

1

Apresentação do Problema e da Organização do Trabalho

1.1

Importância e Aplicabilidade do Estudo

Este estudo surgiu da constatação de que o crescente avanço tecnológico mundial vem cobrando um alto preço ambiental ao exigir uma exploração cada vez mais intensa de recursos minerais do Planeta. Esta necessidade ávida de matéria prima tem levado à utilização de jazidas que uma vez foram consideradas inviáveis economicamente para exploração, pôr apresentarem teores minerais baixos em relação a tantas outras antes disponíveis. A necessidade do uso destas jazidas promoveu acentuada elevação no custo de exploração e produção mineral e industrial. Mais ainda, levou a uma maior geração de resíduos e subprodutos decorrentes da transformação desta matéria prima.

Os problemas de ordem prática decorrentes da exploração mineral contínua também cresceram muito, principalmente com o advento da "consciência ecológica", fazendo com que autoridades e população estejam mais atentas sobre as atividades das empresas exploradoras. Tornou-se necessário que o manuseio e a estocagem destas "sobras" fossem efetuados combinando tanto as ambições de preservação dos ambientalistas como as econômicas das mineradoras e indústrias, e tudo isso sem que fossem esquecidos os princípios básicos e éticos da Engenharia. E como conseqüência, o estudo do comportamento e disposição dos rejeitos da exploração e processamento de minerais vem recebendo cada vez mais verbas das empresas e atenção de toda a sociedade, que anseia cada vez mais pôr práticas menos agressivas e seguras.

A diminuição geral no número de áreas para disposição de resíduos, juntamente com a implementação desta legislação mais rígida no aspecto ecológico, tem criado a necessidade do aproveitamento máximo tanto das áreas de contenção já existentes como as que ainda estão em planejamento. O objetivo é operar e manusear os reservatórios de maneira a reduzir ao máximo a elevação do material depositado, aumentando o volume que pode ser estocado e, como consequência, a vida útil destes depósitos. Assim, o número de regiões exigidas no futuro será minimizado, reduzindo o impacto ambiental.

Atualmente, no Brasil, a técnica de disposição para resíduos de mineração e processamento de bauxita mais utilizada é a disposição via úmida, na qual os rejeitos são diluídos em água de lavagem ou substâncias químicas utilizadas no processamento e, então, conduzidos por bombeamento a lagos formados por diques ou barragens. Como estes resíduos geralmente apresentam baixa taxa de adensamento, várias técnicas são utilizadas na tentativa de acelerar este processo de deposição. E são estas técnicas que irão condicionar o comportamento final do reservatório. Dentre outros procedimentos, é comum, por exemplo, o uso de floculantes e a mistura de areia aos rejeitos.

Já que o Brasil possui uma alta incidência de raios solares, uma das técnicas mais promissoras a se utilizar com o intuito de obter uma diminuição do volume final de produto estocado seria a sua exposição ao ressecamento solar durante todas as etapas do armazenamento. Em geral, os resíduos de mineração depositados por via úmida apresentam uma grande contração volumétrica quando submetidos a este processo, o que aumentaria a capacidade de estocagem do reservatório. Isto é desejável não só economicamente mas também sob o ponto de vista ecológico, já que exigirá menor área e movimento de terra para a construção de novos reservatórios de disposição, diminuindo a agressão ao meio ambiente. A retirada de água por ressecamento aumenta a densidade e a resistência ao cisalhamento do solo, reduzindo a sua compressibilidade. Isto além de promover a otimização do reservatório no tocante a capacidade de estocagem, a longo prazo permite que sua reabilitação possa ser feita imediatamente após o término de sua vida útil (*Kerr & Colombera, 1992*). Na prática, este processo de armazenamento via seco já vem sendo aplicado em muitos países (por exemplo, *Chandler, 1988*).

Para a previsão das propriedades de rejeitos depositados via úmida, utiliza-se muito modelos de adensamento saturado com grandes deformações, como os de Gibson et al. (1981); Schiffman et al. (1984); Pane (1985), dentre muitos. Estes modelos foram muito testados e já tiveram suas previsões bem confirmadas pelo acompanhamento sistemático de muitos reservatórios.

No caso da previsão para os resíduos depositados para serem expostos a secagem, as soluções analíticas das equações governando o processo de adensamento - ressecamento são normalmente complexas, devido a natureza altamente não linear de seus coeficientes (*Cargill, 1985*). Por isso, é comum tentar utilizar os modelos de adensamento saturado à grandes deformações para a previsão das propriedades do material depositado via seco. Porém, se eles têm se mostrado adequados para a deposição subaquática, o mesmo não ocorre no caso onde os resíduos são permitidos ressecar em camadas finas após a deposição (*Rollings, 1994*).

A Figura 1.1 compara as previsões feitas através de teorias de adensamento que não consideram os efeitos de ressecamento e as medições de campo realizadas em uma área de disposição de resíduos regularmente exposta a secagem. Como pode ser percebido dos resultados, é grande a discrepância da previsão teórica em relação ao comportamento real. E é devido a esta discrepância é que se tem procurado desenvolver métodos que considerem adequadamente o efeito provocado pelo ressecamento solar no comportamento de rejeitos depositados sob forma de lama. É provável não se tenha maior aceitação da técnica de exposição dos resíduos à secagem devido justamente a pouca confiabilidade nas respostas dos métodos de previsão até então empregados.

Para chegar a um melhor modelo que descreva o comportamento e a vida útil de reservatórios de resíduos expostos ao ressecamento solar, tentativas têm sido feitas através da mistura de métodos de estimativa de cálculo de perda de água por evaporação com os de cálculo de recalques pela teoria de adensamento a grandes deformações. Dentre os trabalhos que seguem esta linha, pode-se citar os de Sparrow (1981), Cargill (1985), Cooling (1985), Swarbrick & Fell (1992), Richards (1992), Abu-Hejlen & Znidarcic (1995).

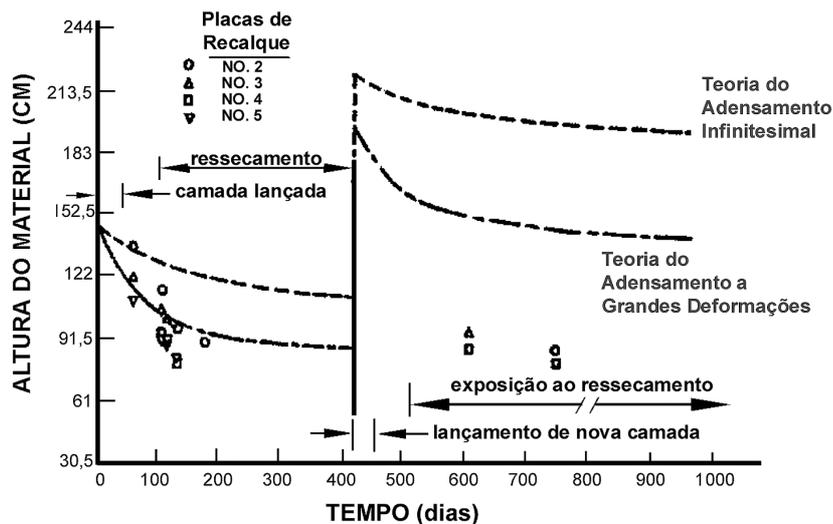


FIGURA 1.1: Alturas Medidas e Previstas de Resíduos em Uma Área de Deposição (adaptado de Cargill, 1985)

No caso dos resíduos de processamento de bauxita, a técnica que permite a secagem dos resíduos teve um desenvolvimento significativo nos anos 80. No Brasil, ela tem sido experimentada em resíduos de lavagem de bauxita, com resultados promissores (Ávila et al., 1995). Experiências com resíduos de outros minerais em várias partes do mundo também tem sido relatadas, como por exemplo, em Knight & Haile (1983); Swarbrick (1992) e Fahey & Fujiyasu (1994).

Indústrias de exploração mineral, como as de bauxita, vêm tentando constantemente melhorar a eficiência de produção, mas esbarram nas milhões de toneladas de resíduos semi-sólidos ou outros subprodutos. Para cada tonelada de alumina produzida, obtém-se em média uma tonelada de rejeito seco, chegando-se a duas toneladas dependendo da composição químico-mineralógica da rocha de origem (Cooling, 1989). Estes números dão uma idéia da dimensão do problema enfrentado pelas produtoras de alumínio com o armazenamento destes resíduos. Só de bauxita, havia até o final da década de 80, um bilhão de toneladas de resíduo seco oriundos só de seu processamento para a obtenção da alumina. Ou seja, este é o volume sem computar os advindos das sobras das etapas de mineração, com uma tendência de crescimento de 4% ao ano (Sousa, 1995).

A fase líquida destes resíduos pode conter um volume considerável de produtos tóxicos, prejudiciais ao meio ambiente. E a preocupação ambientalista

vêm exigindo que a estocagem dos rejeitos sejam efetuadas sob um maior controle, com considerações sobre a estabilidade físico-química a longo prazo dos depósitos. A técnica que permite a secagem destes subprodutos é que melhor tem atendido a estas exigências (Rollings, 1994). Por todos estes motivos, é que ela está ganhando considerável preferência sobre o método de disposição convencional feita em lagos.

Portanto, devido ao exposto, fica evidente que existe uma procura por métodos ou informações mais precisos que conduzam a previsões mais realistas das propriedades de resíduos dispostos pela técnica de secagem (Swarbrick, 1994). Várias tentativas tem sido feitas para modelar a perda de umidade de um depósito formado por camadas depositadas sucessivamente ao longo do tempo, perdas estas tanto devido a drenagem como a fluxo evaporativo. Muitos começaram estudando aterros dragados (p. ex., Cargill, 1985), mas alguns modelos foram desenvolvidos já com base em observações de comportamento de resíduos de processamento e de mineração, como os de Sparrow e outros (1982), Cooling (1985), Swarbrick & Fell (1992), Abu-Hejlen & Znidarcic (1995).

A formação de uma crosta de ressecamento tem sido documentada, estudada e modelada empiricamente, mas o mecanismo de formação desta crosta não tem recebido muita atenção (Rollings, 1994). No presente, não está claro como melhor incorporar os efeitos de fissuramento no modelo de adensamento unidimensional. Por todos esses motivos, acredita-se que o fornecimento de novos dados sobre o comportamento de um solo mole submetido à secagem pode vir a contribuir no desenvolvimento de métodos mais realistas para a previsão de seu comportamento.

1.2

A Técnica de “Dry – Stacking” ou Empilhamento a Seco

Muitas empresas de mineração e processamento vem utilizando esta técnica em várias partes do mundo, com algumas variações. Mesmo no caso de disposição via úmida, quando do momento da reabilitação da área utilizada como

depósito, é procedimento rotineiro colocar um capeamento para receber a cobertura vegetal que irá revestir o reservatório. Para tanto, já é comum permitir o desenvolvimento de uma crosta superficial ressecada, decorrente da exposição solar, para suportar trabalhadores e equipamentos (*Carrier e Bromwell, 1983*). Isto ressalta ainda mais a necessidade do estudo dos processos e efeitos do ressecamento no comportamento dos resíduos.

Elias (1995) descreve algumas alternativas que têm sido empregadas na Austrália. Uma delas foi desenvolvida para aumentar a vida útil de áreas de disposição já esgotadas, onde os resíduos foram lançados sob a forma de lama. É colocada uma camada de areia sobre esta área, com a instalação de drenos no seu interior. Diques são construídos ao redor do perímetro e resíduo seco (espessado) é descarregado dentro deste local, em camadas aproximadas de 1,0 metro de espessura. Estas camadas são deixadas secar ainda mais, sendo permitido o fissuramento para acelerar a drenagem daquelas lançadas posteriormente. Dependendo da disponibilidade de resíduo arenoso no local, novas camadas drenantes podem ser construídas sobre o resíduo ressecado antes de um novo lançamento. Uma outra técnica utilizada é fazer o lançamento de resíduos secos desde o início da vida útil do reservatório. A Figura 1.2 mostra um esquema genérico destas técnicas.

Para o espessamento do resíduo antes de seu lançamento definitivo nas áreas de secagem, é comum o uso de grandes espessadores ou adicionar flocculantes a eles. Também é praxe lançá-los em reservatórios ou tanques para que adensem por peso próprio durante algum período para aumentar o teor de concentração de partículas sólidas antes da exposição ao ressecamento. Uma demonstração da eficiência desta técnica dos resíduos pode ser encontrada em Ávila et al. (1995), que relatam uma variação de teor de sólidos de 12% para um valor acima de 50% (o equivalente a variação de teor de umidade gravimétrico de mais de 700% para menos de 100%) em lamas de lavagem de bauxita. O mesmo efeito também pode ser conseguido com o lançamento do rejeito em camadas de no máximo 20 cm em áreas inclinadas, que podem facilitar o escoamento do excesso de líquido enquanto o vai expondo ao ressecamento. Depois de atingirem um baixo teor de umidade, este material é removido para os locais definitivos de disposição, (Chandler, 1988).

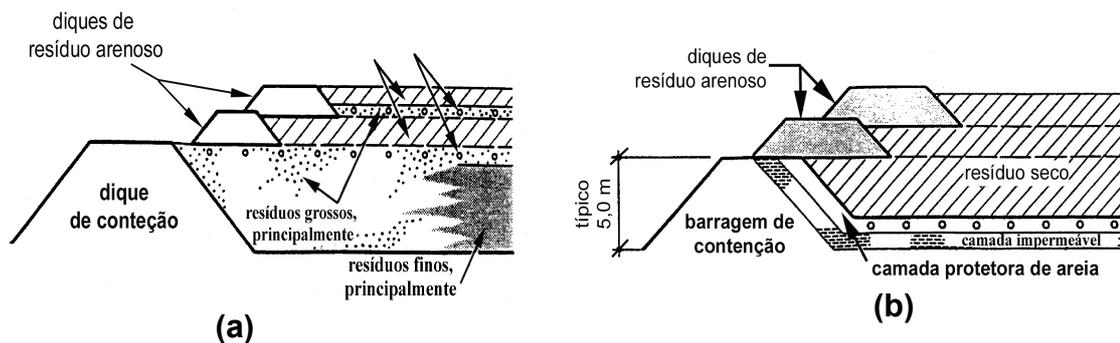


FIGURA 1.2: Disposição a seco: a) sobre resíduo úmido previamente depositado e b) com drenagem na base (*adaptado de Elias, 1995*)

1.3

Apresentação do Problema

O que se pretende agora é ressaltar quais são os processos ou etapas que os resíduos depositados e expostos ao ressecamento experimentam, para assim identificar quais são os parâmetros que devem ser obtidos para a melhor descrição de seu comportamento. Pretende-se, também, procurar fazer a simulação destes mesmos processos em laboratório com boa relação custo-benefício.

Já foi dito que é comum que rejeitos tais como os de mineração sejam produzidos e removidos para o local de estocagem através de processos “úmidos”, ou seja, sob forma de lama. Um projeto bem controlado para a disposição de resíduos nesta forma envolve informações não só sobre sedimentação inicial e adensamento por peso próprio sob várias condições de contorno, mas também sobre a formação de crosta superficial devido a efeitos combinados de rebaixamento do nível de água e de ressecamento devido a exposições esporádicas dos resíduos ao ar livre (Fahley & Fujiyasu, 1994).

Devido às características da forma de transporte e estocagem analisada, via úmida e deposição em diques ou barragens, os grãos de rejeito mantém sempre uma baixa concentração de sólidos. Isto, junto à sua granulometria, geralmente

fina, os levam a passar invariavelmente pelos processos de sedimentação e de consolidação para a formação do novo tipo de solo. Uma seqüência da formação das camadas pode ser de acordo com o modelo proposto por Imai (1981) (ver a Figura 1.3).

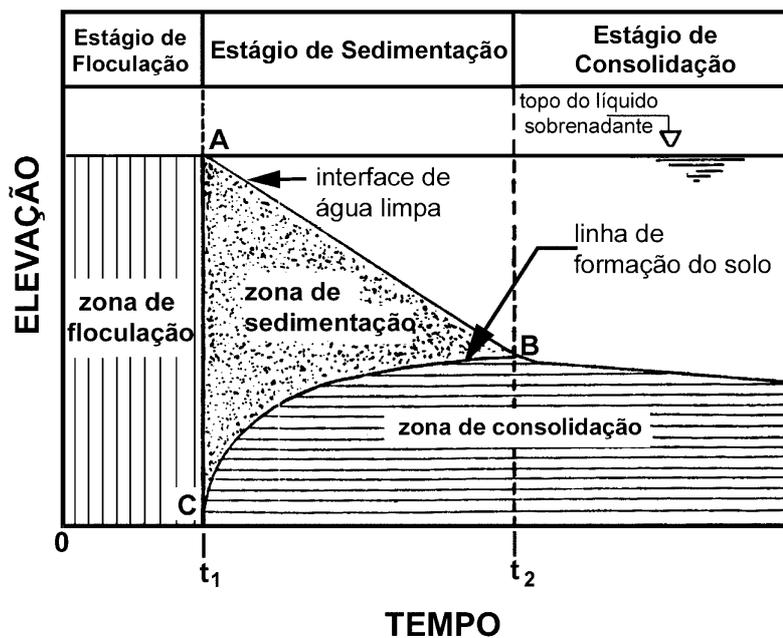


FIGURA 1.3: Seqüência de Formação de Camada de Solo Após Lançamento em Dique ou Reservatório de Contenção (*adaptado de Imai, 1981*)

O processo de consolidação vai avançando com o acréscimo de cargas devido ao lançamento de novas camadas de resíduos. As teorias que lidam com este processo o fazem em função do conjunto parte sólida mais líquida, ao contrário das teorias de sedimentação, que são formuladas, na sua maioria, com base na continuidade da fase líquida, admitindo a conservação da massa de sólidos. Os solos muito moles, como os formados pela deposição de rejeitos saturados, apresentam deformações consideráveis mesmo devido ao seu peso próprio. Isto levou ao desenvolvimento de teorias de consolidação com grandes deformações e que também consideram as mudanças na compressibilidade e permeabilidade durante o processo, tanto devido a efeitos de drenagem ou a sobrecargas adicionais.

Os efeitos do ressecamento solar não podem ser previstos por uma teoria convencional de adensamento a grandes deformações. Devido a isto, Swarbrick (1995), dentre outros, propôs uma teoria de adensamento para meios não saturados submetidos à grandes deformações que considera o efeito do ressecamento. Ela é baseada na formulação de adensamento a grandes deformações para solos saturados, estendida para incluir os efeitos da saturação parcial pela incorporação da equação de Richards para fluxo não saturado. O autor a considerou adequada para a análise de reservatórios de disposição de resíduos em forma de lama.

Para um esquema bem projetado de áreas de deposição, é importante a previsão dos recalques devidos não só ao adensamento, mas também devido ao ressecamento. Com a exposição ao ressecamento solar, o líquido superficial é eliminado de modo que o material possa secar, o que provocará maiores deformações devido a sua contração. A camada ressecada e extensivamente fissurada aumenta também a magnitude e a velocidade da consolidação dos rejeitos localizados em maiores profundidades. E o problema passa a ser, então, determinar este recalque não só como função do tempo e efeitos de deformação por peso próprio, mas também considerando a formação da crosta devido à secagem e à sobrecarga adicional que ela provoca.

O problema a ser estudado é na verdade uma complementação do apresentado na Figura 1.3. Com o material tendo depositado e o líquido sobrenadante evaporado, tem-se o solo exposto ao ressecamento em uma situação mais ou menos como a representada pela Figura 1.4. Por esta ilustração, percebe-se o balanço hídrico que deve ser previsto pela modelagem numérica, além dos vários estágios a que o solo pode ser submetido e que podem ocorrer até simultaneamente. Percebe-se que, enquanto em uma profundidade ele não é mais saturado, em outra ele pode ainda estar adensando com elevado teor de umidade.

Quando camadas sucessivas de sedimentos transportados hidraulicamente são depositados periodicamente dentro de uma área de contenção, pode ocorrer um processo de adensamento e ressecamento simultaneamente. Cada período de tempo durante o qual os sedimentos são depositados pode ser chamado de um ciclo, e a espessura incremental da camada no fim de cada ciclo sendo

proporcional à quantidade de sólidos lançada. Ao final de cada ciclo, existirá na área de contenção uma camada completamente saturada. Após um certo período, o líquido sobrenadante evapora e o topo da camada começa a ressecar. Este ressecamento, junto a vazamentos e drenagens existentes no reservatório, promove o rebaixamento do NA, elevando o peso do sedimento que compõe a camada, devido à perda da submersão e provocando a diminuição da sua espessura. Este processo de ressecamento, drenagem e adensamento continua até o início do próximo ciclo, quando a região é novamente inundada.

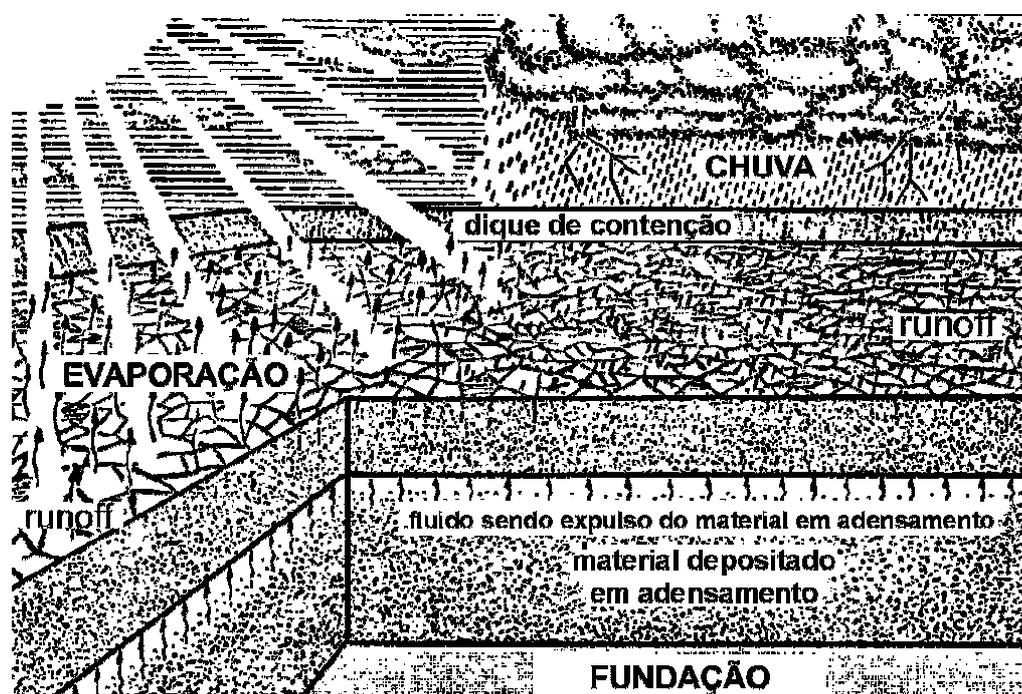


FIGURA 1.4: Balanço Hídrico de um Elemento de Solo de uma Área de Grande Extensão para Deposição de Resíduos (*adaptado de Cargill, 1985*).

Durante o segundo ciclo, uma camada adicional é lançada. Se este processo de lançamento é relativamente contínuo, pode ser assumido que a espessura da camada aumentará linearmente e a taxa de elevação da pressão nas camadas depositadas anteriormente será aproximadamente constante (*Casteleiro et al., 1981*). A localização da interface entre as zonas saturadas e não saturadas está sempre se movendo, dificultando a descrição matemática da situação, principalmente devido ao desconhecimento da posição do NA com o tempo,

influência das condições meteorológicas e pouca informação sobre o comportamento não saturado.

A evaporação é um fenômeno que precisa ser bem estudado para o bom entendimento deste problema. Ele é o processo pelo qual água é convertida de líquido para vapor pela aplicação de energia. A evaporação pode ocorrer à partir da superfície de um solo úmido, em taxas próximas às de reservatórios de água livre. Por isso, é de se esperar que os métodos desenvolvidos para a estimativa de taxas evaporativas destes reservatórios de água livre sejam aplicáveis na análise da vaporização de líquidos à partir de solos, com as devidas correções.

1.4

Linha de Pesquisa da Puc-Rio em Disposição de Resíduos

O Departamento de Engenharia da PUC-Rio vem mantendo uma linha de pesquisa na área de disposição de resíduos minerais e industriais desde 1987. Várias dissertações e teses já foram concluídas, entre elas:

- ⇨ **Pinto (1988)**: desenvolveu um programa para adensamento a grandes deformações, a partir da formulação de Gibson e outros (1967), utilizando o método das diferenças finitas. Posteriormente, este programa foi melhorado por Azevedo & Sato (1990) para simular o enchimento de lagos de armazenagem. No programa de Pinto (1988), a espessura de sólidos era admitida constante e a adaptação permitiu estudar camadas que sofrem acréscimos de material com o tempo.
- ⇨ **Abreu (1989)**: elaborou um programa que resolve a equação de sedimentação de Kynch (1952) pelo Método das Características. Ele utilizou de ensaios convencionais de sedimentação para a calibração e obtenção de dados de entrada.
- ⇨ **Villar (1990)**: trabalhou no desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios de campo em lamas. Apresenta resultados de testes em rejeitos de processamento de bauxita da região de Ouro Preto, MG.

- ⇒ **Guimarães (1990)**: desenvolveu um edômetro de lama que permite ensaios de adensamento com deformação controlada. Fez aplicação na lama de mesma origem da usada por Villar (1990).
- ⇒ **Alves (1992)**: fez a modelagem numérica acoplando sedimentação e adensamento, validando o modelo através de ensaios especiais de laboratório executados na Universidade de Oxford, Inglaterra, obtendo, assim, características de deformação e permeabilidade. O material utilizado nestes ensaios é de mesma procedência dos dois últimos trabalhos citados.

1.5

Objetivos desta Pesquisa

A meta básica deste trabalho é trazer avanços para a área de pesquisa sobre a disposição de resíduos da indústria e mineração depositados sob forma de lama. A proposta é investigar metodologias que forneçam informações sobre o comportamento deste material quando submetidos a secagem, e buscar, assim, um melhor entendimento de alguns efeitos provocados pela variação do teor de umidade tais como os processos de contração e de perda de saturação. Devido a esta investigação, estes efeitos da exposição ao ressecamento poderão ser incorporados e considerados aos modelos de previsão do ciclo de vida útil dos depósitos, e que usualmente só consideram as variações de volume devido ao peso próprio e acréscimos de carga admitindo o material saturado, como é o caso do apresentado por Alves (1992). E isso feito, as análises à partir destes modelos vão fornecer previsões mais realistas do período de capacidade de armazenamento e das características finais dos reservatórios de armazenamento, dados importantes para executar projetos mais racionais de sua recuperação e reintegração ao meio ambiente, uma exigência legal.

O que se buscará ao longo deste estudo é estabelecer técnicas de coleta e interpretação de dados que descrevam o processo de transição da fase saturada para a não saturada de lamas de lavagem e processamento de bauxita de diversos locais, com o auxílio de ensaios de campo e laboratório. Será estudada a

metodologia de ensaios já existentes, mas agora aplicados a este material não usual, e sugeridas as adaptações consideradas necessárias, tanto ao equipamento em questão como na forma de interpretação.

Como se trata de um problema muito complexo, envolvendo muitas variáveis, apenas um primeiro ciclo será analisado. Este primeiro ciclo consiste em estudar o comportamento de uma única camada de resíduo que adensa ao mesmo tempo sob efeito do seu peso próprio e de ressecamento solar. As conseqüências provocadas pelo lançamento de mais rejeitos não serão investigadas, ou seja o volume de sólidos será admitido constante ao longo do tempo. Também não serão verificados os efeitos de infiltração provocados pelas águas de chuvas e/ou mais soro ou qualquer outro líquido do reservatório. Isso significa que será seguida uma trajetória única de secagem. Durante o processo, a influência do vento também será desprezada.

A escolha de resíduos de mineração e/ou processamento de bauxita, de onde se obtém o alumínio, vem do fato de que em todas as pesquisas da Puc-Rio citadas anteriormente, com exceção do trabalho de Pinto (1988), estes materiais já foram estudados. Ou seja, já existe um grande volume de informações a seu respeito. Além deste motivo, existem duas outras razões para esta escolha. Primeiro, devido ao grande volume destes resíduos que são produzidos anualmente, justificando grandes investimentos das produtoras em seu estudo, com possibilidade de aplicação imediata dos resultados. O outro fator relevante é a existência aqui no Brasil de grandes jazidas deste minério e também de empresas exploradoras e produtoras de alumínio poderosas. Elas já forneceram, e poderão continuar a fornecer, farto material para a pesquisa, bem como auxiliar na redução dos custos do projeto.

Foram utilizados cinco tipos de resíduos diferentes. Um, é constituído pelos rejeitos de lavagem de bauxita de uma mina localizada no estado do Pará, sendo composto somente de grãos sólidos e água. O segundo tipo é o resultado do processamento deste primeiro material, realizado por uma empresa do Maranhão, e será aqui denominado de *lama vermelha SL*. Os outros dois são rejeitos de processamento de bauxitas de duas regiões diferentes do estado de Minas Gerais: um da região de Poços de Caldas, chamado de *lama vermelha PC*, e o outro, da

região de Ouro Preto, batizado de *lama vermelha OP neutralizada*. Este último material é que foi utilizado nos estudos anteriores realizados na PUC-Rio.

Esta lama vermelha OP neutralizada leva esse nome por experimentar um processo de neutralização de seu pH através da adição de ácido sulfúrico, o que lhe confere um comportamento presumivelmente diferenciado das demais. Para estudo da influência desta mistura de ácido, o resíduo antes da neutralização, em uma constituição aparentemente mais próxima das lama vermelha SL e lama vermelha PC, também foi analisado. Este quinto material passou a ser denominado de *lama vermelha OP não neutralizada*. Na verdade, o enfoque principal da pesquisa ficou mais restrito exatamente a estas duas lamas provenientes da região de Ouro Preto, devido à sua maior disponibilidade.

Todas estas lamas vermelhas são basicamente originárias do mesmo tipo de processamento, apesar de oriundas de empresas diferentes. Mesmo assim, têm-se observado que alterações aparentemente insignificantes em algumas destas etapas de transformação da matéria prima podem ser as responsáveis por alguns comportamentos diferenciados que elas eventualmente apresentam. A verificação da variação do comportamento do resíduo em função da sua forma de obtenção também constitui uma das etapas desta pesquisa. Isto pôde ser feito através da comparação entre o macro comportamento das diferentes lamas e a sua análise micro-estrutural, via ensaios de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

Resumindo, o que realmente há é uma vontade em contribuir para a implementação da técnica de empilhamento a seco a resíduos finos, tornando-a uma prática mais rotineira no país. Essa vontade vem do fato desta metodologia de disposição ser considerada mais amigável ao meio ambiente que outras técnicas de uso mais freqüente no país, como a disposição sob a forma de lama. Para atingir esse objetivo, dois pontos básicos foram julgados necessários: a) um melhor entendimento do mecanismo do ressecamento deste material e, b) o estabelecimento de formas simples e economicamente viáveis para a determinação de parâmetros para os modelos de previsão de vida útil de reservatórios de disposição.

Resultados preliminares desta pesquisa já foram apresentados também em, dentre outros, Villar et al. (1997); de Campos et al. (1998); Villar et al. (1998) e Villar & de Campos (1999), Villar & de Campos (2000), Villar & de Campos (2001) e Villar & de Campos (2002).

1.6

Organização do Trabalho

O trabalho de apresentação da tese consta de nove capítulos, incluindo este, onde foi feita a apresentação do problema estudado.

No Capítulo 02, este problema será descrito um pouco mais detalhadamente, para deixar mais claro quais são os aspectos físicos que estarão envolvidos ao longo da análise. Será aproveitado para checar alguns conceitos e definições que serão usadas ao longo do texto, a título de uniformização. Apesar de serem assuntos amplamente discutidos em vários outros trabalhos, também é apresentada neste capítulo uma revisão muito breve sobre pesquisas anteriores relacionadas ao *Adensamento*. Como se trata de um processo muito significativo na disposição dos resíduos, mencionado continuamente ao longo do texto, esta revisão tem o propósito de facilitar a seqüência de leitura. Os resíduos lançados por via úmida em reservatórios de deposição invariavelmente serão submetidos a este processo, e que resultará em um novo tipo de solo. Os lançamentos de resíduos dentro da área de contenção não são necessariamente contínuos, podendo ocorrer entre eles intervalos de tempo tais que, estando o rejeito exposto à atmosfera, a sua camada superior pode perder a saturação. A variação de volume de materiais não saturados diferem daqueles com saturação e esta diferença é ligeiramente comentada também no Capítulo 02.

Ainda neste mesmo Capítulo 02, serão apresentados alguns conceitos sobre processos relacionados ao ciclo hidrológico que leva o resíduo ao ressecamento. Serão descritos brevemente o que é a evaporação e a evapotranspiração; mecanismos de infiltração de chuva e movimento de água pela camada de solo,

dentre outros. A evaporação é controlada por muitas variáveis tais como aquecimento por radiação solar, aquecimento convectivo (movimento circulatório do ar devido a subida da porção mais quente e descida da mais fria e densa) à partir da terra, temperatura do ar e do terreno, umidades relativas, velocidade do vento etc. A importância relativa de cada um destes fatores será mencionada. Também será citada a transpiração, que se torna importante na fase de recuperação do depósito, após a etapa de reflorestamento. É o mecanismo que tenta considerar a influência da vegetação na retirada de água do solo e sua transferência para a atmosfera. Na verdade, é um fator de influência adicional na evaporação, um complemento a este processo que o torna conhecido como evapotranspiração. Uma discussão sobre taxas de infiltração de chuva no solo ressecado completa a formação da base conceitual necessária para a concepção e entendimento do modelo de ciclo hidrológico envolvido no problema estudado.

O ressecamento de um material depositado é basicamente a remoção de água dos poros, com sua substituição por um gás, em decorrência principalmente da evaporação e transpiração. É um processo governado por muitos fatores, e conseqüentemente, de difícil previsão. Por isso, é ainda basicamente analisado de uma forma empírica ou semi-empírica. Os estudos dos efeitos do ressecamento na lama tem sido intensificados devido ao fato da disposição com secagem solar ser das mais atrativas, tanto do ponto de vista econômico como ecológico. Os modelos já desenvolvidos para a solução do problema aqui analisado se baseiam, na sua maioria, em uma tentativa de se utilizar os métodos de cálculo de perda de água por evaporação e evapotranspiração, juntamente com o cálculo de recalques por adensamento a grandes deformações. Alguns destes métodos e modelos de previsão de ressecamento serão relacionados também no Capítulo 02. A intenção foi de apresentá-los de uma forma imparcial, sendo todos os comentários sobre seu desempenho feitos com base em experiência prévia dos próprios autores e outros pesquisadores.

As características gerais dos materiais estudados estarão no Capítulo 03. Serão mostradas curvas de distribuição granulométrica, resultados de análises mineralógicas, ensaios de caracterização usuais, além de observações gerais sobre o comportamento de lamas de lavagem de bauxita e as lamas vermelhas encontradas na literatura e os realizados nos laboratórios da PUC-RIO, nos

materiais específicos desta pesquisa. Caracterizações ditas especiais para a verificação de possíveis erros na obtenção de índices físicos dos resíduos também serão apresentadas no Capítulo 03. Estes índices são muito utilizados como base para estimativa do comportamento dos resíduos e foi verificado se procedimentos estipulados para solos ditos convencionais não mascarariam a real condição destes resíduos, em geral muito diferentes do solos comuns. Também se apresentará novas caracterizações químico-mineralógicas e fotos de microscopia eletrônica para verificação da influência da micro estrutura no comportamento geral.

No Capítulo 04 será apresentado as análises sobre o comportamento dos resíduos durante o processo de perda de umidade através de obtenção das curvas de secagem ou contração. Também serão mostrados resultados da execução de uma série de ensaios de compressão diametral a diferentes teores de umidade, para poder correlacioná-los com a sucção por meio da curva característica de sucção. Com este estudo, será feita uma tentativa de relacionar o fissuramento e a resistência à tração.

No capítulo 05 serão apresentados os procedimentos utilizados e os resultados obtidos para montagem da curva característica de sucção de dois dos resíduos, a lama vermelha OP neutralizada e a lama vermelha OP não neutralizada. Foram utilizadas quatro técnicas diferentes, o dessecador, o papel filtro, a medição direta via mini tensiômetros instalados em caixas de secagem e a medição direta com o uso de um transdutor especial, sendo comentado as dificuldades encontradas com cada uma delas. O conhecimento prévio da sucção e da sua variação com o teor de umidade devido à evaporação é de fundamental importância para se realizar uma análise do comportamento dos resíduos quando submetidos a ressecamento. Aqui também será discutida a relação encontrada entre a sucção e a resistência à tração dos resíduos.

Os ensaios para determinação das leis de compressibilidade de laboratório serão descritos no Capítulo 06. Basicamente, só o ensaio de adensamento com deformação controlada, o CRD, foi utilizado. Os procedimentos e resultados para obtenção da compressibilidade de campo estarão no Capítulo 07, onde se descreve o uso de uma sonda piezométrica e amostradores especiais, os mesmos de Villar (1990).

No Capítulo 08 serão apresentadas as observações feitas em laboratório sobre o comportamento durante o ressecamento e aspectos do fissuramento dos resíduos. Foram feitas simulações controladas e instrumentadas da secagem por meio de lisímetros de diversos tamanhos, procurando repetir as condições de campo. Estas caixas foram instrumentadas com termopares e tensiômetros para que todo o comportamento do resíduo fosse bem registrado durante a sua transição do estado saturado para o não saturado.

Por fim, as conclusões obtidas com uso das técnicas escolhidas e a qualidade dos parâmetros obtidos, bem como as sugestões para avanço da pesquisa, serão citadas no Capítulo 09.