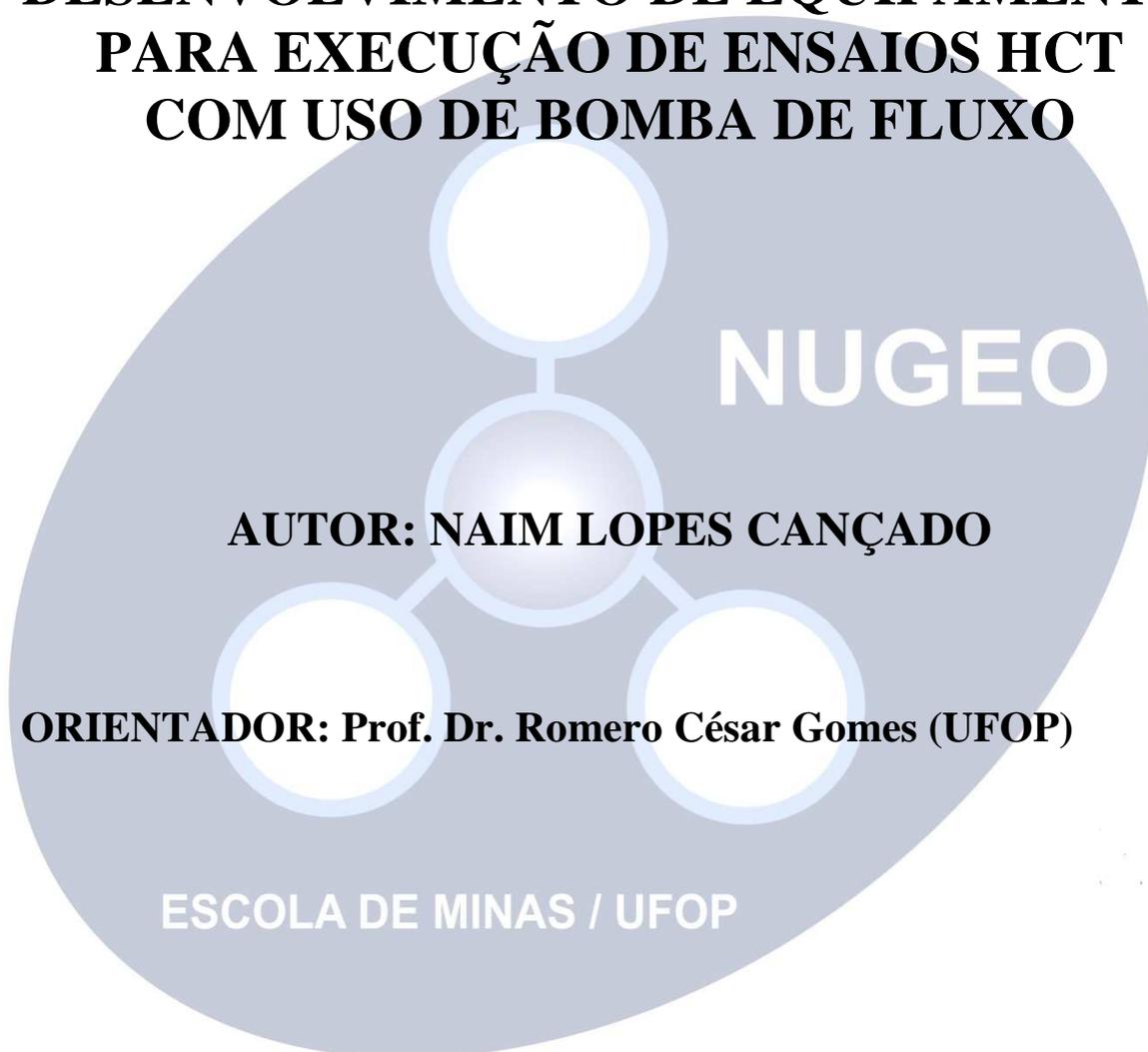


**Dissertação de Mestrado**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO  
PARA EXECUÇÃO DE ENSAIOS HCT  
COM USO DE BOMBA DE FLUXO**



**NUGEO**

**AUTOR: NAIM LOPES CANÇADO**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO - OUTUBRO DE 2010**

C212d      Cançado, Naim Lopes.  
Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios HCT com o  
uso da bomba de fluxo [manuscrito] / Naim Lopes Cançado - 2010.  
xvi, 96 f.: il., color.; tabs., grafs.

Orientador: Prof. Dr. Romero César.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. NUGEO.

Área de concentração: Geotecnia.

1. Bomba de fluxo - Teses. 2. Fluxo magnético - Teses. 3. Indução  
magnética - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 621.67

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

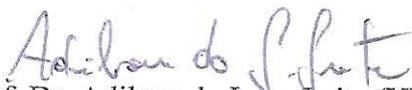
# DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS HCT COM O USO DA BOMBA DE FLUXO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 25 de outubro de 2010, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Romero César Gomes (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Adilson do Lago Leite (UFOP)



Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar (UFMG)

## DEDICATÓRIA

*“Quando uma criatura humana desperta  
para um grande sonho e sobre ele lança  
toda a força de sua alma, todo o universo  
conspira a seu favor”.*

*Johann Wolfgang Von Goethe*

*À minha esposa Eunice e aos meus filhos  
Raquel e Rodrigo, pelo grande apoio  
durante esta jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por todos momentos.

Aos meus familiares pelo incentivo e compreensão nos momentos que estive ausente.

Ao meu orientador Professor Dr. Romero César Gomes pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Professor Adilson do Lago Leite pela confiança.

Aos professores do NUGEO Saulo Gutenberg Ribeiro, Frederico Garcia Sobreira, Rodrigo Pelucci de Figueiredo, Gilberto Fernandes e Luis Bacellar, pela oportunidade de aprendizado.

Aos colegas da GEOLABOR pelo incentivo e força.

Aos colegas de mestrado Fernando, Rosyelle, Marinis, Johanna, Thiago, Luis, Shirlei, Karippe, Juliana, Rodolfo e Guilherme pela boa convivência e amizade.

À Cristina e Rafael, secretários do NUGEO.

À UFOP pela oportunidade.

À FAPEMIG pelo apoio dado para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Em geral, os rejeitos são dispostos sob a forma de polpa, principalmente porque esta condição do resíduo constitui o subproduto natural das atividades de concentração dos minérios, sempre associadas a grandes demandas de água. A disposição final dos rejeitos em polpa ocorre pelas técnicas de aterro hidráulico, em grandes reservatórios de barragens de contenção. No caso de rejeitos mais granulares, o modelo deposicional pode ser interpretado à luz das teorias clássicas do adensamento sob deformações infinitesimais, com base em resultados de ensaios convencionais de laboratório e/ou de campo. Em se tratando de rejeitos finos, porém, a previsão do comportamento dos resíduos e a formulação de um modelo deposicional consistente não podem ser enquadrados nas sistemáticas usuais, exigindo teorias de adensamento a grandes deformações e implantação de equipamentos específicos para avaliação das relações constitutivas índices de vazios  $\times$  tensões efetivas e índices de vazios  $\times$  permeabilidades dos materiais depositados. Este trabalho teve por objetivo principal a otimização dos equipamentos para determinação das relações constitutivas de rejeitos finos por meio de ensaios HCT (Hidraulic Consolidation Test) com a utilização da bomba de fluxo. Aos equipamentos já existentes no laboratório de geotecnia da UFOP foram implementados dispositivos de instrumentação digital para aquisição de dados e montagem de um novo painel de controle, posicionando todos os dispositivos de controle agregados ao painel, de forma a se obter uma definição objetiva dos circuitos de fluxo, incluindo-se a calibração dos instrumentos de medição, bem como a elaboração de um novo programa para a aquisição de dados. Ensaios realizados com um rejeito de bauxita serviram de validação do novo equipamento desenvolvido e designado como HCT-M da UFOP.

## **ABSTRACT**

In general, the tailings are disposed in the form of pulp, mainly because the condition of the residue is the natural byproduct of the minerals concentrations activities, always associated with large water demands. The final disposal of wastes in pulp occurs by hydraulic filling techniques in large reservoirs of check dams. In the case of more granular tailings, the depositional model can be interpreted in the light of classical theories of consolidation under infinitesimal deformation, based on results from conventional laboratory tests and / or field. In the case of fine tailings, however, predict the behavior of waste and the formulation of a consistent depositional model may not be framed in the usual systematic, demanding theories of consolidation at large deformations and deployment of specific equipment for evaluation of the constitutive relations void ratio  $x$  effective stress and void ratio  $x$  permeabilities of the materials deposited. This work was aimed at the optimization of equipment to determine the constitutive relationships of fine tailings by tests (HCT Hidraulic Consolidation Test) with the use of pump flow. To the existing equipment in the laboratory of the UFOP geotechnical instrumentation devices have been implemented for digital data acquisition and assembly of a new control panel, placing all control devices added to the panel in order to obtain an objective definition of the circuits flow, including the calibration of measuring instruments, and the development of a new program for data acquisition. Tests with a bauxite tailings were used for validation of the new equipment developed and designated as HCT-M UFOP.







<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>85</b>
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS .....	85
6.1 – Quanto aos Dispositivos Adotados.....	85
6.2 – Quanto ao Arranjo Geral dos Equipamentos.....	87
6.3 – Sugestões para Trabalhos Futuros .....	89
6.4 – Referências Bibliográficas.....	91
6.5 – Considerações Finais .....	93

# LISTA DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
Figura 2.1 – Sistema de Coordenadas eulerianas ( $\xi$ ).....	10
Figura 2.2 (a,b)– Sistema de Coordenadas lagrangeanas (a).....	10
Figura 2.3 (a,b) – Sistema de Coordenadas reduzidas (Z).....	11
Figura 2.4 – Elemento de Solo com $V_s=1$ : (a) $t=0$ e (b) $t$ qualquer .....	12
Figura 2.5 – Equação de Equilíbrio de um Elemento de Solo com $V_s=1$ .....	18
Figura 2.6 – Equação da Continuidade em um Elemento de Solo com $V_s=1$ .....	19
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>28</b>
Figura 3.1 – Esquema do Ensaio HCT – UFOP (Botelho,2001).....	28
Figura 3.2 – Painel de controle do Ensaio HCT – UFOP .....	29
Figura 3.3 – Célula triaxial modificada do Ensaio HCT – UFOP.....	30
Figura 3.4 – Ligações da câmara triaxial do Ensaio HCT – UFOP.....	31
Figura 3.5 – Sistema de medida das deformações verticais .....	32
Figura 3.6 – Bomba de fluxo de fluxo acoplada ao Ensaio HCT – UFOP.....	33
Figura 3.7 – Seringas de sucção da bomba de fluxo .....	34
Figura 3.8 – Dispositivo para distribuição contínua de fluxo.....	35
Figura 3.9 – Transdutor diferencial de pressão conectado à base da célula.....	36
Figura 3.10 – Bloco de aquisição de dados e cabo serial de borracha .....	37
Figura 3.11 – Gráficos de “poropressões x tempo” (Botelho, 2001) .....	38
Figura 3.12 – Tubulação com estrangulamento da seção .....	41
Figura 3.13 – Dispositivos componentes da célula triaxial .....	41
Figura 3.14 – Ligação geral do sistema de distribuição contínua de fluxo .....	43
Figura 3.15 – Esquema da configuração modificada do sistema HCT (Pereira,2006) .....	44
Figura 3.16 – Montagem da configuração modificada do sistema HCT (Pereira, 2006) .....	45
Figura 3.17 – Preparação e montagem do corpo de prova (Botelho, 2001) .....	48

<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>55</b>
Figura 4.1 – Pote de acrílico da montagem do Ensaio HCT .....	55
Figura 4.2 – Manômetro de pressão da montagem do Ensaio HCT – M .....	56
Figura 4.3 – Sistemas de interligação do painel da montagem do Ensaio HCT – M .....	56
Figura 4.4 – Painel de controle do Ensaio HCT (arranjo novo e arranjo original) .....	58
Figura 4.5 – Bancada de trabalho do Ensaio HCT – M .....	59
Figura 4.6 – Novo sistema de aquisição de dados do Ensaio HCT – M .....	60
Figura 4.7 – Interface de configuração do programa <i>Catman 4.5</i> .....	61
Figura 4.8 – Transdutor de deformação linear (LVDT) .....	61
Figura 4.9 – Conexão (a) e esquema de ligação meia ponte (b) para potenciômetros .....	62
Figura 4.10 – Transmissor de pressão do Ensaio HCT – M .....	62
Figura 4.11 – Conexão (a) e esquema de ligação (b) para corrente contínua com Fonte de alimentação externa .....	63
Figura 4.12 – Pórtico e pendural para aplicação de cargas do Ensaio HCT – M .....	64
Figura 4.13 – Sistema de reversão automática de fluxo (a) e <i>driver</i> de comando das válvulas solenóides (b) .....	65
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>66</b>
Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica da lama de bauxita ensaiada .....	68
Figura 5.2 – Montagem da câmara interna da célula triaxial .....	69
Figura 5.3 – Montagem dos circuitos de fluxo do ensaio .....	70
Figura 5.4 – Equipamento preparado para a montagem do corpo de prova .....	71
Figura 5.5 – Preparação da amostra representativa do rejeito estudado .....	72
Figura 5.6 – Fase de determinação do teor de umidade inicial da amostra .....	73
Figura 5.7 – Corpos de prova preparados para o ensaio de adensamento e para o ensaio de determinação do teor de umidade relativo ao índice de vazios à tensão efetiva nula $e_{00}$ .....	74
Figura 5.8 – Corpo de prova adensado sob a ação do peso próprio para a determinação da altura reduzida $H_s$ .....	74
Figura 5.9 – Monitoramento do ensaio durante o ensaio de adensamento .....	77
Figura 5.10 – Monitoramento do ensaio durante o ensaio de permeabilidade .....	79
Figura 5.11 – Monitoramento do ensaio durante o ensaio de adensamento por carga .....	80
Figura 5.12 – Monitoramento do ensaio durante o ensaio de permeabilidade sob carga .....	81

Figura 5.13 – Curva de compressibilidade .....	84
Figura 5.14 – Curva de permeabilidade.....	84
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>85</b>
Figura 6.1 – Arranjo dos equipamentos na bancada superior.....	88
Figura 6.2 – Arranjo e espaço disponível na bancada inferior .....	88
Figura 6.3 – Posicionamento do sistema de aquisição de dados .....	89
Figura 6.4 – Comparação entre curvas de recalque obtidas pelas teorias de adensamento a grandes deformações e pequenas deformações, e resultados medidos no campo (Villar, 1990).....	94
Figura 6.5 – Curvas de índice de vazios x tensões efetivas obtidas de vários ensaios.....	95
Figura 6.6 – Curvas de permeabilidade x índice de vazios obtidas de vários ensaios .....	96

## LISTA DE TABELAS

	<b>PÁGINA</b>
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do rejeito de bauxita ensaiado .....	68
Tabela 5.2 – Índices físicos iniciais do corpo de prova.....	83
Tabela 5.3 – Índices físicos do corpo de prova após adensamento sob a ação do peso próprio .....	83
Tabela 5.4 – Parâmetros constitutivos do rejeito.....	84

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	: Área da seção transversal
A,B,Z	: Parâmetros constitutivos das funções de compressibilidade
ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
C,D	: Parâmetros constitutivos das funções de permeabilidade
CD	: Consolidado, Drenado
e	: Índice de vazios
ef	: índice de vazios final
e <sub>0</sub>	: Índice de vazios inicial
e <sub>00</sub>	: Índice de vazios correspondente a tensão efetiva nula
G <sub>s</sub>	: Densidade das partículas
HCT	: <i>Hdraulic Consolidation Test</i>
H <sub>0</sub>	: Altura inicial
H <sub>s</sub>	: Altura reduzida
H <sub>f</sub>	: Altura final
Hz	: Hertz
I	: Gradiente Hidráulico
IP	: Índice de plasticidade
K	: Coeficiente de permeabilidade (condutividade hidráulica)
LL	: Limite de liquidez
LP	: Limite de plasticidade
LVDT	: <i>Linear Variable Deformation Transformer</i>
PN	: Ensaio de simulação de desenvolvimento das poropressões
Q	: Vazão
USB	: Porta Universal Serial ( <i>Universal Serial Bus</i> )
V	: Volts
Δμ	: Poropressão gerada
γ <sub>d</sub>	: Peso específico seco
γ <sub>s</sub>	: Peso específico dos grãos

$\gamma_w$	: Densidade da água
$\eta$	: Porosidade
$\sigma$	: Tensão
$\sigma'$	: Tensão normal efetiva
$\sigma_v$	: Tensão vertical
$\sigma_1$	: Tensão principal maior
$\sigma_3$	: Tensão principal menor
$\psi$	: Teor de sólidos

# CAPÍTULO 1

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 – Considerações iniciais

As atividades de mineração são caracterizadas pela geração de grandes volumes de resíduos nas suas operações de extração e beneficiamento do bem de interesse, com grande impacto para o meio ambiente pela ocupação de grande espaço físico, degradação ambiental promovida pelas escavações nas frentes de lavra, alterações no ciclo hidrológico, e necessidade de construção de estruturas de contenção adequadas para a disposição dos materiais descartados dos processos industriais utilizados.

Um controle efetivo na disposição destes resíduos exige projetos de engenharia bem elaborados, contemplando todos os aspectos relativos à segurança, desempenho e capacidade de armazenamento dos sistemas de disposição, para atender a demanda durante o período de vida útil do empreendimento e a garantia de bom desempenho destes sistemas após o encerramento das atividades. Estes projetos devem ser elaborados dentro das exigências legais de proteção do meio ambiente, considerando as particularidades dos resíduos gerados nos diferentes processos e as características físico-químicas e de comportamento geotécnico destes resíduos.

Estas exigências são mais abrangentes à medida que estes resíduos gerados são compostos por substâncias tóxicas, seja da própria matriz rochosa onde estes minerais estão inseridos, ou pela composição química de reagentes e catalisadores adicionados nos processos de beneficiamento do minério. Estes resíduos exigem um controle mais efetivo quanto à sua disposição, objetivando eliminar ou diminuir o impacto sobre o

meio ambiente, em termos da contaminação do solo, flora e águas superficiais e subterrâneas. Soluções técnicas têm utilizado materiais sintéticos (geomembranas) para garantir a estanqueidade dos reservatórios e a não contaminação do lençol freático.

Os projetos de engenharia para estruturas de contenção dos resíduos de mineração são elaborados a partir de dados obtidos em estudos de campo e campanhas de ensaios geotécnicos de laboratório, visando obter os parâmetros geotécnicos tanto do terreno natural do sítio onde serão implantadas estas estruturas, quanto dos rejeitos que ali serão dispostos, dentro do tripé básico da engenharia geotécnica: estabilidade, compressibilidade e permeabilidade.

Para os empreendimentos em fase de implantação, as estruturas de contenção de rejeitos são projetadas durante o período de implantação, pela necessidade de harmonizar o projeto como um todo, obedecendo a um arranjo geral da planta de operação do empreendimento. Como nesta fase os rejeitos ainda não foram gerados, eles deixam de ser objeto de estudos que definiriam seu comportamento geotécnico, sendo utilizados dados de outros empreendimentos congêneres para a definição do projeto.

Quando o conhecimento das características dos rejeitos que serão gerados é tão restrito, ou quando se pretende utilizar novas técnicas de disposição, será mais racional a utilização de uma pequena usina piloto para simular o processo de geração dos rejeitos, obtendo-se uma quantidade suficiente para a realização de ensaios geotécnicos de laboratório. No entanto, mais importante que se dispor de dados de ensaios, é garantir a execução de ensaios de boa qualidade, realizados em equipamentos bem projetados, com instrumentação bem calibrada e que permita a boa acurácia dos parâmetros medidos, bem como a geração de resultados consistentes.

## **1.2 – Justificativa e objetivos do trabalho**

Este trabalho está inserido no contexto da otimização de equipamento já existente no Laboratório de Geotecnia da UFOP (Botelho, 2001), destinado à execução de ensaios para determinação das relações constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade de materiais finos, pelo método do fluxo induzido com a utilização da bomba de fluxo

(Olsen, 1966). Equipamentos desta natureza, embora de aplicação generalizada em centros de pesquisa no exterior, não eram disponíveis no Brasil à época e foi implementado pela autora de forma pioneira no país.

Botelho (2001) desenvolveu um projeto experimental que incluiu a montagem e a operacionalização do equipamento (conjunto bomba de fluxo, célula triaxial, sistema de aplicação de pressão e sistema de aquisição de dados) no Laboratório de Geotecnia da UFOP, fazendo adaptação dos procedimentos de ensaios, de acordo com as técnicas propostas nos trabalhos de Zinidarcic e Liu (1989), Zinidarcic et al. (1996) , Aiban e Zinidarcic (1990) e Manna et al. (1993), a realização de alguns ensaios preliminares de rejeitos de mineração e a pesquisa e implantação dos procedimentos para análise dos dados obtidos dos ensaios com a utilização de programas e modelos de análise.

A autora propôs três esquemas de montagem do conjunto para operacionalização com os equipamentos disponíveis sugerindo, para futuros trabalhos, aprimoramentos no sistema de aplicação de carga na fase de adensamento, melhoria do sistema de aquisição de dados para sanar as oscilações do condicionador de sinais e a melhoria dos sistemas de medição das deformações com a utilização de transdutores de deslocamentos. Outros pesquisadores analisaram posteriormente as relações constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade de materiais finos, particularmente de rejeitos finos, utilizando-se dos esquemas originais ou introduzindo pequenas modificações específicas no equipamento (Araújo, 2004; Pereira, 2005)

Este trabalho teve por objetivo a otimização dos equipamentos para determinação das relações constitutivas nos ensaios de adensamento a grandes deformações, através de ensaio de HCT (*Hdraulic Consolidation Test*) com a utilização da bomba de fluxo, mediante uma reestruturação ampla do aparato experimental existente e considerando as restrições, condicionantes e limitações detectadas ao longo da sua aplicação continuada em pesquisas na UFOP. Neste contexto, foram propostas e implementadas as seguintes intervenções nos equipamentos existentes:

- i. implementação de um sistema de instrumentação digital para aquisição de dados;

- ii. montagem de um novo painel de controle, posicionando todos os dispositivos de controle agregados ao painel, de forma a se obter uma definição objetiva dos circuitos de fluxo;
- iii. implementação do controle da reversão de fluxo nas seringas através de válvulas solenoides, diminuindo as oscilações de pressão durante as reversões de fluxo, visando a obtenção de registros contínuos, com uma definição mais acurada da estabilização das poropressões geradas durante o processo de fluxo.
- iv. implementação de um novo sistema de aplicação de cargas;
- v. implementação de um novo sistema de aquisição de dados.

### **1.3 - Escopo do trabalho**

Este trabalho é apresentado em seis capítulos, com a seguinte estruturação:

No Capítulo 1, é apresentado um breve relato das atividades de mineração, com sua importância econômica e social, contrapostas aos impactos ambientais oriundas das mesmas. São apresentadas também as justificativas e os objetivos deste trabalho e a estruturação da dissertação.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica resumida do comportamento físico de materiais finos em termos de adensamento e compressibilidade, à luz dos princípios e fundamentos da teoria do adensamento convencional e do adensamento a grandes deformações. São desenvolvidas as equações diferenciais que expressam e sintetizam estas teorias, discutidos e abordados as hipóteses que subsidiam cada uma e descritos alguns modelos analíticos que representam as leis constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade destes materiais, quando admitidos como sendo homogêneos e submetidos a carregamentos monotônicos.

No Capítulo 3, é feita uma descrição geral dos equipamentos e metodologias de ensaio HCT com bomba de fluxo, até então correntemente aplicadas em trabalhos no Laboratório de Geotecnia da UFOP, com base na primeira montagem proposta

(Botelho, 2001), sob uma ênfase operacional do sistema. Neste contexto, são expostas as principais deficiências e limitações detectadas, bem como as potenciais intervenções a serem feitas dentro do processo de otimização proposto neste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta, então, as intervenções feitas no equipamento, no âmbito do processo de otimização, com construção de um novo painel de controle, implementação do sistema de aplicação de cargas, sistema de reversão de fluxo, novo sistema de aquisição de dados e instrumentação eletrônica para as medidas de tensões e deformações, enfatizando-se as principais alterações /adaptações do equipamento em relação à montagem original.

No Capítulo 5, são apresentadas as novas metodologias operacionais propostas para a realização do ensaio de HCT Modificado com o emprego da bomba de fluxo, no âmbito da nova configuração dos sistemas, bem como os resultados do ensaio realizado como teste de validação do novo equipamento, incorporando as intervenções implementadas no mesmo.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais, principais conclusões e sugestões para pesquisas complementares no contexto do trabalho realizado.

# CAPÍTULO 2

## 2 – ADENSAMENTO E COMPRESSIBILIDADE DE MATERIAIS FINOS

### 2.1 – Introdução

Os objetivos dos estudos experimentais de campo e de laboratório é substituir, por métodos científicos, os métodos empíricos de projetos aplicados na engenharia geotécnica. Nada justifica que tais estudos não sejam conduzidos no seu devido tempo, e da maneira mais criteriosa possível, pois só por meio deles se consegue uma boa solução de projeto, dos pontos de vista técnico e econômico.

Atenta a necessidade desses estudos, a engenharia geotécnica apresentou, nas últimas décadas, um extraordinário desenvolvimento dos conceitos da mecânica dos sistemas constituídos por uma fase sólida e granular e uma fase fluida. Dentre os vários fundamentos da mecânica dos solos que tiveram grande desenvolvimento no último século, destaca-se o estudo dos princípios fundamentais dos mecanismos de deformação dos solos em obras de terra, e em grandes depósitos de sedimentos, tanto os naturais, como os construídos para contenção de sedimentos diversos.

Este domínio compreende também os sistemas de disposição de rejeitos de mineração, comumente lançados sob a forma de polpa, em grandes reservatórios de barragens de contenção. Em função de suas reduzidas granulometrias e concentrações, estes materiais são submetidos a processos contínuos de sedimentação e adensamento que não se enquadram nas teorias tradicionais da Mecânica dos Solos e são, comumente, tratados como mecanismos distintos. Neste capítulo, serão abordados os conceitos relativos ao estudo da compressibilidade e permeabilidade de rejeitos submetidos a processos de sedimentação das partículas e adensamento do material final em reservatórios de sistemas de contenção.

## 2.2 – Sedimentação dos Rejeitos em Reservatórios

O processo de sedimentação refere-se ao movimento gravitacional de uma partícula, ou o conjunto delas, através de um determinado meio aquoso, o qual é dependente da granulometria do material e das interferências hidrodinâmicas locais. À medida que o processo de sedimentação avança, ocorre um aumento da concentração de sólidos no fundo do depósito, com a formação de uma camada de sedimento depositada. Cada camada representa uma sobrecarga para a camada subjacente, impondo excessos de poropressão que tendem a se dissipar ao longo do tempo, com conseqüentes acréscimos das tensões efetivas, desenvolvendo-se, portanto, o processo de adensamento.

Em termos práticos, a deposição é contínua e os volumes de sólidos aumentam com o tempo, em decorrência dos novos lançamentos, ocorrendo uma interdependência direta entre os dois processos. Do ponto de vista formal, a distinção entre sedimentação e adensamento é feita em termos da ocorrência ou não de tensões efetivas.

Na fase de sedimentação, as partículas tenderiam a se depositar isoladamente ou por floculação, mobilizando diferentes zonas ou horizontes ao longo do ambiente aquoso. De uma forma simplificada, mas pertinente no caso dos rejeitos mais granulares, a velocidade de deposição seria avaliada pela Lei de Stokes, para uma dada partícula isolada e suposta esférica, tal que:

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} d^2 \quad (2.1)$$

sendo:

V – velocidade de queda da partícula;  $\gamma_s$  – peso específico dos sólidos;  $\gamma_w$  – peso específico da água;  $\eta$  – viscosidade do líquido (água); d – diâmetro da partícula.

Para os teores de sólidos presentes em sistemas de disposição de rejeitos mais finos, o processo não é regido pela Lei de Stokes de sedimentação livre, devido às interações físicas que ocorrem entre as partículas.

Nestas condições, um modelo comumente adotado tem sido aquele proposto por Kynch (Kynch, 1952) que considera estas interferências e exprime a velocidade de queda como uma função exclusiva da concentração local de partículas. Vale ressaltar que essa teoria considera o material inerte, ou seja, não leva em consideração as características físico-químicas do material.

No modelo de Kynch, a velocidade de queda da partícula ( $v_s$ ) em um ponto qualquer da zona de deposição depende apenas da concentração do meio em sua vizinhança ( $C$ ). Desta forma, estabelece que a solução do problema pode ser determinada, atendendo-se apenas a equação diferencial da continuidade da fase sólida. A teoria prevê a existência de uma interface superior entre a suspensão e o líquido sobrenadante, cujo movimento, aliado ao conhecimento da distribuição inicial de partículas com a profundidade, é suficiente para determinar a variação da velocidade de queda com a concentração de partículas para uma dada suspensão. As hipóteses simplificadoras da teoria de Kynch são as seguintes (Alves, 1992; Castiglia, 2006):

- a concentração de partículas é uniforme através de qualquer horizontal (seção transversal);
- a concentração de partículas aumenta com a profundidade na suspensão;
- a velocidade de queda das partículas sólidas ( $v_s$ ) tende a um valor mínimo à medida que a concentração tende ao valor máximo  $C_{max}$ ;
- a velocidade de queda depende exclusivamente da concentração local de partículas em sua vizinhança;
- o problema é considerado unidimensional, em termos de uma suspensão em sedimentação em uma coluna, desprezando-se o atrito de partículas com as paredes da coluna;
- as partículas têm a mesma forma e tamanho.

A concentração do meio é expressa em termos do peso ou da massa de partículas sólidas por unidade de volume e está relacionada com a massa específica das partículas sólidas ( $\rho_s$ ) e com índices de vazios  $e$  (ou porosidades  $n$ ) pela relação:

$$C = \frac{\rho_s}{1 + e} = \rho_s (1 - n) \quad (2.2)$$

O fluxo de partículas (S) é definido como sendo a quantidade de partículas que atravessa uma dada seção horizontal do meio por unidade de área e de tempo, sendo expresso por:

$$S = C.V_s = \frac{P_s}{1+e} V_s \quad (2.3)$$

sendo  $v_s$  a velocidade de queda das partículas sólidas.

À medida que a concentração (função da altura H medida a partir da fronteira de base) aumenta, a velocidade diminui, até que o fluxo cessa e a velocidade se anula. Como o fluxo é proporcional à concentração, ele varia continuamente com a altura. A relação entre concentrações e tempos é chamada de equação de continuidade e é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = V(C) \frac{\partial C}{\partial H} \quad (2.4)$$

sendo  $V(C) = \frac{\partial H}{\partial t}$  é a inclinação das curvas de mesma concentração, que são obtidas em gráficos que correlacionam valores de alturas e de tempos; este parâmetro expressa a velocidade de avanço de uma dada frente horizontal de concentração C. A teoria de Kynch não considera, no entanto, os efeitos do processo de adensamento da camada devido ao seu peso próprio.

### 2.3 – Adensamento dos Rejeitos em Reservatórios

A sedimentação implica o processo subsequente (ou simultâneo) de adensamento, induzido pelo peso próprio das camadas existentes ou por novo lançamento de rejeitos no depósito parcialmente preenchido. A análise do problema, por envolver o movimento de partículas ao longo de um domínio (o corpo hídrico do reservatório), requer a adoção de referências e coordenadas para a completa descrição dos processos, sendo os sistemas euleriano e lagrangeano os mais comumente empregados nestes tipos de análises (Gibson *et al.*, 1967; Schiffman, 1979; Gibson *et al.*, 1981; Alves, 2002).

No sistema euleriano, não se avalia o deslocamento de partículas individuais, mas sim, o de uma posição espacial fixa no domínio do meio em função do tempo. Assim, são previamente fixados um dado referencial e uma determinada região do espaço, cuja localização permanece invariável ao referencial fixado. As partículas (sólidas e líquidas) deslocam-se através desta região, assumindo diferentes posições ao longo do tempo (Figura 2.1). Nesta abordagem, portanto, a coordenada euleriana  $\xi$  de uma partícula sólida qualquer em sedimentação é função do tempo  $t$  do processo em andamento, ou seja,  $\xi = \xi(t)$ .

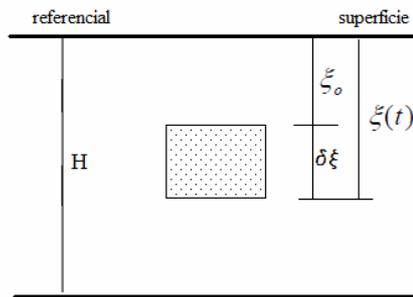


Figura 2.1 – Sistema de coordenadas eulerianas ( $\xi$ )

No sistema lagrangeano, o movimento das partículas no espaço é acompanhado ao longo de suas trajetórias. Assim, considera-se o deslocamento de uma dada região do espaço, delimitada por planos tomados em relação a um referencial pré-fixado cujas posições serão variáveis, ao longo do tempo, em relação ao nível de referência inicial. Este volume de referência, embora tenda a se deformar durante o processo de adensamento, deverá conter sempre o mesmo conjunto de partículas sólidas, ocorrendo somente o fluxo da fase fluida através das faces do mesmo.

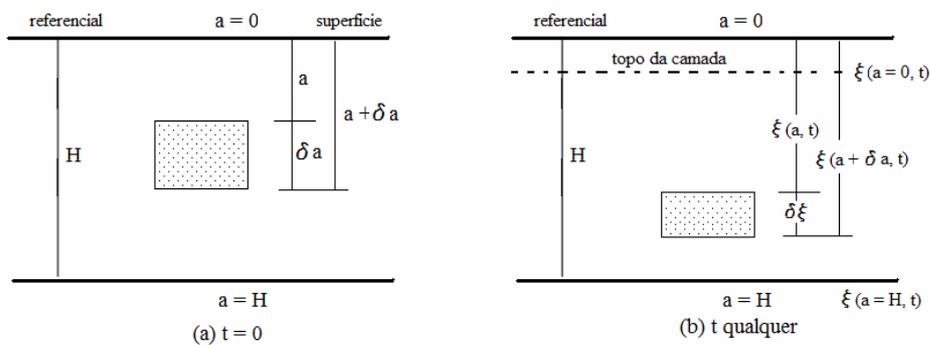


Figura 2.2 – Sistema de coordenadas lagrangeanas (a)

Em  $t = 0$ , o volume de referência está situado entre os pontos de coordenadas lagrangeanas,  $a$  e  $a + \delta a$ , medidas em relação a um plano de referência na superfície da camada. Após um tempo  $t$ , o volume se deforma e se move através do espaço, passando a se situar entre os pontos de coordenadas  $\xi(a, t)$  e  $\xi(a + \delta a, t)$ . As fronteiras superior e inferior serão sempre identificadas, respectivamente, por  $a = 0$  e  $a = H$ , mas suas localizações espaciais, após um dado tempo  $t$ , serão expressas por  $\xi(a=0, t)$  e  $\xi(a=H, t)$ . Em problemas caracterizados por fronteiras móveis, como é o caso do adensamento, adotam-se comumente coordenadas lagrangeanas nas análises.

Em problemas de adensamento sob grandes deformações, visando simplificar o problema da condição superior móvel, adotam-se, em vez das coordenadas lagrangeanas (que estão associadas com volumes totais), as chamadas coordenadas reduzidas, que são associadas apenas a volumes de sólidos. Define-se a chamada coordenada reduzida  $z$  de uma partícula do material como sendo igual ao volume de partículas sólidas, contidas em um volume de área transversal unitária, situado entre um dado plano de referência (geralmente a base da camada) e o ponto caracterizado por sua coordenada lagrangeana (Figura 2.3).

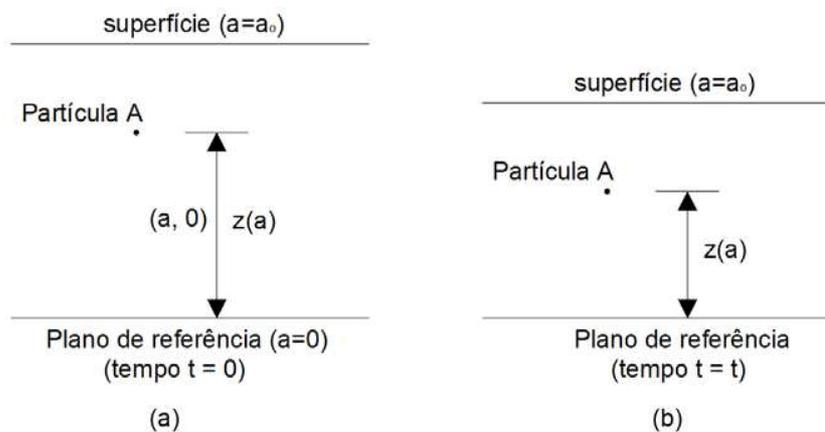


Figura 2.3 – Sistema de coordenadas reduzidas ( $z$ )

Embora definido em termos de volume, o parâmetro  $z$  tem dimensões de comprimento e, portanto, pode ser expresso como uma coordenada. Admitindo-se a hipótese de que as partículas sólidas sejam incompressíveis, este volume permanece constante durante o processo de adensamento. A vantagem de se adotar as coordenadas reduzidas como referência é que este sistema é independente do tempo, ou seja,  $z = z(a)$ .

Considere-se novamente o volume de referência indicado na Figura 2.2, admitindo-se agora a condição de volume de sólidos unitário (Figura 2.4).

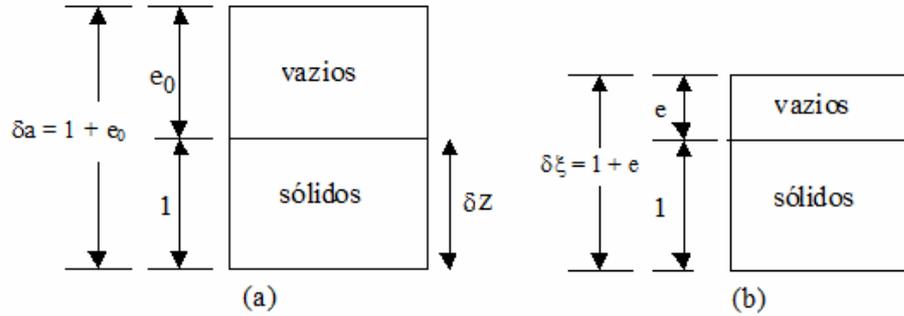


Figura 2.4 – Elemento de solo com  $V_s = 1$ : (a)  $t = 0$  e (b)  $t$  qualquer.

Em  $t = 0$ , sendo  $V = V_s (1 + e_0)$ , resulta para  $V = \delta a$  e  $V_s = 1$ , que  $\delta a = (1 + e_0)$ , onde  $a$  é a coordenada lagrangeana inicial da partícula em movimento. Num dado tempo  $t$  de adensamento, o volume de vazios inicial  $e_0$  passou a um novo valor  $e$  e, assim, o volume do solo ( $\delta \xi$ ) tornou-se igual a  $\delta \xi = 1 + e$ . Para um dado tempo  $t$ , portanto, resulta que  $\xi = \xi(a, t)$ ;  $e_0 = e_0(a, 0)$  e  $e = e(a, t)$ . Nestas condições, a coordenada reduzida  $z$  é dada pela seguinte relação:

$$z = \int_0^a \frac{\delta a}{1 + e(a, 0)} \quad (2.5)$$

Com base nos dados indicados na Figura 2.4, podem ser estabelecidas as diferentes correlações entre coordenadas eulerianas, lagrangeanas e reduzidas, tais que:

- coordenadas eulerianas e lagrangeanas:  $\frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{\delta \xi}{\delta a} = \frac{1 + e(a, t)}{1 + e(a, 0)} \quad (2.6)$

- coordenadas eulerianas e reduzidas:  $\frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{\delta \xi}{\delta z} = 1 + e(z, t) \quad (2.7)$

- coordenadas reduzidas e lagrangeanas:  $\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{\delta z}{\delta a} = \frac{1}{1 + e(a, 0)} \quad (2.8)$

## 2.4 – Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi

No contexto das propriedades-índices da engenharia geotécnica (compressibilidade, permeabilidade e estabilidade), a teoria do adensamento constitui uma das ferramentas mais importantes nos fundamentos da mecânica dos solos, desenvolvida a partir da clássica teoria do adensamento unidimensional proposta por Terzaghi, baseada em um conjunto de hipóteses simplificadoras, que fazem concessões a algumas condições reais para fins práticos, porém, em geral, satisfatórias, que são:

- a camada compressível tem espessura constante;
- a camada é lateralmente confinada;
- solo homogêneo, isotrópico e saturado;
- regime de pequenas deformações;
- as partículas sólidas do solo e a água são admitidas incompressíveis;
- o fluxo da água através dos poros obedece a lei de Darcy;
- o fluxo (e a compressão do solo) se processa unicamente na direção vertical;
- existe uma única relação linear, independente do tempo, entre índices de vazios e tensões efetivas no solo.

As principais restrições à teoria referem-se à adoção da última hipótese e a valores constantes para parâmetros que tendem a variar significativamente durante o processo. A equação diferencial do adensamento unidimensional de Terzaghi é estabelecida analiticamente a partir da equação de fluxo nos solos, uma vez que o adensamento ocorre pela dissipação dos excessos de poropressão devido à drenagem da água intersticial. A equação geral do fluxo unidimensional é expressa pela seguinte relação:

$$K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left( e \frac{\partial S}{\partial t} + S \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (2.9)$$

sendo: K – permeabilidade na direção vertical; z – coordenada na direção vertical; h – carga hidráulica total; e – índice de vazios ; S – grau de saturação; t – tempo

De acordo com Tavenas *et al.* (1983), a proporcionalidade entre a velocidade de fluxo e gradiente hidráulico tem sido comprovada, mesmo em gradientes muito baixos, como os que podem ocorrer devido ao fluxo por consolidação. Desta forma, a lei de Darcy pode ser estendida ao processo de consolidação, sem restrições.

Para os solos saturados,  $S = 1$  e, assim,  $\frac{\partial s}{\partial t} = 0$ ; a equação 2.9 pode ser reescrita como:

$$K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.10)$$

com  $h = h_a + h_p$ , sendo:  $h_a = z$  – carga altimétrica ou de posição e  $h_p$  – carga piezométrica ou de pressão.

$$\text{mas } h_p = \frac{u}{\gamma_w} \quad (2.11)$$

sendo  $u$  – poropressão;  $\gamma_w$  – peso específico da água.

Logo:

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (2.12)$$

Sabendo-se que a poropressão total  $u = u_0 + \Delta u$ , em que  $u_0$  – poropressão estática correspondente à condição de equilíbrio e  $\Delta u$  – excesso de poropressão gerada, resulta:

$$h = z + \left( \frac{u_0 + \Delta u}{\gamma_w} \right) \quad (2.13)$$

Aplicando-se o operador diferencial  $\frac{\partial^2}{\partial z^2}$  à equação 2.13, verifica-se que  $\frac{\partial^2 z}{\partial z^2} = 0$  e

$\frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} = 0$  e logo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

Substituindo-se o termo  $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$ , dado pela equação (2.14), na equação (2.10), resulta que:

$$\frac{K}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.15)$$

que constitui a chamada 'equação da continuidade do fluxo do adensamento unidimensional'.

A segunda equação envolvida na teoria de Terzaghi é a equação que representa a compressibilidade do esqueleto sólido num adensamento unidimensional, dada por:

$$a_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \quad (2.16)$$

sendo :

$a_v$  –módulo de compressibilidade ;  $e$  – índice de vazios;  $\sigma'_v$  – tensão efetiva vertical.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \cdot \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = -a_v \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (2.17)$$

Aplicando-se a equação 2.17 à equação 2.15, com rearranjo dos termos, tem-se:

$$\frac{K(1+e)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = -\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (2.18)$$

Terzaghi denominou o termo independente, localizado à esquerda da equação (2.18) como coeficiente de adensamento  $C_v$ , expresso por:

$$C_v = \frac{K(1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} \quad (2.19)$$

Na equação 2.19, o termo  $(1+e)/a_v$  constitui o chamado módulo ou coeficiente de variação volumétrica  $m_v$ , tal que:

$$C_v = \frac{K}{\gamma_w m_v} \quad (2.20)$$

Um das principais limitações do modelo de Terzaghi é adoção de um valor constante para o coeficiente de adensamento  $C_v$  durante o processo de adensamento, pois o mesmo não constitui uma propriedade independente do solo, mas que é variável com a sua permeabilidade e a sua compressibilidade.

A terceira equação da teoria de Terzaghi expressa finalmente a condição de equilíbrio do sistema, tal que:

$$\sigma = \sigma' + u \text{ e } u = u_0 + \Delta u \therefore \frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u_0}{\partial t} - \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (2.21)$$

sendo:

$\sigma$  – tensão total;  $\sigma'$  – tensão efetiva;  $u_0$  – poropressão inicial;  $\Delta u$  – acréscimo de poropressão.

Admitindo-se a hipótese de não variação das tensões totais ao longo da camada, as tensões totais independem do tempo e, portanto,  $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$  e logo:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (2.22)$$

Levando-se as expressões (2.22) e (2.19) à equação (2.15), resulta finalmente que:

$$C_v \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (2.23)$$

equação de derivadas parciais de segunda ordem que representa a equação diferencial do adensamento unidimensional de Terzaghi. A teoria de Terzaghi que atualmente, em função de novas teorias desenvolvidas, é também conhecida como teoria do adensamento a pequenas deformações ou teoria de deformação infinitesimal, representa ainda a ferramenta mais utilizada no desenvolvimento de projetos geotécnicos.

## 2.5 – Teoria do Adensamento a Grandes Deformações

A teoria clássica de Terzaghi não é aplicável ao estudo da compressibilidade e do adensamento de rejeitos finos de mineração devido às elevadas deformações induzidas, em relação à espessura inicial da camada em análise. Assim, a teoria das deformações finitas (ou de grandes deformações) inclui a espessura da camada como uma variável do problema, ou seja, a deformação da camada num dado tempo é significativa quando comparada com sua espessura inicial (Mikasa, 1963; Gibson *et al.*, 1967; Abu-Hejleh e Znidarcic, 1994).

A teoria proposta por Gibson *et al.* (1967) é a que descreve de forma mais adequada a magnitude e a evolução dos recalques dos depósitos de materiais de granulometria fina e altamente compressíveis, sendo baseada nas seguintes premissas:

- solo homogêneo e saturado;
- qualquer nível de deformação da camada;
- incompressibilidade das partículas sólidas e do fluido intersticial;
- fluido newtoniano e fluxo governado pela lei de Darcy - Gersevanov;
- não mobilização de adensamento secundário ou *creep*;
- validade do princípio das tensões efetivas;
- o processo de adensamento é isotérmico (sem interferência da temperatura);
- relações constitutivas são únicas, implicando com isso que não variam com o tempo e com as condições de carregamento;
- a concentração de soluto na água do solo não interfere no processo de adensamento (pequenas concentrações), ou seja, não afeta as massas específicas do fluido e dos sólidos, a porosidade e nem a forma de escoamento do fluido.

A equação diferencial do adensamento a grandes deformações é desenvolvida a partir das leis de equilíbrio, princípios da continuidade do sistema e nas relações constitutivas dos materiais, conforme exposto a seguir.

### 2.5.1 – Equação de Equilíbrio do Sistema

Para avaliar a equação de equilíbrio do sistema, reconsidere-se a Figura 2.4, analisada em termos do equilíbrio de forças na direção vertical e de coordenadas reduzidas (Figura 2.5).

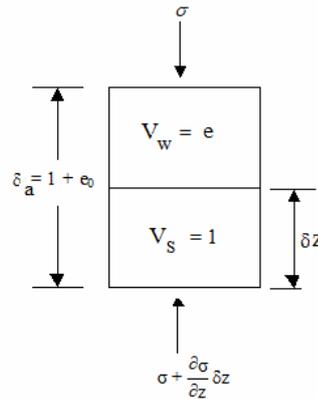


Figura 2.5 – Equação de equilíbrio de um elemento de solo com  $V_s = 1$

Impondo-se a condição de equilíbrio de forças na direção vertical, tem-se que:

$$\gamma_w \cdot V_w + \gamma_s \cdot V_s = \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \gamma_s + e\gamma_w \quad (2.24)$$

### 2.5.2 – Equação de Equilíbrio do Fluido Intersticial

Em termos do fluido intersticial, tem-se que a poropressão total  $u$  é tal que  $u = u_0 + \Delta u$ . Na condição de equilíbrio estático,  $u_0 = \gamma_w \xi$ , expressa em coordenadas eulerianas. Logo, em termos do equilíbrio geral, vem:

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \gamma_w + \frac{\partial \Delta u}{\partial \xi} \quad \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{\partial u_0}{\partial \xi} + \frac{\partial \Delta u}{\partial \xi} \quad \text{ou} \quad (2.25)$$

Aplicando-se a transformação de coordenadas da equação (2.7), resulta, em termos de coordenadas reduzidas:

$$\frac{\partial \Delta u}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} - \gamma_w (1 + e) \quad (2.26)$$

### 2.5.3 – Equação da Continuidade do Sistema

Para o volume elementar de solo admitido previamente (de volume  $dx dy dz$ ), a equação da continuidade implica a correlação entre as vazões de entrada e de saída do mesmo (Figura 2.5), para as condições de fluxo unidimensional (velocidade  $v_z$ ).

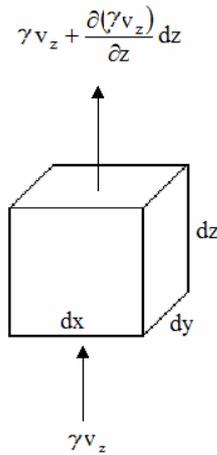


Figura 2.6 – Equação da continuidade em um elemento de solo com  $V_s = 1$

Assim, a diferença entre as vazões de saída e de entrada do elemento de solo deve ser igual à taxa de variação do peso de fluido armazenado ao longo do tempo, tal que:

$$-\frac{\partial(\gamma_w \cdot v_z)}{\partial z} dx dy dz = \frac{\partial W_w}{\partial t} \quad (2.27)$$

$$\text{ou } \frac{\partial(\gamma_w \cdot v_z)}{\partial z} dx dy dz = -\frac{\partial(\gamma_w \cdot S \cdot n)}{\partial t} dx dy dz$$

Admitindo-se as condições de solo saturado e as partículas sólidas e a água como sendo incompressíveis, resulta:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial n}{\partial t} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.28)$$

sendo  $v_z$  (velocidade relativa) função da diferença entre as velocidades absolutas do fluido –  $v_w$  e das partículas sólidas –  $v_s$  (equação de Gersevanov, 1934):

$$v_z = n (v_w - v_s) \quad (2.29)$$

Pela equação de Darcy:  $v_z = -\frac{K}{\gamma_w} \frac{\partial \Delta u}{\partial \xi} = -\frac{K}{\gamma_w} \frac{1}{1+e} \frac{\partial \Delta u}{\partial z}$  e substituindo  $v_z$  em (2.29):

$$n(v_w - v_s) = -\frac{K}{\gamma_w} \frac{\partial \Delta u}{\partial \xi} \quad \text{ou} \quad e(v_s - v_w) = \frac{K}{\gamma_w} \frac{\partial \Delta u}{\partial z} \quad (2.30)$$

A equação (2.30) caracteriza o comportamento de um fluido que obedece a chamada Lei de Darcy-Grisevanov.

#### 2.5.4 – Leis constitutivas do material

No desenvolvimento da teoria do adensamento a grandes deformações, há que se estabelecer ainda as leis constitutivas do material, relativas às suas características de compressibilidade e permeabilidade. Estas relações são funções dos seguintes tipos (Gibson *et al.*, 1967):

- $\sigma_x(e, z, t)$ ;
- $K_x(e, z)$ .

Para materiais homogêneos e carregamentos monotônicos, essas relações são dependentes apenas dos índices de vazios e comumente obtidas por meio de ensaios de laboratório (particularmente o ensaio HCT, escopo desta dissertação) ou por sondagens piezométricas em campo (Gomes, 2008). Os resultados são, então, expressos por modelos matemáticos que sejam mais representativos dos dados coligidos, comumente por meio de funções logarítmicas, exponenciais ou potenciais (Liu e Znidarcic, 1991). Alguns destes modelos são resumidamente expostos a seguir.

##### 2.5.4.1 – Modelagem analítica das leis constitutivas de compressibilidade

Os modelos mais simples admitem relações lineares (coeficientes de compressibilidade constantes) ou funções exponenciais ou potenciais para expressar as variações entre

índices de vazios e as correspondentes tensões efetivas, quase todos de natureza similar e apresentando as mesmas limitações práticas de aplicação.

No modelo proposto por Butterfield (1979), por exemplo, a relação  $\sigma'$  x  $e$  é expressa em termos da seguinte função:

$$e = (1 + e_0) \cdot \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^{-C_c} - 1 \quad (2.31)$$

representada por uma envoltória bilinear, de coeficientes angulares  $C_c$  e  $C_s$ , correspondentes aos comportamentos normalmente adensado e sobreadensado do material, respectivamente.

Gibson *et al.* (1981) e Cargill (1984) propuseram um modelo caracterizado pela seguinte função exponencial:

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma') + e_{\infty} \quad (2.32)$$

sendo  $e_{00}$  – índice de vazios correspondente à tensão efetiva zero;  $e_{\infty}$  – índice de vazios correspondente à tensão efetiva infinita e  $\lambda$  – constante do material. Este modelo é passível de representar o comportamento de materiais de granulometria fina em uma ampla faixa de tensões, mesmo para baixas tensões efetivas.

Funções potenciais diversas têm sido propostas para representar a lei constitutiva da compressibilidade de solos finos, tais como:

- Hardin (1989):  $\frac{1}{e} = \frac{1}{e_i} + \frac{1}{S_{1-D}} \left( \frac{\sigma'}{P_{atm}} \right)^p$  (2.33)

- Somogyi (1979):  $e = A \sigma'^B$  (2.34)

- Carrier III *et al.* (1983):  $e = \alpha \cdot \left( \frac{\sigma'}{P_{atm}} \right)^\beta + \varepsilon$  (2.35)

sendo  $S_{1-D}$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\varepsilon$  constantes do modelo e parâmetros específicos do material estudado.

Liu (1990) readaptou o modelo de Somogyi (equação 2.34), incluindo uma nova constante  $Z$  ao modelo, de forma a se evitar a limitação óbvia da proposição anterior indicar um valor infinito para o índice de vazios do material sob tensão efetiva nula, pela seguinte relação:

- Liu (1990):  $e = A (\sigma' + Z)^B$  (2.36)

Os modelos de Liu(1990) e Hardin (1989) têm sido comumente adotados para expressar a lei constitutiva da compressibilidade de materiais homogêneos de granulometria fina por mostrarem melhores ajustes a resultados de estudos experimentais.

#### 2.5.4.2 – Modelagem analítica das leis constitutivas de permeabilidade

Analogamente aos modelos anteriores, várias funções potenciais e exponenciais foram propostas para representar o comportamento  $K$  x  $e$  de materiais de granulometria fina, tais como:

- Koppula e Morgenstern (1982):  $\frac{k}{(1+e)} = \left( \frac{k}{1+e} \right)_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right)^q$  (2.37)

- Somogyi (1980):  $k = Ce^D$  (2.38)

- Monte e Krizek (1976):  $\frac{k}{(1+e)} = \alpha + \beta e$  (2.39)

- Carrier e Bromwell (1983):  $k = \mu \frac{(e - \lambda)^v}{(1+e)}$  (2.40)

sendo  $q$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $v$  e  $\lambda$  constantes do modelo e parâmetros específicos do material estudado.

O modelo exponencial de Somogyi (equação 2.38) tem-se mostrado bastante apropriado

para expressar a lei constitutiva da permeabilidade de materiais homogêneos de granulometria fina sob carregamentos monotônicos.

### 2.5.5 – Equação Diferencial do Adensamento a Grandes Deformações

A equação diferencial do adensamento a grandes deformações pode ser estabelecida, em termos de coordenadas reduzidas, por meio do seguinte desenvolvimento analítico:

(i) Pelo princípio das tensões efetivas, tem-se que:  $\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z}$ . Substituindo  $\frac{\partial u}{\partial z}$ , dado pela equação (2.26):  $\frac{\partial \Delta u}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} - \gamma_w(1+e)$ , nesta relação, resulta:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \frac{\partial \Delta u}{\partial z} + \gamma_w(1+e) \quad (2.41)$$

(ii) Substituindo  $\frac{\partial \sigma}{\partial z}$  acima na equação (2.24):  $\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \gamma_s + e\gamma_w$ , tem-se que:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \frac{\partial \Delta u}{\partial z} = \gamma_s - \gamma_w \quad (2.42)$$

(iii) Explicitando o termo  $\frac{\partial \Delta u}{\partial z}$  na relação acima e substituindo o mesmo na equação de

Darcy:  $v_z = -\frac{K}{\gamma_w} \frac{1}{1+e} \frac{\partial \Delta u}{\partial z}$ , resulta:

$$v_z = -\frac{K}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial z} - \frac{\gamma_w - \gamma_s}{\gamma_w} \frac{K}{(1+e)} \quad (2.43)$$

(iv) derivando-se  $v_z$  em relação à  $z$  na equação acima e substituindo esta derivada na

equação da continuidade do sistema (2.28):  $\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial e}{\partial t}$ , obtém-se que:

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{K}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \right) \frac{K}{(1+e)} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (2.44)$$

A equação (2.44) constitui a equação diferencial geral do adensamento a grandes deformações (Gibson *et al.*, 1967).

Admitindo-se as hipóteses de material homogêneo, propriedades constantes com o tempo e carregamentos monotônicos, as leis constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade do material podem ser simplificadas para  $\sigma' \propto e$  e para  $K \propto e$ , permitindo, então, a adoção dos modelos analíticos apresentados previamente e a simplificação da equação geral do adensamento a grandes deformações:

(v) reescrevendo-se a equação geral em termos de  $\frac{\partial[\quad]}{\partial z} = \left[\frac{\quad}{\partial e}\right] \frac{\partial e}{\partial z}$ , tem-se que:

$$\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{K(e)}{(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \left( 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \right) \frac{\partial}{\partial e} \left[ \frac{K(e)}{(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.45)$$

$$\text{ou} \quad f(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.46)$$

sendo:

$$f(e) = \left( 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \right) \frac{\partial}{\partial e} \left[ \frac{K(e)}{(1+e)} \right] \quad (2.47)$$

$$g(e) = \frac{1}{\gamma_w} \left[ \frac{K(e)}{(1+e)} \right] \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \quad (2.48)$$

As equações (2.45 ou 2.46) representam a equação diferencial geral do adensamento a grandes deformações para o caso de solos homogêneos, saturados, com propriedades invariantes com o tempo e submetidos a carregamentos monotônicos. Na hipótese de que as cargas devidas ao peso próprio não induzem adensamento (desconsideração do termo dado pela função  $f(e)$  na equação 2.46) e sendo  $K$  e  $a_v = \frac{\partial e}{\partial \sigma'}$  constantes, resulta:

$$\frac{K}{\gamma_w a_v} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{1}{1+e} \right) \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.49)$$

mas, sendo  $\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial z}$  ;  $\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial t}$  e  $\frac{\partial \xi}{\partial z} = 1 + e$  (equação 2.7), a relação (2.49) pode ser reescrita como:

$$\frac{K(1+e)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial \xi^2} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (2.50)$$

ou, aplicando-se o princípio das tensões efetivas:

$$\frac{K(1+e)}{\gamma_w a_v} \left[ \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} \right] = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2.51)$$

Finalmente, admitindo-se a invariância das tensões totais no espaço e no tempo, tem-se que  $\frac{\partial \sigma}{\partial \xi} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$  e, portanto:

$$\frac{K(1+e)}{\gamma_w a_v} \left[ - \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} \right] = \left( - \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} \quad (2.52)$$

A equação (2.52) constitui a equação diferencial da teoria clássica do adensamento unidimensional de Terzaghi, aplicável para o caso particular de pequenas deformações (ou deformações infinitesimais).

# CAPÍTULO 3

## 3 – ENSAIO HCT COM BOMBA DE FLUXO

### 3.1 – Princípio Geral do Ensaio

Este ensaio permite a determinação experimental das leis de compressibilidade e de adensamento dos solos, particularmente dos solos finos, expressas pelas relações ‘índices de vazios  $x$  permeabilidades’ e ‘índices de vazios  $x$  tensões efetivas’, como exposto no capítulo anterior. No escopo desta dissertação, o ensaio constitui ferramenta bastante valiosa para a estimativa dos parâmetros de compressibilidade de sistemas de disposição de materiais com finos oriundos de operações de mineração e dragagem, à luz das premissas das teorias de adensamento a grandes deformações.

O princípio geral dos ensaios de adensamento HCT (*hydraulic consolidation test* ou ensaio de adensamento por percolação induzida) consiste na aplicação de um fluxo descendente ao longo de uma dada amostra de solo que, em associação aos efeitos de peso próprio, induz o adensamento da mesma por gradientes de percolação (Imai, 1979). Assim, torna-se viável a determinação dos parâmetros de compressibilidade dos solos finos sob baixas tensões, algo impraticável pelos ensaios convencionais de adensamento.

O ensaio é complementado pelo incremento de alguns estágios de carregamento, para obtenção dos parâmetros de compressibilidade em níveis de tensões mais elevadas, obtendo-se, desta forma, uma curva mais abrangente da variação dos índices de vazios em função das tensões efetivas. Os resultados são interpretados com base na equação geral do adensamento a grandes deformações e para condições iniciais e de contorno muito bem definidas.

Por outro lado, a técnica da bomba de fluxo (Olsen, 1966), desenvolvida para a medida da permeabilidade de solos com granulometria fina, consiste em utilizar este dispositivo para se aplicar uma vazão de fluxo constante a uma amostra do solo, medindo-se, então, a diferença de pressões entre suas bases; este valor permite a estimativa do gradiente hidráulico induzido e da permeabilidade do solo. O princípio aqui é oposto ao do ensaio convencional de permeabilidade a carga constante, no qual um gradiente hidráulico constante é imposto ao longo da amostra e a vazão de fluxo é medida.

No ensaio HCT com bomba de fluxo, a vazão de fluxo através da amostra é controlada pela bomba de fluxo e a diferença de pressão resultante é medida por um transdutor diferencial de pressão. O conjunto de dados inclui medidas de tempos e das diferenças de carga induzidas ao longo do comprimento do corpo de prova, para cada uma das velocidades de fluxo externamente aplicadas. Os valores obtidos para o estado de equilíbrio das diferenças de carga são utilizados para calcular o valor da permeabilidade para cada estágio do ensaio, tanto na etapa de adensamento por fluxo induzido, quanto na etapa de carregamento.

### **3.2 – Equipamentos do Ensaio**

O aparato experimental para a realização dos ensaios de adensamento por percolação induzida (Znidarcic e Liu,1989; Znidarcic *et al.*,1992; Abu-Hejle *et al.*,1996) é composto por uma célula triaxial modificada, bomba de fluxo, painel de controle de pressão, transdutor diferencial de pressão, sistema de aplicação de carregamento com dispositivo de medida das deformações verticais e um sistema de aquisição de dados.

O equipamento HCT do Laboratório de Geotecnia da UFOP foi implementado por Botelho (2001) que, avaliando diversas configurações possíveis do arranjo do ensaio, optou pela concepção indicada na Figura 3.1. O equipamento era bastante compacto e com painel e bancada independentes, sendo vinculado externamente a uma fonte de suprimento de energia elétrica e a um sistema de alimentação de pressões (circuito de ar comprimido).

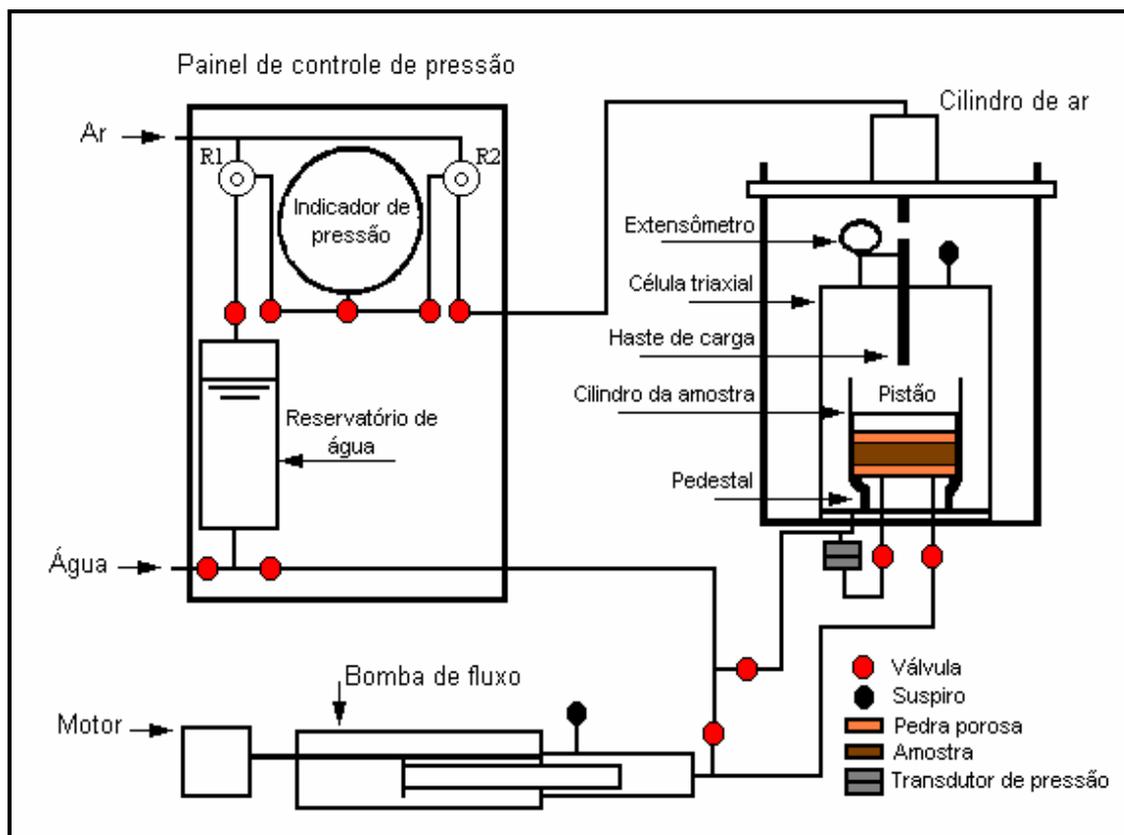


Figura 3.1 - Esquema do ensaio HCT - UFOP (Botelho, 2001).

A partir do diagrama definido, procedeu-se à montagem do equipamento com a seguinte configuração geral, que são apresentados e descritos a seguir, conforme o arranjo original proposto:

- Painel de controle
- Célula triaxial modificada
- Sistema de carregamento uniaxial
- Sistema de medida das deformações verticais
- Bomba de fluxo
- Seringas de sucção
- Dispositivo para distribuição contínua de fluxo
- Transdutor diferencial de pressão
- Sistema de aquisição de dados
- Sistema de direcionamento de fluxo.

### 3.2.1 – Painel de controle

O painel de controle foi construído em placa de madeira revestida por fórmica, no qual foram dispostos dois reservatórios de acrílico, válvulas reguladoras de pressão e um manômetro digital (Figura 3.2). Na configuração proposta, o painel desempenhava duas funções: controle da aplicação de contrapressão no caso de saturação do corpo de prova e da alimentação de água para o processo de fluxo durante o ensaio.

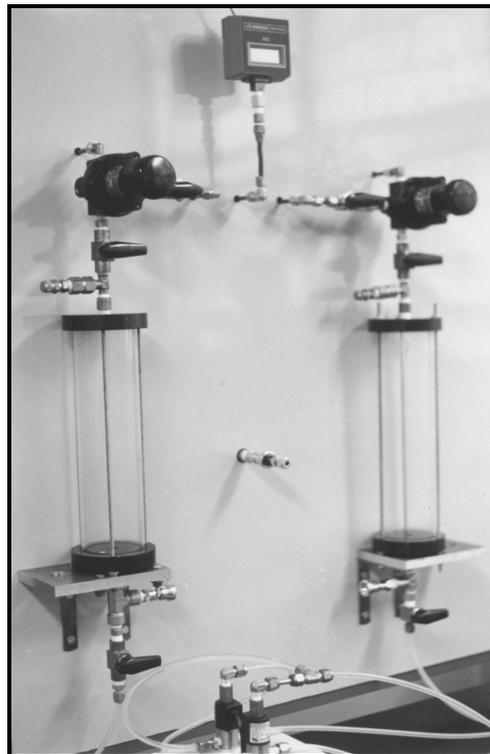


Figura 3.2 – Painel de controle do Ensaio HCT - UFOP

### 3.2.2 – Célula triaxial modificada

A célula utilizada foi uma célula de compressão triaxial convencional (diâmetro interno de 114 mm e altura de 274 mm), de fabricação da Durham Geo-Enterprises, com pressão máxima de operação de 175 psi (Figura 3.3), adaptada mediante a substituição do pedestal e do cabeçote de aplicação de cargas originais por novas peças, confeccionadas em acrílico com 8,9cm de diâmetro, e com pedras porosas incrustadas para permitir a drenagem pelo topo e pela base.



Figura 3.3 – Célula triaxial modificada do Ensaio HCT - UFOP

A base da câmara possuía cinco saídas, sendo uma delas responsável pelo enchimento da câmara triaxial pelo líquido confinante e as outras quatro, conectadas duas a duas ao topo e à base do corpo de prova, usadas para ligação com a bomba de fluxo para medida da poropressões geradas no corpo de prova e também para a sua saturação. O controle dessas saídas era feito por meio de válvulas. A Figura 3.4 ilustra a complexidade e o arranjo concentrado destas diversas ligações.

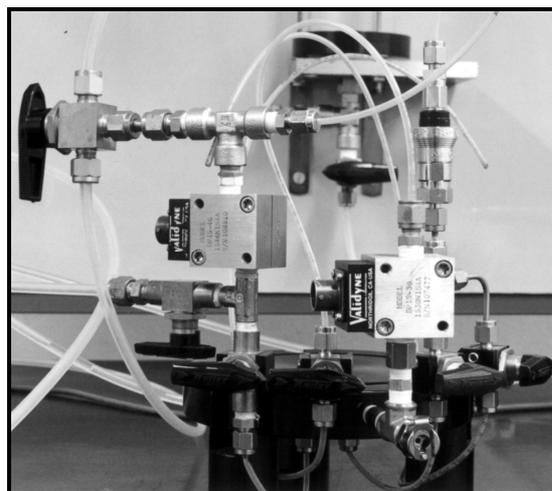


Figura 3.4 – Ligações da câmara triaxial do Ensaio HCT – UFOP

Além da câmara externa de acrílico, a célula possuía outra câmara interna (destinada a receber a amostra a ser ensaiada), composta por um tubo de acrílico com 8,9cm de diâmetro interno e 16,2cm de altura. O tubo era encaixado no pedestal por um sistema de vedação através de anel da borracha (*o-ring*).

### 3.2.3 - Sistema de carregamento uniaxial

O sistema de carregamento uniaxial era constituído por um disco metálico, acoplado diretamente na extremidade superior do pistão da célula, formando uma plataforma na qual eram colocados pesos em conformidade com a tensão desejada, transmitindo, desta forma, o carregamento diretamente ao cabeçote posicionado no topo do corpo de prova.

### 3.2.4 - Sistema de medida das deformações verticais

O controle das deformações verticais, induzidas durante os estágios de aplicação do carregamento uniaxial, era feito por meio de um extensômetro tipo relógio comparador, com precisão de 0,01mm e curso útil de 10mm (Figura 3.5). O extensômetro era fixado diretamente ao pistão da célula por meio de presilha com parafuso de fixação. A haste do extensômetro ficava apoiada diretamente no topo da célula.



Figura 3.5 – Sistema de medida das deformações verticais

### 3.2.5 - Bomba de fluxo

Uma bomba de fluxo modelo PHD 2000 de fabricação da Harvard Apparatus Company, com duas seringas de aço inoxidável com capacidade de 20ml cada uma, foi acoplada ao equipamento do Ensaio HCT (Figura 3.6). Um motor de velocidade variável controla o sistema de infusão/remoção de fluxo das seringas por meio de uma caixa de engrenagens e um parafuso sem fim. O modelo de bomba de fluxo adotado permitia o uso simultâneo das duas seringas, ou seja, enquanto uma das seringas realizava a remoção de água do corpo de prova, estabelecendo um fluxo descendente, a outra se esvaziava, injetando água em um dos reservatórios posicionados no painel de controle. Por meio de um sistema de comando específico (*Infuse/Refill*), procedia-se à inversão automática da direção de deslocamento dos cabeçotes, invertendo-se as funções de operação das duas seringas.



Figura 3.6 – Bomba de Fluxo acoplada ao Ensaio HCT - UFOP

A bomba de fluxo podia ser programada por meio de funções existentes no painel de comando frontal, com velocidades de fluxo variando entre  $10^{-6}$  ml/s até 0,9 ml/s . Além do controle da velocidade de fluxo, o sistema permitia também o controle de volumes, podendo ser estabelecido um volume máximo de água passível de ser removido do corpo de prova; uma vez atingido este valor limite, as operações de sucção eram automaticamente interrompidas.

Durante a realização dos estágios de sucção, é recomendável programar ambas as funções pois, no caso de ausência do operador, a bomba de fluxo irá interromper o deslocamento quando o volume programado for atingido, evitando-se, assim, eventuais danos ao equipamento. Nos ensaios realizados à época, optou-se por se trabalhar com o controle das velocidades de fluxo impostas à amostra.

### 3.2.6 - Seringas de sucção

As seringas, fabricadas pela Harvard Apparatus Company, são constituídas por um cilindro oco (cânula) e um êmbolo, possuindo 19mm de diâmetro e cerca de 104 mm de comprimento (Figura 5.7). A câmara do cilindro possui retífica espelhada na superfície interna e o êmbolo é dotado de anéis de borracha (*o-rings*) na extremidade. A extremidade fechada do cilindro possui uma conexão rosqueável para a ligação com a tubulação do sistema de circulação de fluxo.



Figura 3.7 -Seringas d e sucção da bomba de fluxo

O conjunto bomba-seringa permite injetar ou succionar um total de aproximadamente 20 ml por seringa, com valores limites de vazão de 0,0523  $\mu\text{l}/\text{min}$  e 54,804 ml/min. Qualquer vazão intermediária pode ser selecionada, sendo que os limites possíveis dependem do diâmetro da seringa utilizada.

### 3.2.7 - Dispositivo para distribuição contínua de fluxo

Este dispositivo (Figura 3.8), uma vez ligado à bomba de fluxo, era responsável por garantir o funcionamento unidirecional da bomba. Assim, com este dispositivo ativado, as duas seringas retiram ou apenas injetam água no corpo de prova e, quando desativado, uma seringa retira água do corpo de prova enquanto a outra realiza a injeção. Sendo assim, este sistema permite que a bomba seja usada para obter os ciclos de histerese (ciclos de drenagem e de infiltração).



Figura 3.8 - Dispositivo para distribuição contínua de fluxo

### 3.2.8 - Transdutor diferencial de pressão

O transdutor diferencial de pressão, associado ao sistema original do equipamento HCT – UFOP, era um modelo DP – 15 fabricado pela *Validyne Engineering Corporation*, possuindo três diafragmas substituíveis capazes de medir diferenças de pressão de  $\pm 1,25$  psi (8,62 kPa),  $\pm 12,5$  psi (86,19 kPa) e  $\pm 50$  psi (344,75 kPa) cada um. O transdutor era constituído por duas câmaras separadas por um diafragma, com uma

saída de pressão para cada câmara, sendo uma das saídas ligada diretamente à base da célula triaxial (Figura 3.9) para medir a poropressão gerada na base do corpo de prova durante a aplicação do fluxo.

A outra saída era ligada em conexão com o reservatório de acrílico que alimentava o suprimento de água dentro da câmara da célula triaxial. Desta forma, o transdutor fornecia a poropressão diferencial gerada entre o topo e a base do corpo de prova. Por outro lado, os circuitos eletrônicos do transdutor diferencial eram conectados ao sistema de aquisição de dados, gerando no monitor um gráfico poropressão x tempo, que permitia o monitoramento contínuo das poropressões geradas.

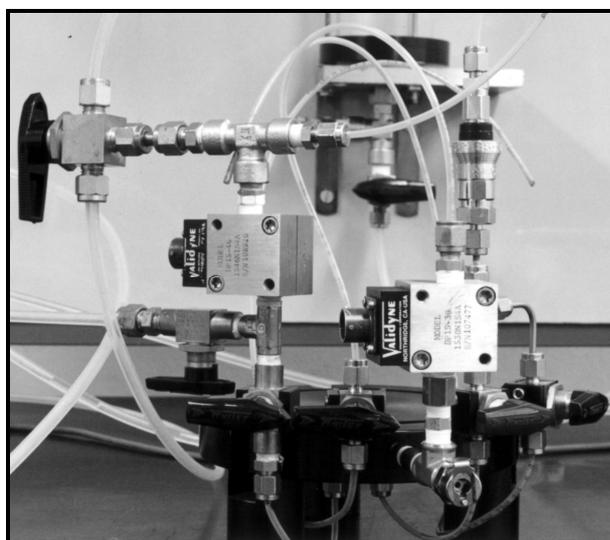


Figura 3.9 – Transdutor diferencial de pressão conectado à base da célula

### 3.2.9 - Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados era composto por um bloco terminal com oito canais de entrada e saída e mais alguns terminais para sensores de temperatura. O sistema, fabricado pela *Validyne Engineering Corporation*, recebia os dados de entrada do transdutor diferencial de pressão e, por meio de um cabo serial de borracha, transmitia os sinais codificados para um microcomputador (Figura 3.10).

Por meio de um programa de aquisição de dados (*Lab-View*) e um cartão de entrada (UPC 601-U ou *Universal PC Sensor Interface Card*) que fornecia a interface direta do

computador com os sensores e transdutores utilizados nos ensaios, ambos instalados no computador, eram coletados os dados de poropressões medidos pelo transdutor diferencial de pressão e traçados os gráficos de poropressões x tempos do ensaio.

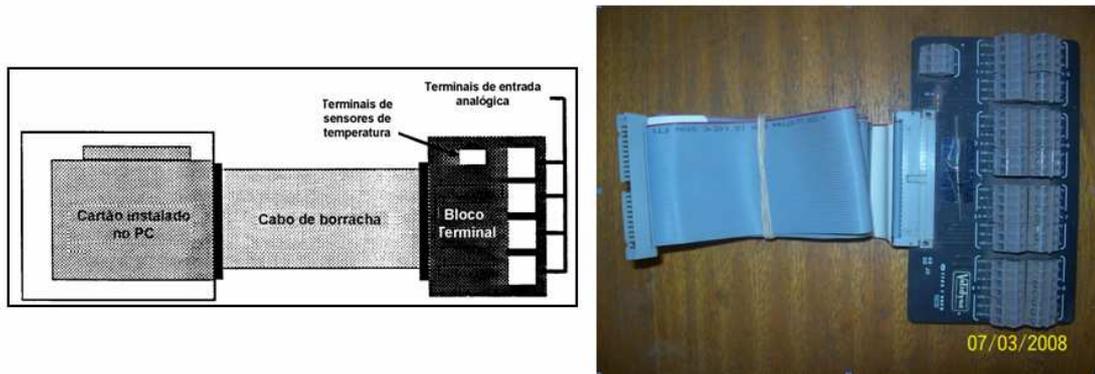


Figura 3.10 – Bloco de aquisição de dados e cabo serial de borracha

### 3.2.10 - Sistema de direcionamento de fluxo

O sistema de controle das direções de fluxo assume grande relevância em termos do arranjo operacional do ensaio de adensamento HCT com utilização de bomba de fluxo, por garantir o alinhamento operacional entre os sistemas de alimentação, sucção e injeção de água durante o processo de fluxo. Um bom sistema de direcionamento de fluxo influenciará positivamente, tanto na racionalização das operações quanto nos resultados dos ensaios.

Para se obter um bom desempenho, o sistema de direcionamento de fluxo deverá estar disposto no painel de controle, com uma clara definição dos diversos caminhos possíveis de fluxo. Neste sentido, o sistema deve ser controlado por válvulas direcionadoras realizando a distribuição do fluxo nos processos de alimentação de água no interior da câmara da célula triaxial, sucção de água na base do corpo de prova através da seringa operando no módulo *infuse* e o retorno da água da seringa operando no módulo *refill* para o reservatório de acrílico disposto no painel.

Todas estas operações do processo de fluxo deverão ocorrer simultaneamente para

permitir a utilização das duas seringas operando em módulos diferentes, sem interrupção do processo. O painel de controle existente não permitia um controle pleno de todas as funções dos processos de fluxo ocorridos durante a realização do ensaio. Para superar estas limitações, implantou-se um sistema de direcionamento de fluxo operando com um conjunto de válvulas acopladas com tubulações de nylon e conexões diversas, para permitir a circulação do fluxo dentro do circuito painel – célula – bomba de fluxo – painel. Desta forma, o sistema de direcionamento resultante, além de confuso e com muitas derivações (Figura 3.4), tinha um percurso muito longo, demandando um tempo muito grande para a operação de injeção da água da seringa para o pote de acrílico (módulo *refill*) e, assim, devido às paralisações do processo de sucção, ocorria perdas de pressão na base da célula. Por esta razão, era típico os resultados do gráfico poropressões x tempos apresentarem oscilações muito pronunciadas, quando o processo de sucção era retomado (Figura 3.11).

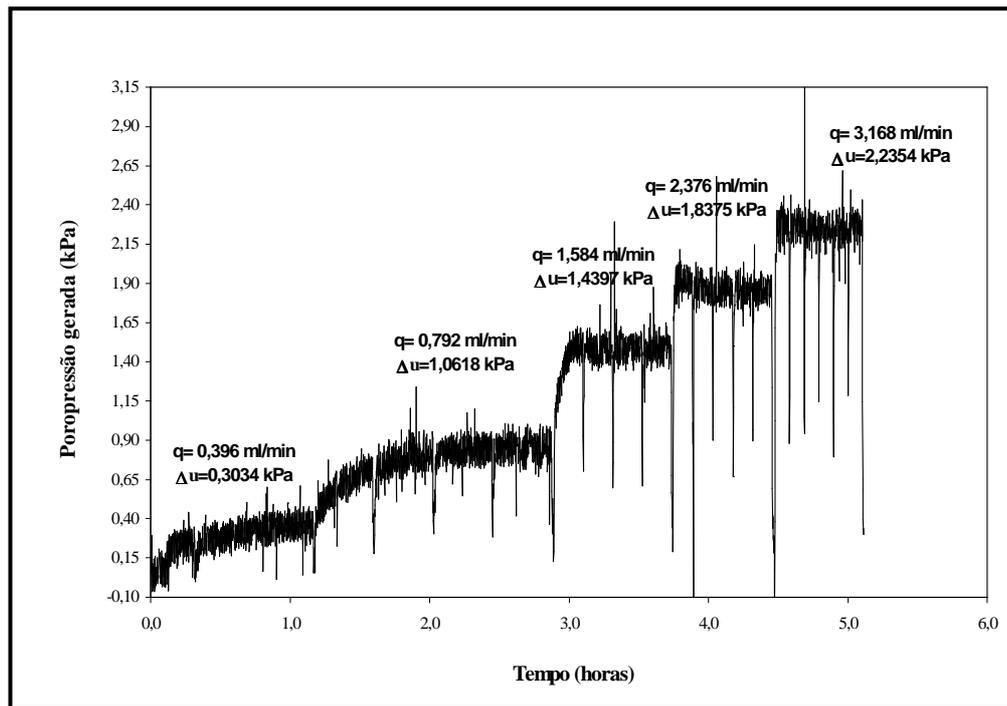


Figura 3.11 – Gráfico de ‘poropressões x tempos’ (Botelho, 2001)

### **3.3 – Metodologias dos Ensaio**

As metodologias aqui descritas abrangem os cuidados na montagem dos equipamentos, interligações dos diversos sistemas, preparação do corpo de prova e as sistemáticas estabelecidas para a execução de ensaios de adensamento HCT com o emprego da bomba de fluxo, com base na configuração originalmente proposta.

As metodologias apresentadas foram definidas a partir das técnicas propostas pelos autores dos métodos de ensaios para estudo do adensamento a grandes deformações em solos finos de alta compressibilidade e pesquisas experimentais realizadas durante os trabalhos de implementação dos equipamentos no Laboratório de Geotecnia da UFOP (Botelho, 2001; Araújo, 2005; Pereira, 2006).

#### **3.3.1 - Montagem da célula**

A montagem da célula exigia alguns cuidados, principalmente quanto aos sistemas de vedação, pois quaisquer vazamentos implicam em perdas de pressão e em caminhos preferenciais de percolação durante a aplicação do fluxo, comprometendo, assim, a acurácia dos resultados dos ensaios.

Antes da montagem da célula, todos os componentes eram submetidos a uma limpeza cuidadosa para remover qualquer impureza presente nas superfícies de contato entre as partes (particularmente em termos das ranhuras da base e do topo da célula triaxial e os anéis de vedação). O processo de limpeza exigia cuidados, de forma a se evitar danos aos componentes de maior fragilidade, sendo avaliadas as condições de funcionamento e identificados eventuais problemas por avarias ou processo de deterioração. Nos tópicos seguintes, são descritos os procedimentos usualmente adotados na metodologia dos ensaios HCT na UFOP.

##### **3.3.1.1 - Vedação da célula**

Os anéis de borracha devem ser removidos das ranhuras, e após a limpeza, deve ser feita uma inspeção visual do estado geral em que se encontram. Esta inspeção tem o intuito

de detectar defeitos que possam afetar o desempenho destes dispositivos como elementos de vedação da célula, como excesso de deformação, ranhuras na superfície, trincas de ressecamento ou alta rigidez que caracterizam processos de envelhecimento. Em caso de constatação de qualquer uma destas anomalias, os anéis afetados deverão ser substituídos. Na instalação dos anéis de borracha, deve ser aplicada previamente uma nova camada de vaselina nas ranhuras.

### **3.3.1.2 – Pedras porosas**

As pedras porosas usadas devem atender as condições de permeabilidade compatíveis com a vazão de fluxo aplicada no ensaio, de modo a não influenciar na medida das poropressões geradas na base da célula, durante a realização do ensaio na fase de aplicação da sucção. Ao mesmo tempo, elas deverão ter porosidades suficientemente baixas de modo a evitar a migração de partículas sólidas através delas quando da aplicação de sucção com valores elevados.

O fato das pedras porosas serem fixadas tanto no pedestal quanto no cabeçote, e dada à fragilidade destes componentes, nas operações de limpeza busca-se evitar a remoção das mesmas, fazendo-se a limpeza por lavagem em água corrente e, se necessário, mediante a utilização de uma escova de cerdas macias. Outra prática possível de ser utilizada é a imersão em banho com temperatura controlada de, no máximo, 70° C, para facilitar a remoção de impurezas de origem oleosa tais como vaselina, graxas, etc.

Uma vez feita a limpeza, as pedras porosas devem permanecer imersas num recipiente com água destilada, para evitar a entrada de bolhas de ar.

### **3.3.1.3 – Ligações de drenagem na base da célula**

Estas ligações são feitas por tubulações de *nylon* de pequeno diâmetro e, portanto, muito susceptíveis a dobramentos que podem causar estrangulamentos do fluxo ou até mesmo rupturas pelo processo de fadiga. Este problema era mais comum do que seria razoável, em face da sistemática da montagem e da elevada concentração de saídas na região da

base da célula (Figura 3.12).

No caso de detecção destes problemas, novos arranjos foram testados em montagens posteriores (quase sempre envolvendo um aumento geral do circuito do fluxo) e, nos casos mais crônicos, procedia-se à substituição das tubulações que eram submetidas a tais dobramentos.

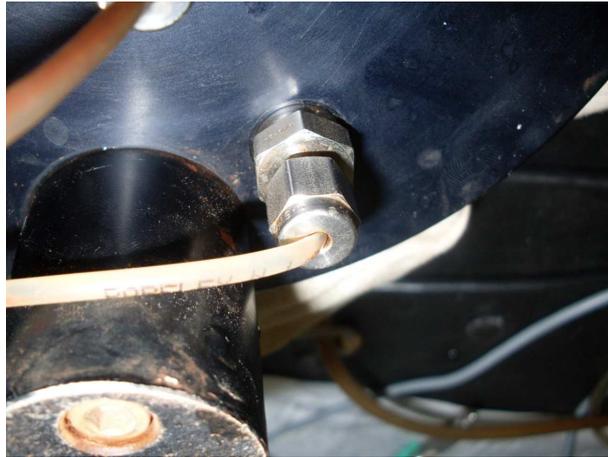


Figura 3.12 - Tubulação com estrangulamento da seção

#### **3.3.1.4 – Montagem dos componentes da célula**

Concluída a rotina de preparação dos diversos componentes da célula (Figura 3.13), tem início a montagem da célula propriamente dita para recepção e montagem do corpo de prova. O pedestal de acrílico era posicionado previamente, com especial cuidado na vedação, fazendo-se a lubrificação das ranhuras e dos anéis de borracha, conforme exposto anteriormente. Em seguida, era feita a fixação do pedestal à base da célula por meio de parafusos de fixação e se acoplava o tubo de acrílico no pedestal, que também possui sistema de vedação com anéis de borracha, igualmente lubrificados com graxa especial ou vaselina sólida filtrada.

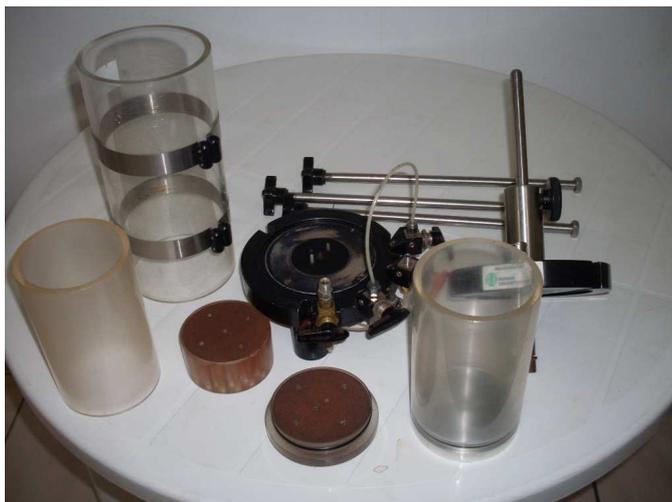


Figura 3.13 – Dispositivos componentes da célula triaxial

O tubo de acrílico possui diâmetro interno com dimensões aproximadas do diâmetro externo do pedestal, proporcionando um encaixe perfeito, garantindo a estanqueidade do conjunto. Este conjunto, tubo de acrílico acoplado ao pedestal, irá formar a câmara interna da célula, na qual será montado o corpo de prova do ensaio.

### **3.3.2 - Interligação dos Sistemas de Fluxo com a Célula**

Antes da montagem do corpo de prova na câmara interna, procedia-se à interligação de todo o sistema de circulação de fluxo com a base da célula. Este procedimento permitia a circulação de água por todo o circuito, a eliminação das eventuais bolhas de ar e garantia da saturação de todo o sistema de circulação de fluxo. Adicionalmente, era testada a eficiência das vedações para se evitar vazamentos e sua potencial correção, caso fossem detectados.

#### **3.3.2.1 – Ligação do painel de controle**

Antes de ser conectado à base da célula, o painel de controle era preparado para entrar em operação, no processo de alimentação de água no interior da câmara da célula e para receber o fluxo de retorno de água das seringas durante a execução do ensaio, quando a bomba de fluxo estivesse operando no módulo *refill*. O painel era conectado ao reservatório com água destilada e deaerada que, desta forma, garantia o suprimento de

água em um dos potes de acrílico fixados no painel. Todo o sistema de circulação de água do painel era mantido saturado, mediante o livre fluxo de água até a total eliminação das bolhas de ar oclusas no sistema.

### **3.3.2.2 – Ligação painel-célula**

Em seguida, era feita a ligação do painel com a base da célula, estabelecendo-se o sistema de suprimento de água do pote de acrílico para o interior da câmara da célula, por meio da abertura da válvula de controle de fluxo e pela percolação de água pela tubulação de ligação, eliminando-se as bolhas de ar. Nesta fase, a válvula de controle de fluxo era fechada, de modo a manter o sistema saturado e isolado dos demais sistemas.

### **3.3.2.3 – Ligação do dispositivo de distribuição contínua de fluxo**

No contexto da configuração original da montagem dos equipamentos, o sistema de distribuição contínua de fluxo era operado como um dispositivo de interface (Figura 3.14), fazendo a conexão geral do fluxo entre os diversos sistemas associados (bomba de fluxo, célula e painel de controle).

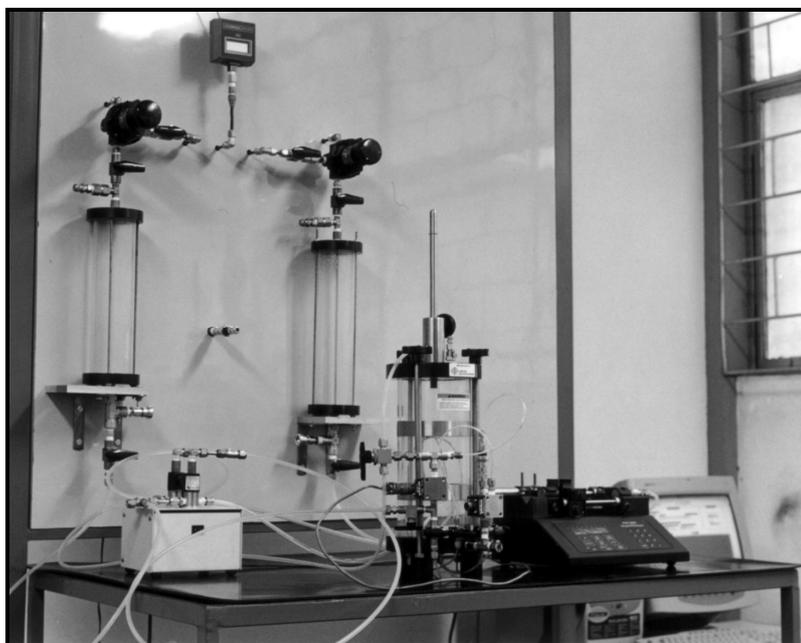


Figura 3.14 – Ligação geral do sistema de distribuição contínua de fluxo

Como se observa no esquema geral dado na Figura 3.14, o sistema de distribuição contínua de fluxo funcionava na montagem original como um ponto de convergência, ao qual estavam interligados os dois potes de acrílicos fixados no painel de controle, a célula triaxial (por meio de válvulas de comunicação com a base da mesma) e as seringas acopladas à bomba de fluxo.

O sistema possuía dois pólos de ligação, cada um com três conexões, podendo operar com a direção de fluxo de entrada ou de saída, de acordo com o módulo de operação das seringas. A primeira conexão de cada pólo era ligada diretamente uma em cada seringa, sendo controladas por uma válvula de fluxo tri-direcional que estabelecia a condição de fluxo de sucção ou de injeção, de acordo com o módulo de operação.

A segunda conexão de um dos pólos é ligada diretamente à válvula da célula em comunicação com a base do corpo de prova, enquanto que a segunda conexão do outro pólo é conectada ao pote de acrílico, que faz o suprimento da água ao interior da câmara da célula triaxial. Fechando o circuito de fluxo, a terceira conexão de cada pólo era ligada a uma conexão tipo “T”, estabelecendo-se, assim, a interligação entre o pote de acrílico que recebia o fluxo de injeção das seringas e a válvula tri-direcional de fluxo.

Nos trabalhos posteriores (Araújo, 2005; Pereira, 2006), foi adotada uma configuração mais simplificada, eliminando-se o sistema de distribuição contínua de fluxo, mediante a ligação direta do circuito de fluxo entre os três sistemas envolvidos: painel de controle – célula triaxial – bomba de fluxo (Figura 3.15).

Esta nova configuração permitia a operação das seringas mesmo durante o processo de aplicação de fluxo, direcionando o circuito de fluxo através de válvulas direcionadoras acopladas ao sistema, simplificando de maneira bem objetiva a ligação dos canais de fluxo (Figura 3.16), sem prejuízo da eficiência do processo.

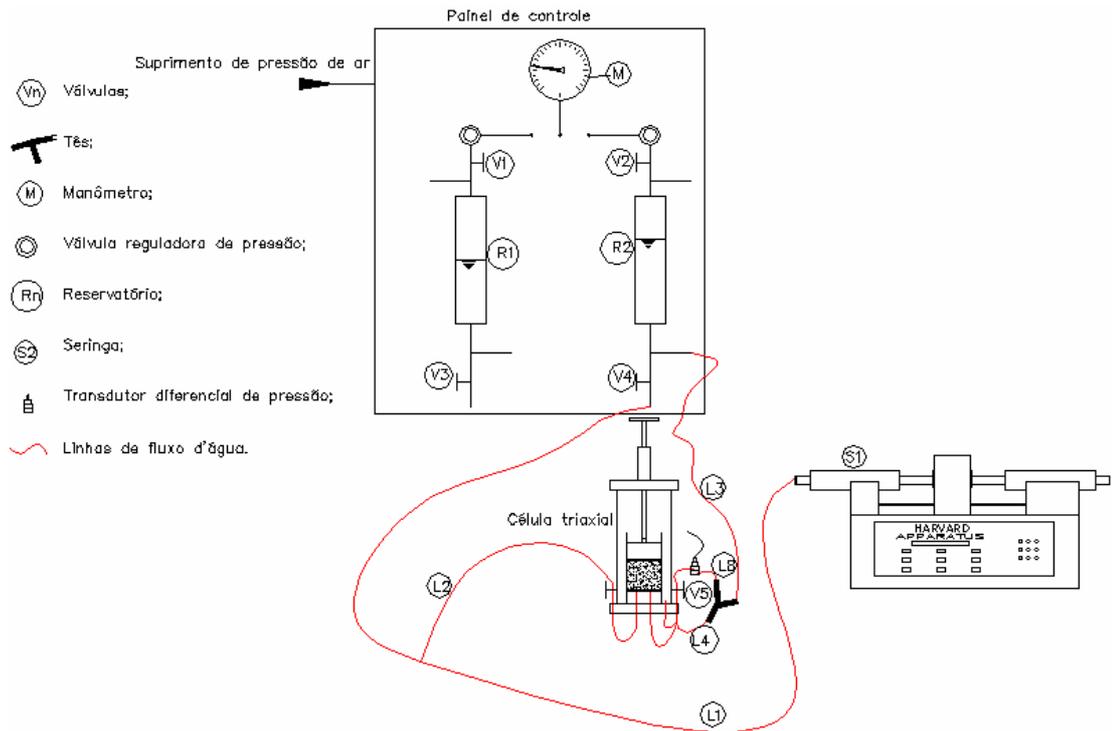


Figura 3.15 – Esquema da configuração modificada do sistema HCT (Pereira, 2006)



Figura 3.16 – Montagem da configuração modificada do sistema HCT (Pereira, 2006)

### **3.3.3 - Saturação dos circuitos de fluxo**

Depois de concluída a interligação de todo o sistema de circulação, este devia ser, então, ser completamente saturado, com a remoção das bolhas de ar oclusas no circuito de fluxo. Para proceder à saturação do sistema, a câmara externa da célula era montada, observando-se os cuidados com a vedação. Abria-se, então, a válvula de suprimento de água, ligada ao painel de controle, para encher a célula com remoção do ar através do suspiro de drenagem existente na parte superior da célula.

Depois de a célula estar completamente cheia, o fluxo do painel para a célula era garantido pela abertura da válvula de comunicação com a base do pedestal de acrílico da câmara interna, permitindo-se a circulação da água por gravidade através dos canais de fluxo. Para se estabelecer o fluxo por gravidade, o pote de acrílico de suprimento de água para a célula era mantido cheio, enquanto o pote de acrílico que recebia o fluxo de injeção ficava vazio, impondo-se ao sistema um diferencial de pressão.

O processo de saturação é automático, bastando acompanhar o caminho percorrido pela água dentro do circuito, abrindo-se, de forma controlada, as conexões de ligação para permitir a saída do ar e fechando-as depois de drenadas. Este procedimento é aplicado até se estabelecer o fluxo contínuo da água de um pote de acrílico para o outro, sem a presença de bolhas de ar ao longo de todo o circuito.

Durante o processo de saturação, o pote de acrílico de suprimento de água deverá permanecer cheio, enquanto o pote de acrílico que recebe a injeção de fluxo deverá estar com a válvula superior aberta para a atmosfera.

Para se certificar da eficiência da saturação do sistema, deve-se fazer um teste de aplicação de fluxo, interrompendo o fluxo de suprimento de água para o interior da célula, fechando a válvula de comunicação com o pote de acrílico de suprimento de água para o sistema. Aplicam-se, então, fluxos sucessivos de sucção e injeção na base da câmara interna da célula, utilizando a bomba de fluxo com uma velocidade de fluxo mais alta, e observa-se o possível surgimento de bolhas de ar dentro do sistema. No caso deste evento ocorrer, desliga-se a bomba de fluxo e repete-se o processo de saturação

conforme descrito anteriormente, drenando as bolhas de ar existentes.

Depois de garantida a perfeita saturação de todo o sistema, a célula deverá ser esvaziada, removendo-se a câmara externa da célula, para se proceder à montagem do corpo de prova. Nesta operação, a câmara interna da célula deverá ser esvaziada sem ser removido o tubo de acrílico do pedestal, utilizando-se uma seringa de borracha para sucção da água. Antes da sucção completa, deverá ser colocado um papel filtro sobre a pedra porosa do pedestal, removendo-se, então, o restante da água. Este procedimento evitará que a água seja removida em excesso, desidratando-se a pedra porosa.

### **3.4 - Preparo do corpo de prova e sua montagem na câmara triaxial**

As metodologias de preparo do corpo de prova para a execução do ensaio de HCT com o emprego da bomba de fluxo são variáveis em função da natureza da amostra ensaiada e dos métodos de obtenção destas amostras.

Uma vez que esta metodologia é mais indicada para o estudo da compressibilidade de solos finos de alta compressibilidade, propõe-se a utilização potencial deste ensaio para subsidiar projetos de engenharia ou de pesquisa envolvendo lamas muito finas e muito fluídas, que podem ser, por exemplo:

- lamas resultantes dos processos de beneficiamento das minerações de caulim e bauxita;
- lamas ou rejeitos finos de várias modalidades de mineração, onde os processos de beneficiamento incluam moagem e flotação;
- lamas obtidas nos processos de ciclonagem dos rejeitos (*overflow*);
- rejeitos totais dos processos de lavagem, onde as impurezas removidas são constituídas basicamente por materiais argilosos.

Quanto ao processo de coleta ou obtenção destas amostras, o mais comum é que elas sejam coletadas em forma de polpa, com dosagem variada de sólidos e água, tal como saem dos processos geradores para os locais de disposição ou mesmo nos reservatórios, depois de lançadas. Estas amostras normalmente são coletadas em recipientes (galões,

bombonas, potes, etc.), que garantam a preservação das características das mesmas, sem perdas ou contaminação, até a sua utilização em laboratório.

### 3.4.1 - Preparo do corpo de prova

As amostras encaminhadas ao laboratório, atendendo as premissas já abordadas, serão homogeneizadas dentro do próprio recipiente de armazenamento ou transferidas para outro recipiente mais adequado, a fim de que a porção de amostra tomada para a realização do ensaio seja a mais representativa possível da amostra total.

A porção tomada como amostra representativa, em quantidade suficiente para a realização do ensaio, será submetida a processo de homogeneização até se obter uma consistência bem fluida, adicionando-se água destilada caso for necessário (Figura 3.17). Uma vez bem homogeneizada, uma pequena porção da mesma deverá ser pesada e seca em estufa para a determinação do teor de sólidos contido na mistura.

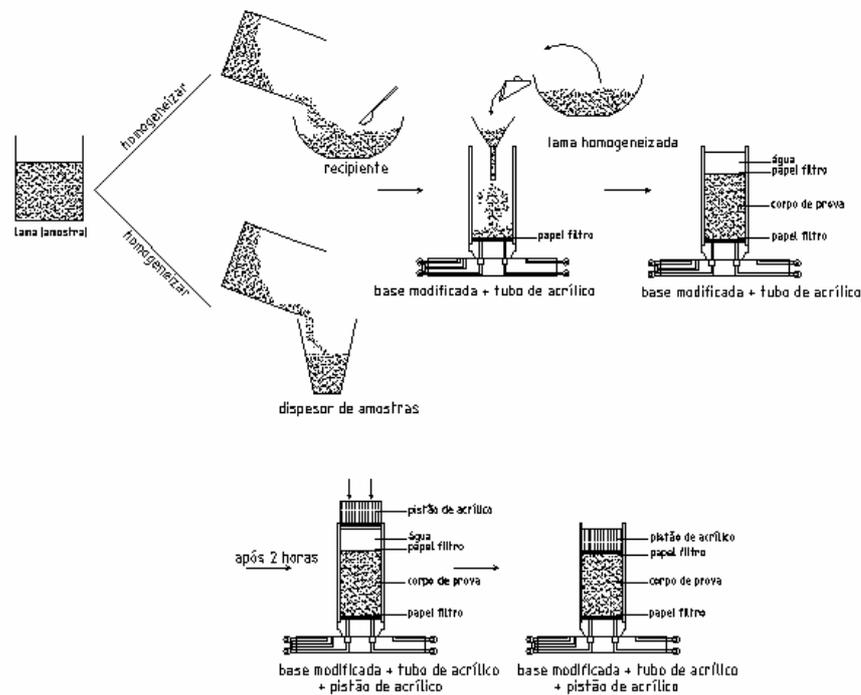


Figura 3.17 – Preparação e montagem do corpo de prova (Botelho, 2001)

### **3.4.2 - Montagem do corpo de prova**

Na montagem do corpo de prova, o cuidado principal reside na determinação correta dos índices físicos iniciais, que servirão de base para o cálculo dos índices de vazios nas diversas fases do ensaio. Assim, é importante a determinação precisa da massa total da polpa utilizada na montagem do corpo de prova.

O procedimento mais correto para se determinar a massa da polpa utilizada consiste em pesar antes da montagem todo o conjunto utilizado na operação (recipiente contendo a polpa, concha e funil). Com o funil posicionado no tubo de acrílico da câmara interna da célula, e utilizando uma concha, coloca-se a polpa no funil (Figura 3.17), preenchendo a câmara até a altura desejada, cuja altura ideal para o corpo de prova deve ser de aproximadamente 5cm (Botelho, 2001). Em seguida, pesa-se novamente o conjunto (recipiente com o restante da polpa, concha e funil). A diferença entre os pesos inicial e final define, então, o peso efetivo da polpa utilizada no ensaio. A altura inicial do corpo de prova também deverá ser determinada por paquímetro ou uma régua graduada.

Na seqüência, coloca-se um papel filtro sobre o topo do corpo de prova e adiciona-se, cuidadosamente, uma camada de água destilada de cerca de 5 cm de espessura. Após a montagem, o corpo de prova ficará em repouso por um tempo mínimo de duas horas. Este procedimento é necessário para se evitar a extrusão da polpa durante a colocação do cabeçote de acrílico no topo do corpo de prova.

Após o período de repouso, o cabeçote de acrílico é colocado no topo do corpo de prova, deixando-o descer livremente. Esta descida é lenta, pois a água irá percolar lentamente pela pedra porosa existente no cabeçote, até este se apoiar no topo do corpo de prova, sem riscos de danos. A altura do corpo de prova deverá ser novamente medida, sendo tomada como a altura inicial de referência, para a determinação das variações de altura tomadas durante o ensaio.

Após a montagem da câmara externa da célula triaxial, abre-se a válvula de suprimento de água, enchendo-se completamente a câmara e drenando-se as bolhas de ar através do suspiro existente no topo da célula. O pistão da célula já portando o extensômetro nele

fixado é, então, destravado, fazendo-se o mesmo descer cuidadosamente até tocar de leve o cabeçote de acrílico, travando-se novamente o pistão da célula. É feito então o ajuste do extensômetro com uma leitura inicial de referência, para a determinação das medidas das deformações durante o ensaio.

O pistão da célula será mais uma vez destravado, permitindo-se que o corpo de prova seja adensado sob a ação do seu peso próprio e da tensão efetiva causada pelo peso do conjunto formado pelo cabeçote de acrílico e o pistão da célula, durante um período de vinte e quatro horas.

### **3.5 - Execução do Ensaio HCT com bomba de fluxo**

Após a fase de adensamento do corpo de prova sob a ação do peso próprio e do peso do conjunto cabeçote de acrílico mais pistão da célula, são feitas as medidas das variações de altura pelo extensômetro, determinando-se as alturas atualizadas do corpo de prova. Em seguida, o ensaio de adensamento por percolação induzida pode ser iniciado.

#### **3.5.1 – Ensaio de adensamento por percolação induzida**

Inicialmente deve ser ligado o sistema de aquisição de dados, abrindo-se a válvula da base da célula que está ligada ao transdutor diferencial de pressão, fazendo-se, então, a leitura da poropressão na base do corpo de prova. Em seguida, liga-se a bomba, juntamente com o dispositivo de distribuição contínua de fluxo, programando no painel da bomba de fluxo o módulo de operação de acordo com o posicionamento das seringas (*infuse/refill*), selecionando-se a velocidade de fluxo (vazão de fluxo em ml/min.). É conveniente fazer também a programação do volume máximo a ser removido em cada seringa, pois, assim, a bomba de fluxo irá interromper automaticamente sua operação no momento que este volume for atingido.

Quanto à velocidade de fluxo adotada, não se pode estabelecer um valor definido, porém o valor inicial não deve ser muito alto, e se resultar em poropressões geradas com valores muito baixos, a velocidade de fluxo pode ser aumentada gradativamente até

se obter valores satisfatórios. De acordo com Zinidarcic *et al.* (1992), as poropressões geradas na base do corpo de prova não deverão ser menores que 0,3 kPa e nem maiores que 10 kPa, sendo sugeridos valores entre 2 kPa e 5 kPa.

Na montagem, esta condição era obtida pela abertura da válvula de comunicação da base do corpo de prova com as seringas, bomba de fluxo ligada no módulo *infuse* e pelo acionamento do sistema de aquisição de dados. A bomba de fluxo passa a retirar água da base do corpo de prova, impondo ao mesmo um fluxo descendente.

As partículas sólidas submetidas às ações das forças de arraste induzidas pelo fluxo descendente tendem a se deslocar no mesmo sentido, aproximando-se umas das outras e promovendo o adensamento da amostra, registrado pelas variações da altura do corpo de prova, medidas pelo extensômetro.

As poropressões geradas na base do corpo de prova são medidas continuamente pelo transdutor diferencial de pressão, sendo registradas no gráfico ‘poropressões x tempos’, exibido no monitor do sistema de aquisição de dados.

O ensaio deve ser conduzido até se alcançar um estado estabilizado no valor das poropressões geradas. Se este estado permanente não for atingido com o volume de uma só seringa, altera-se o regime da bomba de fluxo para o módulo *refill*, invertendo-se a operação das seringas. Desta forma, a seringa que estiver cheia passará a injetar a água para o pote de acrílico no painel de controle, enquanto que a outra seringa, agora vazia, dá continuidade ao processo de sucção, retirando água da base do corpo de prova.

Concluído o estágio de adensamento por fluxo induzido, a bomba deverá ser desligada e o pistão da célula triaxial travado, fazendo-se a leitura da variação de altura registrada no extensômetro, para a determinação da altura final do corpo de prova nesta fase do ensaio.

### 3.5.2 - Ensaio de permeabilidade

Terminado o estágio de adensamento por fluxo induzido, implementa-se o ensaio para a medida da permeabilidade do corpo de prova para a condição de índice de vazios final de adensamento. Para isso, aplica-se um fluxo descendente ao corpo de prova, sob a ação da sucção imposta pela bomba de fluxo operando em baixa velocidade. Esta velocidade deverá ser da ordem de 10 vezes menor que a velocidade aplicada no estágio de adensamento induzido. Desta forma, as poropressões geradas na base do corpo de prova seriam insuficientes para gerar um novo adensamento, uma vez que o corpo de prova já teria antes sido submetido a tensões efetivas bem superiores.

A velocidade de fluxo a ser aplicada é então programada no painel da bomba, bem como o módulo de operação da seringa (neste caso, o módulo *refill*), acionando-se a bomba simultaneamente com o sistema de aquisição de dados e iniciando a aplicação do fluxo descendente pela retirada de água na base do corpo de prova.

As poropressões geradas são medidas pelo transdutor diferencial e continuamente registradas pelo sistema de aquisição de dados. O ensaio será conduzido até a obtenção do estado permanente de desenvolvimento das poropressões, condição passível de individualização por meio do gráfico exibido no monitor.

# CAPÍTULO 4

## 4 – ENSAIO HCT MODIFICADO COM BOMBA DE FLUXO

### 4.1 – Planejamento das Intervenções

Apesar da relevância e da condição operacional corrente do equipamento HCT com bomba de fluxo do Laboratório de Geotecnia da UFOP, eram reconhecidas as limitações e dificuldades operacionais do mesmo, implantado segundo um modelo pré-existente na Universidade de Boulder no Colorado (EUA), sem grandes intervenções adicionais.

Entretanto, a execução de diferentes ensaios para a determinação principalmente das leis de compressibilidade e de permeabilidade de diferentes rejeitos de mineração, mostrou algumas deficiências operacionais das montagens propostas, uma superposição de tarefas plenamente descartáveis durante os ensaios e o não aproveitamento de todos os recursos disponíveis, em termos de execução e da aquisição automatizada dos dados.

Para suprir tais problemas e promover uma melhoria das condições do ensaio, diferentes intervenções foram feitas nos arranjos subseqüentes, quase sempre de caráter limitado e com o propósito de se resolver rapidamente problemas operacionais específicos. Outro grande problema detectado referiu-se à própria natureza dos materiais utilizados na montagem original, muitas vezes com vida útil limitada (caso típico das válvulas de controle de fluxo) ou com características de qualidade que exigiam manutenção contínua (exemplo típico as tubulações de *nylon* do circuito de fluxo). Além dos impactos operacionais descritos, os próprios resultados dos ensaios poderiam ser comprometidos pelos arranjos e montagens efetuadas, seja por vazamentos, seja pela dificuldade de se garantir a saturação completa do circuito de fluxo, seja pelos efeitos nos próprios resultados dos ensaios (Figura 3.11).

Com base nestas premissas e a partir da avaliação crítica detalhada do equipamento HCT com bomba de fluxo da UFOP, bem como da reavaliação da sistemática adotada

nas séries de ensaios realizados no mesmo, estabeleceu-se um planejamento geral de intervenções visando a otimização do equipamento e da própria metodologia do ensaio, consubstanciado pelas seguintes proposições:

- i. Confeção de um novo painel de controle, posicionando-se todos os dispositivos de controle agregados ao painel, de forma a se obter uma definição objetiva dos circuitos de fluxo;
- ii. Implementação de um novo e mais completo sistema de aquisição de dados;
- iii. Implantação de instrumentação eletrônica para aquisição automática das medidas das deformações, substituindo-se o extensômetro analógico;
- iv. Implantação de um novo sistema de aplicação de cargas, com a substituição do sistema de prato rígido acoplado diretamente no pistão da célula, por um sistema móvel e rotular em todas as direções;
- v. Introdução do sistema de inversão de sentido do fluxo, através de válvulas solenóides, com comando eletrônico de funcionamento, operando interligado aos módulos de operação da bomba de fluxo;
- vi. Calibração direta dos instrumentos de medição com o sistema de aquisição de dados, no âmbito do novo programa computacional instalado.

O processo de otimização foi desenvolvido de acordo com a concepção prévia do equipamento e utilizando os mesmos componentes principais do sistema original. No mais, foram aplicados livremente os princípios da ‘técnica de otimização operacional’ que, em última análise, significa ‘explorar a simplicidade e a eficiência operacional de sistemas complexos, garantindo, além da acurácia dos resultados, a ordem natural dos procedimentos e a clareza na disposição dos diversos componentes do sistema’. Nesta ótica, foram implementadas as melhorias descritas nos tópicos seguintes. De princípio, por não exercer nenhuma função básica no sistema de aplicação de fluxo, funcionando apenas como vias de escoamento, o sistema de distribuição contínua de fluxo foi sumariamente suprimido nas novas montagens do ensaio HCT modificado da UFOP (designado a seguir como ensaio HCT – M da UFOP).

Como consequência óbvia, todo o aparato experimental foi desmontado, impedindo a sua utilização continuada por um período de cerca de dois anos. Neste trabalho, foram

identificadas e caracterizadas cada peça isoladamente do conjunto, a qual foi objeto de avaliação cuidadosa e detalhada, em termos de qualidade, exigências de manutenção, avarias potenciais e estado geral de conservação.

## **4.2 - Painel de controle**

Inicialmente, foi desenvolvido um painel de controle de teste, utilizando-se uma placa de laminado tipo MDF e sendo adotadas diferentes tentativas de montagem, de forma a se obter uma distribuição ordenada e harmônica dos diversos componentes. Por meio de simulações das técnicas de operação utilizadas durante os ensaios, definiu-se a ordem de distribuição dos componentes básicos necessários para o controle de suprimento de água na alimentação do fluxo, recepção do fluxo de retorno de injeção das seringas e o controle de acionamento e interrupção do fluxo.

A partir desta ordem pré-estabelecida, foram definidos os componentes do sistema e iniciadas as primeiras montagens experimentais, fazendo-se o ajuste das combinações dos elementos de interligação e das dimensões das peças a serem construídas e os materiais a serem utilizados, de forma a combinar funcionalidade e estética, resistência e leveza de todo o conjunto.

### **4.2.1 - Potes de acrílico**

Para as funções de alimentação de água para a célula triaxial e recepção do fluxo de injeção das seringas da bomba de fluxo, foram confeccionados dois potes iguais de acrílico, compostos por um tubo com dimensões de 7,6cm de diâmetro e 35,0cm de comprimento e duas placas de acrílico em forma de prismas, com dimensões de 10,0cm de lado e 2,0cm de espessura. A montagem dos potes foi feita por meio de tirantes posicionados na base e no topo do tubo, utilizando-se anéis de borracha (*o-rings*) para vedação, obtendo-se potes hermeticamente fechados e capacidade de armazenamento de aproximadamente 1.500ml de água cada um (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Pote de acrílico da montagem do Ensaio HCT - M

Os potes de acrílico foram fixados de forma simétrica nas extremidades laterais do painel e posicionados com alturas adequadas para permitir o escoamento por gravidade durante o suprimento de água na célula triaxial.

#### **4.2.2 - Manômetro de pressão**

Visando a utilização do sistema para outras aplicações, foi adicionado à montagem um manômetro capaz de medir pressões mais elevadas que aquelas exigidas nos ensaios HCT convencionais, para utilização do sistema em outros ensaios. O manômetro, projetado com características estéticas para se harmonizar com o painel de controle, foi confeccionado pela RECOR S.A. com diâmetro de 100,0mm, capacidade de trabalho de 0,0 até 10,0bar e montado em caixa de aço inox (Figura 4.2), com acabamento frontal também em aço inox e saída horizontal.

O manômetro foi posicionado de forma centralizada na parte superior do painel, sendo interligado aos dois potes de acrílico, podendo controlar pressões oriundas de qualquer sistema de geração de pressão que for aplicada ao arranjo do ensaio.



Figura 4.2 – Manômetro de pressão da montagem do Ensaio HCT - M

#### 4.2.3 - Sistemas de interligação

Para estabelecer a interligação entre os componentes do painel e o controle das direções de fluxo, foram implantados três sistemas de interligação no sentido horizontal e dois sistemas de interligação no sentido vertical (Figura 4.3), todos construídos com tubos de aço inox, nódulos de alumínio anodizado, válvulas de esfera e conexões de ligação e sistema de vedação através de anilhas de teflon.

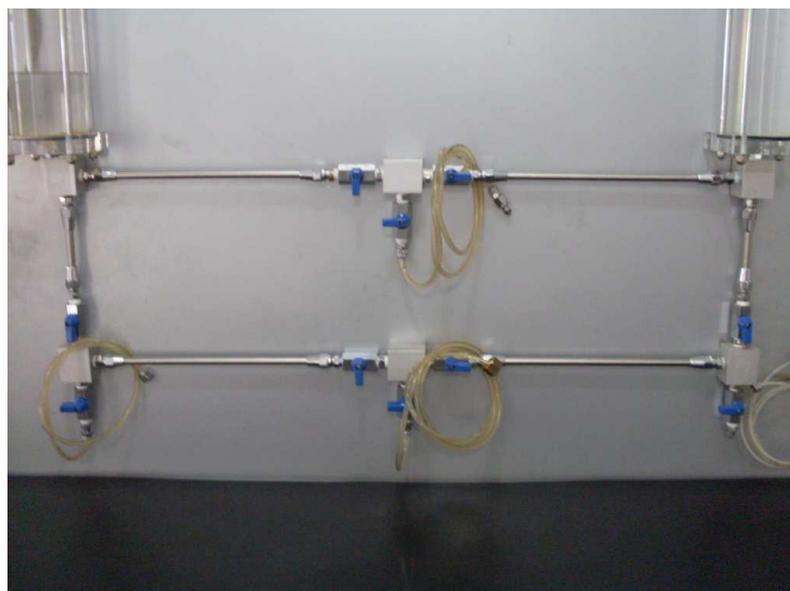


Figura 4.3 – Sistemas de interligação do painel da montagem do Ensaio HCT - M

Cada um dos sistemas exerce as seguintes funções de operação dentro do painel de controle:

- O sistema de interligação horizontal superior estabelece a comunicação entre os dois potes de acrílico entre si, com o manômetro de pressão e com a alimentação de suprimento de água do reservatório externo para os potes. O controle do direcionamento de fluxo livre ou sob pressão é exercido por um conjunto de três válvulas de esfera, conectados em um nódulo de alumínio anodizado, constituindo três vias de fluxo.
- O sistema de interligação horizontal central estabelece a comunicação entre os dois potes de acrílico, através das placas da base, com o fluxo controlado por um conjunto de três válvulas de esfera, conectadas em um nódulo de alumínio anodizado com três vias de fluxo. Este sistema permite a circulação da água de qualquer um dos potes para alimentação de água para o interior da célula triaxial durante o ensaio, podendo também ser utilizado para drenagem de bolhas de ar ou a transferência de pressão do painel para a célula triaxial.
- O sistema de interligação horizontal inferior possui três conjuntos de distribuição de fluxo, cada um deles composto de três válvulas de esfera conectadas em um nódulo de alumínio anodizado, com três vias de fluxo. Este sistema tem a função de direcionar o fluxo de injeção de água das seringas da bomba de fluxo para um dos potes de acrílico.
- Os dois sistemas de interligação vertical permitem a conexão direta do sistema horizontal inferior com os dois potes de acrílico, criando assim outras opções de direcionamento de fluxo.

Depois de concluída a montagem dos componentes do painel de controle, elaborou-se o arranjo da montagem definitiva, definindo-se a posição de cada elemento e as dimensões das vias de fluxo, de forma a obter uma configuração harmoniosa de todo o

sistema de controle agregados ao painel dentro do espaço planejado. Em seguida, foram realizados testes de circulação de água em todo o sistema, com posterior aplicação de pressão, para detecção de eventuais vazamentos e correção antes da montagem final no painel definitivo.

O painel definitivo foi construído em chapa de alumínio com espessura de 3,0mm, com acabamento em pintura eletrostática, com dimensões de 120 x 100 cm. Superpondo-se o painel de teste sobre o painel definitivo, foram feitas as furações necessárias à fixação dos vários componentes, obtendo-se o arranjo final do painel de controle (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Painel de controle do Ensaio HCT [arranjo novo (a) e arranjo original(b)]

### 4.3 - Bancada de trabalho

A bancada de trabalho foi planejada de forma a incluir também o painel de controle, conformando os dois conjuntos em uma única peça, com uma configuração bem compacta. Desta forma, além da plataforma principal, destinada a portar os equipamentos utilizados no ensaio, foi criada uma segunda plataforma de dimensões menores, posicionada abaixo da plataforma principal. Esta bancada inferior é destinada a suportar os equipamentos utilizados para o sistema de aquisição de dados durante o ensaio, como computador, monitor, etc., evitando-se, assim, a necessidade de utilização de uma segunda bancada independente no espaço do laboratório.

Na sua construção, visando a integração estética do conjunto, optou-se inicialmente pela aplicação de perfis de alumínio anodizado para a montagem das estruturas, compatíveis com a utilização de alumínio acrílico e aço inox no painel de controle. No entanto, os perfis de alumínio anodizado disponíveis comercialmente no mercado, não ofereciam a rigidez necessária para a construção de uma bancada resistente e estável. A solução adotada, então, consistiu na aquisição de uma bancada pré-montada, fabricada pela empresa ABG - Automação e Sistemas, utilizando perfis de alumínio KANYA, de alta resistência, com junções entre as peças por meio de conectores universais.

A bancada pré-montada foi complementada utilizando-se chapas de alumínio para o fechamento das laterais da estrutura de sustentação do painel de controle e por peças de ferro das duas plataformas (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Bancada de trabalho do Ensaio HCT - M

#### **4.4 - Sistema de aquisição de dados**

O novo sistema de aquisição de dados foi implementado para automatizar o processo de aquisição de leituras de deformações e de poropressões, substituindo o sistema anterior que, além de ineficiente, permitia poucas intervenções em termos de uma melhoria efetiva de desempenho do mesmo.

O sistema utilizado foi o *Spider 8*, fabricado pela HBM, que utiliza alimentação de 12V em tensão contínua, fornecida por uma fonte com alimentação de 110 ou 220V e 60Hz, que acompanha o equipamento. O sistema possui 4 canais de entrada universal para conexão direta de transdutores, sem necessidade de condicionadores de sinais, e outros 4 canais de entrada de sinais analógicos, que podem ser convertidos em entradas universais através de módulos de expansão (Figura 4.6).

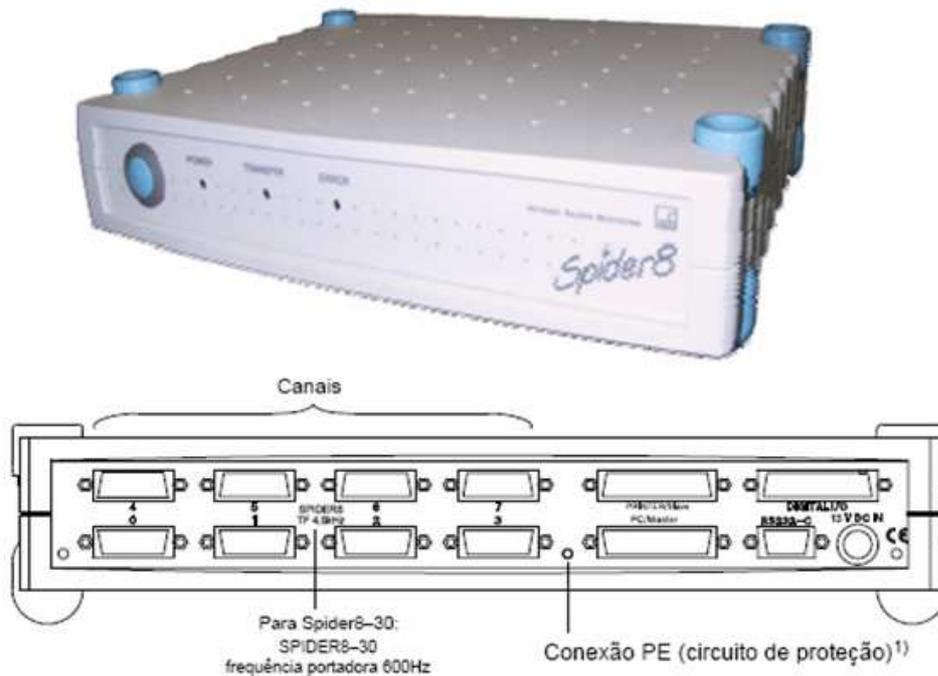


Figura 4.6 – Novo sistema de aquisição de dados do Ensaio HCT - M

O sistema *Spider 8* foi conectado utilizando-se comunicação por porta paralela, embora permita também conexão via porta serial ou USB, desde que se utilize um adaptador para estas condições. Com o sistema de aquisição de dados, é fornecido também o *Software Catman 4.5*.

Esta plataforma, de propriedade da própria HBM, roda em ambiente *Windows* (Figura 4.7) e permite a configuração do *Spider 8* e a criação de painéis de supervisão personalizados para a aquisição de dados, como indicadores, gráficos e tabelas, além de permitir a exportação dos dados coletados para vários formatos, como por exemplo, planilha do Excel (dados do tipo *.xls*).

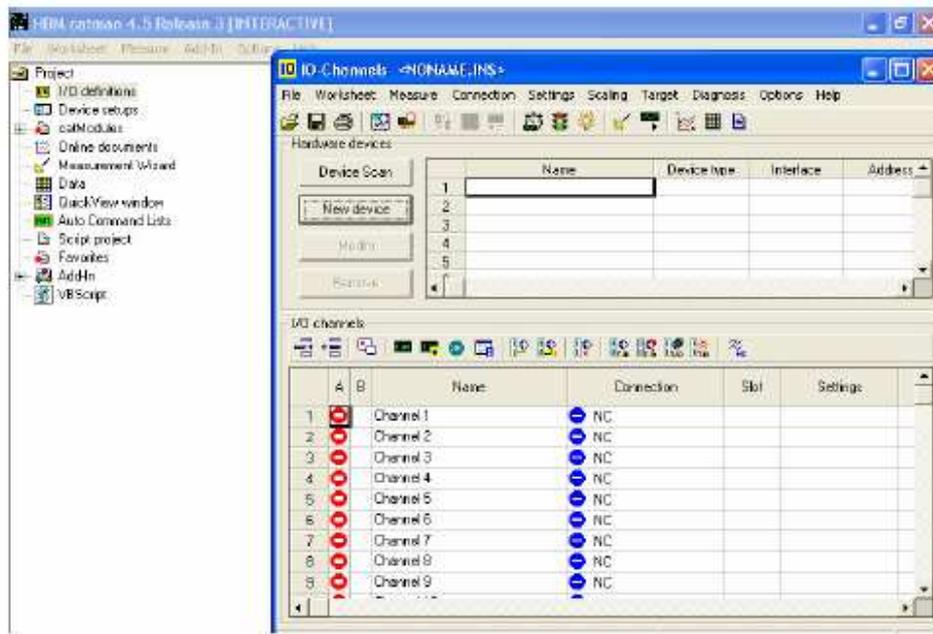


Figura 4.7 – Interface de configuração do programa *Catman 4.5*.

#### 4.5 - Sistema de instrumentação eletrônica

Para a aquisição das medidas de deformações verticais, o extensômetro anteriormente utilizado foi substituído por um transdutor do tipo linear de posição resistivo (LVDT). O modelo utilizado é o PY2, fabricado pela GEFTRAN, com curso útil de 50mm (Figura 4.8). Este transdutor transforma o deslocamento linear em variação de resistência em circuito de meia ponte, permitindo a ligação no HBM *Spider 8*.



Figura 4.8 – Transdutor de deformação linear (LVDT)

O transdutor resistivo foi conectado à entrada universal através de um conector de 15 pinos (Figura 4.9a). O esquema de ligação é apresentado na Figura 4.9b, que mostra o circuito de ligação de transdutores resistivos de meia ponte no sistema HBM Spider 8.

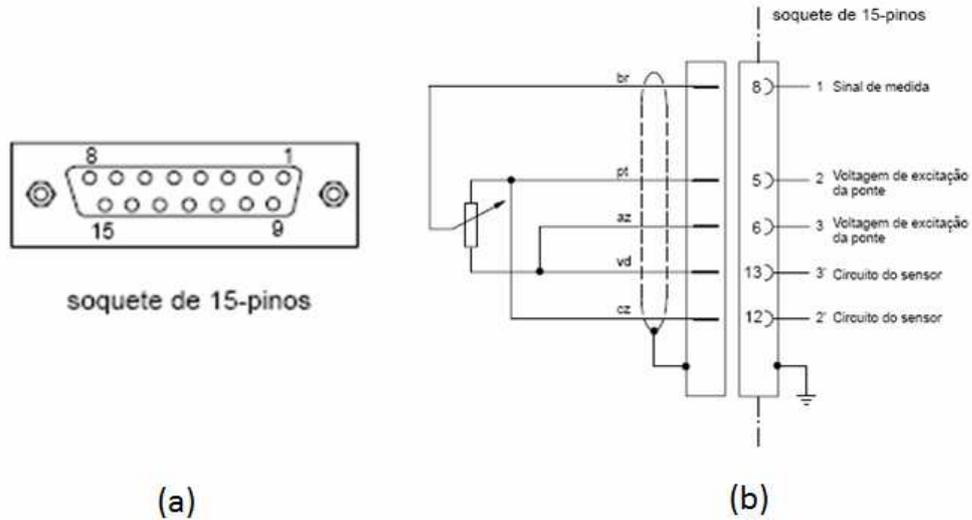


Figura 4.9 – Conexão (a) e esquema de ligação meia ponte (b) para potenciômetros.

#### 4.6 - Sistema de medição de pressões

O novo sistema de medição de pressões foi implementado visando a redução de ruídos, aumentando a exatidão dos resultados. Para isso, o transdutor diferencial de pressão utilizado anteriormente foi substituído por um transmissor de pressão, Modelo S-10m de fabricação da *Wika*, com faixa de trabalho de -1,0 a +1,5 bar e saída de 4 a 20 mA. (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Transmissor de pressão do Ensaio HCT - M

Esse transmissor é alimentado por uma fonte externa de 12V DC, ligada em 110V. O transmissor de pressão transforma a pressão nele aplicada em um sinal de corrente padrão de 4 a 20 mA, sendo este sinal já condicionado, permitindo, portanto, uma ligação direta a uma entrada analógica do sistema de aquisição de dados.

O transmissor foi fixado ao painel de controle através de um nódulo de alumínio anodizado, possuindo uma válvula de esfera para drenagem e alívio de pressões e uma saída de tubulação que faz a conexão com a base da célula triaxial. Os sinais de saída são transmitidos ao sistema de aquisição de dados através de um conector de 5 pinos, conectado à entrada analógica do *Spider 8* (Figura 4.11a). O esquema de ligação é apresentado na Figura 4.11b, mostrando o circuito de ligação de fontes de corrente contínua ao sistema *HBM Spider 8*.

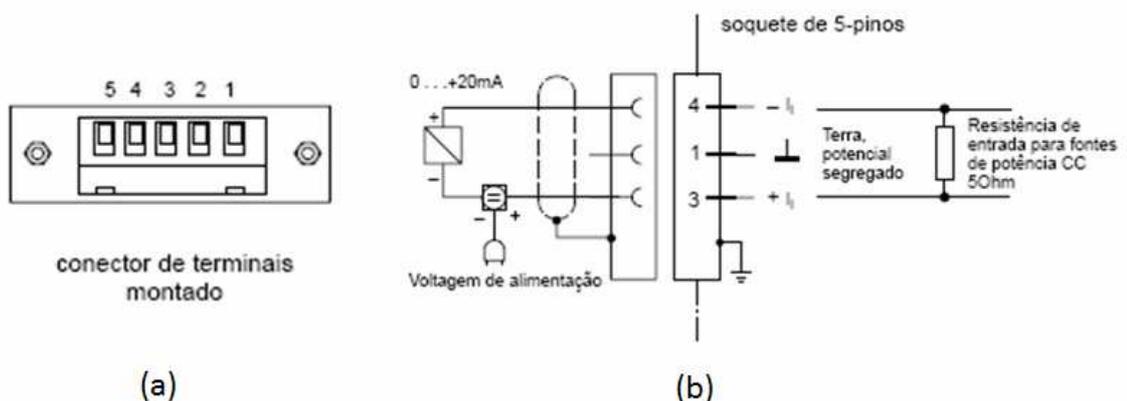


Figura 4.11 – Conexão (a) e esquema de ligação (b) para corrente contínua com fonte de alimentação externa.

#### 4.7 - Sistema de aplicação de cargas

O novo sistema de aplicação de cargas foi implementado para substituir o sistema de plataforma rígida acoplada ao pistão da célula por um sistema pendular de contato com o pistão da célula por meio de uma rótula, garantindo-se, assim, a centralidade de movimento do pistão e o não atrito com o embuchamento da célula. O sistema é composto por um pórtico com um pendural acoplado.

O pórtico é constituído por duas barras ocas de aço inox, interligadas por dois tirantes também em aço inox, compondo um quadro no qual a barra superior tem a função de trave. Nesta barra está fixada a rótula que faz o contato com o topo do pistão da célula, transmitindo a carga aplicada ao cabeçote de acrílico posicionado no topo do corpo de prova.

A barra inferior recebe a ligação do pendural que, por sua vez, é composto por uma haste com dois discos associados, formando duas plataformas distintas para a aplicação de carga (Figura 4.12). Assim, os pesos menores podem ser colocados na plataforma superior, enquanto os pesos maiores são colocados na plataforma inferior.



Figura 4.12 – Pórtico e pendural para aplicação de cargas do Ensaio HCT - M

Esta configuração com duas plataformas evita a formação de uma pirâmide invertida, que acontece quando os pesos são colocados em uma plataforma única, como no caso do disco acoplado direto no pistão da célula.

Além disso, o novo sistema permite a aplicação de cargas maiores, podendo a etapa de carregamento ser conduzida até tensões efetivas da ordem de 200 kPa. Este valor de tensão corresponde a uma carga aplicada de aproximadamente 124 kg, bem inferior à carga de teste aplicada ao sistema, que foi de 180 kg, que não indicou quaisquer deformações ou flambagem na estrutura do pórtico utilizado.

#### 4.8 - Sistema automático de reversão de fluxo

A aparelhagem do sistema automático de reversão de fluxo é produzida pela *Harvard Apparatus*, operando com 120V e frequência de 60Hz. Este aparelho possui uma configuração eletrônica composta por um *driver* (Figura 4.13) que, quando conectado à bomba de fluxo, atua em consonância com os comandos de inversão dos módulos (*infuse/refill*). Os dados são interpretados e transmitidos para comando por duas válvulas solenóides, que atuam em situação de operações inversas, ou seja, ao receber o comando de mudança da direção do fluxo, a válvula que estava com o fluxo orientado em uma dada direção, bloqueia o fluxo nesta direção e abre o fluxo na direção oposta.



(a)



(b)

Figura 4.13 – Sistema de reversão automática de fluxo (a) e *driver* de comando das válvulas solenóides (b).

Desta forma, as duas válvulas, agindo simultaneamente, promovem a inversão do fluxo nas duas seringas. Assim, a seringa que operava com sucção de água na base da célula e que, neste momento, estaria cheia, passa a operar fazendo a injeção da água para o pote de acrílico; ao mesmo tempo, a outra seringa, que operava com injeção de água para o pote de acrílico e que, no momento da inversão, estaria vazia, passa a operar fazendo a sucção de água na base da célula, dando continuidade ao processo de fluxo. As válvulas solenóides são componentes eletrônicos que atuam principalmente como posicionadores em operações de alta precisão. Neste sistema, as válvulas solenóides permitem a inversão do fluxo em apenas dois décimos de segundo.

# CAPÍTULO 5

## 5 – ENSAIO HCT – M DE VALIDAÇÃO

### 5.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio realizado em amostra de rejeito de bauxita, compreendendo ensaios de caracterização tecnológica e ensaio HCT com bomba de fluxo, com o objetivo de se estabelecer a validação do novo aparato instrumental, obtido a partir das intervenções realizadas no equipamento existente no Laboratório de Geotecnia da UFOP.

A amostra ensaiada constitui a parte fina dos subprodutos gerados no processo de beneficiamento de bauxita da empresa Mineração Rio Pomba Cataguases, na Unidade de Mercês, em Mercês/MG. O minério é beneficiado na planta local pelo processo de lavagem simples, sendo recuperadas as frações com diâmetro acima de 4,8mm (equivalente à peneira #4 da ABNT), sendo as frações passantes descartadas em um reservatório formado por barragem de contenção.

Ao serem lançados no reservatório por via úmida, os rejeitos se sedimentam de forma segregada, formando uma praia composta de rejeitos grosseiros que vão desde pedregulhos do minério não recuperado, até areias silicosas grossas, médias e finas. Conduzidas por arraste, as frações finas de siltes e argilas formam um depósito de lamias de consistência fluida, sedimentadas no entorno do ponto de descarga das águas clarificadas, que é feita por um sistema constituído por tulipa e galeria de fundo.

A amostragem foi feita na região de maior concentração de rejeitos finos, próxima à tulipa de descarga de fundo da barragem. As amostras foram coletadas em forma de lama e foram acondicionadas em recipientes plásticos com tampa, de modo a preservar as características físicas originais existentes no reservatório.

## 5.2 – Ensaios de caracterização dos rejeitos

Para a obtenção das características físicas dos rejeitos, foram realizados ensaios de caracterização completa, contemplando os ensaios de determinação do teor de umidade, teor de sólidos, ensaio de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação), limite de liquidez, limite de plasticidade e peso específico dos sólidos.

O ensaio de determinação do teor de umidade foi realizado pelo método da estufa de secagem, de acordo com a norma técnica NBR-6457 da ABNT, permanecendo o material por 24 horas em estufa, com temperatura entre 105 e 110°C. Com os resultados do ensaio de determinação do teor de umidade, determinou-se a porcentagem de sólidos ( $\psi$ ) presentes na amostra.

O ensaio de granulometria foi feito pelo processo de sedimentação em proveta, de uma amostra do rejeito colocada em suspensão através da adição de uma solução defloculante preparada com hexametáfosfato de sódio mais carbonato de sódio anidro. A porcentagem das frações com grãos menores que 0,074mm foram determinadas pela equação de Stokes, através das leituras feitas com densímetro, enquanto que as porcentagens das frações com diâmetro maiores que 0,0074mm foram determinadas por peneiramento, de acordo com a norma técnica NBR-7181 da ABNT.

Os ensaios de determinação dos limites de liquidez e plasticidade foram executados com a amostra de lama sem secagem prévia, revolvendo constantemente a amostra com uma espátula, de modo a se obter a perda natural do excesso de água, até se atingir o teor de umidade adequado para a determinação de cada ponto do ensaio.

O ensaio de determinação da massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) foi feito pelo processo do picnômetro, de acordo com a norma técnica NBR-6508 da ABNT, utilizando-se fervura para a remoção do ar da amostra. Foram feitas duas determinações, sendo considerado o valor definido pela média aritmética dos valores obtidos. Os resultados estão sistematizados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização da lama de bauxita ensaiada

Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	$\rho_s$	LL	LP	IP	w	$\psi$
%	%	%	%	$g/cm^3$	%	%	%	%	%
0,8	5,6	57,0	36,6	2,623	50,8	42,0	8,8	235,3	29,82

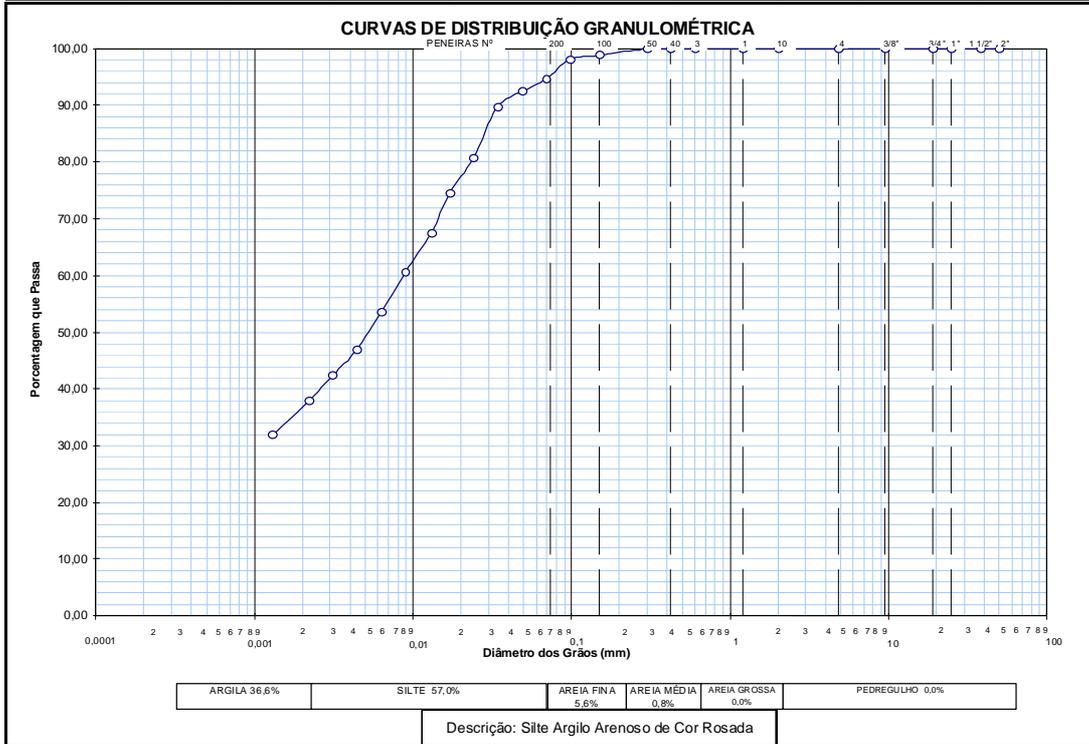


Figura 5.1 - Curva de distribuição granulométrica da lama de bauxita ensaiada

### 5.3 – Ensaio de Adensamento HCT–M

O ensaio de adensamento HCT–M realizado na amostra de rejeitos de bauxita, conforme proposto no início deste capítulo, não teve como objetivo primário a obtenção de parâmetros de adensamento e de permeabilidade para análise de comportamento destes rejeitos ou como subsídios para desenvolvimento de um projeto, servindo apenas como teste de validação do novo equipamento da UFOP, com as intervenções feitas no equipamento original. Assim, o ensaio foi realizado de acordo com as metodologias de execução descritas no Capítulo 3 deste trabalho, observando-se, em cada etapa, o desempenho isolado de cada sistema em operação.

### 5.3.1 - Montagem da Câmara Interna da Célula Triaxial

Depois de se proceder à limpeza das partes de contato da base da célula com o pedestal de acrílico, foi feita a lubrificação dos anéis de vedação utilizando graxa para borracha (Tigre 80), fez-se a fixação do pedestal de acrílico à base da célula e a conexão da tubulação de sucção com a válvula de comunicação com a pedra porosa da base. Em seguida foi feita a montagem do tubo de acrílico no pedestal, formando a câmara interna da célula para receber a amostra de rejeitos (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Montagem da câmara interna da célula triaxial

A câmara interna da célula foi preenchida com água através da linha de alimentação de água do painel, percolando pela base da célula com fluxo ascendente, de modo a efetuar a saturação das linhas de fluxo e a pedra porosa da base da câmara. A percolação foi feita até o enchimento completo da câmara interna. O fluxo de água foi interrompido fechando-se a válvula de alimentação, deixando a câmara cheia de água durante duas horas para verificar a eficiência das vedações. Durante este período de teste nenhum ponto de vazamento foi observado nos pontos de contato, comprovando-se a eficiência da graxa de borracha como lubrificante de vedação e sua adequação às necessidades desta montagem. Esta graxa foi indicada por profissionais que a utilizam com frequência em montagens de sistemas hidráulicos industriais.

### 5.3.2 - Montagem do sistema de linhas de fluxo

Primeiramente fez-se o preparo das seringas antes da montagem definitiva na bomba de fluxo. As seringas, juntamente com as tubulações de ligação com o sistema de reversão de fluxo, foram preenchidas com água, aspirando-se manualmente a água de um béquer pelo êmbolo das seringas. Em seguida, com o sistema de reversão de fluxo em funcionamento, conectou-se a primeira seringa em uma das extremidades deste sistema, injetando-se a água da seringa de modo a saturar as linhas de fluxo do sistema de reversão, bem como a tubulação de ligação com o pote de acrílico no painel de controle.

Feita a reversão de operação do sistema, conectou-se a segunda seringa na outra extremidade do sistema de reversão, injetando-se água até a completa saturação das linhas internas do sistema de reversão e da tubulação de ligação com a válvula de comunicação à base da câmara interna da célula triaxial.

As seringas foram acopladas à bomba de fluxo (Figura 5.3), colocando-se a bomba em operação com uma vazão de 5 ml por minuto, abrindo-se a válvula de comunicação com a base da câmara interna da célula e fazendo-se várias operações alternadas de sucção e de injeção, de forma a drenar as bolhas de ar ainda existentes, até a saturação completa de todo o sistema de fluxo.

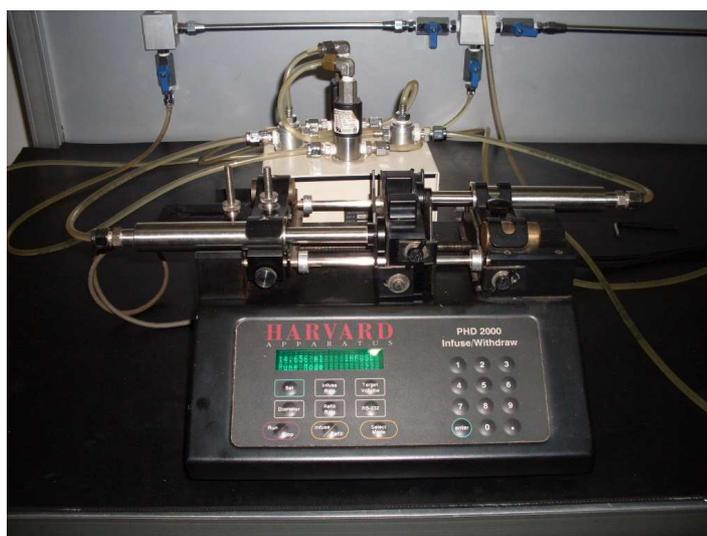


Figura 5.3 - Montagem dos circuitos de fluxo do ensaio

Estas operações de sucção e injeção, além de garantirem a completa saturação das linhas de fluxo, funcionam ainda como teste de avaliação das vedações das conexões, visando evitar potenciais vazamentos durante a execução do ensaio, com perdas de pressão. Terminadas as operações de montagem das linhas de fluxo, a câmara interna da célula triaxial pôde ser esvaziada, para a montagem do corpo de prova (Figura 5.4).

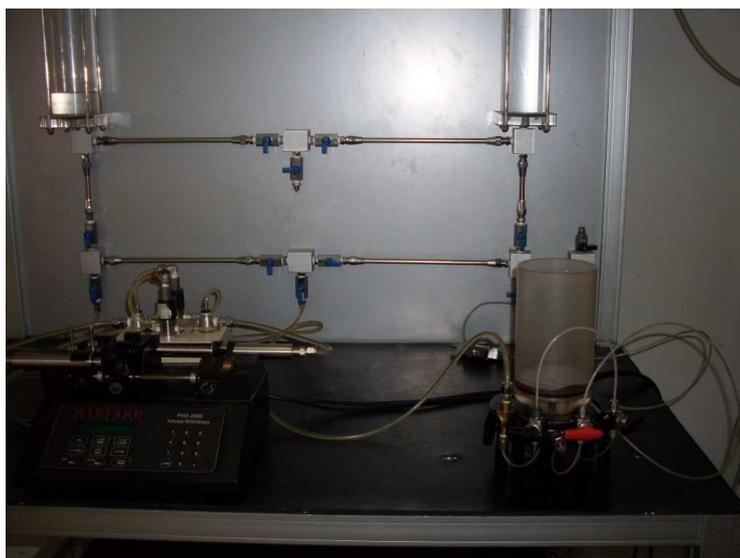


Figura 5.4 - Equipamento preparado para a montagem do corpo de prova.

### **5.3.3 – Preparo da Amostra e Montagem do Corpo de Prova**

Este item constitui a etapa mais importante de qualquer ensaio, uma vez que as operações de preparação do corpo de prova envolvem o manuseio e a experiência do operador; os resultados obtidos vão depender em grande parte de uma boa conduta técnica nestas operações básicas de ensaios laboratoriais.

Desta forma, deve-se atentar para as principais fontes de erro, que incluem a não obtenção de uma amostra representativa do rejeito a ser analisado até a determinação incorreta dos índices físicos iniciais do corpo de prova preparado. As etapas descritas a seguir são baseadas tanto em experiências relatadas por outros pesquisadores como também nas experiências específicas do autor deste trabalho, envolvido por muitos anos nas rotinas diárias de um laboratório de geotecnia.

- Preparação da amostra

Para a obtenção de uma amostra representativa do rejeito, fez-se previamente uma homogeneização de toda a amostra obtida, ainda no próprio do recipiente de coleta, por meio de vigorosa movimentação da amostra com uma concha, até se obter toda a fração sólida em suspensão. Tomou-se, então, uma amostra representativa em quantidade suficiente para a montagem do corpo de prova para o ensaio de adensamento, bem como para a execução dos demais ensaios complementares: determinação do índice de vazios para a tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ), determinação do teor de umidade inicial e ensaios de caracterização.

A amostra representativa foi colocada em um recipiente adequado, procedendo-se a nova fase de homogeneização com ajuste de quantidades de água até se obter uma lama de consistência bem fluida (Figura 5.5).

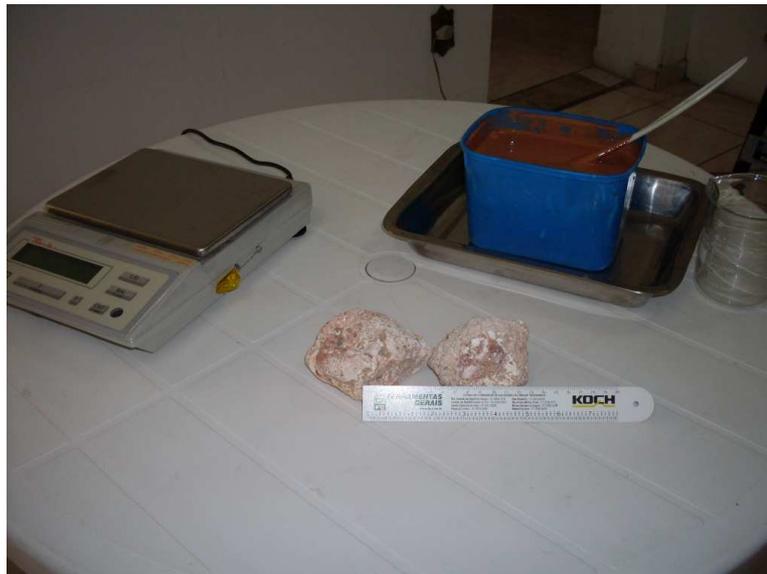


Figura 5.5 - Preparação da amostra representativa do rejeito estudado

Da amostra representativa, tomou-se, em seguida, uma porção para a determinação do teor de umidade e conseqüente estimativa dos índices físicos iniciais do corpo de prova (Figura 5.6). A amostra, colocada em um recipiente, foi pesada com precisão de 0,01g e levada para secagem em estufa a 105 - 110°C, por um período de 24h.



Figura 5.6 – Fase de determinação do teor de umidade inicial da amostra.

- Ensaio para determinação do teor de umidade do corpo de prova para a condição de índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ )

Para se obter o índice de vazios do corpo de prova correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ), ou seja, o índice de vazios do corpo de prova após o adensamento sob a ação exclusiva do seu peso próprio, torna-se necessário fazer a determinação do teor de umidade do mesmo nesta fase do ensaio.

Para se fazer esta determinação de umidade, foi confeccionada uma câmara idêntica à câmara interna da célula triaxial, na qual pode ser montado um segundo corpo de prova oriundo da amostra representativa inicial e ocupando a mesma altura do corpo de prova do ensaio de adensamento (Figura 5.7).

Esta câmara foi, então, colocada em repouso durante um período de 24h, para que a lama fosse submetida ao processo de sedimentação e adensamento sob a ação do peso próprio, medindo-se o correspondente valor da altura reduzida  $H_s$  (Figura 5.8). Em seguida, a água sobrenadante foi removida com o auxílio de uma seringa de borracha e a lama sedimentada transferida para outro recipiente, sendo pesada com precisão de 0,01g e levada à estufa para a determinação do correspondente teor de umidade.



Figura 5.7 - Corpos de prova preparados para ensaio de adensamento e para o ensaio de determinação do teor de umidade relativo ao índice de vazios à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ )



Figura 5.8 - Corpo de prova adensado sob a ação do peso próprio para a determinação da altura reduzida  $H_s$

- Montagem do corpo de prova na câmara interna da célula triaxial

Na montagem do corpo de prova, o principal cuidado deve ser com a determinação da massa total de lama utilizada. Para se obter uma boa precisão, deve-se adotar o procedimento de pesagem de todo o conjunto a ser utilizado na operação. Assim, para a montagem do corpo de prova, faz-se primeiramente a pesagem do recipiente com a lama, juntamente com a concha e o funil, obtendo-se o peso inicial.

Com o funil apoiado na borda superior do tubo de acrílico da câmara, e utilizando a concha, a lama é colocada cuidadosamente e em pequenas porções até ser atingida a altura desejada. Pesando-se o conjunto novamente, pode ser determinada com precisão a massa da lama utilizada.

Quanto à altura ideal para o corpo de prova, alguns autores sugerem que seja em torno de 5,0cm. Para as lamas muito finas, com índices de vazios muito altos, é recomendável que esta altura seja de pelo menos 7,0cm, para se obter uma altura reduzida ( $H_s$ ) de, no mínimo, 1,0cm.

Depois de montado, o corpo de prova é deixado em repouso por um período de 24h para ser submetido ao processo de sedimentação e adensamento sob a ação do peso próprio. Ao final desta fase, é feita a medida da altura atualizada do corpo de prova, sendo esta altura considerada para a determinação do índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ) e da altura reduzida do corpo de prova ( $H_s$ ). Para a obtenção destes parâmetros, deverá ser considerado o teor de umidade obtido do ensaio com a amostra de lama sedimentada na outra câmara (item anterior).

Em seguida, colocou-se um papel filtro no topo do corpo de prova, adicionando-se água até se atingir uma altura de aproximadamente 5,0cm, introduzindo-se em seguida o cabeçote de acrílico. O cabeçote foi posicionado cuidadosamente, deixando-o descer livremente até se apoiar no topo do corpo de prova. A câmara interna foi completada com água e, em seguida, fez-se a montagem da câmara externa da célula triaxial.

Conectando-se a tubulação de suprimento de água do painel com a válvula de enchimento da célula triaxial, fez-se o enchimento da câmara externa, drenando-se o ar pela válvula de suspiro no topo da célula.

Em seguida, foi feita a montagem dos instrumentos de medidas das deformações e poropressões, fixando-se o transdutor de deformações (LVDT) na estrutura de suporte da célula e conectando-se o transdutor de pressão com a válvula da base da câmara interna, em contato com a pedra porosa da base do corpo de prova.

O pistão da célula foi, então, destravado e deixado descer lentamente até se apoiar levemente no topo do cabeçote de acrílico. Nesta condição, o pistão é novamente travado, fazendo-se a medida da altura atualizada do corpo de prova. Esta medida será utilizada como referência para a determinação das variações das alturas do corpo de prova nas fases seguintes do ensaio.

#### **5.3.4 - Adensamento por Fluxo Induzido**

Nesta fase do ensaio, o corpo de prova foi submetido ao adensamento induzido pela ação das forças de percolação, induzidas pela retirada de água da base da amostra, por meio de sucção imposta pela bomba de fluxo, com uma vazão de fluxo previamente programada. A imposição de um fluxo descendente resulta no deslocamento das partículas sólidas, com conseqüentes deformações verticais e reduções dos índices de vazios, gerando uma tensão efetiva entre as partículas. Esta tensão efetiva será conhecida por meio das medidas das poropressões geradas na base do corpo de prova.

A partir desta fase, todos os dados foram obtidos e continuamente monitorados eletronicamente, através do novo sistema de aquisição de dados e da instrumentação eletrônica implementada na aparelhagem. As deformações verticais foram registradas pelo transdutor de deformação linear (LVDT), enquanto que as poropressões geradas na base do corpo de prova foram obtidas por meio do transdutor de pressão.

Estas variações de deformação e de poropressão, captadas por sinais eletrônicos dos instrumentos de medição, foram enviadas para o sistema de aquisição de dados, interpretados pelo programa *Catman 32*, pela codificação dos sinais via calibração prévia dos instrumentos.

Além dos dados arquivados em memória, o programa permite o acompanhamento do desenvolvimento do ensaio através da tela do monitor, mediante a exibição, em tempo real, dos valores medidos em função dos tempos decorridos da execução do ensaio, em termos dos gráficos dos dados acumulados das curvas de ‘poropressões x tempos’ e ‘deformações x tempos’ (Figura 5.9).

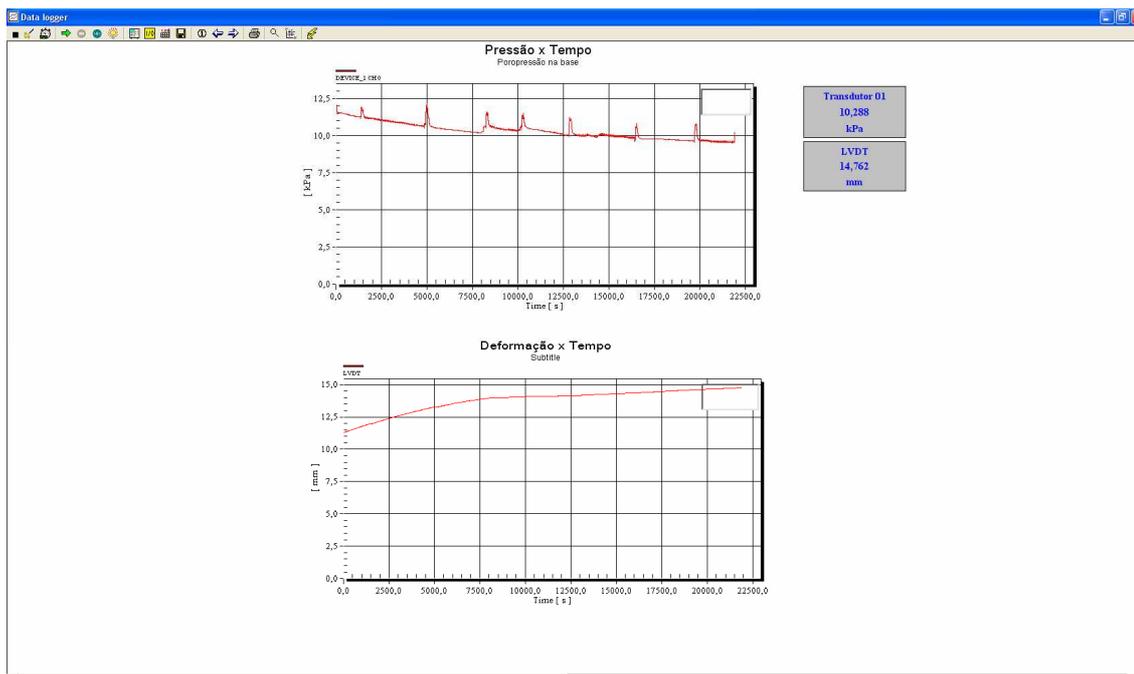


Figura 5.9 - Monitoramento do ensaio durante o ensaio de adensamento

Os dados armazenados na memória do programa podem ser exportados diretamente para planilhas *Excel*, permitindo a representação dos gráficos por meio de escalas mais ampliadas.

A programação da velocidade de fluxo é feita diretamente no painel da bomba; para cada módulo de operação (*infuse/refill*), é feita esta programação em forma de vazão em ml/min, uma vez que a bomba está programada de acordo com o diâmetro da seringa. É conveniente fazer também a programação do volume máximo de sucção das seringas, pois em caso de ausência do operador, ao se atingir esse volume máximo, a bomba automaticamente interrompe os deslocamentos, evitando-se danos ao equipamento.

Quanto à vazão de fluxo aplicada, estas devem ser bem pequenas de início para evitar a geração de poropressões muito elevadas e o adensamento excessivo do corpo de prova. Em caso de geração de poropressões muito baixas, pode-se reprogramar a bomba de fluxo para vazões maiores, sem interrupção do ensaio.

A aplicação do fluxo deve ser mantida até ser alcançado o estado permanente das poropressões geradas. Para isso pode ser necessário fazer várias reversões das operações

da bomba de fluxo, devido à baixa capacidade das seringas. Durante a reversão, ocorre uma inevitável queda das poropressões geradas na base do corpo de prova e esta queda se deve à diferença de tensões entre as linhas dos módulos de fluxo.

Quando a linha de fluxo da seringa que, até então, operava injetando água para o pote de acrílico do painel (portanto, com uma tensão menor que a linha de fluxo da outra seringa operando no módulo de sucção), é invertida para o módulo de sucção, ocorre a queda de poropressão na base do corpo de prova, sendo restabelecida com continuação do fluxo. Esta queda de poropressão é registrada no gráfico através de uma oscilação da curva poropressão x tempo, sendo esta oscilação de valor igual à diferença de tensão entre as duas linhas de fluxo no momento da reversão.

Para o ensaio de adensamento induzido realizado sobre a amostra de lama de bauxita, foi aplicada uma vazão de fluxo de 0,35ml/min.. As poropressões geradas na base do corpo de prova foram próximas de 3kPa (Figura 5.9), ficando dentro do intervalo de valores propostos por Znidarcic *et al.* (1992), que sugerem valores destas poropressões entre 2kPa e 5kPa.

### **5.3.5 – Medida da permeabilidade no Ensaio HCT - M**

Para complementar o ensaio de adensamento por fluxo induzido, é feita uma segunda aplicação de fluxo, agora com valores de vazão de fluxo bem menores, com a finalidade de se determinar o coeficiente de permeabilidade correspondente ao estado de índice de vazios obtido ao final deste estágio de adensamento (Figura 5.10). Para o ensaio realizado, aplicou-se um fluxo com a bomba operando com uma vazão de 0,15ml/min.

Durante a aplicação do fluxo o pistão da célula permanecia travado, admitindo-se, portanto, que não ocorre adensamento do corpo de prova, uma vez que o mesmo já estaria adensado sob tensões efetivas bem superiores às condições impostas pelas poropressões geradas na base da célula durante este ensaio.

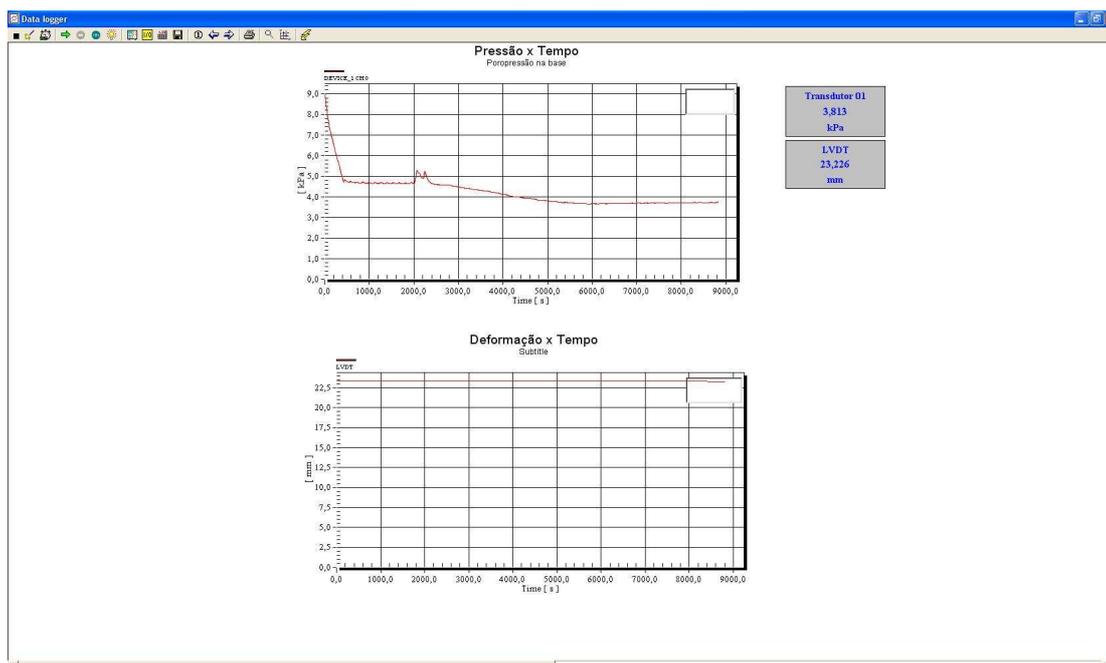


Figura 5.10 - Monitoramento do ensaio durante o ensaio de permeabilidade

### 5.3.6 - Adensamento por aplicação de carregamento estático

Para se obter valores de índices de vazios em níveis de tensões mais elevadas, foi feito o um estágio de carregamento com aplicação de carga estática. Para a aplicação de cargas, adotou-se a montagem do sistema de aplicação de cargas descrita no Capítulo 4, mantendo-se o pistão da célula travado. Este sistema permite a aplicação de cargas até tensões da ordem de 100kPa.

Os pesos foram colocados sobre as plataformas do pendural de modo a atingir a tensão de 50 kPa, mediante acréscimos de carga que levaram em conta as tensões acumuladas nas fases anteriores do ensaio. Em seguida, o pistão da célula foi destravado, dando início ao adensamento do corpo de prova sob a ação do carregamento estático. O adensamento foi monitorado através da instrumentação eletrônica, sendo os dados devidamente registrados pelo sistema de aquisição de dados (Figura 5.11).

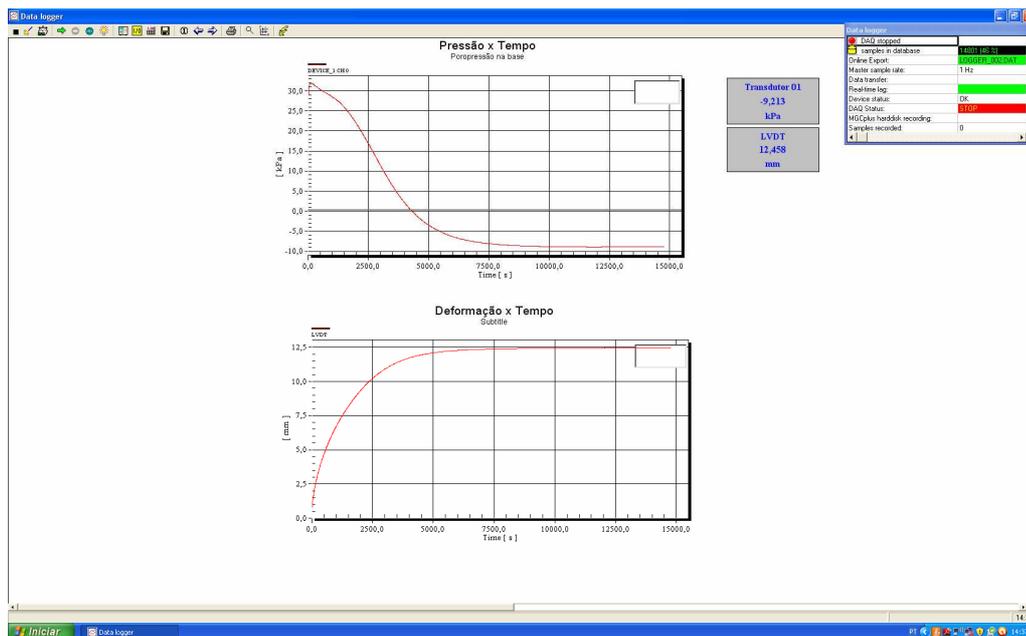


Figura 5.11 - Monitoramento do ensaio durante o ensaio de adensamento por carga

O início do adensamento se caracteriza pelo desenvolvimento imediato de poropressões na base do corpo de prova, com valores bem próximos da tensão de adensamento acumulada. O excesso de poropressão vai sendo dissipada lentamente com o tempo, até atingir sua estabilização com valores próximos ao da poropressão estática.

As deformações comportam-se de forma similar ao padrão do ensaio de adensamento convencional, sendo regidas pela permeabilidade do material. A estabilização das deformações tende normalmente a coincidir com a estabilização das poropressões na base do corpo de prova. Na Figura 5. 11, estão representadas as curvas das deformações verticais e das poropressões geradas na base do corpo de prova, na fase inicial do ensaio.

### 5.3.7 – Medida da permeabilidade no ensaio de adensamento por carregamento

Para a determinação da permeabilidade após a fase de adensamento por carregamento estático, é feita uma nova aplicação de fluxo na base do corpo de prova, mantendo-se o pistão da célula travado.

Esta fase do ensaio foi também monitorada pela instrumentação eletrônica, por meio do

gráfico de poropressões geradas em função do tempo (Figura 5.12). Nesta fase do ensaio, o corpo de prova encontra-se já bastante adensado e, portanto, com índices de vazios baixos, o que torna mais difícil a previsão da vazão de fluxo ideal para ser aplicada. Desta forma, a melhor conduta é programar a bomba de fluxo para uma vazão menor e, de acordo com as poropressões geradas, ir aumentando a vazão de fluxo durante o ensaio.

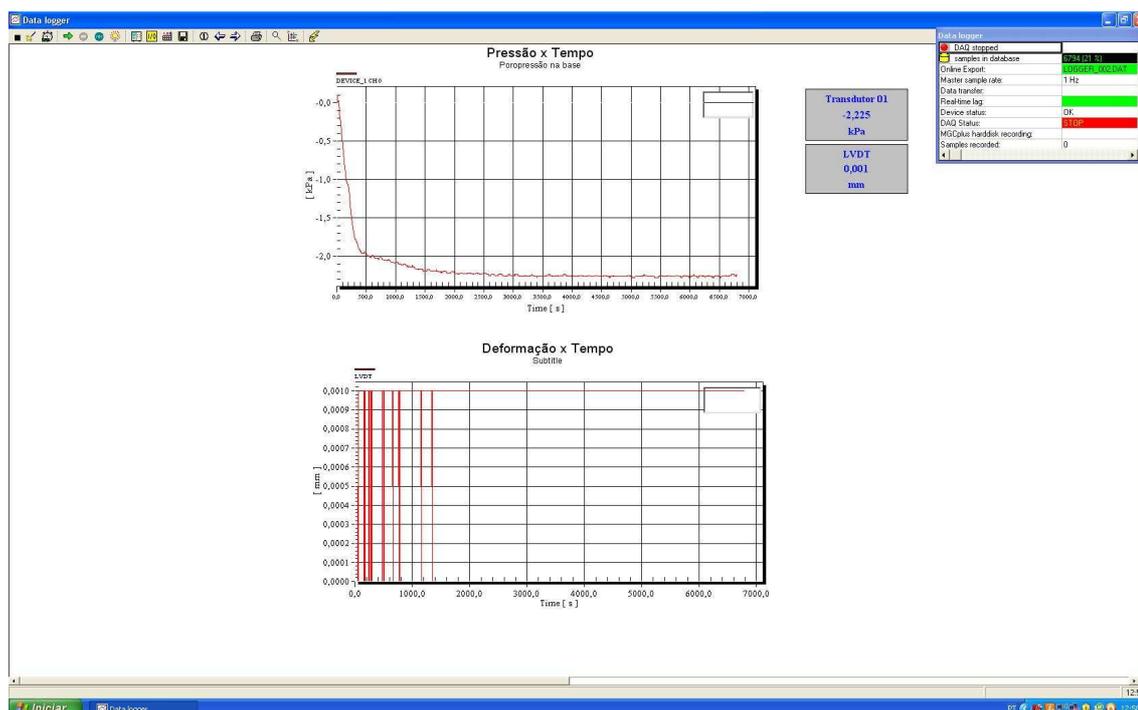


Figura 5.12 - Monitoramento do ensaio durante o ensaio de permeabilidade sob carga

### 5.3.8 – Processamento dos resultados

Os resultados do ensaio de HCT realizado foram processados por meio do programa computacional SICTA (*Seepage Induced Consolidation Test Analysis*), desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992). As leis de compressibilidade e de permeabilidade da amostra ensaiada foram expressas em termos das relações *índices de vazios x tensões efetivas* e *índices de vazios x permeabilidades*, com base nos seguintes modelos matemáticos específicos:

$$\bullet \quad e = A(\sigma' + Z)^B \quad (5.1)$$

$$\bullet K = Ce^D \quad (5.2)$$

sendo A, B, C, D e Z parâmetros relativos ao material analisado.

Para o processamento dos resultados pelo programa SICTA, foram determinados os seguintes parâmetros de entrada de dados:

$$\bullet H_s = \frac{W_{sd}}{(G_s \cdot \gamma_w \cdot A)} \quad (5.3)$$

sendo:

$H_s$  – altura dos sólidos (cm);

$W_{sd}$  – peso seco da amostra (g);

$G_s$  – densidade dos sólidos;

$\gamma_w$  – peso específico da água ( $g/cm^3$ );

A – área da amostra ( $cm^2$ ).

$$\bullet H_0 = (1 + e_{00}) \cdot H_s \quad (5.4)$$

sendo:

$e_{00}$  – índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula;

$H_0$  – altura inicial da amostra (cm).

$$\bullet \sigma'_f = \sigma'_t + (\gamma_s - \gamma_w)Z + \Delta\mu \quad (5.5)$$

sendo:

$\sigma'_f$  – tensão efetiva na base (kPa)

$\sigma'_t$  – tensão efetiva produzida pelo cabeçote de acrílico e pistão da célula (kPa)

$\Delta\mu$  – poropressão gerada na base (kPa)

$$\bullet e_f = \left( \frac{H_f}{H_s} \right) - 1 \quad (5.6)$$

sendo:

$e_f$  – índice de vazios final;

$H_f$  – altura final do corpo de prova (cm);

$H_s$  – altura dos sólidos ou altura reduzida (cm).

$$\bullet \quad K = \frac{v \cdot H_f \cdot \gamma_w}{\Delta\mu} \quad (5.7)$$

sendo:

K – permeabilidade (m/s);

v – velocidade de fluxo (m/s).

Os resultados do ensaio realizado estão sistematizados nas Tabelas 5.2 a 5.4.

Tabela 5.2 – Resultados dos índices físicos iniciais do CP do rejeito de bauxita

Peso da lama (g)	569,18
Altura do corpo de prova – h <sub>i</sub> (cm)	7,90
Volume do corpo de prova - V <sub>i</sub> (cm <sup>3</sup> )	491,46
Teor de umidade inicial - W <sub>i</sub> (%)	267,34
Massa específica úmida – γ <sub>wi</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,158
Massa específica seca – γ <sub>di</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	0,3153
Massa específica dos sólidos – W <sub>g</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2,623
Índice de vazios inicial (e <sub>0</sub> )	7,3191
Massa seca dos sólidos (g)	154,946
Teor de sólidos em peso (%)	27,22

Tabela 5.3 – Resultados dos índices físicos finais do CP do rejeito de bauxita

Peso da lama – (g)	506,97
Altura do corpo de prova – h <sub>0</sub> (cm)	6,90
Volume do corpo de prova – V <sub>i</sub> (cm <sup>3</sup> )	429,249
Teor de umidade - w <sub>0</sub> (%)	215,36
Massa específica úmida – γ <sub>w0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,181
Massa específica seca – γ <sub>d0</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	0,3745
Índice de vazios para σ <sup>2</sup> =0 – e <sub>00</sub>	6,004
Massa seca dos sólidos (g)	154,946
Altura dos sólidos (altura reduzida) –H <sub>s</sub> (cm)	0,9852
Teor de sólidos em peso (%)	30,56

Com base nos resultados do ensaio, foram determinados os parâmetros constitutivos do rejeito de bauxita (Tabela 3.4) e plotadas as respectivas curvas de compressibilidade e de permeabilidade do material estudado (Figuras 5.13 e 5.14, respectivamente).

Tabela 5.4 – Parâmetros constitutivos do rejeito de bauxita estudado

A	3,6374
B	-0,15078
C	8,327E-7
D	3,752
Z	0,02938

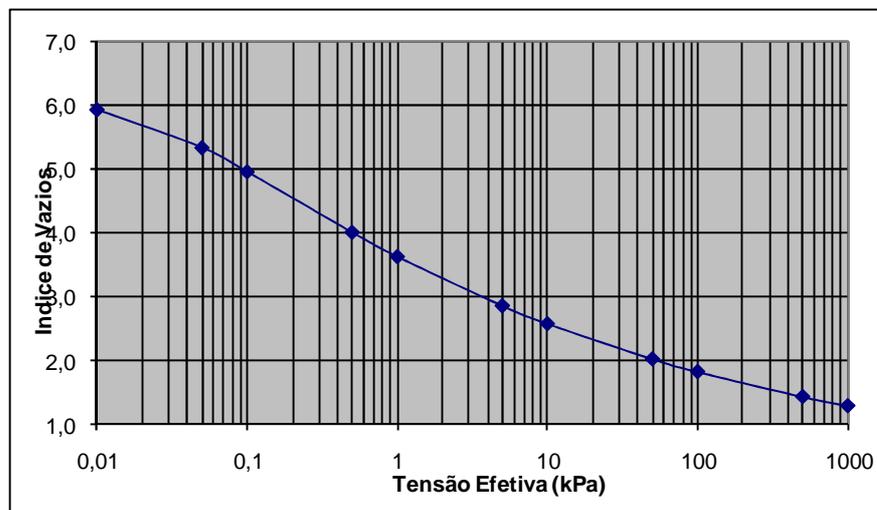


Figura 5.13 – Curva de compressibilidade do rejeito estudado

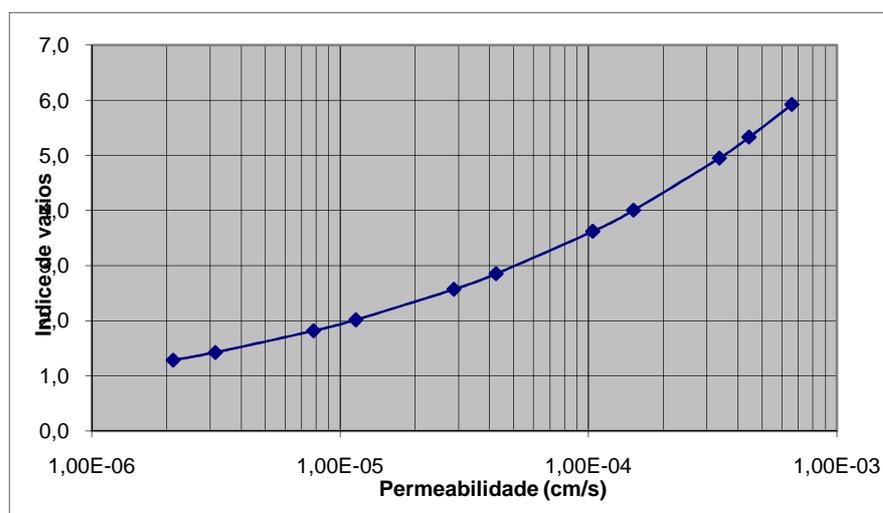


Figura 5.14 – Curva de permeabilidade do rejeito estudado.

# CAPÍTULO 6

## 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

### 6.1 – Quanto aos dispositivos adotados

Na implementação dos novos equipamentos do ensaio de adensamento por fluxo induzido na UFOP (aqui designado como HCT – M), buscou-se estabelecer uma infraestrutura e um arranjo operacional que tornasse a metodologia de plena aplicação, corrente e de uso generalizado num laboratório de geotecnia. Nas intervenções feitas na aparelhagem, dentro do processo de otimização, podem ser destacados os seguintes pontos:

- Painel de controle

O novo painel de controle constitui o principal sistema do conjunto tanto pela qualidade dos materiais utilizados, associando leveza e resistência, quanto pelo agrupamento dos sistemas de alimentação e distribuição de fluxo, proporcionando facilidade operacional, além de um arranjo harmônico e muito estético.

- Bancada de trabalho

A bancada de trabalho, agregando o painel de controle em uma peça única, permite uma melhor distribuição dos equipamentos de forma agrupada, facilitando as operações.

- Sistema de reversão de fluxo

O sistema de distribuição contínua de fluxo foi convertido em um sistema de reversão automática de fluxo, permitindo a operação da bomba de fluxo com duas seringas. A

operação conjunta das duas seringas diminui o tempo de execução do ensaio, mantendo a continuidade do processo e evitando fases de interrupção do fluxo.

- Sistema de aquisição de dados

O novo sistema de aquisição de dados permite a programação de aquisição dos dados em intervalos de tempo bem pequenos, gerando um maior número de pontos no gráfico e um registro mais sistemático dos resultados. O acompanhamento pelo monitor dos valores dos tempos, pressões e deformações em tempo real, além da exibição dos gráficos acumulados, permite uma melhor definição do estado estabilizado das pressões e das deformações.

- Transmissor de pressão

O sistema de medição das pressões, utilizando-se o transmissor de pressão acoplado nesta implementação, permite a medição de pressões numa faixa de -100kPa a +150kPa, podendo ser utilizado tanto nos estágios de aplicação de fluxo, quando são geradas porpressões negativas, quanto nos estágios de carregamento, quando são geradas porpressões positivas. O transmissor de pressão fornece dados de medida com resolução de 0,001kPa.

- Sistema de medida das deformações

O transdutor de deformação linear possui curso útil de 50mm e resolução das medidas de 0,01mm, permitindo que os valores de deformações, induzidas nos diversos estágios do ensaio, sejam acumulados, viabilizando, assim, a determinação atualizada da altura do corpo de prova em qualquer momento do ensaio.

- Sistema de aplicação de cargas

O sistema de aplicação de cargas por meio do pendural permite a aplicação de estágios de carregamentos sucessivos, obtendo-se uma ampla faixa de valores medidos dentro da

curva 'índice de vazios x tensão efetiva'. O sistema de pendural com duas plataformas permite um sistema melhor e menos instável de aplicação dos pesos.

A introdução destes novos dispositivos físicos e de monitoramento do ensaio mostrou-se bastante adequado, tendo sido plenamente validados por ensaios-testes, além do apresentado, realizados com uma amostra de rejeitos de bauxita. Todos os dispositivos apresentaram desempenho satisfatório, sem problemas operacionais e integrados de forma harmônica nos procedimentos gerais do ensaio.

## **6.2 – Quanto ao arranjo geral dos equipamentos**

A deficiência de espaço físico é sempre uma constante nos laboratórios de geotecnia, que incluem a incorporação contínua de novos equipamentos e exigem um bom arranjo na disposição dos mesmos, visando o aproveitamento racional do espaço e a disposição dos equipamentos por setores de acordo com as diversas modalidades de ensaios, de forma a facilitar a rotina de trabalho.

No contexto deste trabalho, fez-se a proposição de um equipamento de adensamento por fluxo induzido (HCT), de forma a demandar o menor espaço possível e concentrando todos os equipamentos dentro do espaço ocupado pela bancada de trabalho, com duas plataformas associadas.

Na plataforma superior da bancada (Figura 6.1), o objetivo foi o de se obter a maior aproximação possível entre os três equipamentos principais: célula triaxial, bomba de fluxo e sistema de reversão de fluxo. Esta distribuição ajustada, além de proporcionar mais espaço livre na bancada, tem a vantagem de diminuir os circuitos de fluxo que interligam os três equipamentos, com melhoria da equalização das pressões nas tubulações.

Na plataforma superior, pode ser ainda posicionado o monitor para acompanhamento do desenvolvimento do ensaio (foi usado um monitor de 19", sendo mais adequado um monitor menor, de 14" ou 17", para um ajuste melhor ao *layout* geral). O princípio geral da proposição neste caso foi o de concentrar os equipamentos de manuseio mais

freqüente na plataforma superior da bancada, facilitando os procedimentos operacionais durante o ensaio.



Figura 6.1 – Arranjo dos equipamentos na bancada superior

Na plataforma inferior da bancada, foi alocada a unidade de CPU, para maior proteção da mesma, dispendo-se de espaço adicional para abrigar vários acessórios utilizados na preparação e execução dos ensaios (Figura 6.2).



Figura 6.2 – Arranjo e espaço disponível na bancada inferior

No arranjo proposto, atenção especial foi dada ao sistema de aquisição de dados, que por ser um aparelho eletrônico de grande sensibilidade, implicava uma maior proteção, de forma a se evitar contato com água, impurezas diversas e emissão de calor dos demais equipamentos eletrônicos.

Por outro lado, constituindo o mesmo o ponto de convergência das ligações entre os demais equipamentos eletrônicos, este deveria ocupar uma posição mais centralizada, evitando-se um possível entrelaçamento dos cabos de conexão. Para isso, foi construído um suporte em aço inox, fixado à face inferior da plataforma superior da bancada de trabalho, para o devido posicionamento deste dispositivo (Figura 6.3).



Figura 6.3 – Posicionamento do sistema de aquisição de dados

### **6.3 – Sugestões para trabalhos futuros**

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, propõe-se a realização de outras modalidades de ensaio com o equipamento HCT, para utilizar de modo abrangente a versatilidade de aplicações dos sistemas implementados nesta nova montagem. Algumas sugestões destas aplicações podem ser:

- Realização de ensaios triaxiais do tipo adensado-drenado, com tensões controladas, utilizando célula triaxial convencional e o sistema de aplicação de carga;
- Realização de ensaios de simulação de desenvolvimento das poropressões com carregamentos anisotrópicos por tensão controlada, com relação  $\sigma_1/\sigma_3$  constante;
- Realização de ensaios triaxiais com ruptura por extensão lateral, aplicando-se inicialmente as tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , e mantendo-se a tensão  $\sigma_1$  constante e reduzindo-se gradativamente a tensão  $\sigma_3$  até a ruptura do corpo de prova;
- Determinação das leis de compressibilidade de diferentes rejeitos de mineração com o equipamento HCT – M e correlação destes resultados com dados obtidos por sondagens piezométricas nos respectivos reservatórios destes rejeitos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

Abu-Hejleh, A. N. e Znidarcic, D. (1992). User manual for computer program SICTA. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 101 p., Boulder, Colorado.

Alves, M. C. M. (1992). Comportamento de sedimentação e adensamento de uma lama vermelha. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 213 p., Rio de Janeiro.

Araújo, G. S. (2005), Estudo Experimental do Comportamento Dreno-Filtrante de Interfaces Rejeitos Finos-Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, UFOP.

Barbosa, P. S. A., Almeida, M. S. S. e Sills, G. C. (1993). Ensaio de adensamento de fluxo restringido na argila de Sarapuí. Solos e Rochas, v. 16, nº 4, p. 305-312, São Paulo.

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

Botelho, A. P. D., Oliveira Filho, W. L. e Gomes, R. C. (2001). Determinação experimental da relação sucção x teor de umidade volumétrica em solos com a utilização da bomba de fluxo. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Ñ SAT'2001, p. 293-307, Porto Alegre, RS.

Carrier III, W. D., Bromwell, L. G. e Somogyi, F. (1983). Design capacity of slurried mineral waste pounds. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 109, nº 5, p. 699-716.

Gibson, R. E., England, G. L. e Hussey, M. J. L. (1967). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. Géotechnique, v. 17, nº 3, p. 261-273.

Head, K. H. (1984). Manual of soil laboratory testing. Pentech Press, 3 vols., London, U. K.

- Koppula, S. D. e Morgenstern, N. R. (1982). On the consolidation of sedimentation clays. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 19, p. 260-268.
- Krizek, R. J. e Somogyi, F. (1984). Perspectives on modeling consolidation of dredged materials. *Symposium on Sedimentation – Consolidation Models: Predictions and Validation*, R. N. Yong e F. C. Townsend, Eds., ASCE, p. 296-332, São Francisco.
- Liu, J. C. (1990). Determination of soft soil characteristics. PhD. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 297 p, Boulder, Colorado.
- Liu, J. C. e Znidarcic, D. (1991). Modeling one-dimensional compression characteristics of soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v. 117, nº 1, p. 162-169.
- Monte, J. L. e Krizek, R. J. (1976). One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation. *Géotechnique*, v. 26, nº 3, p. 495-510.
- Olsen, H. W. (1966). Darcy's law saturated kaolinite. *Water Resources Research*, v. 2, nº 2, p. 287-295.
- Pereira, B. A. (2006). Adensamento e Simulação do Enchimento do Reservatório de uma Barragem para Contenção de Rejeitos de Ouro. Dissertação de Mestrado, UFOP.
- Schiffman, R. L. (1980). Finite and infinitesimal strain consolidation. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, v. 106, nº GT2, p. 203-207.
- Schiffman, R. L., Pane, V. e Gibson, R. E. (1984). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: IV. an overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation. *Symposium on Sedimentation – Consolidation Models: Predictions and Validation*, R. N. Yong e F. C. Townsend, Eds., ASCE, p. 1-29, São Francisco.
- Somogyi, F. (1979). Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation: implementation package. Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project (Technical Report), p.
- Villar, L. F. S. (2002). Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita. Tese de doutorado, Rio de Janeiro, DEC, PUC-RIO, 443 p.
- Znidarcic, D. e Schiffman, R. L. (1982). On Terzaghi's concept of consolidation. *Géotechnique*, v. 32, p. 387-389.
- Znidarcic, D., Abu-Hejleh, A. N., Fairbanks, T. e Robertson, A. (1992). Seepage induced consolidation test, equipment description and users manual. Reported Prepared for Florida Institute of Phosphate Research, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 63 p, Boulder, Colorado.

## 6.4 – Considerações finais

A determinação experimental das características de compressibilidade e adensamento de rejeitos finos através das relações constitutivas (índice de vazios x tensões efetivas e permeabilidade x índice de vazios), possui hoje, além do embasamento teórico desenvolvido por vários autores como apresentado no capítulo 2, os recursos técnicos necessários para a obtenção destes parâmetros, através da implantação de equipamentos e metodologias de ensaios.

A disponibilização destes recursos constitui um grande avanço dentro das necessidades de nossa comunidade geotécnica, que num país como o nosso, com grande vocação para a atividade mineral, está integrada no processo interativo multidisciplinar de desenvolvimento de projetos de implantação destes empreendimentos, tendo a tarefa de propor soluções, técnica, econômica e ambientalmente viáveis, para a disposição da grande quantidade de rejeitos gerados nestas atividades.

Abrão, (1987), faz uma abordagem destas atividades minerais (produção de cerca de 22 substâncias minerais diferentes) com geração de 160 milhões de toneladas de rejeitos por ano. Estes rejeitos com grande quantidade em forma de lama, que por suas características geotécnicas são dispostos por via úmida.

Abrão (1987), define como características principais destes rejeitos:

- Granulometria de colóides a areias;
- Grãos normalmente angulares ou subangulares;
- Em geral não plásticos;
- Grande variação do peso específico (entre 5 e 15 KN/m<sup>3</sup>);
- Características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis.

Em função destas características, estes rejeitos são dispostos normalmente em reservatórios, em forma de barragens e diques de contenção. Estas estruturas de

contenção, pelas implicações ambientais, econômicas e de segurança, exigem o prévio conhecimento dos mecanismos de sedimentação e adensamento destes rejeitos, a fim de quantificar o volume de armazenamento destes reservatórios.

O ensaio de HCT com o emprego da bomba de fluxo, tema inserido neste trabalho, é na opinião de vários autores, a melhor maneira de se obter parâmetros de relações constitutivas próprias para os modelos de enchimento de barragens de rejeitos.

Villar (1990), também citado por Padula (2005), considerando a teoria das grandes deformações no estudo de rejeitos finos, apresentou curvas de recalque versus tempo, previstas para rejeitos de fosfato com base na teoria de adensamento convencional e na teoria de adensamento a grandes deformações, comparando-as com resultados obtidos de instrumentação de campo.

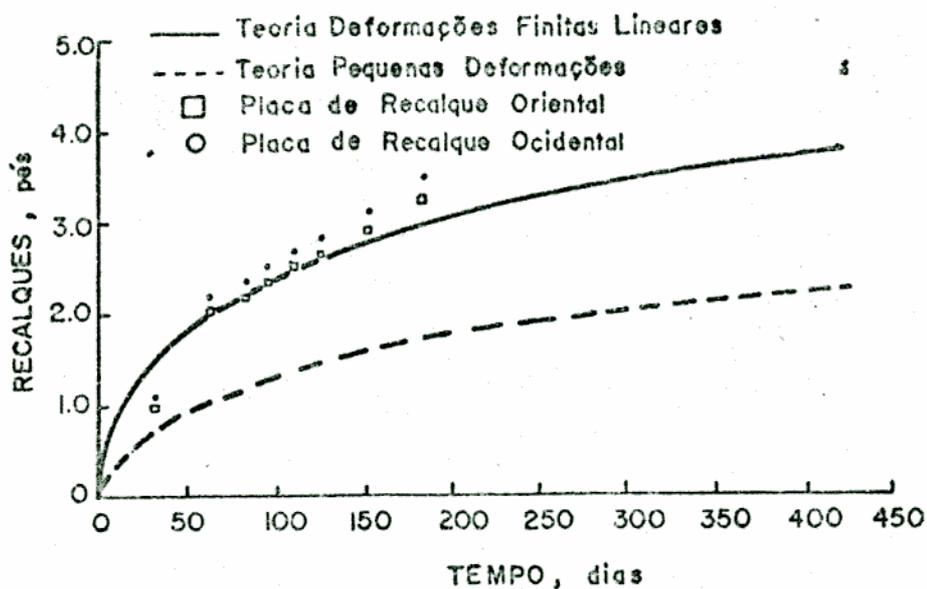


Figura 6.4 - Comparação entre curvas de recalque obtidas pelas teorias de adensamento a grandes deformações e pequenas deformações, e resultados medidos no campo, (Villar, 1990)

Villar, apresenta uma compilação gráfica de resultados de ensaios realizados em rejeito de bauxita (Fig.2.6 e Fig.2.7) onde nota-se uma boa concordância entre os resultados de

ensaios de campo (Villar, 1990 e Santos, 2000), com resultados de ensaios de laboratório CRD (Santos, 2000) e HCT (Alves, 1992), (Santos, 2000) e (Botelho, 2001).

Para as curvas de índice de vazios versus tensão efetiva, tanto o ensaio CRD como os ensaios HCT, tiveram boa concordância com os resultados de campo, sendo que o ensaio HCT mostra uma maior abrangência, permitindo a obtenção destes parâmetros em baixos níveis de tensão.

No entanto as curvas de permeabilidade versus índice de vazios apresentam uma boa concordância entre si, porém discordando dos resultados de campo. Estas discordâncias se justificam pela dificuldade na determinação precisa da permeabilidade em ensaios de campo, devido às deficiências dos equipamentos.

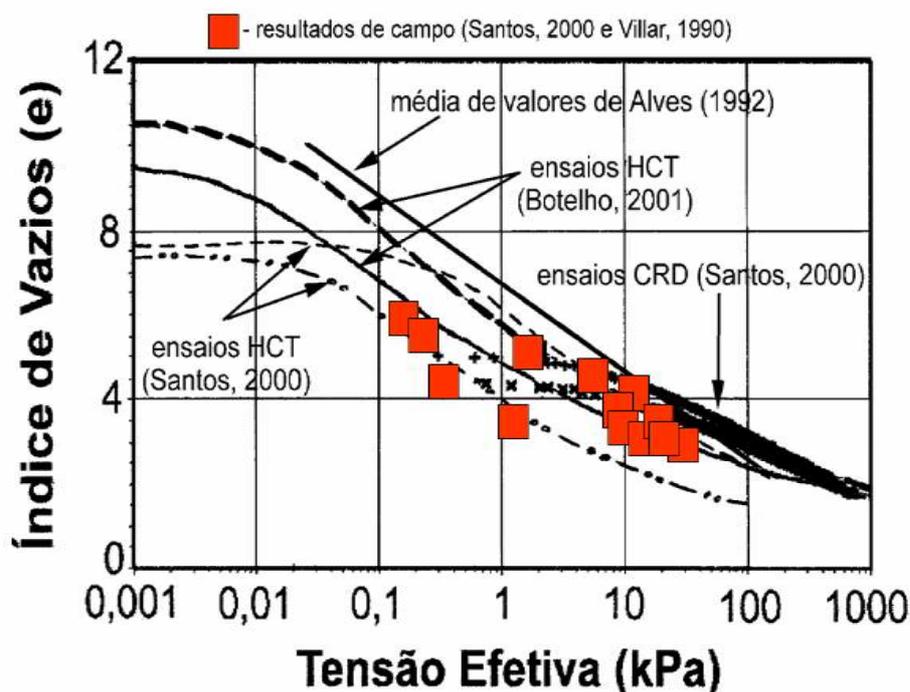


Figura 6.5 – Curvas de índice de vazios x tensões efetiva obtidas de vários ensaios

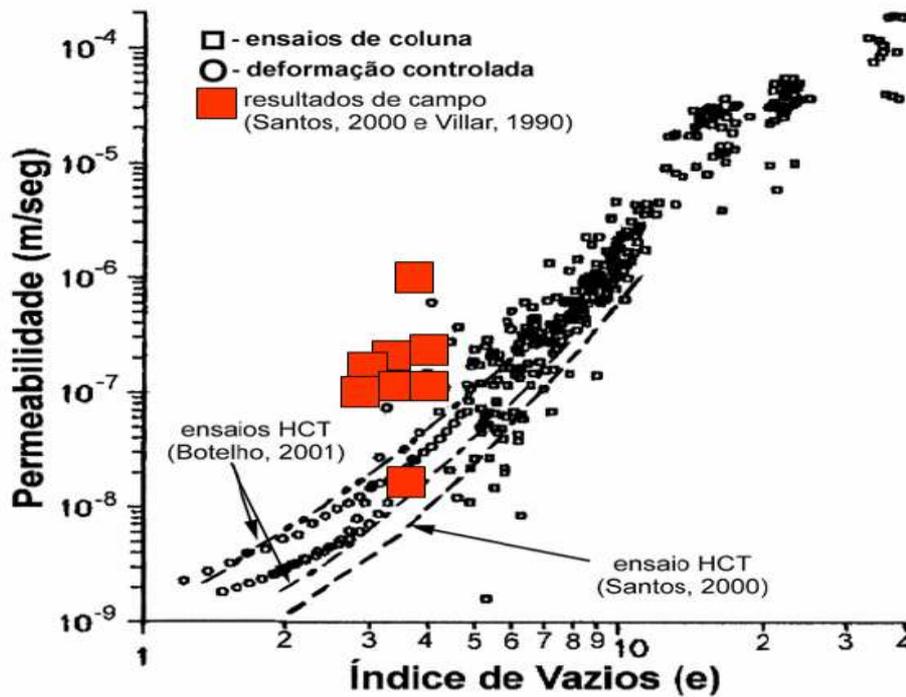


Figura 6.6 - Curvas de permeabilidade x índice de vazios obtidas de vários ensaios(Villar,2009)

Através de alguns trabalhos desenvolvidos no núcleo de geotecnia da UFOP, utilizando o ensaio HCT, (Araújo, 2005) “Estudo Experimental do Comportamento Dreno-Filtrante de Interfaces Rejeitos Finos-Geotêxteis”, e (Pereira, 2006) “Adensamento e Simulação do Processo de Enchimento de Reservatório de uma Barragem para Contenção de Rejeitos de Ouro”, revelam experiências bem sucedidas de colaboração entre universidade e empresas.