grandes estruturas na forma de barragens ou diques. Neste tipo de empreendimento, os rejeitos gerados na planta industrial, sob a forma de polpa, são transportados, lançados e adensados no reservatório da barragem. A análise do comportamento de rejeitos de mineração durante o processo de adensamento assume, portanto, papel fundamental como critério de projeto para a estimativa de capacidade de estocagem de um reservatório, determinação do tempo de enchimento e de adensamento final e também para a elaboração do planejamento a longo prazo dos processos de disposição.

A partir do lançamento dos rejeitos no reservatório, os mesmos são submetidos a fases distintas de floculação, sedimentação e adensamento (Figura 1.1), sendo as duas primeiras de ocorrência muito mais rápida que a última, principalmente para materiais de granulometria mais fina. Para os rejeitos em cuja granulometria predominam as frações silte e areia, as reduções de volume ocorrem em curto prazo, predominando a sedimentação sobre o adensamento.

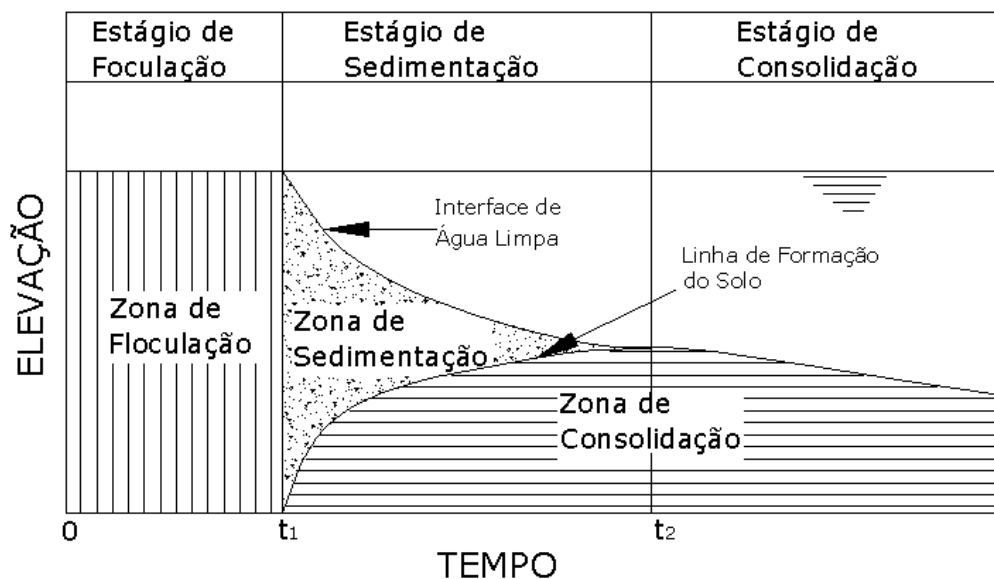


Figura 1.1 – Estágios de deposição de rejeitos em reservatórios (Imai, 1979 modificado)

As análises da capacidade de estocagem do reservatório, ao final e ao longo de sua vida útil, implicam, necessariamente, o conhecimento das variáveis específicas do balanço hídrico local e a caracterização do modelo de deposição da polpa. Para a formulação do modelo deposicional, torna-se fundamental conhecer a geometria do reservatório, o comportamento dos materiais associados ao estudo, os problemas geotécnicos relacionados ao processo de fluxo e as características do rejeito em termos de compressibilidade e de permeabilidade.

## 1.2 – Modelagem Numérica e Experimental do Problema

O modelo deposicional para materiais de maior granulometria pode ser interpretado por meio das teorias clássicas de adensamento, baseando-se nos resultados obtidos em ensaios convencionais de laboratório ou campo. Entretanto, para materiais de granulometria fina, onde o processo de deposição não é governado pela lei de Stokes nem pelos princípios da teoria clássica de Terzaghi, torna-se necessária a utilização de algumas metodologias especiais. Uma vez que tais materiais são lançados com elevados índices de vazios, sendo submetidos a grandes deformações, as análises do adensamento

devem ser implementadas através de teorias de deformações finitas (Mikasa, 1963; Gibson et al., 1967).

Segundo Pane (1981), a teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi constitui uma representação unidimensional de um fenômeno tridimensional, que se baseia na ocorrência de deformações infinitesimais (pequena deformação da camada em relação a sua espessura), na validade da Lei de Darcy (proporcionalidade entre velocidade de fluxo e gradiente hidráulico), na hipótese de fluxo unidimensional (válida quando a espessura da camada em processo de adensamento é muito inferior à sua extensão), na hipótese de que os coeficientes de permeabilidade e compressibilidade permanecem constantes durante o adensamento e na linearidade entre a variação das tensões e as variações volumétricas.

Esta teoria tem mostrado algumas discrepâncias significativas entre a previsão e a observação experimental devido as hipóteses simplificadoras, as quais são apenas, aproximadamente, satisfeitas na prática (Schiffman *et al.*, 1984). Além disso, a teoria clássica de Terzaghi não é adequada para a previsão do comportamento de solos finos de alta compressibilidade, tais como: rejeitos finos de mineração e materiais dragados, dos quais são esperadas grandes deformações em relação à espessura inicial da camada em análise (Carrier III *et al.*, 1983).

É necessário destacar que as teorias de adensamento podem ser divididas em duas categorias: as teorias de deformação infinitesimal e as teorias de deformação finita, conforme explicado em detalhes em Schiffman (1980). Ambas as categorias podem envolver propriedades lineares e não lineares do solo e as relações tensão-deformação são independentes ou intrinsecamente dependentes do tempo.

Do ponto de vista físico, a teoria das deformações finitas difere da teoria de deformação infinitesimal, pois esta última assume que a espessura da camada em adensamento permanece constante por todo o processo, isto é, a deformação da camada para qualquer tempo, durante o processo, é insignificante quando comparado à espessura inicial da camada. Por outro lado, a teoria de deformação finita introduz a espessura da camada

como uma variável do próprio problema, ou seja, a deformação da camada, para um determinado tempo durante o processo, é significativa quando comparada com sua espessura inicial.

A análise de materiais com granulometria fina de alta compressibilidade, onde o peso próprio tem efeito importante na magnitude das deformações que atingem valores consideráveis, levou ao desenvolvimento de teorias de adensamento com deformações finitesimais, distintas e complementares à teoria de adensamento convencional.

O estudo das condições específicas da teoria de adensamento a grandes deformações, como também é chamada a teoria de adensamento com deformações finitas, tomou impulso nas últimas décadas através das formulações propostas nos trabalhos de Mikasa (1963) e de Gibson et al. (1967). A teoria do adensamento a grandes deformações de Gibson *et al.* (1967) descreve de forma adequada a magnitude e a evolução das deformações e dos recalques de materiais de granulometria fina e altamente compressíveis.

O estudo do comportamento de materiais finos de elevada compressibilidade, no processo de adensamento, deve estar baseado não só em uma teoria adequada capaz de descrever este comportamento, como também em métodos e técnicas de ensaio apropriadas para a determinação das relações constitutivas envolvidas neste fenômeno: índice de vazios x tensão efetiva e índice de vazios x permeabilidade.

Os métodos para a determinação dessas propriedades podem ser divididos em dois grupos: os métodos diretos e os métodos indiretos. Nos métodos diretos, essas propriedades podem ser medidas diretamente nos ensaios. Nos métodos indiretos, requer-se um modelo matemático capaz de utilizar os dados do ensaio para determinar as propriedades de adensamento, ou seja, as propriedades do material são retro-calculadas dos dados medidos nos ensaios, o que é denominado de solução inversa.

Dessa forma, foram desenvolvidos diferentes ensaios objetivando a determinação das leis constitutivas de solos finos de elevada compressibilidade que permitam a

modelagem de seu processo de deposição. Dentre estas novas metodologias, podem ser citados os ensaios edométricos do tipo CRD (Ensaio de Adensamento com Taxa de Deformação constante) e ensaios hidráulicos tipo HCT (Ensaio de Adensamento Hidráulico), ensaios de laboratório, e as sondagens piezométricas (ensaios de campo), com posterior amostragem de lama através de amostradores especiais diretamente dos reservatórios de rejeitos.

### **1.3 – Justificativa e Objetivos do Trabalho**

Com a mobilização bastante intensa dos sistemas atuais de disposição de rejeitos de ouro gerados na Planta Industrial do Queiroz, localizada no município de Raposos/MG, conjugada com os planos de expansão desta usina de tratamento para atender aumentos substanciais da produção, a empresa *Anglo Gold Ashanti* (antiga Morro Velho) investiu na proposta de implantação de um novo sistema de contenção de rejeitos.

Em função da complexidade da planta de tratamento, os rejeitos gerados possuem naturezas e características diversas e a empresa buscou alternativas de disposição destes rejeitos sob a forma de polpa e em pasta, priorizando os estudos em relação aos chamados rejeitos de flotação. Assim, formulou-se inicialmente um contexto geral de caracterização tecnológica destes diferentes materiais, visando subsidiar as alternativas e fornecer os parâmetros a serem adotados em projeto, particularmente em termos da obtenção das relações constitutivas das compressibilidades e permeabilidades dos mesmos, utilizando-se as técnicas experimentais em laboratório baseadas em ensaios de adensamento com fluxo induzido (ensaios HCT com bomba de fluxo).

Os estudos realizados, além dos condicionantes específicos das alternativas avaliadas, invalidaram a proposição dos rejeitos sob a forma de pasta, sendo definido um modelo deposicional de rejeitos totais (sem ciclonagem) da flotação, em forma de polpa, no reservatório de uma barragem a ser implantada nas vizinhanças imediatas da Planta do Queiroz e designada como Barragem de Cuiabá.

A Barragem de Cuiabá constitui uma barragem convencional, projetada e construída em

aterro de solo compactado em múltiplas camadas (CMEC, 2005). O projeto contempla metodologia construtiva por jusante, com três etapas de alteamentos, previstos para capacidades de armazenamento dos rejeitos para 4, 5 e 3 anos, respectivamente. Com base no projeto original e nas leis constitutivas dos rejeitos de flotação estudados, foram implementadas, neste trabalho, simulações numéricas para a estimativa do processo de enchimento e da vida útil do reservatório.

Estas simulações foram desenvolvidas por meio do Programa CONDES0, desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997), que consiste em um algoritmo numérico para análise de adensamento unidimensional a grandes deformações, fornecendo a solução de uma equação de diferenças parciais de segunda ordem não linear. O programa permite, ainda, a obtenção de soluções unidimensionais transientes, perfis da distribuição dos índices de vazios, espessuras das camadas de rejeitos adensados e, adicionalmente, efeitos de ressecamento e dos mecanismos de propagação de trincas.

#### **1.4 – Estrutura da Dissertação**

O trabalho foi subdividido em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral ao assunto estudado, apresentando o tema, a justificativa e os objetivos do trabalho, além desta estruturação em capítulos. Nesta introdução, faz-se ainda uma abordagem do problema geral, enfocando o modelo deposicional de rejeitos finos em reservatórios de barragens de contenção e os princípios da modelagem numérica e experimental do problema.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das metodologias básicas para a modelagem numérica e experimental do processo deposicional de rejeitos finos em reservatórios, caracterizando os princípios da chamada teoria do adensamento a grandes deformações, os modelos numéricos de análise e os estudos experimentais associados. O capítulo apresenta também as bases e a formulação do Programa CONDES0 utilizado nas simulações numéricas.

O terceiro capítulo apresenta os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica



realizados para os rejeitos de flotação de ouro da Planta do Queiroz da AngloGold Ashanti, sob a forma de polpa e em pasta. Os ensaios de caracterização englobaram a determinação dos teores de umidade, pesos específicos dos sólidos, limites de consistência e as respectivas curvas granulométricas. Além dos ensaios de caracterização, o programa experimental compreendeu especificamente a determinação das características de compressibilidade e de permeabilidade destes rejeitos, por meio de ensaios HCT com bomba de fluxo.

No quarto capítulo, apresenta-se o estudo de caso, descrevendo-se em detalhes o projeto e a concepção da Barragem de Cuiabá, atualmente em fase de construção e com início de operação previsto para 2007.

O quinto capítulo sistematiza os resultados das simulações numéricas implementadas para o estudo do enchimento do reservatório da Barragem de Cuiabá, considerando diversos tipos de análise: enchimento instantâneo, enchimento escalonado, enchimento com e sem correções da curva cotas x volumes original.

O sexto capítulo apresenta uma contextualização geral do trabalho, as principais conclusões obtidas a partir dos resultados experimentais e das simulações numéricas, além de algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros e complementares ao tema pesquisado.

## **CAPÍTULO 2**

### **MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FINOS**

#### **2.1 – Introdução**

Em geral, os rejeitos no Brasil são convencionalmente dispostos sob a forma de polpa, principalmente porque esta condição do resíduo constitui o subproduto natural das atividades de concentração dos minérios, sempre associadas a grandes demandas de água. Neste caso, o transporte dos rejeitos é feito comumente por gravidade, através de canaletas ou por tubulações (mangotes), sendo os rejeitos lançados diretamente em direção ao reservatório de uma estrutura de contenção.

As análises da capacidade de estocagem do reservatório, ao final e ao longo de sua vida útil, implicam, necessariamente, o conhecimento das variáveis específicas do balanço hídrico local e a caracterização do modelo de deposição da polpa. O estudo do comportamento de rejeitos finos de elevada compressibilidade no processo de adensamento deve estar baseado não só em uma teoria adequada capaz de descrever este comportamento, como também em métodos e técnicas de ensaio apropriadas para a determinação das relações constitutivas envolvidas neste fenômeno: índice de vazios x tensão efetiva e índice de vazios x permeabilidade (Gomes, 2005).

Uma vez que tais materiais são lançados com elevados índices de vazios, sendo submetidos a grandes deformações, as análises do adensamento devem ser implementadas através de teorias de deformações finitas (Mikasa, 1963; Gibson et al., 1967), com base nas leis constitutivas de compressibilidade e permeabilidade destes materiais. Estas leis constitutivas são obtidas por técnicas especiais, como os ensaios edométricos do tipo CRD e ensaios HCT com bomba de fluxo, em laboratório. No presente capítulo, são expostos os fundamentos da modelagem numérica e experimental da deposição de rejeitos finos em reservatórios.

## 2.2 – Formulação da Equação Geral de Fluxo

O processo de fluxo em solos é um processo físico descrito matematicamente pela equação diferencial parcial, deduzida através da equação da continuidade, que descreve a conservação da massa de fluido, durante o fluxo, no meio poroso. Para a dedução dessa equação, considere-se um cubo elementar que representa um volume unitário do meio poroso, sendo submetido a um fluxo nas direções x, y e z (Figura 2.1).

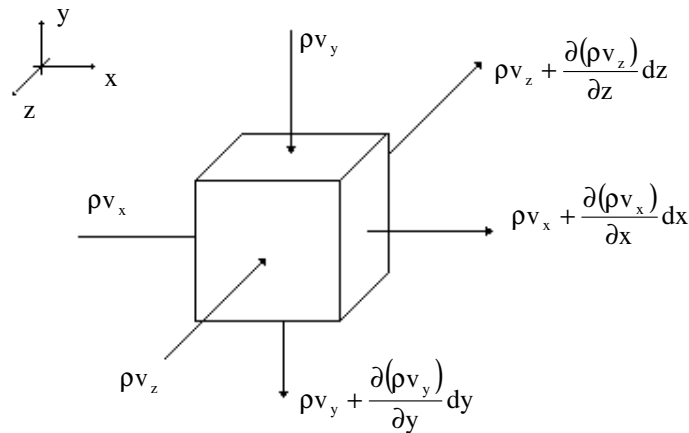


Figura 2.1 – Volume elementar sujeito a fluxo nas direções x, y e z.

Efetuada-se o balanço de massas para a direção x, tem-se que as taxas de fluxo de massa, de entrada e de saída, através do volume elementar, podem ser expressas por:

$$\text{Entrada} = \rho \cdot v_x \cdot dydz \quad (2.1)$$

$$\text{Saída} = \left[ \rho v_x + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx \right] dydz \quad (2.2)$$

Logo, a taxa de fluxo de massa resultante na direção x é dada pela equação:

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = \left( \frac{\partial M_x}{\partial t} \right)_{\text{Saída}} - \left( \frac{\partial M_x}{\partial t} \right)_{\text{Entrada}} \quad (2.3)$$

Levando-se as equações (2.1) e (2.2) na equação (2.3), obtém-se:

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz \quad (2.4)$$

Analogamente, obtém-se para as direções y e z:

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial M_z}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz \quad (2.6)$$

Pelo princípio da conservação da massa, sabendo-se que  $\partial M/\partial t$  é o termo de armazenamento, pode-se dizer que:

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial M_y}{\partial t} + \frac{\partial M_z}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.7)$$

Levando-se as equações (2.4), (2.5) e (2.6) na equação (2.7), tem-se, então, a equação geral de fluxo:

$$\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] dx dy dz = d\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right) \quad (2.8)$$

A equação (2.8) relaciona o balanço de massa no campo tridimensional xyz com o termo de armazenamento (segundo termo da igualdade). Particularizando o problema, tomando-se o fluido como sendo a água e o meio como sendo um solo, ou seja, um meio poroso. Assim, pode-se dizer que:

$$M_w = \rho_w \cdot V_w \quad (2.9)$$

sendo:

$M_w$  : massa de água;

$\rho_w$  : massa específica da água;

$V_w$  : volume de água.

Multiplicando-se e dividindo-se o segundo termo da equação anterior por  $V_v$  (volume de vazios) e  $V$  (volume total) e sabendo-se que  $V = dx \cdot dy \cdot dz$ ,  $S = V_w/V_v$  e  $n = V_v/V$ , tem-se que:

$$M_w = \rho_w \cdot \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V} dx dy dz = \rho_w \cdot S \cdot n \cdot dx dy dz \quad (2.10)$$

O termo de armazenamento pode ser expresso em termos da porosidade do solo ( $n$ ) e do grau de saturação ( $S$ ). Logo, levando-se a equação (2.10) na equação (2.9), obtém-se a equação geral de fluxo em um meio poroso:

$$\frac{\partial(\rho_w v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_z)}{\partial z} = n \cdot S \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \rho_w \cdot S \cdot \frac{\partial n}{\partial t} + \rho_w \cdot n \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.11)$$

Na equação geral do processo de fluxo em solos considerando condições isotérmicas e grau de saturação constante, as derivadas de  $\rho_w$  e  $S$  na equação anterior são nulas. Assim, a equação que rege o adensamento será expressa por:

$$\frac{\partial(\rho_w v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_z)}{\partial z} = \rho_w \cdot S \cdot \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.12)$$

Esta é a equação geral para a análise de adensamento a grandes deformações. Considerando que o fluido é incompressível ( $\rho_w$  constante), que é válida a Lei de Darcy ( $v = k \, dh/dl$  onde  $v$  é a velocidade de fluxo,  $k$  é a permeabilidade e  $dh/dl$  é o gradiente hidráulico) e que o material está saturado, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.13)$$

A equação (2.13) é a equação que descreve, de forma mais convencional, o processo de fluxo em solos relacionado ao adensamento. Uma revisão das teorias de sedimentação e de adensamento acopladas é apresentada por Schiffman *et al.* (1988). A seguir, será apresentada a teoria do adensamento a grandes deformações e a dedução de sua equação governadora.

### 2.3 – Teoria do Adensamento Unidimensional a Grandes Deformações

O estudo das condições específicas da teoria de adensamento a grandes deformações, como também é chamada a teoria de adensamento com deformações finitas, tomou impulso nas últimas décadas, através das formulações propostas nos trabalhos de Mikasa (1963) e de Gibson *et al.* (1967).

A teoria do adensamento a grandes deformações de Gibson *et al.* (1967) descreve de forma adequada a magnitude e o progresso do recalque de materiais de granulometria fina altamente compressíveis. Essa teoria é a mais indicada para o estudo do adensamento destes materiais e é baseada nas seguintes suposições, de acordo com Schiffman *et al.* (1984):

- meio saturado e consistindo de três componentes: as partículas de solo, o esqueleto de solo formado por elas e os vazios preenchidos com água;
- completa interação entre o esqueleto de solo e os vazios preenchidos por água, ou seja, o princípio da tensão efetiva é válido;
- o fluido é Newtoniano;
- a Lei de Darcy governa o escoamento do fluido através do esqueleto de solo e é expressa em termos da velocidade relativa entre a água intersticial e as partículas sólidas;
- assume-se que as partículas de solo e a água que preenche os vazios são incompressíveis;
- as massas das porções sólidas e fluidas do sistema são conservadas separadamente, o que requer a não existência de interações químicas entre os constituintes.

Segundo Pane (1981), a formulação de Gibson *et al.* (1967) para o adensamento considera a não linearidade geométrica e a não linearidade física do problema, sendo a formulação mais geral no âmbito das teorias unidimensionais. A teoria de Terzaghi é, portanto, um caso particular da teoria com grandes deformações. Um aspecto importante na formulação da equação da teoria do adensamento a grandes deformações de Gibson *et al.* (1967) é o sistema de coordenadas (Xie and Leo, 2004).

A Figura 2.2 mostra uma camada de argila de espessura inicial  $H$  sujeita a grandes deformações, na qual estão relacionados os sistemas de coordenadas lagrangeano e euleriano. A coordenada lagrangeana  $a$  e a euleriana  $\xi$  são orientadas no sentido da gravidade. A coordenada euleriana  $\xi$  tem sua origem no topo da camada, o qual é tomado como plano de referência.

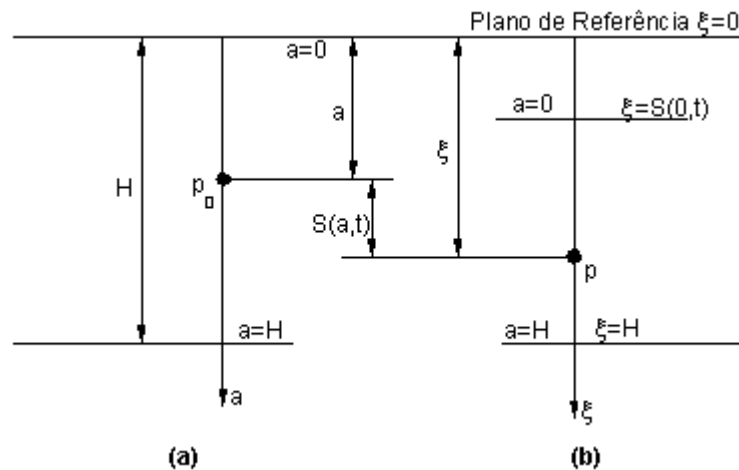


Figura 2.2 - Coordenadas lagrangeanas e eulerianas: (a) configuração no tempo inicial e (b) configuração no tempo t.

A coordenada lagrangeana  $a$  e o tempo  $t$  são variáveis independentes, enquanto a coordenada euleriana  $\xi$  é uma variável dependente de  $a$  e  $t$ , ou seja,  $\xi = \xi(a, t)$ . A relação entre  $a$  e  $\xi$  é dada por:

$$\frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{1+e}{1+e_0} \quad (2.14)$$

sendo:

$e = e(a, t)$  o índice de vazios da camada;

$e_0 = e(a, 0)$  o índice de vazios inicial da camada;

$\xi$  e  $a$  : coordenadas euleriana e lagrangeana, respectivamente, e;

$S$ : recalque dado por  $S(a, t) = \xi - a$ .

Desta forma, num tempo  $t$ , a superfície do topo (contorno superior) e da base (contorno inferior) da camada de argila podem ser referenciadas por meio das coordenadas lagrangeanas ( $a = 0$  e  $a = H$ ) ou eulerianas [ $\xi = S(0, t)$ ] e  $\xi = H$ . Um outro sistema de coordenada, também muito usado, é o sistema de coordenada reduzidas ou do material. Neste sistema, a coordenada  $z$  de uma partícula é definida como sendo o volume de partículas sólidas contidas entre um plano de referência, geralmente a base da camada, e o ponto de coordenada lagrangeana a ser analisado (Botelho, 2001).

O volume de partículas sólidas  $z$  é definido como:

$$z(a) = \int_0^a [1 - n(a,0)] da \quad (2.15)$$

onde  $n(a,0)$  representa a distribuição das porosidades.

Este sistema de coordenadas  $z$  também independe do tempo. Neste sistema, um ponto da camada fica definido através do volume de sólidos entre este ponto e o plano de referência e esse volume será constante durante o processo de adensamento, pois as partículas sólidas são assumidas incompressíveis.

A figura 2.3 mostra a relação entre os sistemas de coordenadas, através de um elemento de solo formado pelo volume unitário de sólidos e pelo volume de vazios, igual ao índice de vazios inicial ( $e_0$ ) nos tempos inicial e  $t$ .

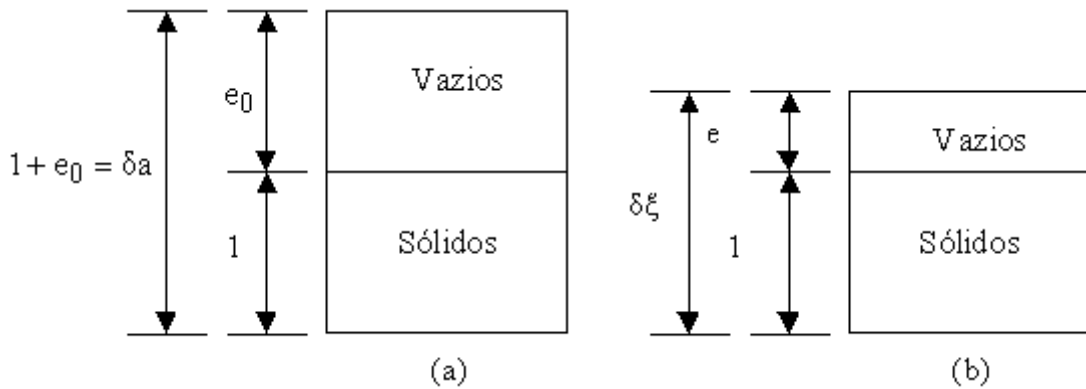


Figura 2.3 - Relação entre os sistemas de coordenadas lagrangeanas, eulerianas e reduzidas: (a) configuração inicial,  $t=0$  e (b) configuração no tempo  $t$ .

Desta forma, a relação entre os sistemas de coordenadas reduzido e lagrangeano pode ser expressa por:

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{1}{1 + e_0} \quad (2.16)$$

A relação entre o sistema de coordenada reduzido e euleriano pode ser estabelecido através das relações 2.14 e 2.16, tal que:

$$\frac{\partial z}{\partial \xi} = \frac{1}{1 + e} \quad (2.17)$$



## 2.4 – Equação Diferencial do Adensamento a Grandes Deformações

Admitindo-se que o fluido e as partículas sólidas são incompressíveis, estabelece-se, a seguir, a equação do adensamento unidimensional a grandes deformações, de uma camada de argila saturada, no sistema de coordenadas eulerianas (Xie and Leo, 2004).

i) equação para o equilíbrio da massa sólida:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \xi} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e}, \quad (2.18)$$

sendo:

$\sigma$ : tensão total;  $G_s$  : densidade das partículas sólidas e  $\gamma_w$  : peso específico da água.

ii) equação de equilíbrio do fluido:

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} = \frac{\partial u}{\partial \xi} + \gamma_w, \quad (2.19)$$

sendo:

$p$  : poropressão total e  $u$ : excesso de poropressão.

iii) princípio das tensões efetivas ( $\sigma = \sigma' + p$ ), sendo  $\sigma'$  a tensão efetiva.

iv) lei de Darcy:

$$\frac{e}{1 + e}(v_w - v_s) = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial \xi} \quad (2.20)$$

sendo:

$v_w$  e  $v_s$  : velocidades relativas da água nos poros e das partículas sólidas para o plano de referência, respectivamente e  $k$  : coeficiente de permeabilidade do material.

v) equação para continuidade do fluxo da água nos poros:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{e}{1 + e}(v_w - v_s) \right] = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.21)$$

Da combinação entre as relações 2.20 e 2.21, obtém-se a equação diferencial do

densamento a grandes deformações, em coordenadas eulerianas:

$$\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( k \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.22)$$

A equação geral do adensamento no sistema de coordenadas lagrangeanas é obtida através da combinação da equação 2.14 e das equações de 2.18 a 2.22, dando:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial a} = \frac{(Gs+e)\gamma_w}{1+e_0} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial p}{\partial a} = \frac{\partial u}{\partial a} + \frac{(1+e)}{(1+e_0)} \gamma_w \quad (2.24)$$

$$v_w - v_s = \frac{k(1+e_0)}{\gamma_w \cdot e} \frac{\partial u}{\partial a} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{e}{1+e} (v_w - v_s) \right] = \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{\gamma_w} \frac{1}{\partial a} \left[ \frac{1+e_0}{1+e} k \frac{\partial u}{\partial a} \right] = \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.27)$$

A equação geral do adensamento, no sistema de coordenadas reduzido, analogamente, é obtida através da combinação da equação 2.17 e das equações 2.18 a 2.22, tal que:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z(1+e)} = \frac{1}{1+e} (Gs+e) \cdot \gamma_w \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w (1+e) \quad (2.29)$$

$$v_w - v_s = - \frac{k}{\gamma_w \cdot e} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{e}{1+e} (v_w - v_s) \right] = - \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{(1+e)\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.32)$$

Consideremos uma camada de argila homogênea e saturada, submetida à ação de uma sobrecarga  $q_p$ , aplicada no seu topo (Figura 2.4). O nível da água acima do topo da

camada é  $H_w$ . O adensamento tem início quando um incremento de carga  $q = q(t)$ , distribuída uniformemente, é aplicada no topo da camada de argila.

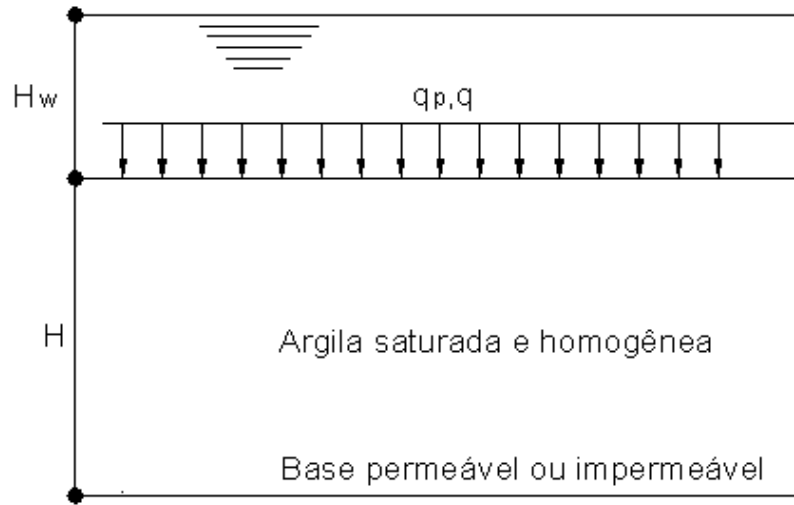


Figura 2.4 - Camada de argila saturada e homogênea para análise do adensamento (Xie and Leo, 2004, modificado).

As relações entre a carga total  $\sigma$ , a poropressão  $p$ , a tensão efetiva  $\sigma'$  e o recalque  $S$  podem ser estabelecidos da seguinte forma:

i) tensão total:

a tensão total  $\sigma$  é dada pela integração da equação 2.23, tal que:

$$\sigma = \sigma(a, t) = \sigma(0, t) + \int_0^a \left( \frac{Gs + e}{(1 + e_0)} \gamma_w \right) da \quad (2.33)$$

sendo:

$\sigma(0, t)$ : tensão total no topo da superfície ( $a=0$ ), dada por:

$$\sigma(0, t) = q_p + q + \gamma_w [H_w + S(0, t)] \quad (2.34)$$

ii) poropressão total:

Da equação 2.24, resulta que a poropressão total é:

$$p = p(a, t) = u + p_w \quad (2.35)$$

sendo  $u = u(a, t)$ : excesso de poropressão e  $p_w$  a poropressão estática dada por:

$$p_w = p_w(a, t) = \gamma_w [H_w + S(0, t)] + \int_0^a \frac{(1 + e) \gamma_w}{(1 + e_0)} da = \gamma_w [H_w + a + S(a, t)] \quad (2.36)$$

iii) tensão efetiva:

Combinando-se as equações 2.19, 2.33, 2.34, 2.35 e 2.36, obtém-se a tensão efetiva por:

$$\sigma' = \sigma'(a, t) = \sigma - p = \sigma'_0 + q - u \quad (2.37)$$

onde, das relações 2.33 e 2.34, a tensão efetiva inicial ( $\sigma'_0$ ) é dada por:

$$\sigma'_0 = \sigma'(a, 0) = q_p + \gamma_w (Gs - 1) \int_0^a \frac{1}{(1 + e_0)} da \quad (2.38)$$

O último termo do segundo membro da equação 2.38 corresponde a tensão efetiva devido ao peso próprio da camada e o primeiro representa os efeitos da sobrecarga.

iv) recalque

O recalque é obtido da equação  $S(a, t) = \xi - a$ , tal que:

$$ds = d\xi - da = \left( \frac{d\xi}{da} - 1 \right) da \quad (2.39)$$

Substituindo-se a equação 2.13 na equação 2.39 e integrando, obtém-se o recalque por:

$$S = S(a, t) = \int_a^H \frac{(e_0 + e)}{(1 + e_0)} da \quad (2.40)$$

sendo  $S=0$  quando  $a = H$ . A tensão total pode ser representada pelas equações 2.35 a 2.39, de forma que:

$$\sigma = \sigma' + p = \sigma'_0 + q + \gamma_w [H_w + a + S(a, t)] \quad (2.41)$$

As relações vistas anteriores são, geralmente, aplicadas para qualquer camada homogênea e saturada de argila até mesmo nos casos onde o esqueleto sólido exhibe efeito intrínseco no tempo (*creep*), ou seja, compressão secundária. Porém, para o desenvolvimento da solução analítica, na hipótese do esqueleto sólido não apresentar compressão secundária, a permeabilidade e a tensão efetiva podem ser relacionadas diretamente com o índice de vazios, tal que  $k=k(e)$  e  $\sigma'=\sigma'(e)$ .

Então, da equação 2.38, resulta que:

$$\frac{\partial u}{\partial a} = \frac{\partial \sigma'}{\partial a} - \frac{\partial \sigma_0'}{\partial a} = \frac{\gamma_w (Gs - 1)}{(1 + e_0)} - \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \quad (2.42)$$

A equação governadora do adensamento em coordenadas lagrangeanas pode, agora, ser finalmente obtida pela substituição da equação 2.42 na equação geral 2.27, ou seja:

$$(Gs - 1) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1 + e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial a} \left[ - \frac{k(1 + e_0)}{(1 + e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] = \frac{1}{(1 + e_0)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.43)$$

Para a obtenção da equação governadora do adensamento em coordenadas do material, basta substituir a equação 2.15 na 2.43, a qual resulta em:

$$(Gs - 1) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1 + e)} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left[ - \frac{k}{(1 + e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.44)$$

Analogamente, para obter a equação governadora do adensamento em coordenadas eulerianas, basta substituir a equação 2.16 na 2.44, ou seja:

$$(Gs - 1) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1 + e)} \right] \frac{\partial e}{\partial \xi} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial \xi} \right] = \frac{1}{(1 + e)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.45)$$

## 2.5 – Modelos Constitutivos Unidimensionais

As características de compressibilidade e de permeabilidade dos materiais são expressas comumente pelas relações constitutivas índice de vazios x tensão efetiva e índice de vazios x permeabilidade. Estas relações devem, portanto, ser modeladas por meio de funções matemáticas que melhor representem os resultados obtidos experimentalmente.

A seguir são descritos alguns dos principais modelos de compressibilidade propostos na literatura:

### (i) Modelo linear-logarítmico

O modelo linear-logarítmico apresenta a expressão mais simples para a compressibilidade, na qual se admite que o coeficiente de compressibilidade é

constante. A equação deste modelo é descrita por:

$$e = e_0 - C_c \log \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (2.46)$$

sendo:

$e_0$  : índice de vazios inicial;

$\sigma'_0$ : tensão efetiva inicial;

$C_c$ : coeficiente de compressibilidade do solo.

Este modelo apresenta como vantagem a facilidade e simplicidade em expressar o decréscimo da compressibilidade com o acréscimo da tensão efetiva. Algumas limitações deste modelo são: índice de vazios infinito para tensão efetiva nula, do índice de vazios negativos para tensões efetivas elevadas e impossibilidade de modelagem do comportamento de materiais de granulometria fina que exibem uma relação não-linear entre o índice de vazios e o logaritmo da tensão efetiva.

(ii) Modelo de Koppula e Morgenstern (1982)

Este modelo foi inicialmente proposto por Janbu (1963), na seguinte forma:

$$\frac{de}{d\sigma'} = \left( \frac{de}{d\sigma'} \right)_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^p \quad (2.47)$$

que pode ser integrado para se obter que:

$$e = \left( \frac{de}{d\sigma'} \right)_0 \frac{1}{(\sigma'_0)^p} \frac{(\sigma')^{p+1}}{(p+1)} + C \quad (2.48)$$

sendo:

$p$  : constante do material;

$C$  : constante de integração.

O primeiro termo à direita da equação representa uma função potencial em termos de tensão efetiva, que tem sido usada, atualmente, de várias formas em modelos constitutivos.

(iii) Modelo de Monte e Krizek (1976)

É baseado na seguinte função potencial:

$$\sigma' = D(\varepsilon)^N \quad (2.49)$$

sendo:

$$\varepsilon = \frac{(e'_0 - e)}{(1 + e'_0)} \quad (2.50)$$

onde:

D, N: constantes;

$\varepsilon$  : deformação relacionada à variação do índice de vazios;

$e'_0$  : índice de vazios no limite de fluidez.

O limite de fluidez é definido como sendo o teor de umidade correspondente ao instante em que as partículas sólidas, sedimentadas a partir de uma suspensão, iniciam a interação entre elas; neste instante, a resistência ao cisalhamento da mistura é nula.

#### (iv) Modelo de Butterfield (1979)

Este modelo surgiu da revisão de dados publicados sobre características de adensamento unidimensional para vários solos. Os solos podem ser modelados com grande eficiência, através de duas linhas retas em um gráfico do logaritmo do índice de vazios com o logaritmo da tensão efetiva. A relação funcional tem a forma:

$$\ln\left(\frac{1+e}{1+e_0}\right) = -C_c \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad (2.51)$$

sendo  $C_c$  : inclinação do trecho correspondente a região normalmente adensada da curva; esta constante deve ser substituída por  $C_s$  para a região sobreadensada da curva.

A função proposta também pode ser escrita como:

$$e = (1 + e_0) \cdot \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right)^{-C_c} - 1 \quad (2.52)$$

#### (v) Modelo de Somogyi (1979)

A função potência proposta por Somogyi (1979) é expressa da seguinte forma:

$$e = A \cdot \sigma'^B \quad (2.53)$$

sendo A, B constantes do modelo.

(vi) Modelo de Carrier III et al. (1983)

A função potência proposta tem a forma:

$$e = \alpha \cdot \left( \frac{\sigma'}{p_{\text{atm}}} \right)^{\beta} + \varepsilon \quad (2.54)$$

sendo:  $p_{\text{atm}}$ : pressão atmosférica e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  são coeficientes empíricos.

(vii) Modelo de Gibson *et al.* (1981) e Cargill (1984)

A função exponencial proposta para modelar o adensamento unidimensional de materiais de granulometria fina tem a forma:

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma') + e_{\infty} \quad (2.55)$$

sendo:  $e_{00}$ : índice de vazios correspondente à tensão efetiva zero;  $e_{\infty}$ : índice de vazios correspondente à tensão efetiva infinita e  $\lambda$  : constante do material.

Segundo Liu (1990), essa função não apresenta as limitações dos outros modelos e é adequada na modelagem do comportamento de materiais de granulometria fina, principalmente para a faixa de baixas tensões efetivas.

(viii) Modelo de Hardin (1989)

Este modelo é proposto para solos coesivos, normalmente adensados, submetidos a um estado de deformação unidimensional e apresenta a seguinte forma:

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{e_i} + \frac{1}{S_{1-D}} \left( \frac{\sigma'}{p_{\text{atm}}} \right)^p \quad (2.56)$$

sendo:  $1/e_i$  : intercepto para  $\sigma'$  igual a zero;  $p$  parâmetro do material e  $S_{1-D}$  : coeficiente de rigidez adimensional para a deformação unidimensional.

Observa-se que o índice de vazios é bem definido para tensão efetiva zero. Além disso, uma vez que  $p$  é sempre positivo, o índice de vazios é positivo independentemente da magnitude da tensão efetiva.

(ix) Modelo de Liu (1990)

Este modelo foi obtido pela expansão da função potencial apresentada por Somogyi



(1979) adicionando uma constante  $Z$  de forma a se evitar o problema da obtenção de um índice de vazios infinito para tensão efetiva nula. Este modelo contorna as deficiências relacionadas anteriormente, além de representar a compressibilidade de ambos os materiais, normalmente adensados e sobreadensados. O modelo apresenta a seguinte forma:

$$e = A \cdot (\sigma' + Z)^B \quad (2.57)$$

sendo  $A$ ,  $B$ ,  $Z$  parâmetros do modelo.

O modelo proposto por Liu (1990) tem se mostrado bastante apropriado para modelar a relação tensão efetiva x índice de vazios (Al-Tabbaa e Wood, 1987; Aiban e Znidarcic, 1990; Abu-Hejleh e Znidarcic, 1992). Através desse modelo, o índice de vazios fica bem definido para a tensão efetiva nula, independentemente da magnitude da tensão.

A seguir são descritos alguns dos principais modelos de permeabilidade para análises de adensamento:

(i) Modelo linear-logarítmico

O modelo linear logarítmico, utilizado para modelar a relação índice de vazios x permeabilidade, apresenta a seguinte forma:

$$e = e_0 + C_k \log_{10} \left( \frac{k}{k_0} \right) \quad (2.58)$$

sendo  $C_k$  : constante para um dado solo e  $k_0$  : coeficiente de permeabilidade inicial.

(ii) Modelo de Kozeny-Carman (1956)

Este modelo apresenta a seguinte forma:

$$k = C \frac{e^3}{(1+e)} \quad (2.59)$$

onde  $C$  é função do peso específico e da viscosidade do fluido, do fator de forma dos poros, da superfície específica por unidade de volume das partículas sólidas e da tortuosidade do caminho de fluxo.

(iii) Modelo de Monte e Krizek (1976)

Os autores propuseram uma relação quadrática da permeabilidade com o índice de vazios para materiais com granulometria fina. Uma forma linear da função relacionando  $k$  dividido por  $(1+e)$  foi usada de acordo com:

$$\frac{k}{(1+e)} = \alpha + \beta e \quad (2.60)$$

sendo  $\alpha$  e  $\beta$  constantes do material.

(iv) Modelo de Somogyi (1979)

Uma função exponencial para relacionar a permeabilidade e o índice de vazios foi proposta sob a forma:

$$k = Ce^D \quad (2.61)$$

sendo  $C$  e  $D$  parâmetros do modelo determinados na análise.

Esta função tem se mostrado bastante apropriada para modelar a relação índice de vazios x permeabilidade (Al-Tabbaa e Wood, 1987; Aiban e Znidarcic, 1990; Abu-Hejleh e Znidarcic, 1992).

(v) Modelo de Koppula e Morgenstern (1982)

Este modelo relaciona a permeabilidade dividida por  $(1+e)$  à tensão efetiva, sendo que a permeabilidade pode ser considerada como uma função potencial do índice de vazios na forma:

$$\frac{k}{(1+e)} = \left( \frac{k}{1+e} \right)_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^q \quad (2.62)$$

sendo  $q$  uma constante do material.

(vi) Modelo de Carrier III *et al.* (1983)

A permeabilidade é modelada através da seguinte equação:

$$k = E \frac{e^F}{(1+e)} \quad (2.63)$$

sendo  $E$  e  $F$  constantes do material.

(vii) Modelo de Carrier e Bromwell (1983)

Este modelo tem a seguinte equação:

$$k = \mu \frac{(e - \lambda)^v}{(1 + e)} \quad (2.64)$$

sendo  $\mu$ ,  $v$  e  $\lambda$  constantes do material.

## **2.6 – Ensaios de Laboratório para a Determinação das Propriedades Constitutivas do Adensamento**

O estudo do comportamento de materiais finos de elevada compressibilidade no processo de adensamento deve estar baseado não só em uma teoria adequada capaz de descrever este comportamento, como também em métodos e técnicas de ensaio apropriadas para a determinação das relações constitutivas envolvidas neste fenômeno: índice de vazios x tensão efetiva e índice de vazios x permeabilidade.

A determinação das relações constitutivas do adensamento pode ser feita por meio de ensaios de laboratório ou de campo. No presente trabalho, serão descritos apenas os ensaios de laboratório, uma vez que os ensaios de campo fogem do escopo da proposta. Em termos dos ensaios de laboratório, serão abordados apenas os ensaios mais comumente utilizados, que são os ensaios CRD e HCT, descritos a seguir.

### **2.6.1 – Ensaio de Adensamento Tipo CRD (*Consolidation Rate Displacement*)**

#### **2.6.1.1 - Princípios e Equipamentos de Ensaio**

O ensaio de adensamento com taxa de deslocamento constante (ensaio de adensamento tipo CRD) constitui uma metodologia comumente utilizada para a determinação das características de compressibilidade e permeabilidade de materiais de consistência mole em laboratório. A principal incerteza relativa ao ensaio, consiste na definição da velocidade a ser adotada, de particular influência nos resultados obtidos.

O ensaio de adensamento CRD foi desenvolvido com objetivo de contornar as limitações do ensaio convencional de adensamento: obtenção da curva tensão x deformação a partir de um número reduzido de pontos e longa duração dos ensaios para materiais finos de elevada compressibilidade. Os detalhes do ensaio CRD e a análise empregada na interpretação dos resultados são descritos em Znidarcic et al. (1986). Este tipo de ensaio foi sugerido como uma tentativa de acelerar o processo de ensaio e testar o material sob taxas de deformações que se aproximem às de campo.

O equipamento utilizado é bastante simples, sendo constituído, basicamente, por uma câmara de material rígido (oedômetro) e dispositivos como topo, pistão, anel superior, anel inferior e base (Figuras 2.5 e 2.6). A amostra de lama é colocada na parte inferior, sendo submetida a carregamentos contínuos, impostos pela movimentação descendente do pistão, a uma velocidade constante de deslocamento. A base da célula, onde é encaixado o anel inferior, possui, na parte central, uma pedra porosa e um transdutor de pressão. Os excessos de poropressões, geradas na base, são medidos através de um transdutor de pressão lateral à base. O topo do oedômetro apresenta um furo central, que serve para permitir a movimentação da base do pistão e dois outros furos, para aplicação de contra-pressão (caso seja aplicada) e saída de ar durante a saturação do sistema. O pistão apresenta uma pedra porosa encaixada na sua base e dois furos que permitem a passagem do excesso de poropressão para o anel superior, durante o adensamento da amostra.

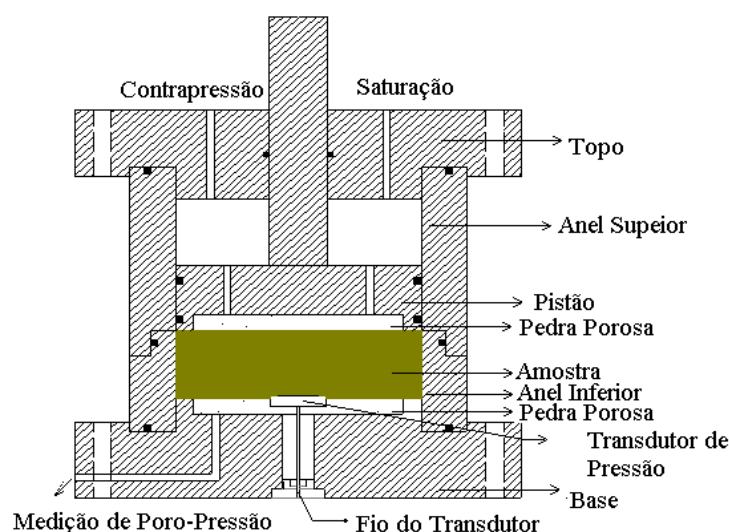


Figura 2.5 – Esquema geral de um equipamento de adensamento tipo CRD

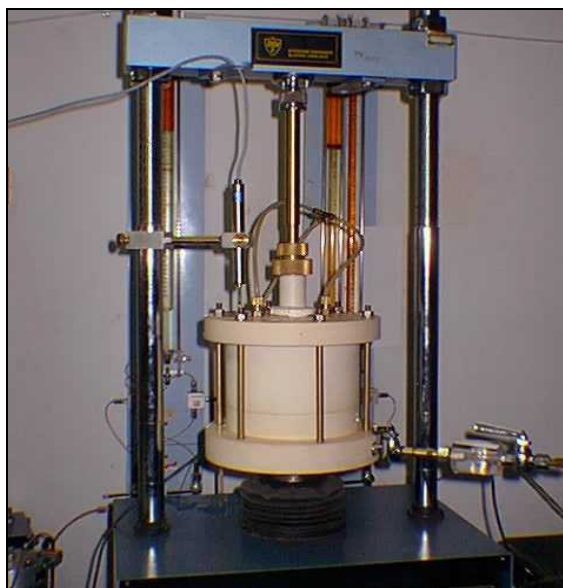


Figura 2.6 - Montagem geral do equipamento tipo CRD

#### **2.6.1.2 - Procedimentos do Ensaio**

Inicialmente, satura-se a pedra porosa da base do oedômetro (deixando percolar água através da mesma) e coloca-se papel filtro para evitar sua colmatção. O anel inferior é encaixado na base do oedômetro e com uma concha deposita-se lentamente o material homogeneizado na consistência desejada dentro dele. Após a conexão do sistema anel superior/pistão/ topo com o anel inferior do oedômetro, fecha-se o sistema com barras de latão para evitar vazamentos (deve-se colocar papel filtro sobre a pedra porosa da base do pistão).

Antes de iniciar-se o ensaio, deve-se ajustar o pistão dentro do anel superior de modo que a pedra porosa da base do pistão fique bem próxima da amostra. Como neste trabalho não foi utilizada contra-pressão, na etapa seguinte de execução do ensaio, seleciona-se a velocidade de ensaio desejada e inicia-se o mesmo. Durante o ensaio, uma das extremidades da amostra permanece parada enquanto a outra é submetida (por uma prensa com controle de velocidade) a uma taxa de deslocamento (velocidade) constante. Geralmente, apenas uma das extremidades (normalmente o topo) é drenada. À medida que o prato da prensa desloca-se para cima, o pistão comprime a amostra, provocando o seu adensamento.

As poropressões são obtidas por meio de um transdutor situado na base do equipamento, as leituras das tensões axiais são feitas através de um transdutor conectado no centro da base do oedometro e os deslocamentos são medidos por um extensômetro elétrico localizado sobre o topo do sistema. Deste modo, a cada instante, pode-se estimar a tensão efetiva em ambas as extremidades da amostra.

A principal limitação do ensaio CRD está relacionada à fixação da velocidade do ensaio. Este fator apresenta influência significativa na determinação dos parâmetros de compressibilidade e está diretamente relacionado com o tipo de solo. Na escolha da velocidade mais adequada, deve-se levar em conta os objetivos do ensaio e as limitações teóricas impostas à análise dos resultados. Na maioria das aplicações, a velocidade é definida com base na razão entre a poropressão na base e a tensão total aplicada ( $u_b/\sigma$ ).

#### 2.6.1.3 – Metodologias de Análise

Alguns dos principais métodos propostos para a análise dos dados do ensaio CRD são descritos a seguir.

- Smith e Wahls (1969)

Essa análise utiliza a formulação a grandes deformações e supõe uma distribuição linear do índice de vazios com o tempo. São calculadas a tensão efetiva média e o coeficiente de compressibilidade.

- Wissa et al. (1971)

Assumindo deformações infinitesimais, define-se o coeficiente de compressibilidade, a tensão efetiva média e a deformação média.

- Umehara e Zen (1980)

A análise é baseada na teoria do adensamento a grandes deformações, definindo-se a taxa de deformação R:

$$R = \frac{(\log(\sigma - u) - \log \sigma'_0)}{(\log \sigma - \log \sigma'_0)} \quad (2.65)$$

Usando gráficos, o valor do parâmetro  $c_v/(vH_0)$ , correspondente à taxa  $R$ , pode ser obtido. Quando este parâmetro é conhecido, a taxa de recalque nas extremidades do corpo de prova pode ser obtida de outros gráficos. Logo, o coeficiente de adensamento e a relação tensão efetiva x índice de vazios são obtidos.

- Lee (1981)

O método assume que o coeficiente de adensamento permanece constante durante o ensaio e define-se o parâmetro  $\beta$  por:

$$\beta = \frac{rH_0^2}{c_v} \quad (2.66)$$

A análise considera o estado transiente e permanente e a distribuição de deformações é aproximada por uma função parabólica. Define-se a tensão efetiva média, o coeficiente de compressibilidade e a deformação nas faces drenada e não drenada.

- Znidarcic (1982)

Este método de análise destaca-se dos demais porque, além de supor grandes deformações, não apresenta o coeficiente de adensamento  $c_v$  constante, nem pressupõe um comportamento pré-definido para a deformabilidade do material. Znidarcic (1982) propôs uma análise para retro-calcular as propriedades cujo procedimento é baseado no cálculo dos parâmetros da teoria, ajustando-se a solução analítica aos resultados obtidos experimentalmente. A análise consiste em se dividir a duração total do ensaio em intervalos de tempo, como se cada um deles correspondessem a um teste de curta duração, admitindo solução com valores constantes da função  $(g)$  válida dentro destes intervalos.

Conhecendo-se as tensões efetivas no topo e na base do corpo de prova durante o ensaio e assumindo uma relação linear entre tensão efetiva e índice de vazios, é possível estabelecer um processo iterativo que termina quando as curvas de compressibilidade obtidas estiverem próximas. Para eliminar as dificuldades no procedimento de análise, a equação do adensamento a grandes deformações foi simplificada, desprezando-se a

parcela de peso próprio  $f(e)$  e fazendo  $g(e)$  constante. Então:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] + f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.67)$$

$$g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.68)$$

A função  $(g)$  é uma função do índice de vazios na forma:

$$g = - \frac{k}{\gamma_w (1 + e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (2.69)$$

A relação de compressibilidade é construída através do processo iterativo, assumindo-se que a relação entre índice de vazios e tensão efetiva para um material homogêneo é única.

Em seguida, a permeabilidade pode ser calculada para cada incremento de tempo com valor conhecido da função  $(g)$ . A hipótese de negligenciar o efeito do peso próprio é considerada imprópria para o adensamento de materiais finos de elevada compressibilidade, pois este desempenha papel dominante no processo.

A Tabela 2.1 apresenta as equações características de alguns dos métodos descritos anteriormente para as análises dos resultados dos ensaios de adensamento tipo CRD.

Tabela 2.1 - Equações usadas na análise do ensaio CRD (Lee et al., 1994).

	Smith e Wahls (1959)	Wissa et al. (1971)	Lee (1981)
Tensão efetiva ( $\sigma'_m$ )	$\sigma'_m = \sigma \left\{ \frac{\left[ \left( \frac{1}{3} \right) - \left( \frac{b}{r} \right) \left( \frac{1}{24} \right) \right]}{\left[ \left( \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{b}{r} \right) \left( \frac{1}{12} \right) \right]} \right\}$	$\sigma'_m = \sigma - \frac{2}{3} u$	$\sigma'_m = \sigma - \frac{2}{3} u$
Coefficiente de compressibilidade ( $c_v$ )	$c_v = \frac{rH^2}{a_v u_b} \left[ \frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left( \frac{1}{12} \right) \right]$	$c_v = \left( \frac{H_0^2}{2u} \right) \left( \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \right)$	$c_v = \left( \frac{H^2}{2u} \right) \left( \frac{\Delta \sigma'_d}{\Delta t} \right)$



			$c_v = \left( \frac{H^2}{2u} \right) \left( \frac{\Delta \sigma'_u}{\Delta t} \right)$
Deformação na face drenada ( $\epsilon_d$ )	_____	$\epsilon_d = \epsilon_m + \frac{\beta}{3}$	$\epsilon_d = \epsilon_m + \frac{\beta}{3} \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\beta}{3} \right) \left( \frac{H}{H_0} \right) \right]}$
Deformação na face não drenada ( $\epsilon_u$ )	_____	$\epsilon_u = \epsilon_m - \frac{\beta}{6}$	$\epsilon_u = \epsilon_m - \frac{\beta}{6} \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\beta}{3} \right) \left( \frac{H}{H_0} \right) \right]}$

sendo:

H: espessura do corpo de prova;

$H_0$ : altura do corpo de prova;

b/r : constante;

u : poropressão;

$\sigma'_d$  : tensão efetiva na face drenada;

$\sigma'_u$  : tensão efetiva na face não drenada;

$\epsilon_m$  : deformação média do corpo de prova.

## 2.6.2 – Ensaio de Adensamento Tipo HCT (*Hydraulic Consolidation Test*)

### 2.6.2.1 - Princípios e Equipamentos de Ensaio

A determinação experimental das características de compressibilidade e de adensamento de rejeitos finos, expressos pelas relações índices de vazios x permeabilidades e índices de vazios x tensões efetivas, é complexa no caso de rejeitos mais finos e os ensaios convencionais não são convenientes para a sua interpretação, principalmente para baixos níveis de tensão. Para contornar este problema, propôs-se nesse trabalho o uso de uma técnica experimental baseada no ensaio de adensamento por percolação induzida, que emprega uma bomba de fluxo permitindo o controle das vazões de fluxo empregadas na amostra. É medida a altura final da amostra e calculada a tensão efetiva

de base assim que a condição de equilíbrio é atingida. Esta técnica tem se mostrado muito conveniente na determinação das relações constitutivas e funções desses materiais, uma vez que reduz, em grande parte, as limitações dos outros métodos.

Neste sentido, esta técnica está atualmente disponível no país, permitindo o estudo do comportamento de materiais como os rejeitos de mineração, durante o processo de adensamento, através da montagem e operacionalização do equipamento (conjunto bomba de fluxo, célula triaxial, sistema de aplicação de pressão e sistema de aquisição de dados), bem como a implementação e adaptação dos procedimentos de ensaio. O ensaio de adensamento por percolação induzida poderá representar uma contribuição válida no processo de planejamento de disposição de materiais com granulometria fina oriundos de operações de mineração e dragagem, representando a viabilização do uso das teorias de adensamento a grandes deformações.

Com a realização da montagem do equipamento para realização do ensaio de adensamento por percolação induzida, observou-se uma segunda aplicação deste equipamento no ensaio de permeabilidade saturada. Segundo Aiban e Znidarcic (1989), o interesse em se obter medidas acuradas da permeabilidade de solos, especialmente para solos com granulometria fina, tem aumentado significativamente nos últimos anos. Este aumento é principalmente devido a necessidade de se prever exatamente o movimento do fluido através dos solos. Para problemas geotécnicos convencionais, tais como: estabilidade de taludes, vazamentos em reservatórios e outras análises de percolação, é freqüentemente suficiente conhecer a permeabilidade dentro de uma ordem de magnitude ou simplesmente determinar que a permeabilidade não é superior a um dado valor especificado.

Portanto, o aumento da necessidade de ensaios de permeabilidade e a exigência de maior acurácia estimularam a reavaliação e a tentativa de melhorias dos métodos de medida de permeabilidade, com significativos desenvolvimentos de técnicas de laboratório e de campo nos últimos anos (Araruna et al., 1994). Idealmente, um ensaio deve ser executado em campo usando um permeâmetro apropriado sujeito a um gradiente de pressão pré-estabelecido. Isto é difícil e caro devido aos problemas de

perturbação associados com a instalação dos equipamentos de ensaio e com o tempo necessário para se atingir as condições de equilíbrio. Alternativamente, ensaios de laboratório podem ser executados em corpos de prova representativos. Isto apresenta a vantagem de se poder variar as condições de contorno, o que permite fazer uma avaliação da sua influência na permeabilidade.

A técnica da bomba de fluxo desenvolvida por Olsen (1966) para medida de permeabilidade de solos com granulometria fina consiste em impor uma vazão de fluxo constante à amostra, por meio da bomba de fluxo, e medir a correspondente diferença de pressão gerada pela qual o gradiente hidráulico é avaliado. Este é exatamente o conceito oposto do ensaio convencional de permeabilidade a carga constante, no qual um gradiente hidráulico constante é imposto através da amostra e a correspondente quantidade de fluxo é medida.

O uso da bomba de fluxo é igualmente apropriado para solos de baixa e alta permeabilidade, mas as vantagens são mais aparentes em ensaios com solos de permeabilidade baixa. O cálculo do coeficiente de permeabilidade é feito com o emprego da Lei de Darcy e a resolução na medida da vazão de fluxo é pelo menos três ordens de magnitude melhor do que os métodos convencionais.

O sistema para a realização dos ensaios de adensamento por percolação induzida e dos ensaios de permeabilidade saturada consiste de cinco partes principais: o painel de controle de pressão, a bomba de fluxo, a célula triaxial, o transdutor diferencial de pressão, o sistema de carregamento e um sistema de aquisição de dados, que são, resumidamente, descritos a seguir.

Um diagrama esquemático geral da montagem do equipamento para o ensaio de adensamento por percolação induzida e de permeabilidade saturada é apresentado na Figura 2.7. A figura 2.8 mostra o equipamento HCT na sua montagem geral. O sistema de ensaio é independente e requer somente força elétrica e um suplemento de pressão, o qual pode ser o sistema de potes de mercúrio (Bishop-Henkel) ou o sistema de ar comprimido. Este equipamento está disponível no Laboratório de Geotecnia da UFOP.

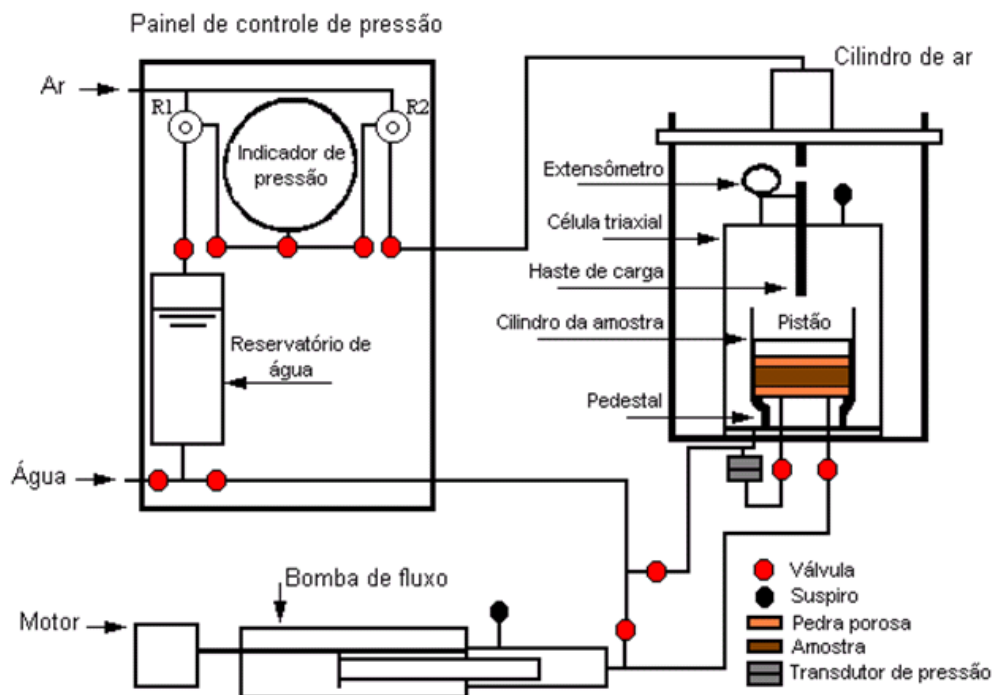


Figura 2.7 – Diagrama esquemático do equipamento para realização do ensaio de adensamento por percolação induzida e permeabilidade saturada.



Figura 2.8 – Montagem geral do equipamento tipo HCT.

a) Painel de controle de pressão

O painel de controle de pressão consiste, basicamente, de uma placa de madeira (compensado) revestida por fórmica, na qual estão fixados os reservatórios para aplicação de pressão, os reguladores de pressão, o manômetro digital para leituras de pressão e as válvulas de controle do fluxo de água e ar. Este painel tem como objetivo controlar a aplicação de pressão e contrapressão para a saturação da amostra e realização dos ensaios propriamente ditos.

b) Bomba de fluxo

A bomba de fluxo é o modelo PHD 2000 (*Infuse/Withdraw* da *Harvard Apparatus*) e consiste de um sistema modificado de infusão/remoção de um êmbolo (seringa) e uma seringa de aço inoxidável. Essa bomba possui um painel frontal digital que permite a seleção dos parâmetros necessários à realização do ensaio, quais sejam: o diâmetro da seringa, o modo de funcionamento (infusão/remoção) e a forma de operação (controle do volume a ser injetado ou retirado por sucção da amostra ou seleção da vazão de fluxo do ensaio).

Como o sistema da bomba é digital, ele possui em sua memória várias seringas que são encontradas no mercado, sendo necessário indicar qual é o tipo da seringa (diâmetro e material) a ser utilizada. Antes de colocar a bomba em funcionamento é necessário selecionar o seu modo de funcionamento (infusão/remoção) e a sua forma de operação (seleção de vazão/controle de volume).

O conjunto bomba-seringa utilizado permite injetar ou fazer a sucção de um total de, aproximadamente,  $20 \text{ cm}^3$ , sendo seu limite inferior a vazão de  $0,0523 \text{ }\mu\text{l/min}$  e seu limite superior, a vazão de  $54,804 \text{ ml/min}$ . Qualquer vazão intermediária pode ser selecionada, sendo que os limites da vazão dependem do diâmetro da seringa utilizada. O uso da bomba de fluxo facilita o controle preciso da velocidade de fluxo através da amostra.

### c) Câmara triaxial

A câmara de ensaio é uma câmara triaxial convencional. Portanto, possui topo e base; cilindro de acrílico; dois conjuntos de base (removíveis) e 'top cap', também de acrílico, e pedras porosas com diâmetros de 1,4" e 2,8". Na base da câmara encontram-se as conexões independentes responsáveis pelo enchimento da câmara com o fluido confinante e pelo controle da drenagem e medida de diferença de pressão do corpo de prova. Tais entradas são também usadas para saturação do corpo de prova.

No topo da câmara encontra-se uma válvula para permitir a saída do ar durante o enchimento da mesma com o fluido confinante. A haste de carregamento tem a finalidade de aplicação de cargas na amostra durante o ensaio de adensamento por percolação induzida (fase de carregamento em etapas). Já o extensômetro é utilizado para medir a altura da amostra durante este ensaio. Nos encaixes do cilindro de acrílico, tanto no topo e na base da câmara, são usados anéis de borracha (O-rings) para evitar vazamentos. A fixação do cilindro no topo e na base é feita através de hastes com porcas.

Para a realização do ensaio de adensamento por percolação induzida, a base deve ser substituída por uma base modificada, na qual é possível acoplar um tubo de acrílico. Nesta base já está assentada uma pedra porosa. A amostra é colocada no interior deste tubo de acrílico que possui um diâmetro de 8,88 cm. Neste ensaio também é utilizado um pistão plástico com uma pedra porosa cuja finalidade é transferir o carregamento aplicado para a amostra, durante a fase de carregamento em etapas. Ele tem o mesmo diâmetro da amostra e seu peso submerso produz um carregamento superficial na mesma que corresponde a uma tensão de 0,10 kPa.

Para a realização do ensaio de permeabilidade, deve-se utilizar o *top cap* e a base de acrílico convencionais. A amostra é colocada sobre a base com pedra porosa e papel filtro, sendo que em seu topo é também colocado papel filtro, pedra porosa e o *top cap*.

#### d) Transdutor diferencial de pressão

Um transdutor diferencial de pressão, fornecido pela Validyne Engineering Corporation, com um diafragma capaz de medir uma diferença de pressão de até 1,25 psi é fixado na base da célula. Este transdutor é formado por duas câmaras, cada uma possuindo uma saída de água (pressão) e uma válvula de sangria. Uma das saídas de pressão é conectada à base da amostra para medir a diferença de pressão gerada durante o ensaio, enquanto a outra é conectada ao reservatório de pressão para fornecer a pressão de referência, a partir da qual a diferença de pressão é medida.

Durante todo o ensaio (tanto de adensamento por percolação induzida e de permeabilidade saturada) a contrapressão deve agir na câmara, desta forma o transdutor diferencial de pressão mede a diferença de pressão induzida através da amostra. O transdutor diferencial de pressão é conectado ao sistema de aquisição de dados.

O transdutor diferencial de pressão pode ser calibrado com o auxílio de um sistema de aplicação de pequenas pressões, tanto positivas quanto negativas, em uma das saídas de pressão, enquanto a outra saída fica aberta para a atmosfera. Este sistema é um tubo de PVC perfurado de 5 em 5 cm fixado com concreto a uma base. Neste tubo é acoplada uma luva de correr ligada a um béquero com água destilada. Um tubo de nylon liga o béquero com água a uma das saídas do transdutor diferencial de pressão.

Portanto, ao alterar a altura do béquero com água ao longo do tubo de PVC, tendo o transdutor diferencial de pressão fixo em um determinado referencial, pode-se obter a leitura da diferença de pressão gerada através do sistema de aquisição de dados. A curva de calibração do transdutor diferencial de pressão (voltagem x pressão) pode ser traçada por meio destes dados e a equação de ajuste da curva será a equação de calibração.

#### e) Sistema de carregamento

Uma das fases do ensaio de adensamento por percolação induzida é o ensaio de carregamento em etapas. Nesta fase a haste de carregamento é usada para transferir a

carga aplicada para a amostra. Um prato é acoplado a extremidade desta haste, no qual podem ser colocados os pesos até se atingir o valor carga desejada. Esta carga externa aplicada é transferida para o pistão através da haste de carregamento da célula triaxial. Um extensômetro é usado para medir a altura da amostra.

f) Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados consiste de um dispositivo eletrônico no qual estão ligados os transdutores diferenciais de pressão e de um computador digital. Por meio de programa de aquisição de dados (*Lab-View*), instalado no computador, os dados de diferença de pressão durante o ensaio podem ser monitorados a uma dada frequência de leitura. Este programa de aquisição de dados apresenta, simultaneamente, na tela do computador o gráfico referente à diferença de pressão gerada ao longo do tempo, bem como a própria leitura da diferença de pressão.

### **2.6.2.2 – Ensaio de Adensamento por Percolação Induzida**

A técnica deste ensaio é baseada na metodologia proposta por Imai (1979) e consiste em aplicar uma força de percolação descendente imposta pela bomba de fluxo no corpo de prova, o que provocará fluxo e causará o adensamento por percolação. Aplica-se, também, um estágio de carregamento na amostra por aplicação de carga e realiza-se o ensaio de permeabilidade com a bomba de fluxo. A poropressão gerada na amostra é medida com transdutor diferencial de pressão durante o ensaio. Detalhes da metodologia são dados em Botelho (2001).

Segundo Abu-Hejleh e Znidarcic (1996), o ensaio de adensamento por percolação induzida proposto inicialmente por Imai (1979) consiste em, juntamente ao peso próprio do corpo de prova, aplicar uma força de percolação descendente imposta pela diferença de carga na amostra, o que provocará fluxo e causará o adensamento por percolação da amostra. Neste ensaio, aplica-se, também na amostra, um estágio de carregamento permitindo que ocorra o adensamento por aplicação de carga. A poropressão da água gerada dentro da amostra, é medida durante o ensaio e a distribuição do índice de vazios



pode ser obtida no final do ensaio pelo fatiamento do corpo de prova na sua altura. Pode-se, também, determinar apenas o índice de vazios final da amostra determinando a umidade final. Através da obtenção destes dados, as relações de permeabilidade x índice de vazios e tensão efetiva x índice de vazios do solo podem ser determinadas.

Com a utilização desta técnica de ensaio, é possível determinar o índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula e os dados no nível de tensões altas através da aplicação de cargas em estágios (possibilitando a obtenção de uma curva de compressibilidade do solo abrangendo níveis baixos e altos de tensão). Durante este ensaio a vazão de fluxo, através da amostra, é controlada pela bomba de fluxo e a diferença de pressão resultante é medida pelo transdutor diferencial de pressão. Além disso, sua análise envolve um algoritmo iterativo para resolver o problema não linear associado. Um procedimento de otimização é empregado para encontrar a combinação ótima (minimizada) dos parâmetros do modelo que correspondem aos resultados das análises com as quantidades experimentalmente observadas.

O ensaio de adensamento por percolação induzida consiste de quatro fases distintas, as quais fornecem dados para a análise do ensaio. Estas etapas consistem na determinação do índice de vazios para a tensão efetiva zero ( $e_{00}$ ), o adensamento por percolação induzida, propriamente dito, o ensaio de carregamento em etapas e o ensaio de permeabilidade com o emprego da bomba de fluxo. Sabe-se que este tipo de ensaio é utilizado para estudo de adensamento de solos moles como, por exemplo, rejeito de mineração sob forma de lama.

Uma quantidade de lama é completamente misturada até se obter uma consistência correspondente às características do início da deposição. Para a determinação do índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula, um béquer é cheio com uma camada de 25mm a 50mm da lama que é deixada em repouso por algumas horas. A camada superficial deste material é coletada para determinação do teor de umidade e, logo do índice de vazios para tensão efetiva nula.

O restante da lama argilosa é colocada dentro do anel de acrílico e o pistão de acrílico é colocado sobre o topo da amostra, após cerca de duas horas, sendo que entre ele e a amostra deve-se colocar um papel filtro. A câmara triaxial é cheia com água destilada e todo o sistema do ensaio é saturado sob uma contrapressão. A amostra de lama é deixada consolidar durante uma noite sob a ação de seu peso próprio e da tensão efetiva de topo produzida pelo pistão.

Em seguida, inicia-se o ensaio de adensamento induzido por percolação, propriamente dito, no qual uma vazão constante é aplicada à amostra pela retirada de água de sua base usando a bomba de fluxo. Devido ao fluxo descendente a amostra adensa e a diferença de pressão é continuamente medida e registrada pelo sistema de aquisição de dados. A mesma vazão é mantida até que se alcance a condição de estado permanente, quando não ocorre mais o adensamento e a diferença de pressão através da amostra torna-se constante. A velocidade da água através da amostra,  $v$ , é constante no estado permanente e é calculada como sendo a vazão imposta dividida pela área da amostra  $A$ . Neste estágio, a altura da amostra é medida e a diferença de pressão é usada para calcular a tensão efetiva na base da mesma através da equação:

$$\sigma'_b = \sigma'_o + \gamma_w H_s (G_s - 1) + \Delta P_s \quad (2.70)$$

sendo:  $\sigma'_o$ : tensão efetiva produzida pelo carregamento do pistão;

$\gamma_w$ : peso específico da água;

$G_s$ : densidade dos sólidos;

$H_s$ : altura de sólidos contidos na amostra calculada como  $W_d / (G_s \cdot \gamma_w \cdot A_s)$ ;

$W_d$ : peso seco da amostra;

$A_s$ : área da amostra;

$\Delta P_s$ : diferença de pressão através da amostra.

Tendo sido alcançadas as condições de equilíbrio, um novo ensaio de percolação induzida pode ser realizado, agora sob uma vazão maior que a anterior. Isto irá produzir novas variações no índice de vazios e na tensão efetiva ao longo da amostra. Novos valores de  $v$ ,  $\sigma'_b$  e  $H_f$  são obtidos, mas somente um conjunto de valores é necessário para a análise dos resultados.

Para obter os dados de adensamento e permeabilidade em uma faixa de tensão efetiva alta, ensaios de carregamento em etapas e permeabilidade são realizados. Na conclusão do ensaio de adensamento por percolação induzida, a amostra é adensada sob uma tensão vertical. No final do seu adensamento, a altura da amostra é medida e o correspondente índice de vazios da amostra adensada é calculado por:

$$e_l = \left( \frac{H_l}{H_s} \right) - 1 \quad (2.71)$$

sendo:  $e_l$  : índice de vazios da amostra adensada;

$H_l$  : altura final da amostra, após o adensamento por percolação.

Na fase do ensaio de permeabilidade, um pequeno fluxo descendente é imposto à amostra com a bomba de fluxo e a variação da diferença de pressão é medida. No estado de equilíbrio esta diferença de pressão é igual a  $\Delta P_l$  e a permeabilidade correspondente da amostra é igual a (Znidarcic et al., 1986; Aiban e Znidarcic, 1989):

$$k_l = \frac{v \cdot H_l \cdot \gamma_w}{\Delta P_l} \quad (2.72)$$

sendo  $\gamma_w$  o peso específico da água.

Os dois ensaios podem ser repetidos várias vezes, aumentando-se o carregamento, com a finalidade de se obter mais dados, mas somente um conjunto de valores para  $\sigma_{1l}$ ,  $e_l$  e  $k_l$  são necessários para a análise. Terminado o ensaio, a amostra é retirada do equipamento e o peso dos sólidos ( $W_d$ ) é determinado.

Uma vez que os dados do ensaio foram obtidos, é preciso realizar a análise. Neste caso, ela é feita por meio de um programa específico, denominado SICTA (*Seepage Induced Consolidation Analysis*), desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992) para análise dos resultados dos ensaios, que fornece, após várias iterações, os valores dos parâmetros A, B, C, D e Z dos modelos utilizados para a obtenção das respectivas leis

de compressibilidade (relação índice de vazios x tensão efetiva) e de permeabilidade (relação índice de vazios x permeabilidade) dos materiais estudados.

### 2.6.2.3 – Ensaio de Permeabilidade Saturada

De acordo com Aiban e Znidarcic (1989), a vantagem deste ensaio com bomba de fluxo reside no fato de que é muito mais fácil controlar pequenas vazões de fluxo do que medi-las exatamente. A medida do gradiente hidráulico imposto não apresenta problema quando se usa um transdutor diferencial de pressão sensível. Além disso, com a técnica da bomba de fluxo, as amostras são submetidas a condições de equilíbrio, tal como, no ensaio de carga constante. Ensaio convencionais podem demandar períodos de até vinte e quatro horas para a medida de permeabilidade, ao passo que os ensaios com a bomba de fluxo, publicados por Aiban e Znidarcic (1989), levaram cerca de uma hora. Nesta metodologia, o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) é calculado diretamente utilizando-se a lei de Darcy:

$$k = H \cdot \frac{q}{A \cdot h} \quad (2.73)$$

sendo:  $H$ : altura da amostra em m;

$q$ : vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ , estabelecida pela bomba de fluxo;

$A$ : área da seção transversal da amostra em  $\text{m}^2$ ;

$H$ : diferença de pressão medida pelo transdutor de pressão e calculada pelo gráfico diferença de pressão x tempo.

O ensaio de permeabilidade saturada com uso da bomba de fluxo consiste de três etapas bastante distintas. Estas etapas consistem: na moldagem do corpo de prova, na sua saturação e no ensaio de permeabilidade com a bomba de fluxo, propriamente dito. Existem muitas maneiras de se moldar o corpo de prova para a realização deste ensaio. Comumente, a moldagem é feita por meio da cravação de um anel de 2,8” de diâmetro no bloco indeformado. Segundo Aiban e Znidarcic (1989) é aconselhável a utilização de amostras menores para reduzir a influência do adensamento induzido por percolação nos resultados do ensaio.

Logo em seguida, a amostra é colocada na célula triaxial e é envolvida por uma membrana de látex. São colocados o *top cap* e os anéis de vedação na base e no topo da amostra. A câmara triaxial é preenchida por água destilada e a amostra é submetida a saturação por percolação por cerca de 12 horas. Em seguida, o método de aplicação de contrapressão é utilizado para a verificação da saturação total da amostra, no qual o teste do parâmetro B de Skempton é utilizado para checar esta saturação.

O ensaio de permeabilidade começa quando, tendo sido verificada a saturação da amostra, uma pressão constante é aplicada no topo da amostra. Após a seleção da vazão de fluxo, esta irá promover a retirada da água da base da amostra, o que provocará uma diferença de pressão entre o topo e a base da amostra e irá gerar um fluxo descendente na mesma. O ensaio continua até que a diferença de pressão gerada, para a respectiva vazão selecionada, atinja o estado de equilíbrio. Adotam-se, então, outros valores de vazão (sempre crescentes) e repetem-se os mesmos procedimentos.

## **2.7 – Simulação Numérica do Processo de Adensamento Unidimensional a Grandes Deformações pelo programa CONDES0**

### **2.7.1 – Fundamentos e Condições de Contorno do Programa CONDES0**

O programa CONDES0 (Yao e Znidarcic, 1997) constitui um algoritmo numérico para análise de adensamento unidimensional a grandes deformações e ressecamento de solos finos compressíveis, usando o método de diferenças finitas. Ele é empregado na solução de equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem que modelam os processos de adensamento unidimensional e ressecamento de solos em função das variações de índices de vazios.

Escrito em linguagem de programação FORTRAN, o programa fornece a distribuição dos índices de vazios ao longo da camada de solo compressível, a diferentes intervalos de tempo. Adicionalmente, podem ser obtidos os perfis da distribuição das poropressões geradas, as alturas das camadas de solo ao longo do adensamento, os perfis dos teores de sólidos presentes e a variação dos valores dos pesos específicos secos médios.

O programa é baseado em plataforma DOS, necessitando, para a sua execução de um arquivo tipo DOSXMF.EXE. Os dados do input do programa (características dos materiais, condições de contorno, estágios de enchimento, etc) são introduzidos por meio de um arquivo de dados tipo texto não formatado. As equações gerais do adensamento são discretizadas espacialmente em uma malha uniforme, sendo adotada uma forma mista dos métodos das diferenças central e avançada com um esquema de integração implícito no tempo. Em análises mais refinadas, uma malha não uniforme é gerada automaticamente pelo programa (Yao e Znidarcic, 1997).

Nas análises de adensamento unidimensional, as simulações numéricas pelo programa são baseadas na teoria de Gibson et al. (1967) com as seguintes hipóteses:

- (i) os materiais finos compressíveis permanecem sempre na condição de saturação até que o índice de vazios atinja o índice de vazios correspondente ao limite de contração;
- (ii) o fluxo é essencialmente vertical, com deformações unidimensionais (verticais);
- (iii) solo é homogêneo horizontalmente;
- (iv) água e as partículas sólidas são incompressíveis (inexistência de *creep*);
- (v) os planos horizontal e vertical são planos das tensões principais durante todo o processo de adensamento;
- (vi) validade da Lei de Darcy.

As relações constitutivas, em termos de compressibilidade e permeabilidade dos materiais, utilizadas nas simulações pelo programa são:

- compressibilidades (modelo de Liu e Znidarcic, 1991):

$$e = A_1 (\sigma' + Z_1)^{B_1} \quad (2.74)$$

sendo:  $e$  : índice de vazios;  $\sigma'$ : tensão efetiva;  $A_1$ ,  $B_1$ , e  $Z_1$ : constantes empíricas obtidas através do ensaio HCT com bomba de fluxo.

- permeabilidades (modelo de Somogy, 1971):

$$k = Ce^D \quad (2.75)$$

sendo:  $k$ : condutividade hidráulica;  $C$  e  $D$ : constantes empíricas.

A equação governadora na compressão unidimensional é formulada com as funções velocidade e conservação de massa no sistema de coordenadas lagrangeanas. As funções velocidade e conservação de massa são introduzidas como:

$$\text{Função velocidade: } v_n = \frac{k(G_s - 1)}{1 + e} + \frac{k(1 + e_0)}{\gamma_w(1 + e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \quad (2.76)$$

$$\text{Conservação de massa: } \frac{\partial v_n}{\partial a} = \frac{-1}{1 + e_0} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.77)$$

sendo:  $t$ : tempos;  $a$ : coordenadas lagrangeanas;  $e_0$  : índice de vazios para tensão efetiva zero;  $G_s$  : densidade das partículas sólidas;  $V_n$  : função velocidade do fluido no solo e  $\gamma_w$  o peso específico da água.

As condições de contorno utilizadas no programa, para simular o processo de enchimento de um reservatório, são de dois tipos (Yao et al., 2002), correspondendo a condições de contorno aplicadas para a base ou topo da camada analisada (condições de Newman ou de Dirichilet, respectivamente). A primeira é representada pela imposição da velocidade do fluido, que é convertida em índice de vazios pela equação 2.76. Na segunda hipótese, impõe-se uma tensão de contorno, sendo esta transformada em índice de vazios por meio da relação 2.74.

Nas condições de contorno para o topo da camada, podem ser impostas uma dada sobrecarga (usada para simulações do adensamento) ou uma dada taxa de evaporação (usada para análises de ressecamento). No processo de estágios de carregamento, somente a condição de sobrecarga nula é aceitável para a condição de contorno no topo.

Para a condição de contorno na base da camada, são possíveis quatro opções: (i) base impermeável (inexistência de fluxo, com velocidades nulas na fundação da camada); (ii) condição de velocidades específicas de fluxo na base da camada (retirada de água da camada a uma fluxo constante). Esta opção deve ser usada com extremo cuidado e requer muita experiência na interpretação dos resultados; (iii) base permeável (condição de base drenada, com a carga hidráulica sempre coincidindo com o topo da camada em análise; (iv) condição de cargas de poropressões específicas na base da camada. Esta condição considera uma carga arbitrária de poropressão que pode ser positiva ou negativa, a sua aplicação pode gerar instabilidades se forem impostos valores de poropressão maiores que a tensão total na base, devido ao peso próprio do material em análise.

### **2.7.2 – Parâmetros de Entrada e de Saída do Programa CONDES0**

Os parâmetros das relações constitutivas do adensamento, história de enchimento, geometria e condições de contorno são as informações necessárias que o programa necessita como dados de entrada para simular o enchimento de um reservatório. A informação destes dados pode ser feita, basicamente, de duas maneiras: método interativo ou arquivo de dados.

O primeiro procedimento é realizado em comando DOS; após inicializar o programa, as instruções de entrada dos dados são solicitadas passo a passo na tela. A segunda forma é mais conveniente quando se deseja introduzir alterações nos dados em simulações contínuas. Os procedimentos de execução estão descritos no manual do programa que será disponibilizado na biblioteca da Escola de Minas da UFOP. A seguir, apresenta-se uma descrição sucinta dos parâmetros de entrada do programa:

#### **i) Características dos materiais**

- parâmetros de compressibilidade: ( $A_1, B_1$  e  $Z_1$ ).

As características de compressibilidade unidimensional do material são requeridas para modelar o processo de adensamento e são introduzidas sob a forma de índice de vazios versus tensão efetiva ( $e$  x  $\sigma'$ ). A função apresentada na forma da equação



2.74, proposta por Liu e Znidarcic (1991), caracterizada pelos parâmetros  $A_1, B_1$  e  $Z_1$ , é implementada no CONDES0.  $Z_1$  tem a unidade de tensão,  $B_1$  é adimensional e  $A_1$  tem a unidade de tensão elevado ao inverso do valor de  $B_1$ .

- parâmetros de permeabilidade: (C, D).

A função dada na equação 2.75 (Somogyi, 1979) é usada para relacionar índice de vazios versus permeabilidades, por meio de dois parâmetros, C (com unidades de condutividade hidráulica e D (fator adimensional);

- densidade dos sólidos ( $G_s$ );
- peso específico da água ( $\gamma_w$ );
- Índice de vazios mínimo (ME): o índice de vazios mínimo é o índice de vazios correspondente ao estado limite de contração, a partir do qual não se tem mais variações de volume, quaisquer que sejam os incrementos de tensão.

## ii) Dados de enchimento

A Figura 2.9 ilustra um exemplo dos estágios de enchimento e a Tabela 2.2 mostra os dados de entrada correspondentes aos mesmos. A descrição do procedimento relativo a cada dado de entrada é apresentada a seguir:

- altura inicial da camada ( $H_0$ ): a altura inicial corresponde à altura no tempo  $t = 0$  das análises;
- número de estágios de enchimento (NS): este número corresponde ao número de etapas previstas na simulação do enchimento, sendo estabelecido, a partir de um gráfico, correlacionando alturas nominais (alturas totais corrigidas pelos índices de vazios, para representar apenas as alturas correspondentes aos sólidos presentes na camada do solo compressível) versus tempos (Figura 2.9);
- Tempo inicial de enchimento (TBF), tempo final de enchimento (TEF) e taxa de enchimento ou de variações de alturas (FRH). Com efeito, no caso de um enchimento instantâneo, os tempos inicial e final são idênticos e a taxa de enchimento é substituída pela diferença de alturas nominais, correspondentes aos pontos inicial e final do estágio de enchimento considerado.

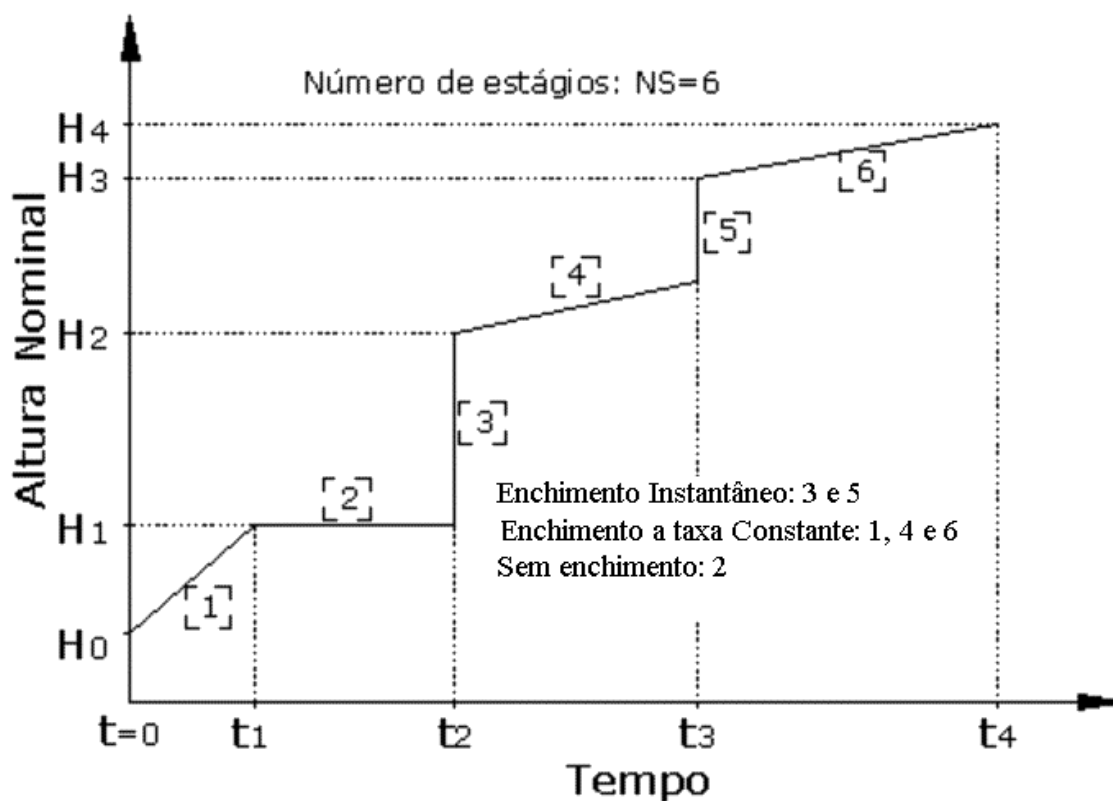


Figura 2.9 - Representação dos diferentes estágios de enchimento de um reservatório (Yao e Znidarcic, 1997)

Tabela 2.2 - Tabela para entrada de dados (Yao e Znidarcic, 1997)

estágio	TBF	TEF	FRH	tipo de enchimento
1	0	$t_1$	$(h_1 - H_0)/t_1$	Taxa constante
2	$t_1$	$t_2$	0	Sem enchimento
3	$t_2$	$t_2$	$(h_2 - h_1)$	Enchimento instantâneo
4	$t_2$	$t_3$	$(h_3 - h_2)/(t_3 - t_2)$	Taxa constante
5	$t_3$	$t_3$	$(h_4 - h_3)$	Enchimento instantâneo
6	$t_3$	$t_4$	$(h_5 - h_4)/(t_4 - t_3)$	Taxa constante

Após a entrada de dados, o programa inicia automaticamente os cálculos e será interrompido quando o índice de vazios atingir o valor mínimo possível ou quando o estado permanente for alcançado.

Com a simulação concluída, são gerados, automaticamente, quatro arquivos de saída, designados como: *ts.out*, *tc.out*, *vd.out* e *input*. Nos anexos deste trabalho serão apresentados exemplos dos mencionados arquivos. Nas análises em que o ressecamento não for estudado, ou seja, somente o adensamento é verificado, o arquivo *tc.out* não é usado, visto que este apresenta os resultados das análises tridimensionais do ressecamento. A seguir, serão descritas as informações produzidas por cada arquivo gerado.

*input* : neste arquivo, são apresentados todos os dados de entrada e a distribuição dos índices de vazios ao final das análises. Este arquivo pode ser usado para continuar o processo com diferentes condições de contorno e, neste caso, o nome do arquivo deve ser mudado. Os parâmetros que podem ser alterados nas análises são: condições de contorno, estado inicial, número de tempos de saída, tempos das saídas, tempo inicial e altura da camada de solo compressível;

*vd.out*: constitui o arquivo geral de saída, contendo o número de nós da malha da discretização, bem como os dados relativos a elevações, índices de vazios, teores de sólidos e poropressões, para cada estágio e cada tempo do enchimento, além da distribuição dos índice de vazios no estado permanente;

*ts.out*: arquivo que contém os dados de recalques ao longo do tempo de enchimento do reservatório, fornecendo também as alturas do material adensado.

É interessante ressaltar que estes arquivos de saída são do tipo texto, não formatado, exigindo, portanto, sistematização e tratamento gráfico subsequentes, para a elaboração das correspondentes relações e perfis entre as grandezas estimadas. No presente trabalho, estes gráficos foram processados com o programa GRAPHER comercialmente disponível.

Para as análises no Programa CONDES0, é preciso conhecer, previamente, a geometria e o processo de enchimento do reservatório e as análises podem compreender as simulações por enchimento instantâneo ou enchimento escalonado (Figura 2.9 e Tabela

2.2). A taxa não constante de deposição deve ser aproximada para vários períodos sob taxas constantes e um máximo de 50 períodos, incluindo a taxa constante de deposição e a deposição instantânea, são admitidos nas simulações numéricas.

## **CAPÍTULO 3**

### **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS**

#### **3.1 – Introdução**

A priori, cumpre salientar que nos foram enviados três tipos de rejeitos, definidos pela empresa *AngloGold Ashanti* como sendo: rejeito de flotação, o qual representava o rejeito total do processo de flotação, o *backfill*, que era o *underflow* do processo da ciclonagem e o *pasta deep*, sendo este o rejeito na forma de pasta. Posteriormente, após o início dos trabalhos, a mencionada empresa nos enviou um quarto tipo de rejeito, denominado flotação, que representava o rejeito total da flotação e o qual, efetivamente, será gerado no processo de beneficiamento, para ocupação do reservatório da Barragem de Cuiabá. Com o objetivo de facilitar o entendimento e o estudo dos rejeitos a serem analisados, passou-se a utilizar as nomenclaturas que se seguem: flotação inicial, que corresponde o rejeito total da flotação, enviado na primeira remessa, *underflow* que representa o *backfill*, pasta que é a *pasta deep* e flotação que será o rejeito a ser utilizado no enchimento do reservatório.

A primeira fase dos estudos implicou a caracterização tecnológica dos rejeitos, visando determinar suas principais características físicas e as propriedades de compressibilidade e adensamento destes materiais em reservatórios, de modo a estabelecer parâmetros, adequados e confiáveis, para as simulações numéricas pretendidas.

Neste capítulo serão apresentados os resultados destes estudos, compreendendo o processo de amostragem adotado para a preparação dos corpos de prova utilizados nos ensaios, os resultados de caracterização tecnológica dos rejeitos analisados, bem como os resultados dos ensaios de adensamento com fluxo induzido por bomba de fluxo (HCT). Os ensaios de caracterização tiveram como objetivo determinar a granulometria e o peso específico dos grãos, segundo as normas da ABNT. O ensaio HCT foi realizado com a finalidade de se determinar as curvas de compressibilidade e

permeabilidade dos materiais analisados, leis constitutivas que são utilizadas no *input* das simulações numéricas descritas no Capítulo 5.

### 3.2 – Amostragem dos Rejeitos

O processo de amostragem de rejeitos de mineração constitui procedimento específico de suma relevância para o desenvolvimento dos ensaios de caracterização tecnológica e para a determinação das propriedades de engenharia destes materiais. Assim, técnicas distintas se aplicam em função da natureza e da metodologia de disposição final destes materiais. No presente estudo, como ainda não se tinha a definição do sistema de disposição a ser adotado, a investigação incluiu todos os tipos de rejeitos passíveis de geração, ou seja, rejeitos em polpa e rejeitos em pasta.

As amostras provenientes dos subprodutos gerados na fase de flotação dos processos de beneficiamento do minério aurífero na Planta de Queiroz (rejeitos em polpa) foram obtidas diretamente nos respectivos pontos de descarga, contemplando os rejeitos totais e a parcela do *underflow* da ciclonagem, utilizado como material de preenchimento (*backfill*) de minas exauridas. Estas amostras foram coletadas em galões de aproximadamente 50 litros, duas amostras para cada material. Um cuidado principal na amostragem foi o de garantir amostras com representatividade do teor de sólidos presentes.

Por outro lado, as amostras dos rejeitos do *overflow* da flotação, desaguados e na forma de pasta, foram retiradas diretamente do flume (canal de disposição dos rejeitos após deságüe) de planta piloto instalada em área do próprio empreendimento. Esta planta piloto foi utilizada em diversos testes para a geração de rejeitos espessados e estes testes em escala real invalidaram a adoção do processo, em função de análises de custos e dificuldades operacionais. Estes rejeitos são designados como ‘rejeitos em pasta’ e as suas amostras foram também colocadas em galões semelhantes aos utilizados para o armazenamento dos rejeitos em polpa.

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados amostradores especiais (Figura

3.1) inseridos nos rejeitos, após a retirada de parte da água sobrenadante e tomando-se os cuidados necessários para se obter uma amostra com uma efetiva distribuição granulométrica do rejeito coletado (Figura 3.2), sem interferências e/ou alterações por segregação ao longo do perfil do material depositado nos galões, particularmente, pela acumulação das frações mais finas dos rejeitos na parte superior da amostra.



Figura 3.1- Amostrador utilizado para a retirada do material dos galões.



Figura 3.2- Amostragem dos galões, após a retirada do material, via amostrador.

Após a retirada da amostra dos galões, a mesma foi quarteada e homogeneizada (Figura 3.3), para composição dos corpos de prova destinados aos ensaios de caracterização.



Figura 3.3 - Amostra homogeneizada para a moldagem dos corpos de prova.

### 3.3 – Resultados dos Ensaio de Caracterização

Os ensaios de caracterização tecnológica foram feitos de acordo com as especificações normativas da ABNT, compreendendo os ensaios de granulometria completa, índices de plasticidade e densidade das partículas sólidas. A tabela 3.1 apresenta os valores médios dos índices físicos, obtidos em seis ensaios executados para cada rejeito (três por galão). Tabela 3.1- Índices físicos dos rejeitos estudados.

rejeitos	pasta	underflow	Flotação inicial	Flotação
w (%)	33,3	38,9	81,8	81,8
G <sub>s</sub>	2,92	2,82	2,85	2,87
LL (%)	27	---	21	21
LP (%)	24	NP	19	19

A Figura 3.4 apresenta as curvas granulométricas dos rejeitos, obtidas de acordo com a norma NBR 7181. A polpa apresentou variações de pH entre 7,2 e 7,6. O fator de contração foi nulo para o *underflow*, de 0,5% para os rejeitos totais da flotação e de 1,0% no caso dos rejeitos do *overflow*.

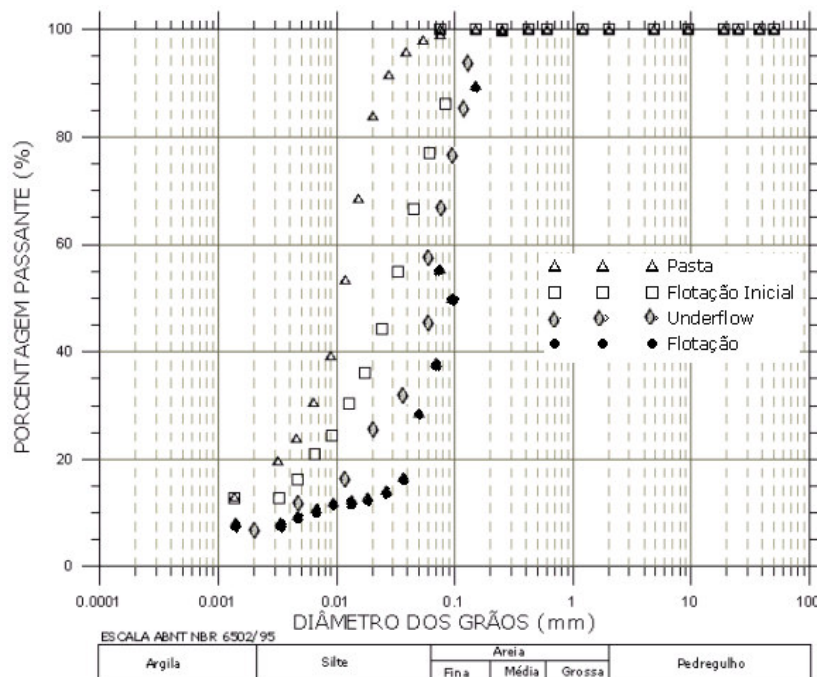


Figura 3.4 - Curvas granulométricas para os rejeitos ensaiados.



### 3.4 – Resultados dos Ensaio HCT com Bomba de Fluxo

Para as simulações numéricas do processo de disposição de rejeitos em reservatórios, impõe-se o conhecimento prévio das leis constitutivas de compressibilidade (relação índice de vazios  $\times$  tensão efetiva) e de permeabilidade (relação índice de vazios  $\times$  permeabilidade) dos materiais. A base de dados para a determinação destas relações é obtida por meio de diferentes técnicas experimentais em laboratório ou campo (Gomes, 2005). O Ensaio HCT é bastante prático e eficiente, apresentando uma grande economia de tempo, quando comparado com outros ensaios, e permitindo a determinação das características de adensamento para uma ampla faixa de tensões efetivas.

Como visto, a técnica do ensaio consiste em impor um fluxo descendente ao corpo de prova, induzindo o processo de adensamento por percolação. Em seguida, submete-se a amostra a estágios de carregamento e executa-se o ensaio de permeabilidade. A velocidade de fluxo através da amostra é controlada pela bomba de fluxo e as poropressões geradas durante o ensaio são medidas por meio de um transdutor diferencial de pressão (Diniz, 2001). A Figura 3.5 mostra o esquema geral do ensaio HCT com bomba de fluxo.

Segundo Znidarcic et al (1992), velocidades apropriadas para o adensamento induzido por percolação são aquelas que produzem geração de pressão diferencial, entre o topo e a base da amostra, entre 1,5 e 10 kPa. Quando, no estado permanente do ensaio, a pressão diferencial, através da amostra, for menor que 1,5 kPa, o ensaio deve ser repetido para uma maior taxa de fluxo. Para diferença superior a 10 kPa, o corpo de prova deverá ser descartado e o ensaio refeito sob uma menor taxa de fluxo.

Para o estágio de carregamento, cargas entre 10 e 100 kPa são apropriadas e, para a permeabilidade, velocidades em torno de 10 vezes menores que as utilizadas no adensamento são as mais indicadas. Os testes de carga e permeabilidade podem ser realizados na mesma amostra, sob vários incrementos de cargas, porém, somente um estágio do teste de carga é requerido para as análises no programa SICTA, que constitui o *software* de análise dos resultados (Znidarcic et al., 1992).

Todos os rejeitos analisados (rejeitos totais da flotação, overflow ou em pasta e underflow ou backfill) foram submetidos a ensaios HCT com bomba de fluxo, no Laboratório de Geotecnia da UFOP, para a determinação das suas leis constitutivas de compressibilidade e permeabilidade, sendo os resultados apresentados a seguir.

### 3.4.1 – Rejeitos de Flotação inicial e em Pasta

No caso dos rejeitos mais finos, adotou-se o arranjo convencional dos ensaios HCT com bomba de fluxo (Figura 3.5). As figuras 3.6 a 3.9 apresentam os resultados típicos dos ensaios realizados com os rejeitos de flotação e do *overflow* em pasta, em termos das poropressões geradas nas fases de adensamento e de permeabilidade, respectivamente.

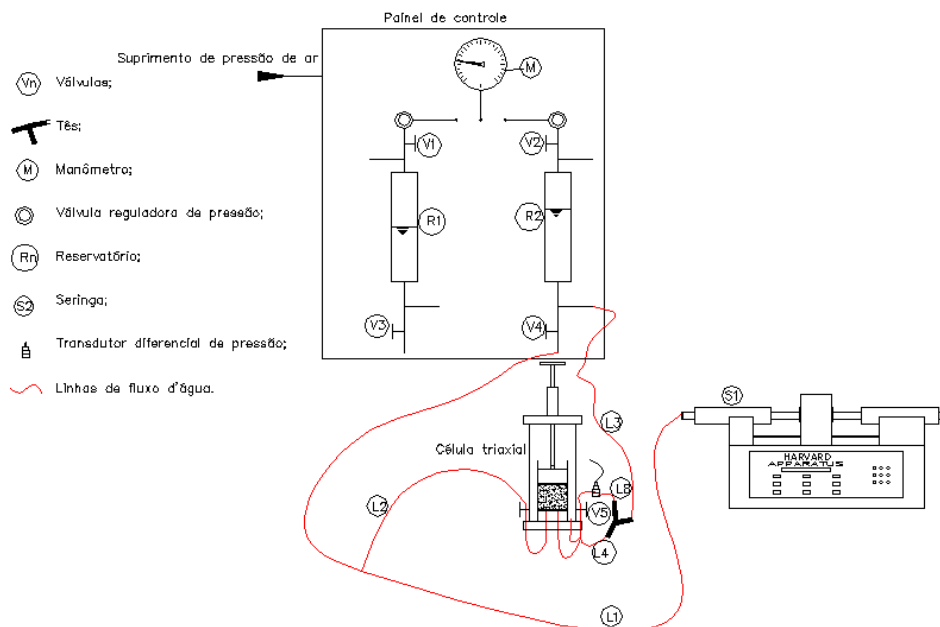


Figura 3.5 – Esquema convencional do Ensaio HCT com bomba de fluxo

Para as duas amostras, o ensaio de adensamento induzido por percolação foi realizado com uma taxa de fluxo constante (4,0 ml/min para rejeitos de flotação e 0,25ml/min para o *underflow*), até a estabilização da poropressão. O carregamento foi realizado em uma única etapa, submetendo-se a amostra a uma pressão efetiva de 50,79 kPa. Ao atingir o equilíbrio sob esse estado, realizou-se o ensaio de permeabilidade, aplicando-se também taxas constantes de fluxo (0,40 ml/min e 0,025 ml/min para os dois rejeitos, respectivamente), até se atingir, novamente, a estabilização das poropressões.

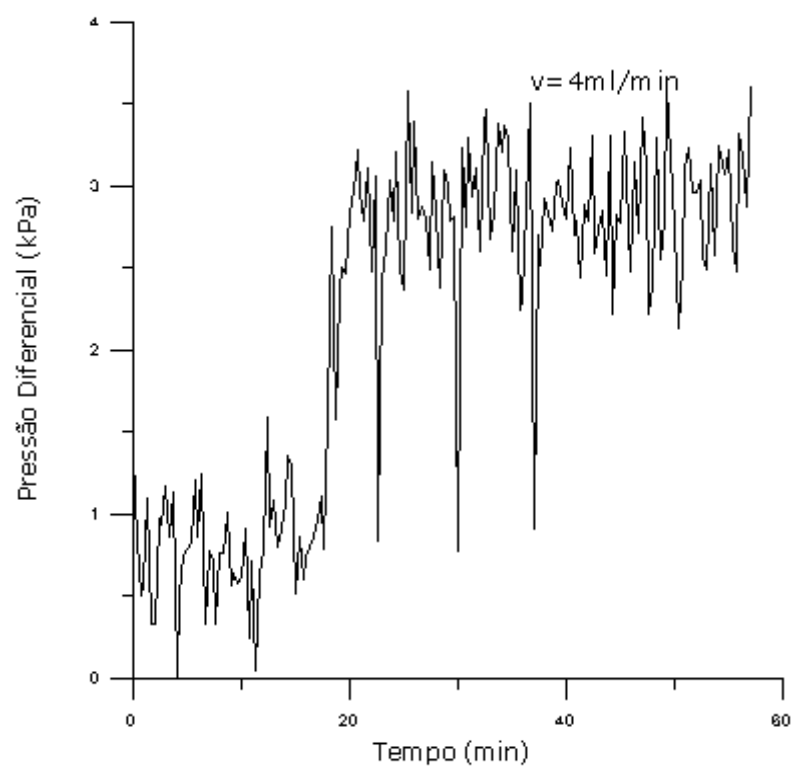


Figura 3.6 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação – Fase de Adensamento.

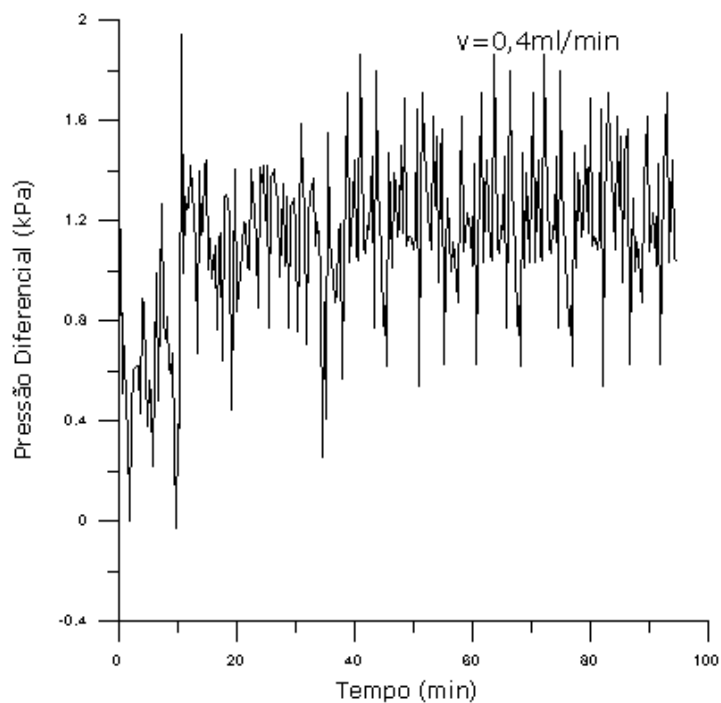


Figura 3.7- Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação – Ensaio de Permeabilidade.

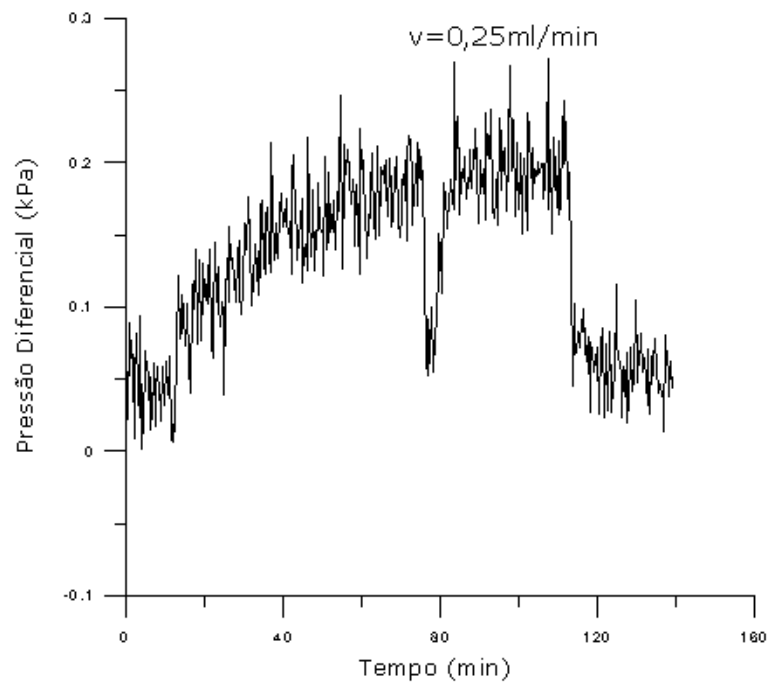


Figura 3.8 - Resultados do Ensaio HCT para o rejeito em pasta – Fase de Adensamento.

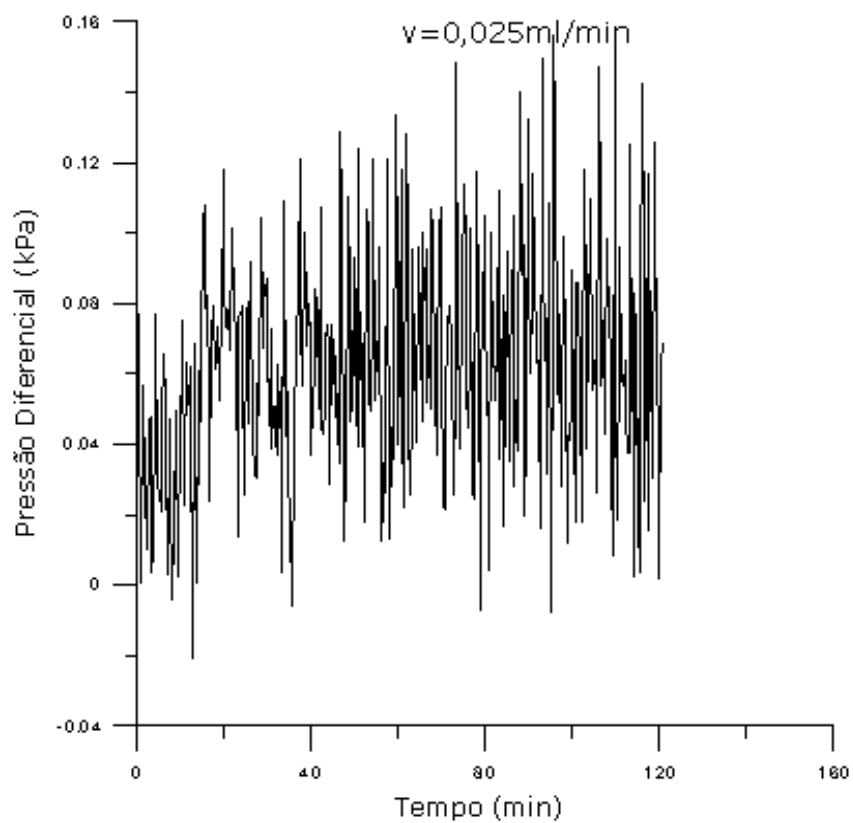


Figura 3.9 - Resultados do Ensaio HCT para o rejeito em pasta – Fase de Adensamento.

### 3.4.2 – Rejeitos de Flotação e de *Backfill*

Para a amostra mais grossa do rejeito de *backfill*, fez-se necessária a aplicação de maiores velocidades de fluxo, para garantir poropressões geradas na amostra entre 1,5 e 10 kPa. Tal fato exigiu uma alteração do esquema inicial do ensaio (Figura 3.10), mediante a utilização de duas seringas (o ensaio convencional utiliza apenas uma seringa), uma vez que a capacidade nominal de uma seringa era atingida antes do estado permanente de fluxo correspondente à estabilização das poropressões no corpo de prova. Para fins de comparação, fez-se um novo ensaio para o rejeito de flotação, tomando-se a amostra de maior granulometria coletada na amostragem.

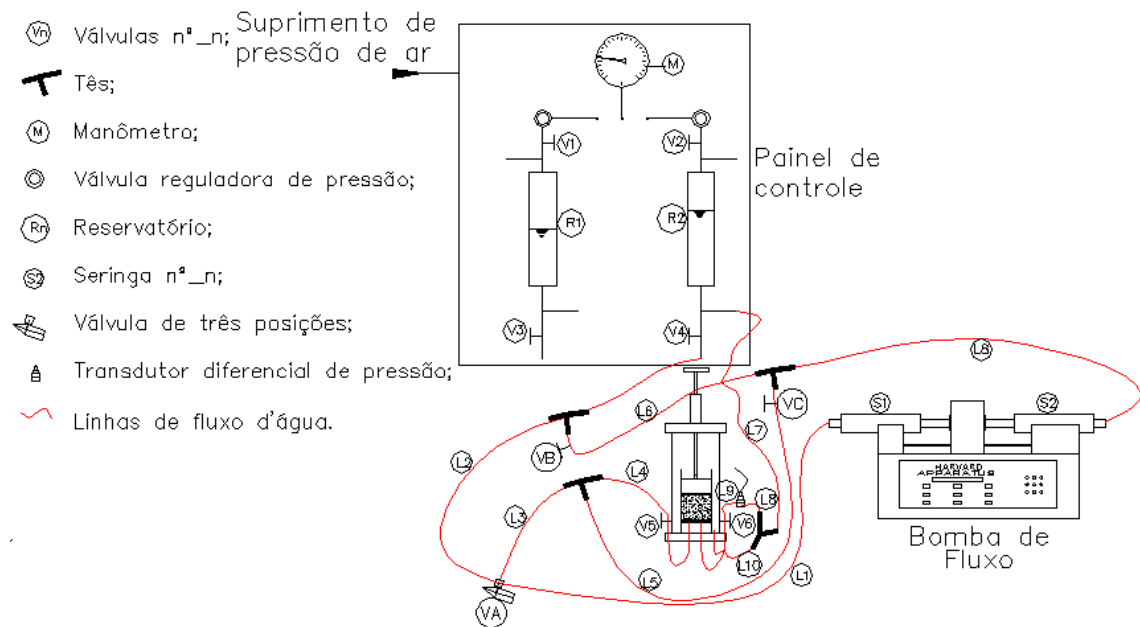


Figura 3.10 – Esquema modificado do Ensaio HCT com bomba de fluxo

Para o funcionamento com as duas seringas, procede-se da seguinte maneira: quando a seringa 1 estiver retirando água do sistema, a seringa 2 estará fazendo o inverso, ou seja, incorporando água ao sistema. Nesta situação, para que a água seja retirada da base da amostra, a válvula A deverá estar comunicando as linhas L1 e L3 e a válvula C deverá manter-se fechada, sendo a válvula B aberta. Na necessidade de uma reversão (seringa 2 passando a retirar água e a seringa 1 fornecendo água ao mesmo), a válvula A deverá manter a comunicação entre as linhas L1 e L2, fechando-se a válvula B e abrindo-se a válvula C. Este processo deve ser repetido até que o estado permanente seja alcançado.

As figuras 3.11 a 3.14 apresentam os resultados típicos dos ensaios realizados com os rejeitos de flotação e do *underflow* do *backfill*, em termos das poropressões geradas nas fases de adensamento e de permeabilidade, respectivamente.

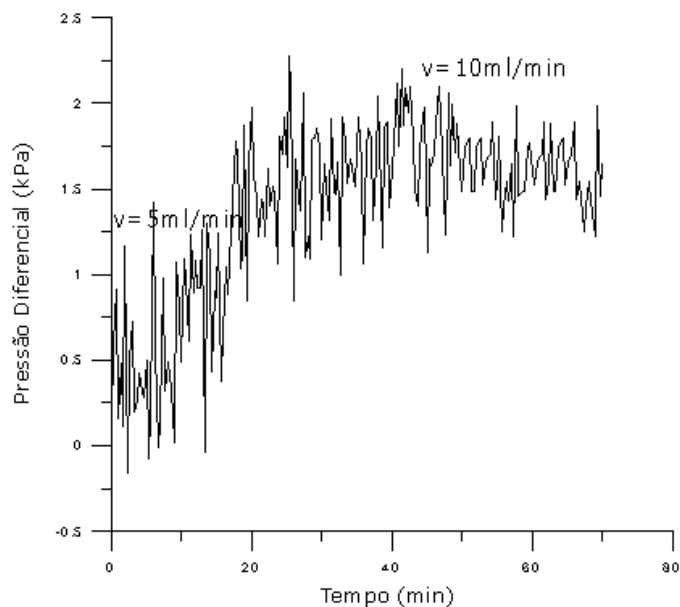


Figura 3.11 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de *backfill* – Fase de Adensamento.

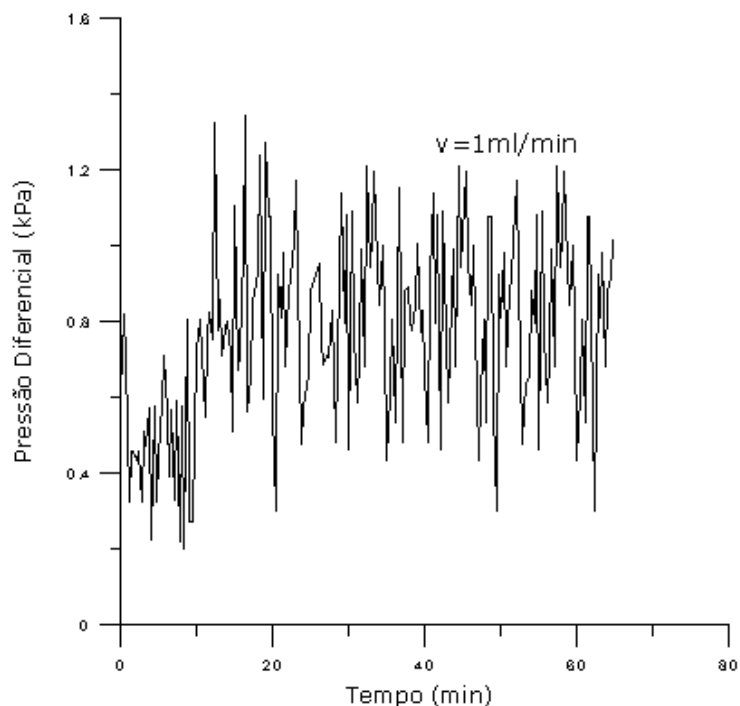


Figura 3.12 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de *backfill* – Fase de Permeabilidade.

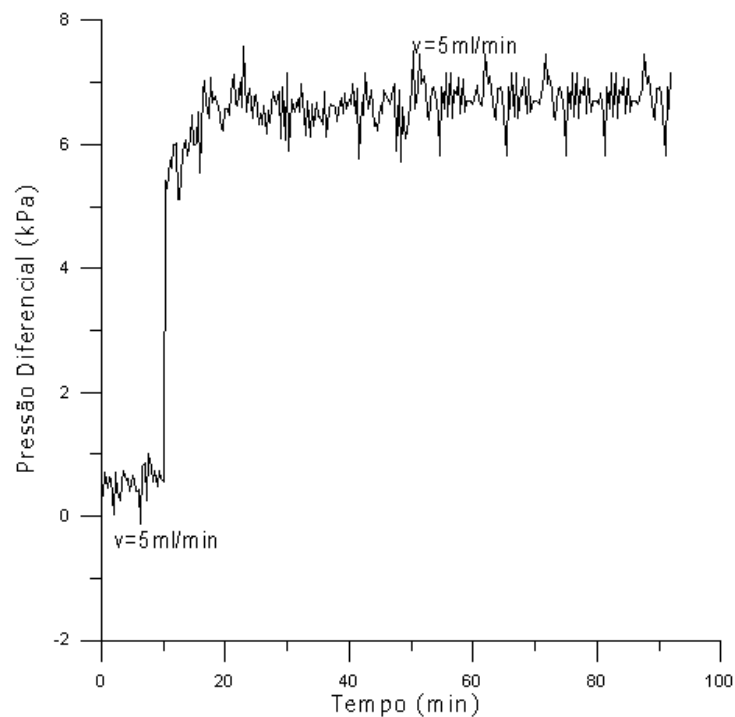


Figura 3.13 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação – Fase de Adensamento.

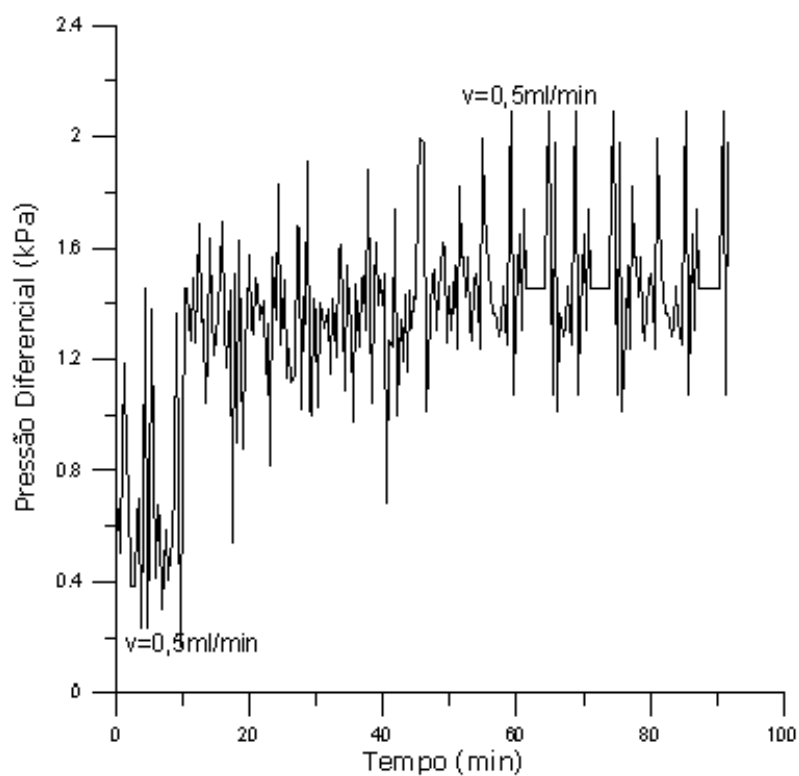


Figura 3.14 – Resultados do Ensaio HCT para o rejeito de flotação– Fase de Permeabilidade.

### 3.5 – Análises dos Resultados dos Ensaios HCT com Bomba de Fluxo

As análises dos resultados dos ensaios HCT com bomba de fluxo são feitas por meio de software específico, desenvolvido na Universidade do Colorado por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992). Este programa determina os parâmetros A,B, C, D e Z dos modelos matemáticos de compressibilidade e permeabilidade propostos por Liu (1990) e Somogyi (1979), respectivamente (Capítulo 2).

Neste programa os parâmetros B e D são independentes, sendo adotados valores iniciais e, através de cálculos iterativos, são determinados os parâmetros finais A,B, C, D e Z e, conseqüentemente, são plotadas as curvas de compressibilidade (relação índice de vazios x tensão efetiva) e as curvas de permeabilidade (relação índice de vazios x permeabilidade) dos materiais ensaiados. Os dados de entrada do programa constituem os dados obtidos nos ensaios HCT e estão sistematizados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados de entrada para o programa SICTA

dados	pasta	<i>underflow</i>	Flotação Inicial	flotação
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	28,626	27,694	27,920	28,125
H <sub>0</sub> (m)	0,046	0,049	0,049	0,063
e <sub>00</sub>	0,984	1,037	1,105	1,459
v (m/s)	6,67e-7	2,67e-5	8,00e-6	1,33e-5
H <sub>f</sub> (m)	0,045	0,048	0,047	0,048
$\sigma'_b$ (kPa)	3,828	1,660	2,558	6,692
e	0,820	0,900	0,820	0,764
$\sigma'$ (kPa)	50,079	50,016	50,016	50,016
k(m/s)	4,56e-7	3,31e-6	6,27e-7	7,73e-7

Com a aplicação do programa SICTA e, após iterações entre os dados, foram obtidos os valores dos parâmetros das leis de compressibilidade e de permeabilidade dos rejeitos ensaiados (Tabela 3.3).



Tabela 3.3 - Parâmetros de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos analisados

parâmetros	pasta	<i>backfill</i>	Flotação Inicial	flotação
A	1,216	1,098	1,005	1,995
B	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
Z	0,01400	3,1240	0,18800	0,00036
C (m/s)	1,26e-7	1,82e-6	1,06e-6	1,997e-7
D	2,901	3,553	3,977	1,996

Com os valores destes parâmetros, ficam estabelecidos os modelos constitutivos de compressibilidade de Liu e de permeabilidade de Somogyi (Capítulo 2), permitindo o traçado das respectivas curvas de compressibilidade (Figura 3. 15) e de permeabilidade (Figura 3.16) dos rejeitos ensaiados.

### 3.6 – Resultados dos Ensaios Especiais em Rejeitos em Pasta

Embora não se tenha mostrado uma alternativa viável, a possibilidade da disposição dos rejeitos de flotação sob a forma de pasta demandou uma série de ensaios especiais para a sua completa caracterização tecnológica. Tais discussões fogem ao escopo do trabalho, por não terem sido implementados os estudos subseqüentes, mas uma das análises abordou a caracterização da natureza e do comportamento geotécnico destes rejeitos para diferentes teores de sólidos presentes. Com efeito, um dado rejeito, sob diferentes concentrações dos sólidos presentes, pode comportar-se de formas distintas e apresentar resistências diversas.

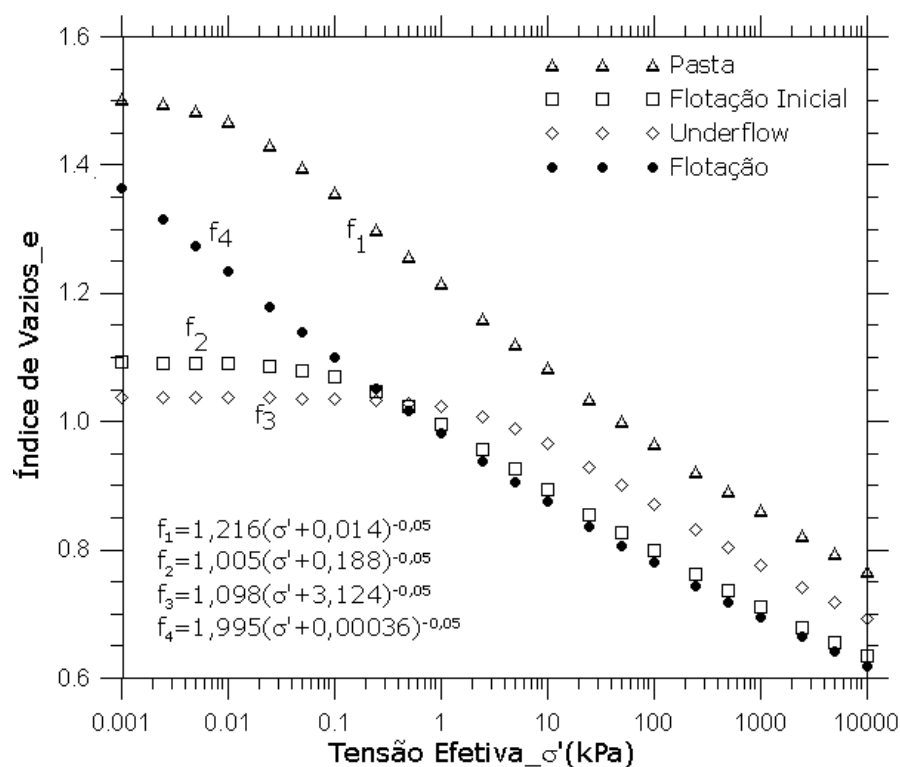


Figura 3.15 - Curvas de compressibilidade dos rejeitos ensaiados.

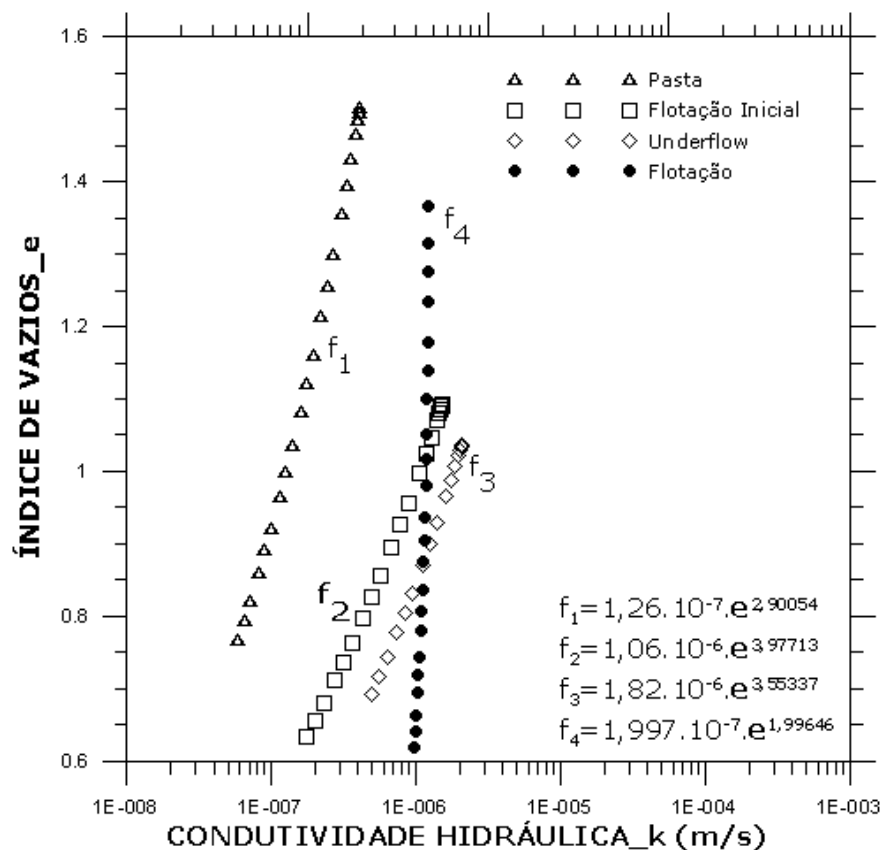


Figura 3.16 - Curvas de permeabilidade dos rejeitos ensaiados.

Esta análise é estabelecida a partir da representação gráfica das variações de resistência dos rejeitos (comumente expressa em termos de tensões de escoamento - 'yield stress') em função das respectivas concentrações (tipicamente, em termos do teor de sólidos presentes, expresso em peso). Com o desaguamento, um acréscimo do teor de sólidos implica um correspondente aumento da resistência do rejeito.

As Figuras 3.17 e 3.18 mostram estas variações de resistência e de naturezas para os rejeitos totais de flotação e para os rejeitos do *overflow*, respectivamente. Nota-se, então, um rápido e substancial acréscimo de resistência a partir de um dado valor de concentração do rejeito e esta zona de inflexão da curva permite a distinção de três regiões características do gráfico, correspondentes aos rejeitos em polpa (nenhuma ou baixos valores de resistência), os rejeitos de elevada densidade e os rejeitos na consistência de pasta. Tais distinções foram estabelecidas, adotando-se tensões de escoamento de referência iguais a 10 e 100 kPa (PCCE, 2004). Por estes critérios, torna-se possível estabelecer uma classificação dos rejeitos de flotação da Planta de Cuiabá, em função dos teores de sólidos presentes (Tabela 4.4).

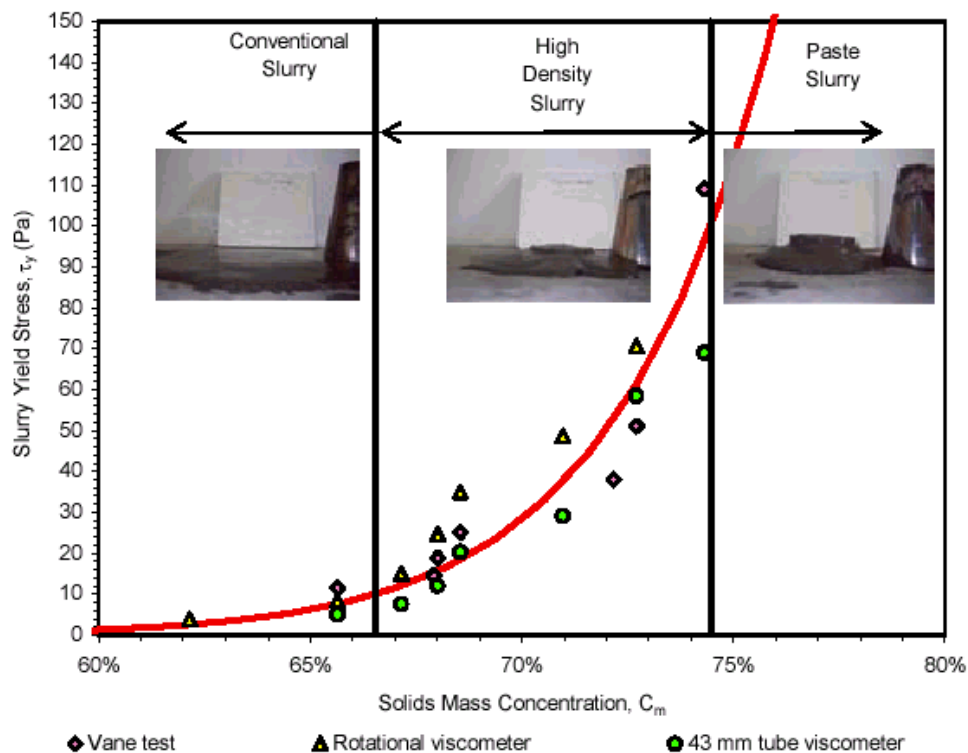


Figura 3.17 – Classificação dos rejeitos totais de flotação.

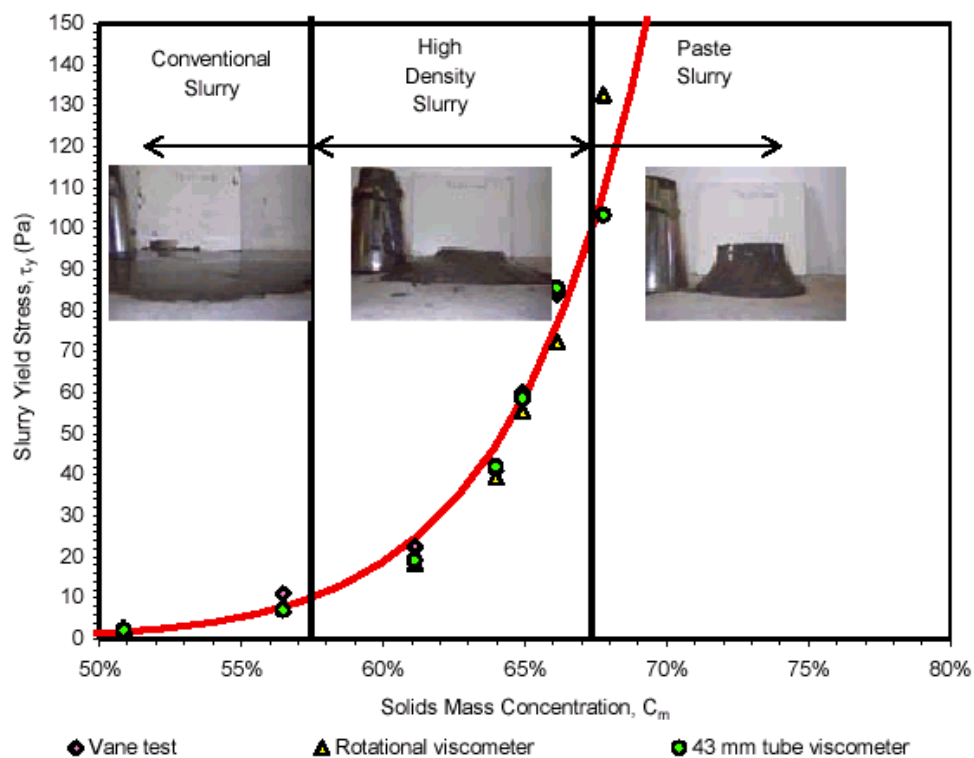


Figura 3.18 – Classificação dos rejeitos do *overflow* de flotação.

Tabela 3.4 – Classificação dos rejeitos de flotação da Planta do Queiroz (PCCE, 2004)

	polpa	rejeito espessado	pasta
rejeitos de flotação	$0 \leq C_S \leq 66,5\%$	$66,5\% \leq C_S \leq 74,5\%$	$C_S > 74,5\%$
rejeitos de <i>overflow</i>	$0 \leq C_S \leq 57,5\%$	$57,5\% \leq C_S \leq 67,4\%$	$C_S > 67,4\%$

$C_S$  : concentração de sólidos em peso

Após esta etapa de caracterização tecnológica dos rejeitos, em polpa e em pasta, a empresa *AngloGold Ashanti* optou por um processo de disposição convencional dos rejeitos de flotação, dando início, então, à concepção e ao projeto da Barragem de Cuiabá (Capítulo 4).

## CAPÍTULO 4

### ESTUDO DE CASO – BARRAGEM DE CUIABÁ

#### 4.1 – Introdução

A Barragem de Cuiabá constitui o sistema de contenção destinado a receber os rejeitos de ouro oriundos do projeto de expansão da mina de ouro de Cuiabá, da *AngloGold Ashanti*. A mina está localizada entre os municípios de Sabará e Caeté, sendo o minério transportado por meio de um teleférico com 15 km de extensão e capacidade nominal instalada de 830.000 toneladas de minério por ano. O minério é processado na chamada Planta Industrial do Queiroz, gerando rejeitos que serão armazenados na nova barragem, com localização prevista nas vizinhanças da planta (Figura 4.1).

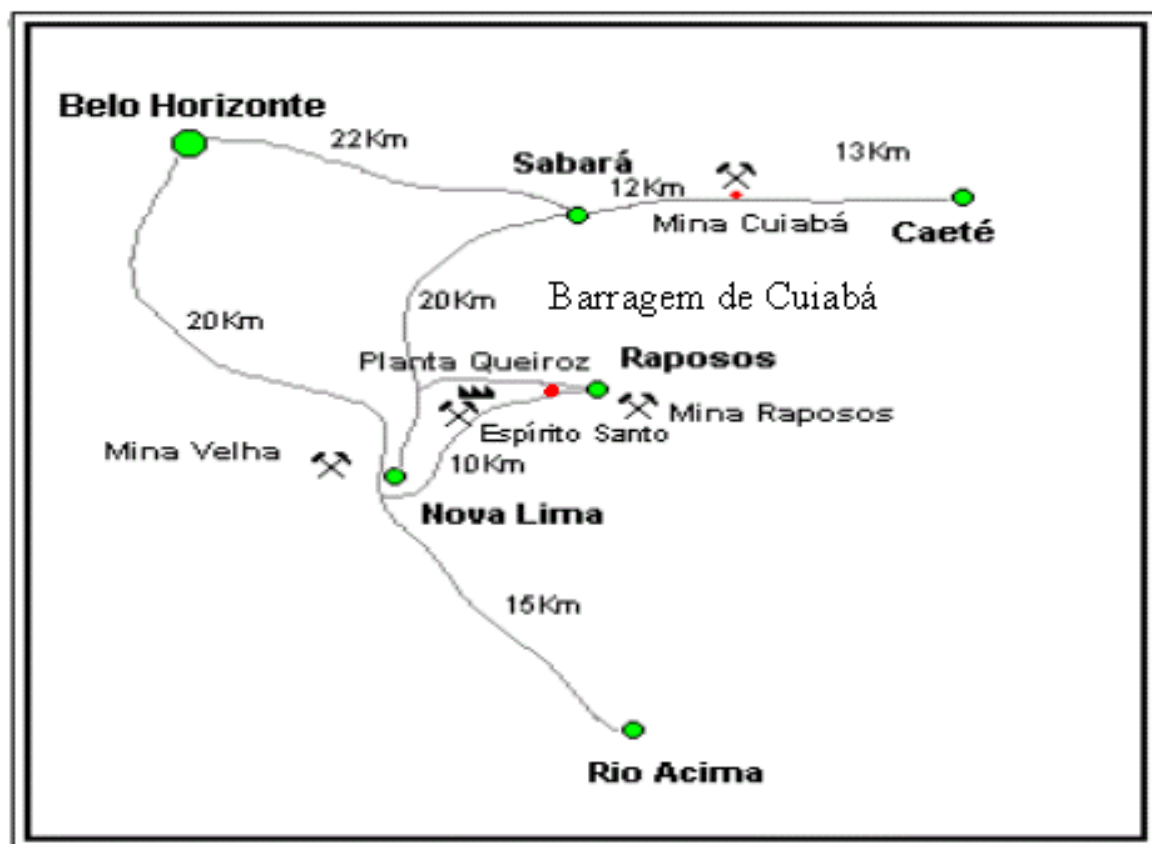


Figura 4.1 – Localização Prevista para a Barragem de Cuiabá (Costa, 2006)

## 4.2 – Geração de Rejeitos na Planta de Queiroz

O processo industrial é bastante complexo, envolvendo diferentes etapas e técnicas de processamento para a extração do ouro do minério bruto, gerando, assim, diferentes tipos de rejeitos. A produção média mensal da planta (2005) é de 515 kg de ouro, 60 kg de prata e 12.000 toneladas de ácido sulfúrico.

O processamento industrial do minério bruto compreende três etapas distintas: Tratamento Mecânico, Hidrometalurgia e Pirometalurgia. O tratamento mecânico inclui os processos de moagem, concentração gravimétrica, flotação e espessamento. A fase hidrometalúrgica engloba os processos de lixiviação, filtragem, precipitação, adsorção com carvão ativado e eluição. A fase final, etapa pirometalúrgica do tratamento, inclui os processos de ustulação, planta de ácidos e de tratamento de efluentes (Figura 1.2).

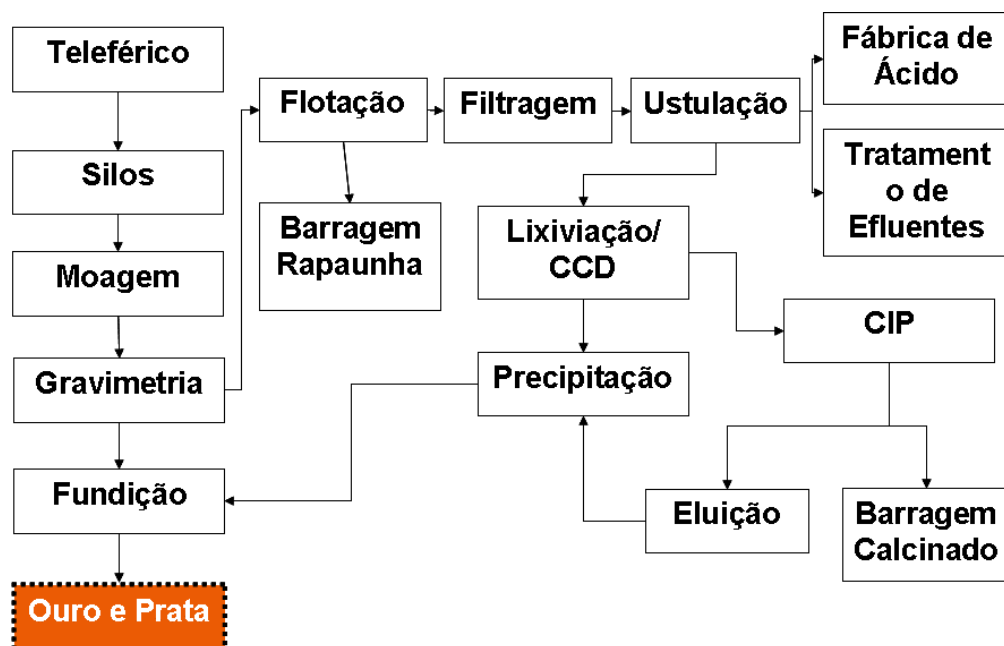


Figura 4.2 – Fluxograma da Planta Industrial do Queiroz (Costa, 2006)

A moagem tem a função básica de reduzir o tamanho das partículas do minério. Na concentração gravimétrica, um conjunto de mesas concentradoras processa o minério moído oriundo da descarga dos moinhos, obtendo-se um concentrado que é enviado para fusão e refino; nesta etapa, recuperam-se 25% do ouro alimentado.

O rejeito da concentração gravimétrica é submetido a uma etapa de classificação por hidrociclones que separam o material em *underflow* e *overflow*. O *underflow* é composto pela fração grosseira de minério que é retornada para os moinhos. O *overflow* dos hidrociclones, que é composto das frações finas dos minérios moídos, é adensado em espessador e, após adensado em forma de polpa, é enviado para a etapa subsequente de flotação.

A etapa de flotação consiste na separação entre os materiais nobres (ouro, sulfetos e grafite) na forma de um concentrado em que o teor de ouro passa de 7 para 30 ppm e o teor de enxofre de 6,5 para 32%, obtendo-se uma massa flotada em torno de 20% da massa alimentada e a separação da ganga, que permanece no rejeito (Murilo, 2006). Os rejeitos de flotação são, então, ciclizados, sendo a fração grosseira (*underflow*) utilizada no enchimento (*back-fill*) de galerias e poços da Mina Velha (exaurida) e na construção do maciço da Barragem de Calcinados e a fração fina (*overflow*) depositada na barragem de rejeitos de Rapaunha, estruturas de armazenamento de rejeitos atualmente existentes.

Na etapa de ustulação, o concentrado é submetido ao processo de calcinação. O resíduo sólido do ustulador que contém o ouro é designado como calcinado que, após resfriado e sob a forma de polpa, é adensado em um espessador. Na hidrometalurgia, o *underflow* do espessador de calcinado, também na forma de polpa, é submetido a processos de lixiviação, filtração, precipitação e adsorção, para recuperação do ouro residual contido. Após o último tanque de adsorção, os rejeitos dos calcinados são, finalmente, bombeados e depositados em uma barragem de contenção, cujo nome identifica a natureza dos rejeitos – Barragem de Calcinados.

Além das barragens citadas de Calcinados e Rapaunha (Figura 4.3), o sistema de disposição de rejeitos da Planta de Queiroz inclui uma terceira barragem (Cocuruto, com capacidade de armazenamento de rejeitos completada em 1995) e mais cinco valas especiais, impermeabilizadas com geomembranas, para a deposição da chamada ‘lama arsenical’, oriunda da planta de tratamento de efluentes da fase pirometalúrgica da planta. Este sistema passa a incluir agora a Barragem de Cuiabá, descrita a seguir.



Figura 4.3 – Vista geral das barragens de Rapaunha e de Calcinados

Em todas estas alternativas de sistemas de disposição, aplica-se a técnica convencional de disposição dos rejeitos, sob a forma de polpa em barragens, pelo processo de aterro hidráulico (Klohn, 1981; Vick, 1983; Kupper, 1991; Gomes, 2005). As barragens de aterro hidráulico são estruturas construídas para reter os rejeitos e os efluentes oriundos da planta de beneficiamento e, geralmente, são construídas em duas etapas distintas. A primeira etapa consiste na construção de um dique de partida, geralmente em solo compactado, e a segunda etapa corresponde à construção contínua, por alteamentos sucessivos, comumente utilizando a fração grossa dos rejeitos.

O método do aterro hidráulico é muito atrativo e vantajoso, principalmente pelas características de produção e transporte dos rejeitos, o que permite praticar custos baixos quando comparados aos aterros convencionais executados com solo compactado. A construção pode ser feita, inclusive, pela própria mineradora que define a velocidade da construção com base em suas necessidades de disposição, o que permite, também, a diluição dos custos de construção ao longo da vida útil da estrutura. Esta metodologia



construtiva permite, também, no decorrer da execução, revisões periódicas no projeto em função das variações das características do rejeito.

Entretanto, na fase prévia de anteprojeto, a AngloGold Ashanti analisou a possibilidade da disposição dos rejeitos, oriundos da fase de flotação, sob a forma de pasta. Rejeitos em pasta consistem em rejeitos submetidos a algum tipo de desaguamento mecânico, feito comumente em espessadores de grande porte, associado ao emprego de algum tipo de aditivo químico, tipicamente um agente hidratante, como cimento Portland, por exemplo (Gomes, 2005).

No estudo destes rejeitos, as propriedades a serem investigadas são: granulometria (tipicamente a fração de finos), mineralogia do material e análise química da água, compreendendo medidas de pH, cátions presentes e concentração iônica. Estes estudos foram implementados na matriz da empresa, na África do Sul, envolvendo os rejeitos totais da flotação e suas componentes de *overflow* e *underflow* (Figuras 4.4 e 4.5).



Figura 4.4 – ‘Slump Test’ do *overflow* de flotação

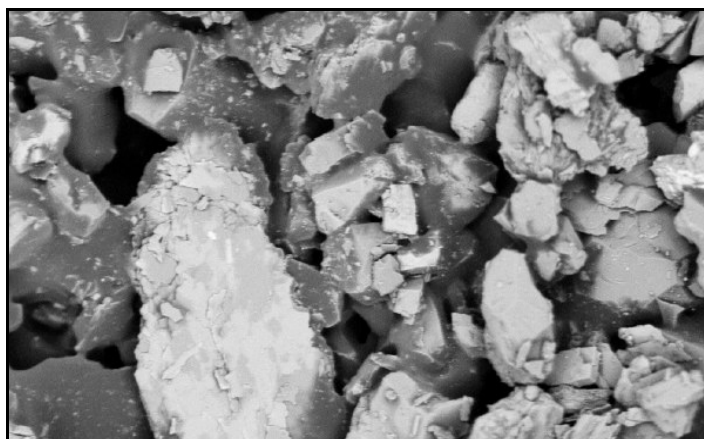


Figura 4.5 – Microfotografia do *underflow* de flotação

#### 4.3 – Concepção e Projeto da Barragem de Cuiabá

Como visto, após a flotação, o minério concentrado é transportado para a Planta do Queiroz para processamento, enquanto os rejeitos são encaminhados a um espessador, para redução dos teores de umidade e para descarte final na barragem. Na barragem, o lançamento ocorre a montante do reservatório, de forma a manter materiais mais grossos junto ao ponto de descarga e os materiais de granulometria mais fina mais próximos à estrutura de contenção, juntamente com a água proveniente da polpa.

No caso de minas de ouro, praticamente todo o minério beneficiado é transformado em rejeito, já que os teores de ouro são da ordem de algumas gramas por tonelada. Assim, são geradas grandes quantidades de rejeitos, exigindo estruturas de grande porte para a sua contenção. A Tabela 4.1 apresenta a previsão dos volumes anuais de rejeitos a serem gerados durante a vida útil da Mina de Cuiabá.

Tabela 4.1 – Produção anual de rejeitos da flotação do minério de ouro de Cuiabá

ano	volume médio mensal (m <sup>3</sup> )	volume de rejeitos		
		anual		total
		toneladas	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2007	28.428,64	460.544,00	341.143,70	341.143,70
2008	31.208,08	505.571,00	374.497,04	715.640,74
2009	32.930,86	533.480,00	395.170,37	1.110.811,11
2010	33.084,38	535.967,00	397.012,59	1.507.823,70
2011	33.713,95	546.166,00	404.567,41	1.912.391,11
2012	33.768,33	547.047,00	405.220,00	2.317.611,11
2013	33.471,91	542.245,00	401.662,96	2.719.274,07
2014	33.697,41	545.898,00	404.368,89	3.123.642,96
2015	33.549,32	543.499,00	402.591,85	3.526.234,81
2016	33.810,74	547.734,00	405.728,89	3.931.963,70
2017	32.967,22	534.069,00	395.606,67	4.327.570,37
2018	21.123,89	342.207,00	253.486,67	4.581.057,03

A Barragem de Cuiabá constitui uma barragem convencional, projetada e construída com a mesma tecnologia para barragens de contenção de água, ou seja, em aterro compactado em múltiplas camadas (CMEC, 2005). O projeto contempla metodologia construtiva por alteamentos a jusante, em três etapas (Figura 4.6), previstas em termos das capacidades de armazenamento dos rejeitos para 4, 5 e 3 anos, respectivamente.

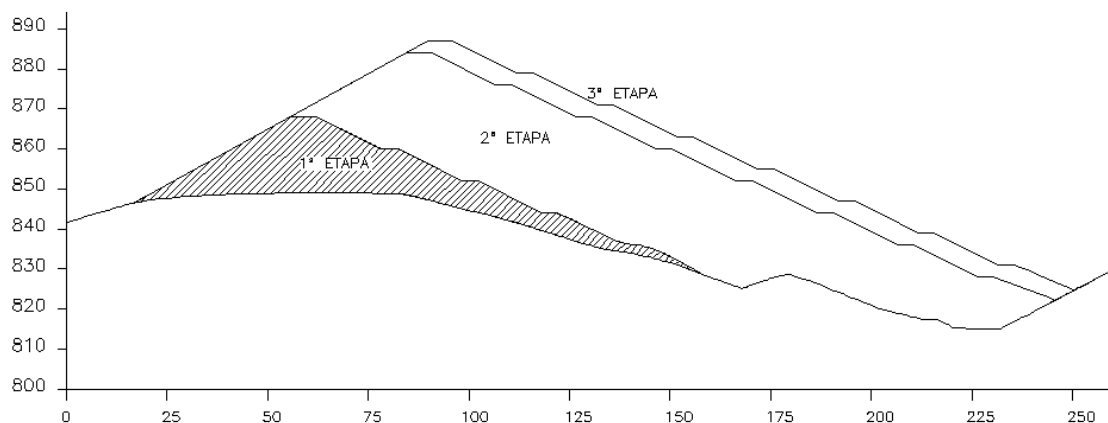


Figura 4.6 - Alteamentos previstos para a Barragem de Cuiabá (CMEC, 2005).

Com base no arranjo definido para a barragem e no levantamento topográfico da área, tornou-se possível estabelecer a curva cotas x volumes para o barramento (Figura 4.7).

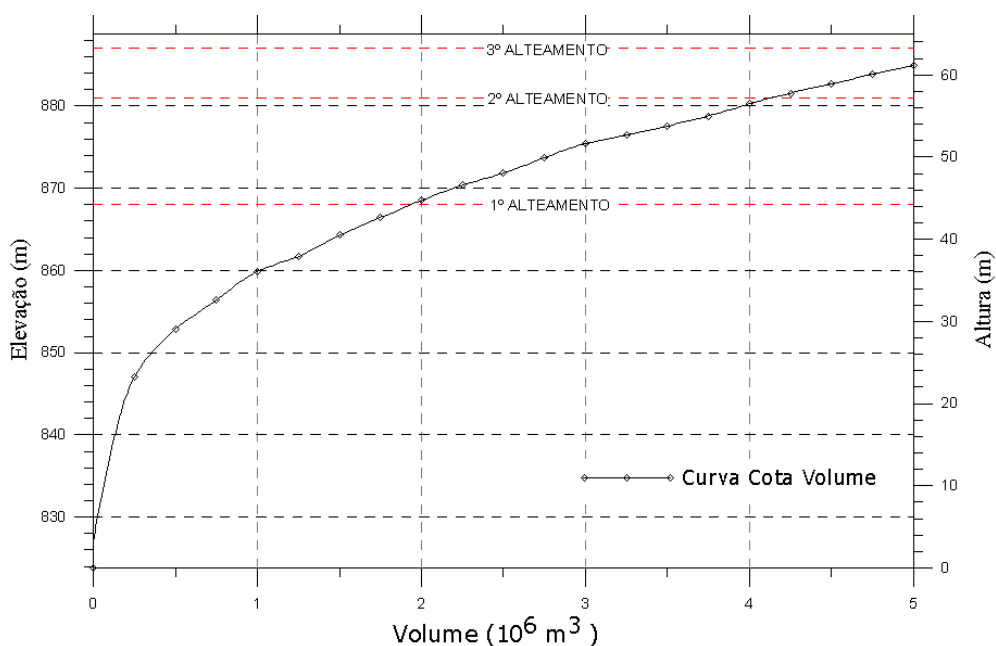


Figura 4.7 – Curva cotas x volumes para a Barragem de Cuiabá (CMEC, 2005)

Com base na correlação direta dos dados da Tabela 4.1 e a curva cotas x volumes obtida na Figura 4.7, definiu-se o cronograma de ocupação do reservatório e as cotas dos alteamentos previstos, levando-se em conta os períodos previstos para a acumulação dos rejeitos gerados. Assim, considerando-se os volumes a serem armazenados ao longo de 4 anos, 9 anos e 12 anos, correspondentes a volumes acumulados de 1.507.823,70 m<sup>3</sup>, 3.526.234,81 m<sup>3</sup> e 4.581.057,03 m<sup>3</sup>, respectivamente, foram estabelecidas as cotas das cristas dos três alteamentos como correspondentes às cotas 865m, 878m e 884 m, respectivamente.

A altura final da barragem foi fixada de forma a atender, simultaneamente, as seguintes três condições: disponibilidade do reservatório para armazenamento do volume total dos rejeitos gerados até a exaustão da mina, disponibilidade de um volume de espera no reservatório para amortecimento de cheia, com recorrência decamilenar e borda livre suficiente para absorver as ondas provocadas na superfície líquida do reservatório.

Estudos hidrológicos foram feitos para estimar a altura adicional necessária da crista da barragem para o amortecimento de cheias, obtendo-se valores de 1,36m, 0,87m e 0,73m, para as três etapas de alteamento, respectivamente. Para uma maior segurança, admitiu-se uma altura equivalente a 1,5m para amortecimento de cheias para os três alteamentos.

Considerando-se, ainda, uma folga mínima de 1,5m para absorção de ondas superficiais no reservatório, além da altura adicional de 1,5m para amortecimento de cheias, a crista da barragem ficou definida na elevação 868,0m na primeira etapa, 881,0m na segunda e 887,0m na etapa final.

O sistema de drenagem interna foi projetado na forma de filtros verticais e horizontais. Os filtros verticais são compostos apenas por areia, ao passo que o tapete horizontal é do tipo sanduíche, sendo composto por uma camada de brita entre duas camadas de areia (Figura 4.8). Adicionalmente, foi prevista, também, a construção de um dique de contenção de sedimentos a jusante da barragem, para conter as eventuais partículas sólidas carregadas durante as fases de construção e de operação da barragem (Figura 4.9).

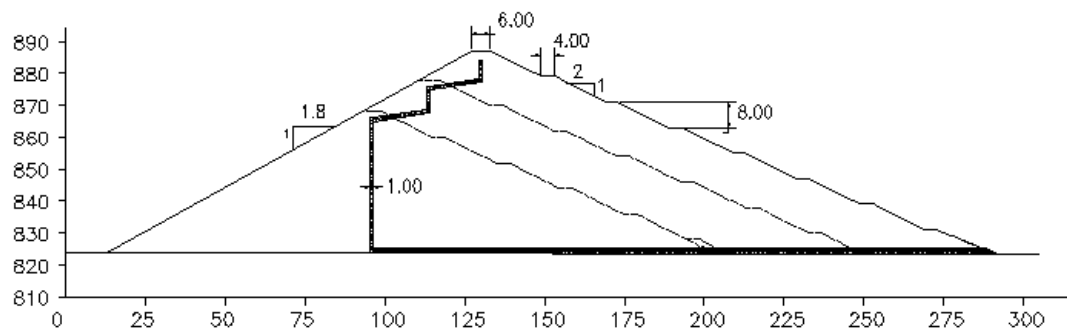


Figura 4.8 – Sistema de drenagem interna da barragem para os três alteamentos.

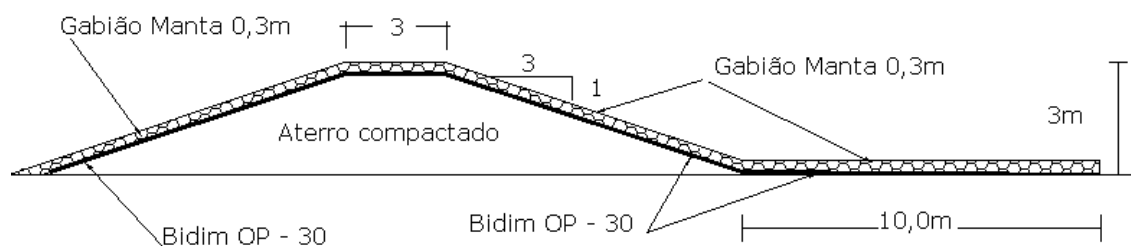


Figura 4.9 – Dique de contenção de sedimentos.

O vertedor proposto para a barragem é do tipo poço, composto por uma galeria sub-horizontal localizada sob o aterro da barragem, ao longo da ombreira direita e conectada a uma galeria sub-vertical que se eleva pela ombreira direita acompanhando o pé de montante da barragem (Figura 4.10).

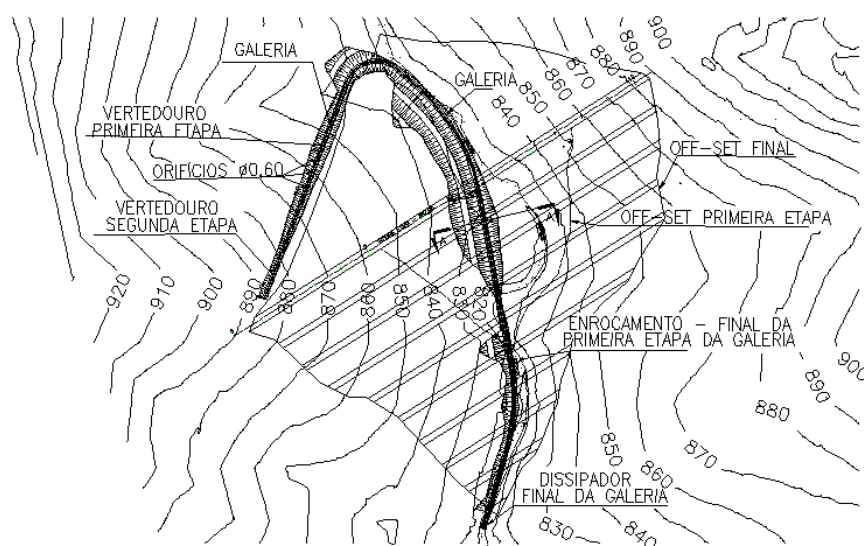


Figura 4.10 – Localização e geometria do vertedor da barragem (CMEC, 2005).

A galeria do vertedouro, em concreto armado, possui uma seção mínima de 1,2 m de largura por 1,8m de altura e, no seu trecho mais inclinado, possui uma escadaria com uma laje de fundo, permitindo, assim, inspeções de avaliação de danos e/ou eventuais defeitos estruturais.

A drenagem superficial é prevista sob a forma de canaletas construídas ao pé de cada berma, bem como nas laterais da estrutura (canaletas das ombreiras), como mostra a Figura 4.11. As canaletas das bermas coletam as águas que escoam dos taludes de jusante da estrutura da barragem e as conduzem às canaletas das ombreiras, que, por sua vez, deverão encaminhá-las à zona de dissipação a jusante.

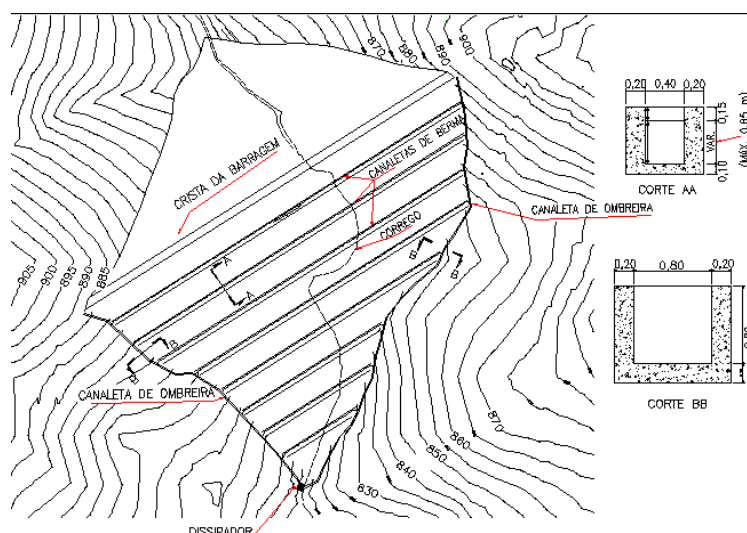


Figura 4.11 – Sistema de drenagem superficial do talude de jusante (CMEC, 2005).

A drenagem superficial será executada por etapas, sendo que, a cada nova etapa a construir, a anterior será removida para permitir o novo alteamento. O sistema de drenagem superficial, bem como o plantio de gramíneas, será implantado de acordo com a evolução dos alteamentos.

Quanto ao controle e monitoramento da barragem, foi prevista a instalação da seguinte instrumentação: medidores de nível de água, instalados no corpo da barragem; medidor de vazão, instalado no pé da barragem e régua para medições dos níveis do reservatório (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Instrumentação da barragem - medidores de NA e medidor de vazão (CMEC, 2005).

#### 4.4 – Análises da Estabilidade da Barragem de Cuiabá

A investigação geotécnica das propriedades dos materiais de fundação da barragem e do vertedouro consistiu na execução de poços de inspeção (com retirada de blocos) e de sondagens a percussão com medidas de SPT. Com base nestes estudos, constatou-se que os materiais localizados na área da barragem são constituídos por solos silto-argilosos, oriundos da decomposição de filitos.

No fundo do vale, os solos presentes variam, em média, entre 1,0 e 3,0m de espessura, sobrepondo-se a filitos duros, com comportamento geotécnico de rocha alterada. Nas ombreiras, as camadas de solo tendem a aumentar de espessura e, em toda a área, ocorre uma camada de solo vegetal com espessura média de 0,30m. A permeabilidade dos

materiais da fundação foi estimada com base em ensaios de infiltração *in situ* e variou entre  $10^{-5}$  m/s a  $10^{-7}$  m/s.

Para os materiais do aterro, os parâmetros geotécnicos foram obtidos a partir de ensaios triaxiais em laboratório tipo CIU (análises sob tensões efetivas), com medidas das poropressões (Geolabor, 2004) e os valores adotados nas análises da estabilidade da barragem estão indicados na Tabela 4.2. Para os materiais dos filtros e da fundação, os parâmetros de resistência foram estimados.

Tabela 4.2 - Parâmetros de resistência dos materiais da barragem - tensões efetivas(CMEC, 2005).

material	ângulo de atrito ( ° )	coesão (kPa )	peso específico (kN/m <sup>3</sup> )
aterro saturado	33,0	20	19,5
aterro seco	34,0	10	18,5
areias/britas dos filtros	30,0	0	19,0
fundação	34,0	10	18,5

Tomando-se a seção de altura máxima da barragem como referência, admitiu-se, de forma bastante conservativa, a posição da linha freática atingindo o filtro superior no mesmo nível do reservatório (Figura 4.13), desconsiderando-se, portanto, quaisquer perdas de carga a montante do filtro.

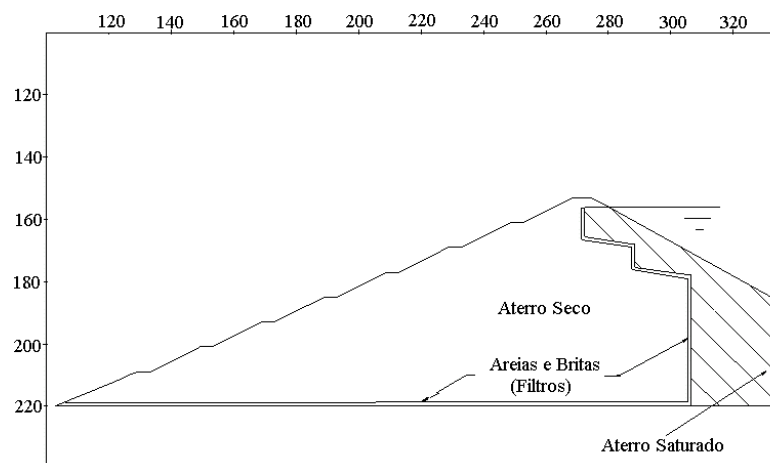


Figura 4.13 – Posição da Linha Freática para as Análises de Estabilidade (CMEC, 2005).



Para esta hipótese de fluxo e para a condição de regime permanente e reservatório cheio (condição mais crítica), as análises da estabilidade (método de Bishop Modificado) da Barragem de Cuiabá, em termos do projeto proposto, indicaram valores de coeficientes de segurança maiores que 2,0 (Figura 4.14).

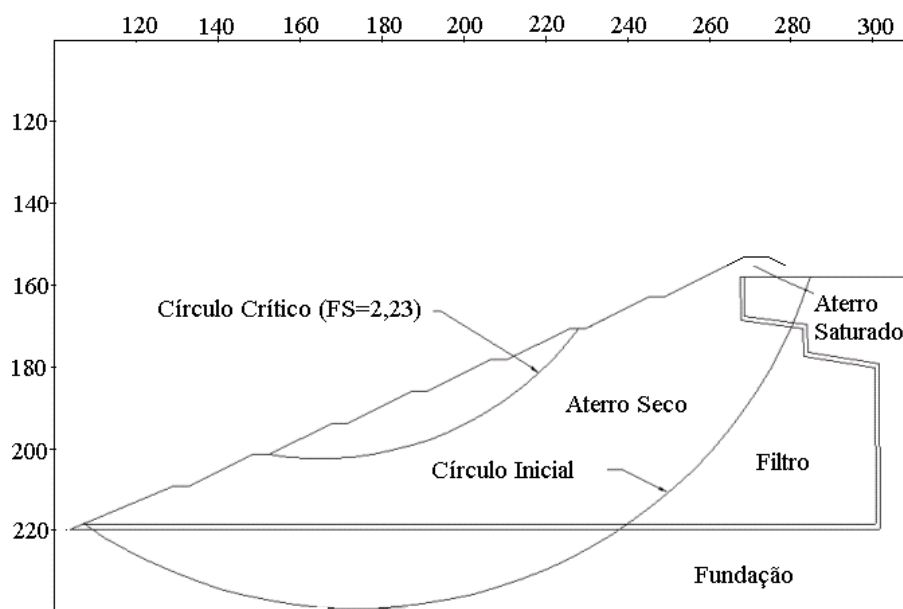


Figura 4.14 – Análise da Estabilidade da Barragem de Cuiabá (CMEC, 2005).

## **CAPÍTULO 5**

### **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO**

#### **5.1 – Introdução**

Com base nos estudos preliminares e na consequente decisão pela não aplicabilidade da técnica de rejeitos espessados, recaiu-se na hipótese de uma disposição convencional em barramento por aterro hidráulico, com rejeitos sob a forma de polpa. Nesta concepção, descartou-se também a hipótese de ciclonagem e, assim, os rejeitos totais da flotação passaram a constituir os materiais efetivamente a serem descartados e armazenados na estrutura de contenção prevista.

Em sistemas de disposição de rejeitos de mineração por via úmida, é imperativo estabelecer previamente os mecanismos de sedimentação da polpa (compressibilidade e adensamento), de forma a quantificar a capacidade de armazenamento do reservatório ao longo da vida útil do empreendimento. Este modelo deposicional é afetado por um grande número de fatores, resultando também em um processo de segregação das partículas, diretamente associado à granulometria dos rejeitos e à sistemática de descarte destes materiais no reservatório.

Como enfatizado na revisão do problema, a formulação de uma modelagem teórica para simular o processo deposicional dos rejeitos no reservatório de uma barragem é algo complexo, por envolver fenômenos acoplados e associados a grandes deformações. Métodos numéricos têm sido desenvolvidos para a análise do adensamento de rejeitos em reservatórios, exigindo, na maioria das vezes, a determinação de parâmetros por meio de ensaios especiais. No presente trabalho, esta simulação foi implementada para uma barragem de rejeitos de ouro em implantação (Barragem de Cuiabá), utilizando um programa numérico (programa CONDES0) desenvolvido por Yao e Znidarcic (1977) e parâmetros obtidos de ensaios HCT com bomba de fluxo.

## 5.2 – Procedimentos de Calibração do Modelo Numérico

Antes de dar início às análises numéricas do processo de enchimento da barragem, foram feitas duas análises numéricas de calibração do modelo, simulando o enchimento instantâneo de uma proveta com capacidade de 1.000 ml (Figura 5.1). Para estes experimentos, foram preparadas amostras com as mesmas características (teor de sólidos) do rejeito de flotação.

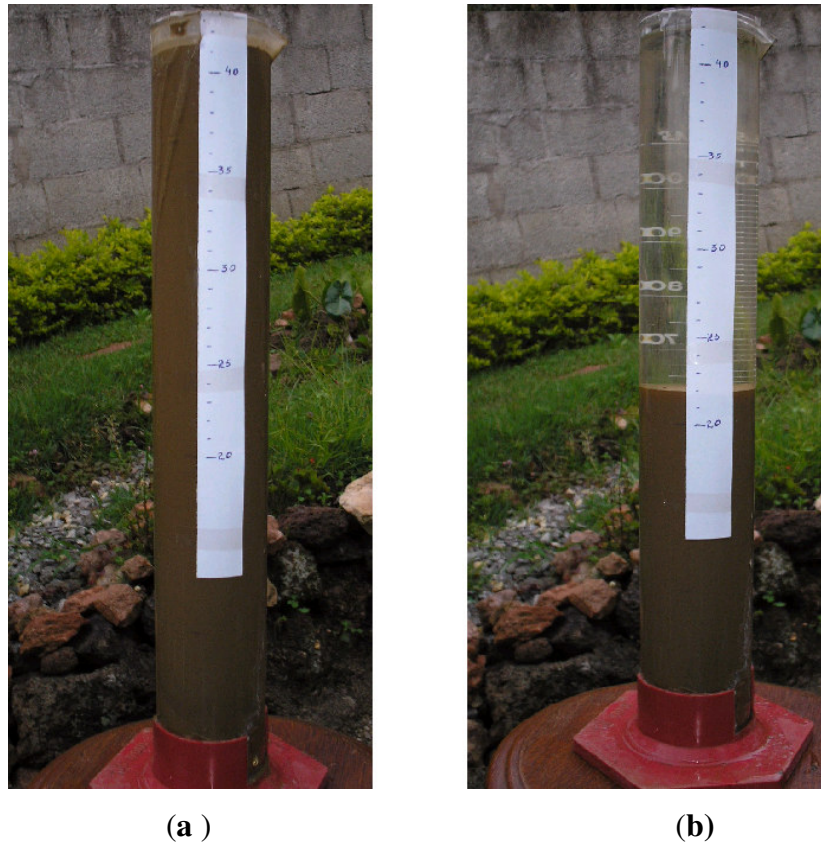


Figura 5.1 - Experimento em proveta para avaliar os parâmetros de compressibilidade e de adensamento do rejeito: (a) enchimento instantâneo antes do adensamento; (b) após o adensamento.

Estas análises serviram para avaliar os parâmetros de compressibilidade obtidos através dos ensaios HCT com bomba de fluxo e compreenderam os seguintes procedimentos:

- (i) a proveta foi graduada de 1 em 1 cm, até a sua plena capacidade, para uma altura total de 42 cm;

- (ii) amostras, com as mesmas características do rejeito em polpa a ser lançado na barragem, foram preparadas e depois lançadas na proveta;
- (iii) após o adensamento completo, mediu-se a altura final atingida pelo rejeito;
- (iv) simulações numéricas pelo Programas CONDES0 foram feitas, utilizando-se os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade do rejeito obtidos nos ensaios HCT e os dados relativos ao enchimento da proveta como geometria do recipiente, condições de contorno e processo de enchimento;
- (v) após as simulações numéricas, procedeu-se às correlações dos resultados previstos com aqueles observados no experimento, dados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados do experimento x simulação numérica (ensaios de proveta).

análises	experimento		simulação	
	H <sub>inicial</sub> (cm)	H <sub>final</sub> (cm)	H <sub>inicial</sub> (cm)	H <sub>final</sub> (cm)
I	34,80	20,00	34,80	19,538
II	42,00	22,40	42,00	23,504

Pela consistência dos resultados, conclui-se que os parâmetros de compressibilidade obtidos nos ensaios de laboratório HCT são confiáveis e representativos para as análises da simulação do enchimento da barragem de Cuiabá com os rejeitos totais da flotação da Planta Industrial do Queiroz.

Um segundo procedimento de calibração do modelo numérico consistiu em simular o próprio ensaio HCT com bomba de fluxo, de forma a verificar a consistência dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade obtidos para os rejeitos de flotação (lembrando que estes parâmetros foram obtidos por outro programa numérico, chamado SICTA). A tabela 5.2 mostra os resultados desta segunda correlação, obtidos no ensaio HCT e na simulação numérica.

Na verdade, foram feitas duas avaliações, a primeira considerando apenas o peso próprio da amostra e a segunda, para uma sobrecarga de 50,02 kgf/cm<sup>2</sup>. Mais uma vez, os resultados mostram-se bem próximos, ratificando o modelo experimental adotado.

Tabela 5.2 - Resultados do experimento x simulação numérica (ensaios HCT).

alturas	peso próprio		carga de 50,02 kgf/cm <sup>2</sup>	
	ensaio	simulação	ensaio	simulação
Altura inicial - H <sub>0</sub> (cm)	10,171	10,171	10,171	10,171
Altura nominal - H <sub>n</sub> (cm)	5,88	5,88	5,88	5,88
Altura final - H <sub>f</sub> (cm)	5,363	5,35	5,165	5,16

### 5.3 – Parâmetros e Premissas da Simulação Numérica

As relações constitutivas do rejeito de flotação da Planta do Queiroz da *AngloGold Ashanti* foram estabelecidas por meio de ensaios HCT com bomba de fluxo. As bases e os procedimentos da técnica e sua aplicação aos rejeitos em questão foram discutidos em detalhes nos capítulos anteriores deste trabalho. As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam os resultados obtidos, em termos das relações constitutivas de compressibilidade (relação índice de vazios x tensão efetiva) e de permeabilidade (relação índice de vazios x permeabilidade), respectivamente.

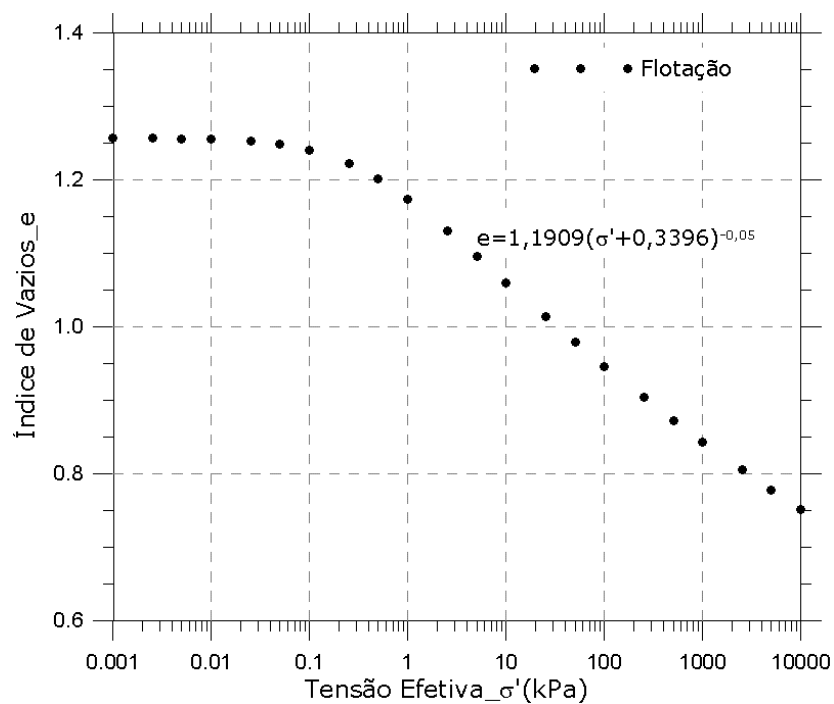


Figura 5.2 - Curva de compressibilidade do rejeito de flotação

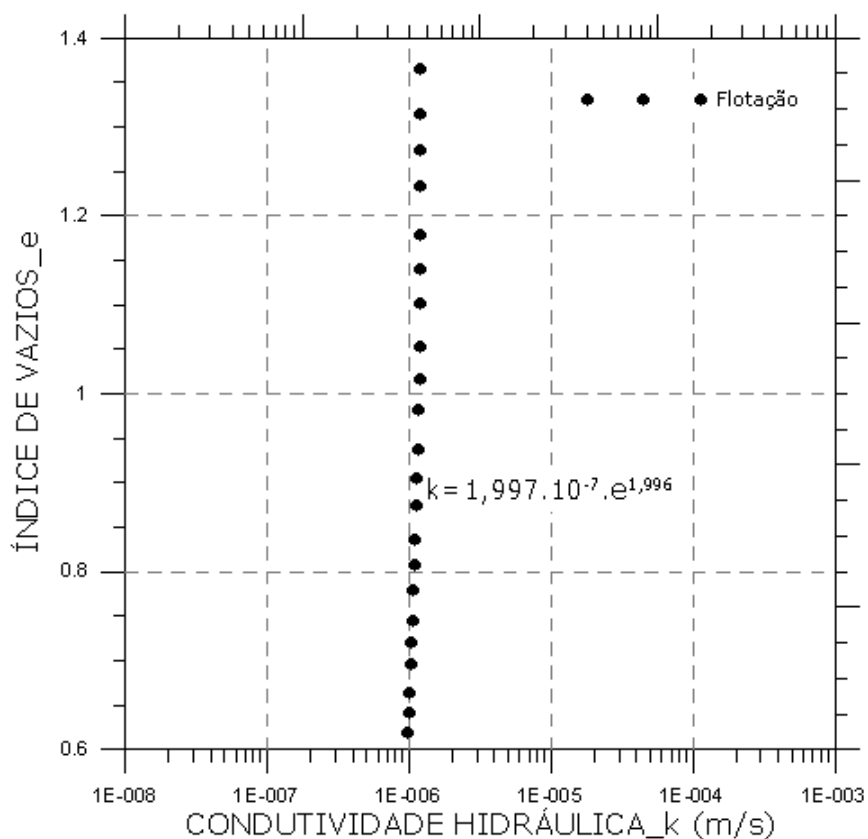


Figura 5.3 - Curva de permeabilidade do rejeito de flotação

A condição de contorno do topo foi definida como sendo uma condição de sobrecarga nula, visto que a deposição do rejeito deverá ser feita de forma contínua ao longo de toda a vida útil da estrutura. Por outro lado, numa condição mais crítica possível, a base do reservatório foi admitida como sendo impermeável, com o material de fundação apresentando uma permeabilidade da ordem de  $10^{-7}$  m/s.

#### 5.4 – Curvas de Enchimento do Reservatório

A curva de enchimento do reservatório, representada pela evolução das cotas dos depósitos de rejeitos acumulados ao longo dos anos, foi simulada de duas formas distintas. Na primeira, a curva foi obtida pela sistemática convencionalmente adotada de analisar todo o processo globalmente; a segunda forma consistiu na definição da curva de enchimento levando-se em consideração o adensamento experimentado pelos rejeitos no decorrer de cada etapa analisada.

### 5.4.1 – Curvas de Enchimento e de Enchimento Nominal

Nesta concepção, a curva de enchimento nominal do reservatório foi obtida de acordo com os seguintes procedimentos:

- i) com base nos dados da Tabela 3.1 (cronograma de ocupação do reservatório pelos rejeitos gerados), foram estimados os volumes acumulados ao longo dos anos;
- ii) com a entrada dos dados dos volumes acumulados na curva cota x volume do reservatório (Figura 5.4), foram obtidas as cotas correspondentes do depósito de rejeitos;

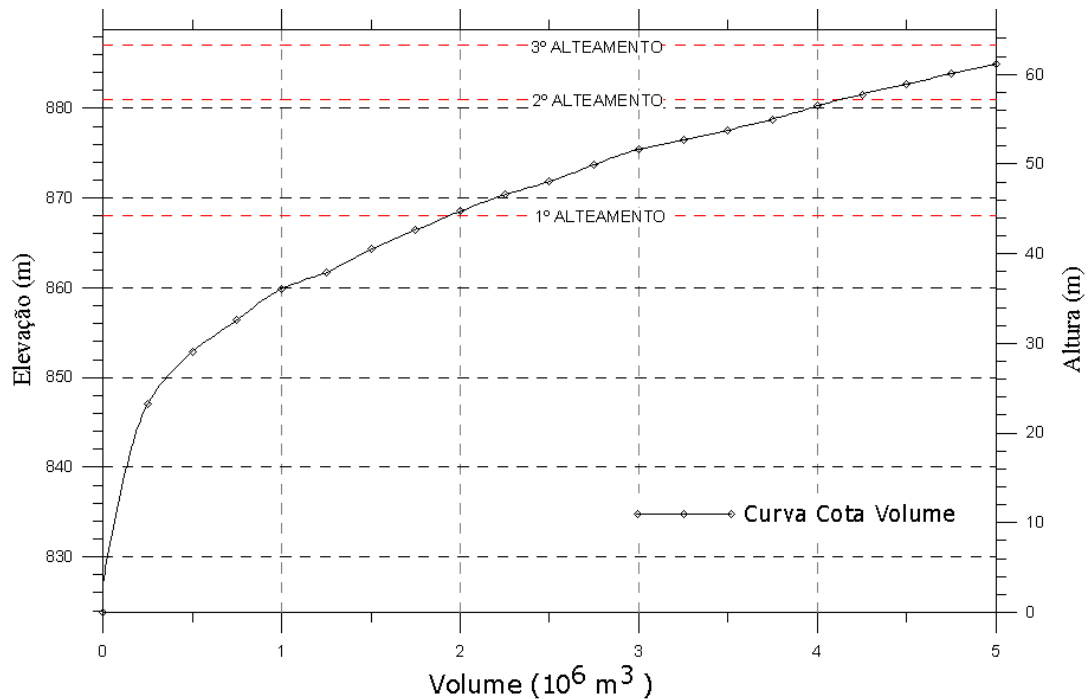


Figura 5.4 - Curva cotas x volumes da Barragem de Cuiabá

- iii) a partir do arranjo inicial e dos alteamentos previstos (Figura 5.5) e com as cotas relativas aos volumes anuais de rejeitos dispostos na barragem, as alturas de rejeitos depositados ficam definidas pela diferença de cotas entre a elevação relativa a cada ano e a cota de referência da base da barragem, determinando-se, assim, a curva de enchimento do reservatório (Figura 5.6).

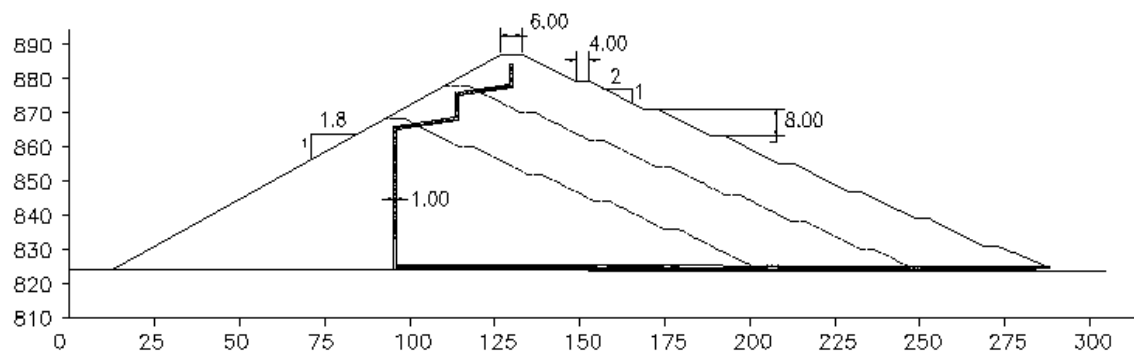


Figura 5.5 – Arranjo geral e alteamentos previstos para a Barragem de Cuiabá

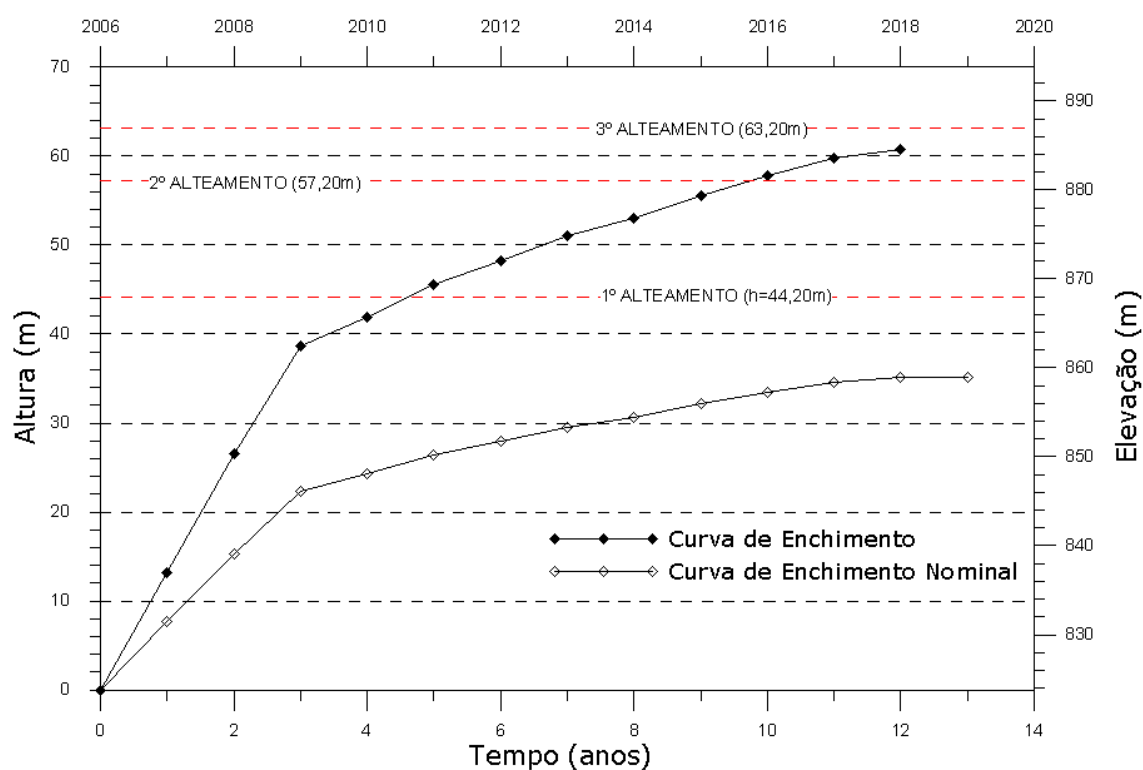


Figura 5.6 - Curvas de enchimento e de enchimento nominal do reservatório.

A curva de enchimento representa a disposição geral dos rejeitos, sob a forma de polpa, no reservatório da barragem. A chamada *curva de enchimento nominal* representa a condição teórica de um arranjo envolvendo, exclusivamente, o teor de sólidos presentes nos rejeitos lançados (mantendo-se a condição saturada dos rejeitos e desconsiderando-se quaisquer efeitos de adensamento). Nesta condição, a curva de enchimento nominal (Figura 5.6) fica, então, definida pela seguinte relação:



$$H_n = \frac{1 + e_{00}}{1 + e_0} H \quad (5.1)$$

sendo:

$e_{00}$  : índice de vazios para tensão efetiva nula;

$e_0$  : índice de vazios inicial;

$H_n$  e  $H$  : alturas nominal e total do depósito de rejeitos, respectivamente.

#### 5.4.2 – Curvas de Enchimento Corrigidas

A segunda forma utilizada para a definição da curva de enchimento do reservatório da Barragem de Cuiabá levou em consideração os efeitos do adensamento experimentado pelos rejeitos previamente depositados, mediante correções periódicas das curvas de enchimento e de enchimento nominal. Desta forma, a curva de enchimento corrigida incorpora os efeitos do adensamento ocorridos nos rejeitos previamente depositados e os efeitos do lançamento das etapas em análise. Esta curva de enchimento corrigida, que afeta as curvas de enchimento e de enchimento nominal, foi obtida por meio dos seguintes procedimentos (somente possível na fase das simulações numéricas):

- (i) com base nos dados da Tabela 3.1 (cronograma de ocupação do reservatório pelos rejeitos gerados), foram estimados os volumes acumulados ao longo dos anos;
- (ii) com a entrada dos dados dos volumes acumulados na curva cota x volume do reservatório (Figura 5.4), foram obtidas as cotas correspondentes do depósito de rejeitos;
- (iii) a partir do arranjo inicial e dos alteamentos previstos (Figura 5.5) e com as cotas relativas aos volumes anuais de rejeitos lançados na barragem, as alturas de rejeitos depositados (curva de enchimento do reservatório) em cada etapa fica definida pela diferença de cotas entre a elevação relativa a esta etapa e a cota de referência da base da barragem;
- (iv) estima-se a altura nominal dos rejeitos acumulados na primeira etapa da simulação do enchimento através da equação 5.1;

- (v) faz-se a simulação do enchimento do reservatório para esta primeira etapa (altura inicial igual a zero, estágio de enchimento igual a 1, tempo inicial (TBF) igual a zero, tempo final (TEF) igual ao tempo de lançamento de rejeito desta etapa e taxa igual à altura nominal dividida pelo intervalo de tempo, que é a diferença entre os tempos final e inicial da etapa em análise);
- (vi) após a simulação, obtém-se a altura de rejeito adensado após a etapa analisada que, somada à elevação da base da barragem, fornece a elevação correspondente aos rejeitos adensados ao final da primeira etapa da análise;
- (vii) substituindo-se o valor desta elevação do rejeito adensado na curva cota volume, obtém-se o volume de rejeitos adensados dispostos no reservatório;
- (viii) somando-se o volume determinado no item anterior com o volume a ser lançado na próxima etapa e levando este somatório à curva cotas x volumes, determina-se a elevação que será alcançada após esta etapa sem considerar o adensamento desta, ou seja, após o adensamento da(s) etapa(s) anterior(es) mais a parcela correspondente ao lançamento de rejeito desta nova etapa;
- (ix) a altura de rejeito lançada nesta etapa fica definida através da diferença entre as elevações de rejeitos obtidas nos itens (vii) e (v);
- (x) a altura nominal desta etapa do enchimento fica definida através da equação 5.1, com H correspondendo à altura encontrada no item anterior;
- (xi) faz-se a simulação para a nova etapa de enchimento, considerando a altura inicial de rejeitos igual à altura atingida após a simulação da etapa anterior, repetindo-se estes procedimentos até a última etapa prevista do enchimento.

## **5.5 – Simulações Numéricas do Enchimento do Reservatório**

As análises foram feitas considerando dois casos. No primeiro, considerou ‘enchimento instantâneo’, ou seja, o material foi depositado num intervalo de tempo muito curto. No segundo, o material foi depositado seguindo a programação de produção do rejeito na planta (enchimento escalonado). Na hipótese de enchimento escalonado, as análises contemplaram a simulação pela curva de enchimento nominal e a simulação pela curva corrigida, levando-se em consideração o processo de adensamento dos materiais lançados previamente.

### 5.5.1 – Enchimento Instantâneo do Reservatório

Na simulação de ‘enchimento instantâneo’ do reservatório, admitiu-se que todo o rejeito produzido, durante a vida útil do empreendimento, fosse lançado no reservatório da barragem num pequeno intervalo de tempo. Conforme exposto previamente, o *input* da simulação numérica do enchimento do reservatório, pelo programa CONDES0, é baseado na curva de enchimento nominal. Como, neste simulação, não se aplicaram as correções das curvas (item 5.4.2), adotou-se diretamente a curva de enchimento nominal indicada na Figura 5.6.

Nesta hipótese, o programa é baseado, não na curva propriamente dita, mas na altura nominal máxima (35,20m), obtida a partir do valor de H máximo (60,80m) da curva de enchimento prevista (Figura 5.6). Com base nos parâmetros de compressibilidade e de permeabilidade dos rejeitos obtidos nos ensaios HCT e nas condições de contorno assumidas, procedeu-se à simulação numérica para as condições de ‘enchimento instantâneo’ e curva de enchimento nominal não corrigida. Os resultados das análises estão apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, em termos das alturas pós- adensamento e os perfis dos índices de vazios dos rejeitos depositados, respectivamente.

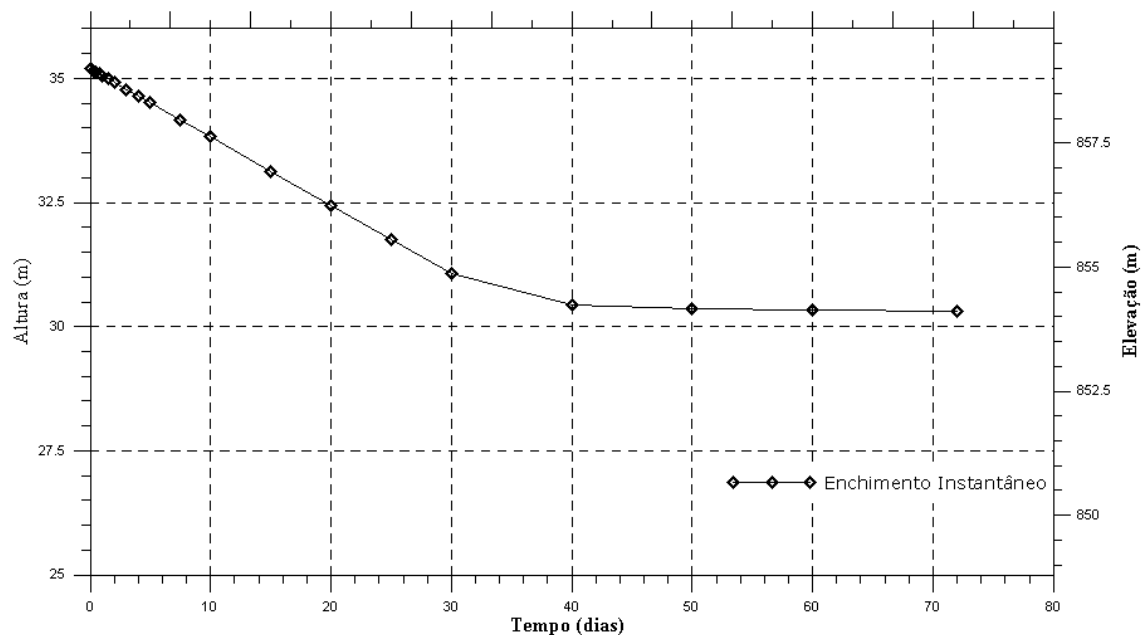


Figura 5.7- Variações das alturas do reservatório considerando enchimento instantâneo.

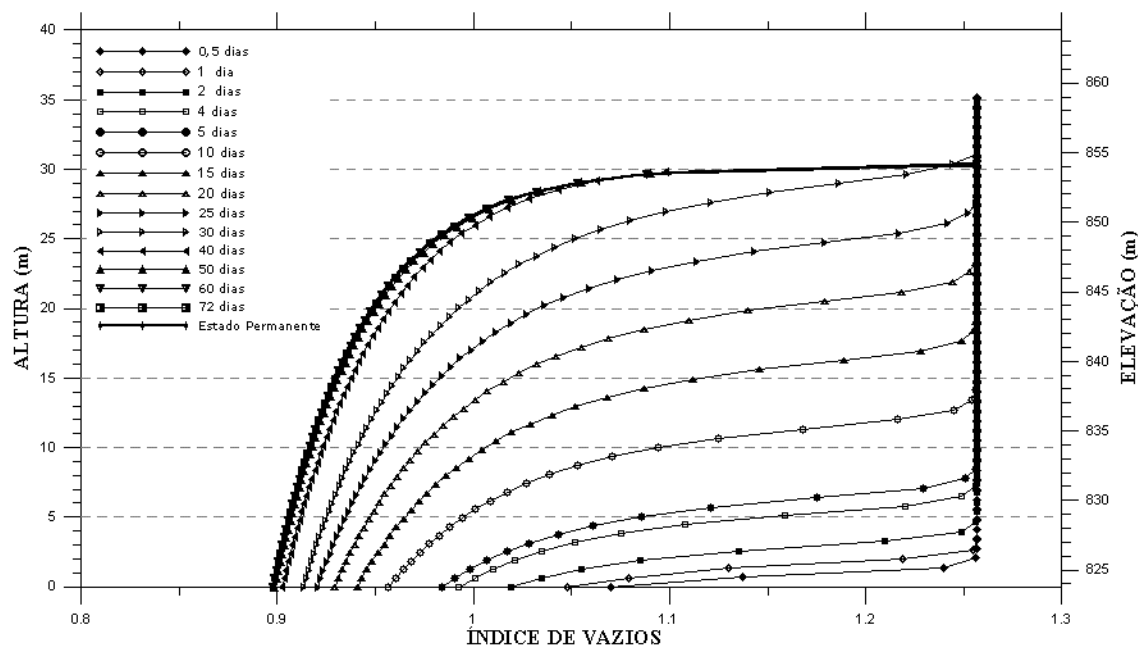


Figura 5.8 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento com enchimento instantâneo.

É importante salientar que uma análise desta natureza tem o enfoque de avaliar apenas uma hipótese limite, não tendo, evidentemente, representatividade prática. Nota-se que a consolidação dos rejeitos é muito rápida, com a estabilização das alturas finais ocorrendo para um período de aproximadamente 40 dias.

## 5.5.2 – Enchimento Escalonado do Reservatório

Para este tipo de enchimento, convencionalmente adotado na prática da disposição de rejeitos em barramentos, o reservatório deverá acumular os rejeitos de acordo com a sua geração na planta industrial. Nesta simulação, foram realizadas análises com as curvas de enchimento nominal com e sem correção.

### 5.5.2.1 – Enchimento Escalonado com Curva Nominal Não Corrigida

Neste caso, a simulação pelo programa CONDES0, foi baseada também na curva de enchimento nominal da Figura 5.6. Esta curva foi subdividida em vários trechos lineares, definindo-se o número de estágios de enchimento do reservatório, bem como os tempos inicial (TBF) e final (TEF) e a taxa de enchimento para cada estágio.

Neste processo de linerização da curva de enchimento nominal do reservatório da Barragem de Cuiabá, foram definidos sete estágios. A tabela 5.4 mostra os parâmetros de entrada, característicos de cada estágio de enchimento, para as simulações numéricas.

Tabela 5.3 - Parâmetros das simulações numéricas por estágio (enchimento escalonado)

N	TBF (anos)	TEF (anos)	Hn (m)	Taxa (m/ano)
1	0	3	22,35	7,45
2	3	5	4,00	2,00
3	5	7	3,18	1,59
4	7	10	3,93	1,31
5	10	11	1,16	1,16
6	11	12	0,57	0,57
7	12	20	0,00	0,00

N corresponde ao número de estágios de enchimentos, TBF e TEF os tempos inicial e final dos estágios, respectivamente e Hn, a altura nominal.

A Figura 5.9 apresenta as curvas de enchimento, de enchimento nominal e a curva de nível final dos rejeitos adensados (curva das alturas finais do rejeito pós- adensamento), obtida pela simulação numérica implementada. A diferença entre as duas curvas superiores representa a espessura da lâmina d'água após a sedimentação do material lançado e a diferença entre as duas curvas inferiores expressa o recalque total por adensamento do depósito de rejeitos.

Desta forma, conclui-se que a altura da barragem necessária para armazenar os rejeitos gerados durante a operação da mina é da ordem de 30,16 m, sem levar em consideração a altura para o amortecimento de cheias e absorção de ondas.

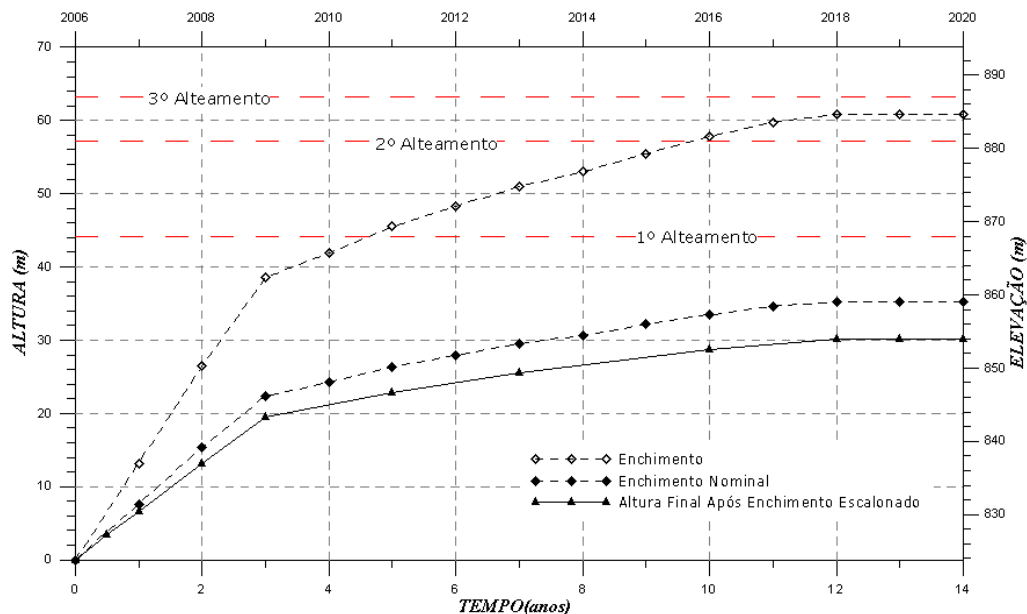


Figura 5.9 - Curvas de enchimento e enchimento nominal e curva de nível final dos rejeitos pós-adensamento (enchimento escalonado sem correção da curva nominal).

Nota-se que uma boa concordância dos resultados obtidos nesta simulação e na anterior, para o caso de enchimento instantâneo, evidenciando a consistência da análise (alturas finais de rejeitos iguais). A Figura 5.10 mostra o perfil de índices de vazios para a condição de enchimento escalonado, que se mostra também muito consistente com o perfil de índices de vazios obtido na hipótese de enchimento instantâneo.

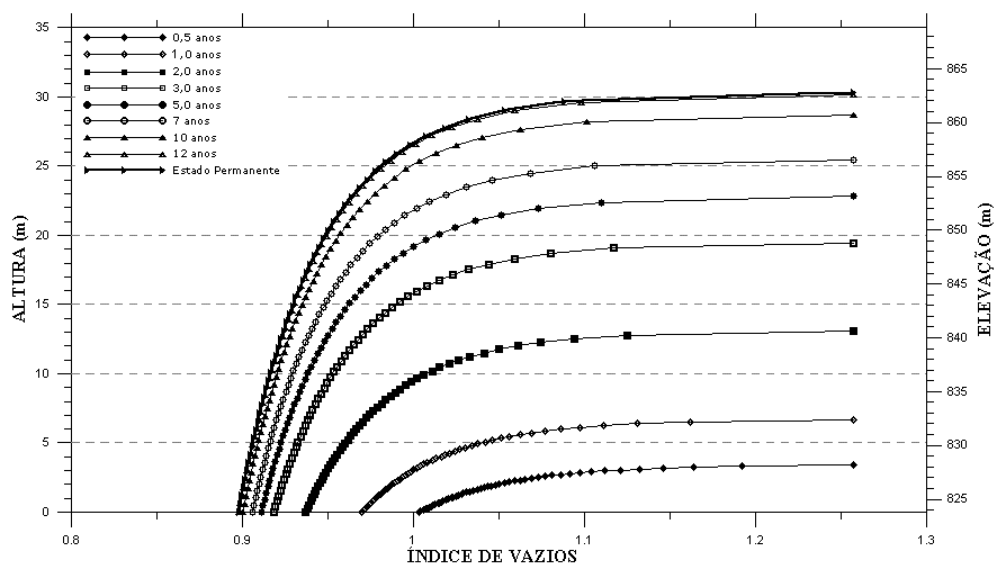


Figura 5.10 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento c/ enchimento escalonado.

### 5.5.2.2 – Enchimento Escalonado com Curva Nominal Corrigida

Devido ao fato das análises das simulações numéricas serem unidimensionais, é importante salientar que, nestas condições, o parâmetro mais importante a ser levado em consideração é a altura de material lançado. Desta forma, o lançamento do material deve ser bem analisado.

Em reservatórios que apresentam seções horizontais constantes e curva cotas x volumes linear (Figura 5.11), independentemente da etapa de lançamento de uma determinada quantidade de material, ter-se-á sempre uma mesma altura de material lançado. Nos reservatórios em geral, em que a curva cotas x volumes tende a ser qualquer, tem-se que, a mesma diferença entre cotas superiores demandam volumes muito maiores de deposição que a mesma diferença para cotas inferiores do reservatório, ou seja, a curva tende a ser muito íngreme na etapa inicial de lançamento e apresentar um abatimento moderado a longo prazo (Figura 5.12).

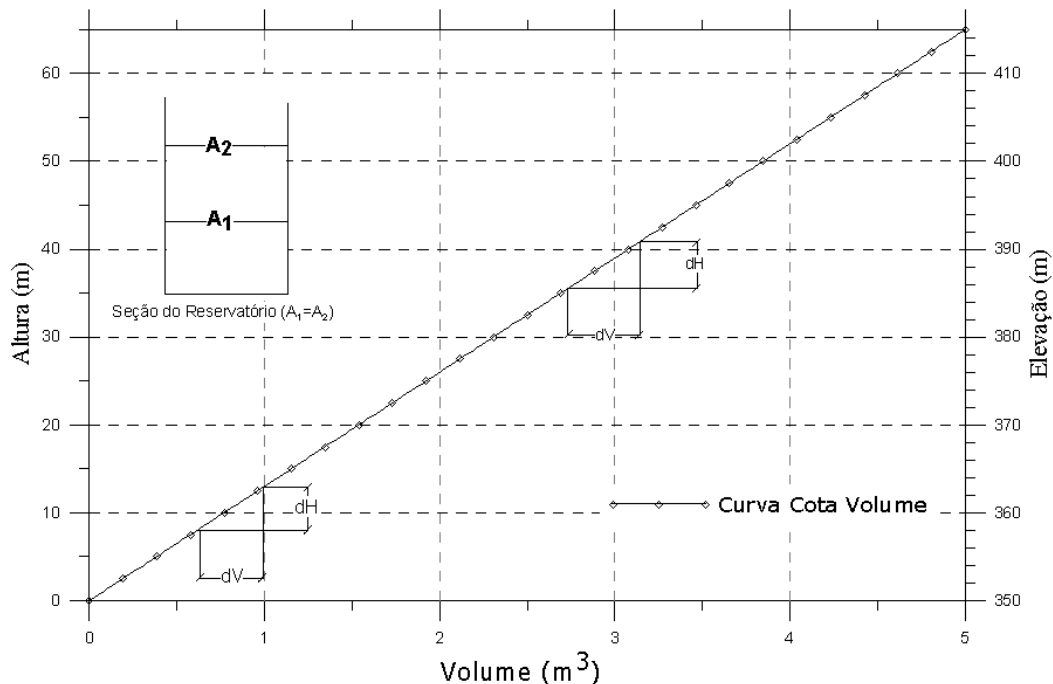


Figura 5.11 – Curva cotas x volumes com seções constantes.

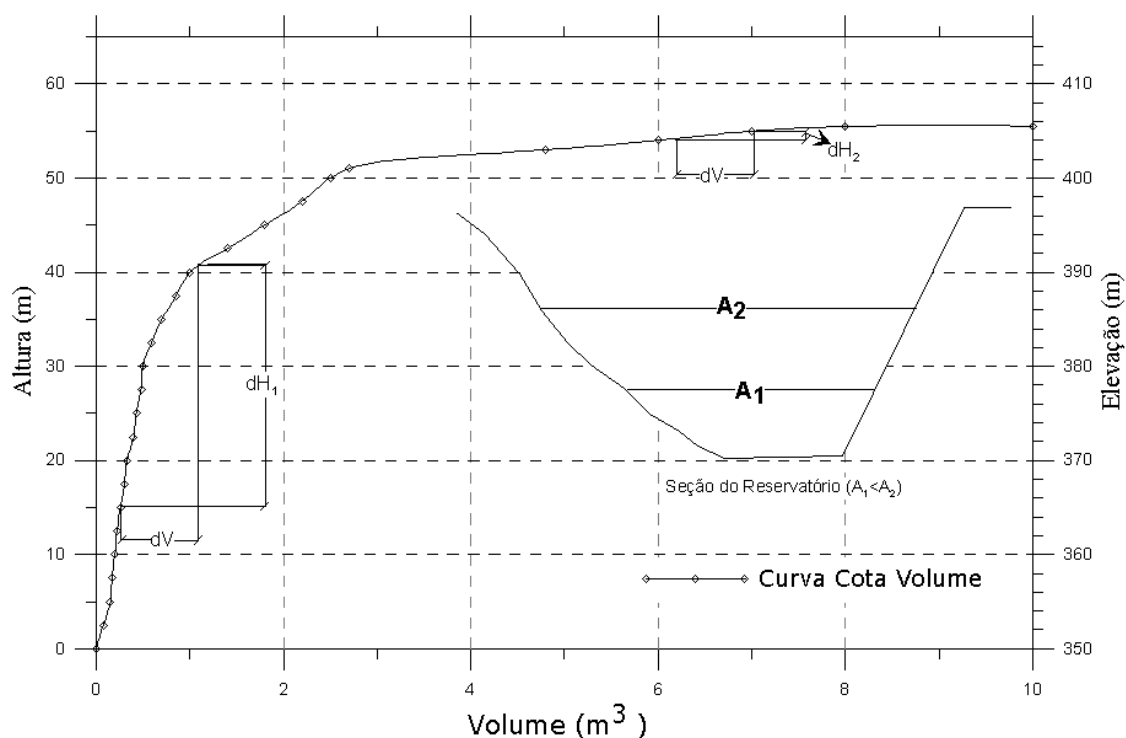


Figura 5.12 – Curva cotas x volumes com geometria qualquer.

Por outro lado, a operação da barragem implica a necessidade de reutilização contínua da água armazenada na mesma e, assim, o volume de rejeitos depositados será reduzido em virtude do adensamento e da retirada de parte da água sobrenadante. Desta forma, os volumes subsequentes dos rejeitos lançados tenderão a ocupar, inicialmente, os espaços deixados pelos volumes reutilizados de água e aquele oriundo do adensamento ocorrido para os rejeitos lançados anteriormente.

Neste contexto, uma análise mais rigorosa e mais representativa das condições reais da barragem deve incorporar estas influências no processo de enchimento do reservatório e, neste sentido, as simulações numéricas foram refeitas, admitindo-se a correção da curva de enchimento nominal.

Dois tipos de análises foram feitas para a hipótese da correção da curva de enchimento inicial. Na primeira análise, a correção foi feita em termos de tempos de enchimento (avaliando-se o processo de enchimento em estágios anuais) e na segunda abordagem, a correção foi feita em termos da linearização da curva cotas x volumes (avaliando-se o processo de enchimento por trechos lineares da curva).



- **Curva Nominal Corrigida por Intervalos de Tempo**

Nesta análise, as premissas e os parâmetros de entrada do programa foram os mesmos usados para as análises anteriores, à exceção da curva de enchimento nominal que foi corrigida, para se levar em consideração os efeitos acoplados do adensamento em múltiplos estágios. Os procedimentos adotados para a correção da curva nominal foram aqueles descritos no item 5.4.2, sendo os estágios de enchimento definidos, neste caso, em função de períodos de tempos anuais.

A Figura 5.13 mostra as curvas de enchimento nominal por períodos anuais (total de 12 estágios anuais, compreendendo o período entre 2007 e 2019), as correspondentes curvas de nível final dos rejeitos pós-adensamento para cada etapa considerada nesta abordagem e a curva de nível final dos rejeitos após o adensamento no período anual avaliado e após o adensamento acumulado nos estágios anteriores (‘adensamento no estado permanente’), obtendo-se uma altura máxima de 42,6m.

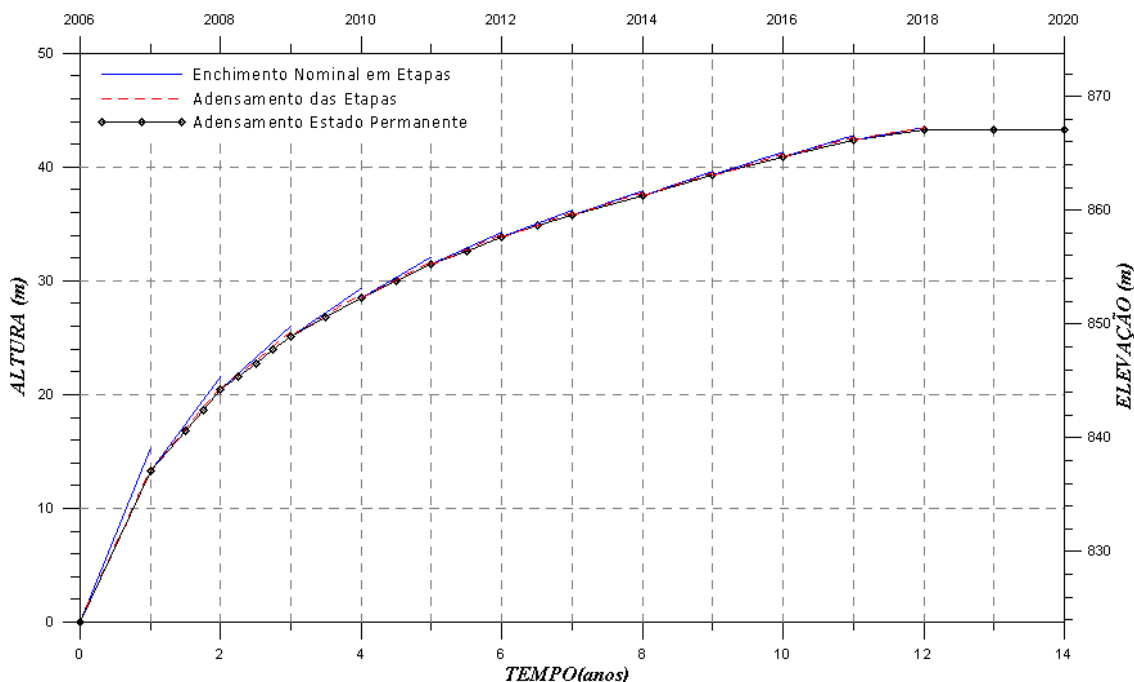


Figura 5.13 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida por intervalos de tempo

A diferença entre as curvas superiores indica os recalques por adensamento ocorridos em cada etapa e, analogamente, a diferença entre as duas curvas inferiores representa o recalque acumulado das etapas anteriores devido ao lançamento dos novos rejeitos na etapa em questão. A diferença entre as curvas limites representa, por sua vez, o recalque total dos rejeitos no decorrer do tempo de lançamento, durante a etapa em análise.

A Figura 5.14 representa um detalhamento da Figura 5.13, considerando apenas os primeiros 4 estágios (4 anos) da série, para uma melhor visualização das curvas mencionadas. No caso particular do primeiro estágio de enchimento (primeiro ano do processo), as curvas de nível final dos rejeitos para a etapa e final acumulada são, naturalmente, coincidentes.

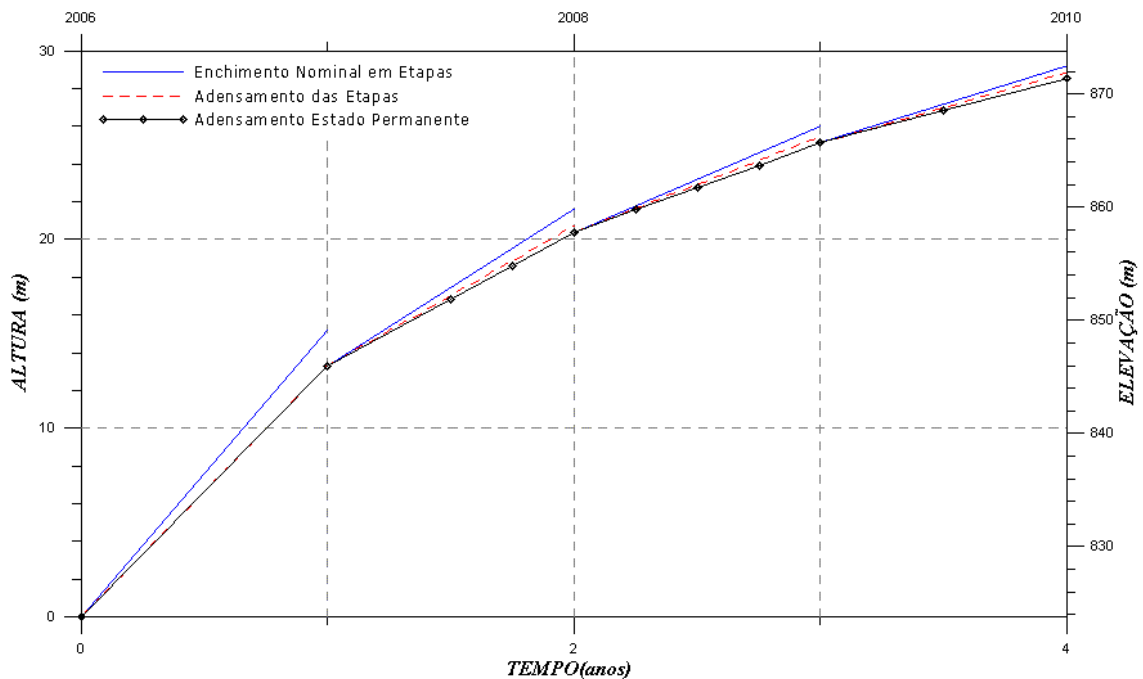


Figura 5.14 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida para os primeiros 4 intervalos de tempo (primeiros 4 anos da série analisada)

Os resultados das simulações numéricas para o caso da curva nominal corrigida por intervalos de tempo incluíram ainda a determinação dos perfis dos índices de vazios dos rejeitos depositados, após cada ano de lançamento (Figura 5.15).

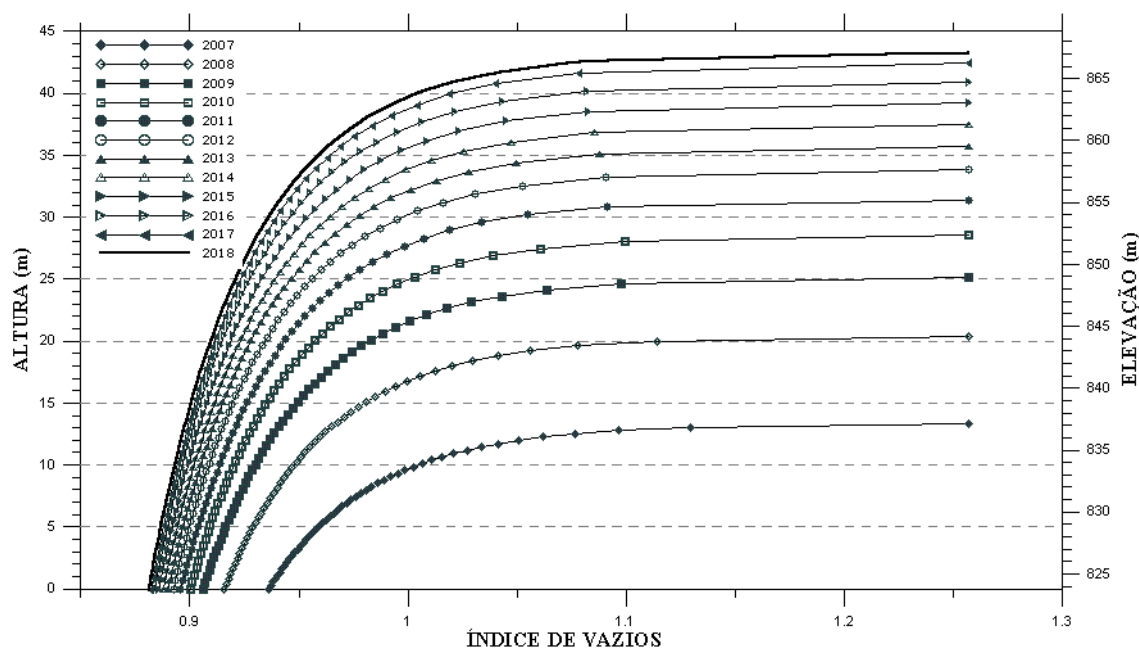


Figura 5.15 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento para a curva nominal corrigida por intervalos de tempo.

- **Curva Nominal Corrigida pela Linearização da Curva Cotas x Volumes**

Na análise anterior, a correção por intervalos de tempos iguais (períodos anuais) não contempla a não uniformidade das variações da curva cotas x volumes ao longo do tempo, que tendem a ser substancialmente maiores nos primeiros estágios do enchimento. Neste sentido, procedeu-se a uma segunda abordagem de análise, em termos de volumes de rejeitos acumulados no reservatório baseados na decomposição da curva cotas x volumes em trechos lineares.

O primeiro estágio de enchimento, correspondente ao trecho linear inicial da curva, foi fixado para os três primeiros meses do lançamento e disposição dos rejeitos. Adotando-se as mesmas premissas e parâmetros de entrada do programa CONDES0 das análises anteriores e com a curva nominal corrigida pela linearização da curva cotas x volumes (que corresponderam a uma subdivisão do processo de enchimento do reservatório em 19 estágios), esta nova simulação numérica que foi implementada obedeceu os seguintes procedimentos (resultados apresentados na Tabela 5.5):

- i) a elevação final dos rejeitos correspondente ao primeiro estágio da simulação (três meses de lançamento) foi determinada, considerando-se o volume total de rejeitos gerados no mesmo período (igual a  $85.285,93 \text{ m}^3$ , valor estimado como sendo igual a 3 vezes a média mensal obtida para o ano de 2007) e levando-se este valor na curva cotas x volumes. A altura total dos rejeitos, após o primeiro estágio do enchimento (valor igual a 15,4543m), foi obtida subtraindo-se, do valor da elevação final, a elevação da base do reservatório. A altura nominal dos rejeitos (valor igual a 8,9483m) foi estimada com base na relação 5.1. Assim, tem-se os parâmetros de *input* para a simulação numérica referente ao primeiro estágio de enchimento, ou seja, tempo inicial igual a zero, tempo final igual a 0,25 anos, taxa anual de disposição de rejeitos no reservatório igual a altura nominal dividida por 0,25 (valor igual a 35,7931 m/ano). A altura final dos rejeitos obtida pela simulação numérica, ao final do primeiro estágio, foi igual a 8,0059m;
- ii) somando-se este valor da altura final de rejeitos, correspondente ao primeiro estágio do enchimento, ao valor da elevação da base do reservatório e superpondo-se esta altura sobre a curva cotas x volumes, obtém-se a cota do nível dos rejeitos no reservatório da barragem após 3 meses de lançamento e adensamento dos rejeitos depositados;
- iii) a partir do ponto da curva correspondente à cota obtida no item anterior (Figura 5.16), definiu-se um novo trecho linear sobre a curva cotas x volumes (segundo estágio de enchimento);
- iv) com a definição do ponto limite do segundo estágio de enchimento, torna-se possível estabelecer os correspondentes valores do volume ( $64.430,00 \text{ m}^3$ ), da altura total (7,4484m) e da altura nominal (4,3127m) de rejeitos a serem lançados no segundo estágio de enchimento;
- v) dividindo-se o volume total dos rejeitos pelo valor do volume médio mensal correspondente ao período (ano) analisado (eventualmente englobando anos distintos), obtém-se o intervalo de tempo correspondente ao segundo estágio

de enchimento (0,1889 anos) e a taxa de anual de disposição dos rejeitos (22,8350 m/ano). A altura final dos rejeitos, obtida pela simulação numérica, ao final do segundo estágio, foi igual a 11,654m;

- vi) repete-se a sistemática da análise para os demais estágios de enchimento (3 a 19), de acordo com os mesmos procedimentos aplicados para o segundo estágio de enchimento (itens iii a vi).

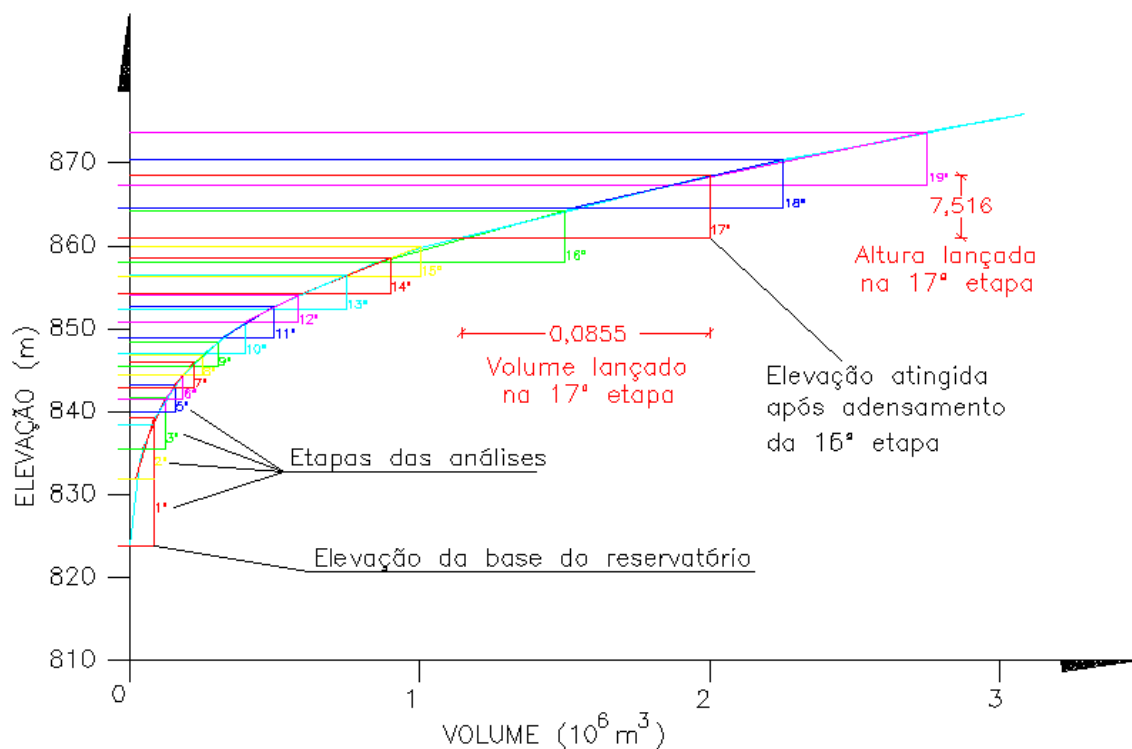


Figura 5.16 – Estágios de enchimento correspondentes à simulação numérica pela linearização da curva cotas x volumes.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos para os estudos de simulação numérica do enchimento do reservatório da Barragem de Cuiabá da *AngloGold Ashanti*, por meio da subdivisão da curva cotas x volumes da barragem em 19 trechos lineares, conforme procedimentos descritos anteriormente, correspondentes a 19 estágios de enchimento. Os resultados indicam que, para um volume total de 4.581.057,03 m<sup>3</sup> depositados no reservatório da barragem, ao longo de 12 anos, a altura final dos rejeitos seria igual a 46,47m.

Tabela 5.4 - Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida pela linearização da curva cotas x volumes.

etapas	tempo (anos)		volume (m <sup>3</sup> )		alturas (m)		taxa (m/ano)	H <sub>Final</sub> (m)
	simples	acumulado	simples	acumulado	total	nominal		
1 <sup>a</sup>	0,2500	0,2500	85.285,93	85.285,93	15,4543	8,9483	35,7931	8,0059
2 <sup>a</sup>	0,1889	0,4389	64.430,00	149.715,93	7,4484	4,3127	22,8350	11,654
3 <sup>a</sup>	0,2401	0,6790	81.920,00	231.635,93	6,1226	3,5451	14,7632	14,635
4 <sup>a</sup>	0,1483	0,8273	50.580,00	282.215,93	3,3140	1,9189	12,9420	16,228
5 <sup>a</sup>	0,1574	0,9846	58.927,78	341.143,70	3,1935	1,8491	11,7513	17,758
6 <sup>a</sup>	0,1620	1,1466	60.650,00	401.793,70	2,8601	1,6560	10,2256	19,135
7 <sup>a</sup>	0,1953	1,3418	73.130,00	474.923,70	3,0152	1,7458	8,9404	20,575
8 <sup>a</sup>	0,1807	1,5225	67.670,00	542.593,70	2,4606	1,4247	7,8847	21,751
9 <sup>a</sup>	0,2422	1,7648	90.710,00	633.303,70	2,9162	1,6885	6,9711	23,15
10 <sup>a</sup>	0,3816	2,1463	146.250,00	779.553,70	3,9162	2,2675	5,9423	25,094
11 <sup>a</sup>	0,4473	2,5936	176.750,00	956.303,70	3,8430	2,2252	4,9749	26,936
12 <sup>a</sup>	0,4674	3,0611	185.580,00	1.141.883,70	3,3260	1,9258	4,1199	28,522
13 <sup>a</sup>	0,6846	3,7457	271.790,00	1.413.673,70	4,1293	2,3909	3,4925	30,484
14 <sup>a</sup>	0,7493	4,4950	303.150,00	1.716.823,70	4,2611	2,4672	3,2926	32,506
15 <sup>a</sup>	0,6559	5,1509	265.800,00	1.982.623,70	3,5669	2,0653	3,1486	34,203
16 <sup>a</sup>	1,5956	6,7465	640.890,00	2.623.513,70	6,2921	3,6432	2,2833	37,184
17 <sup>a</sup>	2,1185	8,8650	855.090,00	3.478.603,70	7,5160	4,3519	2,0542	40,724
18 <sup>a</sup>	1,8029	10,6679	724.560,00	4.203.163,70	5,8360	3,3791	1,8743	43,4546
19 <sup>a</sup>	1,3321	12,0000	377.893,33	4.581.057,03	6,4554	3,7378	2,8059	46,471
TOTAL	12,0000	-----	4.581.057,03	-----	95,93	55,54	-----	-----

A Figura 5.17 mostra as curvas de enchimento nominal obtidas pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares (total de 19 estágios, compreendendo o período entre 2007 e 2019), as correspondentes curvas de nível final dos rejeitos pós-adensamento para cada etapa considerada nesta abordagem e a curva de nível final dos rejeitos após o adensamento no período correspondente a cada trecho linear considerado e após o adensamento acumulado nos estágios anteriores ('adensamento no estado permanente').

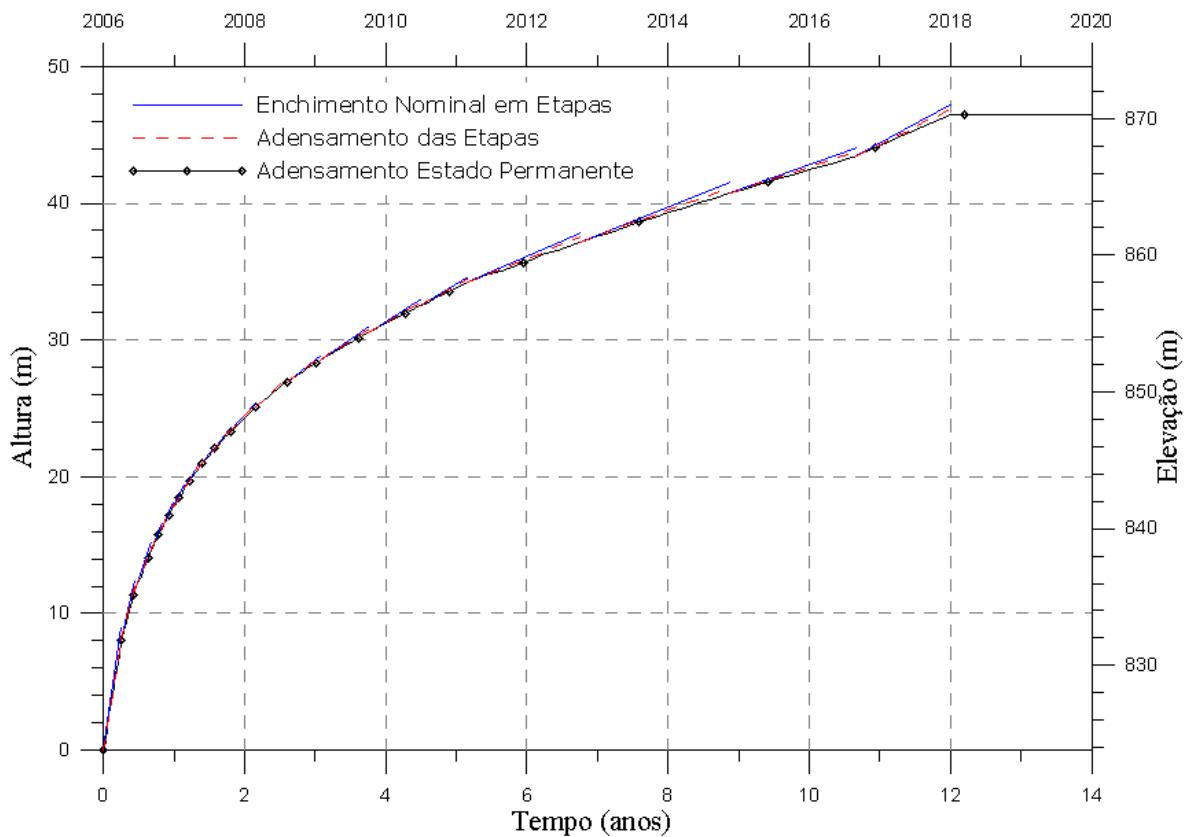


Figura 5.17 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida por subdivisão em trechos lineares.

A Figura 5.18 representa um detalhamento da Figura 5.17, considerando apenas os primeiros 5 estágios (primeiro ano do enchimento do reservatório) da série, para uma melhor visualização das curvas mencionadas. Mais uma vez, no caso particular do primeiro estágio de enchimento (período de três meses), as curvas de nível final dos rejeitos para a etapa e final acumulada são, naturalmente, coincidentes.

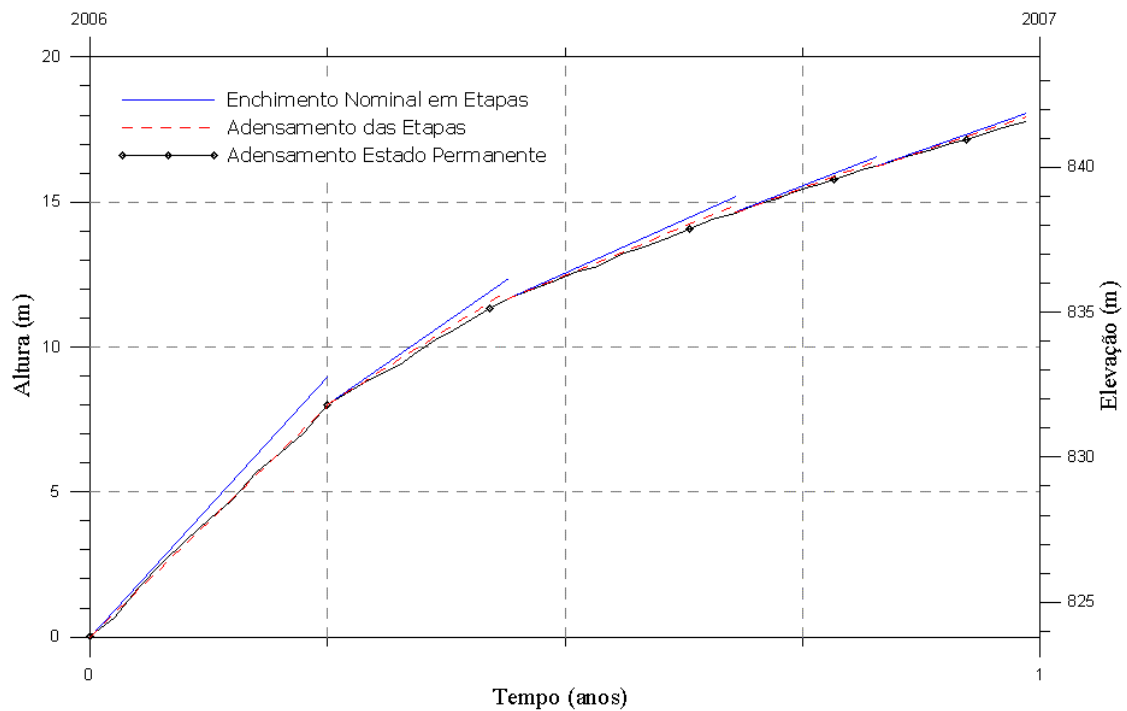


Figura 5.18 – Resultados da simulação numérica para a curva nominal corrigida para os primeiros 5 trechos lineares (primeiro ano de enchimento)

Os resultados das simulações numéricas para o caso da curva nominal corrigida pela linearização da curva cotas x volumes, em termos dos perfis dos índices de vazios dos rejeitos depositados após cada etapa de lançamento, estão indicados na Figura 5.19.

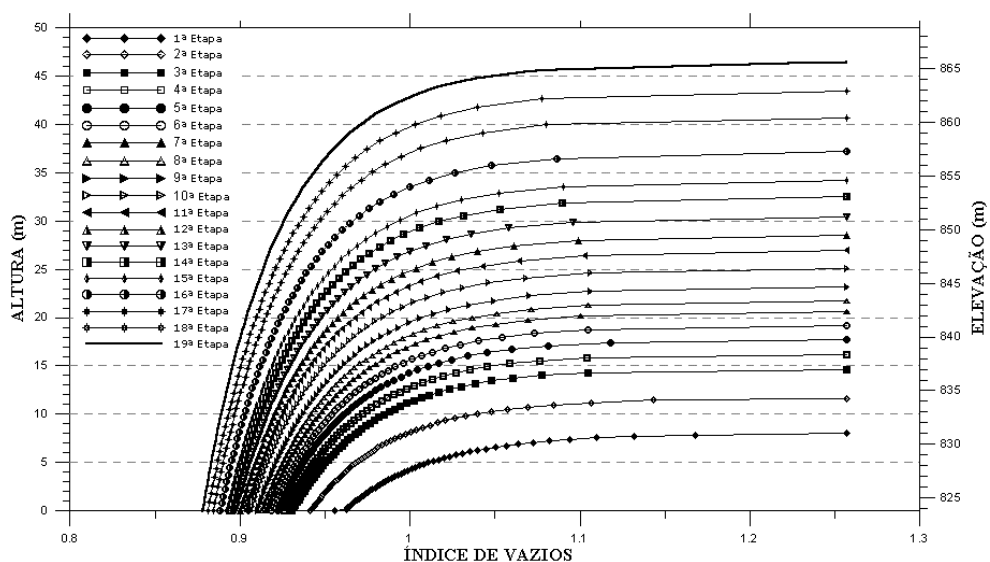


Figura 5.19 - Perfis dos índices de vazios pós-adensamento para cada etapa (curva nominal corrigida pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares).



Adicionalmente, as simulações implementadas permitiram também estabelecer os correspondentes perfis dos teores de sólidos e das poropressões geradas no depósito de rejeitos (Figuras 5.20 e 5.21).

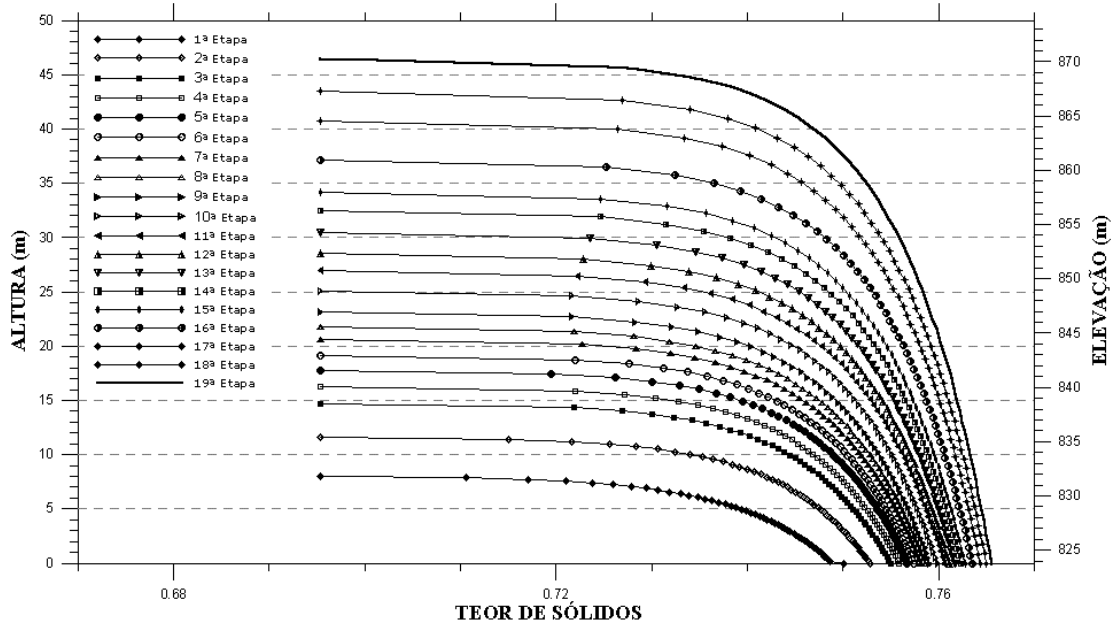


Figura 5.20 - Perfis dos teores de sólidos pós-adensamento para cada etapa (curva nominal corrigida pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares).

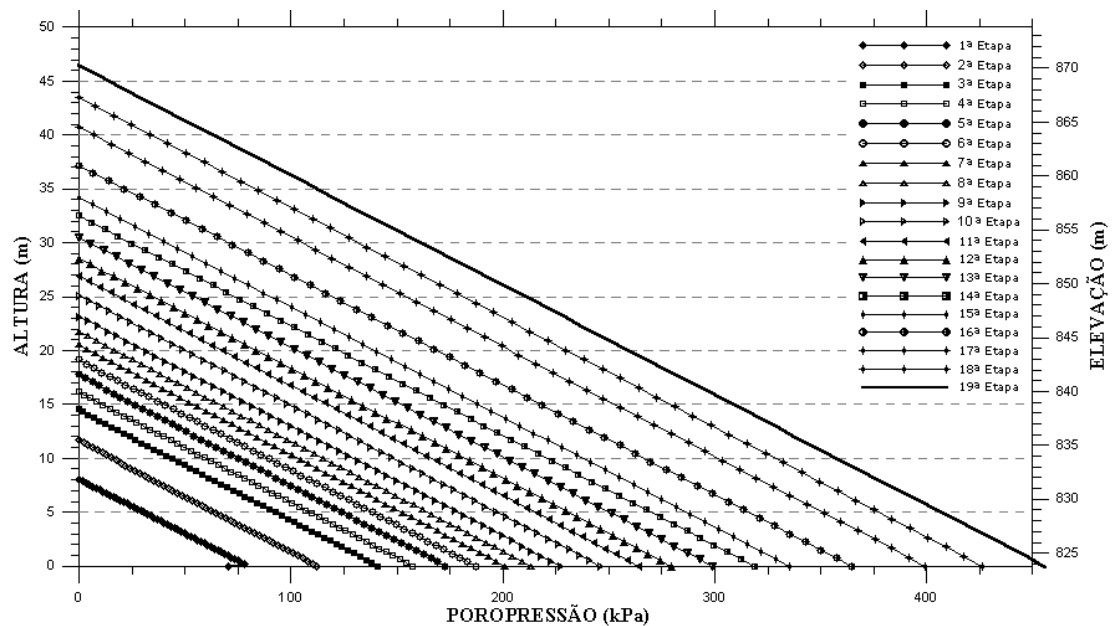


Figura 5.21 – Perfis das poropressões geradas pós-adensamento e para cada etapa (curva nominal corrigida pela subdivisão da curva cotas x volumes em trechos lineares).

Cabe enfatizar que as curvas dos perfis dos índices de vazios também podem ser usadas para avaliar a altura do material adensado em cada etapa. Esta altura corresponde ao ponto máximo da curva, ou seja, o ponto do índice de vazios máximo, que é o valor do índice de vazios para tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ). Como estas alturas foram essencialmente iguais às aquelas obtidas nas curvas de adensamento final, ratifica-se, mais uma vez, a consistência dos resultados.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS**

#### **6.1 – Introdução**

Em projetos de disposição de rejeitos de mineração por via úmida, as análises da capacidade de estocagem do reservatório demandam o conhecimento das características de compressibilidade e adensamento dos resíduos lançados, função primária da natureza e da granulometria do material.

No caso de rejeitos finos, com elevadas proporções de partículas da fração argila, como ocorrem no caso de rejeitos de ouro, a previsão do comportamento dos resíduos e a formulação de um modelo deposicional consistente, não podem ser baseados em ensaios convencionais, exigindo metodologias específicas de ensaio e parâmetros geotécnicos, obtidos a partir de ensaios especiais. Adicionalmente, as relações constitutivas, obtidas a partir destes ensaios, permitem estabelecer metodologias de simulação numérica do enchimento dos reservatórios das barragens de contenção de rejeitos e a estimativa da vida útil de tais empreendimentos.

O presente trabalho buscou aplicar estes princípios para o caso de um empreendimento real, representado pela Barragem de Cuiabá, estrutura projetada para a contenção de rejeitos de ouro gerados na Planta Industrial do Queiroz, em implantação no município de Raposos/MG. Nos estudos numéricos, utilizou-se do Programa CONDES0, desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997), para análises do adensamento unidimensional a grandes deformações de solos finos, usando método de diferenças finitas.

Os parâmetros de *input* das simulações são baseados no conhecimento das leis constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade dos materiais, expressos pelas relações índices de vazios x tensões efetivas e índices de vazios x permeabilidades. Estas relações foram obtidas para os rejeitos da flotação de ouro da Planta do Queiroz, a

partir de séries de ensaios HCT com bomba de fluxo, realizados em laboratório.

Importante salientar que, os resultados obtidos e as conclusões expostas, foram definidos a partir do material estudado, ficando, portanto, as responsabilidades dos resultados encontrados a mercê das características do material. Desta forma, qualquer alteração observada, no rejeito lançado, deverá ter novas análises, a partir destes lançamentos e de acordo com as modificações do material.

## **6.2 – Conclusões Principais**

- **Em relação aos Ensaios HCT com Bomba De Fluxo**

Os ensaios HCT com bomba de fluxo mostraram-se bastante práticos e consistentes para a determinação das características de adensamento dos rejeitos de flotação estudados, tanto sob a forma de polpa como na forma de pasta. Adicionalmente, os ensaios forneceram uma boa repetibilidade, sendo a eficiência dos resultados diretamente relacionada aos cuidados prévios adotados na preparação das amostras.

Durante a realização dos ensaios, pôde ser observado que, quanto maior a compressibilidade do rejeito, maiores os tempos decorridos para a estabilização das poropressões. Um fator crítico para se obter resultados consistentes com a metodologia HCT é a adequada definição das velocidades de ensaio nas etapas de carregamento e de permeabilidade saturada, garantindo-se que as pressões diferenciais entre o topo e a base das amostras ensaiadas fiquem sempre limitadas à faixa entre 1,5 e 10 kPa, como recomendado por Znidarcic et al. (1992).

- **Em relação às Simulações Numéricas**

As análises numéricas implementadas para o enchimento do reservatório da Barragem de Cuiabá contemplaram diferentes abordagens (enchimento instantâneo e enchimento escalonado, curvas cotas x volumes com e sem correções).

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que as metodologias adotadas para as hipóteses de enchimento instantâneo e enchimento escalonado, sem considerar a correção da curva de enchimento, não foram representativas das condições reais do problema analisado. No primeiro caso, a simulação constitui mera hipótese, resultando em uma consolidação dos rejeitos muito rápida, em um período de aproximadamente 40 dias. No segundo caso, a simulação é falha por não incluir os efeitos significativos do adensamento dos rejeitos previamente lançados no reservatório da barragem, obtendo-se uma altura final irrealista de 30,16m para o depósito dos rejeitos adensados.

Na análise por enchimento escalonado com a correção da curva de enchimento por intervalos de tempos (períodos anuais), a simulação não contemplou a não uniformidade das variações da curva cotas x volumes ao longo do tempo, que tendem a ser substancialmente maiores nos primeiros estágios do enchimento. Assim, embora com resultados bastante consistentes e qualitativamente representativos do problema real (evolução do adensamento e perfis dos índices de vazios dos rejeitos ao longo do tempo), esta solução foi, ainda, inadequada em termos da quantificação do processo de enchimento do reservatório (altura final igual a 42,6m).

Finalmente, analisando-se o enchimento do reservatório por meio da sistemática da decomposição da curva cotas x volumes em trechos lineares ('linearização da curva cotas x volumes'), os resultados da simulação mostraram-se bastante consistentes e, na conclusão do autor deste trabalho, representa, efetivamente, a tendência de evolução do processo de enchimento do reservatório da Barragem de Cuiabá ao longo dos 12 anos previstos para a vida útil deste empreendimento. A simulação contemplou um total de 19 estágios de enchimento e os resultados indicaram que, para um volume total de 4.581.057,03 m<sup>3</sup> depositados no reservatório da barragem ao longo da sua vida útil, a altura final dos rejeitos adensados seria igual a 46,47m.

Assim, a altura final da estrutura para armazenar os rejeitos totais gerados, levando em consideração o adensamento transiente e a reutilização da água sobrenadante, deverá ser de 46,5 m. Considerando as mesmas alturas adicionais de 1,5 m, adotadas no projeto original, para amortecimento de cheias e de borda livre para absorção de ondas ao longo

do reservatório, a altura final prevista para a barragem deverá ser de 49,5 m.

Estes resultados podem, então, serem confrontados com o projeto original. Numa primeira correlação, admitiu-se a manutenção de três alteamentos, tal como propostos no projeto da barragem (Figura 6.1). Neste contexto, a previsão original definiu as alturas de 44, 57,2 e 63,2 m para os alteamentos, visando a contenção dos rejeitos gerados após 4, 9 e 12 anos de disposição dos rejeitos na barragem de Cuiabá, respectivamente. Nas simulações deste trabalho, as alturas destes alteamentos deveriam ser iguais a 34, 44 e 49,5 m, respectivamente.

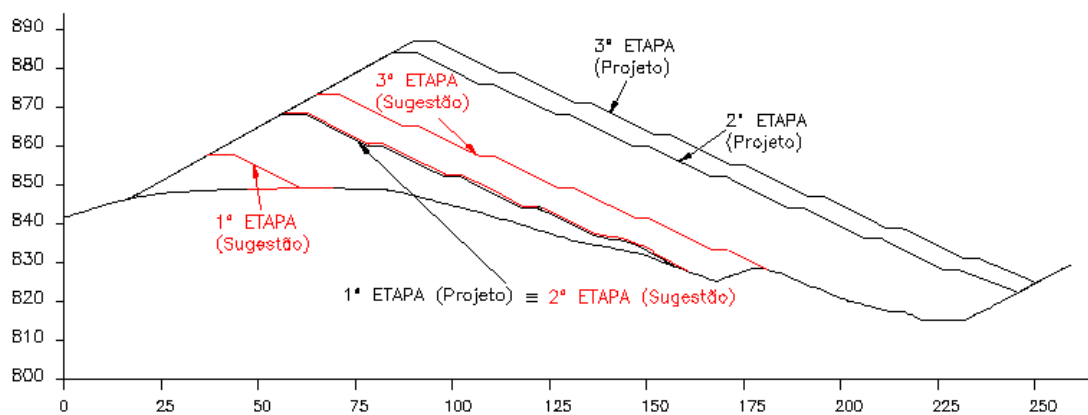


Figura 6.1 – Correlações entre projeto e simulações numéricas (três alteamentos).

Estas correlações iniciais mostram, portanto, que, a rigor, apenas dois alteamentos seriam suficientes para atender às estimativas dos volumes de rejeitos gerados durante a vida útil do empreendimento. Neste caso, as alturas finais destes alteamentos deveriam ser iguais a 44 m e 49,5 m, respectivamente (Figura 6.2).

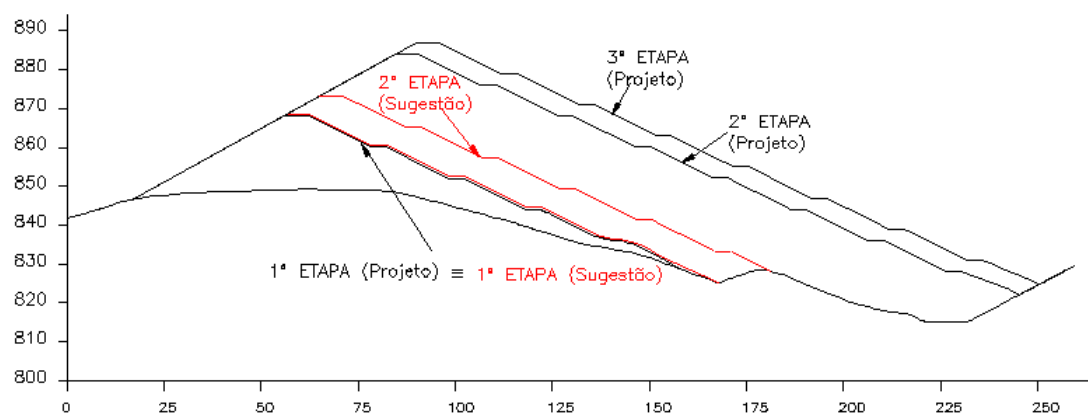


Figura 6.2 – Alternativa de projeto pelas simulações numéricas (dois alteamentos).

### 6.3 – Sugestões para Pesquisas Complementares

Conforme visto, a Barragem de Cuiabá encontra-se em implantação com início de operação em 2007. Desta forma, recomenda-se o monitoramento contínuo dos rejeitos depositados no reservatório (batimetrias periódicas ao longo do reservatório) para correlação destes dados com os resultados simulados neste trabalho.

Neste contexto, outras simulações poderiam ser realizadas, incluindo-se, diferentes condições de contorno (por exemplo, considerando diferentes condições de permeabilidade da fundação da barragem) para ajustes e calibração do modelo numérico à realidade do problema em análise.

Durante o processo de enchimento do reservatório, ensaios de sondagem piezométrica serão de grande valia para a obtenção das leis de compressibilidade e de permeabilidade dos rejeitos *in situ* e comparação com os resultados obtidos em ensaios de laboratório tipo HCT com bomba de fluxo.

Os ensaios HCTs com bomba de fluxo, mesmo tendo uma duração menor que outros ensaios, requerem um período de, no mínimo, três dias, conforme destacados nas metodologias apresentadas por Botelho (2001) e Znidarcic et al. (1992). Como na maioria dos ensaios a amostra já se encontra saturada, o tempo sugerido para aplicação da contrapressão pode ser desconsiderado. Desta forma, um trabalho visando a obtenção dos parâmetros do adensamento, com e sem a aplicação de contrapressão, seria interessante para verificar a comparação relativa destes resultados.

Uma sugestão final seria a de implementar uma interface gráfica de saída ao Programa CONDES0, uma vez que, na versão atual, todos os resultados são obtidos em quatro arquivos de texto (tabelas), exigindo, portanto, um trabalho adicional de processamento gráfico dos mesmos. Tal procedimento, propiciaria uma maior agilidade das análises para extrapolação a outras barragens e outros empreendimentos de mineração.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

ABNT (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. NBR6509, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 8 p., São Paulo, SP.

ABNT (1984). Solo – Análise granulométrica. NBR7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 13 p., São Paulo, SP.

ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Liquidez. NBR6459, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 6 p., São Paulo, SP.

ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. NBR7180, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 3 p., São Paulo, SP.

Abreu, F.R.S., Azevedo, R. e de Campos, T.M. (1990) Modelo Numérico para Cálculo da Sedimentação de Rejeitos, 6o Cong. Bras. de Geologia de Engenharia / IX COBRAMSEF, Salvador, Bahia, Vol.1, p. 21 – 27.

Abu-Hejleh, A.N. e Znidarcic, D. (1994) Estimation of the Consolidation Constitutive Relations, 8th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Virginia, EUA, Balkema, Vol.1, p.499– 504.

Abu-Hejleh, A.N. e Znidarcic, D. (1996). Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays. Journal of Geotechnical Engineering / April 1996/195.

Aiban, S. A. e Znidarcic, D. (1990). Evaluation of the Flow Pump and Constant Head Techniques for Permeability Measurements. Géotechnique, v. 39, no 4, p. 655-666.

Araruna Júnior, J. T., Clarke, B. C. e Harwood, A. H. (1994). A New Apparatus for Measuring Hydraulic Conductivity of Soils. 10º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10º COBRAMSEF, p. 343-350, Foz do Iguaçu, PR.



Araruna Júnior, J. T., Clarke, B. C. e Harwood, A. H. (1994). A New Apparatus for Measuring Hydraulic Conductivity of Soils. 10o Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10o COBRAMSEF, p. 343-350, Foz do Iguaçu, PR.

Azevedo, R. (1991) Sedimentação e Adensamento Uni-Dimensional de Lamas, II Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, Rio de Janeiro, RJ, p. 211 – 220.

Botelho, A. P. D. (2001) Implementação de Metodologias de Ensaio para Determinação de Relações Constitutivas de Processos de Fluxo em Solos com a Utilização da Bomba de Fluxo. Dissertação de Mestrado. UFOP. Ouro Preto. MG.

Bromwell, L.G. (1984) Consolidation of Mining Wastes, Symp. on Sedimentation – Consolidation Models: Prediction and Validation, ASCE, São Francisco, EUA, p. 275 – 295.

Carrier III, W. D., Bromwell, L. G. e Somogyi, F. (1983). Design Capacity of Slurried Mineral Waste Pounds. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 109, no 5, p. 699-716.

CMEC - Consórcio Mineiro de Engenheiros Consultores Ltda, (2005). Relatório Técnico Apresentado à Empresa AngloGold Ashanti Mineração Ltda do Projeto Expansão Cuiabá – Barragem para Contenção de Rejeitos Projeto Básico. V. I e II.

Costa, M. A. (2006). Concepção, Projeto e Análise Geotécnica de Contenção de Rejeitos Auríferos de Calcinados [manuscrito] / Murilo de Amorim Costa – 2006. XIV, 102 f. : / color.; Graf.; tabs.; mapas.

Geolabor (2004). Relatório TLF-3142/04 – Estudo da Estabilidade da Barragem de Cuiabá de Propriedade da AngloGold Ashanti Mineração Ltda do Projeto de Expansão Cuiabá.

Gibson, R. E., England, G. L. e Hussey, M. J. L. (1967). The Theory of One-

dimensional Consolidation of Saturated Clays: I. Finite Non-linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers. *Géotechnique*, v. 17, no 3, p. 261-273.

Gibson, R.E., England, G.L. e Hussey, M.H.L. (1967) The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays, I. Finite Nonlinear Consolidation of Thin Homogeneous Layers, *Geotechnique*, 17(3), p. 261 – 273.

Gobara, W.; Pinto, C. S. & De Silvio, E. Obtenção de Parâmetros para Dimensionamento de Reservatórios para Disposição de Rejeitos pelo Ensaio HCT. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de resíduos REGEO'95. Ouro Preto - MG p 1\_14.

Gomes, (2005). Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Resíduos de Mineração, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 220 p.

Gomes, R.C. (1997) Estudos de Compressibilidade e Adensamento dos Rejeitos de Bauxita da Barragem do Marzagão / Alcan, Vol.1 – Ensaios de Campo, Ouro Preto / MG, 36p.

Imai, G. (1979). Development of a New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force. *Soils and Foundations*, v. 19, no 3, p. 45-60.

Klohn, J. (1981). Design and Construction of Tailings Dams, Colorado School of Mines. *Soils and Foundations*, v. 19, no 3, p. 45-60.

Koppula, S. D. e Morgenstern, N. R. (1982). On the Consolidation of Sedimentation Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 19, p. 260-268.

Kynch, G.J. (1952) A Theory of Sedimentation, *Transactions of Faraday Society*, Vol. 48, p. 166 – 176.

Lee, K. (1981). Consolidation with Constant Rate of Deformation. *Géotechnique*, v. 31,

no 2, p. 215-229.

Lee, K., Choa, V., Lee, S. H. e Quek, S. H. (1994). Constant Rate of Strain Consolidation of Singapore Marine Clay. *Géotechnique*, v. 43, no 3, p. 471-488.

Mikasa, M. (1963). The Consolidation of Soft Clay – A New Consolidation Theory and Its Application Kajima Shuppankai, Tokyo (em japonês com resumo em inglês).

Monte, J. L. e Krizek, R. J. (1976). One-dimensional Mathematical Model for Large-strain Consolidation. *Géotechnique*, v. 26, no 3, p. 495-510.

Olsen, H. W. (1966). Darcy's Law Saturated kaolinite. *Water Resources Research*, v. 2, no 2, p. 287-295.

Pane, V. (1981). One-dimensional Finite Strain Consolidation. M. Sc. Thesis. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 148 p, Boulder, Colorado.

Santos, D. C. D. (2000). Determinação das Propriedades de Compressibilidade e Permeabilidade do Rejeito de Bauxita da Barragem de Marzagão através de Ensaio de Laboratório e Campo. Dissertação de Mestrado. UFV. Viçosa. MG. 132p.

Schiffman, R. L. (1980). Finite and Infinitesimal Strain Consolidation. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, v. 106, no GT2, p. 203-207.

Smith, R. E. e Wahls. H. E. (1969). Consolidation Under Constant Rates of Strain. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 1, no SM2, p. 519-539.

Somogyi, F. (1979). Analysis and Prediction of Phosphatic Clay Consolidation: Implementation Package. Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project (Technical Report).

Umehara, Y. e Zen, K. (1980). Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft

Clayey Soils. *Soils and Foundations*, v. 20, no 2, p. 79-95.

Vick, S. G. (1983). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*, Massachusetts Institute of Technology, Onh W: ley e sans, 369p.

Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. e Heiberg, S. (1971). Consolidation at Constant Rate of Strain. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, v. 4, no SM10, p. 1393-1413.

Xie, K. H.; Leo, C. J.(2004). Analytical Solutions of One-dimensional Large Strain Consolidation of Saturated and Homogeneous Clays. *Computers and Geotechnics* 31 (2004) 301-314.

Yao. D. T. C. & Znidarcic, D. (1997). *User's Manual for Computer Program CONDESO*. University of Colorado at Boulder, EUA.

Znidarcic, D. (1982). *Laboratory Determination of Consolidation Properties of Cohesive Soils*. PhD. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 172 p, Boulder, Colorado.

Znidarcic, D. e Aiban, S. A. (1988). Discussion on Some Measurements of the Permeability of Kaolin by Al-Tabbaa, A. e Wood, D. M. *Géotechnique*, v. 38, n<sup>o</sup> 4, p. 453-454.

Znidarcic, D. e Liu, J.C. (1989) Consolidation Characteristics Determination for Dredged Material, XXII Annual Dredging Seminar, Tacoma, Washington, EUA, p. 45 – 65.

Znidarcic, D. et all (1992) Consolidation Characteristics Determination for Phosphatic Clays, Vol. 1 Seepage Induced Consolidation Test Equipment Description and Users Manual.

Znidarcic, D., Schiffman, R. L., Pane, V., Croce, P., Ko, H. Y. e Olsen, H. W. (1986).

The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays: V. Constant Rate of Deformation Testing and Analysis. *Géotechnique*, v. 36, no 2, p. 227-236.

Znidarcic, D.; Hejleh, A. N. A.; Fairbanks. T.; Robertson, A. (1992). Consolidation Characteristics Determination for Phosphatic Clays. Vol 1: Seepage Induced Consolidation Test Equipment Description and Users Manual. University of Colorado at Boulder, EUA.

# ***ANEXO***

# ANEXO I:

## Modelo de Arquivos de Saídas do Programa CONDES0.

### *input*

```
1,1909      -,0500 33,301      2,6202      ,33962      A1,B1,C,D,Z1
2           3-D DESSICATION STATUS
2,8680      SPECIFIC GRAVITY OF SOLIDS
9,8070      UNIT WEIGHT OF WATER
23,150      INITIAL HEIGHT OF SOIL
1           STAGE FILLING STATUS
1           1 NUMBER OF FILLING STAGES
1,7648      2,1464      6,1269      BEGINNING TIME,ENDING TIME,HEIGHTS OR
RATES
2           TOP BOUNDARY CONDITION
,00000      TOP BOUNDARY CONDITION VALUES
1           BOTTOM BOUNDARY CONDITION
,50000      MINIMUM VOID RATIO
1,7648      STARTING TIME
10          NUMBER OF OUTPUT FILES
1,8029      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
1,8411      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
1,8793      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
1,9174      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
1,9556      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
1,9937      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
2,0319      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
2,0700      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
2,1082      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
2,1464      SPECIFIED TIME FOR OUTPUT
,40000E-01  MAXIMUM TIME INTERVAL
1           INITIAL STATUS
51          NUMBER OF NODAL VOID RATIO-ELEVATION
1,256972083417129      25,094312764089540
1,106260898517868      24,634336207817810
1,068109016090964      24,131719108708100
1,046306280215232      23,629020087968950
1,031075984651016      23,126289801939680
1,019402381492708      22,623545165554820
1,009956552155599      22,120793587514080
1,002035575107067      21,618038769374510
9,952228251609449E-001  21,115282698173950
9,892512158827227E-001  20,612526479742590
9,839393767915310E-001  20,109770734280180
9,791585827486575E-001  19,607015801483820
9,748142187916153E-001  19,104261853976720
9,708347352111119E-001  18,601508963102870
9,671647335758525E-001  18,098757138485520
9,637604596178537E-001  17,596006352454070
9,605867635914868E-001  17,093256555418380
9,576149902084462E-001  16,590507685666430
9,548214769466045E-001  16,087759675645540
9,521864619075325E-001  15,585012455984990
9,496932742523578E-001  15,082265958047890
```

9,473277238882282E-001	14,579520115515380
9,450776343844970E-001	14,076774865330800
9,429324806388370E-001	13,574030148219320
9,408831043488311E-001	13,071285908927290
9,389214880919853E-001	12,568542096277900
9,370405741202760E-001	12,065798663108720
9,352341176687656E-001	11,563055566135450
9,334965671906494E-001	11,060312765772080
9,318229658066813E-001	10,557570225927640
9,302088696209196E-001	10,054827913793280
9,286502795590831E-001	9,552085799628282
9,271435841336067E-001	9,049343856550964
9,256855111022924E-001	8,546602060337548
9,242730864150115E-001	8,043860389230996
9,229035991708606E-001	7,541118823760389
9,215745715617820E-001	7,038377346570867
9,202837329763640E-001	6,535635942263474
9,190289975928041E-001	6,032894597244003
9,178084449129325E-001	5,530153299579601
9,166203027869728E-001	5,027412038861783
9,154629325570731E-001	4,524670806074322
9,143348160109538E-001	4,021929593464465
9,132345438881215E-001	3,519188394415791
9,121608057229703E-001	3,016447203321000
9,111123808432204E-001	2,513706015452881
9,100881303703375E-001	2,010964826831614
9,090869900918741E-001	1,508223634086551
9,081079640950092E-001	1,005482434310535
9,071501190667384E-001	5,027412249047147E-001
9,062125793123613E-001	0,000000000000000E+000
25,094	FINAL HEIGHT OF SOIL
2,1464	STOPPING TIME

### *ts.out*

	SOIL	AVERAGE DRY	CUMULATED OUTFLOW	CUMULATED OUTFLOW	CRUST
-TIME-	-HEIGHT-	-DENSITY-	-TOP-	-BOTTOM-	-THICKNESS-
.1765E+01	.2315E+02	.1437E+02	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
.1803E+01	.2332E+02	.1438E+02	.9002E+00	.0000E+00	.0000E+00
.1841E+01	.2352E+02	.1438E+02	.1859E+01	.0000E+00	.0000E+00
.1879E+01	.2372E+02	.1438E+02	.2819E+01	.0000E+00	.0000E+00
.1917E+01	.2392E+02	.1438E+02	.3778E+01	.0000E+00	.0000E+00
.1956E+01	.2412E+02	.1439E+02	.4740E+01	.0000E+00	.0000E+00
.1994E+01	.2430E+02	.1439E+02	.5699E+01	.0000E+00	.0000E+00
.2032E+01	.2452E+02	.1439E+02	.6659E+01	.0000E+00	.0000E+00
.2070E+01	.2470E+02	.1440E+02	.7621E+01	.0000E+00	.0000E+00
.2108E+01	.2489E+02	.1440E+02	.8581E+01	.0000E+00	.0000E+00
.2146E+01	.2509E+02	.1440E+02	.9538E+01	.0000E+00	.0000E+00
THE TOTAL HEIGHT OF SOIL SOLID IS			12.861342919329820		

Obs.: Neste anexo será mostrado apenas parte do arquivo *vd.out*, correspondente aos dois primeiros tempos de saída. Para os demais tempos, segue-se o mesmo formato desse último.



vd.out

TIME = 1.765

INITIAL STATE					STEADY STATE	
		VOID	SOLID	WATER		
-NODE--	ELEVATION-	-RATIO-	-CONTENT-	-PRESSURE-	-ELEVATION-	-RATIO-
51	.2315E+02	.1257E+01	.6953E+00	.0000E+00	.1000E-19	.1257E+01
50	.2269E+02	.1104E+01	.7220E+00	.4274E+01	.1000E-19	.1257E+01
49	.2222E+02	.1069E+01	.7284E+00	.8779E+01	.1000E-19	.1257E+01
48	.2176E+02	.1049E+01	.7323E+00	.1331E+02	.1000E-19	.1257E+01
47	.2130E+02	.1034E+01	.7350E+00	.1785E+02	.1000E-19	.1257E+01
46	.2083E+02	.1023E+01	.7372E+00	.2240E+02	.1000E-19	.1257E+01
45	.2037E+02	.1013E+01	.7389E+00	.2694E+02	.1000E-19	.1257E+01
44	.1991E+02	.1006E+01	.7404E+00	.3149E+02	.1000E-19	.1257E+01
43	.1945E+02	.9988E+00	.7417E+00	.3604E+02	.1000E-19	.1257E+01
42	.1898E+02	.9929E+00	.7428E+00	.4058E+02	.1000E-19	.1257E+01
41	.1852E+02	.9876E+00	.7438E+00	.4513E+02	.1000E-19	.1257E+01
40	.1806E+02	.9829E+00	.7448E+00	.4968E+02	.1000E-19	.1257E+01
39	.1759E+02	.9786E+00	.7456E+00	.5422E+02	.1000E-19	.1257E+01
38	.1713E+02	.9746E+00	.7464E+00	.5877E+02	.1000E-19	.1257E+01
37	.1667E+02	.9710E+00	.7471E+00	.6332E+02	.1000E-19	.1257E+01
36	.1620E+02	.9676E+00	.7477E+00	.6787E+02	.1000E-19	.1257E+01
35	.1574E+02	.9644E+00	.7484E+00	.7241E+02	.1000E-19	.1257E+01
34	.1528E+02	.9615E+00	.7489E+00	.7696E+02	.1000E-19	.1257E+01
33	.1482E+02	.9587E+00	.7495E+00	.8151E+02	.1000E-19	.1257E+01
32	.1435E+02	.9560E+00	.7500E+00	.8605E+02	.1000E-19	.1257E+01
31	.1389E+02	.9535E+00	.7505E+00	.9060E+02	.1000E-19	.1257E+01
30	.1343E+02	.9512E+00	.7509E+00	.9515E+02	.1000E-19	.1257E+01
29	.1296E+02	.9489E+00	.7514E+00	.9969E+02	.1000E-19	.1257E+01
28	.1250E+02	.9468E+00	.7518E+00	.1042E+03	.1000E-19	.1257E+01
27	.1204E+02	.9447E+00	.7522E+00	.1088E+03	.1000E-19	.1257E+01
26	.1157E+02	.9428E+00	.7526E+00	.1133E+03	.1000E-19	.1257E+01
25	.1111E+02	.9409E+00	.7530E+00	.1179E+03	.1000E-19	.1257E+01
24	.1065E+02	.9391E+00	.7533E+00	.1224E+03	.1000E-19	.1257E+01
23	.1019E+02	.9373E+00	.7537E+00	.1270E+03	.1000E-19	.1257E+01
22	.9723E+01	.9357E+00	.7540E+00	.1315E+03	.1000E-19	.1257E+01
21	.9260E+01	.9341E+00	.7543E+00	.1361E+03	.1000E-19	.1257E+01
20	.8797E+01	.9325E+00	.7546E+00	.1406E+03	.1000E-19	.1257E+01
19	.8334E+01	.9310E+00	.7549E+00	.1451E+03	.1000E-19	.1257E+01
18	.7871E+01	.9295E+00	.7552E+00	.1497E+03	.1000E-19	.1257E+01
17	.7408E+01	.9281E+00	.7555E+00	.1542E+03	.1000E-19	.1257E+01
16	.6945E+01	.9267E+00	.7558E+00	.1588E+03	.1000E-19	.1257E+01
15	.6482E+01	.9254E+00	.7560E+00	.1633E+03	.1000E-19	.1257E+01
14	.6019E+01	.9241E+00	.7563E+00	.1679E+03	.1000E-19	.1257E+01
13	.5556E+01	.9228E+00	.7566E+00	.1724E+03	.1000E-19	.1257E+01
12	.5093E+01	.9216E+00	.7568E+00	.1769E+03	.1000E-19	.1257E+01
11	.4630E+01	.9204E+00	.7570E+00	.1815E+03	.1000E-19	.1257E+01
10	.4167E+01	.9193E+00	.7573E+00	.1860E+03	.1000E-19	.1257E+01
9	.3704E+01	.9181E+00	.7575E+00	.1906E+03	.1000E-19	.1257E+01
8	.3241E+01	.9170E+00	.7577E+00	.1951E+03	.1000E-19	.1257E+01
7	.2778E+01	.9160E+00	.7579E+00	.1996E+03	.1000E-19	.1257E+01
6	.2315E+01	.9149E+00	.7581E+00	.2042E+03	.1000E-19	.1257E+01
5	.1852E+01	.9139E+00	.7584E+00	.2087E+03	.1000E-19	.1257E+01
4	.1389E+01	.9129E+00	.7586E+00	.2133E+03	.1000E-19	.1257E+01
3	.9260E+00	.9119E+00	.7588E+00	.2178E+03	.1000E-19	.1257E+01
2	.4630E+00	.9109E+00	.7589E+00	.2223E+03	.1000E-19	.1257E+01
1	.0000E+00	.9100E+00	.7591E+00	.2269E+03	.1000E-19	.1257E+01

TIME = 1.803

		VOID	SOLID	WATER	ALPHA
-NODE--	ELEVATION-	-RATIO-	-CONTENT-	-PRESSURE-	-VALUES-
51	.2332E+02	.1257E+01	.6953E+00	.0000E+00	.1000E+01
50	.2286E+02	.1101E+01	.7226E+00	.3987E+01	.1000E+01
49	.2239E+02	.1067E+01	.7289E+00	.8453E+01	.1000E+01
48	.2192E+02	.1047E+01	.7326E+00	.1298E+02	.1000E+01
47	.2146E+02	.1032E+01	.7353E+00	.1753E+02	.1000E+01
46	.2099E+02	.1021E+01	.7374E+00	.2210E+02	.1000E+01
45	.2053E+02	.1012E+01	.7392E+00	.2667E+02	.1000E+01
44	.2006E+02	.1004E+01	.7406E+00	.3125E+02	.1000E+01
43	.1959E+02	.9978E+00	.7419E+00	.3584E+02	.1000E+01
42	.1913E+02	.9920E+00	.7430E+00	.4042E+02	.1000E+01
41	.1866E+02	.9868E+00	.7440E+00	.4501E+02	.1000E+01
40	.1819E+02	.9821E+00	.7449E+00	.4960E+02	.1000E+01
39	.1773E+02	.9779E+00	.7457E+00	.5419E+02	.1000E+01
38	.1726E+02	.9739E+00	.7465E+00	.5878E+02	.1000E+01
37	.1679E+02	.9703E+00	.7472E+00	.6336E+02	.1000E+01
36	.1633E+02	.9669E+00	.7479E+00	.6795E+02	.1000E+01
35	.1586E+02	.9638E+00	.7485E+00	.7254E+02	.1000E+01
34	.1539E+02	.9609E+00	.7490E+00	.7713E+02	.1000E+01
33	.1493E+02	.9581E+00	.7496E+00	.8172E+02	.1000E+01
32	.1446E+02	.9555E+00	.7501E+00	.8630E+02	.1000E+01
31	.1400E+02	.9530E+00	.7506E+00	.9089E+02	.1000E+01
30	.1353E+02	.9507E+00	.7511E+00	.9548E+02	.1000E+01
29	.1306E+02	.9484E+00	.7515E+00	.1001E+03	.1000E+01
28	.1260E+02	.9463E+00	.7519E+00	.1046E+03	.1000E+01
27	.1213E+02	.9442E+00	.7523E+00	.1092E+03	.1000E+01
26	.1166E+02	.9423E+00	.7527E+00	.1138E+03	.1000E+01
25	.1120E+02	.9404E+00	.7531E+00	.1184E+03	.1000E+01
24	.1073E+02	.9386E+00	.7534E+00	.1230E+03	.1000E+01
23	.1026E+02	.9369E+00	.7538E+00	.1276E+03	.1000E+01
22	.9797E+01	.9352E+00	.7541E+00	.1321E+03	.1000E+01
21	.9330E+01	.9336E+00	.7544E+00	.1367E+03	.1000E+01
20	.8864E+01	.9320E+00	.7547E+00	.1413E+03	.1000E+01
19	.8397E+01	.9305E+00	.7550E+00	.1459E+03	.1000E+01
18	.7931E+01	.9291E+00	.7553E+00	.1505E+03	.1000E+01
17	.7464E+01	.9277E+00	.7556E+00	.1550E+03	.1000E+01
16	.6998E+01	.9263E+00	.7559E+00	.1596E+03	.1000E+01
15	.6531E+01	.9250E+00	.7561E+00	.1642E+03	.1000E+01
14	.6065E+01	.9237E+00	.7564E+00	.1688E+03	.1000E+01
13	.5598E+01	.9224E+00	.7566E+00	.1734E+03	.1000E+01
12	.5132E+01	.9212E+00	.7569E+00	.1779E+03	.1000E+01
11	.4665E+01	.9200E+00	.7571E+00	.1825E+03	.1000E+01
10	.4199E+01	.9188E+00	.7574E+00	.1871E+03	.1000E+01
9	.3732E+01	.9177E+00	.7576E+00	.1917E+03	.1000E+01
8	.3266E+01	.9166E+00	.7578E+00	.1962E+03	.1000E+01
7	.2799E+01	.9155E+00	.7580E+00	.2008E+03	.1000E+01
6	.2333E+01	.9145E+00	.7582E+00	.2054E+03	.1000E+01
5	.1866E+01	.9135E+00	.7584E+00	.2099E+03	.1000E+01
4	.1400E+01	.9125E+00	.7586E+00	.2145E+03	.1000E+01
3	.9331E+00	.9115E+00	.7588E+00	.2191E+03	.1000E+01
2	.4665E+00	.9105E+00	.7590E+00	.2237E+03	.1000E+01
1	.0000E+00	.9096E+00	.7592E+00	.2282E+03	.1000E+01