



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Edwiges Andrea Santos Moreira

**Comportamento de uma barragem de resíduos de bauxita durante a  
operação de enchimento**

Rio de Janeiro

2015

Edwiges Andrea Santos Moreira

**Comportamento de uma barragem de resíduos de bauxita durante a operação  
de enchimento**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M848 Moreira, Edwiges Andrea Santos.  
Comportamento de uma barragem de resíduos de bauxita durante a operação de enchimento / Edwiges Andrea Santos Moreira. - 2015.  
79 f.

Orientador: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Barragens e açudes – Dissertações. 3. Bauxita -- Dissertações. 4. Metodo dos elementos finitos açudes – Dissertações. I. Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 627.82

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

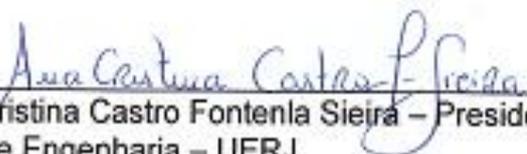
**Edwiges Andrea Santos Moreira**

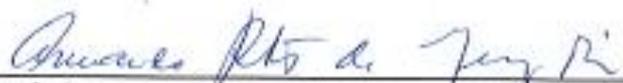
Comportamento de uma barragem de resíduos de bauxita durante a operação de enchimento.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 28 de maio de 2015.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Ana Cristina Castro Fontenla Sieira – Presidente / Orientadora  
Faculdade de Engenharia – UERJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Armando Prestes de Menezes Filho  
Faculdade de Engenharia – UERJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Prof.<sup>a</sup> Michéle Dal Toé Casagrande  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Rio de Janeiro

2015

## DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória. A minha mãe pelo amor incondicional e ao meu querido marido Marco, por compartilhar muitos momentos, felizes ou não. A todos da UERJ que colaboraram para a conclusão desta empreitada.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora, Prof. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira, por ter acreditado em mim, pela ajuda, pela imensa paciência, boa vontade, principalmente pelo carinho e pela amizade, e também pelos ensinamentos cujas aulas foram os alicerces para a elaboração deste trabalho.

Às professoras Dra. Bernadete Ragoni Danziger e Dra. Denise Maria Soares Gerscovich pelas maravilhosas aulas e ensinamentos.

Aos meus colegas, amigos(as) de mestrado – Cynthia, Dani, Luizimar, Márcio, Tatiana e Stephane – que sempre me apoiaram.

À minha comadre Gisely pela torcida, tolerância e amizade.

À Helena que sempre nos facilitou em todas as incumbências administrativas.

À UERJ por tudo.

Sei bem o que é passar necessidade e sei bem o que é andar com fartura.  
Aprendi o mistério de viver feliz em todo lugar e em qualquer situação, esteja bem alimentado, ou mesmo com fome, possuindo fartura, ou passando privações.  
Tudo posso naquele que me fortalece.

*Filipenses 4: 12-13*

## RESUMO

MOREIRA, Edwiges Andrea Santos. *Comportamento de uma área de resíduos de bauxita durante a operação de enchimento*. 2015. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A técnica de deposição de resíduos de processamento de bauxita prevê uma operação inicial de lançamento de resíduos, por via úmida, no interior de reservatórios artificiais. Nesta fase de deposição, os resíduos são lançados em forma de polpa, sofrendo processos de sedimentação e adensamento por peso próprio. A vida útil dos reservatórios depende fundamentalmente do comportamento geotécnico do resíduo, cujas propriedades variam ao longo do tempo e da profundidade. A presente dissertação tem como objetivo a análise do comportamento de uma área de resíduos de bauxita durante a operação de enchimento do reservatório. Para tanto, foi utilizado o programa Plaxis, que executa análises tensão-deformação pelo método dos elementos finitos. Os parâmetros geotécnicos do resíduo foram definidos com base em ensaios de adensamento e piezocone, executados em amostras representativas da polpa de resíduos. Para calibração do modelo, a batimetria executada no reservatório foi confrontada com as cotas de enchimento previstas numericamente. Finalmente, a distribuição dos parâmetros geotécnicos (peso específico, índice de vazios, permeabilidade) com a profundidade prevista numericamente foi confrontada com os valores medidos no campo, ao final da etapa de enchimento. O conhecimento da variação dos parâmetros geotécnicos com a profundidade ao final do enchimento é importante para avaliar o comportamento do reservatório na etapa de operação de alteamento, e para a estimativa do ganho de vida útil do reservatório. Os resultados permitiram avaliar o funcionamento da drenagem de fundo, a distribuição complexa dos excessos de poropressão ao final do enchimento, os perfis dos índices físicos com a profundidade e o ganho de vida útil. As análises mostraram que o programa foi capaz de reproduzir os processos simultâneos de sedimentação e adensamento por peso próprio, em análises de enchimento de reservatórios de resíduos.

Palavras-chave: Resíduo de Bauxita; Método dos Elementos Finitos.

## ABSTRACT

The technique of disposing of waste bauxite processing provides an initial launch of operation, the wet disposal, within artificial reservoirs. In this phase of deposition, the waste is released in the form of pulp, suffering processes of sedimentation and consolidation by self-weight. The useful life of the reservoirs depends crucially on the Geotechnical behavior of the residue, whose properties vary over time and depth. The present dissertation aims to behavior analysis of a bauxite waste area during the operation of filling the tank. To this end, we used the program Plaxis, which performs stress-strain analyses by the finite element method. The Geotechnical parameters of residue were defined based on piezocone, consolidation and tests carried out on representative samples of waste pulp. For calibration of the bathymetry model executed in the reservoir was faced with filling quotas provided for numerically. Finally, the distribution of geotechnical parameters (specific weight, void ratio, permeability) with the depth expected numerically was confronted with the values measured in the field, at the end of the filling stage. Knowledge of geotechnical parameters variation with depth at the end of the filling is important to evaluate the behavior of the reservoir in heightening operation step, and for the estimation of the useful life of the reservoir. The results made it possible to assess the functioning of the Fund drainage, the complex distribution of excess pore pressure dissipations at the end of the filling, the profiles of physical indexes with the depth and the gain of life. The analysis showed that the program was able to reproduce the simultaneous processes of sedimentation and consolidation by self-weight, in analyses of reservoir filling of waste.

Keywords: Bauxite residue; Finite element method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Técnica de Deposição de Resíduos de Bauxita .....	16
Figura 2. Fluxograma da Fabricação de Alumínio (Adaptado de Habashi, 2005) .....	21
Figura 3. Curvas Granulométricas de Diferentes Resíduos (Adaptado de Campos, 1986).....	24
Figura 4. Coeficiente de Adensamento: Ensaio Convencionais (Stinson, 1981) .....	26
Figura 5. Resultados de Ensaio CRD em lama vermelha obtidos por Villar (2002) ..	26
Figura 6. Valores de permeabilidade para resíduos (Massanero, 1994; Bedin, 2006) .....	27
Figura 7. Processo de geração de Poropressões Durante o Enchimento (Vick, 1983) .....	31
Figura 8. Enchimento ( <i>wet disposal</i> ) .....	32
Figura 9. Localização das Áreas de Deposição de Resíduos .....	33
Figura 10. Vista geral de uma área de resíduos após o enchimento .....	34
Figura 11. Seção Típica da Área de Resíduos de Bauxita 3 .....	34
Figura 12. Controle do enchimento da área de resíduos 3 .....	36
Figura 13. Batimetria: Área de Resíduos 3 .....	37
Figura 14. Locação das Estações: Área de Resíduos 3.....	39
Figura 15. Distribuição do Peso Específico do Resíduo ao Longo da Profundidade (Lima, 2008).....	40
Figura 16. Distribuição da Densidade dos Grãos ao Longo da Profundidade (Lima, 2008).....	41
Figura 17. Variação da Umidade com a Profundidade (Lima, 2008).....	41
Figura 18. Variação do Índice de Vazios com a Profundidade (Lima, 2008).....	42
Figura 19. Curva de Compressibilidade Definida pelas Amostras de Campo (Lima, 2008).....	43
Figura 20. Variação do Índice de Vazios com a Tensão Efetiva (Bedin, 2006) .....	44
Figura 21. Variação do Índice de Vazios vs Permeabilidade .....	45
Figura 22. Distribuições de $R_f$ e $q_c$ fornecidas pelos ensaios de Piezocone .....	46
Figura 23. Classificação segundo Robertson e Campanella (1983).....	46
Figura 24. Variação de $c_v$ com a profundidade (todas as estações) – Lima (2008) ..	47
Figura 25. Variação de $k_v$ com a profundidade (Lima, 2008) .....	48

Figura 26. Geometria do Ensaio de Adensamento.....	55
Figura 27. Previsões numéricas vs resultados experimentais: Ensaio de Adensamento.....	57
Figura 28. Análise Numérica x Análise Experimental.....	58
Figura 29. Geometria Adotada nas Análises Numéricas da Área de Resíduos de Bauxita 3.....	60
Figura 30. Subprograma Calculation.....	63
Figura 31. Etapas de Lançamento.....	64
Figura 32. Confronto entre a batimetria e a previsão numérica do enchimento.....	65
Figura 33. Malha deformada ao final do enchimento.....	65
Figura 34. Funcionamento da Drenagem de Fundo.....	66
Figura 35. Distribuição das tensões efetivas verticais previstas com a profundidade.....	67
Figura 36. Distribuição do índice de vazios com a profundidade: Final do Enchimento.....	67
Figura 37. Distribuição do peso específico seco com a profundidade: Final do Enchimento.....	69
Figura 38. Distribuição do teor de umidade com a profundidade: Final do Enchimento.....	69
Figura 39. Fases de cálculo: Previsão do comportamento antes da fase de alteamento a montante.....	70
Figura 40. Distribuição do índice de vazios com a profundidade antes do alteamento.....	71
Figura 41. Distribuição das poropressões antes do alteamento.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de densidade real dos grãos de resíduos (Adaptado de Bedin, 2006)	24
Tabela 2. Funções de Compressibilidade de Solos Muito Moles (Adaptado de Villar, 2002)	26
Tabela 3. Fases de Operação das Áreas de Resíduos	33
Tabela 4. Produção de Resíduo	35
Tabela 5. Processo de enchimento da área de resíduos 3	37
Tabela 6. Correlação entre os parâmetros de compressibilidade	54
Tabela 7. Parâmetros do Modelo <i>Soft-Soil</i>	56
Tabela 8. Etapas de Carregamento: Ensaio de Adensamento	57
Tabela 9. Parâmetros do Dique de Solo Compactado	61
Tabela 10. Modelos constitutivos e parâmetros do resíduo	62
Tabela 11. Tempos de Enchimento de Cada Camada	62
Tabela 12. Recalques Previstos ao Término de Cada Etapa de Enchimento	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	parâmetro do modelo de compressibilidade
c	coesão
$C_v$	coeficiente de adensamento vertical
$C_h$	coeficiente de adensamento horizontal
$C_c$	coeficiente de compressão
$C_r$	coeficiente de recompressão
e	Índice de vazios
$e_0$	índice de vazios inicial
$e_f$	índice de vazios final
E	módulo de deformabilidade
EA	rigidez axial
EI	rigidez à flexão
$\varepsilon_v$	deformação específica vertical
G	densidade dos grãos
G	módulo de cisalhamento do solo
H	altura da camada compressível
$I_r$	índice de rigidez do solo
$k_v$	coeficiente de permeabilidade vertical
$k_h$	coeficiente de permeabilidade horizontal
$m_v$	módulo de variação volumétrica
$p'$	tensão efetiva média
$p_o'$	tensão efetiva inicial
$P_s$	peso dos sólidos
$P_t$	peso total
$\sigma'$	tensão efetiva vertical
$\sigma'_0$	tensão efetiva de pré-adensamento
$q_c$	resistência de ponta corrigida (cone)
$q_t$	resistência de ponta real mobilizada (cone)
R	raio do piezocone
S	grau de saturação

$S_u$	resistência ao cisalhamento não drenada
$t$	tempo
$T_L$	taxa de lançamento de rejeitos
$T$	fator tempo
$TS$	teor de sólidos
$U$	porcentagem de adensamento
$u_o$	poropressão hidrostática (inicial)
$u_z$	poropressão medida na base do cone
$V$	volume do reservatório
$\nu$	coeficiente de Poisson
$v$	volume específico
$\gamma_d$	peso específico seco
$\gamma_t$	peso específico total
$\gamma_{sub}$	peso específico submerso
$\gamma_w$	peso específico da água
$\gamma$	peso específico natural
$w$	teor de umidade
$\Delta\sigma$	variação da tensão total vertical
$\Delta\sigma'$	variação da tensão efetiva vertical
$\rho$	recalque total
$\phi$	ângulo de atrito interno
$B_q, R_f$	parâmetros de classificação do solo (piezocone)
$\alpha$	parâmetro auxiliar
$\lambda^*$	índice de compressão modificado
$\psi$	ângulo de dilatância
$k^*$	índice de carregamento/descarregamento modificado
$z$	profundidade

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ALUMAR	Consórcio de Alumínio do Maranhão
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CRD	<i>Constante Rate of Displacement</i>
FEN	Faculdade de Engenharia
IAI	International Aluminium Institute
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
MEF	Método dos Elementos Finitos
PGECIV	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
USGS	<i>U. S. Geological Survey</i>

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>Importância e Aplicabilidade do Estudo</b>	<b>15</b>
<b>Objetivos e Metodologia</b>	<b>16</b>
<b>Organização da Dissertação</b>	<b>16</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Considerações Iniciais</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Processo de Formação dos Resíduos de Bauxita</b>	<b>19</b>
<b>1.3. Caracterização Geotécnica dos Resíduos de Bauxita</b>	<b>22</b>
<b>1.4. Deposição de Resíduos</b>	<b>27</b>
<b>1.5. Geração de Poropressões Durante o Enchimento</b>	<b>30</b>
<b>2. ÁREA EM ESTUDO</b>	<b>32</b>
<b>2.1. Introdução</b>	<b>32</b>
<b>2.2. Processo de enchimento do reservatório</b>	<b>34</b>
<b>2.3. Investigações Geotécnicas na Área</b>	<b>38</b>
<b>3. FERRAMENTA NUMÉRICA</b>	<b>49</b>
<b>3.1. Programa Computacional Plaxis</b>	<b>49</b>
<b>3.2. Estrutura do Programa</b>	<b>50</b>
<b>3.3. Modelos Constitutivos</b>	<b>52</b>
<b>3.4. Validação do Programa</b>	<b>54</b>
<b>4. ANÁLISES NUMÉRICAS</b>	<b>59</b>
<b>4.1. Metodologia</b>	<b>59</b>
<b>4.2. Simulação Numérica da Área de Resíduos 3</b>	<b>60</b>
4.2.1. Elaboração do Modelo Geométrico	60
4.2.2. Definição dos Modelos Constitutivos e Parâmetros Geotécnicos	60
4.2.3. Simulação do Processo de Enchimento da Área de Resíduos 3	62
4.2.4. Previsão dos Índices Físicos ao Final do Enchimento	66
4.2.5. Previsão dos Índices Físicos antes da Etapa de Alçamento	70
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>73</b>
<b>5.1. Conclusões</b>	<b>73</b>
<b>5.2. Sugestões para Futuras Pesquisas</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>

# INTRODUÇÃO

## Importância e Aplicabilidade do Estudo

O estudo do comportamento de uma barragem de resíduos de mineração é de significativa importância, tendo em vista a exploração contínua de recursos minerais pela economia e com a finalidade de se manter o progresso tecnológico. Devido a isso o armazenamento de rejeitos se torna um problema crescente, pois há baixa resistência do resíduo com o risco de acidentes de considerável impacto ambiental. Neste trabalho, assim como na literatura, rejeitos ou resíduos de bauxita significam toda a lama vermelha que sobra da lavagem mediante o processamento Bayer para a fabricação do alumínio.

Muitos pesquisadores também se preocupam em conhecer o comportamento desses rejeitos na forma de lama, a fim de se dimensionar os reservatórios, planejar a estabilização do solo e prever uma futura utilização do aterro gerado. Os resíduos detêm grande variabilidade em suas características físico-químicas e mineralógicas, que conferem a eles um comportamento distinto dos geomateriais usualmente encontrados em depósitos naturais.

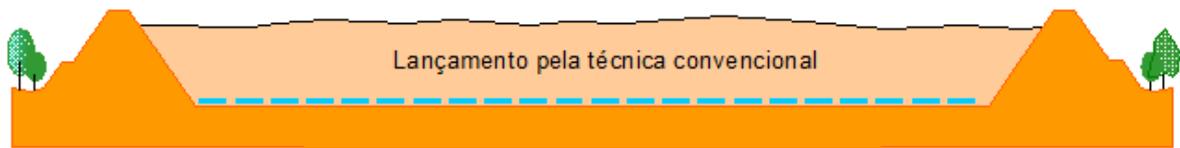
O objetivo é operar e manusear os reservatórios de maneira a elevar ao máximo o volume estocado e, como consequência, a vida útil destes depósitos.

A técnica de deposição de resíduos de processamento de bauxita prevê uma operação inicial de lançamento de resíduos, por via úmida, no interior de reservatórios artificiais (Figura 1). Esta fase de operação inicial é denominada *wet disposal*, onde os resíduos são lançados em forma de polpa.

No lançamento desses rejeitos inicia-se um processo de deposição que envolve sedimentação conjuntamente com adensamento, em razão do peso próprio do material. A vida útil do reservatório depende fundamentalmente deste comportamento geotécnico do resíduo, cujas propriedades variam ao longo do tempo e da profundidade, em função de processos simultâneos de sedimentação e adensamento (Lima, 2008).

O conhecimento da variação dos parâmetros geotécnicos com a profundidade ao final do enchimento é importante para avaliar o comportamento do lago na etapa

de operação de alteamento, onde a pilha de resíduos é construída sobre o resíduo mole de fundação.



**Figura 1. Técnica de Deposição de Resíduos de Bauxita**

## **Objetivos e Metodologia**

A proposta desta dissertação tem como objetivo a análise do comportamento de barragens de resíduos de bauxita durante o processo de enchimento do reservatório (*wet disposal*).

O local de estudo foi a Área de Deposição de Resíduos de Bauxita 3, da Refinaria da ALUMAR, em São Luís do Maranhão, reportada por Lima (2008).

A metodologia adotada consiste na simulação numérica do processo de enchimento da área de resíduos, confrontando-se o enchimento previsto com a batimetria realizada. Os parâmetros do resíduo foram definidos a partir de ensaios de adensamento. Ao final do enchimento, os parâmetros geotécnicos variam com a profundidade do reservatório, em função de processos simultâneos de sedimentação e adensamento. A presente dissertação confronta os parâmetros geotécnicos previstos e estimados no campo, ao final do enchimento.

Este trabalho tem como finalidade uma melhor compreensão do comportamento tensão-deformação de uma barragem de resíduos durante a fase de enchimento a partir da utilização de programa computacional de elementos finitos.

## **Organização da Dissertação**

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos. Inicia-se com esta Introdução, apresentando a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa e os principais objetivos.

O Capítulo 1 apresenta os aspectos gerais dos resíduos de bauxita: composição físico-química mineralógica, compressibilidade, condutividade hidráulica, e comportamento geomecânico do material. São apresentadas algumas considerações sobre os resíduos de bauxita, referentes ao processo de formação e caracterização geotécnica. Adicionalmente, apresenta-se uma breve discussão sobre a forma de deposição de resíduos e a geração de poropressões durante o enchimento.

O Capítulo 2 apresenta uma breve descrição do local em estudo, apresentando a área de resíduos de bauxita, e os resultados da instrumentação de campo (batimetria do lago). Neste capítulo, também são apresentados os resultados de ensaios de campo e laboratório executados na área em estudo. Estes ensaios foram inicialmente reportados por Bedin (2006) e Lima (2008), e serão analisados para a obtenção de parâmetros representativos do resíduo, nas análises numéricas.

O Capítulo 3 apresenta o Programa Computacional PLAXIS, utilizado na modelagem do comportamento de áreas de resíduos durante a operação do enchimento. Aspectos relativos à entrada de dados, modelos constitutivos disponíveis, processos de cálculo, e condições de contorno serão discutidos, juntamente com a simulação de um ensaio de adensamento em laboratório para a validação do programa em problemas que envolvem adensamento.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados das análises numéricas. Inicialmente, discute-se a definição dos parâmetros representativos dos materiais envolvidos e a reprodução do enchimento da área de resíduos 3.

Finalmente o Capítulo 5 reúne as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

Ao final do trabalho, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e citadas na presente dissertação.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica avalia os aspectos gerais dos resíduos de bauxita. A finalidade é o levantamento de informações existentes referentes à caracterização dos minérios, composição físico-química mineralógica, comportamento na compressibilidade e condutividade hidráulica e comportamento geomecânico.

Avaliar o comportamento de uma área de resíduos durante a fase de enchimento com a utilização de um programa computacional aparece como uma alternativa atraente a fim de se estudar o comportamento complexo dos resíduos durante esta fase de operação. O conhecimento da distribuição dos parâmetros geotécnicos com a profundidade ao final do enchimento é importante para previsão da vida útil do reservatório e para programar a etapa de alteamento a montante, quando for o caso.

### 1.1. Considerações Iniciais

O alumínio encontra-se presente em vários produtos da vida cotidiana: embalagens descartáveis, linhas de alta tensão, indústria aeronáutica, construção civil, eletrodomésticos. É também um metal que não é encontrado puro naturalmente. Para a sua transformação é necessária a bauxita, sua matéria-prima, que é um minério avermelhado que contém 52 % de óxido de carbono e foi descoberta no Sul da França.

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) define: “bauxita é constituída por óxido de alumínio hidratado de composições variáveis”. A bauxita não é considerada uma espécie mineral e, em uma classificação rígida, o nome bauxita deve ser utilizado em alusão à rocha (bauxita).

A bauxita com fins metalúrgicos é usada na cadeia produtiva do alumínio, e é o destaque da produção brasileira de bauxita, representando a grande maioria de utilização, sendo produzida, normalmente, de forma integrada desde a mineração passando pela fase intermediária do refino em alumina e redução na forma metal de alumínio.

Na mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados. A quantidade de resíduos gerada pela atividade depende do processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície.

Segundo Fortes (2010), o resíduo de bauxita, proveniente do processo Bayer na produção de alumínio, é o resíduo sólido de maior volume de geração pela indústria de alumínio. Este rejeito é um subproduto no processo de fabricação do alumínio e até hoje tem pouca utilidade para a indústria e termina em grande parte armazenada em aterros. Somente no Brasil a estimativa mínima de resíduos de bauxita é de 10,7 milhões de toneladas/ano e existem diversas dificuldades na alocação desses resíduos, em virtude dos teores de sódio residuais do processamento, que conferem elevada alcalinidade no resíduo. Assim, o gerenciamento desses resíduos envolve elevados custos para a construção e manutenção de armazenamentos seguros. Mesmo assim, a deposição desses rejeitos causa complicações pela utilização de grandes áreas, além dos riscos de contaminação do meio ambiente.

“Para cada tonelada de alumínio produzido, existe em torno de quatro toneladas de resíduo gerado. É um problema ambiental enfrentado mundialmente”, (Rodrigues, 2014).

## **1.2. Processo de Formação dos Resíduos de Bauxita**

A bauxita é uma mistura natural de óxidos de alumínio, que tem como principal componente o  $Al_2O_3$ . A bauxita também contém sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas em quantidades menores.

A bauxita é classificada tipicamente de acordo com a aplicação comercial: abrasivos, cimento, produtos químicos, metalúrgicos e material refratário, entre outros. A maior parte da extração mundial de bauxita (aproximadamente 85%) é usada como matéria-prima para a fabricação de alumina, por lixiviação química, método conhecido como processo Bayer (Gomes, 1988).

Sob determinadas condições físico-químicas, a bauxita pode se formar a partir de qualquer rocha portadora de alumínio (Alecrim, 1982).

As jazidas de bauxita são encontradas, geralmente, em quatro tipos de depósitos: em mantos; em bolsões; entre camadas de outros solos e/ou rochas e em

depósitos de detritos, como resultado da acumulação de bauxita erodida de outros locais. Ressalta-se que a maioria dos depósitos de bauxita encontra-se em países tropicais (Villar, 2002). De acordo com informações do International Aluminium Institute (IAI), a bauxita ocorre em três principais tipos de climas: Tropical (57 %), o Mediterrâneo (33 %) e o Suptropical (10 %), Revista ABAL 2000.

As reservas mundiais de bauxita somam 34 bilhões de toneladas, estando perfeitamente adequadas para atender a demanda atual e suportar aumento na produção mundial. São reservas de bauxita do tipo trihidratadas as encontradas na Guiné, Austrália, China, Brasil, Jamaica e Índia. As bauxitas desse tipo apresentam custos mais baixos na sua transformação em alumina, uma vez que requerem pressões e temperatura mais baixas quando comparadas com as bauxitas do tipo monohidratadas encontradas, por exemplo, na França, Grécia e Hungria (Balanço Mineral Brasileiro 2001).

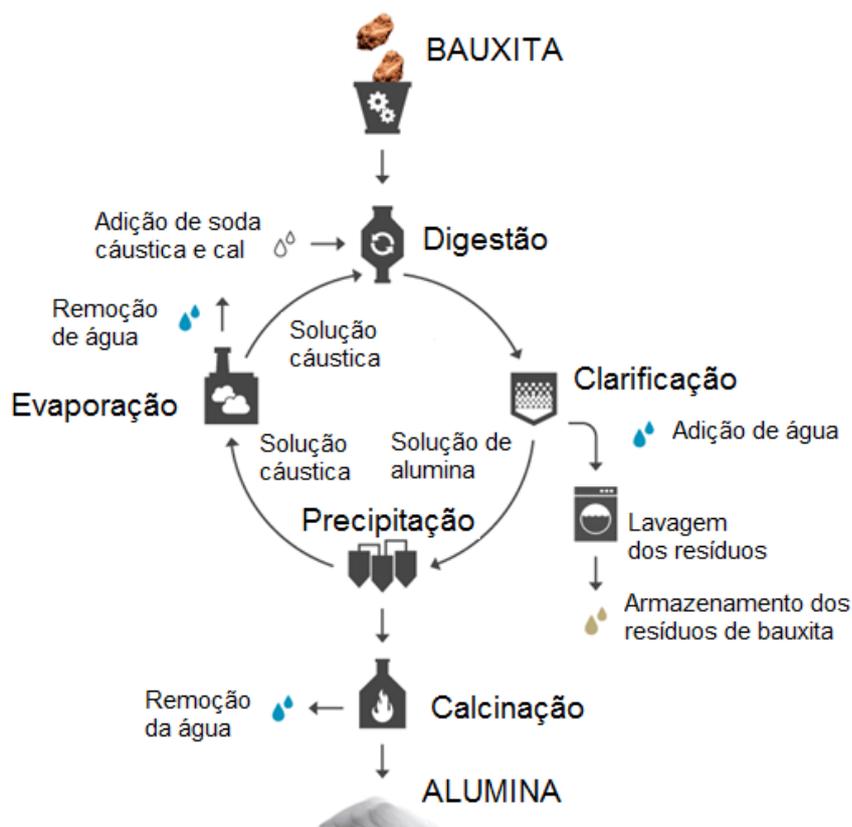
O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de Bauxita, com 31 milhões de toneladas, em 2011. Isto significa 14,1% da produção mundial, de 220 milhões de toneladas. A Austrália é líder em produção, com 30,45% do total, seguida pela China com 21% (USGS/2012), retirado da publicação do Sistema de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira - 7ª Edição, organizado pelo Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM.

As bauxitas ocorrem em camadas planas, próximas à superfície, podendo se estender por quilômetros. Sua espessura pode variar significativamente (1 m a 40 m), mas em geral, apresentam uma espessura média de 4 m a 6 m (Bedin, 2006).

Os procedimentos físicos de enriquecimento ou depuração são difíceis de aplicar às bauxitas, cujos elementos constitutivos estão muito dispersos e intimamente unidos entre si (Krausköpf, 1982). No entanto, em determinadas jazidas tropicais, a bauxita está misturada com argila livre. Uma simples lavagem em água, efetuada em um tambor com grades usadas para fazer uma classificação granulométrica do material, elimina esta argila e permite reduzir o teor de sílica, que é prejudicial durante a fase de processamento para obtenção do alumínio. Esta lavagem com água origina a lama de lavagem. As características desta lama, tais como composição químico-mineralógica, estão intrinsecamente relacionados com a rocha de origem e variam de jazida para jazida.

Em 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu e patenteou o processo até hoje conhecido como “Processo Bayer” (Hind *et al*, 1999). Este processo representa um

marco na história da metalurgia, sendo considerado o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna (Habashi, 2005). É um processo utilizado para o refino da bauxita (pois a primeira mineração comercial ocorreu em Les Baux, distrito na França, por isso a denominação de bauxita) na produção de alumina  $Al_2O_3$ . O processo Bayer é utilizado até os dias de hoje e quase não há mudanças significativas desde o desenvolvimento. O esquema está apresentado na Figura 2.



**Figura 2. Fluxograma da Fabricação de Alumina (Adaptado de Habashi, 2005)**

Após a moagem da bauxita ocorre a digestão, que consiste em uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão. As condições em que se processa a digestão variam de acordo com as propriedades da bauxita (concentração, temperatura e pressão). A clarificação é uma das propriedades mais importantes do processo, pois nela ocorre a separação entre as fases sólida (resíduo insolúvel) e líquida (licor). Em seguida, ocorre a precipitação, quando acontece o resfriamento do licor. A calcinação é o final do processo, quando a alumina é lavada para remover os resíduos de licor, e posteriormente seca.

Durante a clarificação, há a formação de um resíduo insolúvel, chamado de lama vermelha (granulometria fina), areia vermelha (granulometria arenosa) ou resíduo de bauxita pela indústria de refino de alumina, que é composto por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio e dióxido de titânio. Este resíduo é gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer que é disposto nos reservatórios de resíduos.

### **1.3. Caracterização Geotécnica dos Resíduos de Bauxita**

Gauer (2010) cita que a principal característica dos resíduos de mineração de bauxita é a granulometria siltosa.

Segundo Vick (1983), apesar da baixa plasticidade e do baixo teor de argila, os resíduos de bauxita apresentam algumas propriedades associadas aos rejeitos argilosos, tais como compressibilidade e baixa velocidade de sedimentação.

Bedin (2006) estudou o resíduo de bauxita proveniente de uma campanha de investigação geotécnica na refinaria ALUMAR, em São Luís – MA, em que foram realizados ensaios de piezocone e coleta de amostras deformadas para análise em laboratório.

No caso do resíduo de bauxita estudado por Bedin (2006 e 2008), o resíduo lançado próximo ao ponto de despejo (chamado de areia vermelha) consiste de um silte arenoso, encontrado *in situ* com teores de umidade de 55 % a 60 %. No entanto para a lama vermelha encontrada longe dos pontos de despejo, a umidade varia de 55 % a 70 % (siltosa também). Os resíduos de bauxita apresentam média a alta plasticidade e alta massa específica real dos grãos.

Garcia (2012) ressalta que a lama vermelha é um material residual e como qualquer outro resíduo industrial apresenta variações, que são atribuídas à matéria-prima, ao processo industrial e ao tempo de disposição. Esse aspecto impõe ao resíduo de bauxita características e comportamentos diferenciados, podendo em uma mesma refinaria o resíduo não apresentar características homogêneas.

A composição química do resíduo de bauxita está ligada à rocha de origem e ao processo Bayer, utilizado no beneficiamento. Bedin (2006) retirou uma amostra em torno de 5 m de profundidade. A autora observou que o resíduo de bauxita possui grãos relativamente homogêneos e com tendência à floculação. Em outros

pontos, o resíduo pode apresentar granulometria e comportamento distintos, devido à grande variabilidade das características dos resíduos.

Villar (2002) diz que o processo de enchimento dos reservatórios nos quais os resíduos são lançados em forma de polpa é baseado principalmente na teoria de adensamento para grandes deformações, devido ao processo de deposição de rejeitos, que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento devido ao peso próprio do material. Assim, é importante o conhecimento das relações constitutivas do resíduo, ou seja, a relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade) e a relação de condutividade hidráulica e o índice de vazios.

Souza Pinto (2002) ressalta que problemas de adensamento que envolvem grandes deformações, como o adensamento de resíduos de beneficiamento de minérios transportados hidraulicamente e lançados em reservatórios, devem ser tratados por meio de modelos que se resolvem pela aplicação de métodos numéricos, nos quais a não constância dos parâmetros de condutividade hidráulica e compressibilidade é levada em consideração.

Gauer (2007) realizou ensaios de adensamento em resíduos de mineração de bauxita em amostras com 7 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura. Bedin (2008), por sua vez, realizou ensaios de adensamento em amostras com 7 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura e com 20 cm de diâmetro e 7 cm de altura, utilizando resíduos de bauxita e ouro.

Para avaliação da compressibilidade e condutividade hidráulica, Bedin (2008) utilizou uma faixa de pesos específicos representativa das condições máximas e mínimas do reservatório onde são dispostos os rejeitos. Assim, a autora utilizou amostras com diferentes índices de vazios iniciais submetidas às mesmas condições de carregamento.

Geralmente, as características mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos variam em função do tipo de minério processado e do próprio processo de beneficiamento adotado. Os rejeitos usualmente apresentam granulometria fina, variando de colóides a areia. Segundo Vick (1983), resíduos de mineração e processamento apresentam granulometria na faixa dos siltes. No caso de resíduos depositados na forma de lama, pode-se obter uma granulometria mais fina.

A Figura 3 compara curvas granulométricas de diferentes resíduos (Campos, 1986). Observa-se que os resíduos de bauxita apresentam uma granulometria mais fina quando comparados ao carvão mineral e ao ouro.

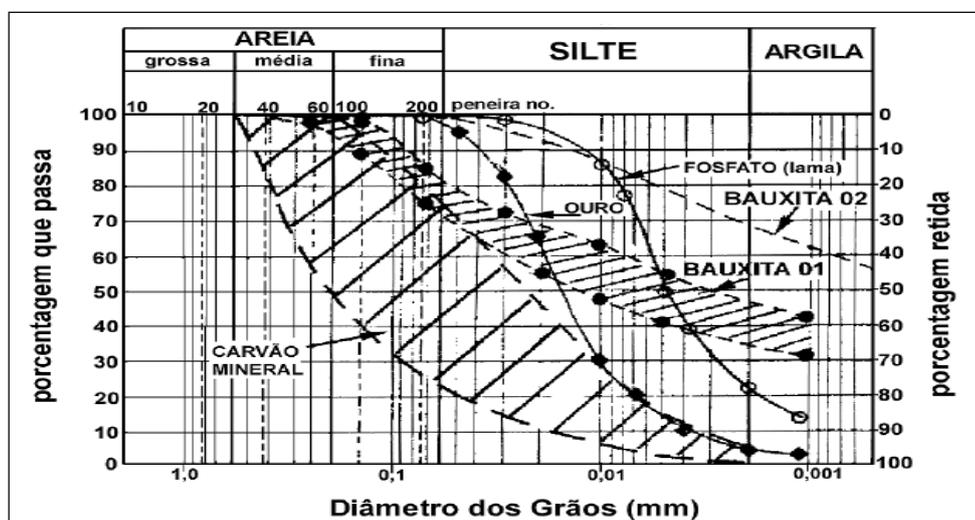


Figura 3. Curvas Granulométricas de Diferentes Resíduos (Adaptado de Campos, 1986)

Segundo Lima (2008), a densidade dos grãos ( $G$ ) varia ao longo da área de resíduos, em função dos efeitos de segregação das partículas provocado pelo método de despejo das torres e calhas (Bedin, 2006). A Tabela 1 apresenta alguns valores de densidade real dos grãos encontrados na literatura. A variabilidade encontrada nos resultados e os altos valores de  $G$  são decorrentes da mineralogia da rocha de origem, e principalmente do teor de ferro existente (Villar, 2002).

Salienta-se que a caracterização geotécnica de resíduos de mineração exige métodos diferentes daqueles normalmente utilizados em depósitos naturais, pois o resíduo “*in loco*” tem seus vazios preenchidos por um fluido diferente da água presente em depósitos naturais. Estes fluidos intersticiais podem determinar o comportamento do resíduo, tanto em termos de adensamento como de permeabilidade, exigindo, em alguns casos, caracterização geotécnica específica.

Tabela 1. Valores de densidade real dos grãos de resíduos (Adaptado de Bedin, 2006)

Tipo de resíduo	Localização	Referência	$G$
Alumínio	Jamaica	Stinson (1981)	2,90 - 3,00
Alumínio	Alabama	Somogyi & Gray (1977)	2,84 - 3,16
Alumínio	Brasil	Villar (2002); Rodrigues e Moura (1992)	3,00 - 3,70
Ferro	Brasil	Albuquerque Filho, 2004	3,16 - 5,00

Para a determinação das características de compressibilidade e permeabilidade desses rejeitos, ensaios de adensamento em amostras têm sido realizados (Azevedo, 2003). Tais ensaios frequentemente são efetuados em amostras com densidades ou teores de sólidos iniciais superiores às condições de lançamento ou disposição do material no campo. Sendo assim, os materiais acabam não fornecendo informações suficientes para a caracterização e uma análise acerca do comportamento sedimentação/adensamento do rejeito de mineração.

Somogyi e Gray (1977) calcularam coeficientes de adensamento de  $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  para lamas vermelhas dos Estados Unidos, a partir de ensaios oedométricos convencionais. A partir do mesmo tipo de ensaio, Elias (1995) chegou a valores de coeficientes de adensamento médio de  $6,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Stinson (1981) obteve valores de  $c_v$  para lamas vermelhas de diferentes regiões, por meio de ensaios com tensão controlada (Figura 4). Os valores de  $c_v$  situaram-se na faixa de  $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Segundo Vick (1983), o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) dos resíduos de mineração geralmente encontra-se na faixa de  $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (na mesma faixa do coeficiente de adensamento das argilas naturais).

Qualquer bibliografia ressalta sobre a importância da relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade), na avaliação da vida útil de reservatórios de rejeitos. Estes materiais são lançados com elevado teor de umidade e são constituídos por grande parte de partículas finas, fazendo com que o processo de deposição envolva sedimentação e adensamento por peso próprio do material.

Para o estudo do comportamento desses resíduos de mineração (lamas) há a utilização de equipamentos projetados especialmente para esse fim. As relações de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos de bauxita podem ser obtidas principalmente a partir dos resultados de laboratório. Nota-se também que ao longo das últimas décadas, têm sido obtidas, experimentalmente, várias relações de compressibilidade para materiais muito moles, como os rejeitos lançados na forma de lama. Além dos modelos constantes e lineares estas relações têm sido modeladas por funções logarítmicas, exponenciais e potenciais, algumas delas estão resumidas na Tabela 2. A Figura 5 apresenta resultados de ensaios de adensamento por deformação controlada, executados por Villar (2002) em lama vermelha, em amostras cilíndricas com cerca de 20 cm de diâmetro e 6 cm de altura.

Os rejeitos de mineração apresentam considerável variabilidade em suas características físico-químicas e mineralógicas, o que lhes confere um comportamento distinto dos materiais usualmente encontrados em depósitos naturais. Estas características têm efeito dominante na permeabilidade do material, e conseqüentemente em seu comportamento *in situ*, sendo sempre necessário estimar o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos de mineração (Lima, 2008).

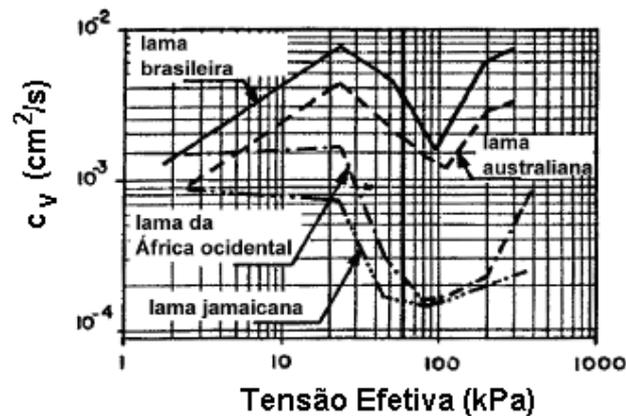


Figura 4. Coeficiente de Adensamento: Ensaios Convencionais (Stinson, 1981)

Tabela 2. Funções de Compressibilidade de Solos Muito Moles (Adaptado de Villar, 2002)

Referência	Função de Compressibilidade
Liu (1990)	$e = e_0 - C_c \cdot \log_{10} \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)$
Somogyi (1979)	$e = A \cdot \sigma'^{-B}$
Liu e Znidarcic (1991)	$e = A \cdot (\sigma' + Z)^B$

Sendo:  $e$  – índice de vazios;  $\sigma'$  – tensão efetiva. O subscrito “0” indica um estado de referência arbitrado; A, B e Z parâmetros do modelo, coeficientes empíricos determinados experimentalmente.

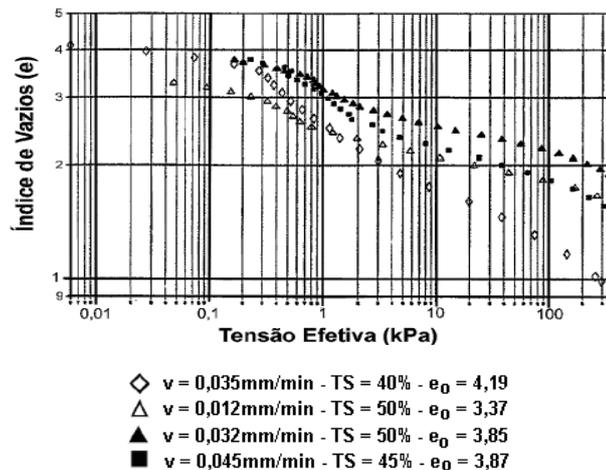


Figura 5. Resultados de Ensaio CRD em lama vermelha obtidos por Villar (2002)

A Figura 6 reúne valores de coeficiente de permeabilidade reportados na literatura, que indicam que rejeitos de mineração possuem uma permeabilidade intermediária que varia de  $10^{-5}$  m/s a  $10^{-9}$  m/s. Fahey *et al* (2002) apresenta valores de coeficientes de permeabilidade de três frações da granulometria de um resíduo de minério de ouro, assumindo o processo de segregação hidráulica. Os rejeitos de minério de ferro, por terem uma composição granulométrica arenosa, apresentam-se mais permeáveis que os demais. Esse comportamento parcialmente drenado inclui uma variedade de granulometria, incluindo partículas com tamanho de areias, siltes e argilas (Manassero, 1994).

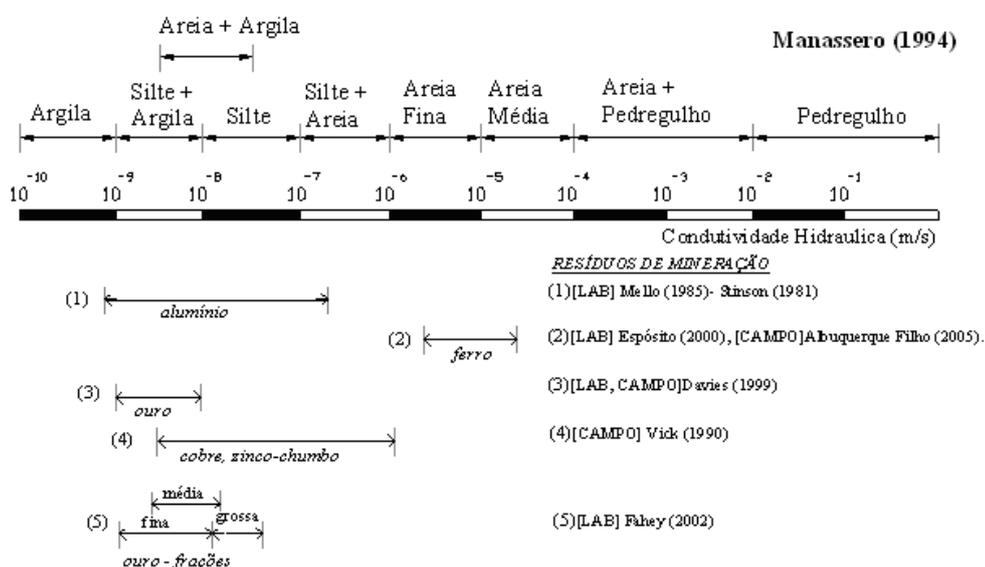


Figura 6. Valores de permeabilidade para resíduos (Massanero, 1994; Bedin, 2006)

#### 1.4. Deposição de Resíduos

Para os depósitos de rejeitos formados hidraulicamente há necessidade de estruturas de contenção para o seu confinamento. Além dessas soluções convencionais como barragens e diques de terra de aterro compactado, são comuns também na mineração as chamadas barragens ou diques de rejeito.

Além dos sucessivos diques de contenção, outras obras são comumente executadas diretamente sobre os depósitos de rejeitos de mineração, tais como: diques internos, estruturas de reforço, dentre outras. A estabilidade dessas estruturas construídas sobre os rejeitos depende das características do material armazenado no depósito e é fortemente influenciada pelo manejo realizado e também pelos métodos empregados, conforme estudado por Penna (2007).

Os rejeitos finos são materiais em geral plásticos, altamente compressíveis, constituídos por siltes e argilas (Massad, 2003). Eles têm seu comportamento geotécnico comparado ao de solos moles, os quais são depósitos naturais sedimentares onde a fração argilosa determina características importantes do depósito, ou seja, são materiais que apresentam baixa consistência, baixa permeabilidade, elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento (Spannenberg, 2003).

Há problemas de duas naturezas referentes à construção sobre solos moles como:

1º) a possibilidade real de instabilidade da estrutura a curto prazo, isto é, durante e logo após o final da construção;

2º) a dificuldade de acesso e tráfego de equipamentos no início dos trabalhos (Oliveira, 2006), requerendo o uso de técnicas adequadas e equipamentos leves.

Durante a execução de obras em depósitos deste tipo, existe uma significativa possibilidade de ruptura devido à baixa capacidade de suporte e ao elevado acréscimo de poropressões no solo de fundação.

A baixa permeabilidade de depósitos de lama dificulta o adensamento do material diante de um carregamento, não modificando a sua condição de terreno extremamente fraco e quase fluido à época da construção (Robertson, 1986).

A estocagem de resíduos de mineração pode ser realizada tanto na superfície do terreno, quanto em escavações superficiais ou subterrâneas, sendo a primeira alternativa a mais utilizada no Brasil (Nakao *et al*, 1984).

Considerando especificamente o método de estocagem superficial, as estruturas de contenção de rejeitos de mineração podem ser agrupadas em dois tipos:

1. Barragens ou diques tipo convencional;
2. Aterros soerguidos em etapas.

As barragens ou diques tipo convencional são estruturas construídas de acordo com projeto e tecnologia usualmente adotados na área de engenharia de barragens de terra e/ou enrocamento. Tais alternativas podem ser adotadas em situações onde volumes apreciáveis de água ou efluentes industriais não recirculáveis são estocados juntamente com o rejeito sólido (Campos, 1986).

Os aterros soerguidos em etapas podem ser classificados em três grupos, de acordo com o método construtivo: montante, jusante e linha central. Tais

denominações se referem à direção em que a crista do aterro se move em relação ao dique de contenção inicial, à medida que a estrutura tem sua altura aumentada.

Os rejeitos podem ser descartados da unidade de beneficiamento na forma sólida (pasta ou granel), ou líquida (polpa de água com sólidos). No primeiro caso, o transporte dos rejeitos é realizado por meio de caminhões ou correias transportadoras. No segundo caso, o transporte é feito por meio de tubulações ou por gravidade.

O método de deposição ou estocagem de rejeitos tem relação direta com os custos e a eficiência de uma barragem. A rigor, podem-se distinguir dois processos de deposição: via úmida (*wet disposal*) e por secagem (*dry stacking*).

Na deposição por via úmida, os rejeitos são lançados na forma de polpa, em reservatórios contidos por diques, ou barragens (vales) criados para esta finalidade. Neste caso, os seguintes aspectos merecem atenção (Abrão, 1987):

- O adensamento dos rejeitos
- A segregação sedimentar;
- A sedimentação e a clarificação da água.

O adensamento é fundamental, tendo em vista que dele depende o peso específico seco ao final do enchimento do reservatório. A vida útil do reservatório é definida a partir do volume do reservatório e da taxa de lançamento de rejeitos, segundo a equação:

$$t = \frac{V \cdot \gamma_d}{T_L} \quad \text{Eq. 1}$$

onde:  $t$  = tempo (vida útil),  $V$  = volume do reservatório,  $\gamma_d$  = peso específico seco e  $T_L$  = taxa de lançamento em peso/tempo.

A segregação sedimentar é um processo de classificação dos minerais presentes no rejeito, ao serem lançados nos reservatórios. Este aspecto é importante na formação de praias a montante das barragens de rejeitos, e depende da granulometria, da forma, e da densidade das partículas.

Com relação à sedimentação e à clarificação da água, Abrão (1987) ressalta que estes fenômenos dependem de uma vasta gama de fatores e são fundamentais na definição do impacto ambiental e no dimensionamento e projeto do sistema de tratamento dos efluentes.

Ávila, Soares e Costa (1995) comparam os principais processos de deposição de rejeitos argilosos (via úmida e por secagem) e as conseqüentes implicações sobre a capacidade de estocagem no reservatório e posterior recuperação ambiental. Para tanto, os autores relatam o caso de deposição de rejeitos finos de bauxita da Mineração Rio do Norte, em Porto de Trombetas. Segundo estes autores, a deposição de rejeitos por via úmida tem sido questionada pelos seguintes aspectos:

- Aspecto econômico: a lama no reservatório é menos densa que os rejeitos ressecados e, portanto, exigem maiores volumes de reservatório;
- Aspecto ambiental: a superfície da lama exige mais tempo antes da recuperação ambiental;
- Aspecto técnico: a lama com água na superfície superior exige maior responsabilidade estrutural da barragem, que precisa ter dimensionamento equivalente a uma barragem para acumulação de água.

Adicionalmente, Ávila, Soares e Costa (1995) ressaltam que o potencial de dano de uma barragem de lama é muito maior que o de um depósito de rejeito ressecado.

Ressalta-se que nos depósitos de rejeitos ressecados, principalmente nos argilosos, a superfície favorece o acúmulo de água, fazendo com que a secagem ocorra por evaporação. Neste caso, o clima é um fator determinante de projeto. No Brasil, a forma de deposição de rejeitos por via úmida ainda é a mais usual, por ser considerada a mais econômica (Abrão, 1987), o que é contrário às afirmações de Ávila, Soares e Costa (1995).

### **1.5. Geração de Poropressões Durante o Enchimento**

O processo de geração de poropressões durante o lançamento de resíduos é bastante complexo e de difícil determinação analítica. Vick (1983) descreve este processo como ilustrado na Figura 7. Inicialmente, em um tempo  $t_1$ , uma camada de resíduos é lançada instantaneamente, gerando excesso de poropressão na camada camada I, pré-existente, que deve ser somado à poropressão inicial.

Em um tempo  $t_2$ , uma nova camada II é lançada. Neste instante, alguma dissipação do excesso de poropressão já ocorreu na camada I, em adição ao

excesso de poropressão gerado pelo lançamento da camada II. Adicionalmente, há um aumento das poropressões hidrostáticas decorrentes da elevação do nível d'água para o topo da camada. O mesmo ocorre quando uma terceira camada é lançada, e assim sucessivamente. No interior de cada camada e a cada etapa de lançamento, processos de geração e dissipação de poropressão ocorrem simultaneamente. Em virtude disso, torna-se difícil estabelecer um procedimento para a previsão da distribuição das poropressões ao longo do tempo durante o enchimento de reservatórios.

Diante do exposto, fica clara a importância de instrumentação das distribuições de  $u_o$  ao longo do tempo de operação de reservatórios de resíduos, principalmente na fase que antecede a operação de alteamento a montante, quando o resíduo de fundação serve de suporte para a pilha de alteamento.

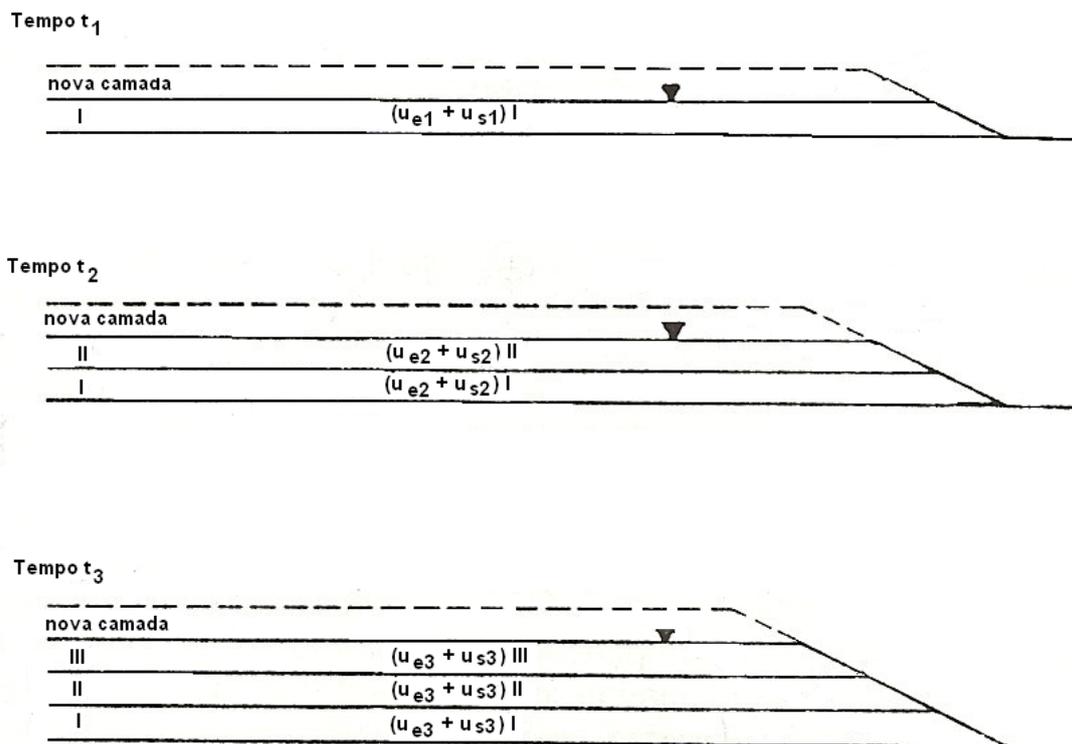


Figura 7. Processo de geração de Poropressões Durante o Enchimento (Vick, 1983)

## 2. ÁREA EM ESTUDO

### 2.1. Introdução

Este capítulo descreve a área de resíduo de bauxita da ALUMAR, área 3, que será analisada no presente trabalho.

A Fábrica de Alumínio da ALUMAR, localizada na cidade de São Luis, no estado do Maranhão deposita o resíduo de bauxita, gerado pelo processo Bayer, em áreas de resíduo impermeabilizadas e dotadas de um sistema de drenagem de fundo, que funcionam em circuito fechado com a Refinaria (Lima, 2008).

Inicialmente, esta área recebe os resíduos pela técnica convencional via úmida (*wet disposal*), como mostra a Figura 8.



**Figura 8. Enchimento (*wet disposal*)**

A Figura 9 mostra uma vista geral das áreas de deposição de resíduos. As áreas 1, 2, 3, 4 e 5 já foram construídas e apresentam as mesmas características técnicas. Atualmente, as áreas 1, 2 e 3 já se encontram reabilitadas. A área de resíduos 4 está em fase de operação pelo método *upstream*, e a área de resíduos 5 opera com a técnica *wet disposal*. A

Tabela 3 detalha as diferentes fases de operação destas áreas.

A metodologia adotada no presente trabalho consiste na reprodução do enchimento da área de resíduos 3, destacada na Figura 9.

A Figura 10 apresenta a vista geral de uma das áreas de resíduos da ALUMAR, após o enchimento do reservatório.

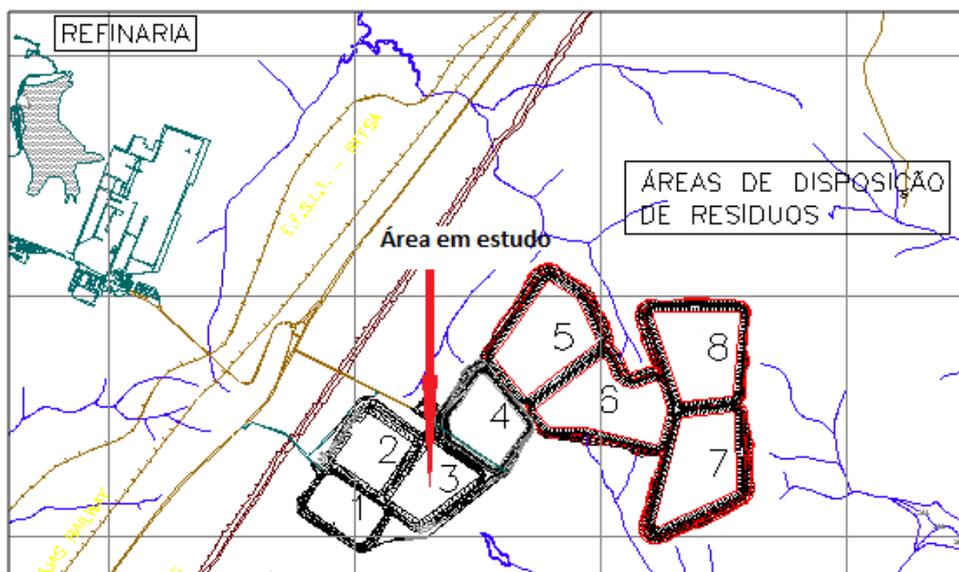


Figura 9. Localização das Áreas de Deposição de Resíduos

Tabela 3. Fases de Operação das Áreas de Resíduos

FASE	Descrição
Construção	Período de execução das obras civis (diques de contenção, galeria)
Pré-Operação	Período compreendido entre a entrega da obra e o início de lançamento de água de processo
Operação com Água	Período em que a área está recebendo a água de processo proveniente de outra área em final de operação
Operação com Resíduo pelo Método Convencional ( <i>Downstream</i> )	Período em que o resíduo está sendo lançado pelo método de <i>wet-disposal</i> no interior dos diques artificiais
Preparação para Lançamento de Resíduo por <i>Upstream Stacking</i>	Período em que a área não recebe resíduo, aguardando condições de ressecamento da superfície para início do processo de alteamento
Operação de Lançamento de Resíduo por <i>Upstream Stacking</i>	Período em que o depósito está sendo alteado por <i>upstream stacking</i> , com o resíduo lançado por <i>wet disposal</i> e a água vertendo para outra área
Pós-Operação	Período após o término do <i>upstream stacking</i> , em que a área aguarda o início da reabilitação
Reabilitação	Fase de execução da cobertura superficial, do plantio e do crescimento da vegetação e da implantação da drenagem superficial



Figura 10. Vista geral de uma área de resíduos após o enchimento

## 2.2. Processo de enchimento do reservatório

Em 1998, a área de resíduos de bauxita 3 iniciou sua operação pela técnica convencional, na qual os resíduos são lançados no interior do reservatório em forma de polpa.

A Figura 11 apresenta uma seção transversal típica da área de resíduos 3 ao final de operação do *wet disposal*. Ocorre a presença de dois materiais distintos: o dique de solo compactado e o resíduo lançado pela técnica *wet disposal*.

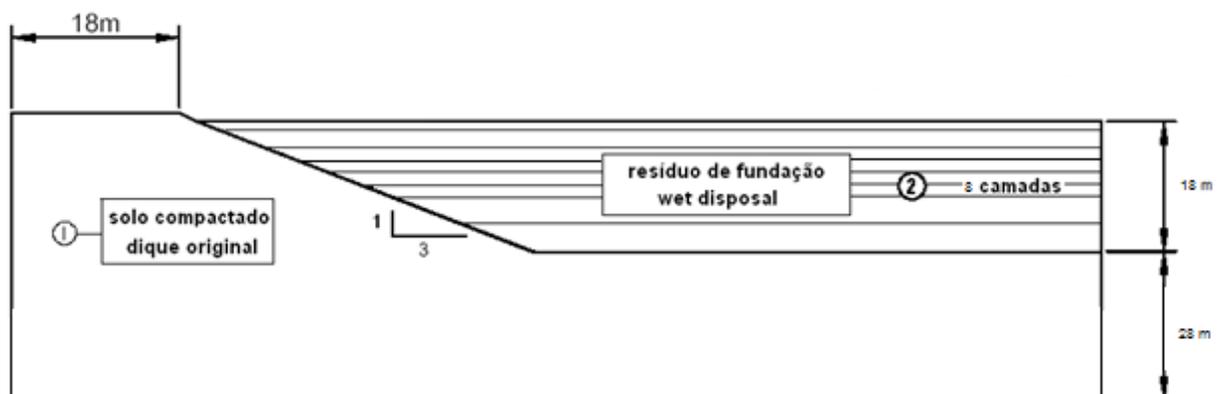


Figura 11. Seção Típica da Área de Resíduos de Bauxita 3

A produção de resíduo fornecida pela ALUMAR está apresentada na Tabela 4. O lançamento dos resíduos no reservatório foi iniciado em 1998. Os dados da Tabela 4 indicam que, até término de 2005, o peso de resíduos lançado foi de 5.275.311 toneladas.

**Tabela 4. Produção de Resíduo**

Ano	Produção de resíduo (t/ano)	Taxa de lançamento (t/dia)
1998	734.574	1.408,77
1999	806.643	1.546,99
2000	855.126	1.639,97
2001	502.104	962,94
2002	520.057	997,37
2003	547.054	1.049,14
2004	711.970	1.365,42
2005	597.783	1.146,43
	5.275.311	

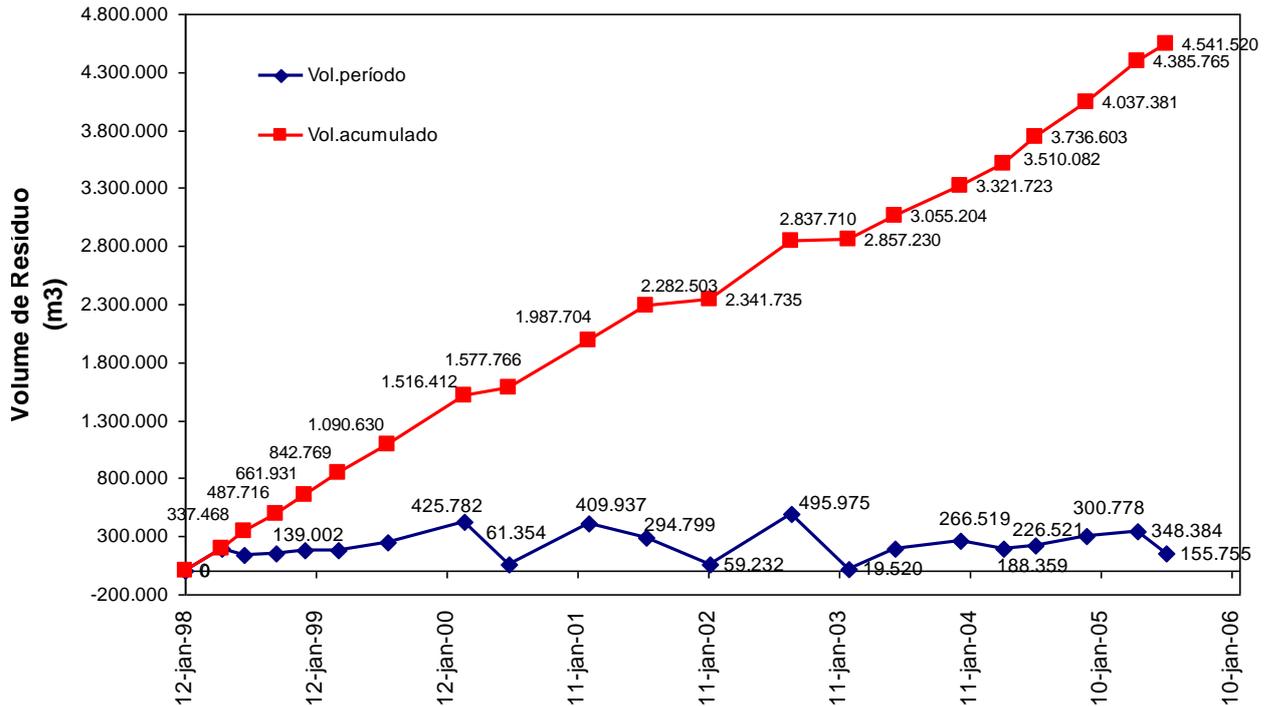
A Figura 25 apresenta o controle do enchimento do lago. Nota-se que em agosto de 2005, o volume estocado de resíduos é da ordem de 4.500.000m<sup>3</sup>.

O peso específico seco médio do depósito pode ser estimado a partir da produção de resíduos e do volume estocado, através da equação:

$$\gamma_d = \frac{\text{Produção}(t)}{\text{Volume}(m^3)} \quad \text{Eq. 2}$$

Considerando-se as taxas de lançamento apresentadas na Tabela 4 e o levantamento batimétrico (Figura 12), o peso específico estimado pela equação 2 é de 11,6 kN/m<sup>3</sup>. Ressalta-se que este valor é apenas uma estimativa grosseira do peso específico seco médio, devendo ser comparado com os resultados obtidos pela simulação numérica.

Análises anteriores do controle de enchimento de outras áreas forneceram valores de peso específico seco médio superiores, da ordem de 11,8 kN/m<sup>3</sup>.



**Figura 12. Controle do enchimento da área de resíduos 3**

O enchimento do reservatório foi monitorado por levantamentos batimétricos periódicos. Cabe ressaltar que existiram períodos sem lançamento devido à operação do alteamento à montante na área de resíduos 2. A Figura 13 apresenta o levantamento batimétrico da área de resíduos 3.

A Tabela 5 resume o processo de enchimento da área de resíduos 3. Cabe ressaltar que:

- O processo de lançamento foi iniciado em Janeiro de 1998;
- No período de Maio a Julho de 2000, o lançamento na área de resíduos 3 foi interrompido, e desviado para o alteamento da área de resíduos 2;
- Em Janeiro de 2002, a refinaria passou a maior parte do tempo lançando resíduos na área 2;
- No período de Junho/2003 a Abril/2004, houve interrupções no enchimento para lançamento de resíduos na área 2.

Esses períodos de lançamento de resíduos no alteamento da área 2 são visualizados na Figura 12 e na Figura 13, pelos patamares praticamente horizontais.

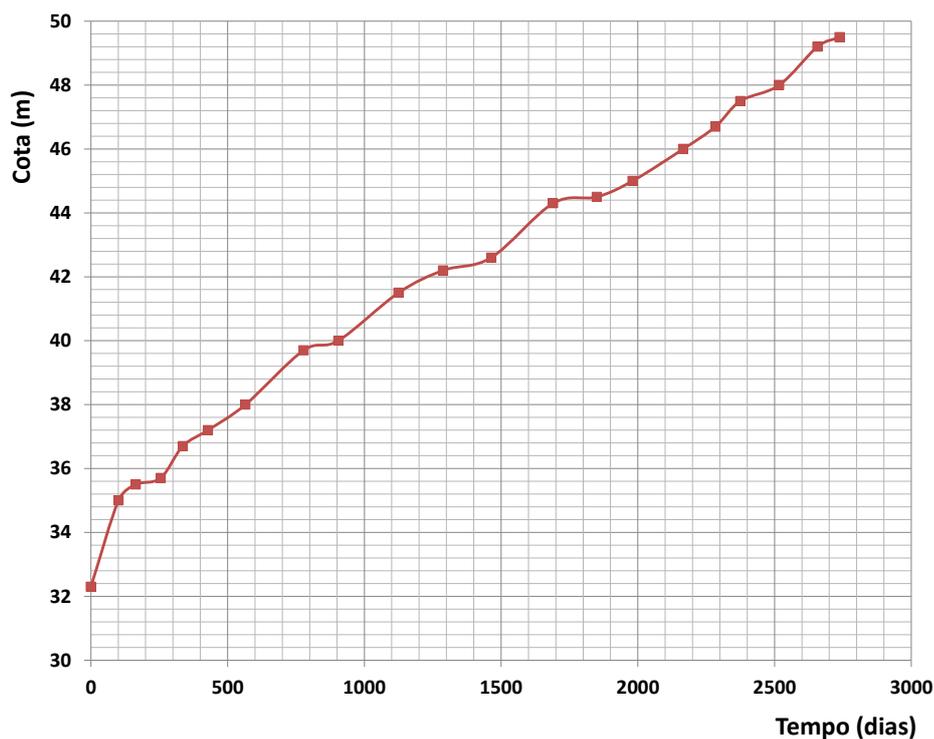


Figura 13. Batimetria: Área de Resíduos 3

Tabela 5. Processo de enchimento da área de resíduos 3

Data	V <sub>acumulado</sub> (m <sup>3</sup> )	Cota	Observações
12/jan/1998	0	32,0	Início da disposição na área de resíduos 3
23/abr/1998	198.465	35,0	Disposição na área de resíduos 3
25/jun/1998	337.468	35,5	
24/set/1998	487.716	35,7	
14/dez/1998	661.931	36,7	
16/mar/1999	842.769	37,2	
31/jul/1999	1.090.630	38,0	
29/fev/2000	1.516.412	39,7	
05/jul/2000	1.577.766	40,0	
10/fev/2001	1.987.704	41,5	Disposição na área de resíduos 3
23/jul/2001	2.282.503	42,2	
15/jan/2002	2.341.735	42,6	Operando <i>upstream</i> na área 2 a maior parte do tempo
29/ago/2002	2.837.710	44,3	Disposição na área de resíduos 3
05/fev/2003	2.857.230	44,5	
16/jun/2003	3.055.204	45,0	Parte do período operando na área 2 (42 dias)
18/dez/2003	3.321.723	46,0	Parte do período operando na área 2 (49 dias)
14/abr/2004	3.510.082	46,7	Parte do período operando na área 2 (46 dias)
14/jul/2004	3.736.603	47,5	Disposição na área de resíduos 3
03/dez/2004	4.037.381	48,0	
22/abr/2005	4.385.765	49,2	
12/jul/2005	4.541.520	49,5	

Legenda: V<sub>acumulado</sub> = volume acumulado

### 2.3. Investigações Geotécnicas na Área

Na área de resíduos 3, foi realizada uma ampla campanha de ensaios de campo e laboratório, com objetivo de caracterizar os parâmetros geotécnicos do resíduo. A campanha de laboratório consistiu na realização de ensaios de caracterização e de adensamento sob deformação controlada (CRD). No campo, foram executados ensaios de Piezocone em diferentes estações, distribuídas ao longo da área.

O programa experimental foi detalhadamente reportado por Bedin (2006), e posteriormente, interpretado por Lima (2008), que realizou um tratamento estatístico, tendo em vista a dispersão dos resultados. No presente trabalho, são apresentados os resultados reportados e interpretados por Lima (2008).

Os ensaios de campo e laboratório foram executados em 9 estações, distribuídas ao longo da área de resíduos, como mostra a Figura 14. Ressalta-se que estas nove estações se encontram dentro da área 3 estudada. Não serão apresentados os ensaios das estações 7, 8 e 9, uma vez que tiveram como objetivo verificar a influência de hidrato depositado no comportamento geomecânico do resíduo.

Em razão da complexidade de definição do comportamento de resíduos, as análises não consideraram separadamente os resultados obtidos nas diferentes estações. A adoção de valores representativos para todo o universo de dados, sem utilização de uma metodologia confiável, colocaria sob suspeita os resultados obtidos. Por outro lado, estudar separadamente as diferentes estações, cada qual com suas características e variações demandaria tempo e esforço desnecessários.

Lima (2008) adotou um tratamento estatístico para definição dos parâmetros geotécnicos. A interpretação dos dados foi feita com base no conceito de limites de confiança, que delimitam uma região no interior da qual é provável que o valor de certo ponto experimental se situe, de acordo com a margem de erro previamente estabelecida (Pacheco e Lima, 1996). Detalhes sobre a formulação estatística estão apresentados em Lima (2008).

Os resultados dos ensaios de piezocone estão reunidos em Bedin (2006).

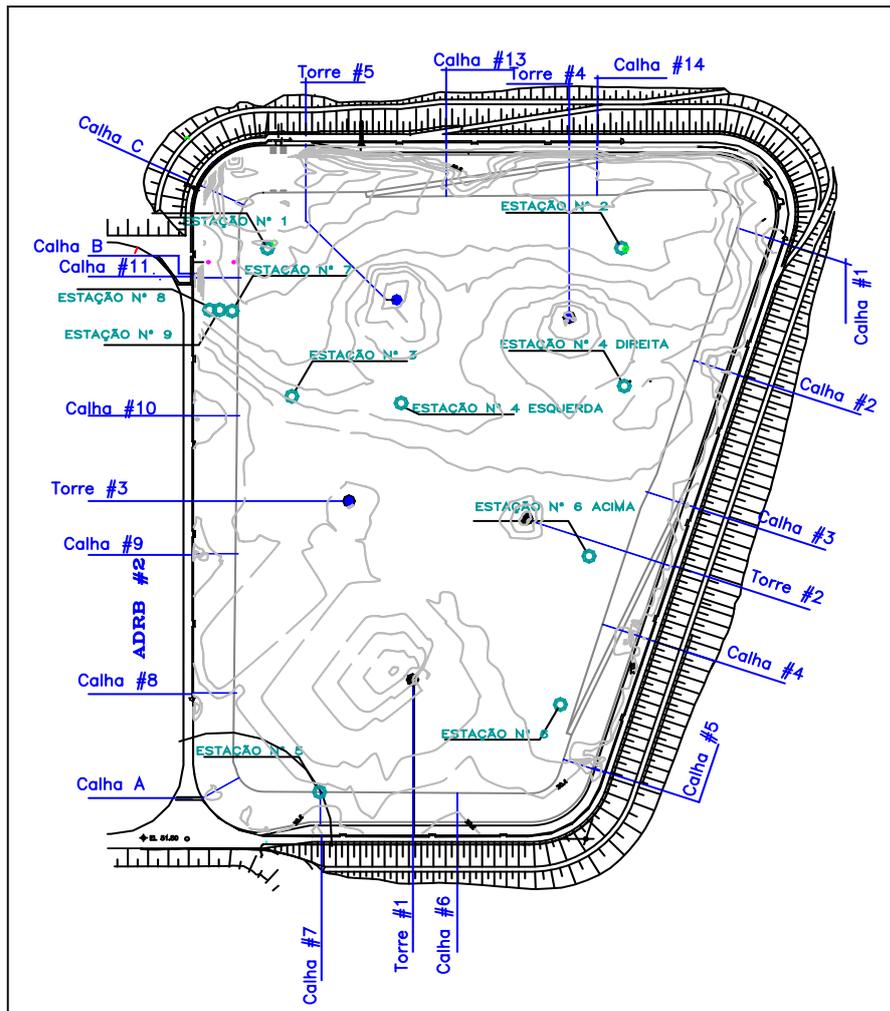


Figura 14. Localização das Estações: Área de Resíduos 3

### 2.3.1. Ensaio de Caracterização

#### a) Peso Específico Natural

Os valores de peso específico foram estimados a partir da determinação dos teores de umidade das amostras e dos valores de densidade dos grãos, obtidos em ensaios na mesma profundidade. Neste caso, considerou-se que as amostras encontravam-se saturadas ( $S=100\%$ ), e o peso específico ( $\gamma$ ) foi estimado por:

$$\gamma = \frac{(1 + w)}{(1 + G \cdot w)} \cdot G \cdot \gamma_w \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:  $w$  é o teor de umidade,  $G$  é a densidade dos grãos e  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

A Figura 15 mostra a variação do peso específico com a profundidade para as diferentes estações. Observa-se uma dispersão nos resultados, sem uma tendência clara de variação de peso específico com a profundidade. Os resultados da Estação 5 mostraram-se superiores aos demais, tendo este comportamento sido atribuído a sua proximidade a uma das calhas de lançamento (Figura 14). O alto teor de areia observado nesta área resultou em uma caracterização distinta, tendo sido, por este motivo, descartado nas análises subseqüentes. Os resultados indicaram um valor médio de peso específico do resíduo de  $17,4 \text{ kN/m}^3$ .

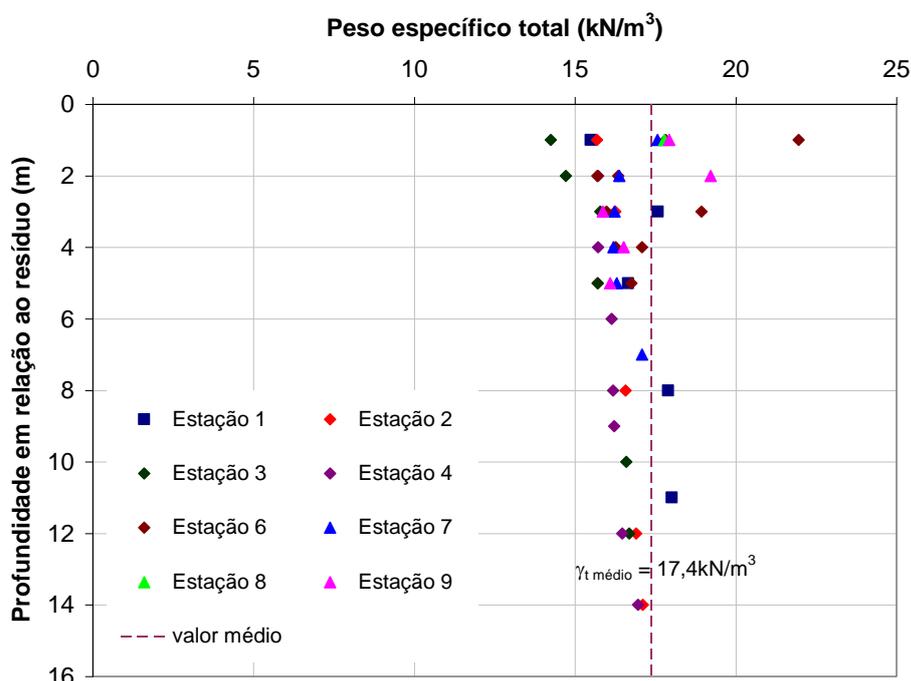


Figura 15. Distribuição do Peso Específico do Resíduo ao Longo da Profundidade (Lima, 2008)

### b) Densidade dos Grãos

A Figura 16 apresenta a distribuição da densidade dos grãos com a profundidade. Nota-se que os valores de densidade dos grãos situaram-se entre 2,8 e 3,2, com um valor médio da ordem de 3,0. Não se observa qualquer tendência de variação com a profundidade. Valores atípicos, da ordem de 2,3, registrados na Estação 3, foram desconsiderados. Stinson (1981), Smogyi e Gray (1977) e Villar (2002) reportam valores de  $G$  entre 2,84 e 3,70 para resíduos de alumínio. Segundo os autores, os altos valores são decorrentes da mineralogia da rocha de origem.

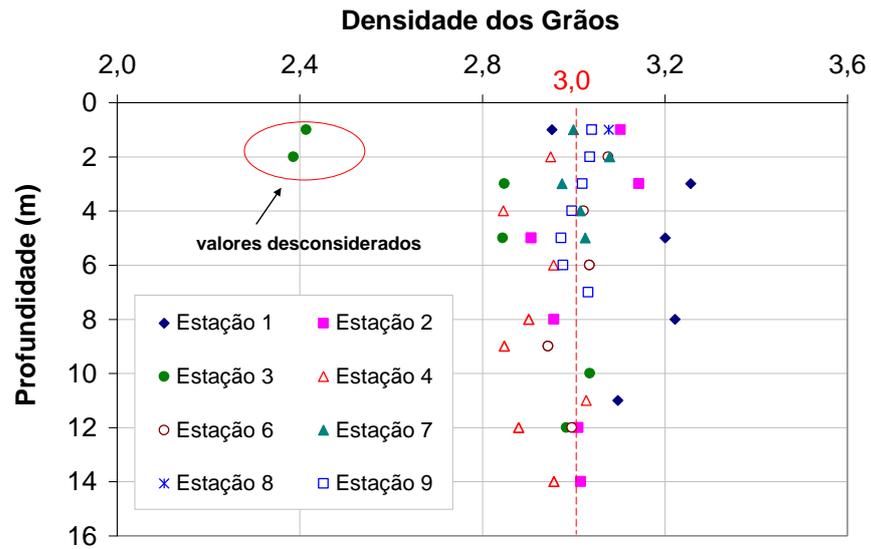


Figura 16. Distribuição da Densidade dos Grãos ao Longo da Profundidade (Lima, 2008)

### c) Teor de Umidade

A Figura 17 apresenta a distribuição do teor de umidade com a profundidade. Observa-se uma dispersão significativa nos resultados, com uma tendência de redução do teor de umidade com a profundidade.

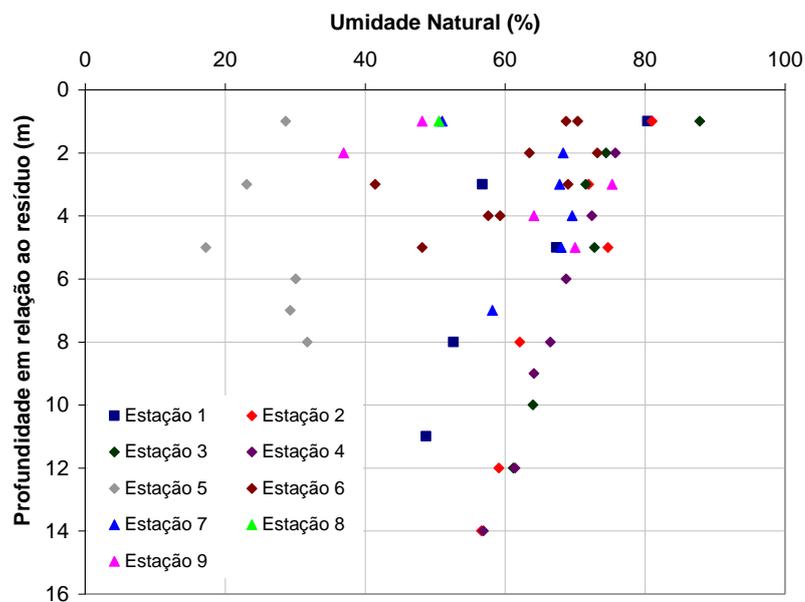


Figura 17. Variação da Umidade com a Profundidade (Lima, 2008)

É interessante observar que considerando-se um valor médio de peso específico natural de  $17,4 \text{ kN/m}^3$  e um teor de umidade médio de 60 % obtém-se um valor de peso específico seco da ordem de  $11 \text{ kN/m}^3$ , inferior ao obtido a partir da Equação 2 ( $\gamma_d = 11,6 \text{ kN/m}^3$ ). Cabe ressaltar, no entanto, que os índices físicos variam ao longo do tempo de operação do enchimento, em função de processos de sedimentação e adensamento.

As análises numéricas poderão fornecer valores de peso específico seco em diferentes etapas de enchimento.

#### d) Índice de Vazios

A Figura 18 apresenta a variação do índice de vazios com a profundidade. Analogamente ao teor de umidade, observa-se uma tendência de redução apresentando valores da ordem de 2,0 a 2,5 no topo do resíduo e 1,5 a 2,0 a 14,0 m de profundidade.

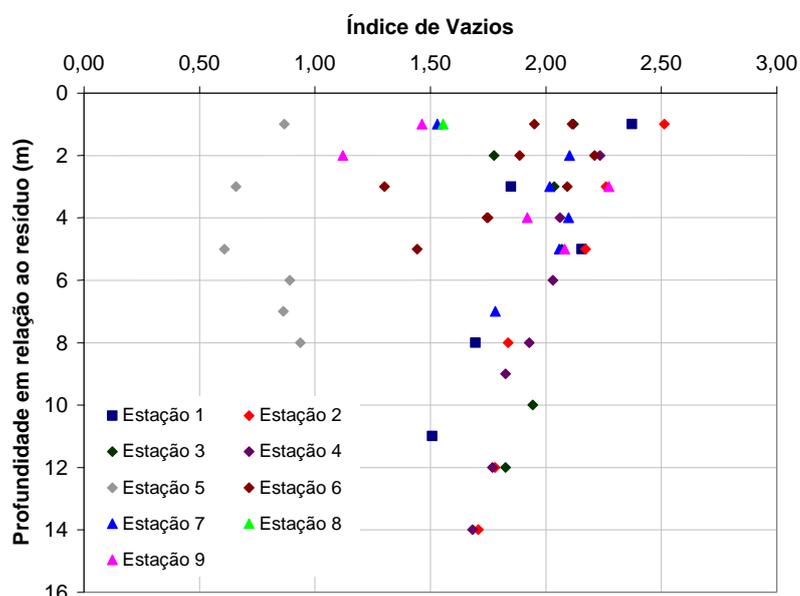
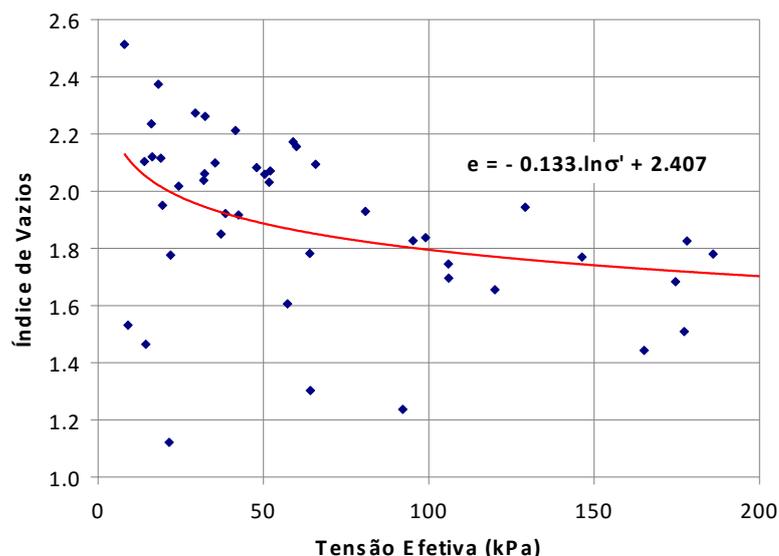


Figura 18. Variação do Índice de Vazios com a Profundidade (Lima, 2008)

A Figura 19 apresenta a curva  $e$  (índice de vazios) vs  $\sigma'_v$  (tensão vertical efetiva), definida a partir dos resultados experimentais. Nesta Figura, observa-se também o ajuste do índice de vazios em função de  $\ln \sigma'_v$ , tradicionalmente adotado em estudos com resíduo.



**Figura 19. Curva de Compressibilidade Definida pelas Amostras de Campo (Lima, 2008)**

### 2.3.2. Ensaios de Adensamento

A Figura 20 apresenta os gráficos de índice de vazios vs  $\log \sigma'$ , obtidos em ensaios CRD (Bedin, 2006). Os resultados indicam uma queda brusca nos valores de índice de vazios para baixas tensões efetivas. Resultados semelhantes em resíduos de bauxita foram reportados por outros autores (Santos, 2000; Villar, 2002).

Ressalta-se que, os rejeitos, em geral, são mais compressíveis do que solos naturais de consistência similar (Vick, 1983). Vários autores já observaram características incomuns de deformação em rejeitos de bauxita (Somogyi e Gray, 1977).

Nesta Figura, estão apresentadas relações  $e$  vs  $\ln \sigma'$  para o trecho correspondente a tensões efetivas superiores a 10 kPa. Ao longo das últimas décadas, várias relações de compressibilidade e permeabilidade têm sido obtidas experimentalmente para materiais muito moles, como os rejeitos lançados na forma de lama (Liu, 1990; Somogyi, 1979; Villar, 2002).

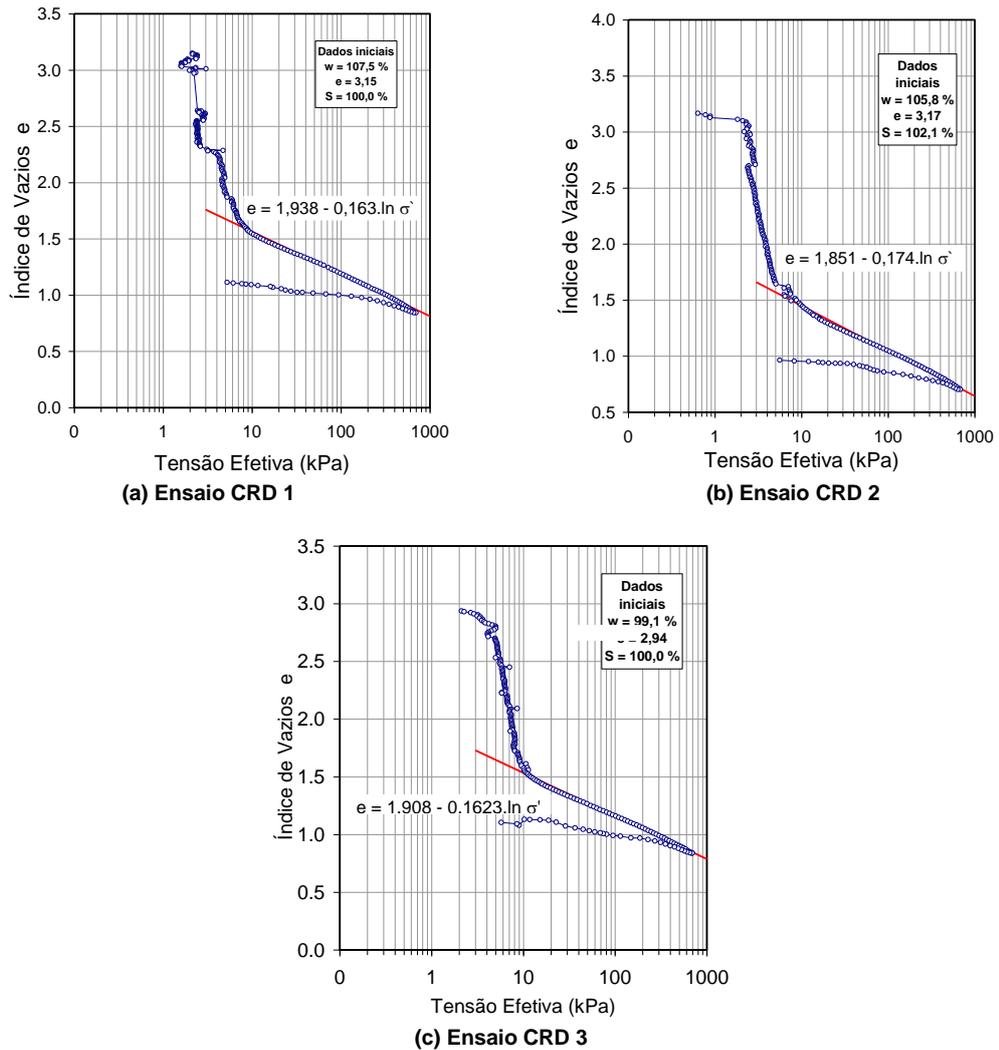


Figura 20. Variação do Índice de Vazios com a Tensão Efetiva (Bedin, 2006)

Os valores de índice de compressão ( $C_c$ ), calculados a partir da inclinação da curva  $e$  vs  $\log \sigma'$ , no trecho correspondente a tensões entre 20 e 300 kPa situaram-se entre 0,34 e 0,41, com valor médio de 0,38. Na literatura, foram encontrados valores de índice de compressão ( $C_c$ ) de 0,26 a 0,38, para cargas variando de 50 a 1000 kPa, não sendo informada a duração do carregamento (Somogyi & Gray, 1977).

A Figura 21 resume a relação entre índice de vazios vs permeabilidade observada para o conjunto de ensaios. De uma maneira geral é possível considerar esta relação como sendo:

$$e = 16,08 + 1,058.ln(k)$$

Eq. 4

Como comentado anteriormente, a curva  $e$  vs  $\log \sigma'$  apresentou um comportamento atípico, com uma queda brusca de índice de vazios para baixos níveis de tensão efetiva. Desta forma, Lima (2008) optou por traçar a linha de tendência para valores de  $e$  inferiores a 2,3.

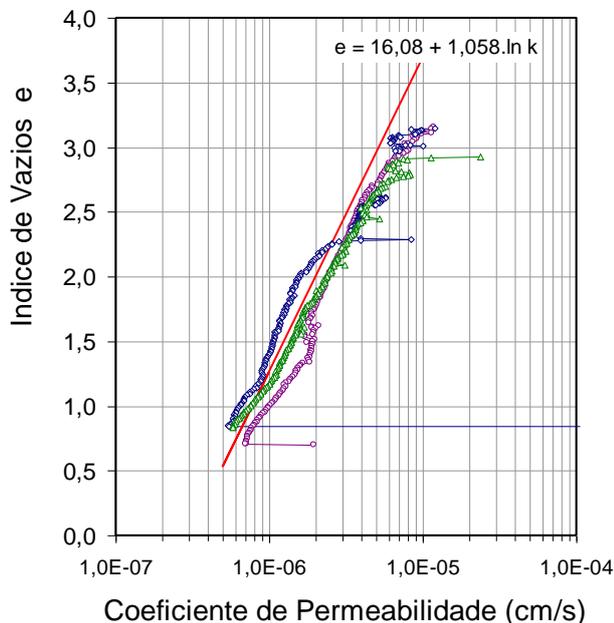


Figura 21. Variação do Índice de Vazios vs Permeabilidade

### 2.3.3. Ensaios de Piezocone

Ensaios de piezocone foram realizados em todas as estações, com exceção da estação 5. Detalhes sobre os ensaios podem ser obtidos em Bedin (2006). Cabe ressaltar que os ensaios de piezocone foram realizados após o término de lançamento pelo método convencional.

Para a caracterização do resíduo, foi adotado o critério de classificação proposto por Robertson e Campanella (1983).

A Figura 22 apresenta as distribuições de  $q_c$  e  $R_f$  com a profundidade para as diferentes estações. De acordo com Schnaid (2000), as camadas de argila caracterizam-se por baixos valores de  $q_c$  e razões de atrito superiores a 5%, enquanto as areias apresentam  $q_c$  elevados e  $R_f$  da ordem de 1%. Os perfis apresentados na Figura mostram uma distribuição de  $q_c$  crescente com a profundidade, e altos valores de  $R_f$  nas camadas superiores ( $z < 3,0$  m). Os gráficos de  $q_c$  apresentam pequenas oscilações, indicando a presença de resistências

variáveis ao longo do perfil, associadas, provavelmente, a veios/camadas arenosas ou ressecadas no resíduo.

A partir das distribuições de  $q_c$  e  $R_f$ , utilizou-se o ábaco proposto por Robertson e Campanella (1983) e os resultados do material da Estação 1 estão apresentados na Figura 24. Observa-se que, para menores profundidades, a granulometria do resíduo se aproxima das argilas, tendendo a uma granulometria mais siltosa em maiores profundidades.

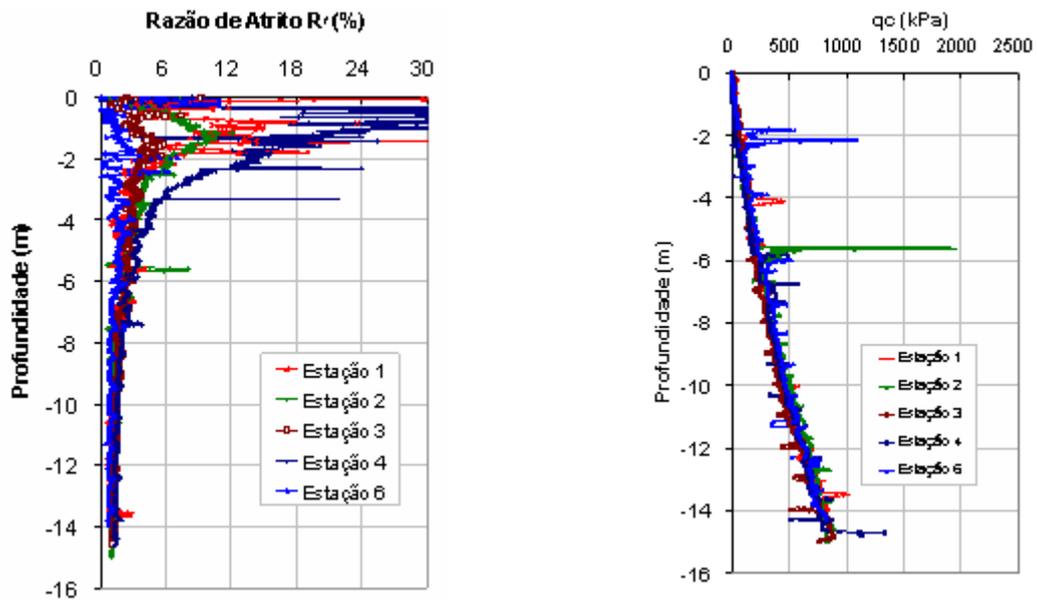


Figura 22. Distribuições de  $R_f$  e  $q_c$  fornecidas pelos ensaios de Piezocone

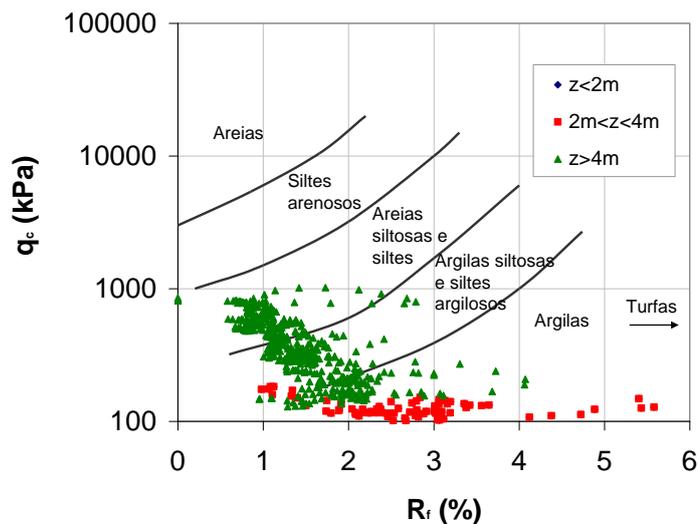
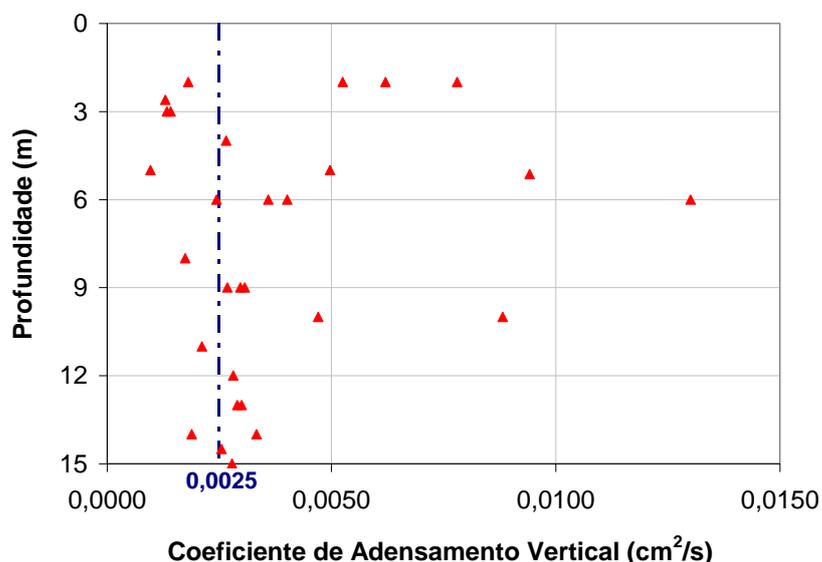


Figura 23. Classificação segundo Robertson e Campanella (1983)

A Figura 24 mostra a estimativa do coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ) ao longo da profundidade, que se apresenta na faixa de  $10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-3}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  (3,15 a 15,8  $\text{m}^2/\text{ano}$ ), com valor médio de  $2,5 \times 10^{-3}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  (9,5  $\text{m}^2/\text{ano}$ ). Os cálculos assumiram o Lima (2008) assumiu um índice de rigidez  $I_r$  igual a 100, dentro da faixa de valores da literatura ( $50 < I_r < 500$ ), uma razão entre índices de compressibilidade na recompressão e compressão virgem ( $C_R/C_c$ ) igual a 0,14 e uma anisotropia de permeabilidades horizontal e vertical ( $k_h/k_v$ ) aproximadamente igual 1,1 (Jamiołkowski et al, 1985). A razão  $C_R/C_c$  foi definida com base em resultados de ensaios de adensamento realizados em amostras de resíduo com teor de sólidos de 40%. Os valores de  $c_v$  obtidos encontram-se dentro da faixa apresentada por Stinson (1981) para lamas brasileiras, entre  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ .



**Figura 24. Variação de  $c_v$  com a profundidade (todas as estações) – Lima (2008)**

O coeficiente de permeabilidade vertical ( $k_v$ ) foi estimado a partir dos valores de  $c_v$ , do módulo de variação volumétrica ( $m_v$ ) e do peso específico da água ( $\gamma_w$ ). O valor de  $m_v$  foi estimado de acordo com a proposta de Mitchell e Gardner (1975), tendo sido adotado  $\alpha$  igual a 4, correspondente à faixa de solos silto-argilosos, com  $q_c$  inferiores a 2MPa. Os resultados, mostrados na Figura 25, situaram-se na faixa de  $5,76 \times 10^{-8}$   $\text{cm}/\text{s}$  a  $1,69 \times 10^{-6}$   $\text{cm}/\text{s}$ , com valor médio de  $3,0 \times 10^{-7}$   $\text{cm}/\text{s}$ .

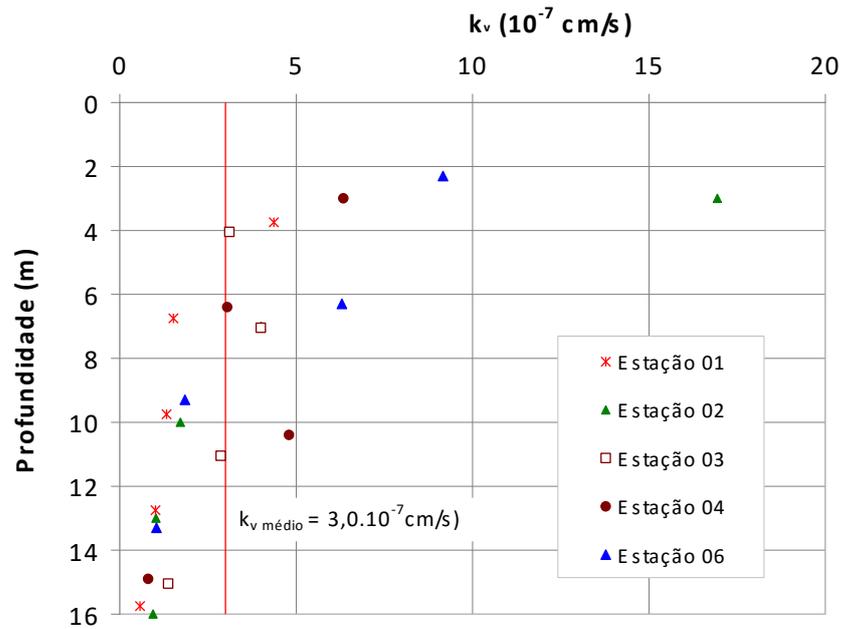


Figura 25. Variação de  $k_v$  com a profundidade (Lima, 2008)

Cabe ressaltar que os ensaios de adensamento forneceram parâmetros representativos do comportamento da polpa, e serviram como parâmetros de entrada do resíduo nas análises numéricas. Os resultados obtidos nas coletas de amostra e pelo piezocone nas diferentes estações são representativos do resíduo depositado, ao final do enchimento. Estes resultados foram utilizados ao final da simulação numérica do enchimento, para avaliar a eficácia do programa nas análises de enchimento do reservatório.

### 3. FERRAMENTA NUMÉRICA

Para a simulação do enchimento da área de resíduos 3 será utilizado o programa computacional Plaxis. Aspectos como estrutura do programa, modelos constitutivos, condições de contorno e geração da malha serão abordados nos itens subseqüentes, juntamente com a modelagem de ensaios de adensamento em laboratório, de forma a validar o programa para análises tensão-deformação envolvendo adensamento de grandes deformações.

#### 3.1. Programa Computacional Plaxis

Nos dias de hoje, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido utilizado com freqüência na prática da Engenharia, em razão de sua capacidade de simular diversas condições de contorno, incorporando diferentes etapas construtivas e modelos constitutivos diversos. Bathe (1982) descreve os fundamentos da teoria de elementos finitos. Potts e Zdravkovic (1999) apresentam aplicações do método dos elementos finitos em análises de problemas geotécnicos.

Na presente dissertação, não serão abordados os aspectos relativos à teoria de elementos finitos, uma vez que o foco do trabalho foi a utilização de um programa comercial para reprodução e previsão do comportamento de barragens de rejeitos durante a fase de *upstream*. Este programa já foi testado e validado, não sendo necessária a implementação de sub-rotinas de cálculo.

O programa Plaxis consiste em um programa de elementos finitos desenvolvido especificamente para análise de deformações e estabilidade de obras geotécnicas. Os materiais são representados por elementos ou zonas de tal forma que a malha gerada pode se adequar perfeitamente aos interesses da modelagem. Cada elemento obedece a relações pré-definidas de tensão-deformação, lineares ou não-lineares, em resposta às forças e condições limites impostas ao modelo (Brinkgreve, 2002).

### 3.2. Estrutura do Programa

O programa Plaxis funciona em ambiente Windows, com uma interface bastante amigável com o usuário. A estrutura computacional do programa é dividida em 4 sub-programas: *input*, *calculation*, *output*, e *curves*.

O primeiro sub-programa consiste em uma sub-rotina de entrada de dados (*input*). Nesta etapa, são introduzidos os dados do problema como geometria, disposição dos elementos, propriedades dos materiais, modelos constitutivos e condições de contorno. Define-se, também, o tipo de problema, que pode ser:

- Axissimétrico, quando apresenta um eixo de simetria axial;
- Estado plano de deformação, quando a geometria pode ser considerada bidimensional, com uma dimensão significativamente superior às demais.

Problemas de deformação plana são muito utilizados em análises de obras geotécnicas, como túneis, barragens, fundações corridas, etc. Fisicamente, tal estado ocorre em estruturas longas com carregamento uniforme ao longo da maior dimensão.

Para a definição da geometria do problema, o programa disponibiliza uma série de elementos, como:

- elementos de placa: simulam estruturas esbeltas que apresentam rigidez axial (EA) e à flexão (EI) elevadas;
- elementos de ancoragem: simulam ancoragens e suportes, podendo ser pré-tensionados;
- elementos geossintéticos: simulam estruturas esbeltas que apresentam apenas rigidez axial (EA);
- elementos de interface: reproduzem o contato entre diferentes materiais. São utilizados em problemas que envolvem interação solo-estrutura.

As condições de contorno do problema podem ser definidas através de forças ou deslocamentos prescritos. O programa permite a adoção de carregamentos distribuídos, em linha e pontuais, e a prescrição de deslocamentos nulos ou não.

Definidas a geometria, as condições de contorno e as propriedades dos materiais, procede-se à geração da malha de elementos finitos.

A malha de elementos finitos é gerada automaticamente pelo programa com elementos de 6 ou 15 nós. Os elementos de 6 nós apresentam relações de interpolação de segunda ordem para os deslocamentos. Neste caso, a matriz de rigidez é avaliada por integração numérica, usando um total de três pontos de Gauss (pontos de tensão). No caso de elementos de 15 nós, a interpolação é de quarta ordem, e a integração envolve 12 pontos de tensão (Brinkgreve, 2002). A malha pode ser refinada global ou localmente de acordo com as necessidades do problema.

Após a geração da malha, são definidas as condições iniciais do problema, levando-se em consideração, ou não, a presença de água. Nesta etapa, podem ser definidas superfícies impermeáveis.

O segundo sub-programa (*Calculation*) permite a realização de uma série de cálculos de elementos finitos, sendo as análises de deformações diferenciadas em: *Plastic* (carregamento plástico), *Consolidation* (adensamento), e *Phi-c Reduction* (determinação do fator de segurança).

Assim como na prática da Engenharia, o programa permite, na fase de cálculo, a simulação de carregamentos e descarregamentos imediatos, ou em tempos pré-estabelecidos, e a introdução de períodos de adensamento. A sub-rotina de cálculo pode ser dividida em um número de etapas, de forma a reproduzir fielmente o processo construtivo no campo.

Nas etapas de construção, é possível o uso das opções de atualização das poropressões e da malha de elementos finitos. Em situações que envolvem grandes deformações, como o alteamento de barragens sobre fundação de resíduo, a atualização da malha é recomendada. Neste caso, a matriz de rigidez é atualizada com base na geometria deformada da correspondente etapa construtiva.

A opção de atualização das poropressões é utilizada quando se deseja introduzir o efeito da submersão dos materiais, resultando, normalmente, em uma redução da tensão efetiva atuante nas camadas compressíveis.

No terceiro sub-programa (*Output*), o usuário obtém os resultados, e a malha deformada. Podem ser avaliadas as tensões (totais, efetivas, cisalhantes

e poropressões), as deformações, os deslocamentos, e os pontos de plastificação.

Os resultados podem ser visualizados a partir da interface gráfica, ou em forma de tabelas. Cabe ressaltar que a convenção de sinais utilizada no programa Plaxis é diferente da usual em Geotecnia, considerando as tensões de tração positivas.

Finalmente, o quarto sub-programa (*Curves*) permite a geração de curvas de tensão vs deformação, força vs deslocamento e trajetórias de tensão ou deformação para pontos pré-selecionados na fase de cálculo. A geração das curvas pode ser executada para diferentes estágios construtivos e diversos pontos podem ser inseridos em um mesmo gráfico, facilitando a interpretação.

### **3.3. Modelos Constitutivos**

O programa Plaxis possui 6 modelos constitutivos que governam o comportamento tensão-deformação dos materiais envolvidos em um dado problema geotécnico: linear elástico, Mohr-Coulomb, *Jointed Rock*, *Hardening Soil*, *Soft Soil* e *Soft Soil Creep*.

Face ao tipo de problema analisado na presente dissertação e aos parâmetros geotécnicos disponíveis, optou-se pela adoção dos modelos *Mohr-Coulomb*, e *Soft Soil* para a representação dos materiais.

Desta forma, apenas estes modelos serão descritos no presente trabalho. Detalhes sobre os demais modelos constitutivos disponibilizados pelo programa Plaxis podem ser obtidos em Brinkgreve (2002).

O modelo constitutivo Mohr-Coulomb integra a categoria dos modelos elastoplásticos. O princípio básico da elastoplasticidade define que as deformações são decompostas em duas parcelas: elástica e plástica. No comportamento elástico, as deformações são recuperadas, ou seja, são reversíveis, enquanto a plasticidade está associada ao desenvolvimento de deformações irreversíveis.

O modelo Mohr-Coulomb é um modelo elástico perfeitamente plástico, empregado para representar a ruptura por cisalhamento de solos e rochas. Este modelo é assim designado, devido à hipótese de que o material se comporta como linear elástico até atingir a ruptura, definida pela envoltória de

Mohr-Coulomb; ou seja, o material apresenta um comportamento linear elástico até atingir uma determinada tensão de escoamento, que se mantém constante com o acréscimo de deformações plásticas (Brinkgreve, 2002).

Para a representação de um material a partir do modelo de Mohr Coulomb, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros:  $\gamma_{\text{sat}}$  (peso específico saturado),  $\gamma_d$  (peso específico seco),  $\phi'$  (ângulo de atrito efetivo),  $c'$  (coesão efetiva),  $k_x$  (permeabilidade horizontal),  $k_y$  (permeabilidade vertical),  $E$  (módulo de deformabilidade),  $\nu$  (coeficiente de Poisson).

O modelo *Soft-Soil* é um modelo do tipo *Cam-Clay* (Burland, 1967) utilizado para solos muito moles, como argilas normalmente adensadas, e turfas, podendo ser aplicado em resíduos de mineração. As principais características deste modelo são (Brinkgreve, 2002):

- Rigidez de acordo com o nível de tensões;
- Distinção entre carregamento primário e descarregamento-recarregamento;
- Registro de tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ );
- Critério de ruptura de Mohr-Coulomb;
- Usa a teoria de Biot (1941) para o cálculo de adensamento.

Para a representação do comportamento de solos moles, o modelo *Soft-Soil* requer o conhecimento de 9 parâmetros de entrada:  $\gamma_{\text{sat}}$  (peso específico saturado),  $\gamma_d$  (peso específico seco),  $\phi'$  (ângulo de atrito efetivo),  $\psi$  (ângulo de dilatância),  $c'$  (coesão efetiva),  $k_x$  (permeabilidade horizontal),  $k_y$  (permeabilidade vertical),  $\lambda^*$  (índice de carregamento modificado),  $\kappa^*$  (índice de descarregamento/recarregamento modificado), definidos pelas equações mostradas na Tabela 6.

**Tabela 6. Correlação entre os parâmetros de compressibilidade**

Fase de Carregamento ( $\lambda^*$ )	$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e}$	$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3.(1+e)}$
Fase de Descarregamento/Recarregamento ( $\kappa^*$ )	$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e}$	$\kappa^* = \frac{2.C_r}{2,3.(1+e)}$

Legenda:  $\lambda$  e  $\kappa$  = parâmetros do modelo *Cam Clay* (Burland, 1967) definidos a partir da inclinação da curva  $v \times \ln p'$ , nas fases de carregamento e descarregamento, respectivamente;  $v = 1+e$ ;  $p'$  = média das tensões efetivas.

Para determinados tipos de solo, como os descritos pelo modelo *Soft-Soil*, a dilatância pode ser, em geral, negligenciada. Desta forma, valores nulos de dilatância são considerados padrão, em análises com este modelo.

### 3.4. Validação do Programa

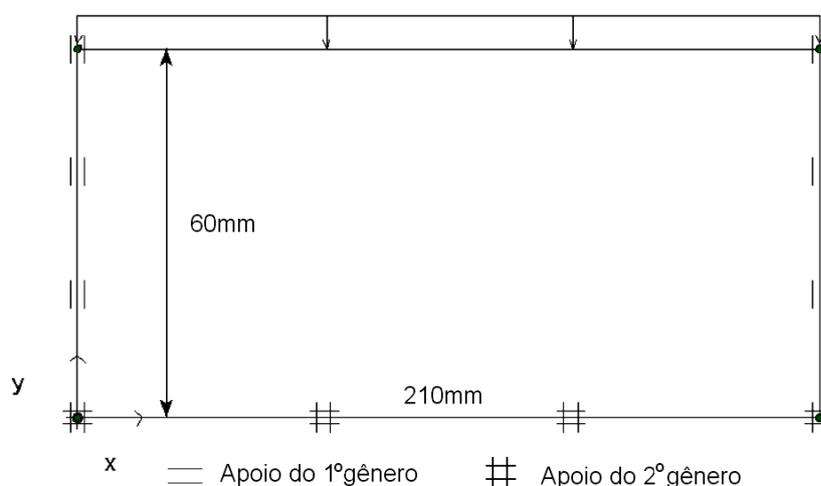
Para validar o uso do programa computacional Plaxis em análises de problemas que envolvem adensamento em grandes deformações, optou-se por selecionar um ensaio de adensamento executado em amostra de resíduo retirada da área em estudo e reproduzi-lo numericamente.

No Capítulo 3, foram apresentados e discutidos os ensaios de adensamento realizados na área de resíduos de bauxita 3. Neste item, será apresentado apenas o resultado de um ensaio (CRD 1), que será confrontado com os resultados previstos pelo programa Plaxis. O objetivo é validar o programa para análises de grandes deformações e confirmar a potencialidade do modelo *Soft-Soil* na representação de materiais moles como resíduos de bauxita.

Na sub-rotina de entrada de dados (*input*), foram introduzidos os dados do problema como geometria, propriedades dos materiais, modelos constitutivos e condições de contorno.

A geometria adotada procurou reproduzir fielmente as condições de ensaio. O corpo de prova cilíndrico foi modelado com 210 mm de diâmetro e 60 mm de altura, considerando-se a condição de axissimetria. Brinkgreve (2002) alerta que, tendo em vista que o processo de adensamento depende do comprimento de drenagem, é fundamental usar as dimensões reais do corpo de prova.

As condições de contorno consistiram em restrições de deslocamentos horizontais (apoios do 1º gênero) nas extremidades direita e esquerda do corpo de prova. Ressalta-se que o ensaio de adensamento é um ensaio de compressão unidimensional e, portanto, a amostra é impedida de se deformar horizontalmente. Na base do corpo de prova, foram inseridas restrições de deslocamentos verticais e horizontais (apoios do 2º gênero) na base, como mostra a Figura 26.



**Figura 26. Geometria do Ensaio de Adensamento**

Para a representação do comportamento do resíduo, foi adotado o modelo *Soft-Soil*, por ser um modelo específico para solos moles, como descrito no Item 5.1.2. A definição dos 9 parâmetros representativos deste modelo baseou-se nos resultados do ensaio de adensamento CRD 1 (Figura 20) e nos ensaios triaxiais. Estes parâmetros estão resumidos na Tabela 7. Salienta-se que para solos descritos pelo modelo *Soft-Soil*, a dilatação pode ser, em geral, negligenciada ( $\psi=0$ ). Os valores de peso específico ( $\gamma_{sat}$  e  $\gamma_d$ ) foram definidos com base nos dados iniciais da amostra CRD 1, no ensaio de adensamento.

Tabela 7. Parâmetros do Modelo *Soft-Soil*

Parâmetro	Valor
Peso específico saturado ( $\gamma_{\text{sat}}$ )	15,2kN/m <sup>3</sup>
Índice de vazios inicial ( $e_0$ )	2,40
Ângulo de atrito ( $\phi'$ )	32
Coesão ( $c'$ )	0,0
Dilatância ( $\psi$ )	0,0
Permeabilidade ( $k_x = k_y$ )	2,1 x 10 <sup>-3</sup> m/dia
Índice de carregamento modificado ( $\lambda^*$ )	0,035
Índice de descarregamento/re-carregamento modificado ( $\kappa^*$ )	0,013

A partir da curva índice de vazios ( $e$ ) vs permeabilidade ( $k$ ) do ensaio de adensamento, apresentada na Eq. 4, foram definidos os valores de permeabilidade. Para a condição de índice de vazios inicial ( $e_0 = 2,40$ ), determinou-se o valor de  $2,1 \times 10^{-3}$  m/dia.

Na fase de cálculo do programa (*Calculation*), o carregamento foi aplicado em etapas, sob condições não drenadas. Após cada etapa de carregamento, introduziu-se um período de adensamento de 1 dia, para que o excesso de poropressão fosse completamente dissipado. Terminada a última etapa de carregamento, um período de adensamento adicional de 100 dias foi introduzido. A Tabela 8 esquematiza as etapas de cálculo.

A Figura 27 apresenta as previsões numéricas de deslocamentos verticais em confronto com os deslocamentos medidos durante o ensaio de laboratório. Nota-se um ajuste bastante adequado entre os resultados experimentais e as análises numéricas. A não linearidade na curva numérica se deve aos períodos de consolidação.

Ressalta-se que a metodologia adotada na reprodução do ensaio de adensamento seguiu as sugestões do manual do programa (Brinkgrieve, 2002), com etapas de carregamento e adensamento. Esta metodologia é a mesma dos ensaios de adensamento convencionais, onde se aplica uma tensão vertical na superfície do corpo de prova, e mede-se a evolução das deformações verticais ao longo do tempo.

Tabela 8. Etapas de Carregamento: Ensaio de Adensamento

Etapa	Tipo de Cálculo	Carregamento (kPa)	Tempo (dias)	Tempo total (dias)
1	Aplicação de carga	10	0	0
2	Adensamento	10	1	1
3	Aplicação de carga	20	0	1
4	Adensamento	20	1	2
5	Aplicação de carga	40	0	2
6	Adensamento	40	1	3
7	Aplicação de carga	80	0	3
8	Adensamento	80	1	4
9	Aplicação de carga	160	0	4
10	Adensamento	160	1	5
11	Aplicação de carga	320	0	5
12	Adensamento	320	1	6
13	Aplicação de carga	640	0	6
14	Adensamento	640	1	7
15	Adensamento	640	100	107

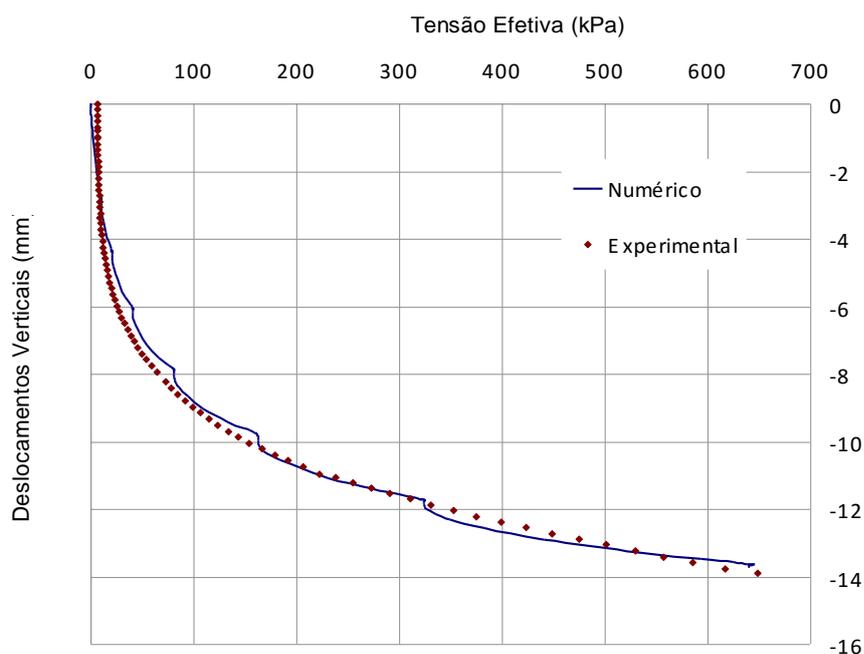
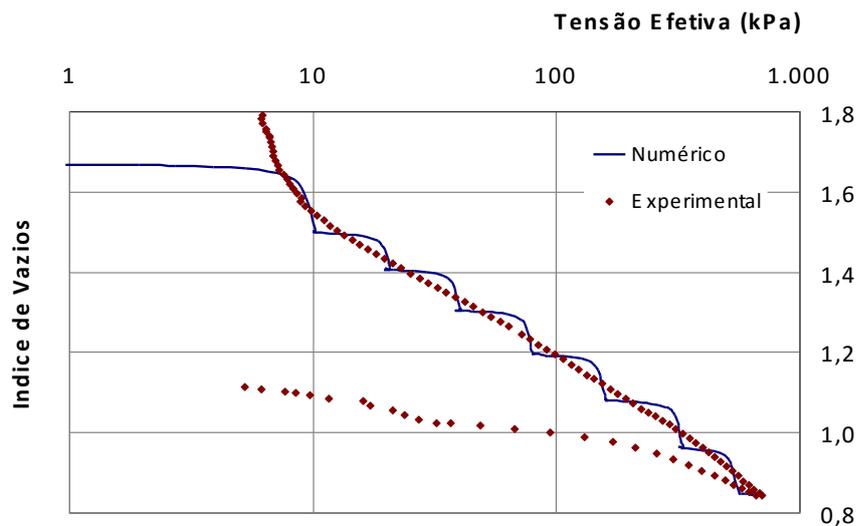


Figura 27. Previsões numéricas vs resultados experimentais: Ensaio de Adensamento

A Figura 28 confronta as curvas  $e$  vs  $\sigma'$  numérica e de laboratório. Observa-se que, para a faixa de tensões de 10 a 800 kPa, a curva de laboratório interpolou a curva prevista numericamente, reproduzindo satisfatoriamente o ensaio de adensamento.



**Figura 28. Análise Numérica x Análise Experimental**

Diante do exposto, pode-se afirmar que o modelo constitutivo adotado, bem como os parâmetros selecionados, são capazes de reproduzir o comportamento do resíduo de bauxita. O Capítulo 5 apresenta e discute as análises numéricas executadas para a simulação do comportamento da área de resíduos.

## 4. ANÁLISES NUMÉRICAS

### 4.1. Metodologia

A simulação do enchimento do reservatório da área de resíduos 3 foi realizada com o programa computacional Plaxis, de elementos finitos, que permite a análise de grandes deformações.

A metodologia adotada constou das seguintes etapas:

1. Elaboração de um modelo geométrico, onde foi definida uma geometria ótima, que representasse a área de resíduos, sem interferência das condições de contorno. Para tanto, alguns testes foram realizados, afastando-se os contornos, até que houvesse uma repetição dos resultados.

2. Introdução dos parâmetros geotécnicos, definidos a partir da análise dos resultados dos ensaios de adensamento apresentados no Capítulo 3.

3. Calibração do modelo. Nesta etapa, os resultados da simulação do enchimento realizada com o programa PLAXIS foram confrontados com os dados da batimetria de campo.

4. Uma vez definidos a geometria, e ajustados os parâmetros, procedeu-se à previsão do comportamento da área de resíduos durante o enchimento. A partir da distribuição das tensões efetivas ao longo da profundidade do reservatório ao final do enchimento, e da expressão  $e \times \ln \sigma'$ , foram estimados os principais índices físicos (índice de vazios, peso específico, teor de umidade, densidade dos grãos) e as distribuições dos mesmos com a profundidade, imediatamente após o enchimento do reservatório. Essas distribuições foram confrontadas com as obtidas a partir da coleta de amostra, apresentadas no Capítulo 3, de forma a validar o programa computacional para análise de enchimento de reservatórios de resíduos.

5. Apresenta-se, também, a distribuição das poropressões prevista ao longo da profundidade, tão difícil de se determinar analiticamente.

6. Finalmente, apresenta-se a distribuição dos índices físicos com a profundidade, 2 anos após o enchimento, época em que se iniciou a etapa de alteamento a montante da área.

As análises serão bidimensionais, procurando-se considerar: as deformações verticais ao longo da profundidade, e as deformações horizontais ao longo da superfície da lama depositada e já em processo de adensamento devido ao peso próprio.

## 4.2. Simulação Numérica da Área de Resíduos 3

### 4.2.1. Elaboração do Modelo Geométrico

A Figura 29 apresenta a geometria adotada nas análises numéricas. Tendo em vista as grandes dimensões da área, buscou-se um modelo capaz de reproduzir a área de resíduos, sem interferência das condições de contorno. Os reservatórios tendem a apresentar grandes dimensões em planta. No caso da área 3, a razão entre a largura total da seção e a espessura de resíduo de fundação (H) é da ordem de 40 vezes. Este fato torna inviável, por um problema de escala, a introdução da geometria completa no programa Plaxis.

Nas análises numéricas, a camada de 18,00 m de resíduo de fundação (Material 2) foi dividida em 8 subcamadas, visando reproduzir fielmente o processo de enchimento do reservatório, com tempo de lançamento que dependem das taxas de lançamento adotadas pela Refinaria.

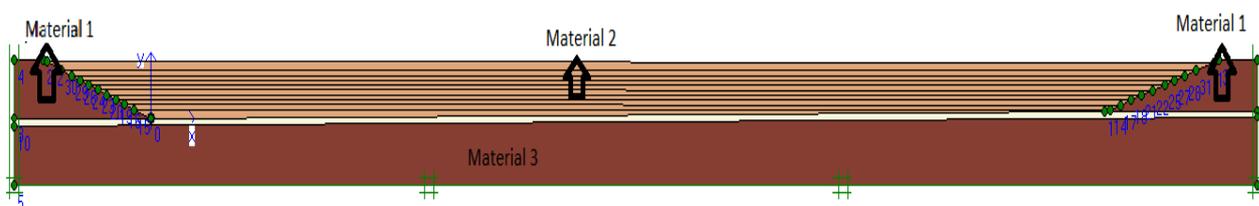


Figura 29. Geometria Adotada nas Análises Numéricas da Área de Resíduos de Bauxita 3

### 4.2.2. Definição dos Modelos Constitutivos e Parâmetros Geotécnicos

A escolha do modelo constitutivo deve levar em conta o tipo de material e a resposta que se espera da análise numérica. O dique de solo compactado (Material 1), constituído por um solo areno siltoso compacto, foi representado pelo modelo Linear Elástico, uma vez que este material não apresenta problemas de ruptura ou deformações excessivas. Os parâmetros, listados na Tabela 9, foram estimados em face de inexistência de dados experimentais.

Acredita-se que tais parâmetros não tenham interferência significativa no comportamento tensão vs deformação do dique.

**Tabela 9. Parâmetros do Dique de Solo Compactado**

Material	Modelo Constitutivo	Parâmetro	Valor	
1	Dique de solo compactado	Linear Elástico	Peso específico ( $\gamma$ )	18 kN/m <sup>3</sup>
			Módulo de deformabilidade (E)	10 <sup>5</sup> kN/m <sup>2</sup>
			Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,30

O resíduo depositado pela técnica convencional (Material 2) foi representado pelo modelo *Soft Soil*. Este modelo permite a reprodução das deformações sofridas por solos de alta compressibilidade e baixa permeabilidade, e considera o tempo de adensamento. A adoção deste modelo requer a definição dos pesos específicos ( $\gamma_{sat}$ ,  $\gamma_d$ ), parâmetros de resistência ( $\phi'$ ,  $c'$ ), permeabilidade ( $k_x$  e  $k_y$ ), ângulo de dilatância ( $\psi$ ), razão de pré-adensamento (OCR), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), índices de compressibilidade ( $C_c$ ,  $C_R$ ) e índice de vazios inicial ( $e_0$ ).

A definição dos parâmetros da polpa de resíduo foi realizada com base nos ensaios de adensamento executados em amostras de resíduo. Estes ensaios foram apresentados no Capítulo 3. Observou-se que o comportamento do resíduo pode ser definido pela expressão:

$$e = 1,938 - 0,163 \cdot \ln \sigma' \quad \text{Eq. 5}$$

No entanto, observa-se que o índice de vazios inicial é elevado (Figura 20), ocorrendo uma queda brusca para baixas tensões. A distribuição de índice de vazios com a profundidade, definida a partir da coleta de amostras no reservatório após o enchimento (Figura 18), mostra que no topo do reservatório, o índice de vazios é igual a 2,40, correspondendo ao valor inicial da polpa. Diante do exposto, as análises consideraram um valor de índice de vazios inicial ( $e_0$ ) igual a 2,40, e coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) igual a 0,38 (média dos ensaios CRD apresentados no Capítulo 3).

O coeficiente de permeabilidade foi definido com base na Equação 4. Considerando um índice de vazios inicial igual a 2,40, determina-se um valor de permeabilidade igual a  $2,2 \times 10^{-3}$  m/dia.

Para simulação da abertura da drenagem de fundo, foi introduzido um material rígido e permeável, representado pelo modelo linear elástico.

**Tabela 10. Modelos constitutivos e parâmetros do resíduo**

Material	Modelo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	k (m/dia)	E (MPa)	C <sub>c</sub>	e <sub>o</sub>
Resíduo	Soft Soil	15,0	$2,2 \times 10^{-3}$	---	0,38	2,40

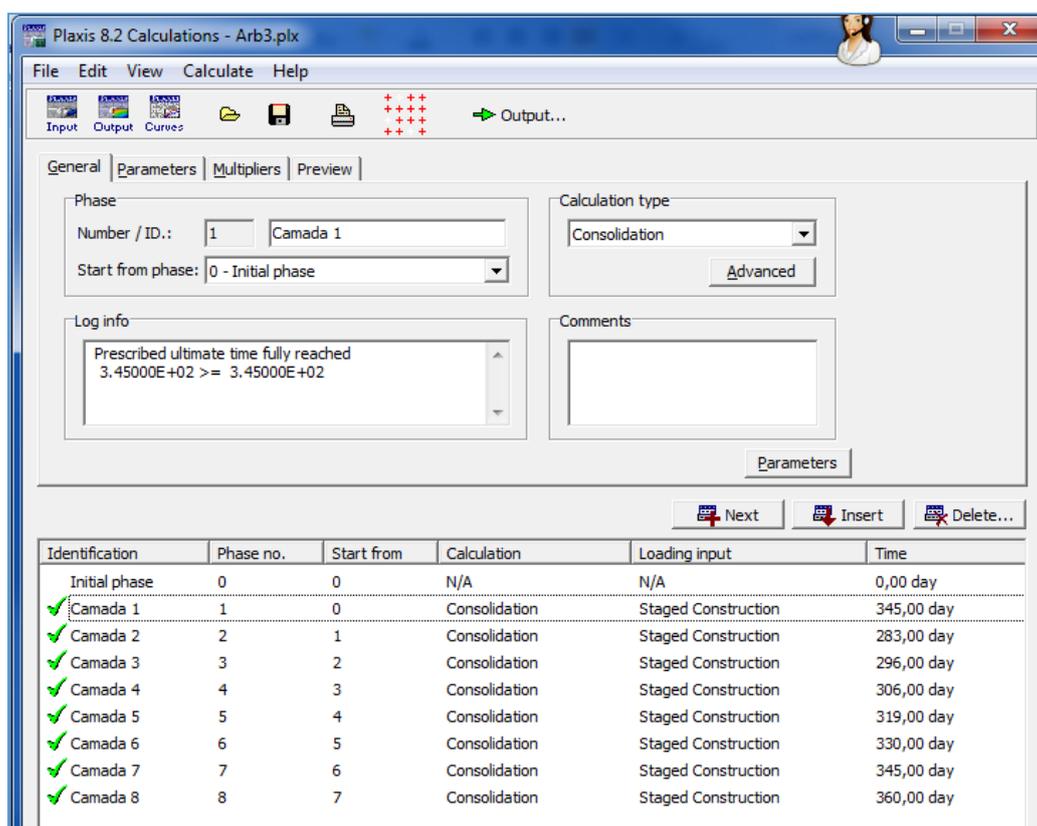
#### 4.2.3. Simulação do Processo de Enchimento da Área de Resíduos 3

A simulação do enchimento da área de resíduos 3 procurou reproduzir fielmente as etapas de lançamento de resíduos no interior do reservatório. Como comentado anteriormente, o reservatório foi subdividido em 8 camadas, e os tempos de enchimento foram estimados com base no volume de cada camada e na taxa de lançamento do resíduo informada pela ALUMAR (1850 m<sup>3</sup>/dia). A Tabela 11 apresenta os tempos de enchimento introduzidos no programa para cada camada. A cota do fundo do reservatório é 32,30 m.

**Tabela 11. Tempos de Enchimento de Cada Camada**

Camadas	Cota Inicial (m)	Profundidade (m)	Volume por camada (m <sup>3</sup> )	Tempo (dias)
1ª Camada	36,50	4	638.354,24	345
2ª Camada	38,50	2	524.159,56	283
3ª Camada	40,50	2	547.757,02	296
4ª Camada	42,50	2	567.444,85	306
5ª Camada	44,50	2	591.601,71	319
6ª Camada	46,50	2	612.033,12	330
7ª Camada	48,50	2	638.926,80	345
8ª Camada	50,50	2	667.229,97	360

A Figura 30 mostra o subprograma de cálculo do Plaxis, onde são introduzidos os tempos de lançamento das camadas, e o tipo de análise, que no caso foi *Consolidation*. As diferentes etapas de enchimento estão ilustradas na Figura 31. Cabe ressaltar a drenagem de fundo é aberta antes do lançamento da 2a camada de resíduos.

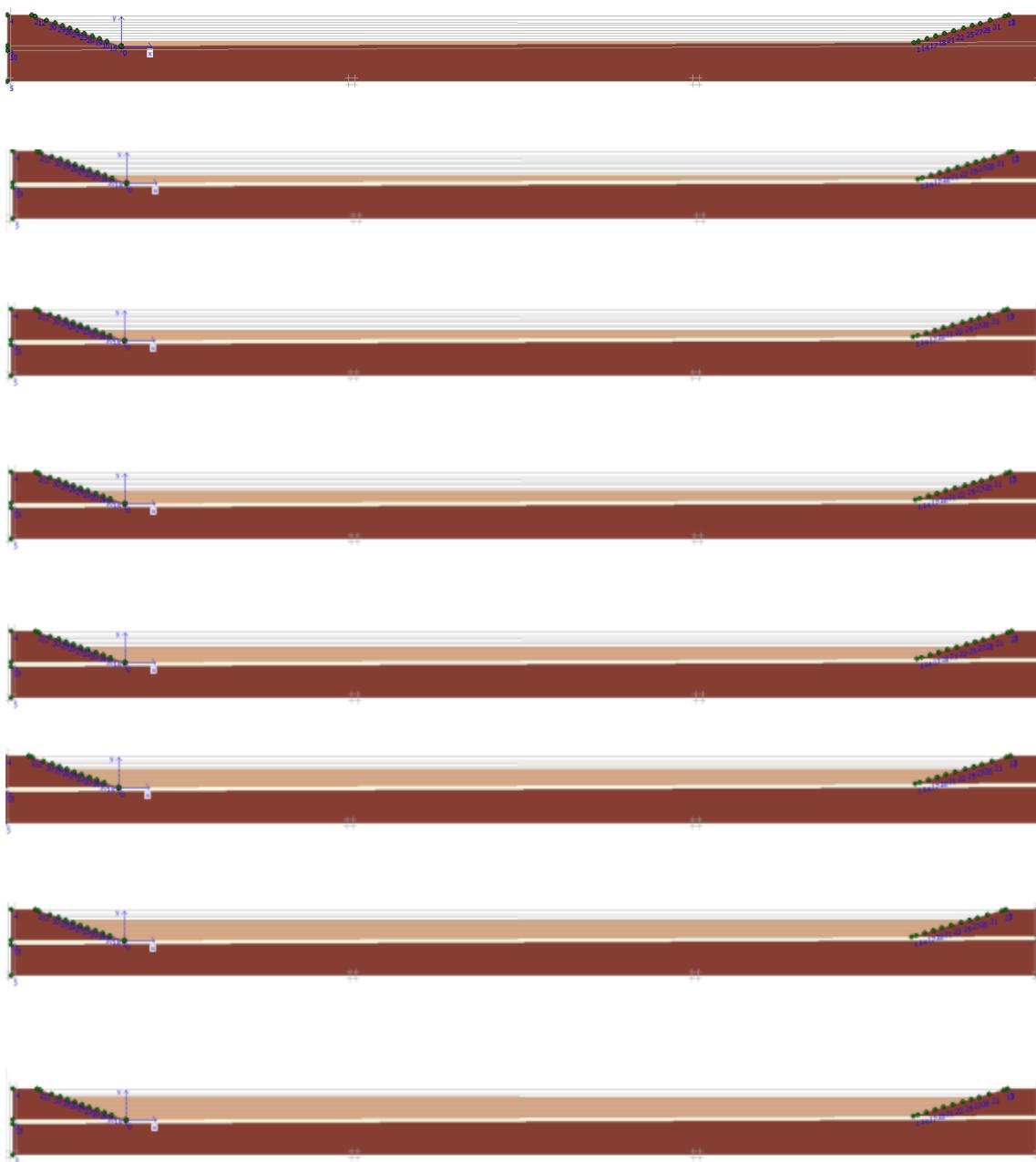


**Figura 30. Subprograma Calculation**

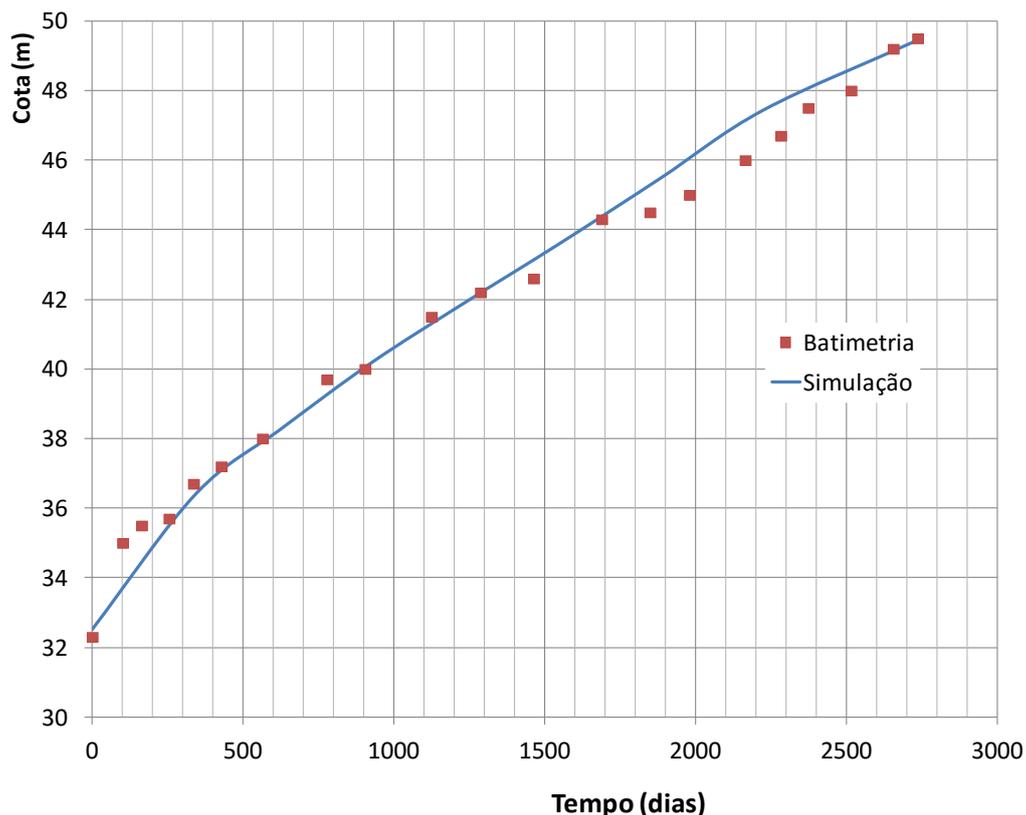
Na Figura 32, os resultados da simulação numérica do enchimento do reservatório são confrontados com a instrumentação de campo. Pode-se observar um ajuste satisfatório entre os resultados numéricos e experimentais, indicando que o programa é capaz de reproduzir o processo de enchimento de áreas de resíduos.

Ao final de cada etapa de enchimento, o programa fornece um valor de recalque no topo do resíduo, decorrente do adensamento por peso próprio. Este valor é descontado da cota inicial e, assim, é definida a curva de enchimento prevista numericamente. Na realidade, esse recalque representa a

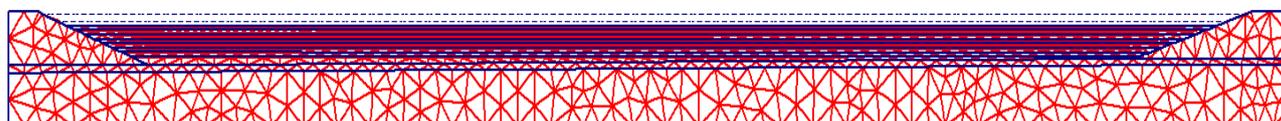
compressão da pilha de resíduos por peso próprio. A Figura 33 mostra a configuração deformada da malha ao final do enchimento, que forneceu um valor de recalque no topo do resíduo igual a 1,31 m. Este valor de recalque é importante para a previsão da vida útil do reservatório. Nas estimativas iniciais de projeto, a compressão decorrente do adensamento por peso próprio é desconsiderado. No entanto, este valor representa um ganho de vida útil do reservatório, e a possibilidade de previsão deste ganho torna o uso da ferramenta computacional muito interessante.



**Figura 31. Etapas de Lançamento**



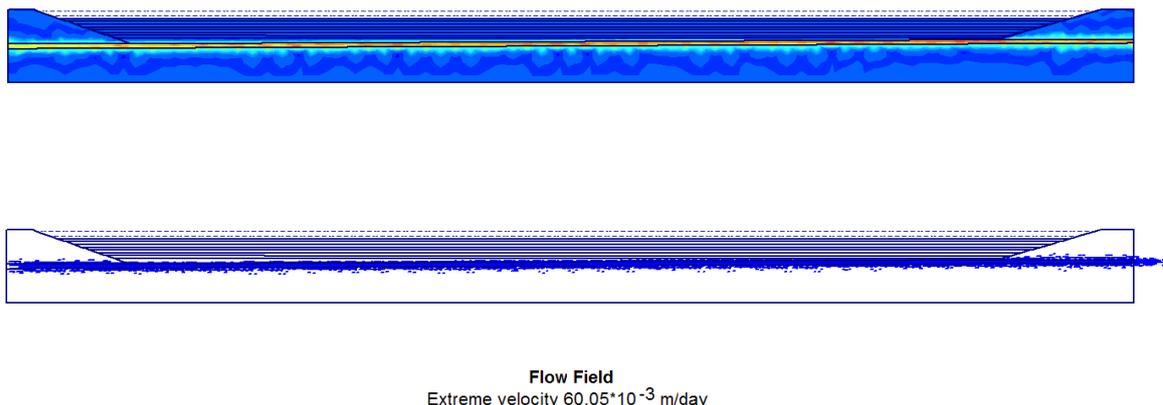
**Figura 32. Confronto entre a batimetria e a previsão numérica do enchimento**



**Deformed Mesh**  
 Extreme total displacement 1,31 m  
 (displacements at true scale)

**Figura 33. Malha deformada ao final do enchimento**

A Figura 34 ilustra o funcionamento da drenagem de fundo. Observa-se que o fluxo ocorre exatamente na camada drenante inserida na geometria para simulação do sistema de drenagem. Com a drenagem de fundo aberta, ocorre a dissipação dos excessos de poropressão gerados durante o lançamento do resíduo no reservatório, e conseqüentemente, a compressão da pilha.



**Figura 34. Funcionamento da Drenagem de Fundo**

A Tabela 12 reúne os recalques previstos ao término do lançamento das diferentes camadas e as cotas finais de enchimento previstas numericamente.

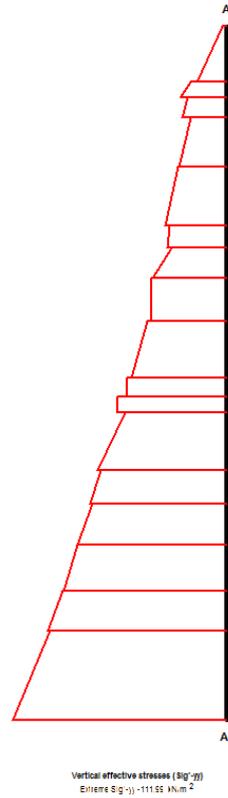
**Tabela 12. Recalques Previstos ao Término de Cada Etapa de Enchimento**

Camadas	Cota Inicial (m)	Recalque (m)	Cota Final (m)
1ª Camada	36,50	0,09	36,41
2ª Camada	38,50	0,22	38,28
3ª Camada	40,50	0,34	40,16
4ª Camada	42,50	0,63	41,87
5ª Camada	44,50	0,90	43,60
6ª Camada	46,50	1,04	45,46
7ª Camada	48,50	1,06	47,44
8ª Camada	50,50	1,31	49,19

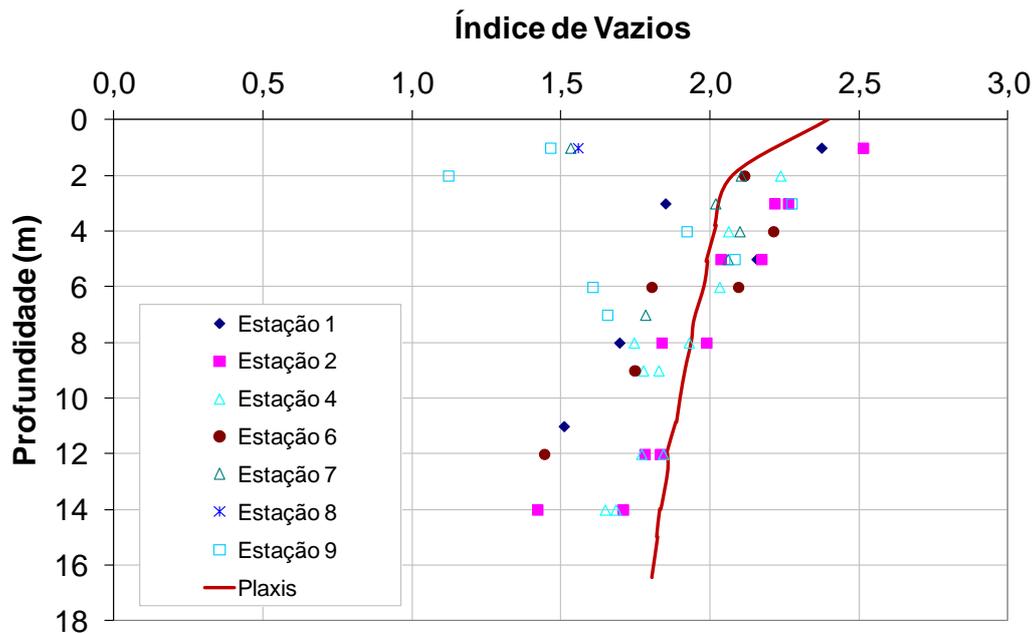
#### 4.2.4. Previsão dos Índices Físicos ao Final do Enchimento

A previsão dos índices físicos foi realizada a partir da distribuição das tensões efetivas verticais ao longo da profundidade do reservatório, fornecida pelo programa (Figura 35). Uma vez conhecidas as tensões efetivas verticais, o índice de vazios é obtido a partir da relação  $e = \ln \sigma'$ , definida em ensaios de adensamento. A Figura 36 compara a distribuição dos índices físicos com a profundidade, prevista numericamente, com a obtida a partir da coleta de

amostras. Observa-se um bom ajuste entre os resultados numéricos e experimentais.



**Figura 35. Distribuição das tensões efetivas verticais previstas com a profundidade**



**Figura 36. Distribuição do índice de vazios com a profundidade: Final do Enchimento**

A Figura 37 e a Figura 38 apresentam, respectivamente, as distribuições de peso específico seco e teor de umidade com a profundidade, que foram estimados pelas expressões:

$$\gamma_d = \frac{G}{1+e} \gamma_w \quad \text{Eq. 6}$$

$$w = \frac{S.e}{G} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde: G = densidade dos grãos = 3,0 (Figura 16).

S = grau de saturação = 100 %.

Tendo em vista a relação entre o índice de vazios e o peso específico seco (Eq 6), espera-se que um bom ajuste em um parâmetro implique em um ajuste também satisfatório do outro. É interessante notar que as distribuições de  $\gamma_d$  e  $w$  previstas numericamente encontram-se de acordo com os resultados das amostras coletadas nas diferentes estações, sugerindo que os modelos e os parâmetros adotados são representativos do comportamento de resíduos, e que o programa é capaz de prever o enchimento de áreas de resíduos.

O teor de sólidos ao final do enchimento também pode ser calculado a partir dos índices físicos, e com base na resposta do programa. O teor de sólidos é definido como:

$$TS = \frac{P_s}{P_t} = \frac{1}{1+w} \quad \text{Eq. 8}$$

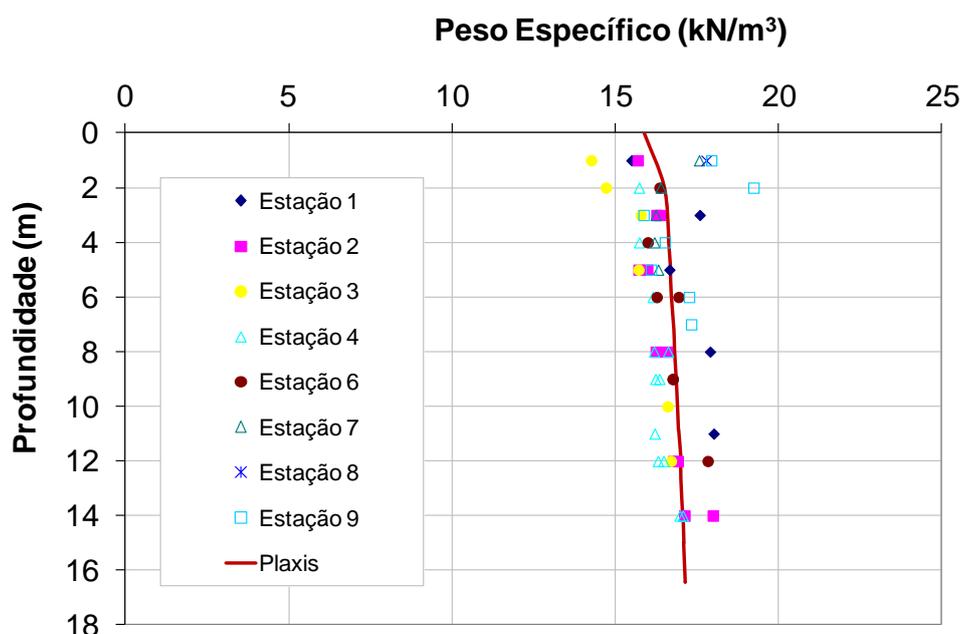
Onde:  $P_s$  = peso dos sólidos

$P_t$  = peso total

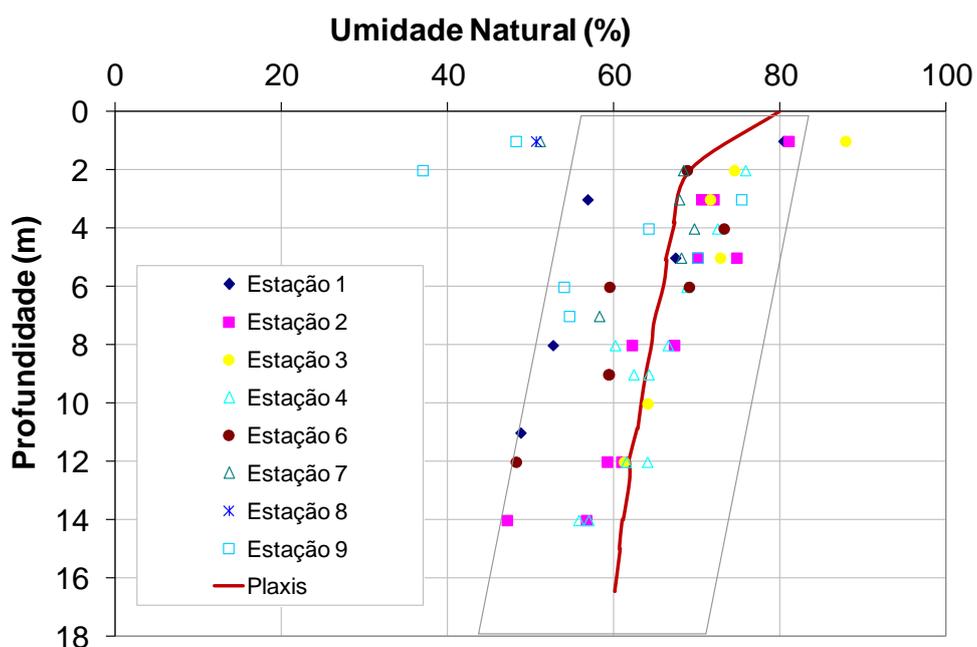
$w$  = teor de umidade

Considerando um valor médio de teor de umidade de 64 % ao final do enchimento, obtém-se um valor médio de teor de sólidos de 61 %.

Diante do exposto, é possível prever os perfis dos índices físicos com a profundidade para diferentes fases do enchimento, bem como a condição do resíduo antes da etapa de alteamento a montante. Nesta fase, os resíduos são lançados em forma de pilha, sobre o resíduo de fundação pré-existente. Portanto, é fundamental o conhecimento dos parâmetros do resíduo de fundação.



**Figura 37. Distribuição do peso específico seco com a profundidade: Final do Enchimento**



**Figura 38. Distribuição do teor de umidade com a profundidade: Final do Enchimento**

#### 4.2.5. Previsão dos Índices Físicos antes da Etapa de Alteamento

A área de resíduos 3 passou a receber resíduos pela técnica de alteamento a montante em Abril de 2007, cerca de 650 dias após o final do enchimento do reservatório.

De forma a obter a distribuição dos índices físicos antes da fase de alteamento, foi introduzido, na etapa de cálculo, um tempo de adensamento de 650 dias, após a fase de enchimento, como mostra a Figura 39.

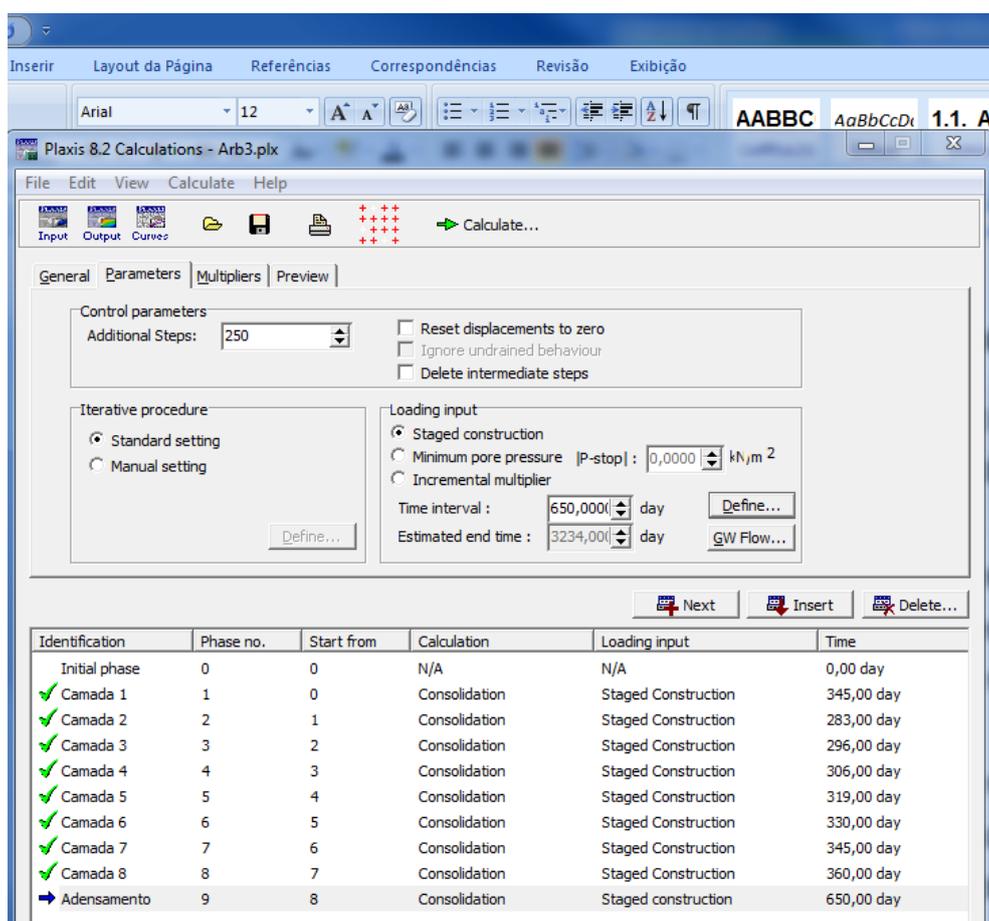
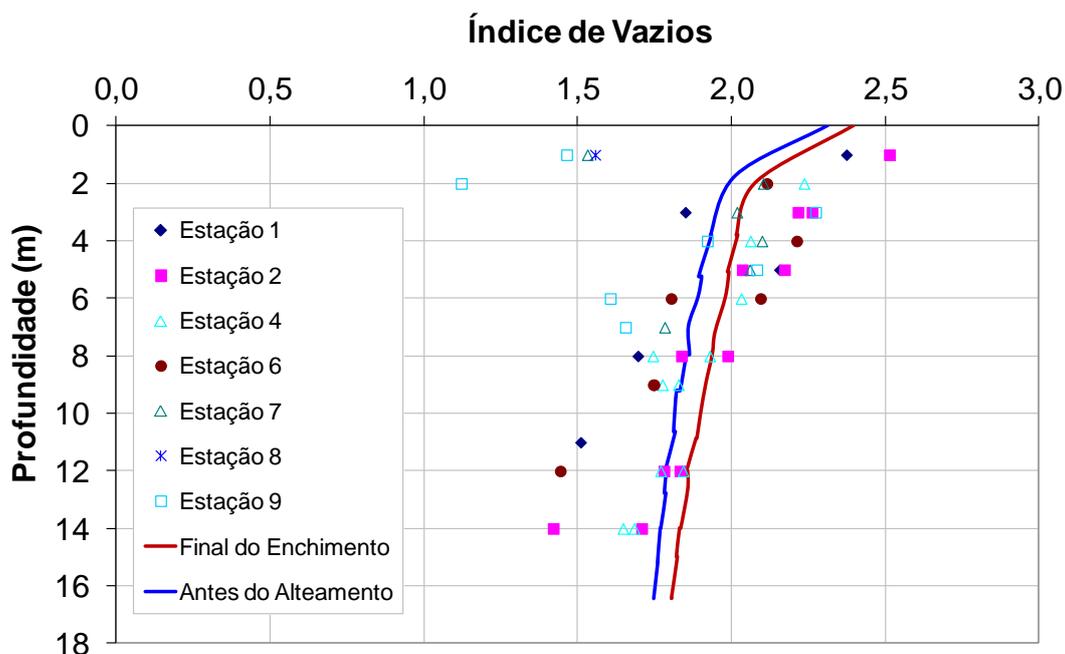


Figura 39. Fases de cálculo: Previsão do comportamento antes da fase de alteamento a montante

A Figura 40 compara a distribuição do índice de vazios com a profundidade no início da fase de alteamento a montante. Pode-se observar que há uma leve redução no índice de vazios, em função da introdução deste tempo de espera de 650 dias. A distribuição e x z é fundamental para a

estimativa dos recalques que ocorrerão no resíduo de fundação, decorrentes da construção da pilha de resíduos.

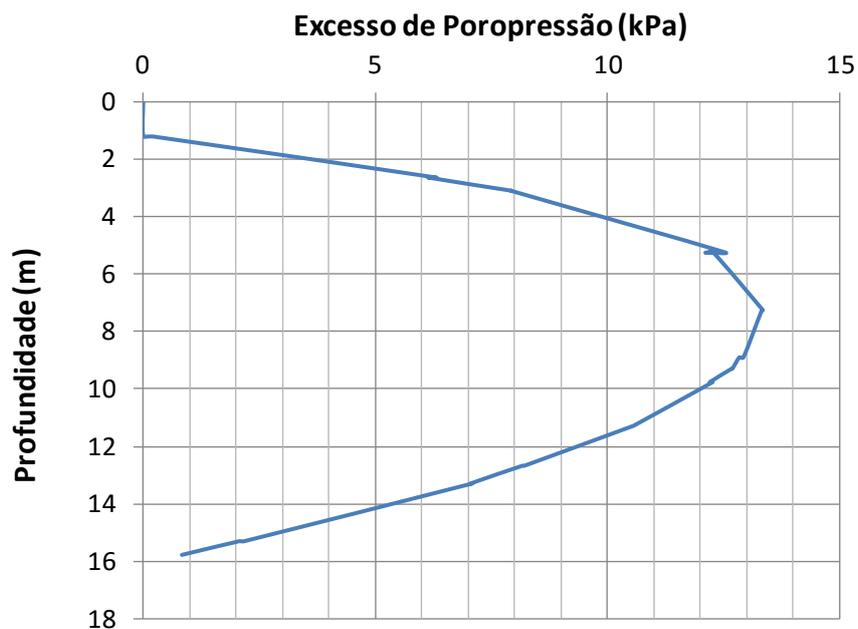
Outro parâmetro importante para a estimativa dos recalques e da resistência do solo de fundação para receber a pilha de alteamento é a distribuição das poropressões antes da etapa de alteamento.



**Figura 40. Distribuição do índice de vazios com a profundidade antes do alteamento**

A Figura 41 mostra a distribuição dos excessos de poropressão antes da etapa de alteamento. Observa-se uma distribuição parabólica de excessos de poropressão, que deve ser considerada na estimativa dos recalques decorrentes da construção da pilha de resíduos.

Em reservatórios de resíduos, os processos de consolidação e dissipação dos excessos de poropressão são, em geral, significativamente acelerados pela presença de drenagem de fundo. Estes fatores introduzem uma complexidade adicional e são usualmente negligenciados nas análises, tornando as soluções existentes conservadoras.



**Figura 41. Distribuição das poropressões antes do alteamento**

Diante do exposto, fica clara a importância de instrumentação das distribuições das poropressões ao longo do tempo de operação de reservatórios de resíduos, principalmente na fase que antecede a operação de alteamento a montante, quando o resíduo de fundação serve de suporte para a pilha de alteamento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusões

A análise do comportamento de áreas de resíduos durante a operação de enchimento consiste em um desafio geotécnico, tendo em vista que os resíduos são lançados em forma de polpa, sofrendo processos de sedimentação e adensamento por peso próprio. A vida útil dos reservatórios depende fundamentalmente do comportamento geotécnico do resíduo, cujas propriedades variam ao longo do tempo e da profundidade.

A presente dissertação teve como objetivo a análise do comportamento de uma área de resíduos de bauxita durante a operação de enchimento do reservatório. Para tanto, foi utilizado o programa Plaxis, que executa análises tensão-deformação pelo método dos elementos finitos.

Como principais conclusões, pode-se destacar:

- O processo de enchimento do reservatório foi satisfatoriamente previsto numericamente. A curva cota x tempo prevista foi compatível com o levantamento batimétrico executado na área, confirmando os modelos e parâmetros adotados;

- A distribuição prevista do índice de vazios com a profundidade mostrou-se compatível com a obtida a partir de coleta de amostras, confirmando que, ao final do enchimento, o índice de vazios reduz com a profundidade. Este fato decorre dos processos de sedimentação e adensamento;

- Os perfis previstos de peso específico e de teor de umidade com a profundidade também se mostraram de acordo com os obtidos em campo. Coerentemente, existe uma tendência de aumento do peso específico e redução do teor de umidade com a profundidade;

- A drenagem de fundo, inserida nas análises numéricas, funcionou satisfatoriamente, fazendo com que o fluxo ocorresse nesta camada, e permitindo o processo de adensamento por peso próprio;

- A distribuição parabólica dos excessos de poropressão com a profundidade foi prevista numericamente;

- A distribuição do índice de vazios antes da etapa de alteamento também foi coerente, mostrando que ocorre uma variação com o tempo, representada por uma redução no índice de vazios.

As análises mostraram que o programa computacional Plaxis foi capaz de reproduzir os processos simultâneos de sedimentação e adensamento por peso próprio, em análises de enchimento de reservatórios de resíduos.

## **5.2. Sugestões para Futuras Pesquisas**

Como sugestões para futuras pesquisas, destacam-se:

- Simulação da etapa de alteamento a montante, partindo dos perfis de índice de vazios, peso específico e poropressões obtidos na simulação do enchimento;

- Comparar a instrumentação das distribuições de poropressões ao longo do tempo de operação de reservatórios de resíduos, principalmente na fase que antecede a operação de alteamento a montante, com os resultados previstos numericamente.

- Analisar a sensibilidade dos parâmetros.

## REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio, sob a coordenação da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da ABAL. Novembro de 2000. Disponível em: <[http://www.abal.org.br/downloads/futuras\\_geracoes\\_2000\\_parte1.pdf](http://www.abal.org.br/downloads/futuras_geracoes_2000_parte1.pdf)>. Acesso em: 6 de abril 2015.

ABRÃO, P, C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil - In SIMP Simpósio de Barragem de Rejeitos e Resíduos Industriais e de Mineração, Anais., V1, p. 2 – 9, 1987.

ALECRIM, J. D. Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais – Publicação da Metamig, 1982.

ÁVILA, J. P.; SOARES, R. e COSTA, L. H. D. Deposição de rejeitos finos pelo método de secagem - III SIMP. BARRAG. REJ.E DE DISP. DE RES. REGEO – Anais... Ouro Preto, MG, vol 01: 97-108, 1995.

AZEVEDO, R. F. de: Ensaio de Adensamento em Resíduos de Bauxita. Consultoria; Determinação da compressibilidade e permeabilidade; 1; 0; Restrita; Companhia Vale do Rio Doce; BRASIL, 2003.

BALIGH, M. M., LEVADOUX, J. N. “Consolidation after undrained piezocone penetration”: I - Prediction. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 112, nº. 7, pp. 707-725, 1986.

BEDIN, J. Interpretação de Ensaio de Piezocone em Resíduos de Bauxita. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 150p, 2006.

BEDIN, J; SCHNAID, F.; COSTA FILHO, L. M. Estudo das propriedades geotécnicas de resíduos de bauxita através de ensaios de laboratório. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais... Búzios, 2008b.

BIOT, M. General Theory of Three-Dimensional Consolidation - Journal of Applied Physics, vol. 12, 1941.

BRINKGREVE, R.B.J. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. PLAXIS -2D user's manual. Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2002.

BURLAND, J.B. Deformation of soft clays. PhD thesis, Cambridge University, 1967.

CAMPOS, T. M. P. Geotecnia e Meio Ambiente: Relato do Estado da Arte. In VIII COBRAMSEF. Porto Alegre, p. 123 – 157, 1986.

ELIAS, D. C. Geotechnical Properties of Bauxite Residue and Their Use in Planning Disposal Facilities. In LIGHT METALS ANNUAL MEETING, pp 149-164, 1995.

FAHEY, M., NEWSON, T.A. & FUJIYASU, Y. Engineering with tailings. Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, V.2, p. 947-973, 2002.

FORTES, GUSTAVO MATTOS. Obtenção e caracterização de cimentos sulfobelíticos sintetizados a partir do resíduo de bauxita. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. 158p, 2013.

GARCIA, M. C. S. Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo Bayer por tratamento térmico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 102p, 2012.

GAUER, E A. Estudo da compressibilidade e da condutividade hidráulica de resíduos de mineração de bauxita. 2007. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GAUER, E A. Influência da velocidade de rotação da mini-palhetas na resistência de um solo siltoso. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

GOMES, R.C., ARAÚJO, L.G., FILHO, W.L. “Concepção e Projeto Básico da Disposição em Pilhas de Rejeitos de Minério de Ferro em Cava Exaurida de Mineração”. In: 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, pp. 161-168, São José dos Campos, 1988.

HABASHI, F. A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, n.79, pp. 15-22, 2005.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, S. C., "The surface chemistry of Bayer process solids: a review", *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, n. 146, pp.359-374, 1999.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração - 7ª Edição do Sistema de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. Disponível em <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>> Acesso em 18 de maio de 2015.

JAMIOLKOWSKI, M., LADD, C.C., GERMAINE, J.T., LANCELLOTTA, R. "New Development In Field And Laboratory Testing Of Soils", *Proc Of The XI Int. Conf. On Soil Mech. And Found Eng.*, Vol. 1 pp. 57-153, 1985.

KRAUSKÓPF K.B., *Dissolution and Precipitation of Silica at Low Temperatures. Sílica. Geochim. Cosmochim. Acta.* 10,1-26, 1982.

LIMA, JULIANO DE. Simulação Numérica do Processo de Alçamento de Áreas de Deposição de Resíduos pelo Método a Montante. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro. 118p, 2008.

MANASSERO, M.; PASQUALINI, E., VEGGI, S. Stability of compacted clay liners at landfill sidewalls. In: XII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, New Delhi. Proceedings... v.4, 6v, p.1587-1590, 1994.

MÁRTIRES, R. A. C. Balanço Mineral Brasileiro 2001. Alumínio. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/balanco-mineral-brasileiro-2001-aluminio.pdf>>. Acesso em: 6 abril 2015.

MASSAD, F. *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos Editora. 2003.

MASO, Isabelle A. Dal. USP e UFSCAR pesquisam uso de resíduos de bauxita no cimento Portland. *Revista Técnica*. 13 janeiro 2014. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/noticias/usp-e-ufscar-pesquisam-uso-de-residuos-de-bauxita-no-304306-1.aspx>>. Acesso em: 6 abril 2015.

MITCHELL, J.K. & GARDNER, W.S. In situ measurement of volume change characteristics. State of the art report, Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, North Carolina State University, Raleigh. 1975.

NAKAO, J.; MORE, R.T.; OLIVEIRA, H.G. Canga, Itabirito e Solo Saprolítico de Filito na Barragem de Retenção de Rejeitos de Águas Claras. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 4. Belo Horizonte. Anais. São Paulo, ABGE, v. 1, pp.288-309, Belo Horizonte, MG, 1984.

OLIVEIRA, H. M. Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura, tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2006.

PACHECO, M., LIMA, L. S. A., 1996, "Um critério estatístico para a interpretação de ensaios geotécnicos", Solos e Rochas, São Paulo, Brasil.

PENNA, L. R. Estudo da Construção de Aterros em Depósitos Estratificados de Rejeitos de Mineração. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Mineração em Engenharia Mineral – PPGEM. Departamento de Engenharia Mineral. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto.

POTTS, D., ZDRAVKOVIC, L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. Thomas Telford Books.London. ISBN: 0727727834. 1999.

QUARESMA, A. R.; DECOURT, L.;QUARESMA FILHO, A. R.; ALMEIDA,M. S. S.; DANZIGER, F. Investigações geotécnicas In Hachich, W.; Falconi, F.; Saes. J.; Frota, R.; Carvalho, C.; Sussumu (Coordenadores), Fundações: teoria e prática. São Paulo, Editora PINI, Cap. 3, p. 119-162, 1996.

ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R.G. Interpretation of cone penetrometer test, Part I: Sand. Canadian Geotechnical Journal, v. 20, n. 4, p. 718-733, 1983.

ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R.G., Gillespie, D.J. e Grieg, J. Use of Piezometer Cone Data, Proceedings of In-Situ' 86, ASCE, Geotechnical Special Publication, No 6, p.1263-1280, 1986.

SANTOS, P. S. - Ciência e Tecnologia das Argilas - V1, 2a ed., Ed. Edgard Blücher Ltda, 2000.

SCHNAID, F. Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. Editora Oficina de Textos. 189p, 2000.

SOARES, J. M. D. Identificação das Características Geotécnicas de Solos e Rochas Sedimentares da Região de Santa Maria - RS (2ª fase). 1997.

SOMOGYI, F. & GRAY, D. Engineering Properties Affecting Disposal of Red Muds. In CONF. ON GEOTECHNICAL PRACTICE FOR DISPOSAL OF SOLID WASTES MATERIALS, Proc... ASCE, Michigan, p. 1-22, 1977.

SOUZA PINTO, C. Curso básico de mecânica dos solos. 2ª ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2002.

SPANNENBERG, M. G. Caracterização geotécnica de um depósito de argila mole da Baixada Fluminense. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica da Rio de Janeiro. 2003.

STINSON, J. M. Correlation of red mud consolidation with its soil properties. In LIGHT METALS, 110TH AIME ANNUAL MEETING, Proc... Chicago, Illinois.1981.

USGS – U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2012.

VICK, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

VILLAR, L.H.A. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 461p, 2002.