

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - ÁREA DE GEOTECNIA**  
**LABORATÓRIO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM**  
**GEOMECÂNICA**

**Modelagem Numérica com acoplamento Hidro-Mecânico da  
reconstrução, enchimento e comportamento da Barragem de  
Açú/RN após o acidente no final de construção.**

**MARCOS GEORGE MAGALHÃES MORENO**

TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL – ÁREA  
DE GEOTECNIA.

**Orientador:** Professor Leonardo José do Nascimento Guimarães, DsC.

**Co-Orientador:** Professor Igor Fernandes Gomes, DsC.

Recife, PE – Brasil.

31 de agosto de 2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

MODELAGEM NUMÉRICA COM ACOPLAMENTO HIDRO-MECÂNICO  
DA RECONSTRUÇÃO, ENCHIMENTO E COMPORTAMENTO DA  
BARRAGEM DE AÇÚ/RN, APÓS O ACIDENTE NO FINAL DE CONSTRUÇÃO

defendida por

Marcos George Magalhães Moreno

Considera o candidato APROVADO

Recife, 31 de agosto de 2011

Leonardo José do Nascimento Guimarães – UFPE  
(orientador)

Agostinho Fernandes Gomes – UFPE  
(co-orientador)

Manoel Porfírio Cardoso Neto – UnB  
(examinador externo)

Stela Fúcale Suñar – UPE  
(examinador externo)

Ivaldo Dário da Silva Portes Filho – UFPE  
(examinador interno)

Lígia Mouta da Costa – UFPE  
(examinador interno)

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M843m Moreno, Marcos George Magalhães.  
Modelagem numérica com acoplamento hidro-mecânico da reconstrução, enchimento e comportamento da barragem de Açú/RN após o acidente no final de construção / Marcos George Magalhães Moreno. - Recife: O Autor, 2011.  
235 folhas, il., gráfs., tabs.  
  
Orientador: Prof. DsC. Leonardo José do Nascimento Guimarães.  
Co-Orientador: Prof. DsC. Igor Fernandes Gomes.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.  
Inclui Referências Bibliográficas e Apêndice.  
  
1. Engenharia Civil. 2. Solos Não Saturados. 3. Barragens de Terra. 4. Modelagem numérica. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento (Orient.). II. Gomes, Igor Fernandes (Co-orient.). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2011-232

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha esposa Rosário,  
Meus filhos Giselda, Giselle e George,  
Meu neto Makoto, minha mãe Giselda.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe Giselda, exemplo de eterna luta pelo bem estar dos filhos, netos e bisneto, meu eterno agradecimento.

A minha esposa Rosário pelo constante incentivo nas horas de desânimo, paciência e compreensão dos momentos ausentes.

A meus filhos, inspiração maior da minha vida.

A meu querido neto Maurício Makoto, que a Força Criadora o envolva sempre nas suas luzes e fluídos, fazendo-o sempre justo, honesto, amigo e trabalhador e bom filho.

Aos meus familiares pelo incentivo.

A Universidade Federal de Pernambuco – CTG – DEC, pelos ensinamentos gratuitos e de qualidade, meu muito obrigado.

Ao professor Nilton de Almeida Castro pela atenção, amizade e incentivo.

A todos os professores da Pós-Graduação em Geotecnia pela oportunidade e ensinamento transmitidos.

Ao professor Washington Moura Amorim pela atenção dispensada, sempre prestativo a tirar dúvidas e a passar conhecimentos, que a nossa amizade seja para sempre.

Ao professor José Maria Justino por sua simplicidade e amizade que sempre dedicou a todos.

Ao professor Ivaldo Pontes pela amizade, convivência saudável e ótimas aulas.

Ao professor Fernando Jucá pelas aulas esclarecedoras e sem estresse.

Ao professor e amigo Igor Gomes, meu muito obrigado pela atenção, dedicação, honestidade para com todos e principalmente pela amizade sincera.

Ao professor Leonardo Guimarães, obrigado pela orientação e atenção dispensada.

A professora Lícia Mouta Costa, pela atenção, sugestões e dúvidas tiradas no final dos trabalhos.

A Andréa pela atenção, alegria, amizade para com todos e dedicação ao seu trabalho de secretária da Pós-graduação em Engenharia Civil.

A todos os que fazem o laboratório de solos (Técnicos Francisco, Gutemberg, que muito me ajudou na preparação das amostras, Severino, eterna alegria do laboratório, amigo leal e bom companheiro; ao Engenheiro Antônio Brito pelo constante bom humor e ajuda na realização dos ensaios; ao Professor Joaquim Oliveira, obrigado pelas dúvidas tiradas no decorrer dos ensaios realizados, e pelos dados fornecidos), obrigado a todos vocês pela atenção, convivência e amizade sincera.

A Vânia, pelo constante bom humor e dedicação ao trabalho na limpeza.

A todos os colegas da Pós-graduação em Geotecnia pela acolhida e amizade sincera dedicada a minha pessoa e pelos bons momentos que passamos juntos (não vou citar nomes, pois correria o risco de omitir alguém), principalmente aos colegas do LMCG, Roubier, Inaldo, Jonatha, Juliana (obrigado pelas correções nas equações), Luciana, Tiago Mamu, Vinicius, Débora, Leila, Marcela, Nayra, Gustavo, Rafael, a Gerson agradecimento especial pela amizade e orientações nos ensaios para determinação da curva de retenção, através do método do papel filtro e pelos bons momentos que passamos juntos.

A Sara, pela atenção, simpatia e amizade.

A Rose, pela dedicação aos seus trabalhos e atenção para conosco.

Ao Diretor Geral do D.N.O.C.S. e ao Coordenador Estadual em Pernambuco do D.N.O.C.S., pela minha liberação para que fosse possível cursar o Doutorado.

A todos os colegas do D.N.O.C.S. pelo incentivo, em particular a Saulo, Joaquim e Telmilson.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

Modelagem Numérica com acoplamento Hidro-Mecânico da reconstrução, enchimento do reservatório e comportamento da Barragem de Açú/RN após o acidente no final de construção.

## RESUMO

No presente trabalho estudou-se a simulação acoplada hidro-mecânica da re-construção, enchimento e comportamento da Barragem de Açú/RN, devido ao acidente ocorrido no final do ano de 1981, quando o reservatório se encontrava vazio. Trata-se de um caso interessante de engenharia de ruptura do talude de montante em final de construção. A barragem de terra de Açú, também conhecida como Açude Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, está localizada na zona rural do município de Açú, no estado do Rio Grande do Norte, distante 250 km da capital Natal, com acesso pela BR 304. O objetivo desta tese é simular numericamente a reconstrução da barragem, avaliando o seu comportamento mecânico e hidráulico ao longo do seu processo construtivo, enchimento do reservatório e ao longo de 13 anos de instrumentação, comparando os dados obtidos na simulação através do acoplamento Hidro-Mecânico, com os dados de leitura dos instrumentos instalados no maciço e fundação da barragem. A ferramenta de trabalho utilizada na modelagem numérica foi o programa computacional CODE\_BRIGHT (COupled DEformation and BRine, Gas and Heat Transport) no processo e no pré e pós-processo foi utilizado o **GID** que foi desenvolvido pelo CIMNE (Centro Internacional para Métodos Numéricos em Engenharia). Os resultados obtidos na modelagem numérica para a construção do maciço, assim como o comportamento da barragem, quando do primeiro enchimento do reservatório, foram bastante consistentes. As análises numéricas apresentaram bons resultados, como os deslocamentos verticais registrados pelos tassômetros e as medidas de poro pressão e sub pressão, respectivamente, no maciço e fundação da barragem e a evolução da pressão de pré-adensamento, que nos dá uma idéia do colapso que o maciço sofreu.

Palavras chaves: Solos Não Saturados; Barragens de Terra; Modelagem Numérica

# Hydro-Mechanical Numerical Modeling of the reconstruction, impounding and the behavior of Açú/RN dam after accident at the end of construction

## ABSTRACT

In this work it was studied the hydro-mechanical coupled simulation of reconstruction, impounding and the behavior of Açú/RN dam, due to the accident occurred at the end of the year 1981, when the reservoir was empty. It is an interesting engineering problem which involves upstream slope failure at the end of construction. Açú earth dam is situated in the rural area of Açú town, in the state of Rio Grande do Norte, 250 km far from the city of Natal, with access through BR 304 highway. The objective of this thesis is to simulate numerically the reconstruction of the dam, evaluating its mechanical and hydraulical behavior during its construction, reservoir impounding and along 13 years of instrumental measurement, and comparing the simulation results with the instrumentation data of the body and foundation of the dam. The tool used in the numerical modeling was the “in house” finite element computer code CODE\_BRIGHT (COupled DEformation and BRine, Gas and Heat Transport). The results achieved by numerical modeling for construction, as well as the behavior for the first reservoir impounding, were consistent. The numerical analyses presented good results compared with field observations and measurements, for vertical displacements, pore-pressure and under pressure in the body and foundation of the dam, as well as the development of the overconsolidation pressure which gives a measure of collapse occurred in the dam core.

Keywords: Unsaturated Soils, Earth Dams; Numerical Modeling

# ÍNDICE

| <b>CAPÍTULO</b> |                                                                                                   | <b>Página</b> |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 1.0             | Introdução, Objetivos e Organização da Tese                                                       | 11            |
| 1.1             | Introdução                                                                                        | 11            |
| 1.2             | Objetivos da Tese                                                                                 | 14            |
| 1.3             | Organização da Tese                                                                               | 15            |
| 2.0             | Descrição Geral das Obras do Açude Público Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (Barragem de Açú) | 17            |
| 2.1             | Descrição Geral da Barragem de Açú                                                                | 17            |
| 2.2             | Hidrologia                                                                                        | 18            |
| 2.3             | Características Geológicas                                                                        | 20            |
| 2.4             | Arranjo Geral das Obras                                                                           | 21            |
| 2.5             | Barragem Principal                                                                                | 22            |
| 2.5.1           | Características da Barragem Principal, tomada d'água, vertedouro e diques auxiliares              | 23            |
| 2.5.2           | Modificação da seção transversal original                                                         | 25            |
| 2.5.3           | Acidente no final de construção                                                                   | 26            |
| 2.5.4           | Reprojetoamento da Barragem                                                                       | 28            |
| 2.6             | Instrumentação da Barragem                                                                        | 29            |
| 2.7             | Parâmetros de resistência dos solos para análise de estabilidade no reprojetoamento da Barragem   | 31            |
| 2.8             | Vertedouro                                                                                        | 31            |
| 2.9             | Tomada d'água                                                                                     | 33            |
| 2.10            | Barragem auxiliar                                                                                 | 34            |
| 2.11            | Reconstrução da Barragem                                                                          | 34            |
| 3.0             | Fluxo de água em solos saturados e não saturados                                                  | 35            |
| 3.1             | Introdução                                                                                        | 35            |
| 3.2             | Fases do Solo                                                                                     | 39            |
| 3.3             | Potencial total de água no solo                                                                   | 40            |
| 3.4             | Sucção                                                                                            | 42            |
| 3.5             | Curva Característica do solo                                                                      | 44            |
| 3.6             | Fluxo de água em solos não saturados                                                              | 51            |
| 3.7             | Determinação da permeabilidade do meio poroso a água no                                           | 57            |

|         |                                                                                                        |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|         | laboratório e no campo                                                                                 |     |
| 4.0     | Deformação em solos saturados e não saturados: equação de equilíbrio e modelos constitutivos           | 59  |
| 4.1     | Introdução                                                                                             | 59  |
| 4.2     | Modelos Constitutivos                                                                                  | 63  |
| 4.2.1   | Modelos Constitutivos Mecânicos                                                                        | 63  |
| 4.2.1.1 | Expressões Analíticas                                                                                  | 63  |
| 4.2.1.2 | Superfícies de Estado                                                                                  | 64  |
| 4.2.2   | Modelos Elásticos                                                                                      | 67  |
| 4.3     | Teoria da Plasticidade – Modelos Elastoplásticos                                                       | 69  |
| 4.3.1   | Relação Elástica                                                                                       | 73  |
| 4.3.2   | Função de Plastificação                                                                                | 74  |
| 4.3.3   | Função de Potencial Plástico – Regra de Fluxo                                                          | 76  |
| 4.3.4   | Leis de Endurecimento/Amolecimento                                                                     | 79  |
| 4.3.5   | Modelo de Drucker-Prager                                                                               | 81  |
| 4.3.6   | Modelo Básico de Barcelona (BBM)                                                                       | 85  |
| 4.3.6.1 | Formulação para o estado de tensões isotrópicas                                                        | 89  |
| 4.3.6.2 | Curva de escoamento carregamento - colapso                                                             | 92  |
| 4.3.6.3 | Curva de escoamento de aumento de sucção                                                               | 95  |
| 4.3.6.4 | Leis de endurecimento (deformações volumétricas)                                                       | 96  |
| 4.3.6.5 | Considerações sobre colapso máximo                                                                     | 99  |
| 4.3.6.6 | Extensão do modelo para o caso do ensaio triaxial                                                      | 100 |
| 5.0     | Ensaio de solos realizados para obtenção dos parâmetros do solo a ser utilizados na modelagem numérica | 105 |
| 5.1     | Introdução                                                                                             | 105 |
| 5.2     | Determinação da curva característica pelo método do papel filtro                                       | 106 |
| 5.2.1   | Calibração do papel filtro                                                                             | 108 |
| 5.2.2   | Realização do ensaio com papel filtro                                                                  | 112 |
| 5.2.3   | Determinação da curva de retenção                                                                      | 114 |
| 5.3     | Ensaio com sucção controlada                                                                           | 116 |
| 5.3.1   | Ensaio edométrico com sucção controlada                                                                | 116 |
| 5.3.2   | Ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada                                                    | 124 |
| 6.0     | Modelagem Numérica – Condições de contorno, materiais                                                  | 140 |

|     |                                                                                                                                            |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|     | constituintes e resultados obtidos                                                                                                         |     |
| 6.1 | Introdução                                                                                                                                 | 140 |
| 6.2 | Materiais constituintes da Barragem e Condições de Contorno                                                                                | 143 |
| 6.3 | Análise dos deslocamentos e colapso durante a elevação do maciço, enchimento do reservatório e comportamento da Barragem ao longo dos anos | 146 |
| 6.4 | Análise das tensões desenvolvidas no maciço e fundação da Barragem                                                                         | 168 |
| 6.5 | Análise do fluxo no maciço e fundação da Barragem                                                                                          | 171 |
| 7.0 | Conclusões e sugestões para estudos complementares a este trabalho                                                                         | 183 |
|     | Referências Bibliográficas                                                                                                                 | 185 |
|     | APÊNDICE                                                                                                                                   | 191 |

## Capítulo 1: Introdução, Objetivos e Organização da tese.

### 1.1 – Introdução:

Os solos utilizados nos projetos e construção de barragens de terra estão na condição de solos não saturados, sendo necessário o estudo das características e propriedades destes tipos de solos, convencionais ou não, tais como curva de retenção, permeabilidades intrínseca e relativa destes solos.

Enfim, as leis constitutivas que regem o fluxo de água, assim como, o comportamento mecânico, deformações e tensões, antes de se estabelecer o fluxo de água através da estrutura porosa, durante o regime transiente e após se estabelecer o regime de fluxo estacionário.

Uma vez que é muito comum a ocorrência da condição não saturada, é necessário o conhecimento do comportamento destes solos quando submetidos a carregamentos e regimes de fluxo, através de ensaios de solos no laboratório e no campo, de onde se obtém os parâmetros e propriedades para o uso na construção dos maciços de terra, e para a análise de fluxo de água através do maciço e fundação de uma barragem.

Isto é de fundamental importância para alimentar modelos matemáticos empregados em uma modelagem numérica que considere o acoplamento entre o fenômeno hidráulico e o comportamento mecânico, isto é, o acoplamento Hidro-Mecânico para solos saturados e não saturados.

Os solos não saturados são meios porosos constituídos por quantidades distintas de frações sólidas, líquidas e gasosas. O estudo de fluxo de água em meios

porosos não saturados tornou-se ferramenta indispensável ao engenheiro geotécnico.

A percolação de um líquido (água, no caso em estudo), através da estrutura dos solos não saturados merece destaque em diversas obras de geotécnica, tais como: barragens de terra, aterros, taludes naturais ou artificiais, túneis, escavações em geral, etc.(MORENO, 2005).

O fluxo em solos não saturados pode ocorrer em duas fases: a fase líquida e a fase gasosa. LLORET E ALONSO (1980) consideram o fluxo simultâneo de líquido e gás, onde cada fluido é admitido como contínuo e ocupando completamente o domínio de fluxo.

No caso em estudo, o líquido pode ser composto de água e ar dissolvido e o gás, como uma mistura de ar seco e vapor d'água. A consideração de vapor d'água é importante quando existe a presença de um gradiente de temperatura elevado e o grau de saturação no meio poroso é baixo (COSTA, 2000).

No caso a ser considerado neste trabalho, o processo é considerado isotérmico, pois em ambientes úmidos a umidade é elevada e as diferenças de temperatura no meio poroso considerado são praticamente insuficientes para provocar o fluxo de água na forma de vapor. Neste trabalho só será considerado o fluxo de água na fase líquida.

A utilização da modelagem numérica na previsão e resolução de problemas de engenharia civil e otimização de projetos, tornou-se uma ferramenta imprescindível.

Pode-se obter uma visão qualitativa e quantitativa do comportamento da obra sendo possível prever problemas que venham surgir, tais como: erosão regressiva,

analisando o gradiente hidráulico através do corpo e fundação da barragem, quando a força de percolação pode provocar o rompimento da estrutura do solo e carreamento dos grãos; liquefação, devido ao aumento progressivo da carga piezométrica, a tensão efetiva pode decrescer até anular-se em um ponto da camada de solo, esse fenômeno ocorre somente para areias, uma vez que as argilas apresentam coesão, mesmo quando a tensão efetiva é nula; subpressões na fundação e no pé de talude de jusante, entre outros; assim como, verificar a funcionalidade de ações corretivas adotadas para problemas que surgem nas obras.

CRUZ (1996) comenta sobre a utilização da modelagem numérica em projetos de engenharia “Sempre que a água começa a surgir no pé do talude de jusante da barragem, o ambiente na obra se torna intranquilo e algumas soluções de emergência, talvez desnecessárias, acabam por serem implantadas meio que na correria.

Se fossem gastos mais tempo em estudos sobre por quais caminhos de fluxo a água pode passar, através da modelagem numérica, na melhoria dos nossos ainda primitivos ensaios de permeabilidade, e na implantação de sistemas efetivos, o problema poderia ser resolvido em grande parte e com a vantagem indiscutível de se trabalhar a seco na maioria dos casos.

Se a afirmativa de que “a arte de se projetar uma barragem é essencialmente à arte de controlar o fluxo” é válida, o tempo gasto no projeto do controle de fluxo deverá ser prioritário, dando-se aos demais aspectos do projeto, um tempo proporcional a sua importância (CRUZ, 1996)”.

No presente trabalho, realizou-se uma modelagem numérica hidro-mecânica da Barragem de terra Armando Ribeiro Gonçalves (Barragem de Açú) localizada no município de Açú no estado do Rio Grande do Norte, de propriedade do D.N.O.C.S

sendo analisado a construção e o funcionamento da barragem no que diz respeito ao seu comportamento mecânico, quando submetido ao regime de fluxo de água através da estrutura dos seus materiais componentes.

A complexidade do problema acoplado requer a utilização de técnicas numéricas para a sua resolução, as quais comumente usam o método dos elementos finitos como técnica de aproximação. A descrição do comportamento mecânico necessita de uma relação constitutiva entre tensões e deformações, atuantes no solo não saturado. Esta relação geralmente é estabelecida entre variáveis macroscópicas obtidas durante ensaios experimentais (COSTA, 2000).

BISHOP & DONALD (1961), MATYAS & RADHAKRISHNA (1968) E FREDLUND & MORGENSTERN (1977) em seus trabalhos estabelecem relações entre o estado de tensões totais, pressão do ar e pressão da água, onde geralmente são usadas as tensões excedentes sob pressão do ar e sucção.

Os avanços na formulação das relações constitutivas têm mostrado que as deformações dos solos não saturados, quando submetidos a variações de tensões e de sucção, podem ser favoravelmente interpretadas no contexto da plasticidade com endurecimento (ALONSO, GENS & HIGHT, 1987; ALONSO, GENS & JOSA, 1990; GENS & ALONSO, 1992; WHELER & SIVAKUMAR, 1995; MAÂTOUK, LEOUIEL & LA ROCHE, 1995; CUI & DELAGE, 1996).

Modelo Básico de Barcelona (BBM), baseado em uma extensão do modelo Cam-Clay, permanece sendo a referência básica neste contexto (COSTA, 2000).

## **1.2 – Objetivo**

O objetivo geral dos estudos desenvolvidos neste trabalho consistena aplicação de um modelo matemático capaz de simular de forma realística, o

comportamento mecânico dos solos utilizados na construção de barragens de terra, na condição não saturado, acoplado ao regime de fluxo de água (acoplamento hidromecânico).

Na simulação do fluxo de água através da estrutura dos solos envolvidos na análise do problema, tem-se como objetivo, verificar o comportamento da barragem, durante sua construção, enchimento do reservatório e ao longo da sua vida útil.

A comparação dos dados obtidos através de um projeto de instrumentação, adequadamente elaborado, com os dados obtidos na modelagem numérica, é um dos objetivos principais deste trabalho, no que diz respeito à análise dos dados de distribuição dos deslocamentos, deformações, tensões, sub-pressões, poro pressões, vazões, gradientes hidráulicos, cargas hidráulicas, grau de saturação ao longo do maciço e fundação da barragem.

### **1.3 – Organização da Tese:**

A presente tese encontra-se dividida em seis capítulos, sendo assim distribuídos:

- **O capítulo 1** consta de uma introdução, objetivo e organização da tese;
- **O capítulo 2** consta dos dados e relatos dos fatos ocorridos na obra, isto é, todos os dados referentes à construção, desabamento da obra no final de construção, reconstrução da barragem, parâmetros dos solos envolvidos na construção da barragem, através de ensaios de campo e de laboratório, realizados antes e após o acidente e leituras dos instrumentos instalados no maciço da barragem e fundação;

- **No capítulo 3** é dada ênfase à teoria sobre Solos Não Saturados e fluxo de água em meios porosos;
- **O capítulo 4** é dedicado à modelagem numérica, onde se fez comentários a respeito da ferramenta de trabalho utilizada, o programa computacional CODE\_BRIGHT, suas principais características e aplicações. Também é feita a descrição dos modelos elastoplásticos utilizados: Mohr-Coulomb e o BBM (Modelo Básico de Barcelona);
- **No capítulo 5** constam os resultados dos ensaios realizados para obtenção dos parâmetros dos solos necessários a aplicação dos modelos matemáticos;
- **No capítulo 6** apresenta-se a análise dos resultados obtidos na modelagem numérica do problema em estudo, comparando-os com os resultados obtidos nas leituras dos instrumentos instalados na barragem;
- **O capítulo 7** Dedicado as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

## **Capítulo 2: Descrição Geral das obras do Açude Público Armando Ribeiro Gonçalves (Barragem de Açú).**

### **2.1 – Descrições gerais da Barragem de Açú/RN**

O Açude Público Armando Ribeiro Gonçalves, mais conhecido como Barragem de Açú, está localizado no rio Piranhas, também denominado Açú, distante 6 km da cidade de Açú, no estado do Rio Grande do Norte.

O acesso ao local é feito, pela BR 304, distando 250 km da cidade de Natal.

O objetivo do açude é o suprimento de água ao projeto e irrigação do Baixo-Açú. São inúmeros os benefícios gerados pelo projeto Baixo-Açú, destacando-se, sobretudo o aproveitamento hidroagrícola das terras aluviais do vale, assim como os chapadões dos tabuleiros das encostas, cuja irrigação promoverá o desenvolvimento agrícola em uma área com cerca de 25.000 ha, com geração de quase 12.000 empregos diretos e indiretos.

A construção da barragem Armando Ribeiro Gonçalves exigiu ações complementares necessárias ao remanejamento das populações atingidas, com o enchimento do reservatório, e das infra-estruturas localizadas na área inundável da bacia hidráulica. Entre as ações desenvolvidas merecem destaque: relocação da sede do município de São Rafael com assentamento de toda a população (730 famílias); construção de um dique de proteção à cidade Jurucutu, com assentamento de parte da população urbana; relocação das linhas de transmissão e do sistema viário e reassentamento da população rural (1.852 famílias), em sítios convenientemente selecionados, de modo a não paralisar as atividades agrícolas,

principal fonte de manutenção e subsistência. Foram também efetivadas as indenizações das propriedades mineiras localizadas na área do lago.

O Açude Açú na época de sua construção era o maior reservatório construído pelo D.N.O.C.S. sendo hoje o segundo maior, ficando atrás do reservatório formado pelo Açude Público do Castanhão, no Ceará, com capacidade de armazenamento de água de 2,4 bilhões de metros cúbicos de água e bacia hidráulica com área de 195 km<sup>2</sup>. O volume regularizado é de 389 milhões de m<sup>3</sup> para uma garantia de 90%.

## **2.2 – Hidrologia**

Foram admitidos como representativos para a bacia, os dados pluviométricos do posto Açú, referentes ao período de 1911-1971.

A bacia tributária do açude é de 36.770 km<sup>2</sup>, estando incluídos nesta área, a montante da barragem, 20 açudes públicos construídos pelo D.N.O.C.S., bem como 115 açudes construídos em regime de cooperação, além de um número razoável de pequenos açudes particulares.

Foi deduzida a área de drenagem correspondente aos açudes existentes e, em seguida, avaliaram-se os deflúvios remanescentes na bacia. Esta avaliação foi feita com base nos dados dos postos fluviométricos de Pau Ferrado, Sítio Vassouras, Jardim de Piranhas e Oiticica II (todos dentro da bacia), sendo que o período observado foi o correspondente a 1963 - 1971.

A aplicação desses dados ao período 1912-1963 foi realizada com base numa correlação entre os deflúvios remanescentes anuais e as chuvas correspondentes na bacia. A distribuição ao longo de cada ano foi o resultado da aplicação do padrão

médio de distribuição dos deflúvios mensais ao ano, no período conhecido 1963-1971.

Os deflúvios remanescentes foram então calculados para o posto de Oiticica II, com bacia tributária conhecida de 36.770 km<sup>2</sup>, subtraindo-se as descargas liberadas para os açudes públicos construídos a sua montante.

Para o estudo de regularização dos deflúvios, foi realizada a operação simulada do reservatório em bases mensais, considerando-se duas alternativas: demanda alta e demanda baixa.

O estudo de cheias foi realizado através das enchentes no período estudado e dos hidrogramas unitários correspondentes, estabelecidos para as diversas subáreas consideradas, conforme se pode observar na figura 2.1.

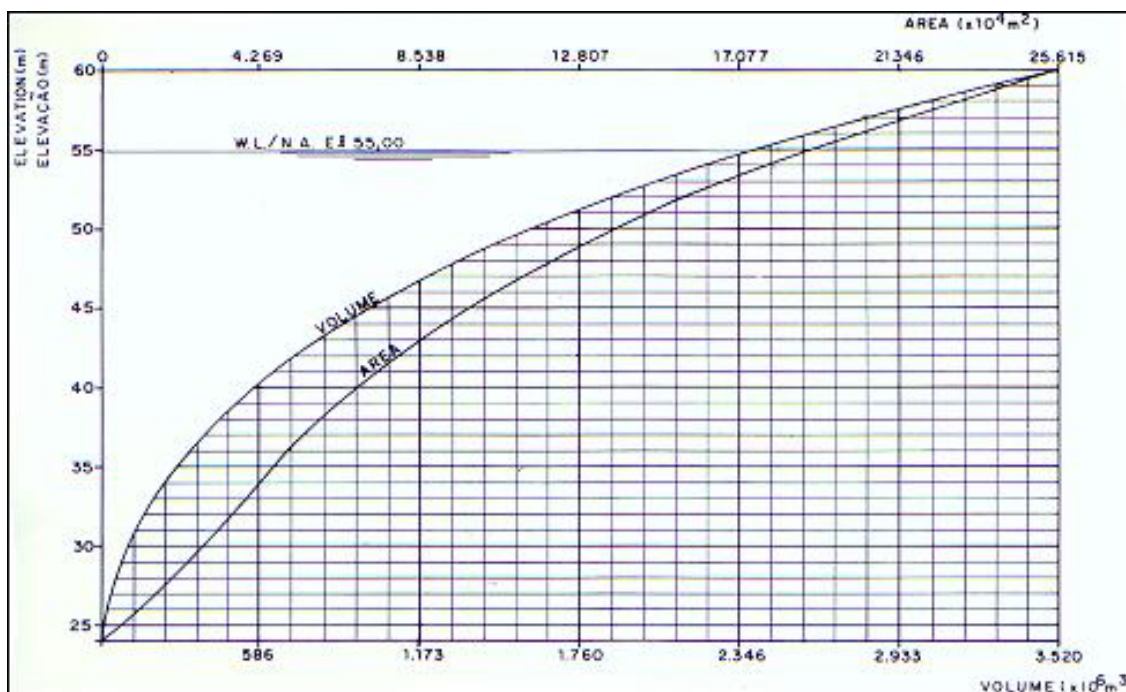


Figura 2.1 – Curvas cotas x área x volume (DNOCS, 1990).

### 2.2.1 – Características Hidrológicas

A Tabela 1 apresenta as características hidrológicas do Açude Armando Ribeiro Gonçalves.

Tabela 01 – Características Hidrológicas do Açude Armando Ribeiro Gonçalves (Barragens no Nordeste Brasileiro, DNOCS – 1990).

|                            |                                                                              |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Pluviometria média         | 570mm                                                                        |
| Área da bacia drenante     | 36.770 km <sup>2</sup>                                                       |
| Área da bacia remanescente | 20.890 km <sup>2</sup>                                                       |
| Deflúvio remanescente      | 40,20 m <sup>3</sup>                                                         |
| Volume escoado             | 1,270 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ou uma lâmina de 61 mm.               |
| Descarga média             | 185,50 m <sup>3</sup> /s                                                     |
| Volume regularizado        | 389 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> para uma frequência de garantia de 90%. |
| Cheia cinquentenária       | 5.300 m <sup>3</sup> /s                                                      |
| Cheia máxima provável      | 13.000 m <sup>3</sup> /s                                                     |

### 2.3 – Características Geológicas e Geotécnicas

A região da obra é representada por um complexo granítico migmatítico com características xistosas, cinza, pouco alterado, com pontos localizados bastante alterados. Nas ombreiras é encoberto por um solo residual pouco espesso, envolvendo afloramento de rochas graníticas, e no trecho da calha do rio por um pacote aluvionar, constituído de areia média grossa, amarelada, com espessura de 26 m.

O maciço migmatítico granítico apresenta-se estruturalmente pouco e mediantemente fraturado, com fraturas normalmente seladas ou preenchidas por materiais quartzo-feldspatos.

Os materiais utilizados na construção do maciço compactados foram os materiais aluvionares existentes nas margens do rio.

São eles, o de composição silto-argilosa (CL-CH), de coloração cinza escura; o cascalho argilo-arenoso (SC-GC), de coloração avermelhada, que ocorre em um altiplano na ombreira da esquerda; o material arenoso, de granulometria média a grossa, retirado diretamente do leito do rio.

O material de transição, cascalho arenoso, obtido na raspagem superficial da jazida de cascalho argilo-arenoso; e o material pétreo obtido através da exploração de uma grande ocorrência de rocha granítica, na ombreira da esquerda.

## **2.4 – Arranjo geral das obras**

A disposição geral das estruturas inclui uma barragem de terra fechando o vale em um boqueirão suave, com um comprimento total de 2553 m até a posição onde se encontram os elementos extravasores, compostos de um vertedouro principal (ou vertedouro de serviço), dois diques transbordáveis e um dique fusível com três células separadas estrategicamente, localizados entre o vertedouro principal e o muro de proteção da ombreira esquerda.

O conjunto se completa com uma tomada d'água em túnel, com extensão de 165 m, situada na margem direita conforme se pode observar na Figura 2.3.

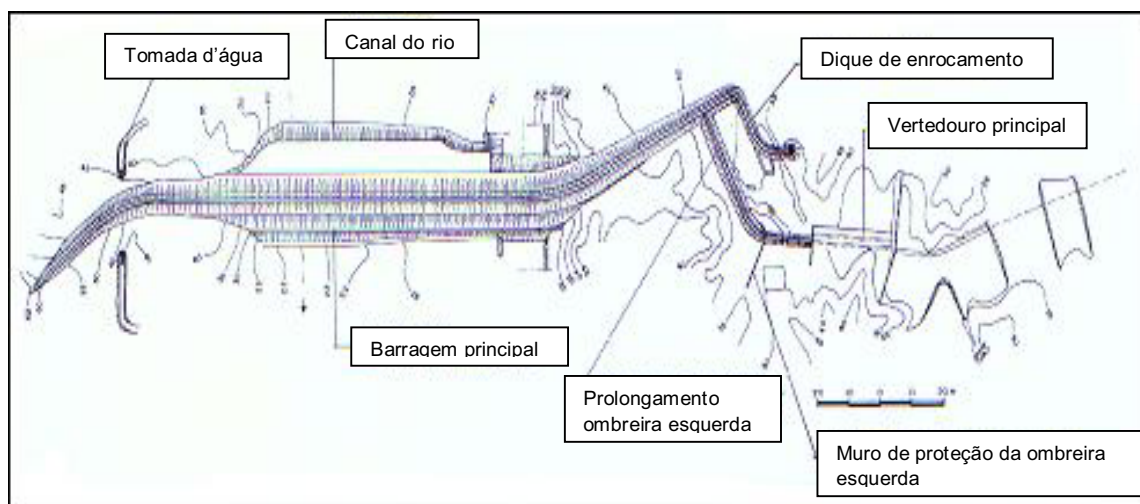


Figura 2.3 – Arranjo geral das obras (DNOCS, 1990).

## 2.5 – Barragem principal

A barragem principal é composta de trechos homogêneos nas ombreiras e de seções zoneadas na parte central do maciço, em função das características da fundação, conforme se pode observar na Figura 2.4.

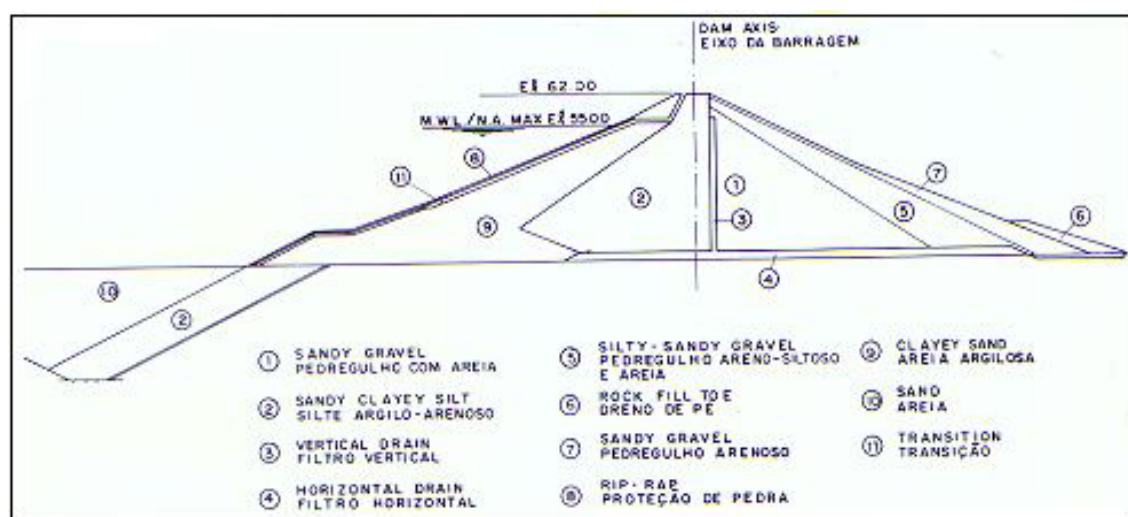


Figura 2.4 – Seção transversal do projeto original (DNOCS, 1990).

A fundação da barragem, na parte central do vale, é composta de sedimentos arenosos, com profundidade que excedem 20 m, com característica de elevada permeabilidade.

Subjacente a este aluvião ocorre um gnaiss migmatítico ocasionalmente capeado por material de alteração poço permeável.

### 2.5.1 – Características da Barragem principal, tomada d'água, vertedouros e dique auxiliar

Na Tabela 02 estão colocadas as características do Açude Público Armando Ribeiro Gonçalves (DNOCS, 1990).

Tabela 02 – Dados da barragem principal, vertedouros, tomada d'água e dique auxiliar.

| <b>Barragem Principal</b>                      | <b>Dados</b>                                                                 |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Cota do coroamento                             | 62,00 m                                                                      |
| Cota do leito do rio                           | 22,00 m                                                                      |
| Altura máxima da barragem sobre o leito do rio | 40,00 m                                                                      |
| Comprimento da barragem                        | 2.440,00 m                                                                   |
| Largura da crista da barragem                  | 8,00 m                                                                       |
| Talude de montante                             | 1V:2H (da cota 62,00m até a cota 55,00m)                                     |
|                                                | 1V:2,5H (da cota 55,00m até a cota da ensecadeira 36,00m)                    |
|                                                | 1V:3H (da cota 36,00m da ensecadeira, até a cota do terreno natural 22,00m)  |
| Talude de jusante                              | 1V:1,9H (da cota 62,00m até a cota 45,70m, da banquetta com 4,0m de largura) |
|                                                | 1V:2,5H (da cota da banquetta, 45,70m até a cota 30,00m)                     |
|                                                | 1V:3H (da cota 30,00 até a cota do terreno natural no pé do talude)          |

|                                                            |                                  |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Profundidade máxima do septo impermeabilizante (cut-off)   | 27,00 m                          |
| Volume máximo de acumulação                                | $2,40 \times 10^6 \text{ m}^3$   |
| Volume útil de acumulação (entre as cotas 35,00m e 55,00m) | $2,10 \times 10^6 \text{ m}^3$   |
| Nível d'água máx. maximorum                                | 60,50 m                          |
| Nível d'água máx. normal                                   | 55,00 m                          |
| Nível d'água mínimo operacional                            | 38,20 m                          |
| Nível mínimo                                               | 35,00 m                          |
| <b>Tomada D'água</b>                                       |                                  |
| Extensão do túnel da tomada d'água                         | 165,00 m                         |
| Descarga máxima da tomada d'água (N.A.máx. normal)         | $30,00 \text{ m}^3$              |
| Descarga mínima da tomada d'água (N.A.mín. operacional)    | $25,00 \text{ m}^3$              |
| Cota da soleira da tomada d'água                           | 31,60 m                          |
| <b>Vertedouros</b>                                         |                                  |
| Largura do vertedouro principal                            | 220,00 m                         |
| Cota da soleira do vertedouro principal                    | 55,00 m                          |
| Largura do dique transbordável                             | 415,00 m                         |
| Cota da soleira do dique transbordável                     | 58,70 m                          |
| Comprimento do dique fusível                               | 200,00 m                         |
| Cota do dique fusível                                      | 60,20 m                          |
| Vazão do vertedouro no N.A.máx. maximorum                  | $12.367,00 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| <b>Dique auxiliar</b>                                      |                                  |
| Comprimento do dique auxiliar                              | 1.340,00 m                       |
| Altura máxima sobre o terreno natural                      | 15,00 m                          |
| Cota do coroamento do dique                                | 62,00 m                          |

O “cut-off” ou, no caso presente, um septo de impermeabilização, foi projetado e construído no prolongamento do talude de montante, até encontrar rocha sã.

Essa localização permitiu que se executasse simultaneamente não só a elevação da barragem como a sua fundação, já que as escavações, com o desafiante rebaixamento do lençol freático, absorveram bastante tempo.

### **2.5.2 – Modificação da seção transversal original**

Em visita a obra quando do início da elevação do maciço, no dia 24/06/1980, o consultor internacional em Engenharia Civil (Geotécnia) contratado pela Hidroterra, ao ver o material que estava sendo espalhado na praça de trabalho, e os materiais nas respectivas jazidas, além de observar os percentuais de material extraídos de três furos realizados no maciço, constatou que o percentual de pedregulho era de 40%, 50% e 53%, respectivamente.

Argumentando que tal percentual era elevado e que dificilmente os materiais finos preencheriam os vazios entre os pedregulhos, e que quando submetido ao fluxo de água, poderia ocorrer o fenômeno de erosão regressiva neste trecho, e após examinar o projeto original da firma SERETE, sugeriu que seria conveniente:

- Construir uma camada de 7m de espessura com argila impermeável da zona 3, a fim de se obter um selo impermeabilizante entre a camada impermeável inclinada de montante, denominada de septo impermeabilizante (cut-off), construída com material da zona 3 (argila cinza escura, muito plástica utilizada no cut-off), e o núcleo impermeável da barragem (Figura 2.5).
- O caminho de percolação à montante da barragem, atualmente da ordem de 10m, deve ser aumentado (no caso, passaria a ter 17m), a fim de proteger a barragem contra fissuramento (proveniente de recalques diferenciais, quando

do término de elevação do maciço da barragem, da camada inicial da fundação, composta por uma areia fina a média, muito fofa) e piping.

- Análises de estabilidade devem ser feitas para as alternativas 1 e 2, antes de tomar uma decisão sobre qual alternativa deva ser adotada(ver Figura 2.5).

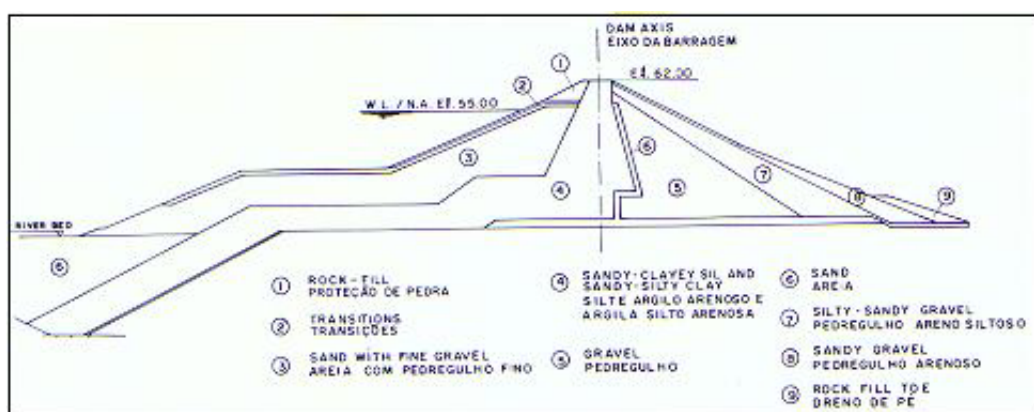


Figura 2.5 – Seção transversal modificada da barragem (DNOCS, 1990).

### 2.5.3 – Acidente no final de construção

Durante a construção da barragem (Final de construção) houve um escorregamento do talude de montante, na sua parte central, provocando um desmoronamento de material, de grandes proporções, da ordem de 1,5 milhões de metros cúbicos.

Estudos técnicos e geotécnicos foram contratados pelo D.N.O.C.S. e o resultado, apresentado pelos consultores Professores Costa Nunes e Victor de Mello, concluiu que o acidente ocorreu em condições características de ruptura de “fim de período de construção” conforme se pode observar no croqui da Figura 2.6 e da Figura 2.7.

Quando da mudança do projeto original da consultoria SERETE, foram realizadas várias análises de estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem, pelo método de Bishop modificado, considerando a superfície de ruptura, circular. Em todas as superfícies consideradas na análise de estabilidade, o fator de segurança foi maior ou igual a dois ( $F.S. \geq 2,0$ ).

Em nenhum momento foi realizada uma verificação de estabilidade dos taludes, considerando uma ruptura com superfície composta, utilizando, por exemplo, o método de Morgenstern & Price, devido, principalmente, a geometria adotada para o material argiloso escuro, conforme se pode observar na figura 2.5.

Ao se verificar, depois de ocorrido o acidente, a estabilidade da barragem, utilizando o método de Morgenstern & Price, obtiveram valores para o fator de segurança menor que um ( $0 < F.S. < 1$ ).



Figura 2.6 – Foto do acidente em final de construção (DNOCS, 1990).

## 2.5.4 – Reprojetamento da Barragem

A barragem foi re-projetada e corrigiu-se a seção transversal, deslocando-se o filtro chaminé mais para montante, utilizando-se o mesmo material, e homogeneizando-se os materiais cascalhos-areno-argilosos para os espaldares de montante e jusante.

No espaldar de montante, utilizou-se um material cascalhos-areno-argilosos, de coloração vermelha, possuindo um percentual de finos apreciável, enquanto que no espaldar de jusante foi utilizado junto ao filtro vertical de areia, o material cascalhos-areno-argilosos, mas com uma quantidade de fino bem menor do que o utilizado no espaldar de montante.

Adjacente a esse material, à jusante e fazendo fronteira com o enrocamento de pedras do dreno de pé, permaneceu o material que ficou intacto após o acidente, procurando-se fazer uma amarração, entre o material cascalhos-areno-argilosos (com uma quantidade pequena de finos) e o material que ficou intacto, denominado solo 1C (constituído por pedregulhos arenosos) durante a re-construção do maciço, conforme se pode observar na Figura 2.8.

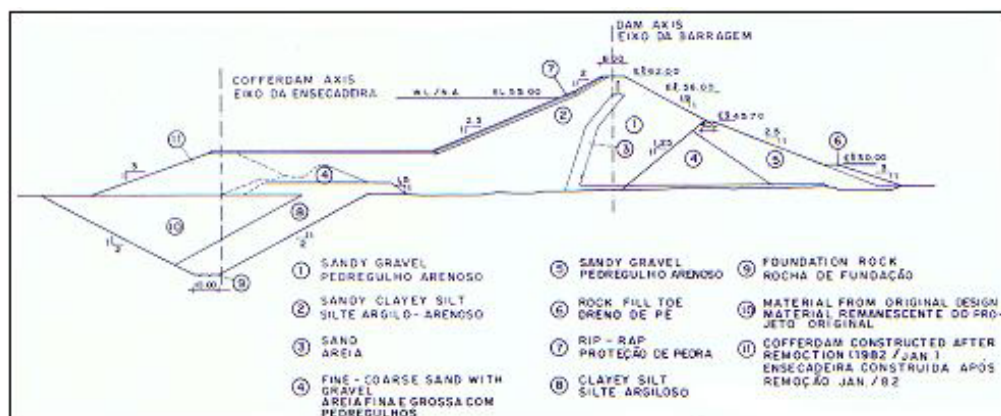


Figura 2.8 – Seção transversal da barragem re-projetada (DNOCS, 1990).

## 2.6 - Instrumentação da barragem na estaca 53+00

A barragem está totalmente instrumentalizada, constituindo-se de marcos superficiais, medidores de deslocamentos verticais, inclinômetros e piezômetros de Casagrande e pneumáticos, conforme se pode observar no Quadro 01 na figura 2.9, consta Locação dos instrumentos na barragem.

Quadro 01 – Locação da instrumentação da Barragem (TECNOSOLO, 1982).

| INSTRUMENTOS                              |                 | ESTACA 53 + 00 |                         |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|
|                                           |                 | COTA (m)       | AFASTAMENTO DO EIXO (m) |
| MARCOS SUPERFICIAIS                       | M-1             | 56,50          | 15,00 (M)               |
|                                           | M-2             | 47,50          | 37,50 (M)               |
|                                           | M-3             | 38,50          | 60,00 (M)               |
|                                           | M-4             | 36,00          | 82,50 (M)               |
|                                           | M-5             | 36,00          | 104,00 (M)              |
|                                           | M-6             | 36,00          | 125,00 (M)              |
|                                           | M-7             | 62,00          | 4,00 (J)                |
|                                           | M-8             | 51,50          | 25,00 (J)               |
|                                           | M-9             | 43,50          | 41,75 (J)               |
|                                           | M-10            | 38,00          | 55,50 (J)               |
| TASSÔMETROS<br>(EXTENSÔMETROS MAGNÉTICOS) | T-1             | 50,00          | 18,00 (J)               |
|                                           | T-2             | 43,00          | 18,00 (J)               |
|                                           | T-3             | 35,00          | 18,00 (J)               |
|                                           | T-4             | 24,00          | 18,00 (J)               |
|                                           | T-5             | -4,50          | 18,00 (J)               |
|                                           | T-6             | 50,00          | 16,50 (M)               |
|                                           | T-7             | 43,00          | 16,50 (M)               |
|                                           | T-8             | 33,00          | 16,50 (M)               |
|                                           | T-9             | 24,00          | 16,50 (M)               |
|                                           | T-10            | -4,50          | 16,50 (M)               |
|                                           | T-11            | 29,00          | 81,50 (M)               |
|                                           | T-12            | 22,00          | 81,50 (M)               |
|                                           | T-13            | -3,00          | 81,50 (M)               |
| PIEZÔMETROS                               | TIPO CASAGRANDE | Pz C-1         | 20,00 116,00 (M)        |
|                                           |                 | Pz C-2         | 20,00 90,00 (M)         |
|                                           |                 | Pz C-3         | 10,00 136,00 (M)        |
|                                           |                 | Pz C-4         | 10,00 110,00 (M)        |
|                                           |                 | Pz C-5         | 0,00 156,00 (M)         |
|                                           |                 | Pz C-6         | 0,00 130,00 (M)         |
|                                           |                 | Pz C-7         | 26,50 4,00 (J)          |
|                                           | PNEUMÁTICOS     | Pz P-1         | 37,50 29,00 (M)         |
|                                           |                 | Pz P-2         | 28,50 22,00 (M)         |
|                                           |                 | Pz P-3         | 28,50 38,00 (M)         |
|                                           |                 | Pz P-4/5       | VER NOTA 2 VER NOTA 2   |
| VERTICAIS<br>INCLINÔMETROS                | I-1             | BASE EM ROCHA  | 19,50 (J)               |
|                                           |                 |                | 81,00 (M)               |

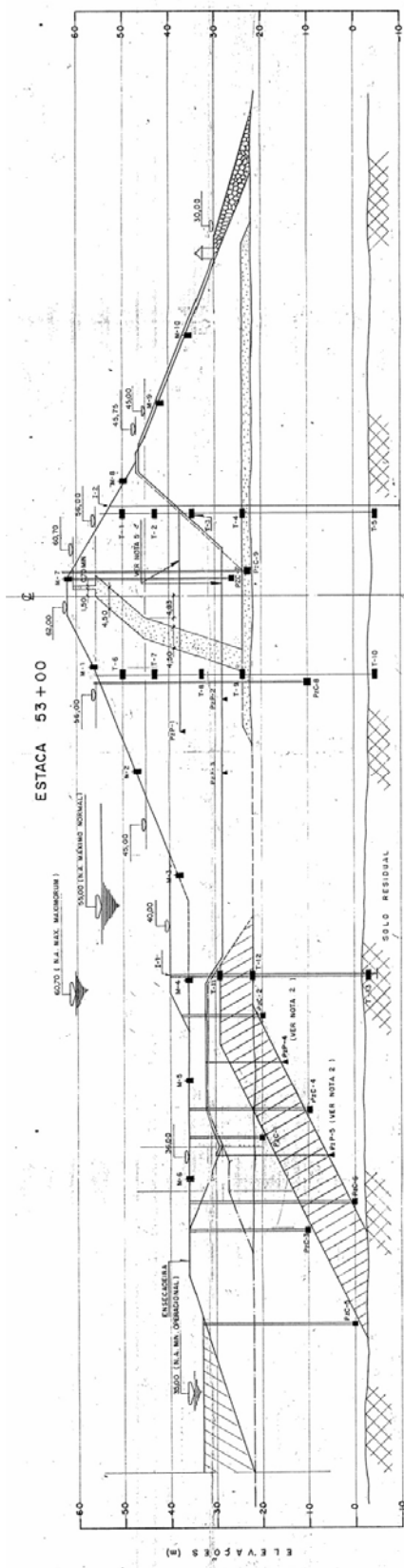


Figura 07b - Instrumentação da barragem

Figura 2.9 – Instrumentação na barragem (DNOCS, 1990)

## 2.7 - Parâmetros de resistência dos solos para análise de estabilidade no reprojeto da barragem.

Os parâmetros dos solos a serem utilizados na reconstrução da barragem principal de Açú, foram obtidos através de ensaios de laboratório, realizados pela TECNOSOLO (relatórios de reprojeto da barragem de Açú), sob a supervisão dos consultores Professores Costa Nunes e Vitor Mello,

Tabela 03 – Parâmetros dos solos após o reprojeto da barragem (TECNOSOLO, 1982).

| Material                                                                            | Peso específico<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Condição                                | Coesão - c'<br>(KN/m <sup>2</sup> ) | Ângulo de atrito<br>$\phi$<br>'(graus) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| Solo IIA<br>(argila siltosa)<br>Utilizado no<br>septo<br>impermeável<br>da fundação | 16,00                                   | Intacta<br>Com<br>laminação<br>residual | 10,00<br>5,0 a<br>10,0<br>0,0       | 18<br>15<br>7,5                        |
| Solo IB<br>(cascalho<br>areno-<br>argiloso)                                         | 20,00                                   | Compactado<br>em<br>laboratório         | 20,00                               | 27                                     |
| Areia<br>(drenos e<br>fundação)                                                     | 19,00                                   | -----                                   | 0,00                                | 30                                     |

## 2.8 - Vertedouros

A cheia adotada para o projeto foi a máxima provável, que é de 13.000m<sup>3</sup>/s, o que exigiu a adoção de extensas superfícies vertentes. Após o acidente, as revisões do projeto relacionadas à segurança da obra incluíram novos estudos hidrológicos e hidráulicos com a colaboração de consultores e especialistas nestas disciplinas.

Além da revisão dos valores de picos de cheias, foram também revistos os hidrogramas das enchentes e os estudos de amortecimento pelo reservatório.

Desta forma, foram adotados e construídos os seguintes descarregadores:

- Vertedouro de serviço tipo soleira livre, com 255m de extensão em perfil Creager, com soleira na cota 55,00m;
- Dique transbordável nº 1, com crista na cota 58,70m e soleira na cota 57,50m, com extensão de 295m;
- Dique transbordável nº 2, com soleira na cota 57,50m e extensão de 110m;
- Dique fusível com três células para graduar a liberação da vazão. As soleiras dos três diques estão na cota 55,00. As cotas das cristas variam, sendo 60,20 na primeira. As células estão separadas entre si por muros de concreto. O comprimento total é de 200m.

O vertedouro, os diques transbordável 1 e 2, e o dique fusível com as três células para liberação gradual da vazão, estão mostrados na Figura 2.10.



Figura 2.10 – Vista aérea do vertedouro e diques transbordáveis 1 e 2 (DNOCS, 1990).

## 2.9 – Tomada d'água

A tomada d'água está localizada na ombreira direita e atravessa a barragem por um túnel, com diâmetro de 2,80 m e 165 m de extensão. Na entrada de montante foi previsto o fechamento através de uma torre de comando em concreto, dotada de “*stop-log*”.

A jusante há uma bifurcação da tubulação com válvula borboleta, seguida de duas válvulas dispersoras. O canal de aproximação à montante tem uma extensão de 220 m e largura de 6 m e o canal de descarga tem 270 m de extensão e 25 m de largura. Na Figura 2.11 se pode observar o túnel da tomada d'água escavado na rocha.



Figura 2.11 – Túnel da tomada d'água escavado na rocha (DNOCS, 1990).

## **2.10 – Barragem auxiliar**

A barragem auxiliar é do tipo terra homogênea com 19m de altura máxima, o coroamento tem largura igual a 8 m, na cota de 62,00 e extensão de 165 m, situada na ombreira esquerda da Barragem principal.

## **2.9 – Reconstrução da Barragem principal**

A construção da barragem foi iniciada em 1979 pela Construtora Andrade Gutierrez S.A. Em dezembro de 1981 houve o acidente relatado no item Arranjo Geral, resultante do escorregamento do talude de montante. O projeto foi refeito e a construção continuada em ritmo acelerado até sua conclusão em 1983. Na Figura 2.12 observa-se o sangradouro quando da cheia em abril de 2006.



Figura 2.12– Vista do sangradouro em funcionamento na cheia de 2006.

## **Capítulo 3: Fluxo de água em Solos Saturados e Não Saturados.**

### **3.1 – INTRODUÇÃO**

Na superfície do planeta, grandes áreas se encontram em regiões de clima árido e semi-árido, nas quais as evaporações excedem as precipitações. O lençol freático nessas regiões geralmente encontra-se localizado em razoável profundidade, e as camadas de solos que se encontram acima do mesmo, passam a ter uma considerável importância para as obras de engenharia, devido às peculiaridades dos problemas que estes solos apresentam (por exemplo, colapso e expansão).

Dependendo das condições climáticas predominantes nas regiões onde os solos se desenvolvem (já que o clima é um importante fator na formação dos solos, pois é através do intemperismo que as rochas sofrem uma degeneração físico-química, e tal degeneração imprime ao material características que são refletidas nas propriedades mecânicas dos mesmos), os solos podem ter seu comportamento mecânico governado pelos princípios da mecânica dos solos saturados e não saturados.

São vários os fatores associados ao clima que afetam a formação e o comportamento mecânico dos solos. Podem-se agrupar estes fatores em dois (HASTENRATH, 1990; MORENO, 2005):

- Fatores preparatórios – O clima atua como agente intemperizador ou laterizador.

- Fatores deflagatórios – O clima atua como agente instabilizador de um equilíbrio estabelecido.

Os agentes instabilizadores definem, por exemplo, a condição de saturação ou não saturação de um solo. A alteração do estado de saturação de um solo tem conseqüências importantes para a análise das obras e problemas de engenharia.

A dessaturação pode ocorrer por evaporação, evapotranspiração dos vegetais ou drenagem. A formação de trincas ao ocorrer a dessaturação, é induzida pelo gradual ressecamento do solo. Estas trincas podem em muitos casos instabilizar taludes e fundações.

A saturação do solo pode ocorrer por precipitação pluviométrica, vazamento em tubulações de água, irrigação, elevação do lençol freático, etc.

Na prática da engenharia geotécnica a influência da água intersticial nos vazios do solo é freqüentemente explicada em termos de grau de saturação do material.

O grau de saturação de um solo pode ser alterado pelo movimento relativo entre água intersticial e grãos de solo que é também fortemente influenciado pela permeabilidade da sua matriz. Esse movimento de água, se não controlado adequadamente, pode contribuir significativamente para a desestabilização da estrutura do solo.

O comportamento de um maciço de solo sob fluxo transiente de água requer que o comportamento mecânico e hidráulico dos solos componentes, durante o processo gradual de saturação, seja previsto.

Este comportamento deve ser analisado usando uma teoria capaz de descrever como se comporta um maciço de solo quando submetido à ambas as

condições: saturada e não saturada. A teoria deve também prever uma transição suave entre estas duas condições (MARINHO & PEREIRA, 1998).

Para aqueles solos que estão abaixo do nível d'água, as poro-pressões são positivas e os solos estão. Já para aqueles solos que se encontram acima do nível d'água, em geral as poro-pressões são negativas e os solos são ditos não saturados.

A principal diferença entre solos saturados e não saturados é a existência de uma pressão negativa na água dos poros dos solos não saturados, comumente definida de sucção, a qual tende a aumentar a tensão intergranular e, conseqüentemente, a resistência e rigidez do solo (SOUZA NETO, 2004).

Na construção de obras de terra, no caso em estudo, barragens de terra (homogênea, zoneada ou de enrocamento), os solos utilizados encontram-se geralmente na condição não saturada, e deve-se estudar o comportamento desses solos quando submetidos ao fluxo de água através de suas estruturas.

A arte de projetar uma barragem está ligada a arte de controlar o fluxo de água através do conjunto maciço - fundação da barragem.

A estabilidade externa (taludes) e interna (conjunto maciço – fundação) deve atender aos requisitos básicos de segurança estabelecidos em função do tipo de obra e das diversas condições de carregamentos admitidos.

Para satisfazer esses requisitos, três princípios básicos de projeto devem ser atendidos;

i – Princípio de controle de fluxo: Considerando o eixo da barragem, todo esforço deve ser concentrado no sentido de vedar ao máximo a barragem e sua fundação à montante do eixo, introduzindo todos os sistemas de vedação

necessários. Por outro lado, todo esforço deve ser concentrado em facilitar ao máximo a saída de água à jusante do eixo da barragem, introduzindo todos os sistemas de drenagem na barragem e fundação, que sejam necessários.

ii – Princípio da estabilidade: As zonas externas ou espaldares da barragem devem ter características de resistência que garantam a estabilidade dos taludes e devem ser compatibilizadas com os materiais de fundação, para garantir a estabilidade do conjunto maciço – fundação para várias condições de carregamento.

iii – Princípios da compatibilidade das deformações: A compressibilidade dos materiais das várias zonas da barragem e de sua fundação deve ser compatibilizada ou transicionada por zonas adicionais de transição, a fim de reduzir os recalques diferenciais e totais que venham a prejudicar o desempenho dos sistemas de drenagem e de vedação, ou seja, pela ocorrência de trincas (causadas por recalques diferenciais) que se tornem feições de fluxo concentrado, seja pela inversão dos gradientes de fluxo nos sistemas de drenagem, devido a recalques totais excessivos.

Conquanto os princípios gerais de projetos acima descritos sejam obrigatórios em qualquer projeto de barragem, os tipos de barragens são extremamente variáveis e influenciados pelas condições locais, que acabam por ser determinantes na escolha do perfil da barragem.

Dentre estes condicionantes podem ser destacados os materiais disponíveis, o clima da região, a geologia e hidrologia local, os tipos de equipamentos e recursos de laboratório, legislação local referente a leis sociais e à segurança da obra, fatores de preservação ambiental, prazos construtivos (CRUZ, 1996).

### 3.2 – FASES DO SOLO

Os solos não saturados são meios porosos constituídos por quantidades distintas de frações sólidas, líquidas e gasosas (Figura 3.1), isto é, consiste em um meio multifásico.

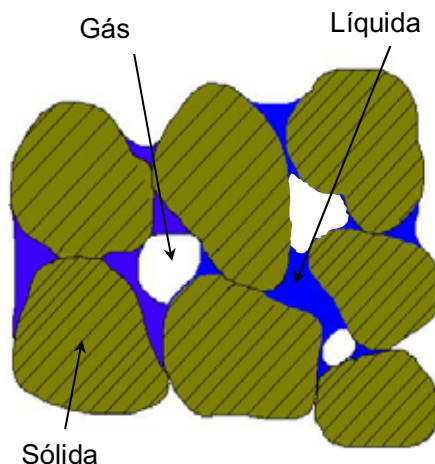


Figura 3.1 – Esquema das fases componentes do solo não saturado.

A **fase sólida** é representada pelas partículas de minerais, podendo apresentar características variáveis como tamanho, forma, composição mineralógica, configuração cristalográfica, etc.

Um aspecto a ser considerado é a superfície específica, à qual estão associados o tipo e o predomínio das forças que atuam na superfície das partículas do solo. As características e propriedades das partículas sólidas, quanto à forma e tamanho, são determinantes no comportamento do solo.

A **fase líquida** é constituída fundamentalmente de água, sais e ar dissolvido. A água dos poros tem sido classificada em três tipos: água gravitacional (é a que está livre para se mover por entre os poros, sob a ação da gravidade), água capilar (é aquela que permanece no solo devido às forças capilaridade desenvolvidas no contato água-partícula do solo, e se movimenta no interior da massa de solo através

da ação destas forças), e água adsorvida (é a água que adere a superfície da partícula sólida, através de mecanismos de adsorção, devido a existência de cargas elétricas negativas nestas superfícies).

Sob o ponto de vista hidrodinâmico, a água capilar e a água gravitacional formam a água livre (JUCÁ, 1990).

A **fase gasosa** é constituída por ar livre e água na forma de vapor e está presente no espaço poroso não ocupado pela água, quando o solo se encontra na condição seca ou não saturada.

Um dos principais fatores de alteração do comportamento mecânico dos solos não saturados é o aparecimento de uma pressão de água negativa nos poros, denominada de sucção (FREDLUND & RAHARDJO, 1994).

### **3.3 – POTENCIAL TOTAL DE ÁGUA NO SOLO**

A água no solo pode ser caracterizada por um estado de energia, podendo ser determinado de diferentes formas e quantidades. A água obedece a uma tendência universal e move-se no sentido de diminuição de energia.

Conhecendo-se os potenciais da água em diferentes pontos do solo, pode-se determinar sua tendência de movimento através da diferença entre estes potenciais.

O potencial total de água no solo é definido como o trabalho realizado para levar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água pura, desde um ponto situado a uma altura conhecida, sob condições atmosféricas, até um ponto considerado de água no solo (JUCÁ, 1990).

A energia disponível para realizar trabalho pode ser descrita em termos de potencial equivalente, chamado de potencial total.

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m + \phi_g + \phi_a \quad (3.1)$$

Onde  $\phi_o$  é o potencial osmótico,  $\phi_m$  é o potencial matricial,  $\phi_g$  é o potencial gravitacional e  $\phi_a$  é o potencial pneumático.

O **potencial osmótico** ou de soluto, que surge em função da diferença de composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. Esta diferença de composição só causará movimento de água pura quando o sistema estiver **separado** por uma membrana semipermeável, que é aquela que só permite passagem de solvente (no caso, a água pura), não deixando passar o soluto.

Como no solo, de uma maneira geral, não existem membranas semipermeáveis, qualquer diferença de potencial osmótico que se estabeleça provoca um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível de água (REICHARDT, 1987).

O **potencial matricial** é resultante das forças capilares ou de adsorção, originada da interação entre a matriz do solo e a água. Quando o solo se encontra na condição saturada, a componente matricial é nula. À medida que o solo vai se tornando não saturado, o efeito de capilaridade começa a atuar e o potencial matricial torna-se negativo.

Para altos valores de umidade, a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial matricial. Nestas condições, o arranjo poroso determinado pela estrutura, textura e composição das partículas é de enorme importância.

Para baixos valores de umidade, o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância e a adsorção passa a governar os valores de potencial matricial (REICHARDT, 1987).

O **potencial gravitacional**, obtido pela elevação do ponto em questão relativa ao nível de referência, reflete a componente de posição. Considerando apenas o campo gravitacional, a água tem uma energia potencial gravitacional que

depende da posição na qual ela se encontra em relação a um dado plano referencial (REICHARDT, 1987).

Já o **potencial pneumático** ou de pressão, origina-se de pressões externas de gás diferentes da pressão atmosférica e é medido em relação à condição padrão, tomado como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local, onde, nestas condições, admite-se que o potencial de pressão seja igual a zero.

O potencial de pressão considera somente pressões manométricas positivas (acima da pressão atmosférica), portanto, este componente só existirá se existir água livre exercendo carga hidráulica sobre solo saturado (REICHARDT, 1987).

Quando o solo estiver na condição não saturada, o potencial matricial passará a atuar no lugar do potencial de pressão.

Em escala de laboratório, algumas considerações podem ser feitas a fim de simplificar a equação de potencial total: o potencial gravitacional  $\phi_g$  é desprezível, assim como, o potencial pneumático se torna irrelevante, se for admitido que os poros do solo estejam interligados com a atmosfera.

Logo, a equação do potencial total pode ser reduzida a soma do potencial osmótico e do potencial matricial:

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m. \quad (3.2)$$

### 3.4 – SUCÇÃO

MARINHO (1997) define sucção como sendo a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou

reduzindo o grau de saturação. Em outras palavras, a sucção é uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água.

Pode-se também escrever a Equação 3.2, acima descrita, em termos de suas pressões equivalentes. Esses potenciais osmóticos e gravimétricos são equivalentes a pressão de sucção osmótica  $s_o$  e pressão de sucção matricial  $s_m$ , assim a sucção total  $S_t$  é definida como a soma da sucção osmótica e a sucção matricial.

$$s_t = s_o + s_m \quad (3.3)$$

Podemos então afirmar que a sucção total em um solo é definida segundo duas componentes, a sucção osmótica e a sucção matricial, em que a sucção osmótica está associada à concentração de solutos no solo, enquanto a sucção matricial definida como a pressão negativa da água intersticial, resultante da associação de forças de adsorção (atração dos sólidos do solo e os íons permutáveis da água) e de capilaridade gerada pela tensão superficial (SOUZA NETO, 2004).

A sucção osmótica tem influência apenas em solos finos, dependendo do tipo e concentração dos solutos presentes (MITCHELL, 1984).

Estudos de laboratório têm indicado que a sucção matricial é a componente fundamental da sucção total e responsável pelo comportamento mecânico dos solos não saturados (ALONSO ET AL., 1987; FREDLUND, 1998). Do ponto de vista prático, a sucção matricial tem sido definida como:

$$s_m = p_g - p_l \quad (3.4)$$

Sendo  $p_g$  a pressão do gás nos poros do solo e  $p_l$  a pressão do líquido, representando a expressão acima, tanto a parcela de pressão de adsorção como a

parcela de pressão capilar. A importância de cada uma variará de acordo com o tipo de solo e o valor da sucção.

Os métodos de medição da sucção serão comentados no capítulo 5, que constará de todos os ensaios realizados para obtenção da curva de retenção, assim como, para obtenção dos parâmetros necessários à aplicação dos modelos elasto-plásticos que serão utilizados no presente trabalho.

### **3.5 – CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO**

Define-se como curva característica de sucção ou curva característica solo-água, ou ainda curva de retenção, a relação entre a quantidade de água (teor de umidade gravimétrico, volumétrico ou grau de saturação) presente nos poros e a sucção do solo.

A curva pode ser função da sucção mátrica ou da sucção total. Para elevados valores de sucção (acima de 1500 KPa), a sucção mátrica e a sucção total podem ser consideradas equivalentes (FREDLUND e XING, 1994).

O formato da curva de retenção depende das características do solo, como a sua estrutura, agregações/cimentação, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, teor de umidade inicial (trajetória de umedecimento ou secagem).

Considerando as características dependentes da estrutura do solo, quando está submetido a baixos níveis de sucção, o efeito de capilaridade e a distribuição dos poros regem a quantidade de água existente no interior da massa de solo.

Para valores mais altos de sucção, fatores como textura e a superfície específica dos grãos do solo tem uma influência maior na forma da curva caracterís-

tica, desde que a água esteja adsorvida as partículas sólidas.

A distribuição granulométrica, também é um fator que afeta a relação sucção-umidade. Normalmente, quanto maior a quantidade da fração de argila numa massa de solo, maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção (FREDLUND ET AL., 1994).

Isso se deve pelo fato dos solos mais argilosos possuírem vazios muito pequenos (canalículos), o que aumenta o efeito de capilaridade.

Pode-se atribuir a influência da distribuição granulométrica na relação sucção-umidade, ao efeito do aumento das forças de adsorção, devido à maior superfície específica apresentada pelos grãos menores.

Outro ponto relevante é a uniformidade dos poros dos solos argilosos, que faz com que a relação entre a sucção e a quantidade de água retida, seja gradual, devido a esses poros estarem menos interconectados (VANAPALLI et al., 1999).

Quando se analisa solos arenosos, observa-se que estes não possuem essa relação gradual, e sim, uma variação brusca na curva característica de sucção.

Basicamente, isso se deve a presença de poros maiores dos solos arenosos e mais conectados, quando comparados aos argilosos, uma vez que estes solos mostram uma tendência de mudar o grau de saturação rapidamente à medida que a sucção aumenta (VANAPALLI ET AL., 1999).

A influência da mineralogia dos solos na retenção de água é significativa, principalmente, em solos argilosos. Isso porque os argilominerais presentes nesses solos apresentam força de adsorção, diferentes, que são afetadas pela natureza da superfície das partículas e pelos tipos de cátions trocáveis (JUCÁ, 1990).

Existem pontos na curva características dos solos que merecem destaque. Um corresponde à pressão de entrada de ar, que representa o diferencial de pressões entre a água e o ar, necessário para causar a drenagem do maior poro do solo.

O outro se associa ao início do estágio residual de dessaturação do solo, no qual o efeito da sucção para causar uma perda adicional de água diminui e a remoção da água requer fluxo de vapor.

Existem três parâmetros do solo, que podem ser identificados na curva de retenção, ver Figura 3.2.

- O grau de saturação residual ( $S_r$ ), que é definido como o grau de saturação ao qual, um aumento na sucção mátrica não produz uma variação significativa no grau de saturação;
- O valor da entrada de ar no solo  $P_o$  ou  $p_g - p_l$  que é o valor da sucção que deve ser excedido, antes que o ar penetre nos poros do solo;
- O índice de distribuição do tamanho dos poros ( $\lambda$ ), que é dado pela inclinação da curva de secagem.

A forma da curva de retenção esta associada a algumas características e propriedades do meio poroso, como a geometria, distribuição dos poros e a composição mineralógica da fração fina.

Observa-se que solos com granulometria uniforme apresentam grande variação do grau de saturação para pequenas faixas de sucção, enquanto que num solo bem graduado cuja fração fina pode reter uma maior quantidade de água a variação do grau de saturação com a sucção é mais suave (COSTA, 2000), conforme se pode observar na figura 3.3.

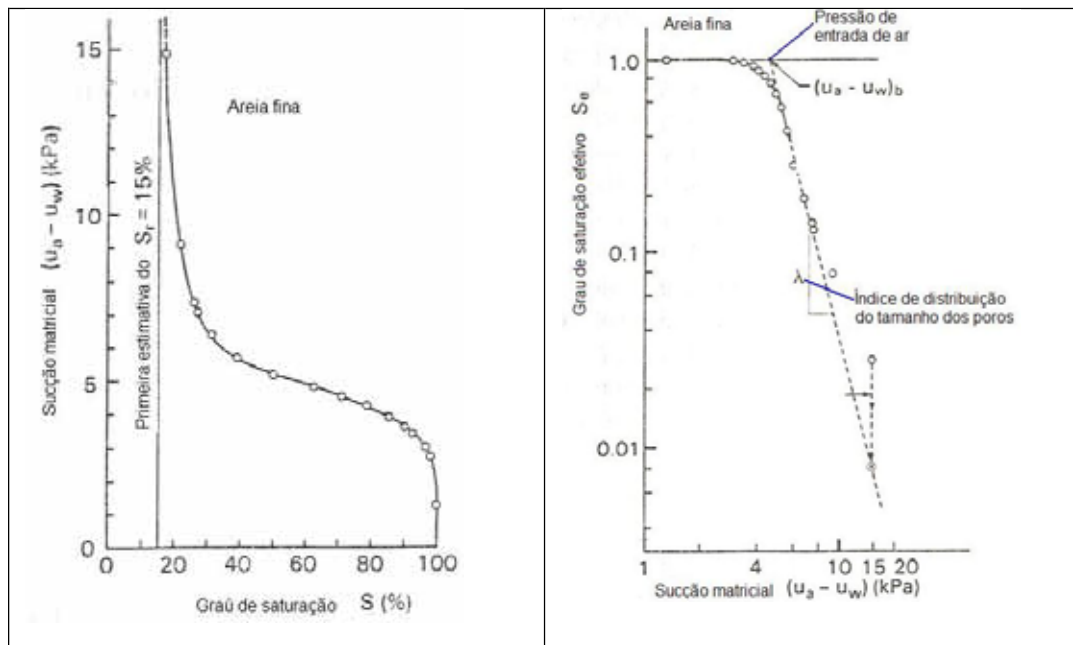


Figura 3.2 – Curvas de retenção: (a) Curva de sucção matricial x Grau de saturação; (b) Curva grau de saturação efetivo x sucção matricial – (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Tem-se observado experimentalmente que estas curvas de retenção exibem histerese. Este comportamento histerético afeta diretamente as condições de fluxo do solo não saturado. A natureza deste comportamento é atribuída a diversas causas:

- O efeito dos diferentes ângulos de contato em processos de umedecimento (avanço do menisco) ou drenagem (retrocesso do menisco);
- A geometria não uniforme dos poros individuais, intercomunicados por pequenas passagens, que dão lugar a que existam condições diferentes no caminho da água, segundo se trate de drenagem ou umedecimento;
- A presença de ar aprisionado nos poros, que dá origem a que um processo de umedecimento, diminua o valor do teor de umidade, inclusive não permitindo a completa saturação, em caso de sucção nula;

- As trocas de estrutura do solo, associadas ao inchamento (em processos de drenagem - JUCÁ, 1990).

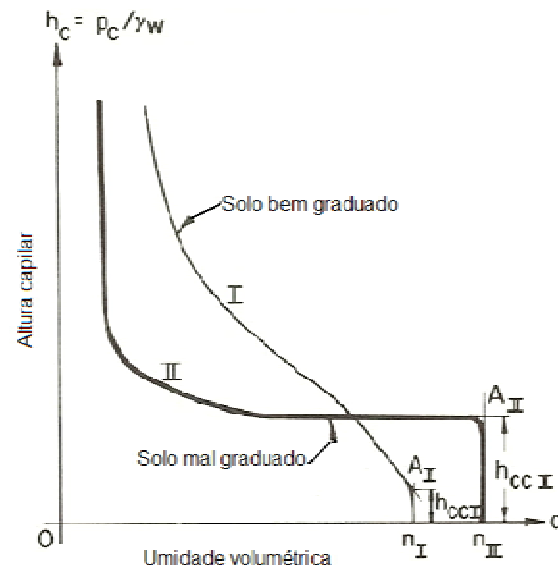


Figura 3.3 – Curva de retenção típica de solo, durante a drenagem (BEAR, 1972).

O comportamento destas curvas é não linear e depende da trajetória seguida (umedecimento ou drenagem).

Na Figura 3.4 está ilustrada uma curva característica típica para solos compactados, apresentando uma trajetória de secagem e uma trajetória de umedecimento, onde se podem identificar os pontos principais da curva de retenção (valor de entrada de ar e ponto de saturação residual, já visto) e os estágios identificáveis de dessaturação (zona limite de entrada de ar, zona de transição e zona residual de não saturação).

O primeiro estágio identificável da curva característica é a zona limite de entrada de ar, que inicia com o valor de sucção próximo de zero e vai até a sucção correspondente ao valor de entrada de ar. Neste estágio, quase todos os poros do solo encontram-se preenchidos por água.

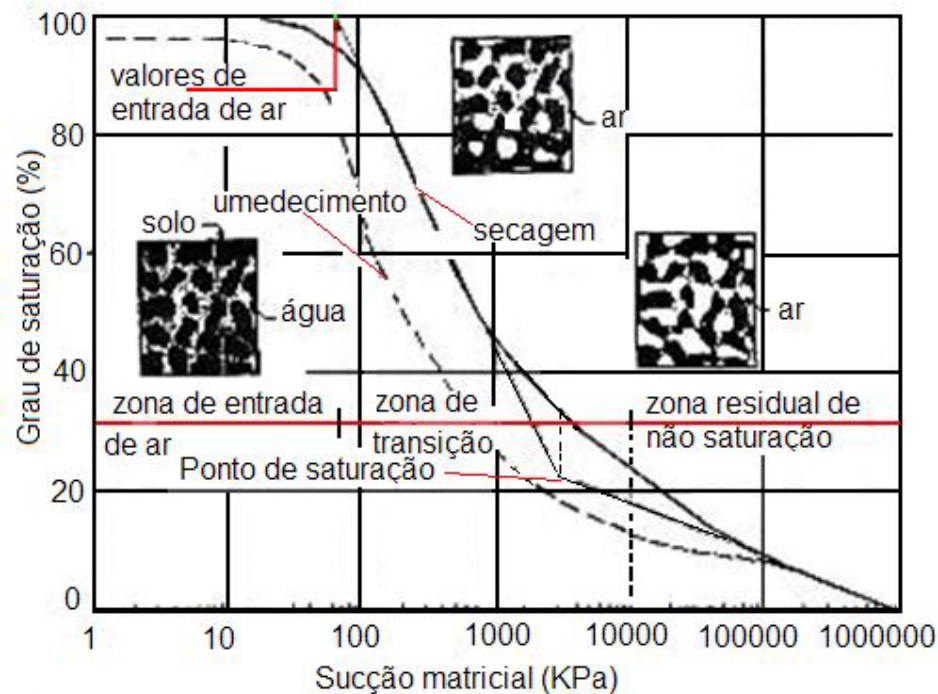


Figura 3.4 – Curva característica típica de solos compactados e suas diversas zonas (VANAPALLI ET AL, 1999).

O próximo estágio da curva de retenção é a zona de transição, a qual inicia na sucção correspondente ao valor de entrada de ar e termina na sucção correspondente no ponto de saturação residual.

O solo começa a dessaturar-se no estágio de transição e o teor de umidade reduz significativamente com o aumento da sucção.

O ponto de saturação residual pode ser considerado como o teor de umidade, além do qual, torna-se difícil remover água do solo por drenagem, ou seja, a fase líquida encontra-se descontínua.

O último estágio da curva de retenção é o estágio residual de não saturação, que se inicia no ponto de saturação residual e vai até a máxima sucção, ou seja, aquela correspondente a um teor de umidade muito próximo de zero.

Nesse estágio, grandes aumentos de sucção conduzem a variações muito pequenas no teor de umidade (GEHLING ET AL, 2004).

Em solos argilosos, o valor de entrada de ar tende a ser maior do que em solos arenosos. Quanto maior o teor de argila tende a ser maior a quantidade de água retida para um determinado valor de carga de pressão e mais suave deve ser a inclinação da curva de retenção.

Já em solos arenosos, carga de pressão negativa é, em geral, suficiente para reduzir bastante o teor de umidade.

Portanto, a curva de retenção descreve a capacidade do meio poroso de reter líquido para uma dada pressão capilar e geralmente é modelada por uma relação empírica como a de VAN GENUCHTEN (1980), adotada neste trabalho, escrita como:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left\{ 1 + \left( \frac{p_a - p_l}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right\}^{-\lambda} \quad (3.5)$$

Onde

$p_a - p_l$ , é a pressão capilar

$S_e$ , é o grau de saturação efetivo.

$S_{rl}$ , é o grau de saturação residual.

$P_o$ , é a pressão de entrada de ar.

$\lambda$ , é o índice de distribuição do tamanho dos poros.

$S_{ls}$ , é o grau de saturação máxima.

$S_r$ , é o grau de saturação na fase líquida.

Em solos argilosos, o valor de entrada de ar tende a ser maior do que em solos arenosos. Quanto maior o teor de argila espera-se que seja maior a quantidade de água retida para um determinado valor de carga de pressão e mais suave deve ser a inclinação da curva de retenção.

Já em solos arenosos, os poros são relativamente grandes e a imposição de um pequeno valor de carga de pressão negativa é, em geral, suficiente para reduzir bastante o teor de umidade.

### **3.6 - Fluxo de água em solos não saturados**

O estudo de fluxos de água em meios porosos não saturados tornou-se ferramenta indispensável ao engenheiro geotécnico. No meio poroso não saturado, a percolação de água, merece destaque em diversas obras de geotecnia, tais como: barragens de terra, aterros, taludes, etc.

Para o projeto de barragens, o controle de fluxo de água pelo maciço, fundação e ombreiras constitui um dos requisitos fundamentais à segurança da obra.

Analizando qualquer estatística de acidentes e rupturas de barragens a maior parte das causas está em geral atribuída à falta de um sistema eficiente de controle de fluxo (CRUZ, 1996).

A água e o ar se deslocam no interior do meio poroso por ação de forças derivadas de gradientes de potencial (JUCÁ, 1990).

O fluxo de água pode ser originado por um gradiente de carga hidráulica (carga de elevação mais carga de pressão).

Os fluxos podem ser classificados de acordo com:

- As características do meio poroso:
  - isotrópico / anisotrópico;
  - homogêneo / heterogêneo;
  - deformável / indeformável;
- As características do fluido percolante:
  - compressível / incompressível
- O regime do fluxo:
  - laminar (lei de Darcy) / não laminar;
  - estacionário / transiente;

O fluxo de fluidos em meios porosos é governado pelas leis de conservação de massa e pelas relações constitutivas que relacionam as variáveis dependentes.

A equação de conservação de massa (equação de continuidade) que rege os fluxos em meios porosos é dada por:

$$\frac{\partial(\rho_{\alpha} n S_{\alpha})}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{j}_{\alpha}) + \mathbf{f}_{\alpha} \quad (3.6)$$

Onde  $\alpha$  representa a fase que pode ser líquida (l) ou gasosa (g).

Onde, o primeiro membro da equação representa o termo de armazenamento de massa da espécie nas fases consideradas, o primeiro termo do segundo membro da equação representa o termo de fluxo da espécie nas fases consideradas e o segundo termo do segundo membro representa o termo de fonte/ sumidouro.

Portanto, a equação 3.6 indica que considerando um volume elementar representativo (VER) do meio poroso, a equação de conservação diz que a variação da quantidade de massa de fluido acumulada no volume do meio poroso é igual ao fluxo de massa de fluido que o atravessa mais a quantidade de massa de fluido, adicionados a VER, através de fontes ou sumidouros (SANTOS, 2002).

Onde o fluxo de líquido no meio poroso não saturado continua sendo dado pela lei de Darcy. O fluxo mássico de água é definido por:

$$J_l = \rho_l \cdot \mathbf{q}_l + n \cdot S_l \cdot \rho_l \cdot \dot{\mathbf{u}} \quad (3.7)$$

onde  $\mathbf{q}_l$  é o fluxo volumétrico de Darcy,  $\dot{\mathbf{u}}$  é a velocidade fase sólida, já que o meio é deformável, onde a equação de balanço de massa de água pode ser redefinida da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho_l n S_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{q}_l + n S_l \rho_l \dot{\mathbf{u}}) = 0 \quad (3.8)$$

O termo de armazenamento da equação de balanço de massa de água, pode ser escrito como:

$$\frac{\partial(\rho_l n S_l)}{\partial t} = \rho_l n \frac{\partial(S_l)}{\partial t} + \rho_l S_l \frac{\partial(n)}{\partial t} + n S_l \frac{\partial(\rho_l)}{\partial t} \quad (3.9)$$

Em que, o primeiro termo no segundo membro representa a curva de retenção, o segundo termo da equação no segundo membro representa a deformação do meio, e o terceiro termo no segundo membro representa a compressibilidade da água.

O termo de fluxo da equação de balanço de massa de água é definido pela lei constitutiva de Darcy, desenvolvida em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy, em que considera o solo saturado, o fluxo laminar, o meio homogêneo, e o fluido incompressível.

A lei de Darcy estabelece relações básicas entre a vazão e o gradiente hidráulico que podem ser modificados (adaptados) de diversas formas, no intuito de modelar uma variedade de fluxos laminares, estacionários e/ou transientes.

A lei de Darcy apresenta-se da seguinte forma, considerando o fluido compressível e meio poroso não saturado, a lei de Darcy é dada por (BEAR, 1972):

$$\mathbf{q}_l = -\frac{\kappa}{\mu_l} \cdot K_{rel} (\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (3.10)$$

onde  $K_{rel}$  e  $\mu_l$  são a permeabilidade relativa e a viscosidade da fase líquida, respectivamente,  $\rho_l$  é a densidade do líquido,  $p_l$  é a pressão da fase líquida e  $\mathbf{g}$  é o vetor gravidade. Na equação (3.8),  $\kappa$  é o tensor de permeabilidade intrínseca, que é função unicamente do meio poroso, cuja unidade é dada em  $m^2$ .

Esta permeabilidade independe das características ou quantidades do fluido percolante, e consiste em um parâmetro constitutivo do meio, pois é função das características do solo, entre as quais, podemos citar: disposição das partículas, porosidade, distribuição dos vazios e densidade dos grãos.

A permeabilidade intrínseca pode ser definida em função da porosidade, por exemplo, através da relação de Kozeny - Carman:

$$\kappa = \kappa_{ref} \frac{n^3 (1 - n_{ref})^2}{(1 - n)^2 \cdot n_{ref}^3} \quad (3.11)$$

onde  $\kappa_{ref}$  é a permeabilidade intrínseca para a porosidade de referência  $n_{ref}$ .

No fluxo multifásico os fluidos (água e ar) presentes interferem no escoamento uns dos outros fazendo com que a permeabilidade efetiva seja menor ou igual à permeabilidade do meio poroso por uma única fase.

A variação da permeabilidade relativa é não linear e função do grau de saturação. Dentre as relações encontradas na literatura, podem-se destacar as relações de Brooks – Corey e Van-Genuthen, por exemplo, bem como a relação exponencial entre esta propriedade e a saturação de líquido, conforme apresentado na equação 3.12.

$$K_{rel} = AS_e^\lambda \quad (3.12)$$

Onde  $S_e$  é o grau de saturação efetivo ( $0 \leq S_e \leq 1$ ),  $A$  e  $\lambda$  são parâmetros de ajuste. Pode-se observar na Figura - 3.5, a curva que relaciona a permeabilidade relativa com o grau de saturação.

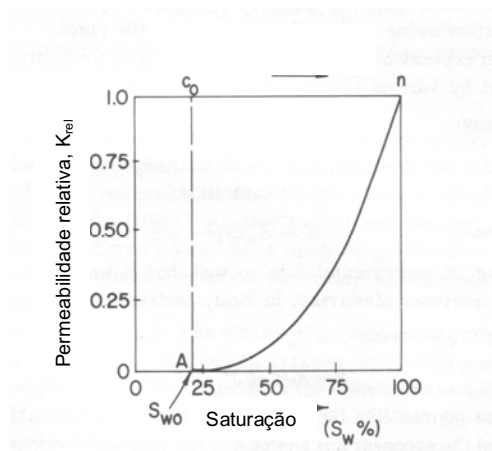


Figura 3.5 - Relação entre a permeabilidade relativa e o grau de saturação de uma areia (IRMAY - 1954).

Assim, o que determina a facilidade ou dificuldade do fluxo de um fluido através de um meio poroso não saturado é a permeabilidade desse meio ao tipo de fluido percolante.

No estado de completa saturação, todos os espaços entre as partículas sólidas do meio poroso estão conectados por um único fluido percolante.

À medida que diminui o grau de saturação do meio poroso, o ar tende a ocupar os poros que antes estavam ocupados pelo fluido, tendo como consequência:

- Uma rápida diminuição da seção disponível para o fluxo de água, pois o ar tende a ocupar os poros de maior diâmetro;
- Os meniscos de água tendem a diminuir com o aumento da sucção, diminuindo a velocidade de fluxo do fluido e também a permeabilidade do meio poroso ao fluido percolante;
- Como cresce o volume de poros ocupados pelo ar, parte do volume de fluido fica desconectado e como consequência, o fluxo do fluido só será possível, através na fase gasosa.

Diante dos aspectos citados, o coeficiente de permeabilidade de um meio poroso não saturado é fortemente dependente do grau de saturação (ou da sucção matricial). (JUCÁ, 1990).

O coeficiente de permeabilidade pode ser expresso também como função da sucção do meio poroso.

A sucção varia de acordo com a presença de água no solo. Quando o solo está com teor de umidade muito baixo em seus poros, a afinidade do mesmo em absorver água é grande e por isso, a sucção é alta. Para meios porosos com alto teor de umidade em seus poros, este efeito é reduzido e a sucção conseqüentemente decresce de valor.

Desta maneira conclui-se que a permeabilidade do meio poroso ao fluido percolante, decrescerá com o aumento da sucção.

Quanto maior a permeabilidade do meio poroso ao fluido percolante, maior será o grau de saturação do mesmo reduzindo assim a intensidade da sucção mátrica.

Quanto menor for a permeabilidade do meio poroso ao fluido percolante, menor será o grau de saturação, aumentando assim a intensidade da sucção mátrica. Logo, o fluxo de fluidos (água e ar) num meio poroso é governado pela sucção mátrica.

### **3.7 – Determinação da permeabilidade do meio poroso a água, no laboratório e no campo**

Os métodos empregados para determinação da permeabilidade do meio poroso à água, tanto no campo, como no laboratório, são classificados como de carga constante e de carga variável.

Dentre os métodos de ensaios de laboratórios empregados, os de carga constante ou de regime permanente, são os mais recomendados. No campo, os ensaios de carga variável vêm sendo utilizados indiretamente para determinação da permeabilidade não saturada.

No laboratório, as duas metodologias utilizadas para determinação da permeabilidade em laboratório são com o permeâmetro de carga constante e de regime transiente. No primeiro ensaio, determina-se a vazão para um gradiente hidráulico conhecido e sucção controlada.

Alguns pesquisadores chegaram a desenvolver este ensaio para determinação da permeabilidade em níveis baixos de sucção, utilizando a célula do ensaio oedômetro (JUCÁ, 1990).

No ensaio de regime transiente faz-se entrar um determinado volume de água (franja capilar) que percola o solo e à medida que essa franja avança, mede-se a sucção do solo em diferentes níveis da amostra.

No campo, a determinação da permeabilidade não saturada é bem mais difícil de ser obtida. Algumas técnicas têm sido utilizadas, como o permeâmetro de Guelph, teste Bore-Hole e infiltrômetros (MARINHO & PEREIRA, 1998).

Do exposto no capítulo 3 podemos salientar que o fluxo de água em meios porosos não saturados depende das características do meio poroso, do fluido percolante e do regime de fluxo, e que o mesmo é fortemente depende da permeabilidade do meio poroso ao fluido percolante e ao grau de saturação (sucção) (MORENO, 2005).

## **Capítulo 4: DEFORMAÇÕES EM SOLOS SATURADOS E NÃO SATURADOS: EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO E MODELOS CONSTITUTIVOS**

### **4.1 – Introdução**

O problema Hidro-Mecânico acoplado, além do problema de fluxo, visto no capítulo 3, contempla a solução do problema de equilíbrio, juntamente com as equações constitutivas que relacionam as tensões e deformações.

Nos últimos anos, o crescente interesse no desenvolvimento dos modelos constitutivos tem impulsionado pesquisadores para o estudo do comportamento dos solos não saturados. Como decorrência desse esforço, modelos constitutivos e ajustes matemáticos surgiram.

Neste contexto passou a serem empregados métodos numéricos, como o método das diferenças finitas, método dos elementos finitos, etc., para resolver o sistema de equações diferenciais que é definido pelas equações governantes e constitutivas de problemas correntes na engenharia, como por exemplo, o problema de modelagem numérica de uma barragem, considerando o seu comportamento hidráulico e mecânico, soma-se a isto, equações definidas pelas condições de contorno do problema, bem como, definem-se as condições iniciais que consideram os valores iniciais das variáveis primárias do problema.

Neste problema, a conservação de quantidade de movimento se reduz a equação de equilíbrio de tensões, desprezando-se as forças inerciais e, supondo tratar-se de um problema de pequenas deformações, a equação obtida em um volume de controle diferencial, semelhante ao cubo mostrado na figura 4.1 é:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (4.1)$$

Onde  $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$  consiste no divergente do tensor de tensões totais ( $\boldsymbol{\sigma}$ ) e o termo  $\mathbf{b}$  consiste no vetor de forças do corpo.

Nos problemas de análise do equilíbrio tensão-deformação deve-se atender a um conjunto de três condições:

- **Condições estáticas:** está relacionada ao estado de tensões (equilíbrio de tensões, forças).
- **Condições cinemáticas:** Diz respeito ao estado de deformação.
- **Condições físicas:** diz respeito a: relação tensão – deformação e estado elástico, elástico-linear e elastoplástico.

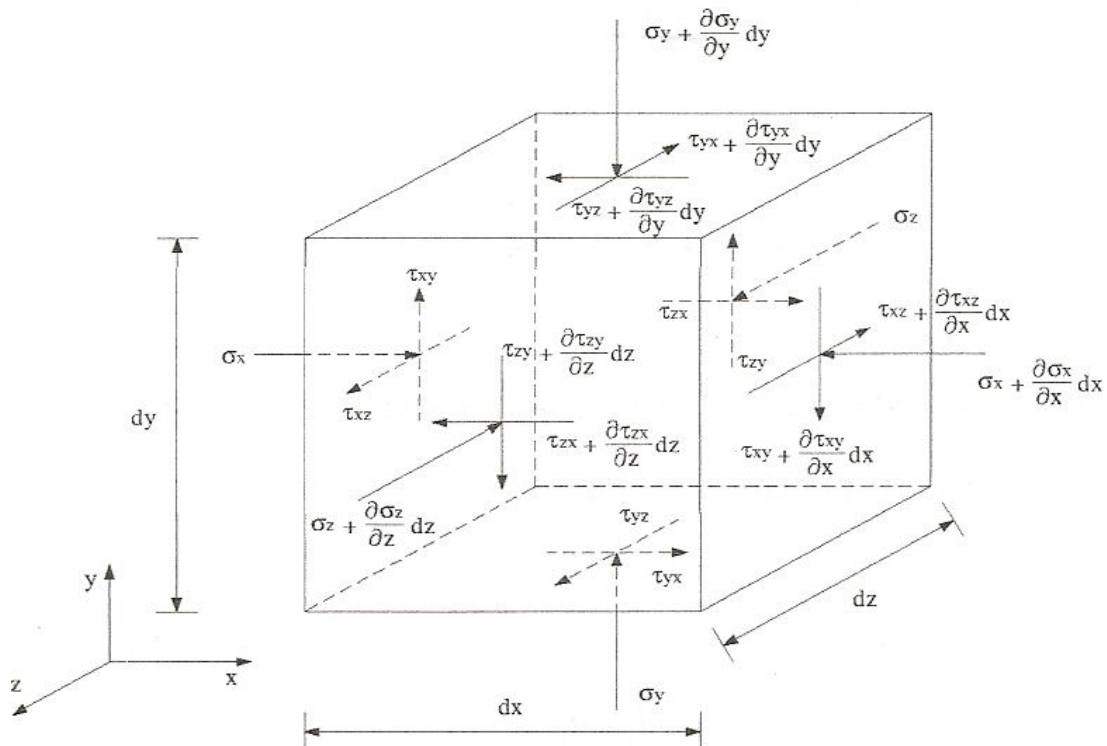


Figura 4.0 - Tensões atuantes em um elemento de volume de controle diferencial (Rodrigues,R.A - 2007

Figura 4.1 – Tensões atuantes em um elemento de volume de controle diferencial (RODRIGUES, 2007)

Para as **condições estáticas** o estado de tensões em um ponto é definido pelo tensor de tensões ( $\sigma$ ), que é dado por:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Ou sob a forma vetorial, dada pelo vetor de tensões ( $\sigma$ ), dado por:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

**Sob condições estáticas** (equilíbrio de tensões), o estado de tensões deve atender a equação 4.1, que relaciona a soma do divergente do tensor de tensões totais somado ao vetor de forças mássicas. **Sob condições cinemáticas**, o estado de deformação em um ponto, será dado pelo tensor de deformação ( $\epsilon$ ), que é dado por:

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \epsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Ou se for utilizar a notação vetorial será escrito da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Onde  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ , são respectivamente as deformações normais e  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ , são respectivamente as deformações cisalhantes.

As deformações estão ligadas aos deslocamentos, logo devem atender as seguintes relações deformações/deslocamentos (Quadro 4.1), válidas para o caso de pequenas deformações:

Quadro 4.1 – Relações deformações – deslocamentos.

|                                                                                                 |                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_x = \frac{du}{dx}$ $\varepsilon_y = \frac{dv}{dy}$ $\varepsilon_z = \frac{dw}{dz}$ | $\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}$ $\gamma_{yz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy}$ $\gamma_{zx} = \frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Válidas para o caso de pequenas deformações, que são aquelas que não mudam as configurações do corpo, isto é, as coordenadas de cada ponto do corpo. As grandes deformações causam não-linearidades geométricas.

**Sob condições físicas** ou relação tensão – deformação, que é a relação constitutiva do material (se o material é elástico, linear, homogêneo, anisotrópico), a relação pode ser escrita como:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.6)$$

onde  $\mathbf{D}$  é o tensor constitutivo.

O tensor constitutivo define o tipo de comportamento do meio, podendo este ser elástico ou elastoplástico, por exemplo, cuja teoria se encontra posteriormente descrita neste capítulo.

## **4.2 – Modelos Constitutivos**

Os modelos constitutivos foram divididos em Modelos Hidráulicos e Modelos mecânicos.

### **4.2.1 – Modelos Constitutivos Mecânicos**

É denominado modelo constitutivo ao modelo matemático que permite reproduzir a relação tensão-deformação observada em um meio contínuo.

Alonso (1993) agrupa os modelos constitutivos para previsão do comportamento dos solos não saturados em quatro categorias: Expressões analíticas, Superfícies de estado, Modelos Elásticos, Modelos Elastoplásticos.

#### **4.2.1.1 - Expressões analíticas**

As expressões analíticas são equações para prever a deformação volumétrica específica ou índice de vazios com a aplicação de uma tensão. A seguir é apresentada a tabela 4.2 onde estão resumidas algumas destas expressões citadas por Alonso, 1993.

Tabela 4.2 – Expressões analíticas para previsão da deformação volumétrica específica (FUTAI, 1997).

| Referência Bibliográfica         | Expressão                                                                                                   | Descrição                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jimenez Salas e Serratosa (1953) | $\frac{\Delta e}{1 + e_0} = k p_0 \log \frac{p_0}{\sigma}$                                                  | $\Delta e / (1 + e_0)$ = variação de volume;<br>$p_0$ = tensão de expansão;<br>$k$ = constante.                                                                               |
| Aitchison (1973)                 | $\frac{\Delta e}{1 + e_0} = C_\sigma \Delta \log \sigma + I_m \Delta \log \psi_m + I_s \Delta \log \psi_s$  | $\psi_m$ = sucção matricial;<br>$\psi_s$ = sucção osmótica;<br>$C_\sigma, I_m, I_s$ = constantes.                                                                             |
| Lytton (1997)                    | $\frac{\Delta e}{1 + e_0} = -\gamma_\sigma \log \sigma - \gamma_h \Delta \log(u_a - u_w)$                   | $\gamma_\sigma, \gamma_h$ = coeficientes empíricos relacionados com o índice de plasticidade, quantidade de argila e a capacidade de troca catiônica;<br>$u_a, u_w$ = sucção. |
| Johnson (1978)                   | $\Delta e = \frac{\alpha \gamma}{100B} \{ \log(u_a - u_w)^0 - \log[\log(u_a - u_w)_f^0 + \alpha \sigma] \}$ | $(u_a - u_w)^0$ = sucção inicial antes do carregamento;<br>$(u_a - u_w)_f^0$ = sucção final.                                                                                  |
| Justo et al (1984)               | $\frac{\Delta e}{1 + e_0} = a + b \Delta \log \sigma + c (\Delta \log \sigma)^2 + d (\Delta \log \sigma)^3$ | $a, b, c, d$ = constantes.                                                                                                                                                    |

#### 4.2.1.2 - Superfícies de estado

MATYAS E RADHAKRISNA (1968) citaram POOROOSHASB (1961) para definir parâmetros de estado: Como sendo aqueles que foram suficientes para descrever completamente as condições do elemento de solo sem prévio conhecimento de sua história.

Alguns dos parâmetros de estado que têm sido utilizados são: estado de tensão, grau de saturação, estrutura do solo, índice de vazios e umidade. Os

parâmetros de estado podem ser relacionados em funções matemáticas, definidas como funções de estado. Estas funções representam a superfície de estado em um espaço tridimensional como idealizado por Bishop e Blight (1963).

Estes autores propuseram que em um espaço tridimensional se construísse uma superfície com dados de variação de volume versus  $(\sigma - p_g)$  e  $(p_g - p_w)$ , como é mostrado na figura 4.3.

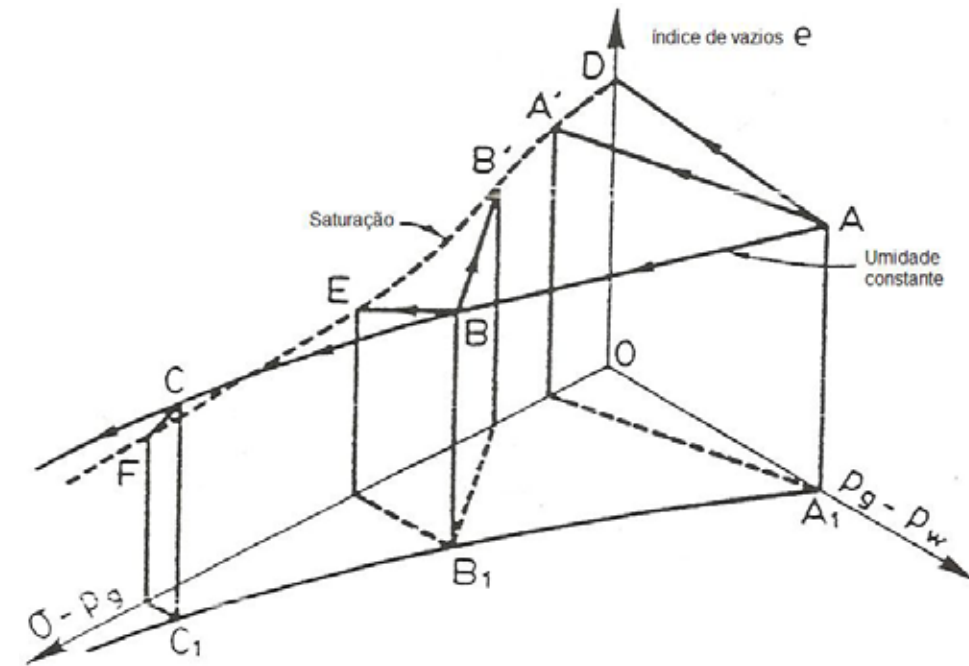


Figura 4.3 – Espaço tridimensional idealizado (BISHOP & BLIGHT, 1963).

MATYAS E RADHAKRISNA (1968) apresentaram as seguintes funções de estado para ensaios triaxiais:  $e = F(p_a, q, u_c, e_0, Sr_0)$ ; e  $S = \phi(p_a, q, u_c, e_0, Sr_0)$ ; e para ensaios edométricos:  $e = F(\sigma, u_c, e_0, Sr_0)$ ,  $S = \phi(\sigma, q, e_0, Sr_0)$ .

O estado inicial do solo é considerado pelo seu índice de vazios e grau de saturação inicial, o estado de tensão, pela tensão média ( $p = \frac{\sigma_1 - 2\sigma_3}{3} - u_a$ ) e a tensão desviadora ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ) e a sucção ( $u_c = u_a - u_w$ ). As funções  $F$  e  $\phi$  podem ou não

ser funções únicas, dependendo do caminho de saturação ou sucção. Matyas e Radhakrisna (1968) apresentaram resultados experimentais na forma de superfícies de estado, ver Figura 4.4 desenhada em um espaço  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$  contra índice de vazios ou grau de saturação. As funções de estado também foram exploradas por Fredlund (1979) e Lloret e Alonso (1985).

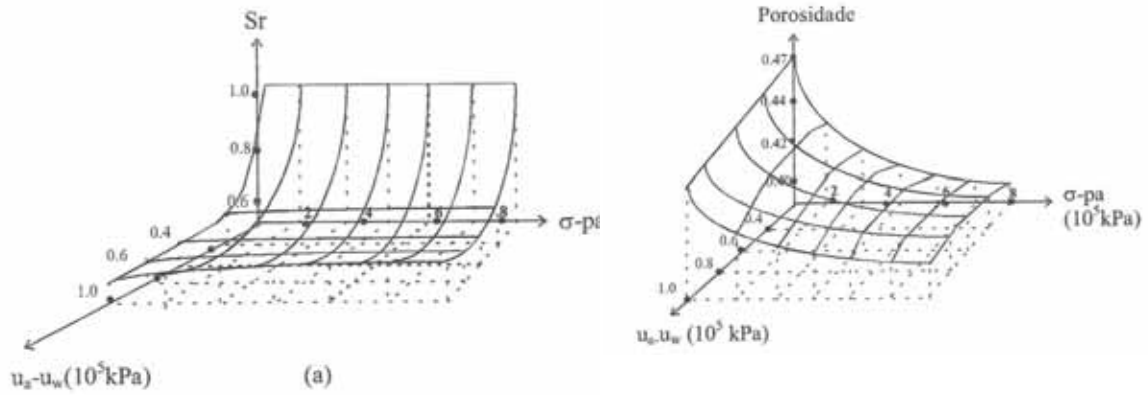


Figura 4.4 – Superfícies de estado de porosidade e grau de saturação (MATYAS E RADHAKRISNA, 1968).

Já Fredlund (1979) propôs a utilização de escalas logarítmicas para os pares de tensão  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$  tentando a linearização da superfície. Aquele autor apresentou duas equações de superfície de estado, sendo uma para o índice de vazios,

$$e = e_o - C_t \log \frac{(\sigma - u_a)^f}{(\sigma - u_w)^o} C_m \log \frac{(u_a - u_w)^f}{(u_a - u_w)^o} \quad (4.7)$$

Onde  $C_t$  é o valor do índice de compressibilidade convencional no plano saturado,  $C_m$  é o índice para o carregamento no plano índice de vazios versus sucção e  $e_o$  é o índice de vazios inicial.

e outra para a umidade, dada pela equação 4.8.

$$w = w_o - D_t \log \frac{(\sigma - u_a)^f}{(\sigma - u_w)^o} D_m \log \frac{(u_a - u_w)^f}{(u_a - u_w)^o} \quad (4.8)$$

Onde  $D_t$  é o índice de umidade correspondente a tensão total e  $D_m$  é o índice de umidade correspondente a sucção.

Lloret e Alonso partiram de equações para prever o índice de vazios de uma série de ensaios em uma análise estatística. Concluíram que o solo por eles estudado foi mais bem representado pelas seguintes funções de estado:

Para a variação de volume:

$$e = a + b \log(\sigma - u_a) + c \log(u_a - u_w) + d[(\sigma - u_a) \log(u_a - u_w)] \quad (4.9)$$

Para a variação do grau de saturação:

$$Sr = a - \tanh[b(u_a - u_w)][c + d(\sigma - u_a)] \quad (4.10)$$

Onde:

$a, b, c, d$ , São parâmetros obtidos a partir do sistema de equações.

#### 4.2.3 - Modelos elásticos

Os modelos elásticos são aqueles que relacionam diretamente a variação do estado de deformação com o estado de tensão do solo. Os modelos que assim se classificam são os de Coleman (1962), Fredlund (1979) e Alonso et al (1988).

Coleman (1969) definiu equações de deformação para a variação de volume de água (Equação 4.11), para variação de volume do solo (Equação 4.12) e para a variação de deformações cisalhantes (Equação 4.13):

$$-\frac{dV_w}{V} = -C_{11}(du_a - du_w) + C_{12}(d\sigma - du_a) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (4.11)$$

$$-\frac{dV}{V} = -C_{21}(du_a - du_w) + C_{22}(d\sigma - du_a) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (4.12)$$

$$-(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) = -C_{31}(du_a - du_w) + C_{32}(d\sigma - du_a) + C_{33}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (4.13)$$

Onde:

$C_{11}, C_{12}, C_{13}$ , São parâmetros associados com a variação do volume de água no elemento de solo;

$C_{21}, C_{22}, C_{23}$ , São parâmetros associados com a variação de volume do elemento de solo;

$C_{31}, C_{32}, C_{33}$ , São parâmetros associados com a deformação cisalhante.

Todos estes parâmetros dependem da sucção, tensão isotrópica, tensão desviadora e da história de tensões.

Fredlund (1979) definiu as equações para deformações normais, incorporando às equações de deformação da elasticidade linear clássica, a sucção e as tensões  $(\sigma - u_a)$  para cada direção principal.

$$\epsilon_x = \frac{(\sigma_x - u_a)}{E_1} - \frac{\mu_1}{E_1} (\sigma_y + \sigma_z - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H_1} \quad (4.14)$$

$$\epsilon_y = \frac{(\sigma_y - u_a)}{E_1} - \frac{\mu_1}{E_1} (\sigma_x + \sigma_z - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H_1} \quad (4.15)$$

$$\epsilon_z = \frac{(\sigma_z - u_a)}{E_1} - \frac{\mu_1}{E_1} (\sigma_x + \sigma_y - 2u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{H_1} \quad (4.16)$$

Onde:

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  = Deformações específicas segundo as direções x, y, z, respectivamente;

$E_1$  = Módulo de elasticidade para o carregamento de  $(\sigma - u_a)$ ;

$\mu_1$  = Coeficiente de Poisson;

$H_1$  = Módulo de elasticidade para o carregamento de  $(u_a - u_w)$ .

Alonso et al (1988) consideram que as deformações resultam da soma de duas parcelas, sendo uma devido aos efeitos da variação de tensões e a outra devido às deformações volumétricas causadas pela variação da sucção  $(d\epsilon_0)$ .

$$d\epsilon = \mathbf{D}^{-1} d\sigma^* + d\epsilon_0 \quad (4.17)$$

onde:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{m}u_a \quad (4.18)$$

$$\mathbf{m} = [1, 1, 1, 0, 0, 0]$$

#### 4.3 – Teoria da Plasticidade – Modelos elastoplásticos

Os modelos constitutivos elasto-plásticos são utilizados na mecânica dos meios contínuos para representar o comportamento mecânico dos materiais, quando são submetidos a valores limites de tensões (ou de deformações) e o comportamento deixa de ser representado por modelos simplificados, como os modelos elásticos.

O comportamento plástico se distingue do comportamento elástico, porque produz deformações permanentes, ou seja, deformação que é irreversível e não pela falta de linearidade entre tensão e deformação.

O termo plasticidade se refere a processos inelásticos que produzem deformações permanentes e independentes do tempo, excluídos os fenômenos de deformação viscosa, creep e relaxação.

Logo, o comportamento elasto-plástico dos materiais se caracteriza pelos seguintes aspectos:

- Não existe unicidade na relação tensão-deformação, onde um mesmo valor de deformação pode corresponder a infinitos valores de tensões (endurecimento), e o mesmo ocorre no caso inverso, isto é, para um mesmo valor de tensão pode corresponder a infinitos valores de deformações (idealmente plástico);

- Não há linearidade entre tensão-deformação, o que pode ocorrer é que a linearidade seja incremental em certos trechos do processo de deformação;
- São produzidas deformações irreversíveis (plásticas) num ciclo de carga-descarga.

A plasticidade para pequenas deformações se caracteriza por postular que as deformações em um ponto ( $\varepsilon$ ) se decompõem em uma parte elástica ( $\varepsilon^e$ ) e outra plástica ( $\varepsilon^p$ ) irreversível, isto é:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (4.19)$$

Ao tentar simular o comportamento real dos solos é necessário um modelo que leve em consideração os comportamentos de endurecimento e de amolecimento dos mesmos.

A teoria da plasticidade se baseia na mecânica do contínuo e representa o comportamento físico macroscópico dos sólidos ideais, onde se observa de forma esquemática o comportamento uniaxial de um ponto correspondente a um material de comportamento elasto-plástico ideal.

Analisando o primeiro ciclo, que vai de 0 até 1, verifica-se que a tensão não ultrapassa o valor da tensão correspondente ao limite elástico  $\sigma_e$  (tensão de fluência) e o material se comportará como material elástico, caracterizado pelo módulo de elasticidade de Young E.

Ao começar o processo de carga, apresenta-se uma zona elástica linear, que se mantém até o ponto A, chamado de limite de proporcionalidade.

Atingindo o ponto B e o comportamento deixa de ser elástico e passa a ter um comportamento plástico, parte das deformações não se recupera, diante de uma eventual redução de tensões (ponto 3) e a partir daí surge uma deformação permanente que é definida como deformação plástica ( $\varepsilon^p$ ), caracterizada no ponto 3.

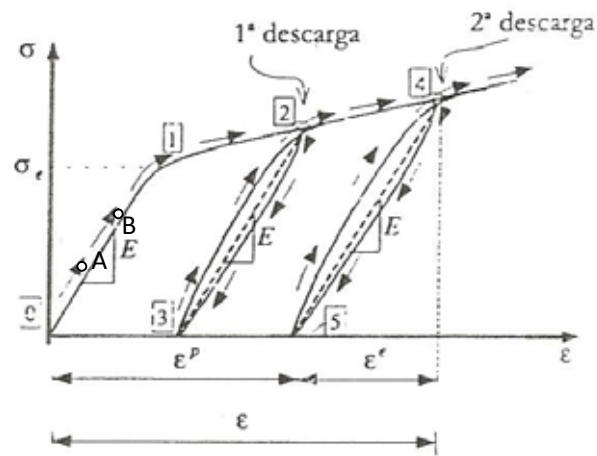


Figura 4.04 – Ciclo de carga-descarga (OLIVELLA & BOSCH, 2000).

No trecho 2-3 de descarga e 3-2 de recarga, o comportamento pode ser aproximado a um comportamento incremental elástico ( $\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon$ ) até a tensão alcançar o ponto 2 (máximo valor que havia alcançado durante o processo de carga).

A partir deste ponto, o comportamento deixa de ser incrementalmente elástico (como se o material se recordasse da máxima tensão a qual havia sido anteriormente submetido).

Um segundo ciclo de carga descarga recarga (2-4-5-4) gera mais deformação plástica, que aparece em forma de deformação permanente no ponto 5, e mais deformação elástica que se recupera no tramo de descarga (4-5).- recarga (5-4) (Olivella & Bosch, 2000).

Dentro do trecho com comportamento elasto-plástico (trecho  $A'E$ ) se distingue uma região onde ocorre crescimento da tensão “hardening”, caracterizado pelo aumento da tensão de fluência do material devido ao seu enrijecimento durante o comportamento plástico, trecho 0 – 2, que recebe o nome de zona elasto-plástica com endurecimento.

Para a análise do comportamento dos materiais em problemas genéricos de engenharia, o comportamento precisa ser formulado para o espaço geral das tensões e deformações, por se tratar de um escoamento. que envolve seis componentes independentes de tensões  $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{zy})$  e seis componentes independentes de deformação  $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{zy})$ .

Se for considerado que o material é isotrópico e que a plastificação é essencialmente dependente da magnitude das tensões, simplificações podem ser feitas, trabalhando-se com o uso dos invariantes de tensões e deformações.

Três invariantes de tensões são necessários para determinação da magnitude das tensões. Esses invariantes podem ser as tensões principais ou uma combinação das mesmas.

$$p = \frac{1}{3}I_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.20)$$

$$J = \frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.21)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_1 - 2\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (4.22)$$

Onde  $p$  é a tensão média efetiva,  $J$  é a tensão desviadora e  $\theta$  é o ângulo de Lode. O valor de  $p$  é medido ao longo da diagonal das tensões principais (espaço diagonal), ou seja, ao longo do eixo das tensões hidrostáticas, em que  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , como ilustrado na Figura 4.6.

O valor de  $J$  é medido como sendo a distância do ponto **P** no plano octaédrico ao eixo hidrostático. O ângulo de Lode varia de  $-30^\circ$  até  $+30^\circ$  no plano cisalhante.

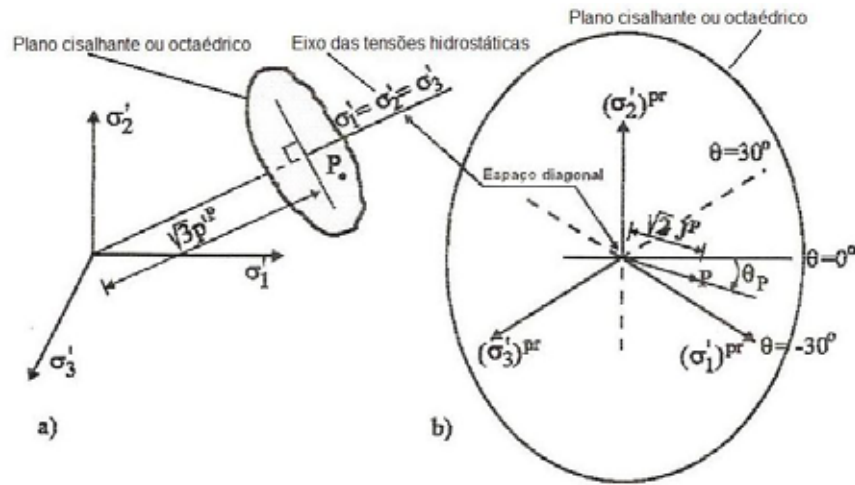


Figura 4.6 – Invariante no espaço de tensões (OLIVELLA & BOSCH, 2000).

De acordo com Potts e Zdravkovic (1999) para formular um modelo constitutivo elasto-plástico são necessários quatro critérios essenciais: Relação elástica, Função de Plastificação, Função de Potencial de Plastificação, Lei de Endurecimento/Amolecimento.

#### 4.3.1 - Relação elástica

Diz respeito à proporcionalidade entre a tensor de tensão e o tensor de deformação que ocorre em um material, através da tensor constitutivo, conforme mostra a relação a seguir:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (4.23)$$

Ou de outra maneira, como é usado na prática:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{D}^{-1} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (4.24)$$

Onde  $\mathbf{D}$  é o tensor constitutivo elástico, definida pelas propriedades constitutivas plásticas do material, sendo estas, o módulo de Young  $E$  e o coeficiente de Poisson

$\nu$ , sendo  $\boldsymbol{\varepsilon}^e$  o tensor de deformação elástica e  $\boldsymbol{\sigma}$  é o tensor de tensões.

#### 4.3.2 - Função de plastificação

Também denominada de critério de descontinuidade, é uma função escalar de argumentos tensoriais que delimita o domínio elástico. Para caracterizar o local dos estados de tensões onde se inicia a plastificação, é necessário definir um limite onde o material deixa de se comportar elasticamente e passa a ter um comportamento plástico.

Para isso é necessário mais que um simples valor de tensão de plastificação  $\sigma_y$ , é sim uma função de plastificação, que é uma função escalar dependente do estado de tensões ( $\boldsymbol{\sigma}$ ) e de parâmetros de estado ( $\mathbf{k}$ ), estabelecendo a separação entre a região das tensões plasticamente admissíveis e não admissíveis.

Esta função pode ser representada por:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) = 0 \quad (4.25)$$

Onde  $\boldsymbol{\sigma}$  é o tensor de tensões de Cauchy e  $\mathbf{k}$  representa o conjunto de variáveis internas agrupadas em forma de matriz coluna. Portanto, esta função  $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) = 0$  estabelece o limite a partir do qual se inicia o comportamento não linear.

Qualquer estado de tensão fora do limite definido por esta superfície é inadmissível ( $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) > 0$ ). Portanto, o processo de resolução elasto-plástico consiste em forçar a que o estado tensional se situe na fronteira ou no interior da função de plastificação.

Para plasticidade perfeita  $\mathbf{k}$  é constante e representa a magnitude da tensão de escoamento (na plasticidade perfeita as deformações crescem para um mesmo

valor de tensão constante e igual à tensão de escoamento).

Para plasticidade com endurecimento/amolecimento o parâmetro de estado  $k$  varia com as deformações plásticas, representando como a magnitude das tensões varia no escoamento (SOUZA, 2005).

Quando  $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) < 0$ , o material apresenta um comportamento puramente elástico, significando que as tensões atuantes são inferiores a tensão de plastificação  $\sigma_y$  e que as mesmas estão no interior dos espaços das tensões admissíveis ( $\text{int}\mathbb{E}_\sigma = \{\boldsymbol{\sigma} \in \mathbb{R}: F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) < 0\}$ ), e nesse caso, será o próprio domínio da função e não existe deformação plástica ( $\nexists \boldsymbol{\varepsilon}^p$ ).

O espaço das tensões admissíveis (ETA) é representado pela união do domínio elástico mais o seu contorno isto é:  $\mathbb{E}_\sigma = \text{int}\mathbb{E}_\sigma \cup \partial\mathbb{E}_\sigma = \{\boldsymbol{\sigma} \in \mathbb{R}: F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) \leq 0\}$ .

Quando  $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) = 0$ , o material está na superfície de plastificação ou de fluência que pode ser representado pela expressão:  $\partial\mathbb{E}_\sigma = \{\boldsymbol{\sigma} \in \mathbb{R}: F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) = 0\}$ , isto é, na fronteira entre o regime elástico e plástico, e apresenta um comportamento elástico-plástico. Na carga, ou seja, para qualquer incremento de carga, o material plastificará, e aparecerá uma deformação plástica ( $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ ).

No caso de descarga e recarga ( $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) < 0$ ) as tensões estão no domínio do espaço de tensões e não existe deformação plástica ( $\boldsymbol{\varepsilon}^p = 0$ ) e o material se comportará como elástico.

Quando  $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k}) > 0$  se configurará uma situação de tensões impossível, pois estará fora da superfície de plastificação, (Figuras 12 e 13).

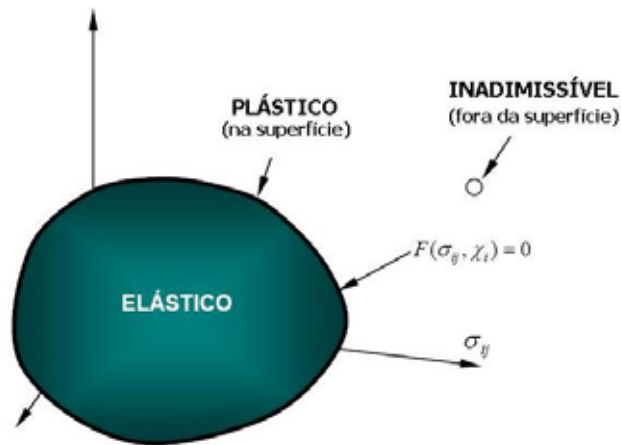


Figura 4.7 – Superfície de fluência (ou de plastificação) (GENS & PRAT, 2003)

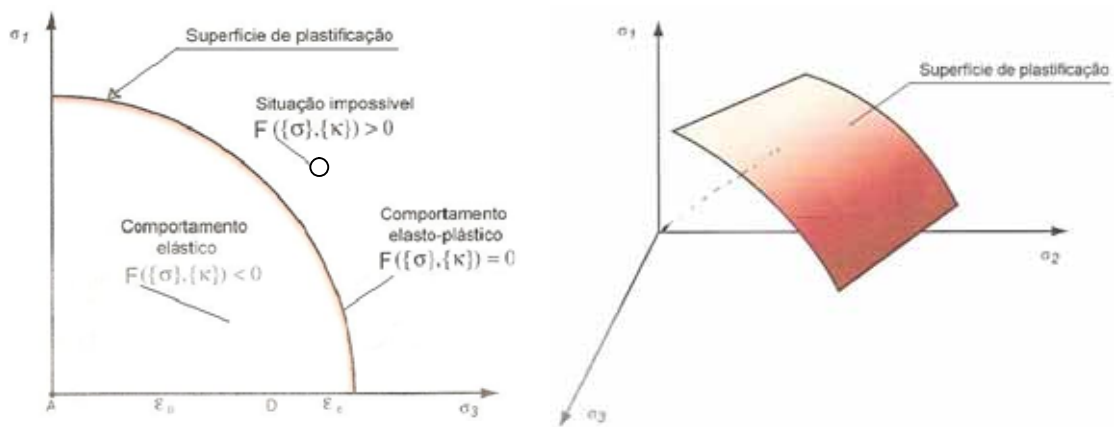


Figura 4.8 – Curva de plastificação e superfície de plastificação (FRANÇA, 2006, Apud POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

### 4.3.3 - Função de potencial plástico e Regra de Fluxo

Nos modelos unidimensionais é assumido que as deformações plásticas ocorrem na mesma direção da aplicação das tensões.

No entanto, em um caso multiaxial a situação se torna mais complexa para determinação da direção das deformações, uma vez que existem seis componentes

de tensão e seis componentes de deformação, e é necessário estabelecer a direção de deformação plástica para qualquer estado de tensão.

Para isso, adota-se a chamada regra (lei) de fluxo que determina a direção e a magnitude do incremento de deformação plástica, para o estado de tensão corrente.

É considerada como hipótese básica a existência de um potencial Plástico  $P$  que caracterize esta lei através da seguinte relação:

$$\dot{\epsilon} = \lambda \frac{\partial P(\sigma', \mathbf{m})}{\partial \sigma} \quad (4.26)$$

Onde  $\dot{\epsilon}$  representa as componentes da taxa de deformação plásticas e  $P$  é a função vetorial denominada de função de potencial plástico e  $\lambda$  é um multiplicador escalar chamado de multiplicador plástico, onde o seu valor é:

$$\lambda = \frac{\left( \frac{\partial F(\sigma, \mathbf{k})}{\partial \sigma} \right)^T \mathbf{D} \dot{\epsilon}}{\left( \frac{\partial F(\sigma, \mathbf{k})}{\partial \sigma} \right)^T D \left( \frac{\partial P(\sigma, \mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}} \right) + A} \quad (4.27)$$

$$A = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\partial F(\sigma, \mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}} \right\}^T \cdot \dot{\mathbf{k}} \quad (4.28)$$

O potencial plástico tem a forma:

$$P(\sigma', \mathbf{m}) = 0 \quad (4.29)$$

Em que  $P$  é dependente do estado de tensões  $\sigma$  é o vetor de parâmetros de estado  $\mathbf{m}$ .

No espaço bidimensional de tensões ( $\sigma_2 = 0$ ) a função de potencial plástico representa uma curva de potencial plástico (Figura 4.9a) e no espaço geral das tensões representa uma superfície de potencial plástico (Figura 4.9b).

Devido à consideração dos eixos de tensões principais acumuladas e incrementos de deformações plásticas serem coincidentes, é possível desenhar as duas componentes no mesmo eixo (SOUZA, 2005).

O vetor normal  $\mathbf{n}$  a superfície de potencial plástico no estado de tensão, indica a direção da resultante dos incrementos de deformação plástica e a relação entre a magnitude de seus componentes (FRANÇA, 2007).

A magnitude do incremento de deformação Plástica é controlada pelo parâmetro escalar  $\lambda$ , que está relacionado à lei de endurecimento/amolecimento. Se a função de potencial plástico coincide com a função de plastificação  $P(\boldsymbol{\sigma}', m) = F(\boldsymbol{\sigma}, k)$ , diz-se que o fluxo é associado.

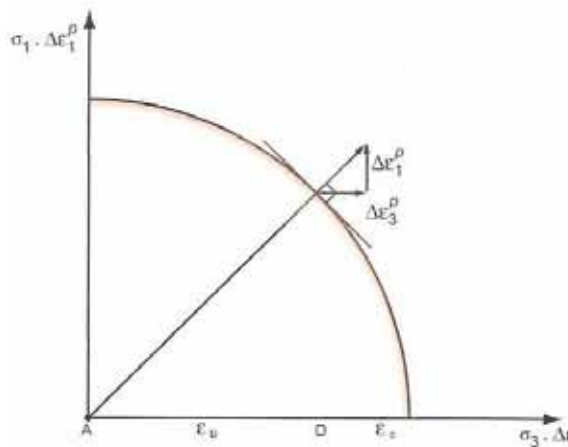


Figura 4.9a

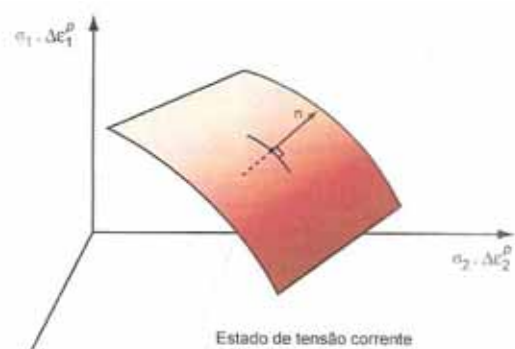


Figura 4.9b

Figura 4.9 – representação gráfica da função de potencial plástico (a) e da superfície de potencial plástico (b) (França, 2006 Apud POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

Caso contrário, se  $P(\boldsymbol{\sigma}', \mathbf{m}) \neq F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k})$ , diz-se que o fluxo é não associado.

Resumindo:

Se  $\lambda > 0 \Rightarrow f(\boldsymbol{\sigma}) = 0$  (esta na superfície de fluência e esta plastificando).

Se  $f(\boldsymbol{\sigma}) < 0 \Rightarrow \lambda = 0$  (ocorre descarga e esta no interior da superfície de fluência, só ocorrem deformações elásticas, logo,  $\epsilon^p = 0$ ).

#### 4.3.4 - Leis de endurecimento/amolecimento

A lei de endurecimento expressas a variação do tamanho, forma ou posição da superfície de Fluência (plastificação). Estas leis descrevem como o parâmetro de estado  $k$  varia com a deformação plástica.

Se o material é elasto-plástico perfeito, os parâmetros de estado são constantes e conseqüentemente a superfície de fluência permanece constante, logo, nenhuma lei de endurecimento/amolecimento se faz necessária.

Se o material sofre endurecimento/amolecimento durante a plastificação, são necessárias regras para estabelecer como as funções de plastificação e potencial plástico, variam, nessas condições.

Para compreensão mais generalizada dos modelos com diferentes materiais no estado bidimensional de tensões, os materiais possuem potencial plástico coincidente com a superfície de plastificação, é o que denominamos de fluxo associado  $(P(\{\boldsymbol{\sigma}\}, \{\mathbf{m}\}) = F(\{\boldsymbol{\sigma}\}, \{\mathbf{k}\}))$ .

No material com comportamento elasto-plástico perfeito, a superfície de plastificação é fixa no espaço geral das tensões e não muda de tamanho ou posição quando ocorrem deformações plásticas.

Como foi visto, se o estado de tensões permanece abaixo ou no interior da superfície de plastificação, o comportamento do mesmo é puramente elástico; se o estado de tensões se situa sobre a superfície de plastificação  $(F(\{\boldsymbol{\sigma}\}, \{k\}) = 0$ ,

ocorrem deformações plásticas. A Figura 4.10 mostra o comportamento de um elemento de solo no estado bidimensional de tensões com sistema de coordenadas de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ .

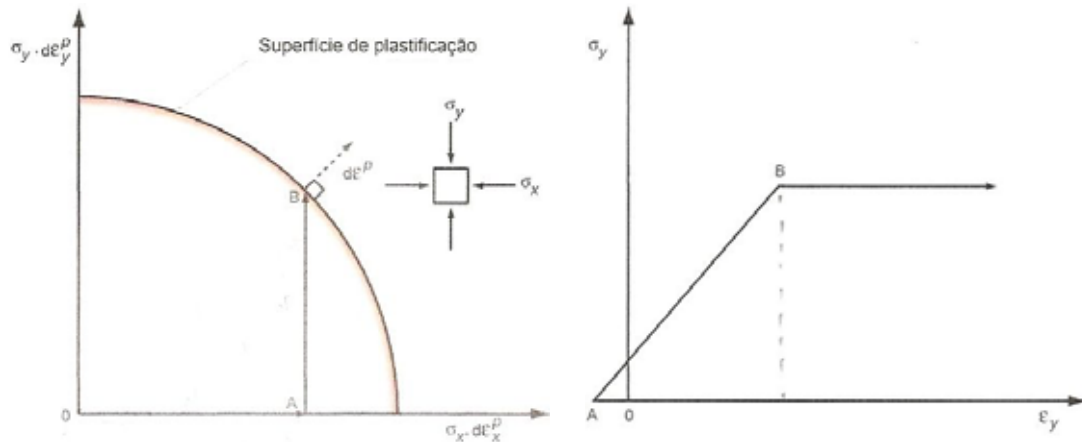


Figura 4.10 – Comportamento bidimensional de um material elasto-plástico perfeito (FRANÇA, 2006 Apud POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

- Com relação ao comportamento do material elasto-plástico com endurecimento (hardening). Observa-se a variação na superfície de plastificação quando ocorrem deformações plásticas.
- Quando na presença de deformações plásticas este material apresenta aumento da superfície de plastificação centrado em torno do mesmo ponto, onde diz-se que ocorre endurecimento isotrópico (Figura 4.11).

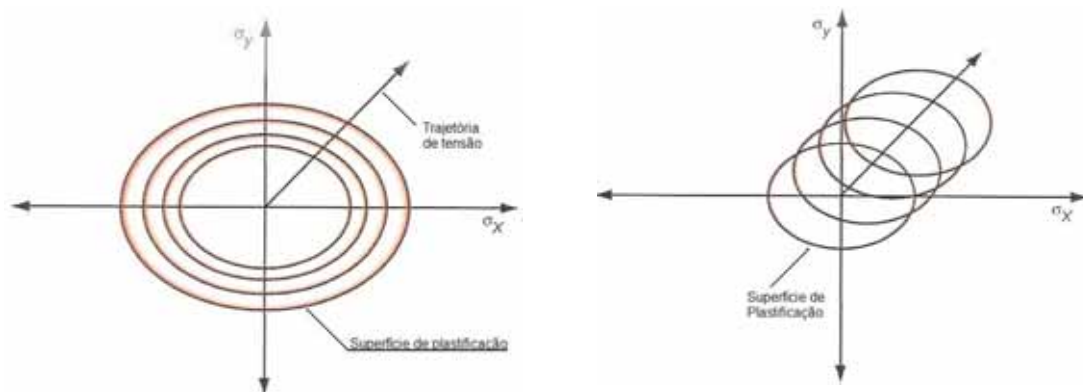


Figura – 4.11 – Superfícies de plastificação com endurecimento isotrópico e cinemático (FRANÇA, 2006, Apud POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

Por sua vez, este movimento pode ser:

- **Positivo:** Quando o movimento da superfície de fluência é de expansão. Neste caso, se diz que é um processo elasto-plástico isotrópico com endurecimento.
- **Nulo:** Quando a superfície de carga plástica não evolui (aumenta) durante o processo elasto-plástico. Neste caso, se diz que o processo elasto-plástico é isotrópico perfeito.
- **Negativo:** Quando ocorre um movimento de contração da superfície de plastificação. Neste caso, se diz que é um processo elasto-plástico isotrópico com amolecimento (OLLER, 2000). Quando diante de deformações plásticas, a superfície de plastificação não muda de tamanho, mas muda de posição, diz-se que ocorre endurecimento cinemático.

#### 4.3.5 - Modelo de Drucker – Prager

Neste trabalho foi utilizado o modelo constitutivo de Drucker-Prager para modelar o comportamento mecânico dos materiais da fundação da barragem, solo 1C (solo que permaneceu intacto durante o rompimento do talude da barragem e que fica localizado no maciço da barragem, próximo ao dreno de pé), dreno de pé, filtros de areia vertical e Horizontal e enrocamento de proteção do talude de montante.

No modelo de Mohr-Coulomb se observa cantos agudos quando a função é traçada no espaço das tensões efetivas principais. Esses cantos implicam singularidades na função de fluência, em particular no que diz respeito às derivadas parciais necessárias para definição da matriz elasto-plástica. Essas singularidades podem ser numericamente tratadas ou adotar funções que suavizem os cantos da

função de Mohr-Coulomb. Uma das soluções mais comuns é adotar uma função que envolva a superfície de plastificação de Mohr-Coulomb (Figura 4.13). Essa superfície adotada é proposta por Drucker-Prager (1958) (SOUZA, 2004).

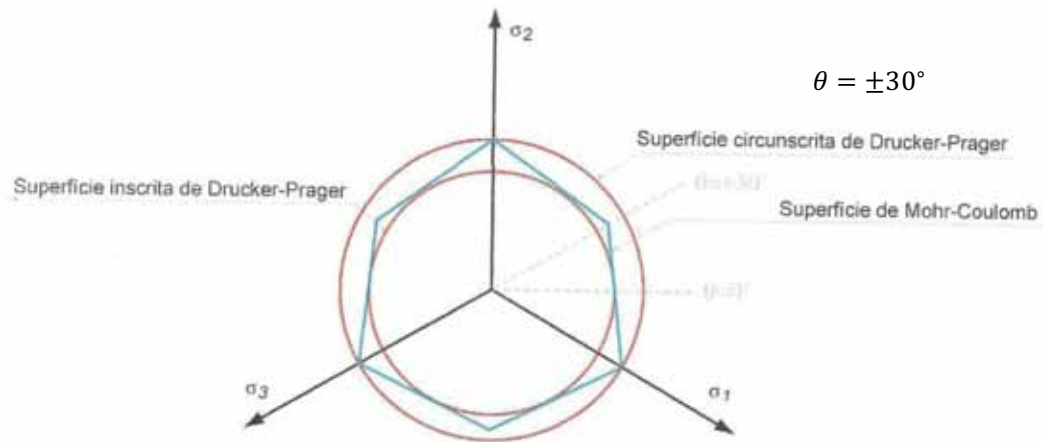


Figura 4.13 – Comparação do critério de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager em um plano desviador qualquer (FRANÇA, 2006 Apud POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

Essas singularidades podem ser numericamente tratadas ou adotar uma função que suavize os cantos da função de Mohr-Coulomb. Devido a esses problemas, Drucker-Prager (1952) desenvolveram um modelo similar ao modelo de Mohr-Coulomb, mas com simplificações na superfície de plastificação, que assume a forma de um cone cilíndrico no espaço geral das tensões principais (Figura 4.14).

O critério de Drucker-Prager subestima a ruptura em relação ao critério de Mohr-Coulomb, porém, não apresenta problemas de singularidades, como é o caso do critério de Mohr –Coulomb.

Para isso, a parcela  $g(\theta)$  na equação de Mohr-Coulomb é substituída pela constante  $M_{jp}(\theta)$ , obtendo assim, um cone cilíndrico no espaço de tensões principais. logo, o critério pode ser entendido como uma simplificação do critério de Mohr-Coulomb.

A função de plastificação de Drucker-Prager é definida como:

$$F(\boldsymbol{\sigma}', k) = J - \left( \frac{c'}{tg\phi'} + p' \right) M_{jp} = 0 \quad (4.30)$$

No plano desviador essa superfície passa a ser um círculo, conforme se observa na Figura 4.13. A função de plastificação  $F$ , descreve um cone de eixo coincidente com o eixo hidrostático no espaço de tensões e um círculo em um plano octaédrico, ver Figura 4.14.

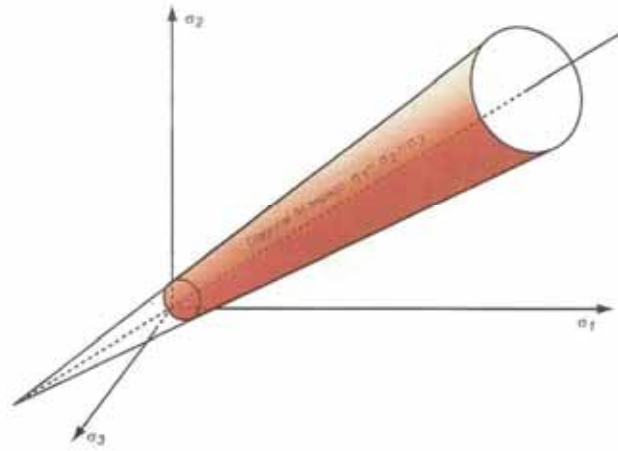


Figura 4.14 – Superfície de plastificação de Drucker-Prager (FRANÇA, 2006 Apud POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

O valor da constante do material  $M_{jp}$  é função do ângulo de atrito interno do material  $\phi$  e da invariante de Lode  $\theta$ . A determinação de  $M_{jp}$  é feita igualando a função  $g(\theta)$  para diferentes valores do ângulo do Lode. No caso do círculo que circunscreve o hexágono irregular de Mohr-Coulomb (trajetória de compressão axial) há correspondência para  $\theta = -30^\circ$ .

Neste caso, assumindo que o ângulo de  $M_{jp} = g(\theta)$  é freqüente considerar um valor constante para o ângulo de Lode  $\theta$ . Duas condições são de interesse a condição triaxial de tração e de compressão.

$$M_{jp}^{\theta=-30^\circ} = g(\theta = -30^\circ) = \frac{\sin \theta'}{\cos \theta + \frac{\sin \theta \cdot \sin \theta'}{\sqrt{3}}} = \frac{2\sqrt{3} \cdot \sin \theta'}{3 - \sin \theta'} \quad (4.31)$$

O modelo é completado com a adoção de um potencial de plastificação não associado. O modelo pode assumir fluxo não associado,  $P(\sigma, m) \neq F(\sigma, k)$  com a superfície de potencial plástico sendo definida por

$$P(\sigma', m) = J - \left[ \left( \frac{c'}{tg(\varphi')} + p'_c \right) \frac{M_{jp}}{M_{jp}^{pp}} - p'_c + p' \right] M_{jp}^{pp} = 0 \quad (4.32)$$

Onde

$$M_{jp}^{pp} = g_{pp}(\theta) = \frac{\sin \varphi}{\cos \theta + \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sqrt{3}}} \quad (4.33)$$

Se for adotado  $M_{jp}^{pp} = M_{jp}$ , ou seja, se o ângulo de dilatação  $\varphi$  for igual ao Ângulo de atrito  $\emptyset$ , a superfície de potencial plástico coincide com a superfície de plastificação,  $P(\boldsymbol{\sigma}, m) = F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{k})$  e o modelo assume fluxo associado.

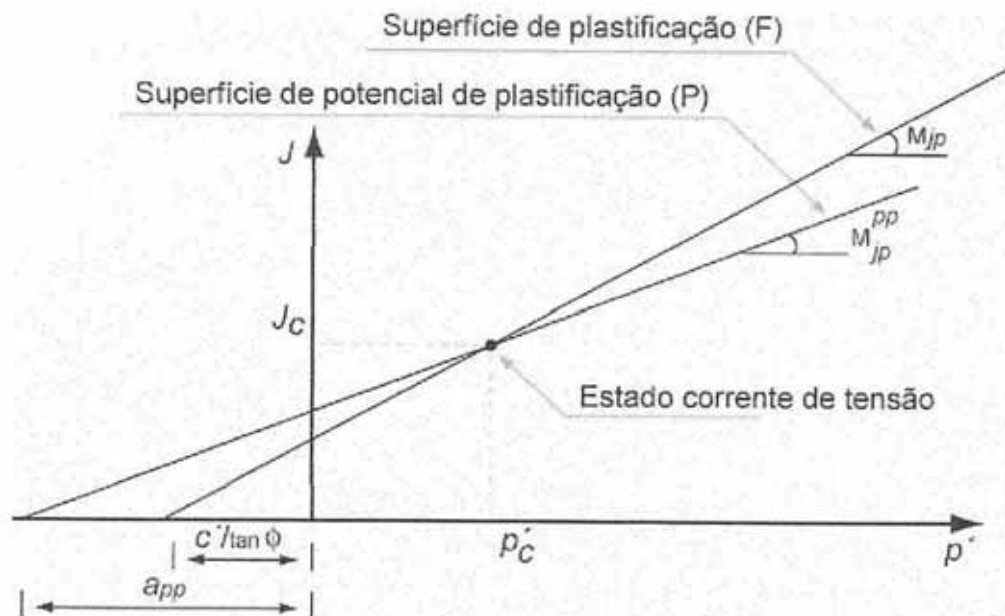


Figura 4.20 – Relação entre a superfície de plastificação e a superfície de potencial plástico (POTTS and ZDRAVKOVIC, 1999).

#### **4.3.6 - O Modelo Básico de Barcelona (BBM)**

O Modelo Básico de Barcelona (BBM) foi formulado no contexto de endurecimento elastoplástico com o objetivo de representar o comportamento tensão-deformação dos solos não saturados e foi desenvolvido a partir de evidências experimentais (ensaios de laboratório, edométricos e de cisalhamento com sucção controlada) do comportamento de amostras de solos naturais e compactado, submetidas a diversas trajetórias de tensões e variação da sucção matricial, tomando por base o modelo do estado crítico.

Destina-se a análise de solos não saturados, leve a moderadamente expansivos e é válido para um estado de tensões isotrópicas e triaxiais.

Alonso et al. (1987) apresentaram um estudo teórico em que diferentes características de solos não saturados são analisados de maneira acoplada (RODRIGUES, 2007).

Partindo do estudo qualitativo, Alonso et al. (1990) apresentaram conceitos da influência da sucção na variação de volume (colapso e pequena a moderada expansão), limites elásticos e a análise do comportamento mecânico de um elemento de solo quando submetido a diferentes trajetórias que combinam tensão e sucção, utilizando para isso ensaios de laboratório triaxiais (PEIXOTO, 1999).

Alonso et al (1990) apresentaram a formulação matemática para o estado de tensões hidrostático e triaxial (FUTAI, 1997).

Este modelo elastoplástico é caracterizado por uma região de comportamento elástico limitada por uma superfície de escoamento LC (carregamento e colapso) e SI (aumento de sucção), que quando atingida, introduzirá deformações plásticas, cuja direção é determinada pelo potencial

plástico. Uma lei de endurecimento define como os parâmetros de história variam com as deformações.

O modelo é capaz de reproduzir a maioria dos aspectos do comportamento de solos parcialmente saturados, tais como:

- Aumento da rigidez do solo, resistência ao cisalhamento e pressão de pré-adensamento com aumento da sucção;
- Ocorrência de colapso ou expansão, dependendo do nível de tensões;
- Deformação volumétrica dependente não só dos valores de sucção e tensões iniciais e também finais, mas também da trajetória de tensões seguidas (COSTA, 2000).

Na formulação do modelo para condições de carregamento isotrópico foram usadas quatro variáveis de estado:

$$p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} - p_{ar}, \text{ tensão média líquida} \quad (4.34)$$

$$s = p_{ar} - p_w, \text{ sucção} \quad (4.35)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3), \text{ tensão desviatória} \quad (4.36)$$

$$v = 1 + e, \text{ volume específico} \quad (4.37)$$

Em termos volumétricos o modelo de Alonso et al. (1990), considera que as variações de volume específico  $v = (1 + e)$  podem ser produzidas por variações de sucção ( $U_a - U_w$ ) ou da tensão líquida média,  $p$ .

Tais variações são apresentadas num sistema de eixos bi-dimensionais, representando trajetórias de carregamento para diferentes valores de sucção (PEIXOTO, 1999).

O desenvolvimento matemático do modelo constitutivo está idealizado na figura 4.21, onde dois corpos-de-prova, idênticos, o primeiro, no estado saturado e o segundo, submetido a um valor de sucção constante, diferente de zero, são carregados no trecho virgem da reta de compressão.

O corpo-de-prova não saturado é solicitado até a tensão  $p_0$  (ponto 1).

A partir deste ponto, procede-se o descarregamento a sucção constante, até atingir a tensão de pré-adensamento  $p_0^*$  (ponto 2).

O corpo-de-prova não saturado ( $S \neq 0$ ) é umedecido, mantendo-se a tensão  $p_0^*$  até atingir o ponto 3, ocorrendo expansão do mesmo.

A partir deste ponto (2), o corpo-de-prova é saturado e solicitado sob a tensão  $p_0^*$ , até alcançar o ponto 3.

Analisando o comportamento das duas amostras de solos idênticos, sob sucções diferentes ( $s = 0$ ;  $s = s_1$ ), conforme a figura 4.18, observa-se que para a amostra sob sucção  $s$ , o escoamento se dará a uma tensão  $p_0$  maior que a tensão de escoamento  $p_0^*$  (tensão de pré-adensamento saturada).

Para cada valor de sucção existe um valor de tensão de escoamento correspondente.

Para dois pontos pertencentes à mesma curva de escoamento (pontos 1 e 3) e considerando a trajetória de tensões 1-2-3, em que o solo é inicialmente descarregado de  $p_0$  a  $p_0^*$ , sob sucção constante (trecho 1-2) e depois submetido a uma redução na sucção de  $s_1$  a zero, sob tensão constante  $p_0^*$  (trecho 2-3), o caminho de tensões 1 - 2 - 3 tem-se como resultado o volume específico  $v_3$  dado por:

$$v_3 = v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s \quad (4.38)$$

Onde o volume  $v_1$  é o volume específico no ponto 1;  $v_3$  é o volume específico no ponto 3.

$\Delta v_s$  é a variação de volume específico devido à variação de  $p$  (*trecho 1 – 2*);  $\Delta v_s$  é a variação de volume específico devido à variação de  $s$  (*trecho 2 – 3*).

Para o descarregamento e re-carregamento mantendo a sucção constante, a variação de volume é dada pela expressão:

$$dv = -k \frac{dp}{p} \quad (4.39)$$

Onde  $k$  é o índice de compressibilidade para descarregamento e re-carregamento da tensão isotrópica (parâmetro de rigidez elástica para variação da tensão  $p$ ), considerada independente da sucção.

O umedecimento indicado no trecho 2-3, onde temos uma redução de sucção, mantendo-se constante a tensão de pré-adensamento, gera uma expansão elástica que é dada por:

$$dv = -k_s \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (4.40)$$

Onde,  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica e  $k_s$  é o parâmetro de rigidez elástica para a variação da sucção,  $S$  (Costa, 2000).

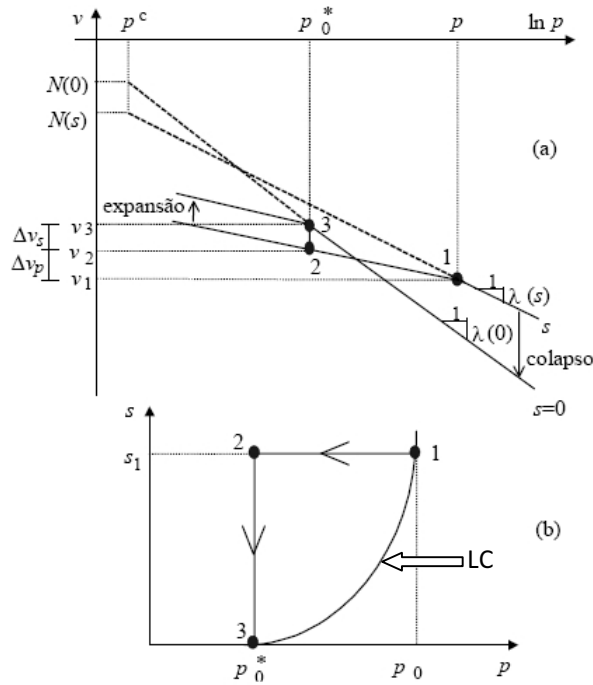


Figura 4.21 – Trajetórias de carregamento isotrópico para diferentes valores de sucção, onde podemos observar a relação entre as tensões de pré-adensamento  $p_0$  e  $p_0^*$ . (a) curvas de compressão para solos saturados e não saturados; e (b) trajetória de tensão e curva de escoamento para o estado plano de tensão ( $p$ ,  $q$ ) (ALONSO, GENS & JOSA, 1990).

#### 4.3.6.1 - Formulação para o estado de tensões isotrópicas (Alonso et al, 1990)

O modelo isotrópico constitutivo para solos não saturados foi formulado no espaço de tensões  $p$  “versus”  $q$  e com variação de volume específico de uma amostra de solo não saturado, sujeito a incrementos de carga isotrópica ao longo do trecho virgem da curva e a um determinado valor constante de sucção  $S$ , de:

$$dv = -\lambda(s) \frac{dp}{p} \quad (4.41)$$

Integrando, temos:

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad (4.42)$$

Onde  $\lambda(s)$  É o parâmetro de rigidez no ramo virgem da curva para variação da tensão isotrópica para uma determinada sucção. O aumento da rigidez do solo com a sucção consiste na inclusão de uma equação que descreve uma rigidez máxima assintótica dada por:

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r)\exp(-\beta s) + r] \quad (4.43)$$

Onde,

$\lambda(0)$  É o parâmetro de compressão virgem para a condição saturada ( $S = 0$ );

$\beta$  É o parâmetro que controla a taxa do aumento da rigidez do solo com a sucção;

$r$  É uma constante relacionada à rigidez máxima do solo  $\left( r = \lim_{s \rightarrow \infty} \left( \frac{\lambda(s)}{\lambda(0)} \right) \right)$ .

$N(s)$  É o volume específico referente à tensão  $p^c$  com a sucção;

$p^c$  É a tensão de referência para  $v = N(s)$ ;

Os parâmetros acima descritos são ilustrados na figura 4.21 e nela está à representação de dois corpos de prova, um com sucção  $S$  constante e o outro com sucção nula. No trecho de descarregamento e re-carregamento (sob sucção constante) o solo tem um comportamento elástico (COSTA, 2000).

Modificando as equações 4.39; 4.40 por expressões logarítmicas equivalentes e substituindo-as ao lado da equação 4.44 na equação 4.40, tem-se:

$$N(S) = \lambda(S) \ln \frac{p_0}{p^c} + k \ln \frac{p_0}{p_0^*} + k_S \ln \frac{S + p_{atm}}{p_{atm}} = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{p_0^*}{p^c} \quad (4.44)$$

A equação 4.44 fornece uma relação entre  $p_0$  e  $S$  como função de alguns valores de tensões de referência ( $p_0^*$  e  $p^c$ ) e alguns parâmetros do material

$(N(S); \lambda(S); k; k_s)$  (RODRIGUES, 2007). A escolha conveniente de  $p^c$  e  $N(S)$  para simplificar a equação 4.44 é assumir:

$$\Delta v(p^c)|_S^0 = N(0) - N(S) = k_s \ln \frac{S+p_{atm}}{p_{atm}} \quad (4.45)$$

Substituindo a equação 4.45 na equação 4.44, obtemos a seguinte relação:

$$\left( \frac{p_0}{p^c} \right) = \left( \frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{[\lambda(0)-k]}{[\lambda(s)-k]}} \quad (4.46)$$

A equação 4.46 descreve a variação da tensão de pré-adensamento com a sucção.

Esta função define a fronteira do domínio elástico e prediz deformações irreversíveis para trajetórias de carregamento e colapso no plano  $(p, s)$ .

$p_0$  É a pressão de pré-adensamento na condição não saturada;

$p_0^*$  É a pressão de pré-adensamento na condição saturada;

Desta equação é possível determinar um conjunto de valores de plastificação  $p_0$  associado a um valor de sucção, resultando em uma família de superfícies de plastificação no espaço de tensão  $(p, S)$  (INOUE, 2005).

A curva LC juntamente com outra curva de plastificação denominada **SI** (Suction Increase), delimita o domínio elástico no plano  $p$  versus  $s$ .

Explica não somente o aparente crescimento da tensão de pré-consolidação com o aumento de sucção matricial, mas também, o fenômeno do colapso observado na trajetória de molhagem, ver figura 4.22.

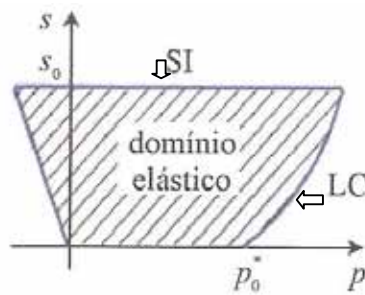


Figura 4.22 – Domínio elástico delimitado pelas curvas LC e SI (ALONSO, 1993).

A variação de volume específico devido à variação da sucção depende do histórico de sucção do solo. Para valores elevados de sucção, o solo pode deformar-se irreversivelmente.

Neste caso, outra curva denominada SI demarca a região elástica do solo, indicando o valor a partir do qual se tem deformações plásticas por incremento de sucção (Rodrigues, 2007). Neste trabalho não se utilizou a curva SI.

#### 4.3.6.2 - Curva de Escoamento Carregamento – Colapso:

A curva **LC** representa a superfície de plastificação para variações nas trajetórias de carregamento e umedecimento. Já a curva **SI** simula a variação da superfície de plastificação para trajetória de secagem ou incremento de sucção.

Qualquer variação ( $p$  e/ou  $s$ ) no estado de tensão dentro do espaço limitado por estas curvas (LC e SI) resultará em deformações elásticas (recuperáveis); uma vez ultrapassado estes limites, deformações plásticas (irreversíveis) ocorrerão, resultando na ampliação do espaço elástico, ver figura 4.22 e 4.23a e 4.23b.

A redução da sucção sob uma tensão isotrópica constante, ou aumento da tensão isotrópica sob sucção constante, resultará no deslocamento da curva LC, daí

o termo carga-colapso (SOUZA NETO, 2004). A posição da curva de escoamento LC no espaço  $p - S$  é fixada pelo valor da tensão de pré-adensamento saturada  $p_0^*$ . Observa-se que existe um valor de  $p_0^*$  definido pela tensão de referência  $p^c$  ( $p_0 = p^c$ ), para o qual a curva de escoamento LC é uma linha reta vertical.

Sob estas condições, variações na sucção não fornecerão deformações plásticas. Trajetórias de tensão atingindo a curva LC, mudam a curva para uma nova posição, aumentando o domínio elástico devido à deformação volumétrica plástica de compressão induzida.

O movimento da curva LC é controlado pela deformação plástica volumétrica, através de um parâmetro de endurecimento que é a tensão de pré-adensamento saturada  $p_0^*$ .

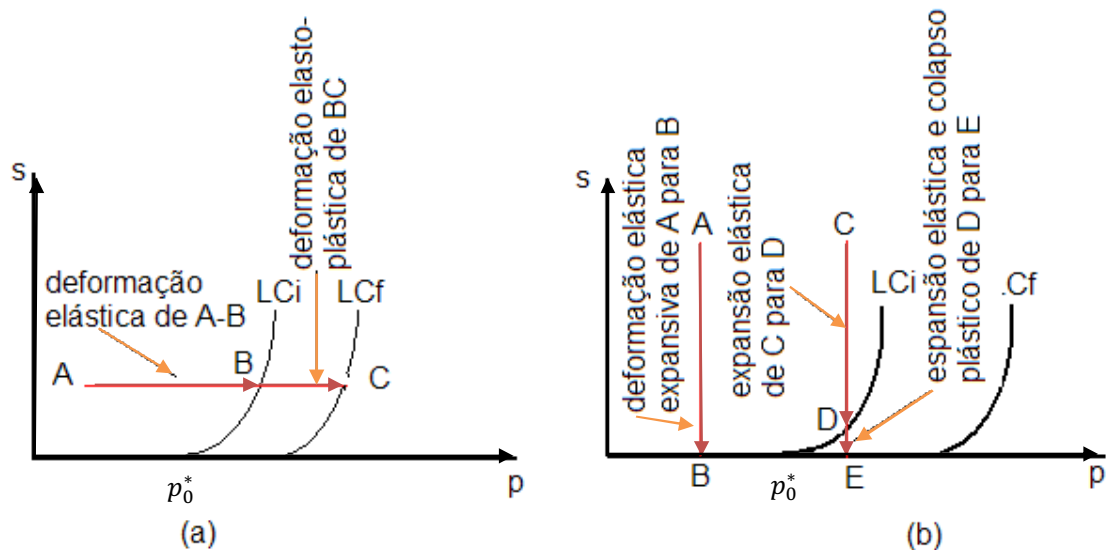


Figura 4.23 – Curvas de escoamento Carregamento – Colapso

Na figura 4.23a temos aumento de tensão com sucção constante, em que no trecho de A para B, tem-se a ocorrência de deformação elástica, enquanto que no trecho de B para C, tem-se a ocorrência de deformações elásticas e plásticas.

Uma trajetória de tensão tal como AC, mostrada na figura 4.23a, induz uma deformação compressiva que só é elástica de A para B, definida pela equação 4.44

A posição e a inclinação da curva LC permite a modelagem da expansão ou colapso que ocorre no umedecimento. Na figura 4.23b a trajetória de tensão de A para B, corresponde a uma redução na sucção para um valor constante de  $p$  menor que  $p_0$  até a saturação ser alcançada.

Para essa trajetória de tensão só ocorre deformação elástica expansiva. A trajetória de tensão de C para E, corresponde a uma diminuição na sucção para um valor constante de  $p$  maior que  $p_0$ . A trajetória de tensão de C para D resulta em expansão elástica e de D para E, ocorre expansão elástica e colapso plástico.

Alonso et al (1990) propõem que as deformações sejam calculadas pelas seguintes expressões (Futai, 1997):

O carregamento de  $p$  dentro da região elástica causa aumento na deformação elástica volumétrica compressiva, dada por:

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{k}{v} \frac{dp}{p} \quad (4.47)$$

Se a tensão  $p$  atingir o valor de escoamento  $p_0$  na curva **LC**, as componentes elástica e plástica de deformação volumétrica de B para C, isto é, a deformação total, é dada por:

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s)}{v} \frac{dp_0}{p_0} \quad (4.48)$$

Em que a componente plástica de deformação volumétrica é dada por:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s)-k}{v} \frac{dp_0}{p_0} \text{ ou } d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0)-k}{v} \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (4.49)$$

Na figura 4.23b a trajetória de tensão de A para B, corresponde a uma redução na sucção para um valor constante de  $p$  menor que  $p_0$  até a saturação ser alcançada. Para essa trajetória de tensão só ocorre deformação elástica expansiva. Alonso, Gens, Josa (1990), admitem que estas deformações elásticas expansivas no umedecimento, são dadas por:

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{k_s}{v} \frac{ds}{(s+p_{arm})} \quad (4.50)$$

A trajetória de tensão de C para E, corresponde a uma diminuição na sucção para um valor constante de  $p$  maior que  $p_0$ . A trajetória de tensão de C para D resulta em expansão elástica e de D para E, ocorre expansão elástica e colapso plástico e a deformação total de D para E será dada por:

$$d\varepsilon_{vs} = \frac{k_s}{v(s+p_{atm})} ds + \frac{\lambda(0)-k}{vp_0^*} dp_0^* \quad (4.51)$$

O segundo termo da equação (4.44) resulta da primeira hipótese feita por Alonso, Gens, Hight (1987), que o fenômeno do colapso observado na trajetória de tensão envolvendo uma redução na sucção é essencialmente o mesmo processo da compressão plástica que ocorre no carregamento isotrópico, além do ponto de escoamento.

Onde:

$\varepsilon_{vp}^e$  = Deformação volumétrica elástica devido a variação da tensão  $p$ ;

$\varepsilon_{vs}^e$  = Deformação volumétrica elástica devido a variação da sucção.

#### 4.3.6.3 - Curva de escoamento de aumento de sucção

Alonso, Gens & Josa (1990) definiram uma segunda curva de escoamento, a uma curva de escoamento SI (suction increase) que foi admitida ser uma linha reta

paralela ao eixo  $p$ , definida por  $s = s_0$ , onde  $s_0$  representa o valor máximo de sucção que o solo sofreu previamente. Um aumento de sucção  $s$  dentro do domínio elástico provocará deformação volumétrica elástica de compressão dada por:

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{k_s}{v} \frac{ds}{(s+p_{arm})} \quad (4.52)$$

Onde:

$d\varepsilon_{vs}^e$  É a deformação volumétrica elástica devido à variação da tensão  $p$ .

E a deformação plástica quando atingida a curva SI é dada por:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - k_s}{v} \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad (4.53)$$

Onde:

$d\varepsilon_{vs}^p$  É a deformação volumétrica plástica devido a variação da sucção.

Alonso et al (1990) admitiram que  $\lambda_s$  e os dois índices de expansão elástica  $k$  e  $k_s$  tinham um valor constante com somente  $\lambda_s$  variando com a sucção. No nosso trabalho, não consideramos a curva SI.

#### 4.3.6.4 - Leis de endurecimento (Deformações volumétricas):

As superfícies de escoamento LC e SI são acopladas através da lei de endurecimento, que corresponde a uma formulação matemática que controla a movimentação da LC e da SI, devido às deformações plásticas volumétricas produzidas pelo aumento na tensão média hidrostática, que deslocam LC e SI simultaneamente (uma movimentação da curva LC, também arrasta a curva SI e vice-versa).

Josa, Alonso, Lloret & Gens (1987) mostraram que um aumento de sucção, que modifica a posição da curva de escoamento SI, afeta a resposta do solo ao carregamento ao longo do eixo das pressões de pré-adensamento ( $p$ ). Baseado no trabalho de Josa, Lloret & Gens (1987), Alonso, Gens & Hight (1987) sugeriram um acoplamento entre o movimento de aumento da sucção e as curvas de carregamento e colapso, conforme se pode observar na figura 4.24. O aumento de  $S$  acima do limite  $S_0$ , deslocará a curva SI.

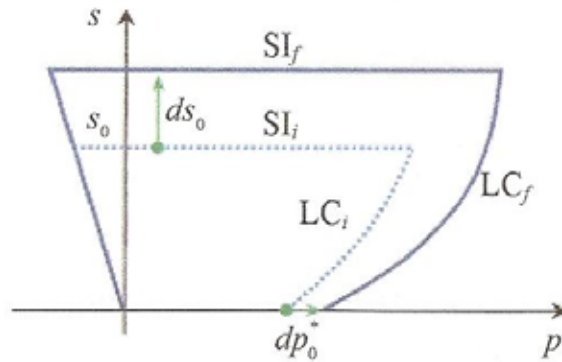


Figura 4.24 – Acoplamento entre as superfícies de plastificação (ALONSO ET AL., 1987).

Admitindo que deformações plásticas induzidas pela sucção ou por variação de tensão têm um efeito similar, Alonso, Gens & Josa (1990) acoplaram as curvas de escoamento, controlando a posição delas por uma deformação volumétrica plástica total, tal que:

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_{vs}^p + d\varepsilon_{vp}^p \quad (4.54)$$

Em que a componente de deformação volumétrica plástica associada com a curva de escoamento LC (variação da pressão) é dada por:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s)-k}{v} \frac{dp_0}{p_0} \text{ ou } d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s_0)-k}{v} \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (4.55)$$

E, a componente de deformação volumétrica plástica associada com a curva de escoamento SI será dada por:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - k_s}{v} \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad (4.56)$$

Onde:

$\lambda_s$  É o coeficiente de compressibilidade para o aumento de sucção no trecho virgem da curva de tensão – deformação.

Admitindo que as deformações plásticas volumétricas induzidas pela sucção e variação de tensão ( $d\varepsilon_{vs}^p$  e  $d\varepsilon_{vp}^p$ ) têm efeitos similares, as superfícies de plastificação podem ser acopladas adotando a deformação plástica volumétrica total ( $d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_{vs}^p + \varepsilon_{vp}^p$ ) como parâmetro de endurecimento (INOUE, 2005).

O modelo de Barcelona adota duas leis de endurecimento tipo deformação, uma para cada superfície de plastificação e pode ser determinada a partir das equações 4.85 e 4.86, da seguinte forma:

Para tensão média

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{v}{\lambda(0) - k} \cdot d\varepsilon_{vp}^p \quad (4.57)$$

E para sucção

$$\frac{ds_0}{s_0} = \frac{v}{\lambda(s) - k(s)} \cdot d\varepsilon_{vs}^p \quad (4.58)$$

Onde  $dp_0^*$  e  $ds_0$  são os dois parâmetros de endurecimento, respectivamente, tipo-tensão e tipo-sucção, usados no modelo.

#### 4.3.6.5 - Considerações sobre o colapso máximo:

O modelo descrito prevê um aumento contínuo no colapso com o aumento de tensão. Entretanto, resultados de ensaios mostram que o colapso aumenta com a tensão confinante, alcança um máximo e diminui até tornar-se bastante pequeno, Para tensões muito elevadas.

A fim de modelar o colapso máximo, Josa, Balmaceda, Gens & Alonso (1992) modificaram o modelo original apresentando uma nova expressão para a superfície de escoamento LC, dada por:

$$p_0 = (p_0^* - p^c) + p^c[(1 - m)e^{-\alpha s} + m] \quad (4.59)$$

Onde,  $\alpha$  é um parâmetro que controla a forma da superfície de escoamento,  $m$  é um parâmetro que relaciona a diferença entre  $p_0$  para valores de sucção elevados ( $p_0^\infty$ ) e ( $p_0^*$ ).

A definição adequada para  $m(p_0^*)$  permite modelar o colapso máximo, uma vez que o parâmetro  $m$  controla a variação de  $p_0^*$  quando o solo é umedecido sob tensão constante.

Um máximo na forma de  $m(p_0^*)$  modela o colapso máximo. As condições específicas consideradas para esta função são:

- Quando  $p_0^* = p^c$ ,  $m = 1$ ;
- Para valores elevados de  $p_0^*(p_0^\infty)$ ,  $m = 1$ ;
- $m(p_0^*)$  apresenta um pico  $p_0^* = \zeta_x$ ,  $m = \zeta_y$ .

Onde  $m$  é dado por:

$$m = 1 + \frac{\zeta_y - 1}{\zeta_x - p^c} (p_0^* - p^c) e^{\left(\frac{\zeta_x - p_0^*}{\zeta_x - p^c}\right)} \quad (4.60)$$

E  $m \geq 1$ .

A curva de escoamento resultante é convexa, aumentando continuamente e tem um valor assintótico representado na figura 4.25.

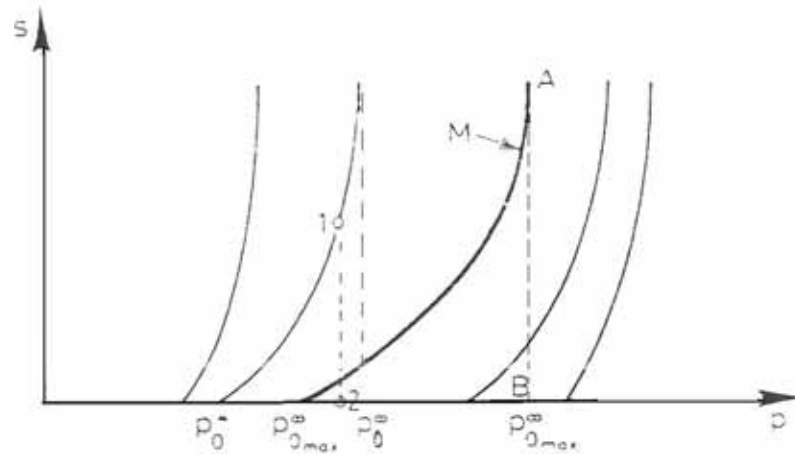


Figura 4.25 – Superfícies de escoamento carregamento-colapso LC no espaço de tensões  $(p, s)$ , para diferentes valores de  $p_0^*$  (JOSA ET AL, 1992).

#### 4.3.6.6 - Extensão do modelo para o caso do ensaio triaxial

Para o estado de tensão no ensaio triaxial deve-se incorporar o parâmetro de tensão  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$  ao modelo para o estado de tensões isotrópicas, para incluir o efeito da tensão cisalhante.

O estado de deformação no ensaio triaxial é definido pela deformação volumétrica, que é dada por:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (4.61)$$

E pela deformação cisalhante que é dada por:

$$\varepsilon_c = 2 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{3} \quad (4.62)$$

Por uma questão de consistência, o modelo deve prever o comportamento saturado quando a sucção atinge a situação limite igual a zero ( $s = 0$ ).

Para a condição saturada, o modelo ficará reduzido ao modelo Cam-Clay modificado, que fornece uma descrição qualitativa para o comportamento de solos saturados.

A inclinação da linha de estados críticos  $M$  foi considerada inalterada com a sucção, ou seja, seu valor é o mesmo para a condição saturada ou não saturada com sucção constante.

O aumento da resistência do solo com a sucção foi considerado através do parâmetro  $k$ , que descreve o aumento da coesão com a sucção e pode ser encontrado, conhecendo-se  $p$ , que é a resultante do prolongamento da linha de estados críticos com uma determinada sucção  $s$ , no eixo  $p$  (ALONSO, 1990).

Alonso, Gens & Josa (1990) admitiram uma relação linear da coesão com a sucção, assim a elipse interceptará o eixo  $p$  no ponto em que:

$$p = -p_s = -ks \quad (4.63)$$

onde  $k$  é uma constante.

O escoamento acima do eixo hidrostático é definido por uma elipse que passa pelos pontos  $-p_s(s)$  e  $p_0(s)$ , e é dada pela função:

$$q^2 = M^2(p + p_s)(p_0 - p) \quad (4.64)$$

que é a expressão para a superfície de escoamento

O modelo propõe também que a superfície de escoamento SI se estenda à região  $q > 0$  em um plano paralelo ao eixo  $q$ .

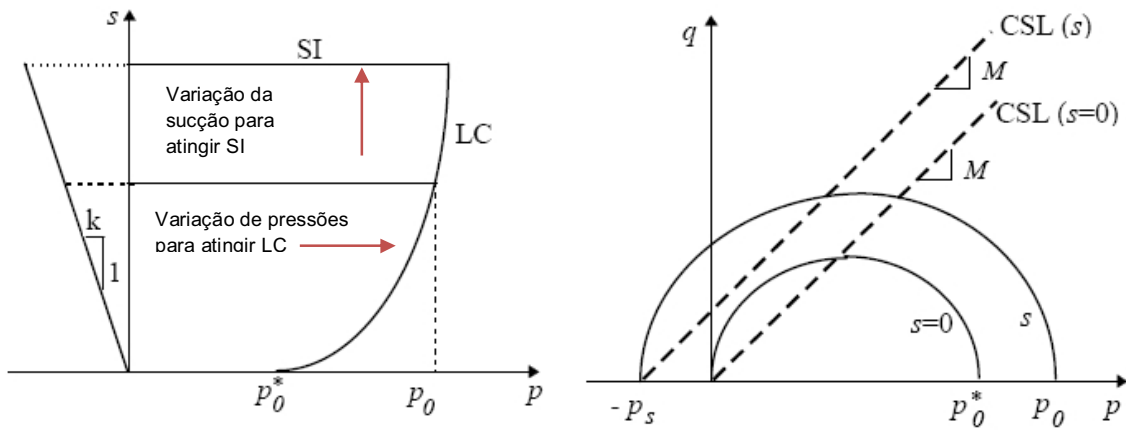


Figura 4.26 - Superfícies de escoamento no espaço (p, q, s) (ALONSO, GENS & JOSA).

A idealização da forma espacial da superfície de escoamento é mostrada na Figura 4.27.

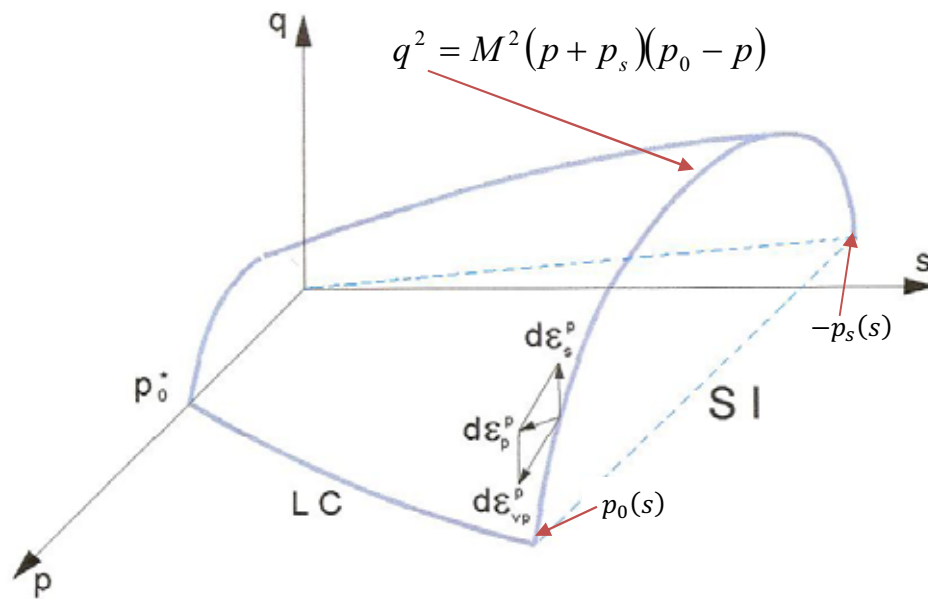


Figura 4.27 – Visão tridimensional da superfície de escoamento no espaço (p, q, s) (ALONSO, GENS & JOSA, 1990).

O modelo considera o incremento de deformação plástica associado com a superfície de escoamento no plano (p, q) e sugere uma lei não associada ao plano de sucção constante, sendo então, introduzido o parâmetro  $\alpha$  e chegando-se a:

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2p+p_s-p_0)} \quad (4.65)$$

Que é a expressão que fornece o potencial plástico, onde o parâmetro  $\alpha$  indica a condição de associatividade na lei de plasticidade e é dado por:

$$\alpha = \frac{M(M-9)(M-3)}{9(6-M)} \left[ \frac{1}{1-\frac{k}{\lambda(0)}} \right] \quad (4.66)$$

Em que para  $\alpha = 1$ , teremos plasticidade perfeita;

E para  $\alpha \neq 1$ , plasticidade não associada.

As deformações elásticas causadas pelo carregamento são calculadas através das seguintes expressões:

$$d\varepsilon_s^e = \frac{1}{3G} dq \quad (4.67)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{k}{v} \frac{dp}{p} + \frac{k_s}{v} \frac{ds}{(s+p_{atm})} \quad (4.68)$$

Na formulação utilizada no presente trabalho, toma-se o coeficiente de Poisson,  $\nu$  como parâmetro do material e o módulo  $G$  variam com  $p$  de acordo com a seguinte expressão:

$$G = \frac{3(1-2\nu)p(1+e)}{2(1+\nu)k} \quad (4.69)$$

Os parâmetros do modelo podem ser obtidos através de uma série de ensaios, a saber:

- Ensaios de compressão isotrópicos drenados (carregamento e descarregamento) sob vários valores de sucção constante, fornecendo dados para determinação de  $p^c, p_0^*, \lambda(0), k, r, \beta$  (associados à curva de escoamento LC).
- Ensaios de ciclos de umedecimento-secagem para uma determinada tensão aplicada, permitindo a obtenção dos parâmetros  $s_0, \lambda_s, k_s$ .
- Ensaios de cisalhamento direto sob diferentes valores de sucção, fornecendo dados para determinação dos parâmetros  $G, M, k$  (ALONSO, 1990).

## **Capítulo 5: Metodologia e Resultados dos Ensaios de solos realizados para obtenção dos parâmetros a ser utilizados na modelagem numérica:**

### **5.1 - Introdução**

Para a realização dos ensaios de laboratório, no solo 1B, que foi utilizado no maciço, no espaldar de montante da barragem, a fim de se obter os parâmetros necessários para realização da modelagem numérica, utilizando o Modelo Básico de Barcelona – BBM, para construção e comportamento da barragem ao longo de sua vida útil, necessitou-se coletar material na jazida, próximo a barragem, utilizada como empréstimo na construção da barragem.

Coletamos amostras de material em sacos de nylon, estando o solo, praticamente no estado seco e trouxemos para o laboratório de solos, no Departamento de Engenharia Civil, no CTG, da UFPE.

Procurou-se reproduzir em laboratório, amostras de solos compactadas com as mesmas características do solo utilizado na elevação do maciço da barragem, através do ensaio de compactação de Proctor Normal, com teor de umidade ótima, grau de compactação e densidade máxima, iguais aos obtidos na obra.

Foi determinada no laboratório a densidade real dos grãos ( $2,64 \text{ g/cm}^3$ ), que também foi igual à densidade dos grãos dos solos utilizados na construção do maciço, conforme consta no relatório de controle tecnológico da TECNOSOLO, que ficou contratada para refazer o novo projeto da barragem e o seu controle

tecnológico da qualidade dos materiais a serem empregados na reconstrução da Barragem de Açú/RN.

As amostras de solo foram previamente secas ao ar e em seguida preparadas para a compactação dinâmica na energia do Proctor Normal. Conhecida a umidade inicial e a curva de compactação do solo, calculou-se a quantidade de água necessária para a amostra de solo atingir a umidade ótima.

A amostra, com a quantidade de água assim definida, foi compactada, extraída do molde e envolvida por papel filme de PVC e em papel alumínio, sendo mantida por, no mínimo, sete dias na câmara úmida para permitir que fosse estabelecido o equilíbrio da umidade.

À medida que fosse precisando de material para realização dos ensaios, retiravam-se amostras dos corpos de prova que estavam na câmara úmida e eram moldados nos anéis para os respectivos ensaios.

Foram realizados ensaios para obtenção da curva de retenção do solo utilizado no maciço da barragem, ensaios edométricos com sucção constante, num total de seis ensaios para os seguintes valores de sucção: 0 KPa; 50 KPa; 250 KPa; 500 KPa; 750 KPa e 1000 KPa, e ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada de 250 KPa, 500 KPa e 1000 KPa, para três carregamentos respectivos de 0,50 Kg/cm<sup>2</sup>, 3,50 Kg/cm<sup>2</sup> e 7,50 Kg/cm<sup>2</sup>, correspondentes aproximadamente as tensões próximo ao coroamento da barragem, a meia altura do maciço da barragem (em torno de 20m) e entre o maciço e a fundação.

## **5.2 - Determinação da curva característica pelo método do papel filtro**

Para determinação da Curva Característica (ou de Retenção) de Sucção, foi utilizado o método do papel filtro. A técnica do método do papel filtro (Marinho, 1995)

tem-se mostrado muito útil na determinação da curva característica dos solos. O método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio, que existe, quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com o papel filtro, com umidade inferior. O papel passa a absorver certa quantidade de água do solo até que o sistema papel filtro-solo entre em equilíbrio de sucção. O papel filtro e o solo possuirão o mesmo valor de sucção, porém com umidades gravimétricas diferentes.

Tendo-se a relação entre a sucção e o teor de umidade do material poroso (calibração), a sucção do solo pode ser obtida referindo-se à curva de calibração.

O papel indicado para estes ensaios é o classificado como quantitativo, sendo o Whatman 42 e o Schleicher & Schuell 589 os mais utilizados.

A escolha deste tipo de papel se deve ao fato que o processo industrial envolvido na fabricação garante as mesmas características de absorção, independente de caixa ou lote (CHANDLER & GUTIERREZ, 1986).

Nos ensaios realizados o papel escolhido foi o Whatman 42, o qual no estado seco ao ar, apresenta umidade da ordem de 6%, permitindo medir sucções na faixa de 0 a 29 MPa. Esta é a máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo (MARINHO, 1994).

CHANDLER ET AL. (1992) apresentam as seguintes equações obtidas por um grande número de pontos para serem usadas como curvas de calibração para o papel Whatman N° 42:

- Para umidade do papel (W) > 47%

$$\text{Sucção } (u_a - u_w) = 10^{(6,05 - 2,48 \log W)} \text{ (KPa)} \quad (5.1)$$

- Para umidade do papel (W) ≤ 47%

$$\text{Sucção } (u_a - u_w) = 10^{(4,84 - 0,0622W)} \text{ (KPa)} \quad (5.2)$$

Sucção total (matricial mais osmótica) ou matricial pode ser obtida por este procedimento, a depender de como ocorre o fluxo da água do solo para o papel. Caso o fluxo ocorra na forma de vapor, a sucção medida será total. Isto é obtido evitando-se o contato direto do papel com o solo. Caso o fluxo ocorra apenas por capilaridade, a sucção medida será a matricial. A capilaridade ocorre através do contato direto do papel filtro com a amostra de solo. Estes dois procedimentos estão exemplificados na figura 5.1. Todavia, para sucções muito altas, quando o solo encontra-se num estado muito seco, a transferência da água do solo para o papel será, predominantemente, na forma de vapor. Neste caso, pouca ou nenhuma diferença ocorrerá entre a sucção matricial e a total (FREDLUND & XING, 1994, SOUZA NETO, 2004).

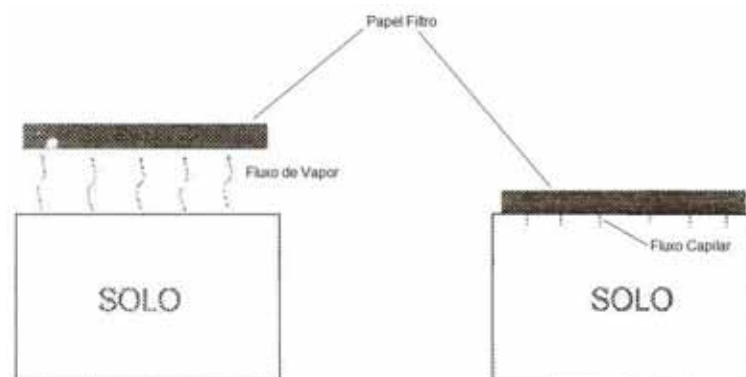


Figura 5.1 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (MARINHO, 1995).

### 5.2.1 – Calibração do papel filtro

Os materiais necessários para se calibrar e usar o papel filtro como sensor de sucção são os seguintes:

- Balança analítica com acurácia de no mínimo 0.0005g;

- Pequenos sacos plásticos auto-selante ou outro recipiente leve de fácil e rápida selagem;
- Pinça e tesoura;
- Papel filtro Whatman 42.(cada tipo de papel filtro requer uma curva de calibração própria).

O procedimento de calibração consiste em permitir que o papel filtro, após o equilíbrio, seja removido do ambiente de equilíbrio sem perda significativa de umidade. A perda de umidade é da ordem de 1,5% por minuto para uma umidade de aproximadamente 35%. Esta perda depende da umidade do papel. Para baixas umidades (altas sucções) a evaporação é menor. Quando retirado da estufa o papel absorve água do ar e, portanto deve ser rapidamente colocado no recipiente e selado.

No caso do método do papel filtro o fluxo de água pode ocorrer de duas maneiras: por fluxo de vapor ou por fluxo capilar. Na situação de fluxo de vapor as moléculas de água têm que escapar da água dos poros vencendo as forças capilares no solo e eventualmente forças osmóticas que agem devido à presença de sais. O espaço de ar deixado entre o solo e o papel filtro fornece uma barreira para os sais, permitindo apenas o fluxo de vapor de água (isto é, água pura). O fluxo capilar ocorre através das partículas do solo e das fibras do papel filtro, sem que a água perca continuidade. O fluxo capilar implica numa interação entre o papel filtro e a água de poro (isto é, com sais, etc.).

Se o fluxo ocorre apenas através de vapor o papel filtro medirá sucção total, uma vez que estarão incorporadas forças osmóticas e capilares que retêm a molécula de água. Quando o fluxo ocorre apenas por capilaridade a sucção matricial

é medida. Neste caso o componente osmótico não age como força adicional que impede o fluxo de água para o papel filtro (MARINHO, 1995).

No caso da sucção matricial, é fundamental que o papel filtro esteja em perfeito contato com o solo. O tempo de estabilização de 7 dias tem sido adotado como suficiente (CHANDLER & GUTIERREZ, 1986; MARINHO, 1994, SOUZA NETO, 2004).

Outro aspecto importante que pode influenciar nos resultados, é o tempo requerido desde a remoção do papel do ambiente de equilíbrio até a pesagem, que deve ser o mais curto quanto possível para evitar perda significativa de umidade. Da mesma forma deve-se proceder durante a pesagem do papel filtro seco, evitando ganho excessivo de umidade. Quando retirado da estufa o papel absorve água do ar e, portanto deve ser rapidamente colocado no recipiente e selado (MARINHO, 1995).

O uso do papel filtro como sensor de sucção deve seguir os seguintes procedimentos:

- O papel filtro utilizado deve ser o quantitativo Whatman Nº 42;
- O papel filtro deve ser usado na condição “seco ao ar”, diretamente da caixa;
- A princípio qualquer tamanho de papel filtro pode ser utilizado, contudo a sensibilidade da medida reduz-se com a redução do tamanho do papel;
- Podem-se utilizar as calibrações existentes na literatura;
- O tempo de equilíbrio para medição de sucção matricial deve ser de no mínimo sete dias;
- No mínimo dois papéis filtro por amostra devem ser utilizados, um de cada lado da amostra de solo, em seguida o conjunto (papel mais corpo de prova) era envolvido em várias camadas de papel filme de PVC, para evitar a

transferência (perda ou ganho de umidade) de água com o meio, e armazenado em uma caixa térmica (caixa de isopor) e colocada em uma sala, cuja variação de temperatura máxima seja de 5°C;

- Os papéis filtro nunca podem se sobrepor;
- Nenhum material absorvente deve ser utilizado entre o papel filtro e o solo;
- O tempo para estabilização padrão é de sete dias;
- Depois que o equilíbrio é alcançado os papéis filtro são removidos com o uso de pinça e colocados em pequenos sacos plásticos auto-selantes. O tempo de transferência deve ser de no máximo 5 segundos, para evitar evaporação;
- Os sacos plásticos com papel filtro são pesados em balança com capacidade de leitura de 0,0005g. O papel é removido do saco plástico e seco em estufa (105°C) por no mínimo 2 horas;
- A umidade do papel é obtida e com o uso das curvas de calibração a sucção é determinada (MARINHO, 1995);
- Os papéis foram pesados em uma balança digital com capacidade de 200g e de sensibilidade de 0,0001g. Em seguida, os papéis eram conduzidos à estufa com temperatura de 105 °C durante no mínimo 2 horas e no máximo 24 horas, após esse tempo os mesmos eram pesados para determinação do teor de umidade;
- O tempo de pesagem (retirada do papel da amostra de solo e condução a balança para pesagem) ocorreu em poucos segundos (entre 5 e 10 segundos);
- O papel filtro utilizado nos ensaios, antes da sua colocação em contato com a amostra de solo, era mantido dentro da embalagem original e esta, colocada dentro de uma caixa de isopor, com o intuito de evitar ganho ou perda de umidade, em relação ao meio ambiente;

### 5.2.2 – Realização do ensaio com papel filtro

Nas figuras de 5.2 a 5.15 se pode observar a seqüência na realização do ensaio com o uso do papel filtro para obtenção dos dados que permitiram a obtenção da curva de retenção do solo usado no maciço da barragem.



Figura 5.2 – material a ser utilizado no ensaio com papel filtro e cravação do anel na amostra compactada.



Figura 5.3 – Preparação da amostra na cravação do anel e Anel moldado no corpo de prova compactado.



Figura 5.4 – Amostra moldada no anel, pronta para colocação do papel filtro.



Figura 5.5 – Amostra moldada no anel com papel filtro, sendo envolvida no papel filme de PVC.



Figura 5.6 – Retirada do papel filtro da amostra de solo para pesagem e Retirada do papel filtro da amostra de solo para pesagem.



Figura 5.7 – Retirada do papel filtro em contato com a amostra para pesagem.



Figura 5.8 – Pesagem do papel filtro após ensaio.

### 5.2.3 – Determinação da curva de retenção

A determinação da curva de retenção a ser considerada para o solo utilizado no maciço da barragem, referente à trajetória de secagem apresentada na figura abaixo, foi ajustada através do programa computacional “STATISTICA”, utilizando-se o modelo de VAN GENUTHEN (1980), apresentado a seguir. A curva de retenção foi obtida através do ensaio de laboratório, utilizando a técnica do papel filtro e considerando o índice de vazios igual para todas as amostras ( $e_0 = 0,41$ ), para o solo 1B, utilizado na construção dos espaldares, à montante e à jusante do filtro

vertical da barragem. Na tabela 5.1 estão os dados para determinação da curva de retenção e na figura 5.16 está a curva de retenção obtida do ensaio.

Tabela 5.1 – Dados referentes à curva de retenção do solo.

| Umidade gravimétrica(W%) | Grau de Saturação(S%) | Sucção (KPa) | Densidade dos grãos (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|-----------------------|--------------|------------------------------------------|
| 12,54                    | 80,75                 | 4,80         | 2,64                                     |
| 11,70                    | 75,34                 | 108,30       | 2,64                                     |
| 11,24                    | 72,73                 | 336,10       | 2,64                                     |
| 10,93                    | 70,38                 | 597,20       | 2,64                                     |
| 10,55                    | 67,93                 | 1029,30      | 2,64                                     |
| 9,44                     | 60,78                 | 2548,60      | 2,64                                     |
| 5,24                     | 33,74                 | 12059,20     | 2,64                                     |
| 1,31                     | 8,44                  | 22979,80     | 2,64                                     |
| 0,57                     | 3,67                  | 27122,10     | 2,64                                     |

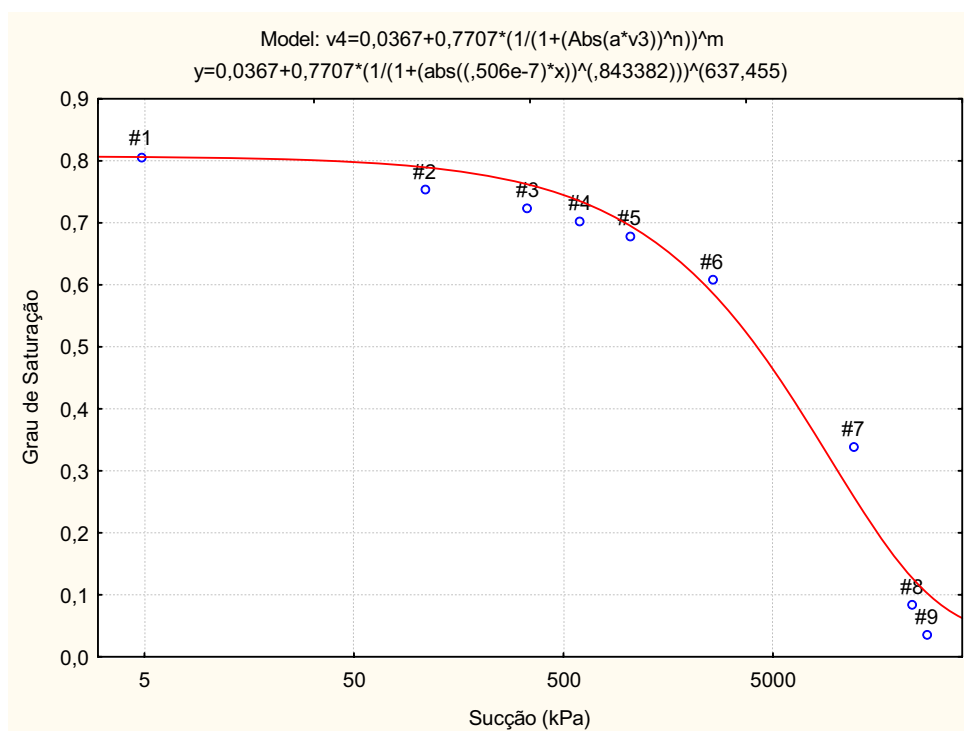


Figura 5.9 – Curva de retenção do solo 1B, utilizado nos espaldares do maciço da barragem.

Como resultado obteve-se:

Coeficiente de correlação .....→  $R = 0,98783255$

Coeficiente de determinação →  $R^2 = 0,97581316$

### **5.3 – Ensaio com Sucção Controlada**

Nos ensaios com sucção Constante foi utilizado um oedometro e uma prensa de cisalhamento direto. Na figura 5.17 esta uma foto da célula edométrica e prensa de Bishop adaptada para permitir a compensação da excentricidade provocada pelo peso do manômetro e da válvula de passagem de ar.

#### **5.3.1 – Ensaio Edométrico com Sucção Controlada (EDSC).**

Os ensaios oedométricos com sucção controlada foram realizados segundo os seguintes procedimentos básicos:

- Preparação do equipamento;
- Moldagem e instalação do corpo de prova na câmara oedométrica;
- Aplicação do estado de tensões e de sucção, previamente estabelecidos, com o contínuo monitoramento das pressões verticais, de água e de ar, medição, medições de deformações volumétricas produzidas durante o processo de adensamento.

O procedimento inicial é feito com a saturação da membrana semi permeável durante sete dias, numa célula de pressão de valor de entrada de ar até que não ocorresse variação nas leituras das pressões.

O corpo de prova é moldado em um cilindro de bronze com 5 mm de diâmetro por 25 mm de altura e ponta biselada. O processo de moldagem é feito através da talhagem do anel cilíndrico no corpo de prova compactado através do Proctor Normal.

Após a moldagem, é feita a determinação da umidade através da coleta de material em cápsulas, pesadas e levadas para a estufa por 24 horas.

O anel da célula edométrica é pesado com o material e envolto em papel filme e depois enrolada em papel alumínio e lacrado com fita crepe, e colocado numa caixa de isopor até ao momento de ser colocado na célula de adensamento para iniciar o ensaio. Aplica-se a sucção ( $p_g - p_l$ ) desejada no aparelho durante sete dias, para então, depois, iniciar a aplicação do carregamento vertical ( $\sigma_v - u_a$ ), iniciando assim as leituras no deflectômetro vertical.

A estabilização de cada estágio de carregamento é medida pela variação das deformações verticais, quando estes valores não apresentam mudanças significativas, indicando que o estágio estava estabilizado.

Nos ensaios com sucção controlada foi utilizado um edômetro, cujo esquema da célula está representado na figura 5.18 e da prensa tipo Bishop adaptada para permitir a compensação da excentricidade provocada pelo peso do manômetro e da válvula de passagem de ar. Detalhes técnicos deste equipamento podem ser encontrados em Ferreira, 2005 (SOUZA NETO, 2004).

A célula do edômetro com sucção controlada (ESCÁRIO, 1967 e 1969, citados por FERREIRA, 1995) foi projetada baseada no princípio de translação de eixos. A sucção é imposta a amostra de solo pela diferença entre a pressão de ar (nitrogênio), aplicada através da válvula de ar, e a coluna de água mantida no reservatório fixado no topo da prensa.

O ar no interior da célula é mantido por uma camada de graxa, a base de dissulfeto dimolibideno, no topo da célula envolvendo o pistão e substitui a pedra porosa de alta resistência à passagem do ar.



Figura 5.10 – Prensa para ensaio edométrico com sucção constante.

Essa membrana possui duas vantagens em relação à pedra porosa: a primeira permite a realização de ensaio sob elevados valores de sucção e segunda pode alcançar a saturação em 5 minutos (JUCÁ, 1993). A desvantagem é a possibilidade de ruptura da mesma, especialmente quando são realizados ensaios com solos arenosos, resultando na perda do mesmo (SOUZA NETO, 2004).

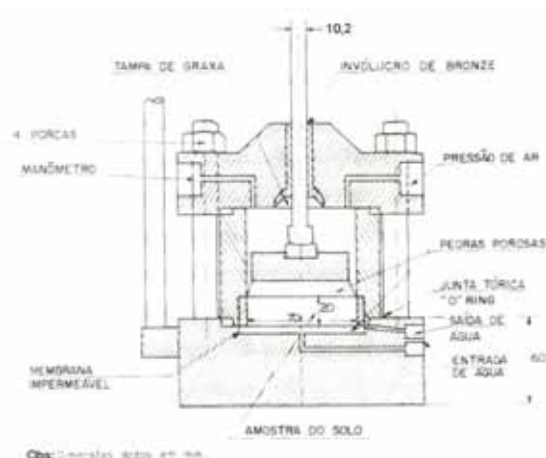


Figura 5.11 – Célula edométrica com sucção controlada (ESCÁRIO, 1967 e 1969; citados por FERREIRA, 1995, SOUZA NETO, 2004).

Neste trabalho os ensaios edométricos com sucção constante tiveram o objetivo principal de se obter os parâmetros de compressibilidade  $\lambda(s)$ ;  $\kappa(s)$ ;  $k_{i0}$  e a tensão de pré-adensamento  $p_0^*$  em função da sucção, do solo utilizado na reconstrução do maciço da barragem do Açude Público Armando Ribeiro Gonçalves, a serem utilizados no modelo elastoplástico BBM (Modelo Básico de Barcelona).

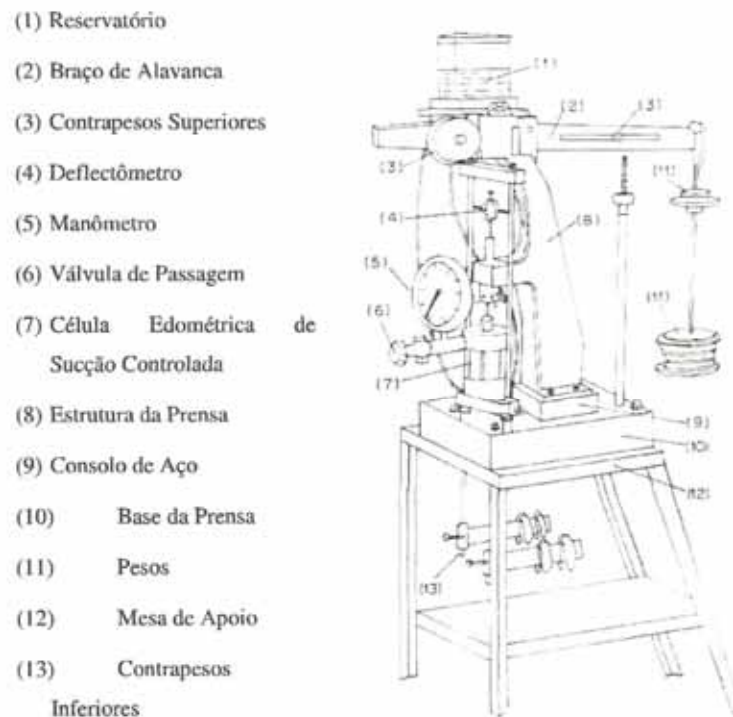


Figura 5.12 – Adaptações na prensa do tipo BISHOP para realização de ensaios com a célula de sucção controlada (FERREIRA, 1995, SOUZA NETO, 2004).

Logo, apresentam-se a seguir os resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada realizados neste trabalho.

Foram realizados ensaios com Sucção controlada de: 0 KPa; 50 KPa; 250 KPa; 500 KPa; 750 KPa e 1000 KPa. Para o cálculo da pressão de pré-

adensamento foi utilizado o método gráfico de Pacheco Silva, que consta basicamente em traçar uma reta tangente no trecho virgem da curva de adensamento e através do valor do índice de vazios inicial, traçar uma reta horizontal até encontrar a reta tangente a reta virgem.

Nesse ponto, desce uma reta vertical até atingir a curva de adensamento, a partir deste ponto da curva, se traça uma reta horizontal até atingir a reta virgem, onde, a partir do encontro da reta horizontal com a reta tangente a reta virgem, desce uma reta vertical até atingir o eixo das pressões de pré-adensamento e obtém-se o valor da pressão de pré-adensamento do solo ( $p_0^*$ ).

No ensaio de adensamento obtemos também os parâmetros  $K_{(i0)}$  (na inclinação do trecho elástico da curva do ensaio),  $\lambda(s)$  (obtido na inclinação da reta virgem da curva – trecho plástico).

$\lambda(0)$  é obtido na inclinação da reta virgem da curva, trecho plástico, quando a sucção for igual a zero, através da resolução de um sistema de equações não lineares, definido pela equação 5.3, em função de  $\lambda(s)$ ,  $\lambda(0)$  e o valor da sucção  $S$  correspondente para cada ensaio.

$$\lambda(s) = \lambda(0) * [(1 - r) * \exp(-\beta * S) + r] \quad (5.3)$$

Através da resolução de um sistema de equações não lineares, para cada valor de sucção, onde se tem os valores de  $\lambda(s)$  e  $\lambda(0)$  correspondentes, obtidos através dos ensaios edométricos com sucção controlada realizados, obtém-se os parâmetros  $\beta$  e  $r$ .

As figuras 5.13 a 5.18 apresentam as curvas dos ensaios edométricos para cada valor de sucção.

Ensaio com Sucção de zero KPa e índice de vazios inicial de 0,36.

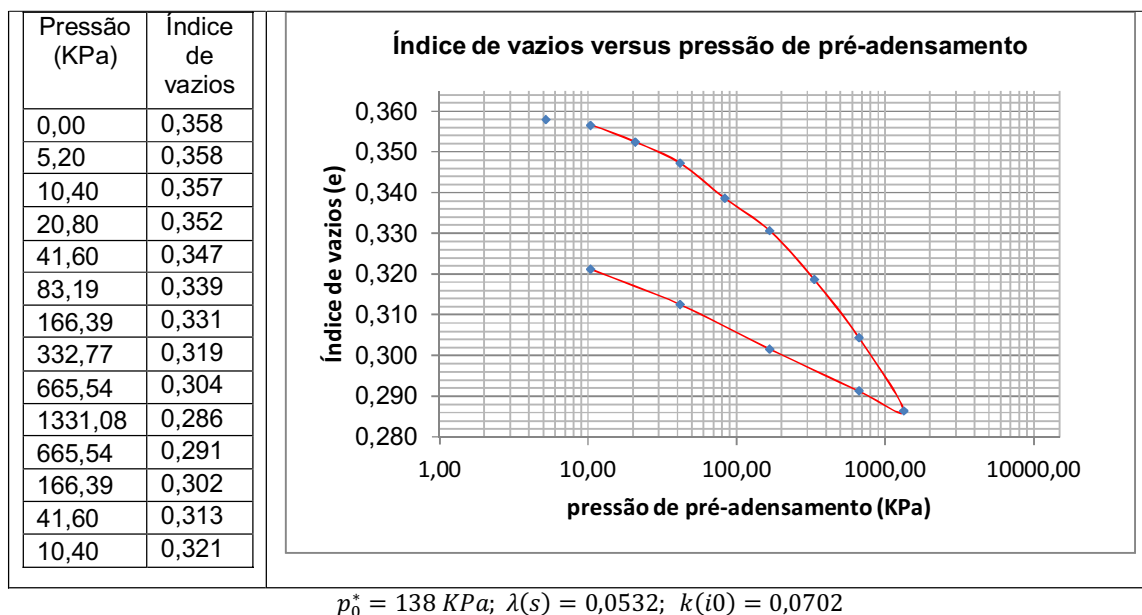


Figura 5.13 – Obtenção da curva do ensaio edométrico para sucção de 0 KPa.

Ensaio com Sucção de 50 KPa e índice de vazios inicial de 0,46.

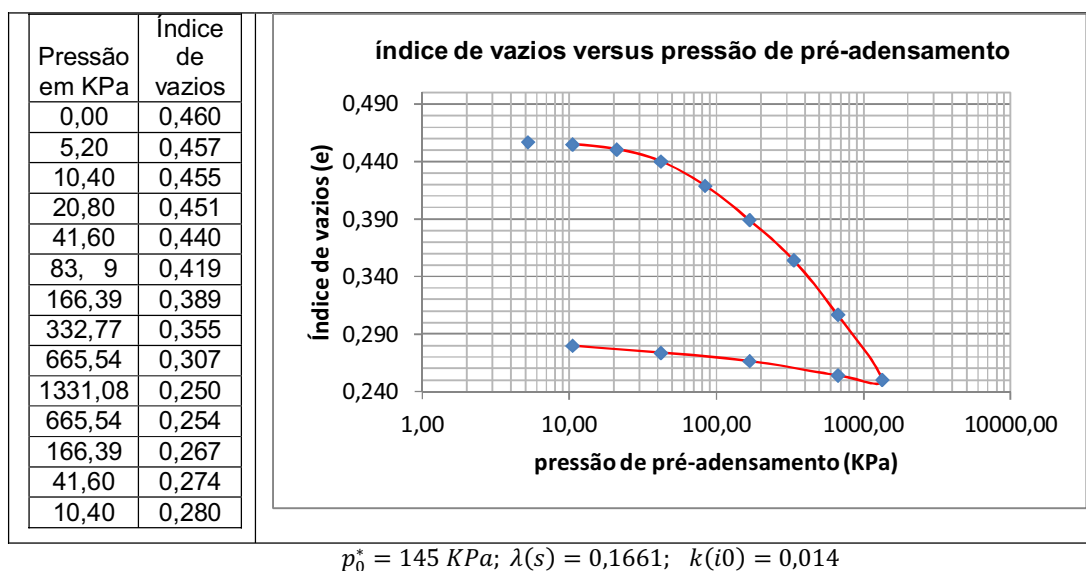


Figura 5.14 – Obtenção da curva do ensaio edométrico para sucção de 50 KPa.

Ensaio edométrico com sucção de 250 KPa e índice de vazios inicial de 0,42.

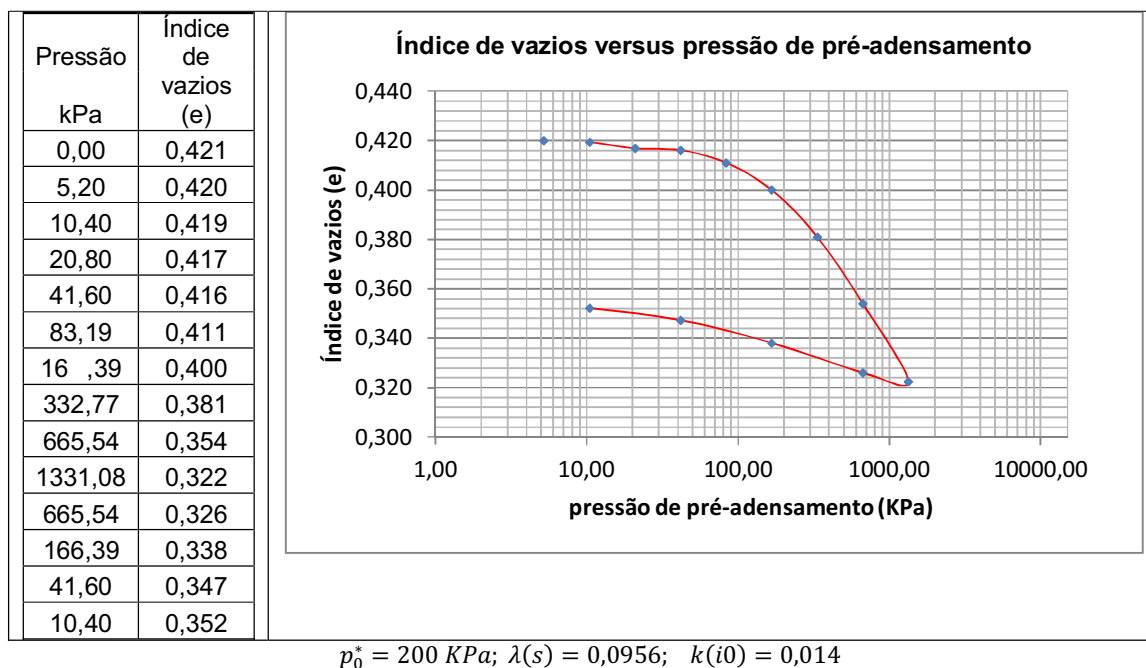


Figura 5.15 – Obtenção da curva do ensaio edométrico para sucção de 250 KPa.

Ensaio edométrico com sucção de 500 KPa e índice de vazios de 0,45.

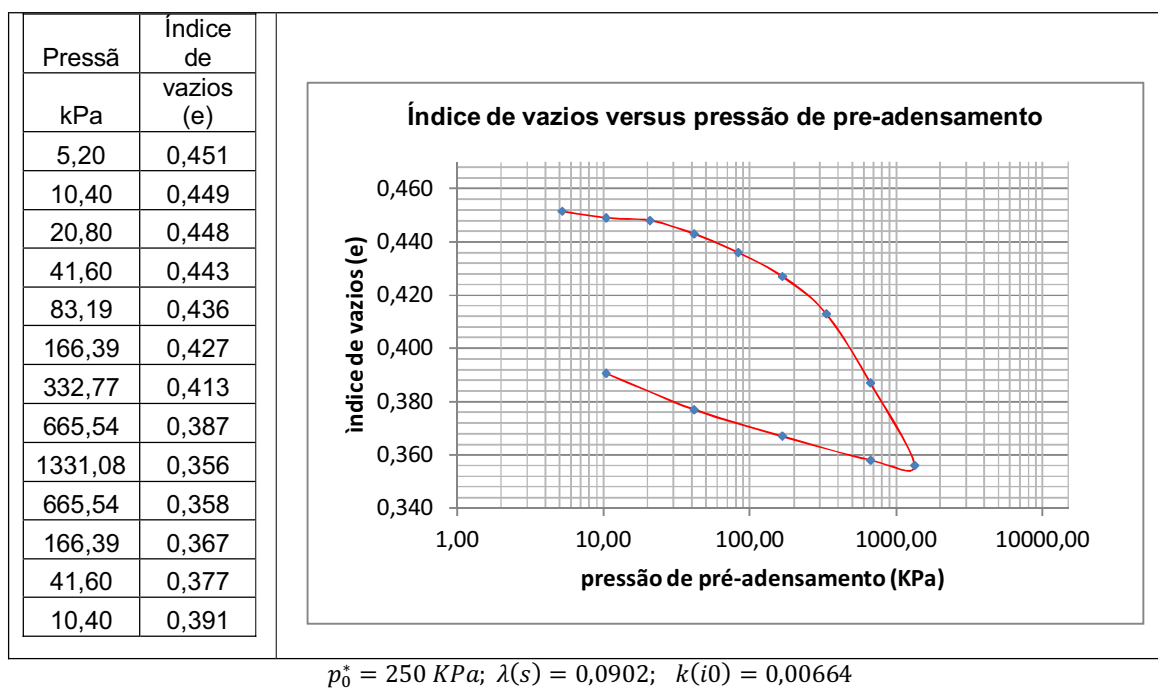


Figura 5.16 – Obtenção da curva do ensaio edométrico para sucção de 500 KPa.

Ensaio edométrico com sucção de 750 KPa e índice de vazios inicial de 0,43.

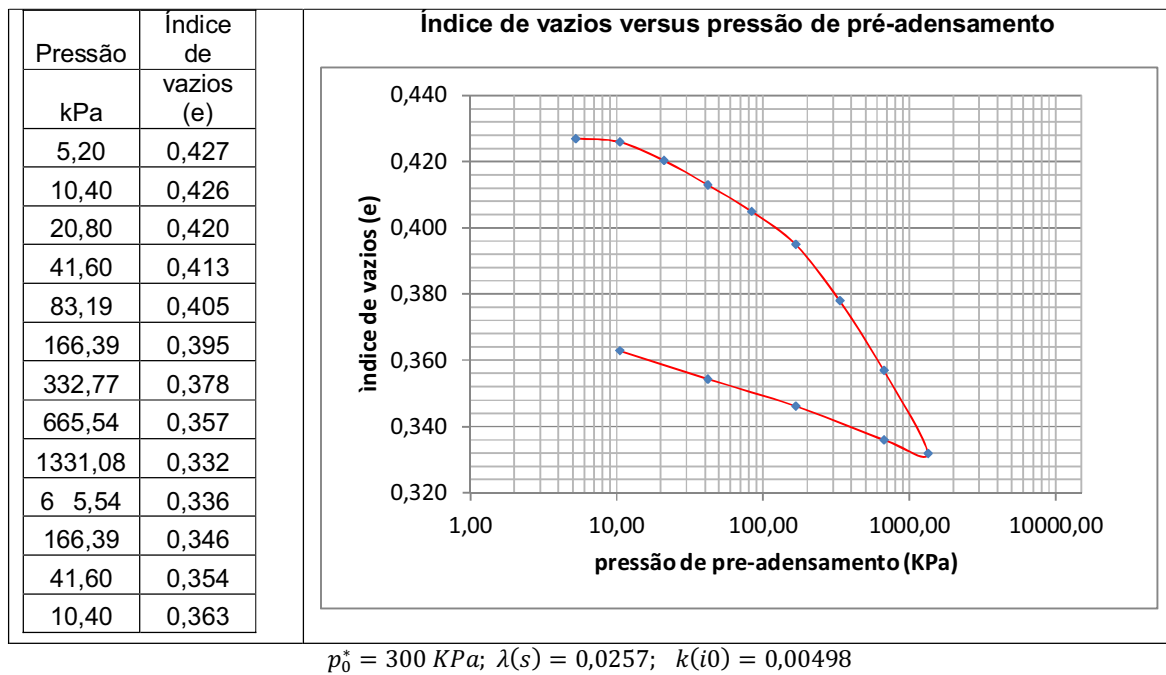


Figura 5.17 – Obtenção da curva do ensaio edométrico para sucção de 750 KPa.

Ensaio edométrico com sucção de 1000 KPa e índice de vazios inicial de 0,50.

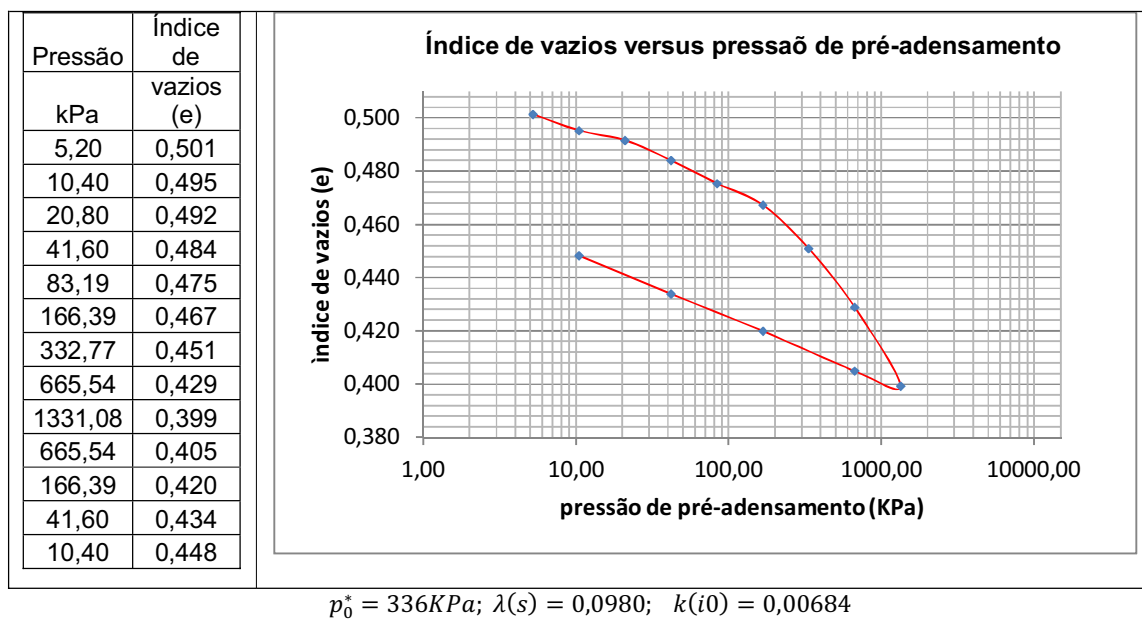


Figura 5.18 – Obtenção da curva do ensaio edométrico para sucção de 1000 KPa.

Onde  $\lambda(s)$ ,  $k_{i0}$ ,  $p_0^*$  são parâmetros obtidos nos ensaios de consolidação do solo compactado.

Na tabela 5.2 consta a relação entre as pressões de pré-adensamento e sucção nos ensaios realizados

Quadro 5.1 – Relação entre as sucções e pressões de pré-adensamento obtidas nos ensaios.

| $\lambda(s)$ | $K_{(i0)}$ | Pressão de pré-adensamento ( $p_0^*$ ) em MPa | Sucção (MPa) |
|--------------|------------|-----------------------------------------------|--------------|
| 0,0532       | 0,0702     | 0,138                                         | 0            |
| 0,1661       | 0,0140     | 0,145                                         | 0,050        |
| 0,0956       | 0,0140     | 0,200                                         | 0,250        |
| 0,0902       | 0,00664    | 0,250                                         | 0,500        |
| 0,0257       | 0,00498    | 0,300                                         | 0,750        |
| 0,0980       | 0,00684    | 0,336                                         | 1,000        |

### 5.3.2 – Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada

Nos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada, adotou-se como critério de ruptura os valores de pico da tensão cisalhante ou os valores máximos, quando a curva tensão-deformação não indicava valores de pico bem definidos.

Nos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada recomenda-se, antes de se iniciar os ensaios, realizar algumas operações preliminares para a garantia do bom funcionamento do equipamento. Entre as operações estão à calibração dos instrumentos elétricos, a saturação do disco cerâmico de alto valor de pressão de entrada de ar (que visa garantir uma coluna de água contínua entre o corpo de prova e a câmara de água).

Ao se cobrir com água deaerada, o disco cerâmico, provoca-se um fluxo de água no interior do mesmo, através da aplicação de um pequeno diferencial de

pressão entre a câmara de compressão e a câmara de água. Considera-se que o disco cerâmico está saturado quando a vazão de água, medida através do medidor de variação volumétrica, fica constante ao longo do tempo.

Operações adicionais são a saturação das linhas de contra-pressão, a detecção de vazamentos, a saturação da membrana semi-permeável (durante sete dias) e a instalação do corpo de prova na caixa de cisalhamento. Também se faz necessária a calibração do braço de alavanca utilizado para aplicação da carga vertical (PEIXOTO, 1999).

Após as etapas preliminares do ensaio, iniciou-se a moldagem e instalação do corpo de prova na caixa de cisalhamento. Estas etapas foram efetuadas de maneira similar a do ensaio de cisalhamento direto convencional.

Foi utilizado um molde biselado, de seção quadrada de 100 mm de lado e 22 mm de altura, para moldagem do corpo de prova a partir das amostras compactadas no laboratório, através do ensaio de Proctor Normal, com o mesmo teor de umidade com que foi compactado no corpo da barragem.

Os corpos de prova foram envolvidos em papel filme de PVC e depois embalados em papel alumínio e envoltos em fita crepe, para em seguida serem colocados em um depósito de isopor, até o momento de se efetuar o ensaio.

As tensões são aplicadas através de um sistema de pesos em pendural, idêntico ao da prensa convencional de cisalhamento direto. Nas leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram utilizados extensômetros da marca Mitutoyo com sensibilidade de 0,01 mm e a força horizontal foi determinada através de um anel de carga.

Foram utilizados corpos de prova quadrados com dimensões de 50 mm de lado e 22 mm de altura, onde o corpo de prova moldado é transferido para a caixa de cisalhamento, sobre o qual é posto uma pedra perfurada, uma pedra porosa e uma placa de transferência de carga (SOUZA NETO, 2004).

Foi realizado um total de nove ensaios de cisalhamento direto com sucção constante de 250 KPa; 500 KPa e 1000 KPa, variando a tensão vertical aplicada para cada sucção mencionada, dos seguintes valores: 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>; 3,5 Kgf/cm<sup>2</sup> e 7,5 Kgf/cm<sup>2</sup>, que correspondem as tensões a que está submetido o corpo da barragem próximo ao coroamento, meio do corpo da barragem e no nível do terreno natural, respectivamente, agrupados em três séries distintas.

Na primeira série manteve-se constante a sucção de 250 KPa e fez-se variar a tensão vertical dos seguintes valores: 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>; 3,5 Kgf/cm<sup>2</sup> e 7,5 Kgf/cm<sup>2</sup>. Antes de começar o ensaio, a amostra era mantida sob a pressão de sucção durante sete dias até estabilização dos deslocamentos.

Na segunda série, manteve-se constante a sucção em 500 KPa e fez-se variar a tensão vertical dos seguintes valores: 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>; 3,5 Kgf/cm<sup>2</sup> e 7,5 Kgf/cm<sup>2</sup>. Mantendo o corpo de prova na prensa de cisalhamento sob uma sucção constante de 500 Kpa até a estabilização dos deslocamentos.

Na terceira série, manteve-se constante a sucção de 1000 KPa e fez-se variar a tensão vertical dos seguintes valores: 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>; 3,5 Kgf/cm<sup>2</sup> e 7,5 Kgf/cm<sup>2</sup>. A velocidade de cisalhamento nos ensaios foi de 0,0122 mm/min.

A prensa foi desligada quando se atingiu um deslocamento próximo de 6 mm que corresponde a 12% da dimensão da caixa. A seguir, na figura 5.19 vemos um ensaio de cisalhamento direto com sucção em andamento.

Nas figuras 5.19 se observam fotos da prensa para ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada, com a carga aplicada num ensaio em andamento.

Nas figuras 5.20 a 5.50 podem-se observar os resultados dos ensaios realizados para as cargas normais aplicadas para cada sucção considerada.



Figura 5.19 - Vista da prensa de cisalhamento direto com sucção.

Na Figura 5.20 observa-se a ocorrência de uma tensão cisalhante de ruptura, bem definida, onde se consta que a tensão normal aplicada no ensaio é menor que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova ( $\delta_N = 0,05MPa < \delta_{cp} = 0,28MPa$ ), estando o corpo de prova na condição Pré-Adensada (PA).

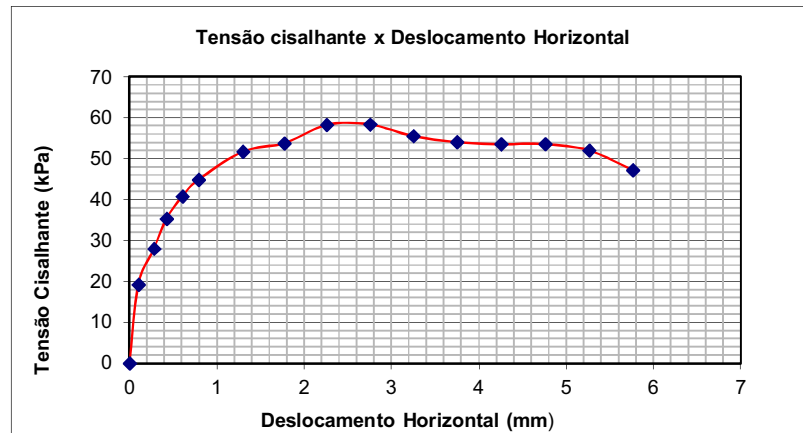


Figura 5.20 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na Figura 5.21 pode-se observar a relação entre os deslocamentos verticais e horizontais no ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada de 250 KPa, para uma tensão aplicada de 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>, onde as deformações indicam um aumento de volume, durante a ruptura.

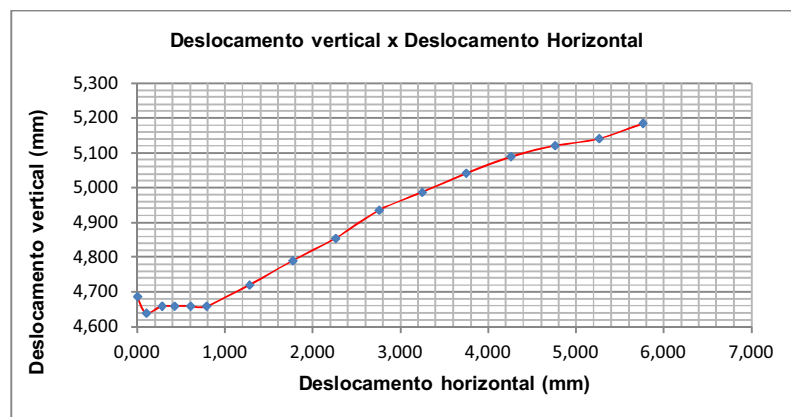


Figura 5.21 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.22 a tensão normal aplicada é maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova ( $\delta_N = 0,35 \text{ MPa} > \delta_{cp} = 0,28 \text{ MPa}$ ), para uma sucção de 0,25 MPa, logo a amostra está normalmente adensada (2º ponto). Observa-se que o solo plastifica, não apresentando tensão de ruptura definida.

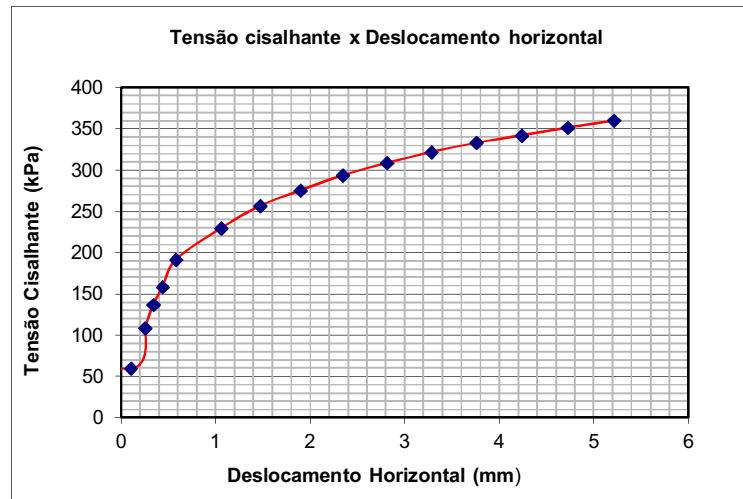


Figura 5.22 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.23 observa-se a relação entre os deslocamentos verticais e horizontais no ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada de 0,25 MPa, para uma tensão aplicada de 0,05 MPa, onde ocorre uma redução de volume.

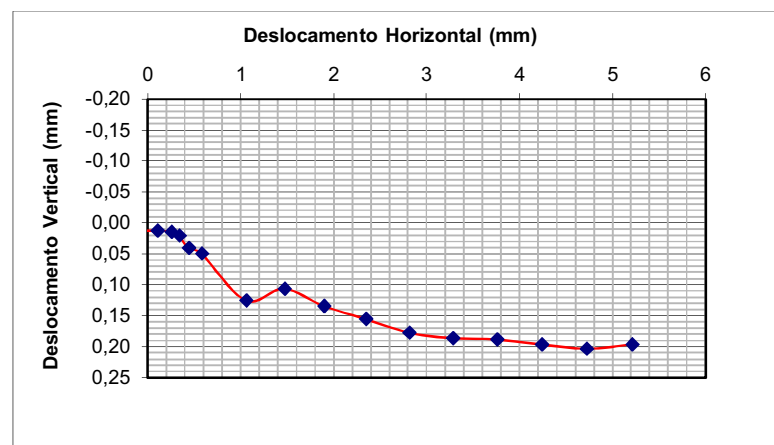


Figura 5.23 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

Na Figura 5.24 observa-se que não ocorre uma tensão de pico cisalhante bem definida e sim o crescimento da tensão cisalhante com os deslocamentos, indicando uma possível plastificação do corpo de prova. A tensão normal aplicada no ensaio é maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova ( $\delta_N = 0,75 \text{ MPa} > \delta_{cp} = 0,28 \text{ MPa}$ ), (amostra Normalmente Adensada).

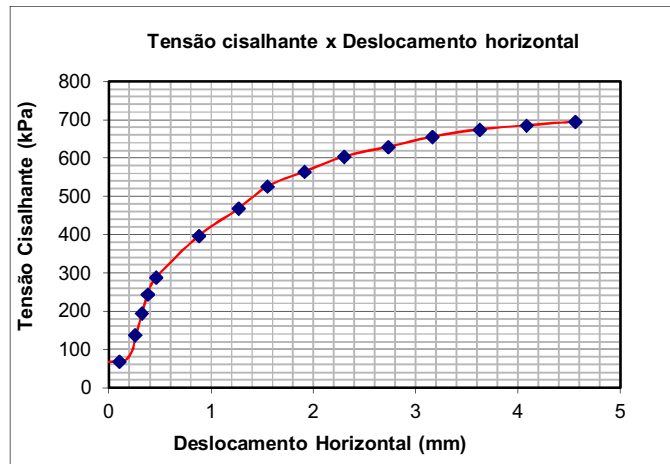


Figura 5.24 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para uma sucção de 0,25 MPa e uma tensão normal de 0,75 MPa (3º ponto).

Na Figura 5.25 se observa uma compressão da amostra, ou seja, ocorre uma redução de volume, ao longo do ensaio, quando o corpo de prova está plastificando.

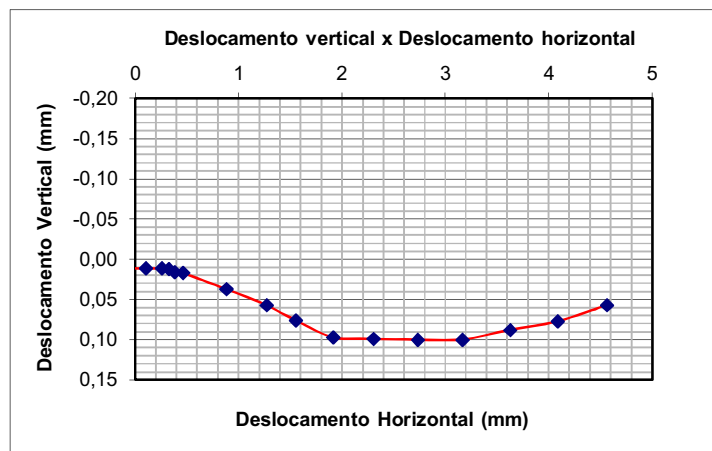


Figura 5.25 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

No Quadro 5.2 constam os resultados dos ensaios realizados para Tensões de Cisalhamento e Normal de ruptura para uma sucção de 0,25 MPa e aplicação de várias cargas de 0,05 MPa, 0,35 MPa e 0,75 MPa e na Figura 5.26 obteve-se a envoltória de ruptura do solo para uma sucção de 250 KPa. No primeiro ponto a amostra se encontra pré-adensada (tensão normal inferior a tensão de pré-adensamento do corpo de prova) e no segundo e terceiro casos, a amostra se encontra normalmente adensada (tensões normais aplicadas, maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova).

Quadro 5.2 – Relação entre tensão cisalhante e tensão normal de ruptura.

| $\tau$ (Kpa) Tensão cisalhante de ruptura | $\sigma$ (Kpa) Tensão normal de ruptura |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 58,37                                     | 52,90                                   |
| 360,08                                    | 390,60                                  |
| 695,06                                    | 825,30                                  |

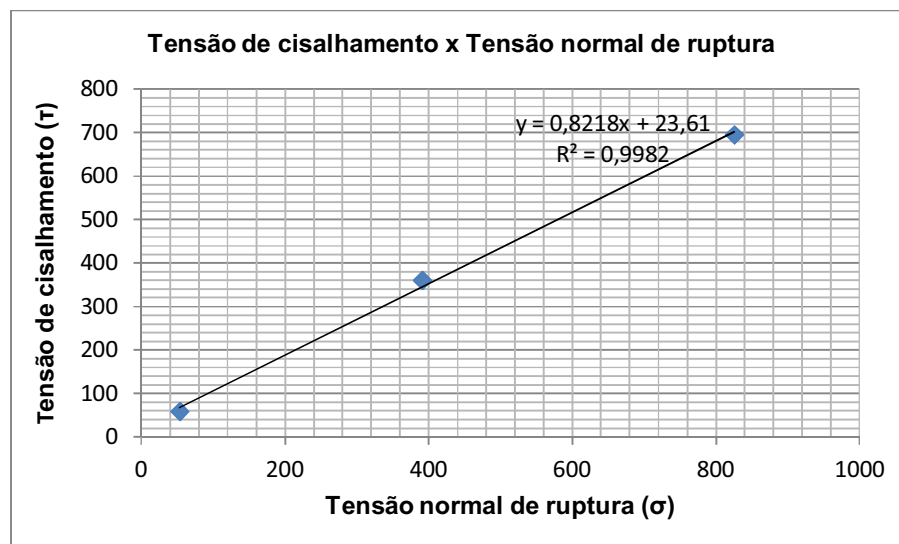


Figura 5.26 – Superfície de ruptura para o ensaio de cisalhamento direto com uma sucção de 250 KPa.

$$\tan \varphi = 0,8218; c = 23,61$$

Na Figura 5.27 observa-se a relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal de ruptura para uma sucção de 0,50 MPa e tensão normal aplicada de 0,05 MPa (1º ponto), concluindo-se que a amostra se encontra pré- adensada (PA), pois a tensão normal aplicada é menor que a tensão de pré-adensamento.

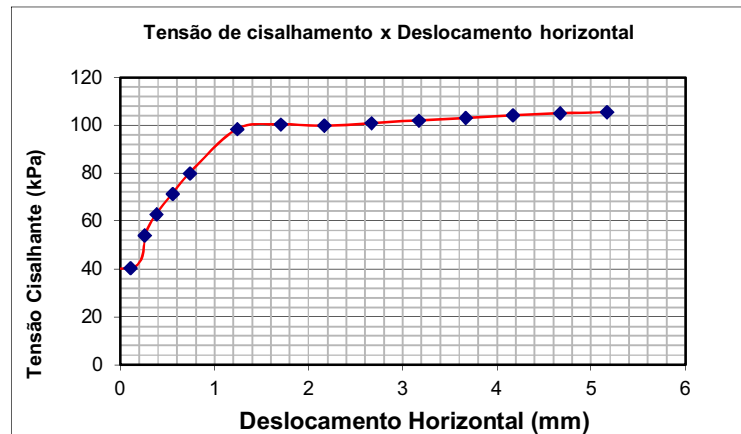


Figura 5.27 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.28 pode-se observar uma ligeira expansão do corpo de prova, no início do ensaio, para logo em seguida, ocorrer uma compressão até próximo a tensão de ruptura de cisalhamento, para em seguida, apresentar expansão até o final do ensaio.

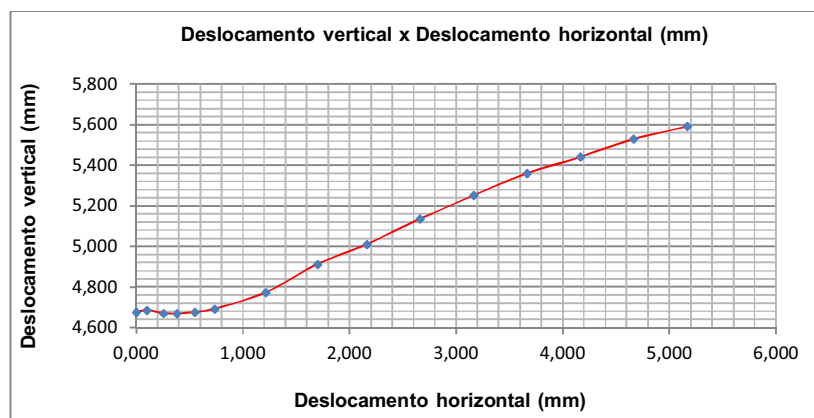


Figura 5.28 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.29 observa-se o gráfico resultante da relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal de ruptura para uma sucção de 0,50 MPa (2º ponto), onde se pode observar que ocorre um crescimento da tensão cisalhante com os deslocamentos horizontais, indicando uma possível plastificação do corpo de prova, onde se observa que a tensão normal aplicada é maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova ( $\delta_N = 0,35 \text{ MPa} > \delta_{cp} = 0,28 \text{ MPa}$ ) e a amostra se encontra Normalmente Adensada(NA).

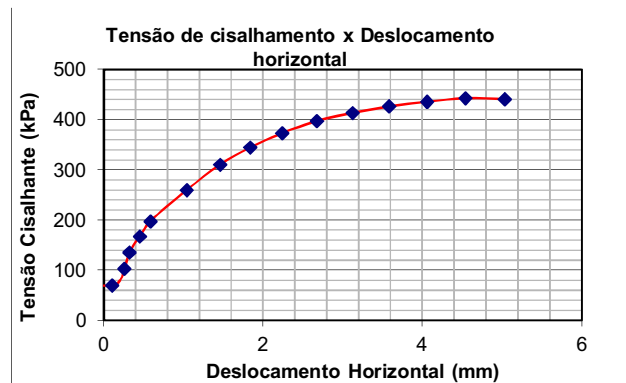


Figura 5.29 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na Figura 5.30 pode-se observar uma leve expansão para os deslocamentos iniciais, seguidos de compressão até uma tensão cisalhante em torno de 0,26 MPa e a partir deste ponto uma nova expansão do solo.

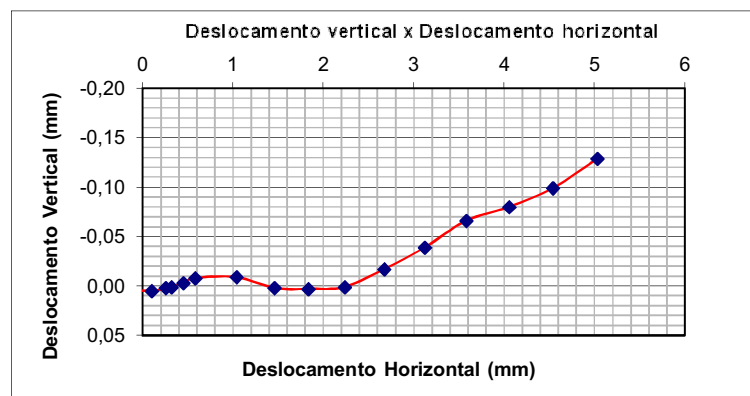


Figura 5.30 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.31 observa-se o gráfico resultante do ensaio com sucção de 0,50 MPa e tensão normal aplicada de 0,75 MPa (3º ponto), onde se observa que não ocorre uma tensão de ruptura definida (tensão máxima) e sim um crescente aumento da tensão cisalhante com os deslocamentos horizontais, indicando uma possível plastificação do corpo de prova. Como a tensão normal aplicada é maior que a tensão de pré-adensamento, o corpo de prova está Normalmente Adensado.

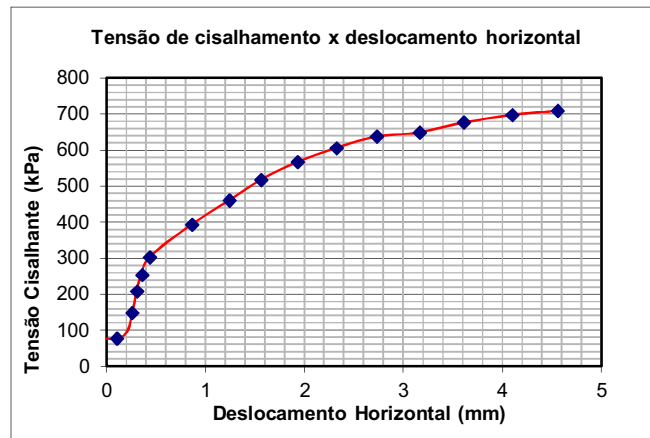


Figura 5.31 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal

Na Figura 5.32 observa-se uma redução de volume do corpo de prova, quando da plastificação do mesmo, assim como, uma expansão do solo para uma tensão cisalhante acima de 0,600 MPa.

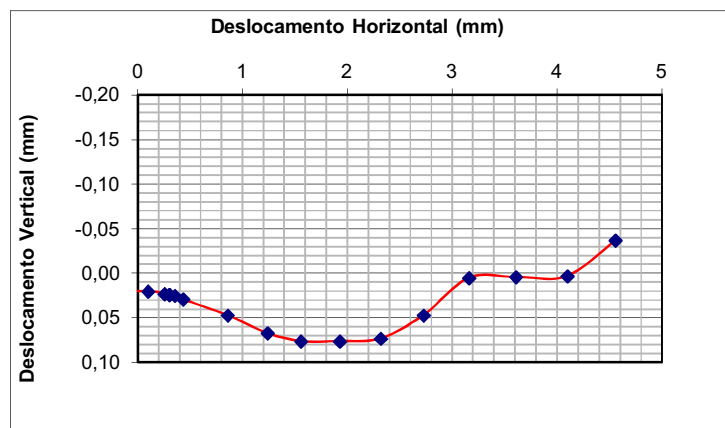


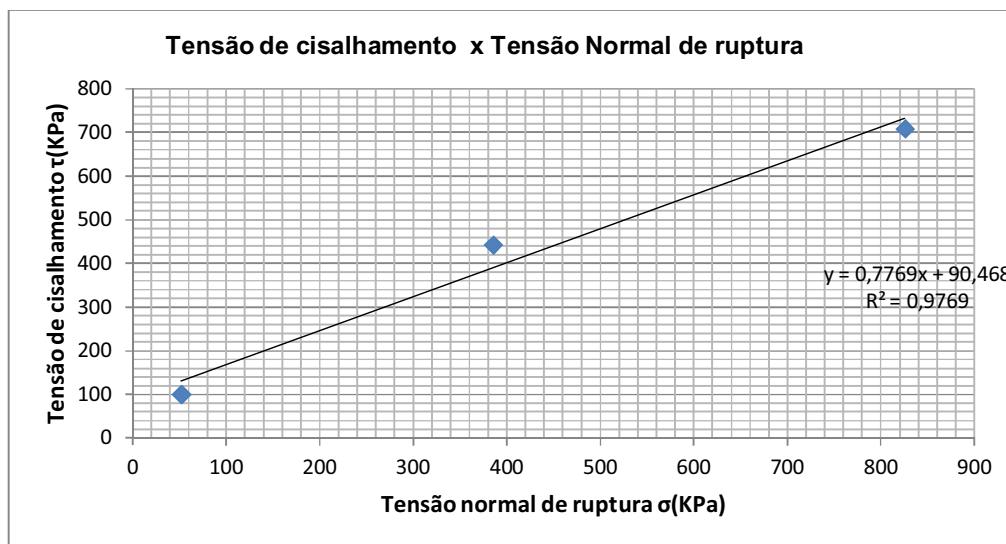
Figura 5.31 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

No Quadro 5.3 consta um resumo dos resultados dos ensaios realizados para uma sucção de 0,50 MPa e aplicação de carregamentos normais de 0,05 MPa, 0,35 MPa e 0,75 MPa.

Observa-se que, como a máxima tensão de pré-adensamento do corpo de prova obtida nos ensaios edométricos com sucção controlada foi de 0,28 MPa, no primeiro carregamento a amostra está na condição Pré-Adensada (PA), pois a tensão normal aplicada é menor que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova. No segundo e terceiro carregamento (0,35 MPa e 0,75 MPa), as tensões normais aplicadas são maiores que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova, logo, as amostras estão na condição de Normalmente Adensadas.

Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios para sucção de 500 KPa.

| $\tau$ (KPa) Tensão cisalhante de ruptura | $\sigma$ (KPa) Tensão normal de ruptura |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 100,37                                    | 51,80                                   |
| 442,90                                    | 385,00                                  |
| 708,72                                    | 825,30                                  |



$$\tan \varphi = 0,7769; c = 90,468$$

Figura 5.32 – Superfície de ruptura para o ensaio de cisalhamento direto com uma sucção de 500 KPa.

Na figura 5.33 observa-se o gráfico resultante da relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal de ruptura com sucção de 1000 KPa e tensão normal de 0,05 MPa (1º ponto), menor que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova ( $\delta_N < \delta_{cp}$ ) e o corpo se encontra na condição de pré-adensada (PA), com a tensão de ruptura bem definida.

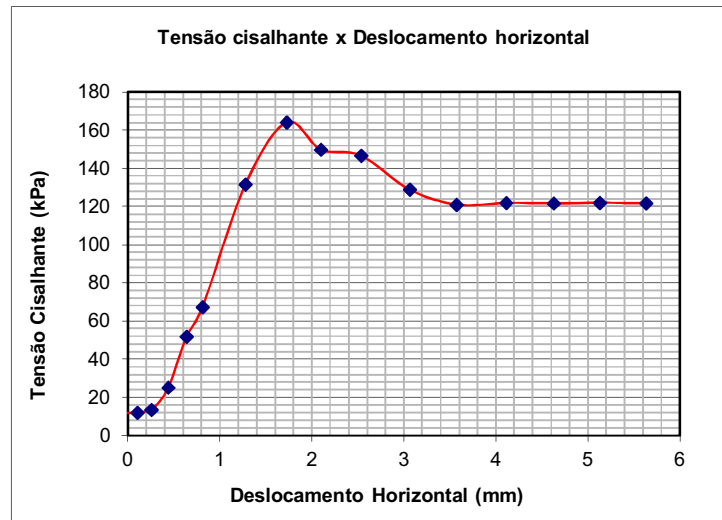


Figura 5.33 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na Figura 5.34 se observa que a partir da tensão de cisalhamento de ruptura o corpo de prova sofre uma expansão (um aumento de volume), encontrando-se o mesmo na condição de pré-adensada (PA).

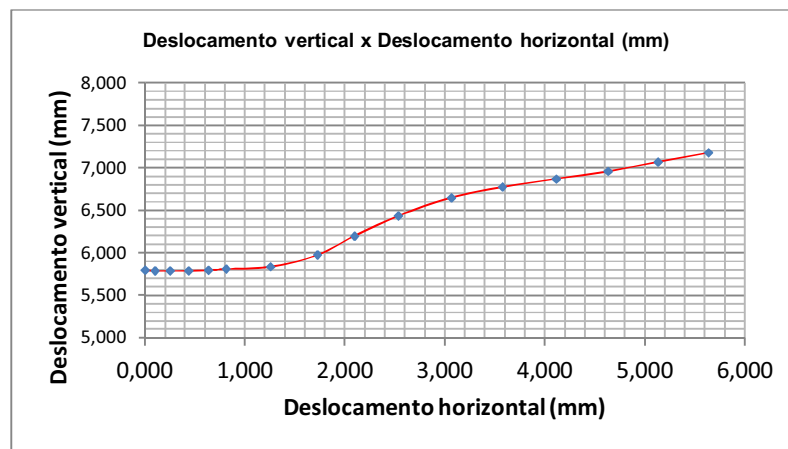


Figura 5.34 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.40 observa-se o gráfico resultante da relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal de ruptura para uma sucção de 1000 KPa e tensão de 0,35 MPa (2º ponto) em que pode-se ver que a tensão cisalhante não apresenta um pico de tensão máxima, estando na condição Normalmente Adensada (NA), onde a tensão normal aplicada no ensaio é maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova.

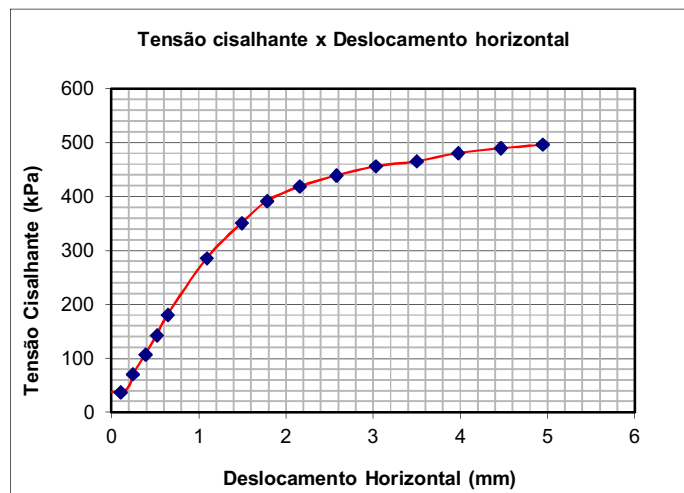


Figura 5.44 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na Figura 5.41 pode-se observar que a partir de uma tensão cisalhante de 0,46 MPa o corpo de prova apresenta uma expansão.

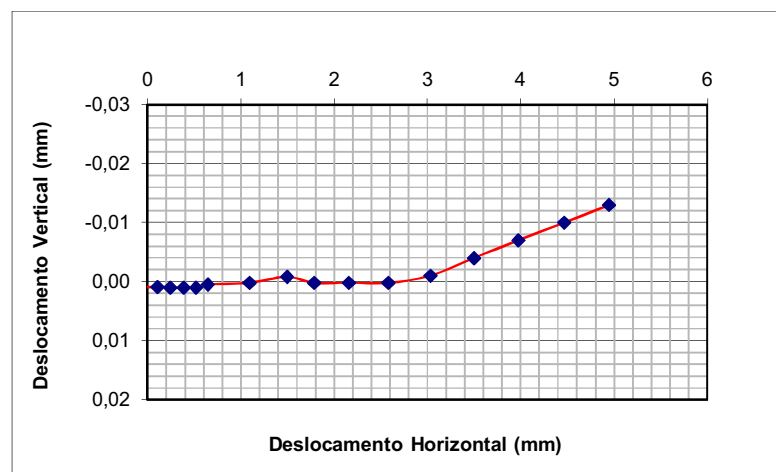


Figura 5.45 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

Na figura 5.42 observa-se o gráfico do ensaio de cisalhamento direto com sucção de 1,0 MPa e tensão de 0,75 MPa (3º ponto), onde a tensão normal aplicada é maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova ( $\delta_N = 0,75 \text{ MPa} > \delta_{cp} = 0,28 \text{ MPa}$ ), estando o corpo de prova na condição Normalmente Adensada (NA), onde o corpo de prova plastifica ao longo do ensaio.

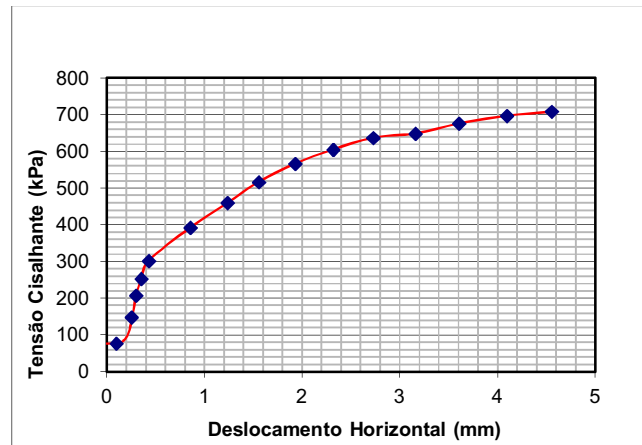


Figura 5.46 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

Na Figura 5.43 pode-se observar que o corpo de prova sofre uma redução de volume (compressão) e que quando esta plastificando, acima de uma tensão de 0,60 MPa, o corpo de prova apresenta uma expansão.

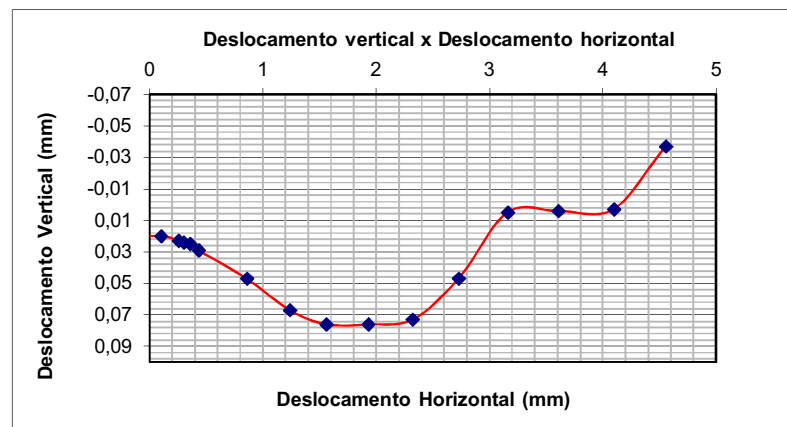
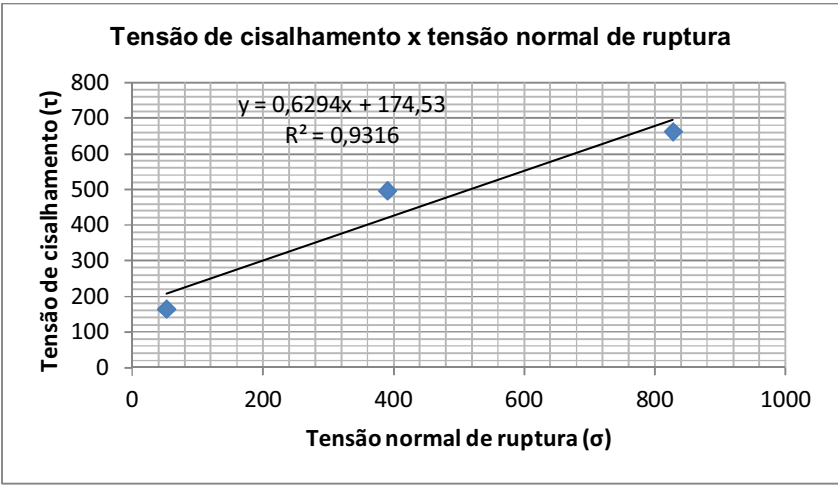


Figura 5.47 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

No Quadro 5.3 consta os resultados dos ensaios realizados para Tensões de Cisalhamento e Normal de ruptura para uma sucção de 1,0 MPa e aplicação de várias cargas de 0,05 MPa, 0,35 MPa e 0,75 MPa. e na Figura 5.30 obteve-se a envoltória de ruptura do solo par uma sucção de 1,0 MPa.

Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios para sucção de 1000 KPa.

| $\tau$ (Kpa) Tensão cisalhante de ruptura | $\sigma$ (Kpa) Tensão normal de ruptura |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 164,06                                    | 51,80                                   |
| 496,40                                    | 390,00                                  |
| 662,03                                    | 827,40                                  |



$$\tan \varphi = 0,6294; c = 174,53$$

Figura 5.48 – Superfície de ruptura para para o ensaio de cisalhamento direto com uma sucção de 1000 KPa.

Quadro resumo dos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada:

| Sucção (KPa) | $\tan \varphi$ | $c$    | $\varphi$ | $M$    | $M_{\text{médio}}$ |
|--------------|----------------|--------|-----------|--------|--------------------|
| 250          | 0,8218         | 23,61  | 39,41     | 0,929  |                    |
| 500          | 0,7769         | 90,468 | 37,84     | 0,8904 | 0,856              |
| 1000         | 0,6294         | 174,53 | 32,18     | 0,7477 |                    |

onde,  $M = \frac{2\sqrt{3}\sin \varphi}{3-\sin \varphi}$  é um parâmetro a ser utilizado no BBM

## Capítulo 6: Resultados da Modelagem Numérica

### 6.1 - Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados da modelagem numérica realizada, considerando o acoplamento hidro-mecânico, que consistiu na simulação da construção do maciço da barragem, na parte central em que ocorreu o acidente (ruptura do talude de montante no final de construção).

Para isto, dividiu-se o maciço em oito camadas de forma a modelar as etapas de construção de cada camada, bem como a etapa de enchimento do reservatório pelo período de um ano. A partir deste período, se procedeu à modelagem do comportamento da barragem considerada cheia ao longo de treze anos de vida útil, quando cessaram as leituras no maciço e fundação da barragem, por parte do órgão proprietário da obra, o D.N.O.C.S.(Departamento Nacional de Obras Contra as Secas).

Neste trabalho a ferramenta utilizada na análise hidro-mecânica será o código computacional **CODE\_BRIGHT** (COupled DEformation and BRine, Gas and Heat Transport, Olivella et al, 1994) no processo, e o programa comercial **GID** no pré e pós-processo, que foi desenvolvido pelo CIMNE (Centro Internacional para Métodos Numéricos em Engenharia), e consiste em um método de iterações gráficas, utilizando interfaces, que é usado para a definição, preparação e visualização de todos os dados relatados na simulação numérica.

O CODE\_BRIGHT emprega o método de elementos finitos (MEF) e é capaz de resolver problemas acoplados em meios geológicos. Este programa foi desenvolvido por Olivella et al. (1994) e a primeira versão foi apresentada com o propósito de solucionar problemas relacionados a materiais salinos num contexto de

disposição de barreiras de proteção ambiental, transporte de solutos, aterros, escavações, barragens de terra, pavimentação, solos colapsíveis e solos expansivos. Está escrito em FORTRAN e é composto por várias sub-rotinas, contendo uma vasta biblioteca de modelos constitutivos (RODRIGUES, 2007).

O programa tem como principais características:

- Permitir a resolução de problemas acoplados ou não, do tipo: mecânico (M), hidráulico (H), térmico (T), hidro-mecânico (HM), termo-hidráulico (TH), termo-hidro-mecânico (THM), termo-hidro-mecânico e geoquímico (THMG);
- Realiza análises unidimensional (uniaxial e axi-simétrico), bidimensional (deformação plana e axi-simétrico) e tridimensional;
- Usa as leis constitutivas, definidas por uma série de parâmetros que são definidos por dados de entrada.
- Define condições de contorno para:
  - ➔ Problemas mecânicos: restrições de deslocamentos, aplicações de taxa de deslocamentos e de forças e tensões instantaneamente ou gradualmente em qualquer direção;
  - ➔ Problemas hidráulicos: fluxo de massa de água e ar prescritos e pressão do líquido/gás prescritos;
  - ➔ Problemas térmicos: fluxo de calor prescrito e temperatura prescrita.
- Usa critérios de convergência, com tolerância para erros absolutos e relativos, independente de cada incógnita, e tolerância para convergência residual de cada problema;
- Opções de saída: usa distribuição espacial das variáveis em nós e elementos e sua evolução temporal das variáveis em pontos.

No CODE\_BRIGTH os problemas são formulados com uma aproximação multifásica, considerando o meio poroso composto de grãos sólidos, água e gás. Em função disso, as interações mútuas que ocorrem são consideradas simultaneamente entre os diferentes fenômenos.

As propriedades térmicas, hidráulicas e mecânicas são levadas em consideração, interagindo entre si de um modo acoplado. Na composição dos materiais, três fases são consideradas: fase sólida (mineral), fase líquida (água e ar dissolvido), fase gasosa (mistura de ar seco e vapor de água) e três componentes são consideradas: água, ar seco e calor (RODRIGUES, 2007).

Na resolução de problemas numéricos, cada um desses componentes está associado a uma equação diferencial. Estas equações, denominadas equações de balanço, são oriundas essencialmente dos princípios de conservação de massa e do equilíbrio de tensões, que são deduzidas em volume de controle de dimensões infinitesimais.

As soluções dessas equações implicam na determinação das variáveis de estado ou das incógnitas envolvidas no problema a ser calculado numericamente. O centro das análises numéricas é constituído pelas quatro equações de balanço, que correspondem às equações apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Definição das equações de balanço e de suas variáveis (Rodrigues, 2007).

| <b>Equação</b>               | <b>Nome da variável</b> | <b>Variável</b>                 |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Balanço de massa de água     | Pressão de líquido      | $P_l$ (MPa)                     |
| Balanço de massa de ar       | Pressão de gás          | $P_g$ (MPa)                     |
| Balanço de energia interna   | Temperatura             | $T$ (°C)                        |
| Balanço de massa dos sólidos | Porosidade              | $\phi$                          |
| Balanço de momento           | Deslocamentos           | $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ (m) |

## 6.2 – Materiais constituintes da Barragem

Na Figura 6.1 se observa os materiais componentes do maciço e fundação da barragem, na seção transversal máxima EST 53+00.

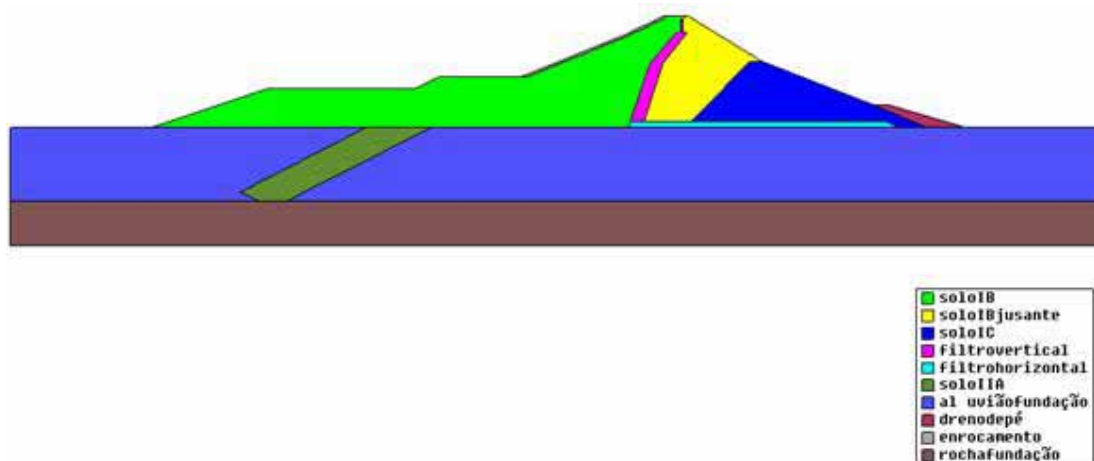


Figura 6.1 – Materiais componentes da barragem na seção transversal EST. 53+00.

Para a simulação da construção do maciço, o mesmo foi dividido em oito camadas e cada camada ficou composta de vários materiais (Figura 6.2), para que fosse possível fazer a construção, colocando material por material em cada camada.

Pode-se observar que os materiais do maciço que aparecem à montante do filtro vertical de areia, são todos, o mesmo solo 1B que aparece na cor verde na Figura 6.1. Considerando a construção do maciço, o número total de materiais considerado foi de 38, estando ai incluindo o material “água”, que é o último material colocado, quando termina a construção do maciço da barragem.

O material água consiste em uma camada saturada de elevada permeabilidade, sem resistência ao cisalhamento, e, foi empregado unicamente para aplicar as pressões de água do reservatório, durante seu enchimento até atingir a cota do volume máximo de acumulação do reservatório, no contorno do talude de montante da barragem e na fundação. Este material foi colocado gradativamente,

reproduzindo o enchimento do reservatório e a transmissão gradual da pressão de água ao maciço e fundação da barragem.

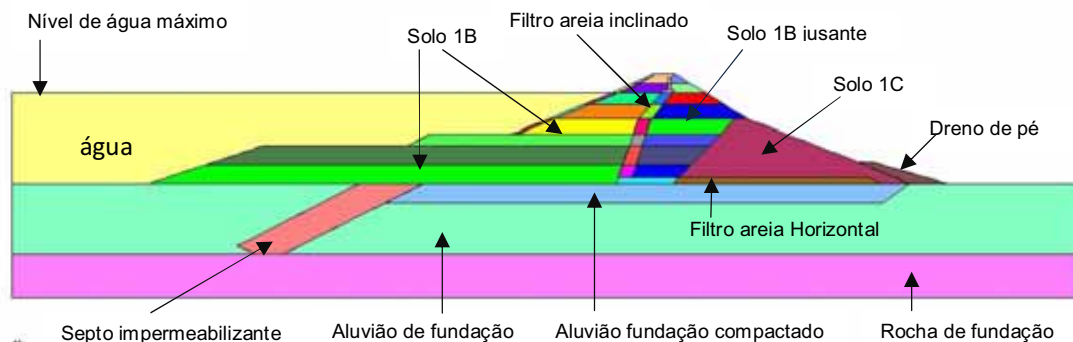


Figura 6.2 – Materiais componentes da barragem na seção máxima estudada (maciço e fundação).

A descrição destes materiais componentes da fundação e maciço da barragem, consta no Capítulo 2, nos subitens 2.3, 2.5.4 e 2.7, nos quais foram empregados os modelos elastoplásticos de Drucker-Prager (aplicado aos solos da fundação da barragem, dreno de pé, enrocamento de proteção do talude de montante e filtros vertical e horizontal de areia, todos esses materiais na condição saturado) e o Modelo Básico de Barcelona (BBM), aplicado aos materiais solo 1B e Solo 1B jusante.

Os parâmetros utilizados no BBM foram obtidos através dos ensaios edométrico e de cisalhamento direto com sucção controlada e através de correlações ( $M$  em função de  $\varphi$ ) e resolução de sistemas de equações não lineares (obtenção dos parâmetros  $\beta$  e  $r$ ). O ângulo de atrito  $\varphi$  foi obtido através dos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada, conforme foi visto no capítulo 5.

Na tabela 6.1 constam os parâmetros utilizados no BBM, obtidos através dos ensaios edométricos com sucção controlada ( $\lambda(s)$ ,  $K_{i0}$  e  $p_0^*$ ), e nos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada, através da  $\tan \varphi$ , de onde se tira o valor

de  $\varphi$  e calcula-se o valor de  $M \left( = \frac{2\sqrt{3} \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \right)$ .

O parâmetro k foi estimado, uma vez que não foi possível a realização de ensaios edométricos com sucção variável.

Tabela 6.1 - Parâmetros do BBM utilizados na modelagem

| Sucção(MPa) | K <sub>0</sub> | K    | λ(s)     | λ(0)   | p <sub>0</sub> <sup>*</sup> (média) | β    | r      | M (média) | α     |
|-------------|----------------|------|----------|--------|-------------------------------------|------|--------|-----------|-------|
| variável    | 0,0096         | 0,73 | variável | 0,0532 | 0,223                               | 2,70 | 0,1254 | 0,856     | 0,395 |

Na Figura 6.3 se observa a malha de elementos finitos empregada na simulação, constando de 4094 nós e 7845 elementos triangulares de três nós.

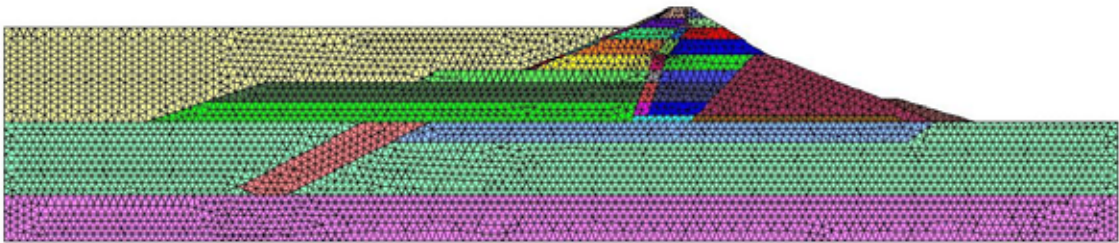


Figura 6.3 – Malha de elementos finitos, constando de 4094 nós e 7845 elementos triangulares.

Na Figura 6.4 constam as condições de contorno mecânicas e de fluxo, consideradas na modelagem numérica. Na superfície do material água, foi considerada a aplicação da pressão atmosférica, o geostático se encontra a 1,0 m de profundidade em relação ao NT e o fluxo q igual a zero nas superfícies indicadas.

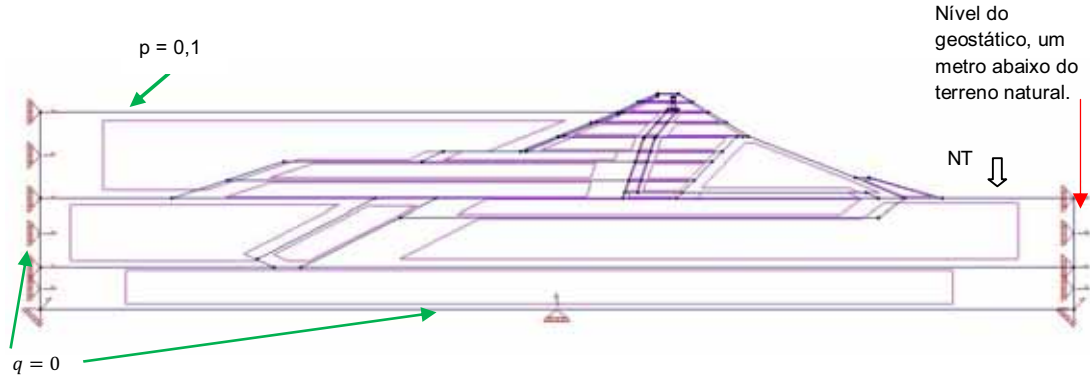


Figura 6.4 – Condições de contorno mecânicas.

### **6.3 – Análise dos deslocamentos e colapso durante a elevação do maciço da Barragem, enchimento do reservatório e comportamento ao longo dos anos.**

A instrumentação se concentrou mais na região à montante do eixo da barragem, devido ao problema do acidente ocorrido, uma vez que o mesmo foi no talude de montante da barragem. Neste trecho foram instalados, conforme apresentado por ROCHA (2003), os Tassômetros T6, T7, T8, T9 e T10, sendo este último fixado na rocha de fundação, bem como o piezômetros de Casagrande PzC8 e os piezômetros pneumáticos PzP1, PzP2 e PzP3.

Na parte de jusante do eixo da barragem foram colocados dois piezômetros de Casagrande (PzC7 e PzC9), quatro Tassômetros (T1, T2, T3, T4) e marcos superficiais no talude de jusante.

A partir destas instrumentações, tomaram-se seus resultados para efeito de comparação com os resultados da modelagem realizada neste trabalho, sendo feitas algumas considerações quanto a medições de leituras não consistentes, as quais serão discutidas posteriormente.

Na análise dos deslocamentos na barragem na seção transversal relativa à estaca 53+00, observa-se a ocorrência do colapso do material compactado no maciço da barragem, quando da hidratação do mesmo, no final de construção da barragem, quando do primeiro enchimento do reservatório.

O reservatório está completamente cheio no tempo de 2 anos e 2 meses, desde o início da reconstrução, sendo o período do último ano correspondente ao enchimento do reservatório, período no qual ocorre a hidratação do maciço.

Nas Figuras 6.5 a 6.22 pode-se observar a distribuição dos deslocamentos ao longo da seção transversal, durante a construção do maciço, assim como, a

evolução dos deslocamentos, medidos pelo Tassômetro T9, à medida que o maciço da barragem vai sendo elevado, camada por camada.

O Tassômetro T9 foi instalado no início da execução da primeira camada de material compactado na barragem, estando localizado no começo do filtro horizontal, próximo ao eixo da barragem e um pouco acima do nível do terreno natural.

Na Figura 6.5 observa-se a distribuição dos deslocamentos na fundação, uma vez que só está sendo considerado o geostático (terreno natural e nível freático que se encontram a uma profundidade de um metro da superfície do terreno natural).

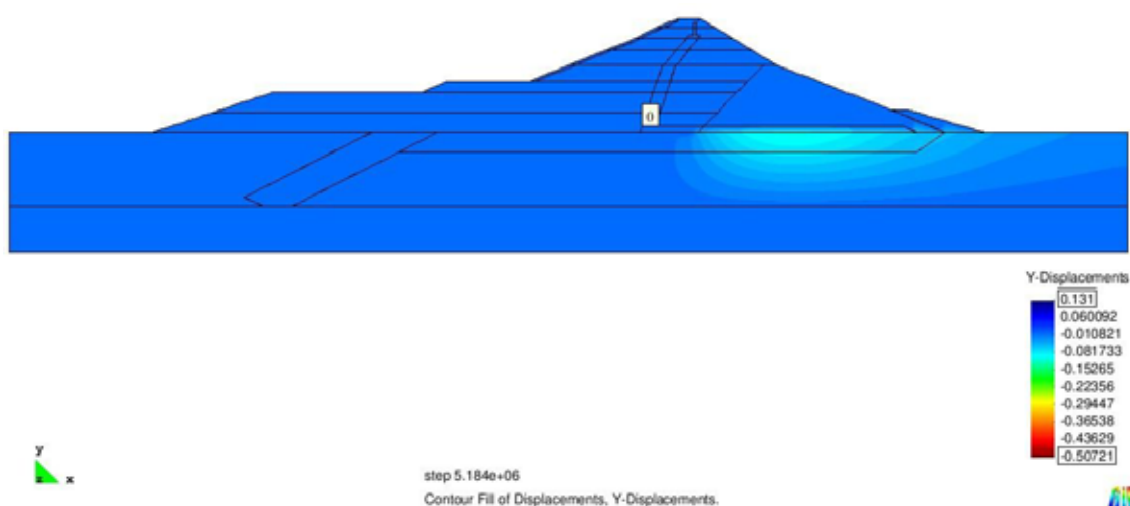


Figura 6.5 – Distribuição dos deslocamentos na seção transversal da barragem, no geostático

Na Figura 6.6 se observa o valor do deslocamento no nó em que se encontra instalado o Tassômetro T9, a fim de medir os deslocamentos verticais ao longo de toda a construção do maciço e quando da saturação do mesmo, após o primeiro enchimento do reservatório. Pode-se observar que nesse estágio da construção do maciço, foi considerada a colocação do material solo 1C, que permaneceu intacto após a ocorrência do acidente de final de construção na barragem.

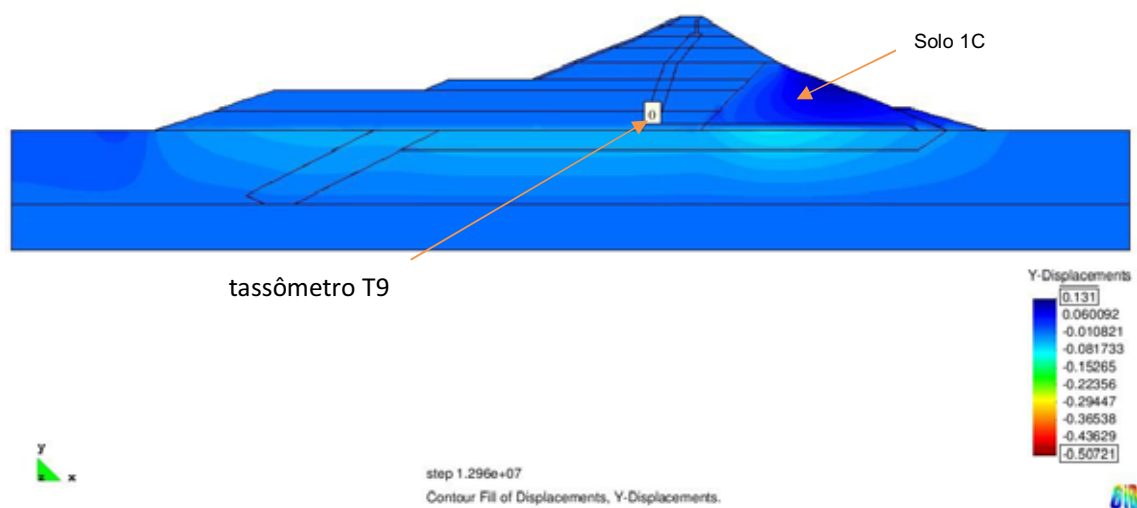


Figura 6.6 – Distribuição dos deslocamentos na seção transversal após colocação do solo 1C.

Observou-se na modelagem que após a colocação (construção) do material solo 1C (pedregulho arenoso), que ficou intacto após o rompimento do talude de montante ao final da construção, a medida de deslocamento vertical, no nó da malha de elementos finitos correspondente à posição do Tassômetro T9 (que foi instalado antes da execução da primeira camada), apresentou valor igual a zero.

Nas figuras seguintes se pode observar a variação das leituras do medidor de deslocamento vertical no nó equivalente ao medidor T9, à medida que o maciço da barragem é construído.

A construção do maciço da barragem foi dividida em oito camadas, cada uma, em média, com 5 metros de espessura.

A partir da colocação da primeira camada compactada, será analisado simultaneamente o colapso que sofre o maciço da barragem, através da evolução da tensão de pré-adensamento no elemento 46, que corresponde ao trecho do maciço que mais irá colapsar.

Na Figura 6.8 pode-se observar a evolução da tensão de pré-adensamento no elemento 46, escolhido para a análise, por ser o elemento que sofrerá a maior variação da tensão de pré-adensamento, logo, onde ocorrerá o maior colapso.

A posição do elemento 46, não é a mesma onde está instalado o medidor de deslocamento vertical T9, fica um pouco mais para montante e na linha do terreno natural, limite entre o maciço da barragem e a fundação.

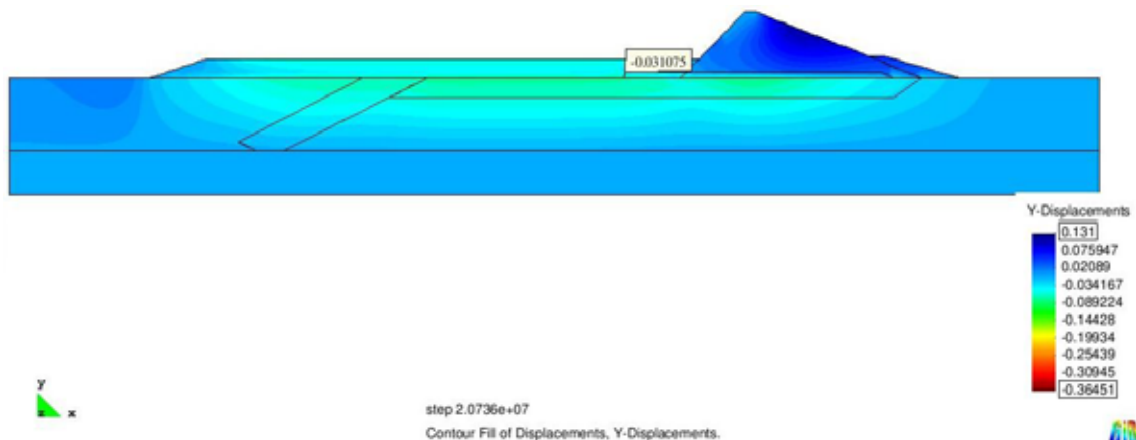


Figura 6.7 – Distribuição dos deslocamentos após a colocação da primeira camada compactada.

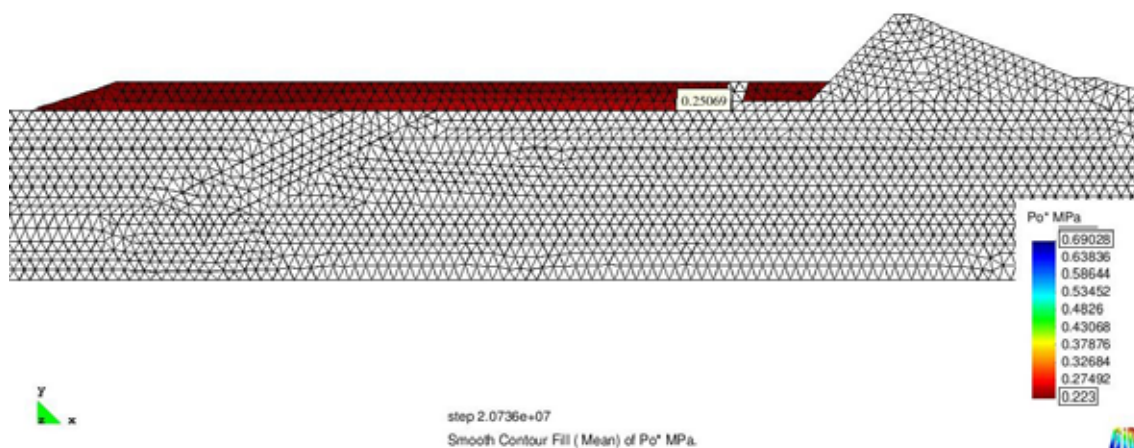


Figura 6.8 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no elemento 46, depois de colocada a primeira camada compactada.

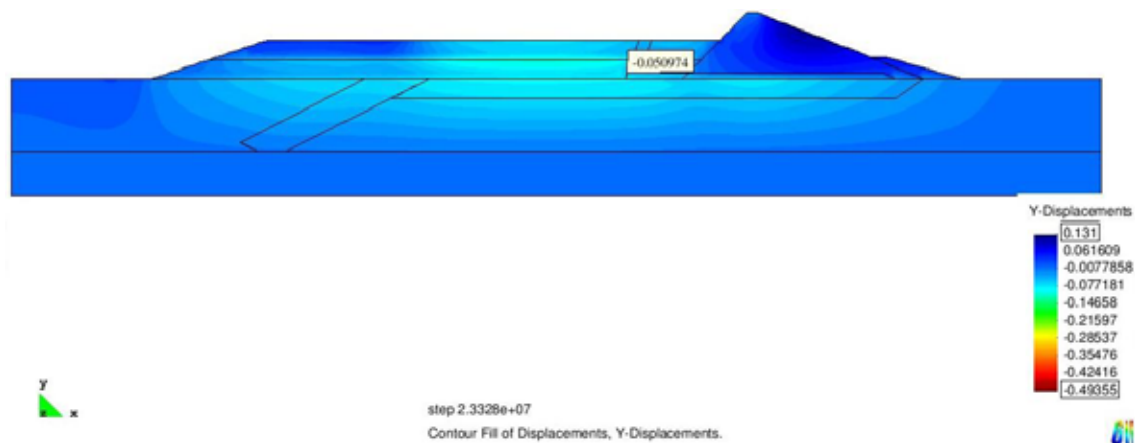


Figura 6.9 – Distribuição dos deslocamentos verticais após colocação da segunda camada compactada.

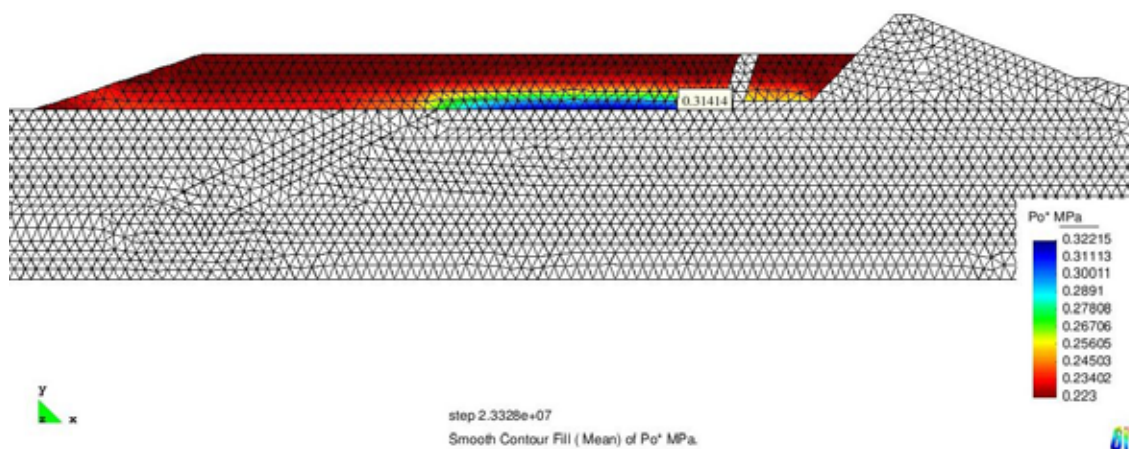


Figura 6.10 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço e evolução no elemento 46, após a colocação da segunda camada compactada.

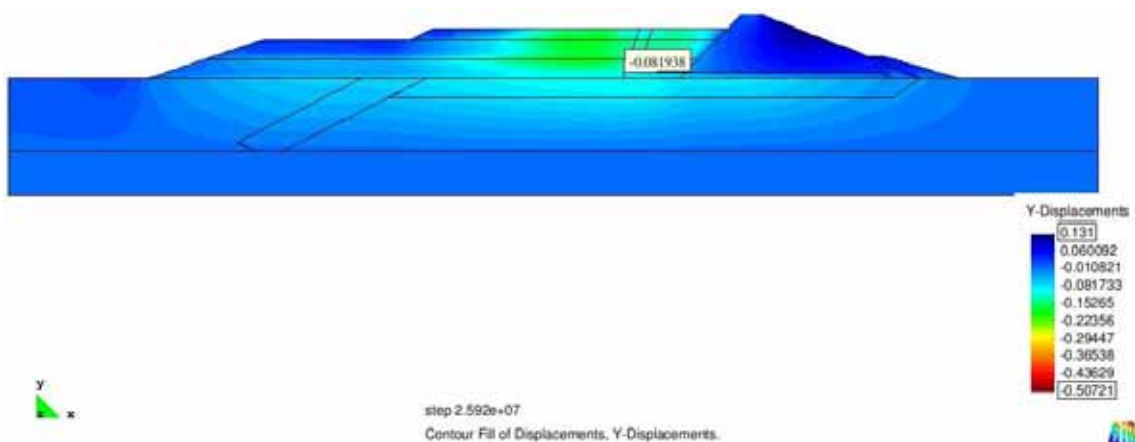


Figura 6.11 – Distribuição dos deslocamentos verticais após colocação da terceira camada compactada.

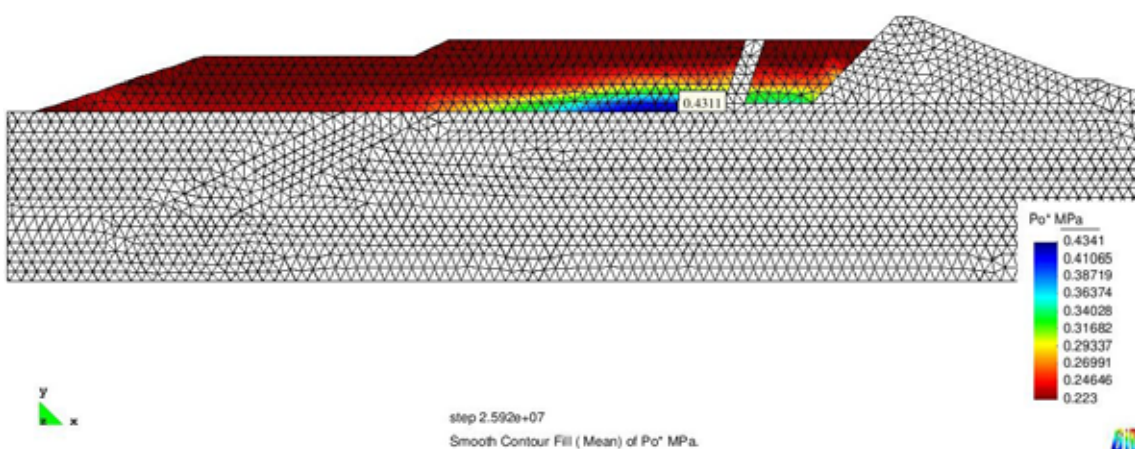


Figura 6.12 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço e evolução no elemento 46, após a colocação da terceira camada compactada.

Pode-se observar o aumento das leituras dos deslocamentos verticais, à medida que o maciço está sendo elevado, assim como, ao longo de toda a fundação.

A construção das camadas foram realizadas de tal forma que cada camada foi encaixada dentro do material solos 1C, que permaneceu intacto após o

deslizamento de montante, fazendo assim, uma amarração entre o maciço antigo e o maciço novo da barragem.

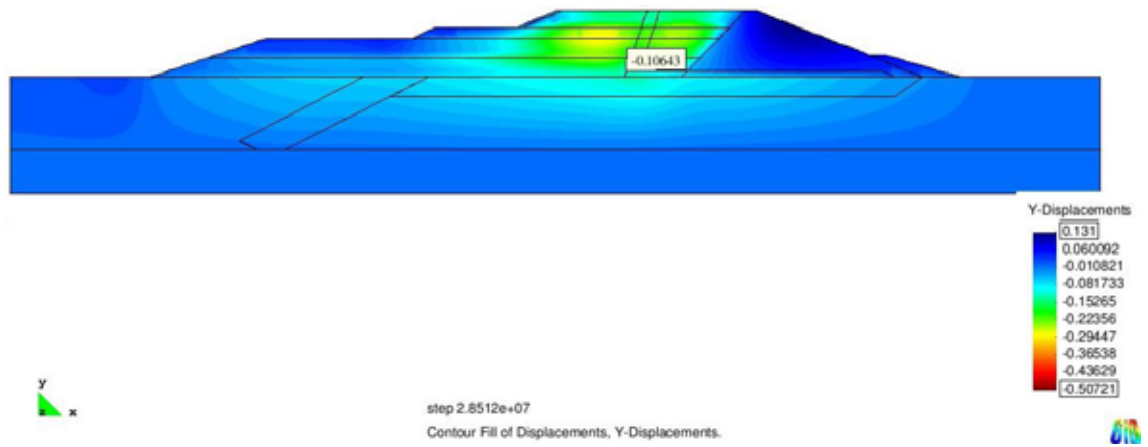


Figura 6.13 – Distribuição dos deslocamentos verticais, após colocação da quarta camada de solo compactado.

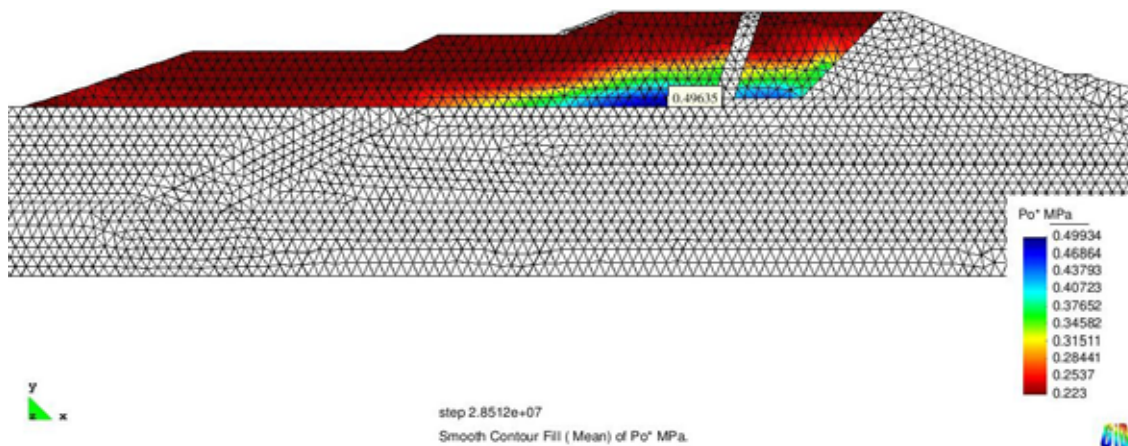


Figura 6.14 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço da barragem e evolução no elemento 46 após colocação da quarta camada de solo compactado.

Na Figura 6.15 pode-se observar uma concentração maior de deslocamentos na parte central do maciço, como é de se esperar, já que os deslocamentos no

maciço da barragem são distribuídos de uma forma concentrica, diminuindo de intensidade do centro dos círculos para parte externa.

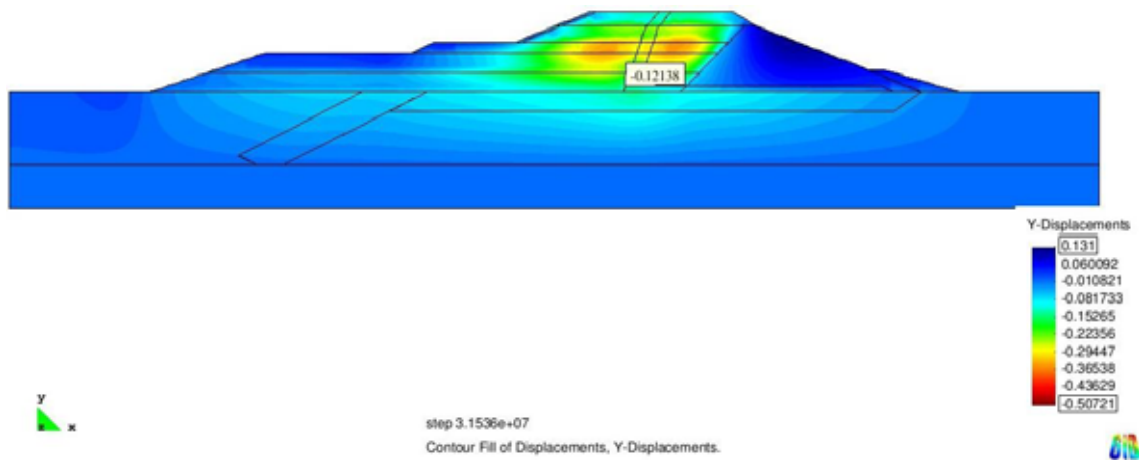


Figura 6.15 – Distribuição de deslocamentos, após a colocação da quinta camada compactada.

A distribuição dos deslocamentos ao longo do maciço e fundação, focando o tassômetro T9, assim como, a distribuição da tensão de pré-adensamento em todo o maciço da barragem, em particular no elemento 46, nos dá uma idéia do colapso que o solo está sofrendo, a medida em que se vai elevando o maciço da barragem.

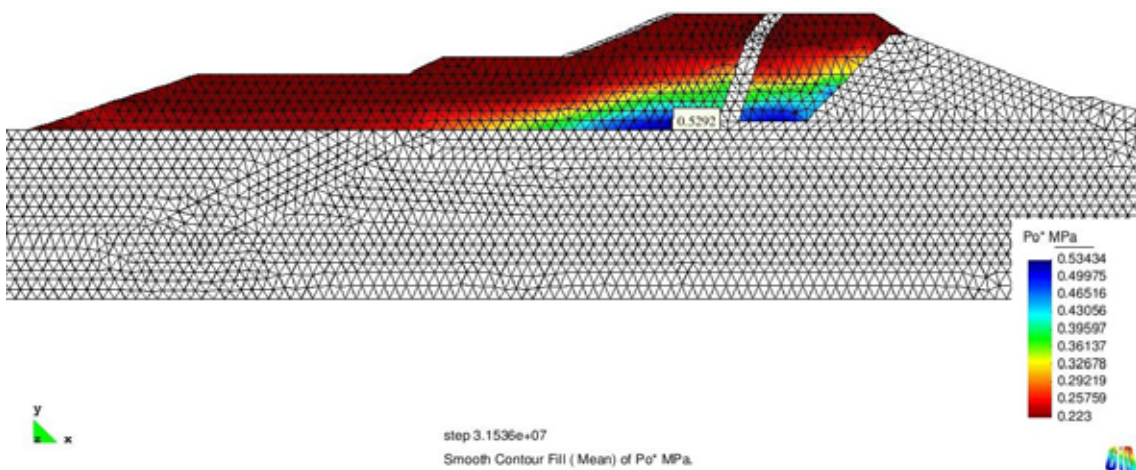


Figura 6.16 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço e evolução no elemento 46, após colocação da quinta camada compactada.

Nas figuras 6.17, observa-se a distribuição dos deslocamentos verticais em todo o maciço e fundação da barragem, em especial na posição em que se encontra instalado o Tassômetro T9.

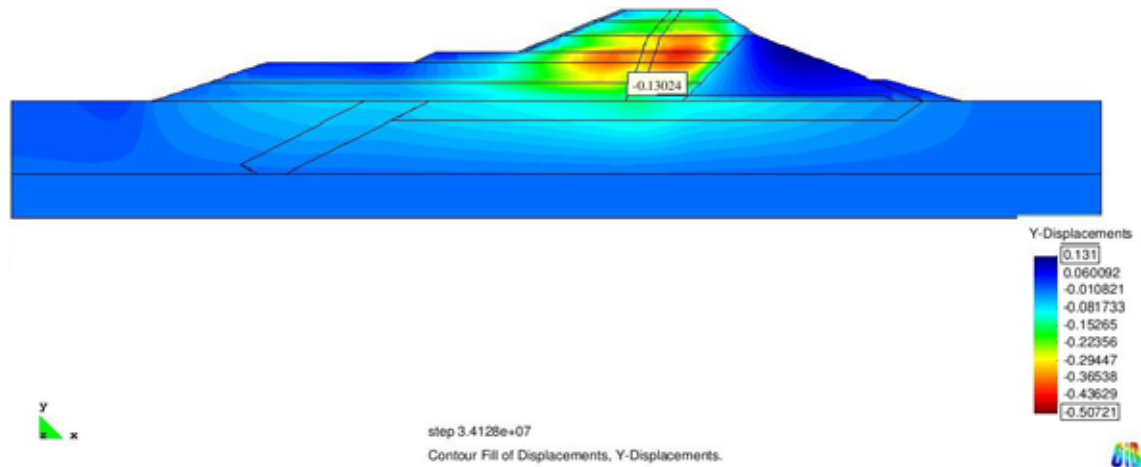


Figura 6.17 – Mostra a distribuição dos deslocamentos verticais, após compactação sexta camada compactada.

Na figura 6.18 se observa a distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço da barragem, principalmente no elemento 46, após a compactação da sexta camada, onde o aumento da tensão de pré-adensamento nos dá uma idéia do colapso que o maciço está sofrendo.

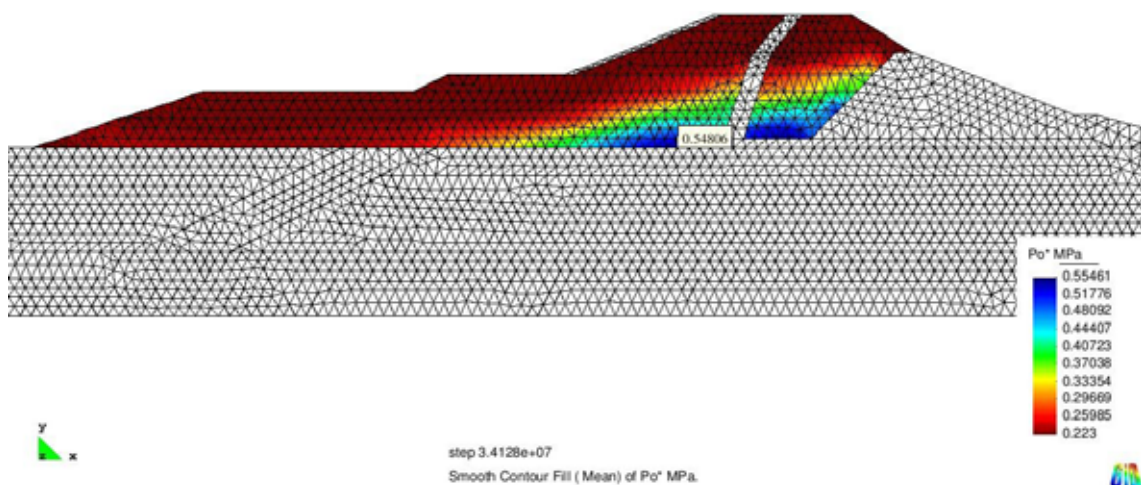


Figura 6.18 – Distribuição  $p_0^*$  no maciço e evolução no elemento 46, após colocação sexta camada.

Após a colocação da sétima camada de material compactado no maciço da barragem, se pode observar na Figura 6.19 a distribuição dos deslocamentos no maciço e fundação, assim como, a evolução da tensão de pré-adensamento no elemento 46 na Figura 6.20.

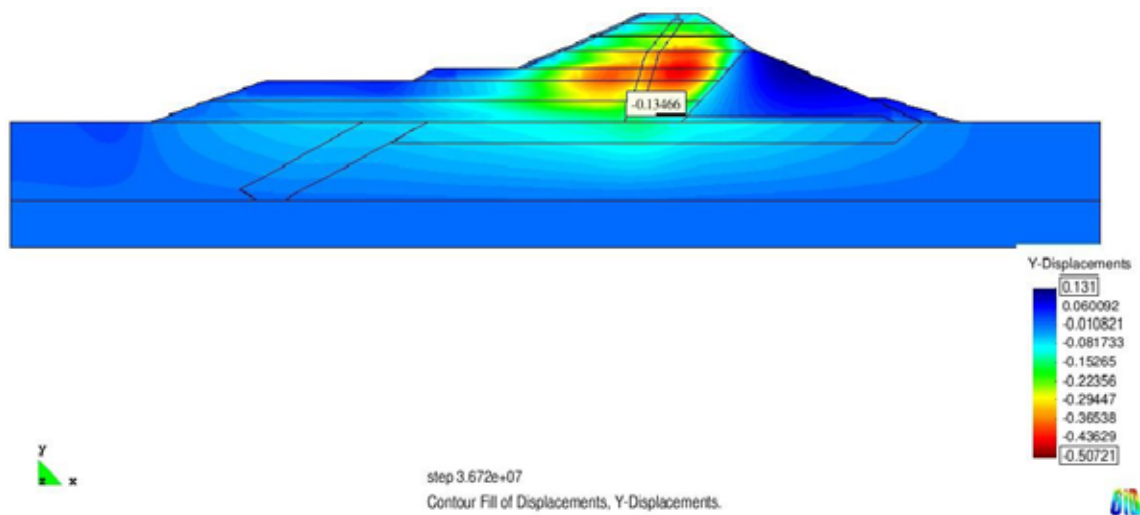


Figura 6.19 - Distribuição dos deslocamentos verticais após colocação da sétima camada compactada.

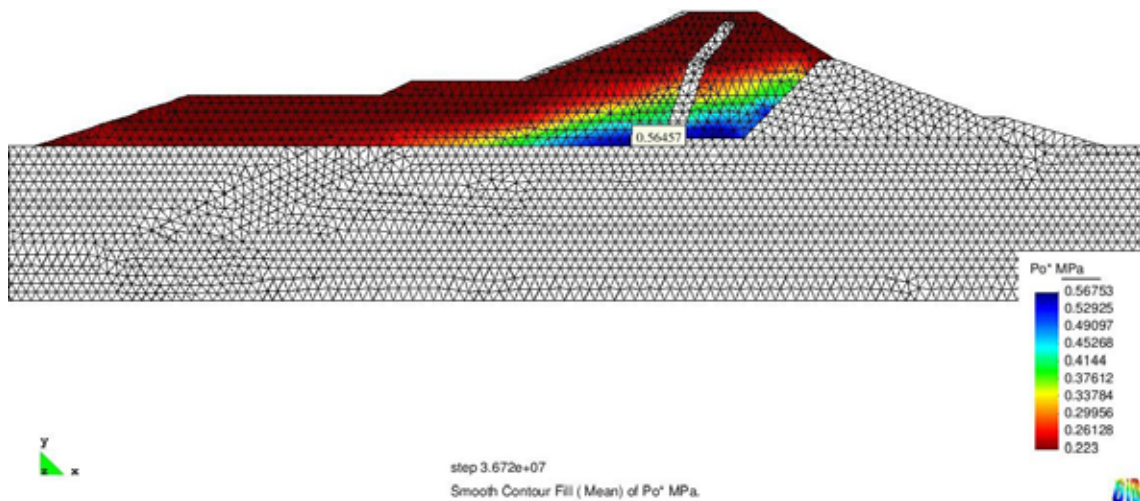


Figura 6.20 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço e evolução no elemento 46, após a colocação da sétima camada compactada.

Nas Figuras 6.21 e 6.22, podemos observar a distribuição dos deslocamentos verticais e do colapso, após a colocação da oitava e última camada de material compactado, atingindo o coroamento da barragem, numa altura de 40 metros, acima do nível do terreno natural.

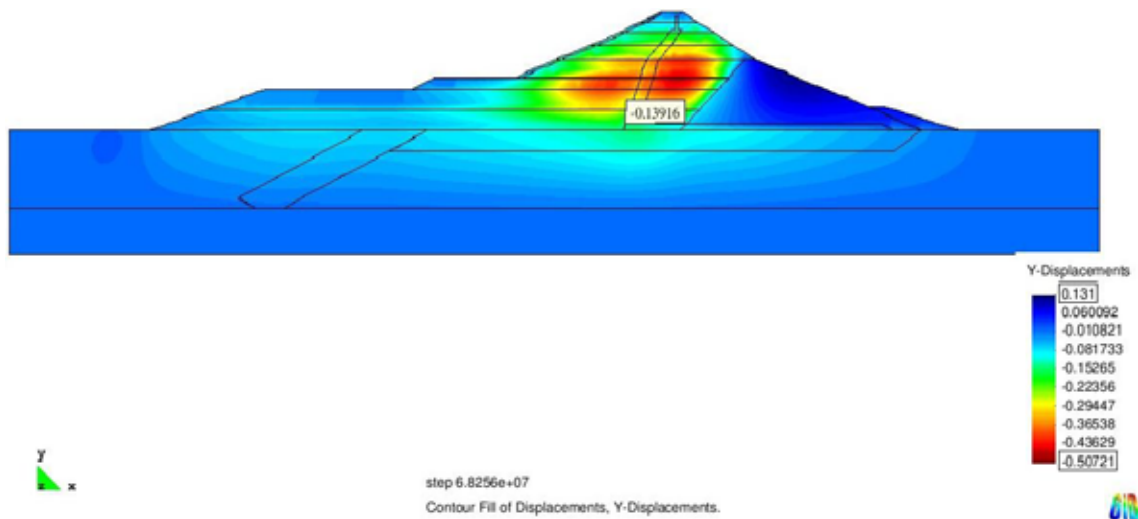


Figura 6.21– Evolução das distribuição dos deslocamentos verticais no maciço e fundação da barragem, após colocação da oitava e última camada compactada.

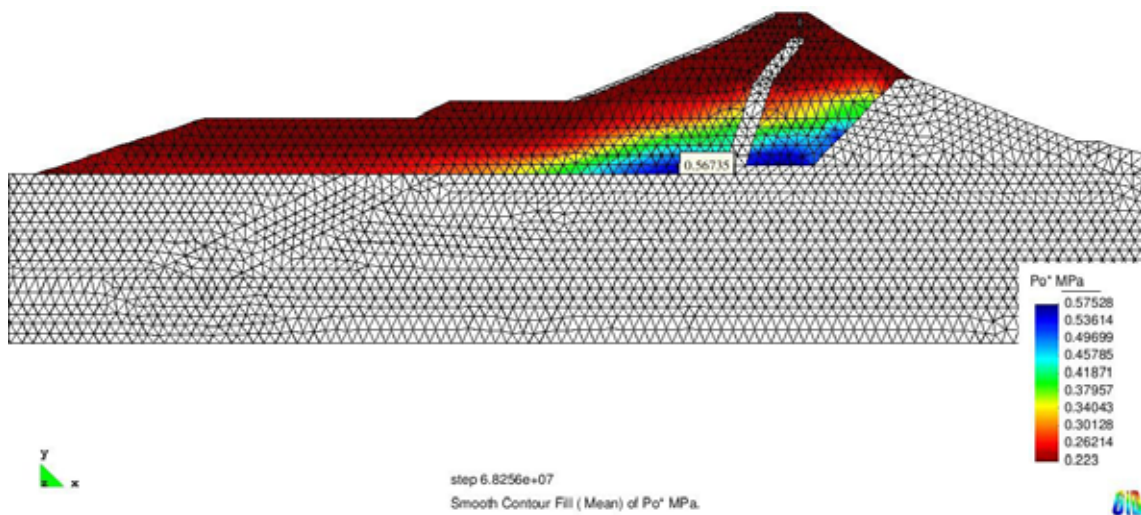


Figura 6.22 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço da barragem e sua evolução no elemento 46, após colocação da oitava e última camada de solo compactada.

Na Figura 6.23 podemos observar a distribuição dos deslocamentos verticais no maciço e fundação da barragem, após o primeiro enchimento do reservatório, no período de um ano, assim como, a evolução da distribuição da tensão de pré-adensamento, na Figura 6.24, quando da colocação do material “água”, após o término da construção do maciço, representando o primeiro enchimento do reservatório.

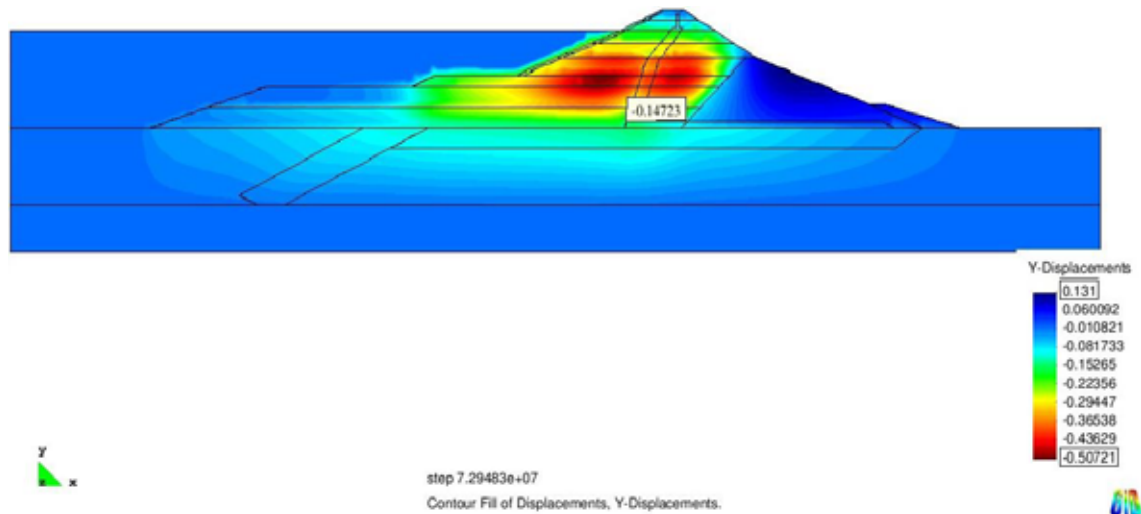


Figura 6.23 – Evolução das distribuição dos deslocamentos verticais no maciço e fundação da barragem, após o primeiro enchimento do reservatório, durante um ano.

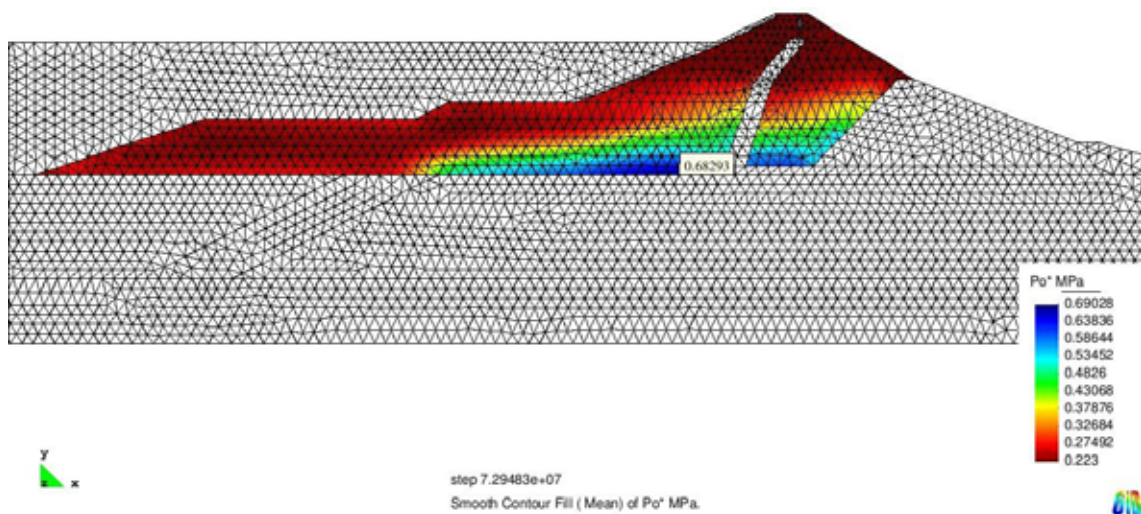


Figura 6.24 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço da barragem, após um ano do enchimento do reservatório.

Na distribuição dos deslocamentos verticais, pode-se observar na fundação, uma camada de material que sofreu um enrijecimento (primeira camada de aluvião que está adjacente ao filtro horizontal), após a construção do maciço e o acidente ocorrido no final de construção, e que está funcionando como se fosse uma viga, já que, segundo os consultores que reprojeteram a barragem (professores Vitor Mello e Costa Nunes), o módulo de Young do material da fundação, numa espessura em torno de 7 metros, quando ocorre um acidente deste tipo, aumenta em torno de dez vezes o seu valor.

Após as leituras na instrumentação, verificou-se que o módulo de Young aumentou em torno de 7,5 vezes o seu valor e não em 10 vezes como se havia imaginado, quando do reprojeto da barragem.

Mas é importante também enfatizar que boa parte do enrijecimento do material da fundação, próximo ao nível do terreno natural, se deu, devido em grande parte, pelo próprio peso do maciço da barragem, quando construído e não só devido ao fato do escorregamento de talude ocorrido.

A parte enrijecida da fundação, funciona como uma viga, em que a resultante dos esforços, será no sentido vertical e para cima, no treco sob o solos 1C, e para baixo (compressão) sob o maciço no eixo da barragem, que sofre colapso, conforme se pode observar na Figura 6.26, onde temos a distribuição dos vetores de deslocamentos verticais, no maciço e fundação da barragem, ao longo do tempo.

Isto pode também ser observado através das deformações plásticas ocorridas neste material (camada de solo de aluvião da fundação, onde ocorreu o maior enrijecimento), no qual empregou-se o modelo de Drucker-Prager para sua análise.

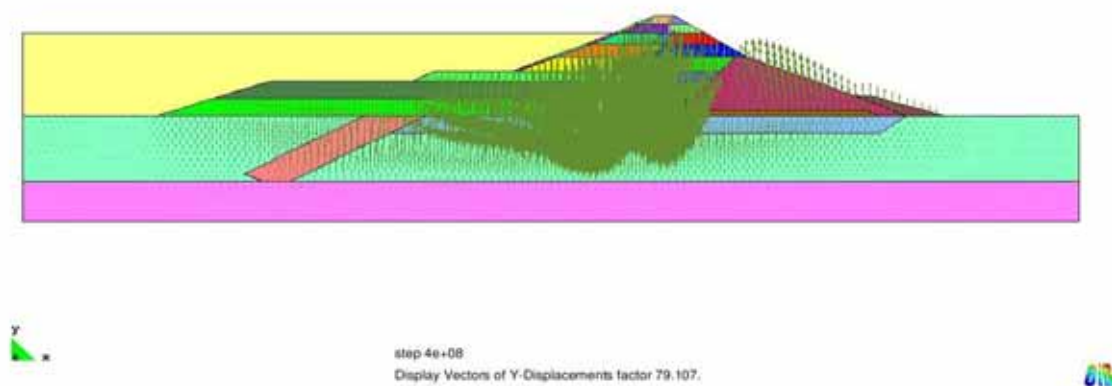


Figura 6.25 – Vetores de deslocamentos no maciço e fundação da barragem.

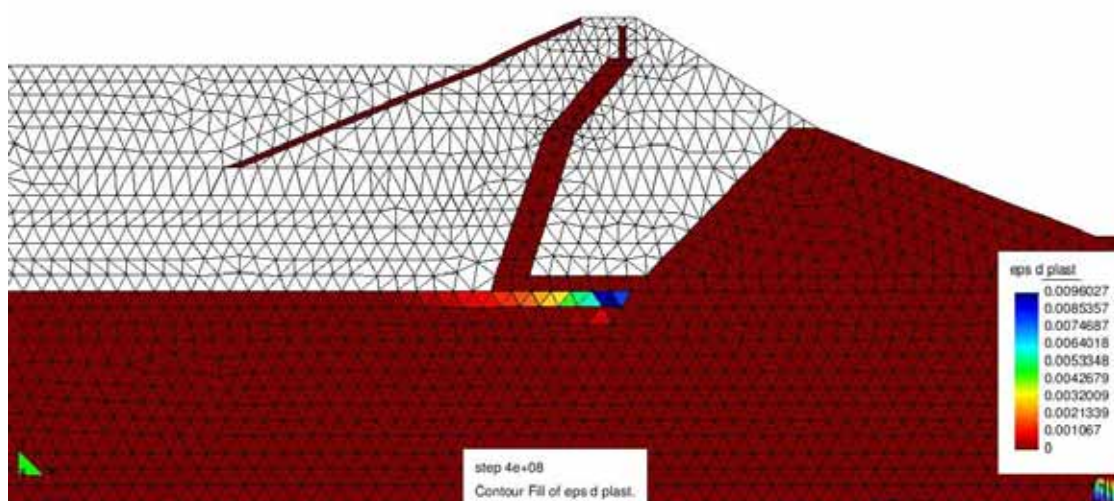


Figura 6.26 – Plastificação da camada de aluvião compactado na fundação.

Na Figuras 6.27 e 6.28, observa-se a distribuição dos deslocamentos no maciço e fundação da barragem assim como a variação da tensão de pré-adensamento (colapso) no maciço, quando é atingido o fluxo estacionário na barragem.

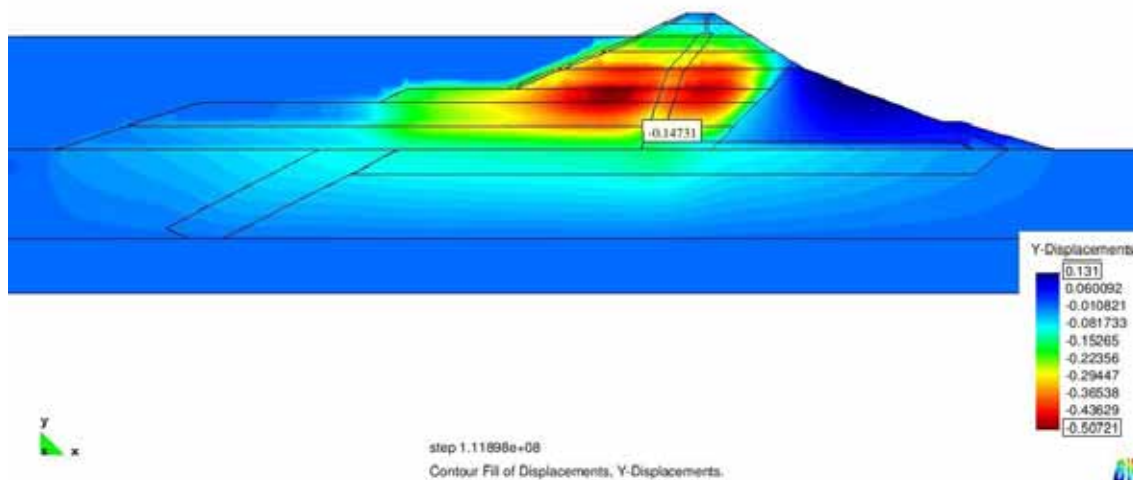


Figura 6.27 – Evolução das distribuição dos deslocamentos verticais no maciço, fundação e Tassômetro instalado na barragem, após atingir o fluxo estacionário.

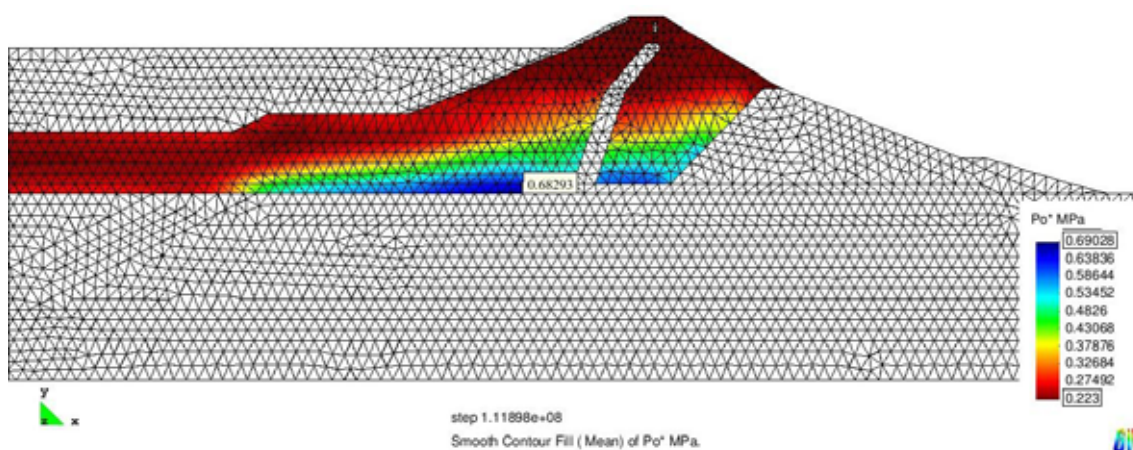


Figura 6.28 – Distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço e no elemento 46, após ser atingido o fluxo estacionário na barragem.

Ao final de treze anos de funcionamento da barragem, observa-se que não ocorre mudanças nas leituras dos deslocamentos verticais nos tassômetros instalados no maciço, assim como, na distribuição dos colapso no maciço da barragem, após atingido o fluxo estacionário (em torno de dois anos e meio), conforme observado nas Figuras 6.29 e 6.30.

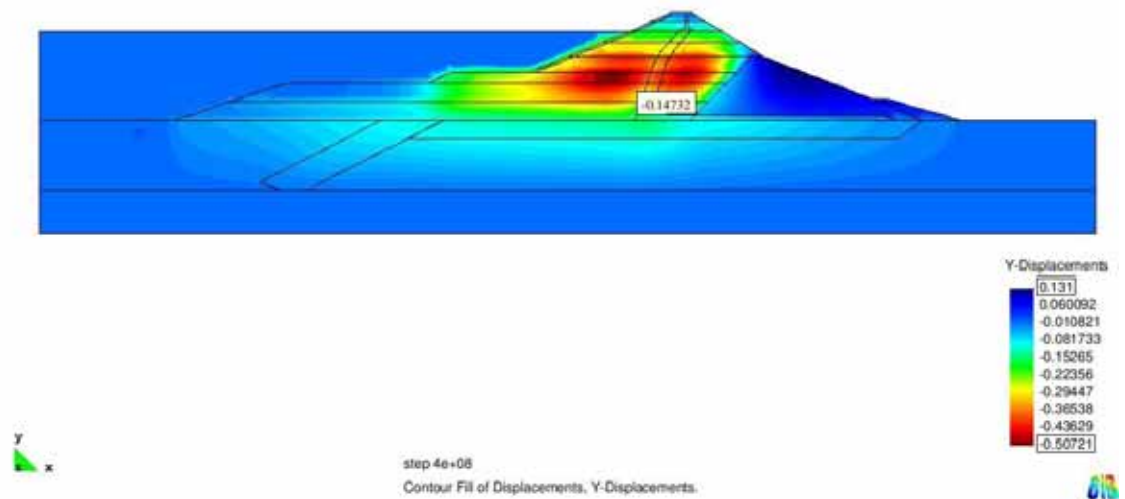


Figura 6.29 – Evolução das distribuição dos deslocamentos verticais no maciço e fundação da barragem, ao final de treze anos de funcionamento.

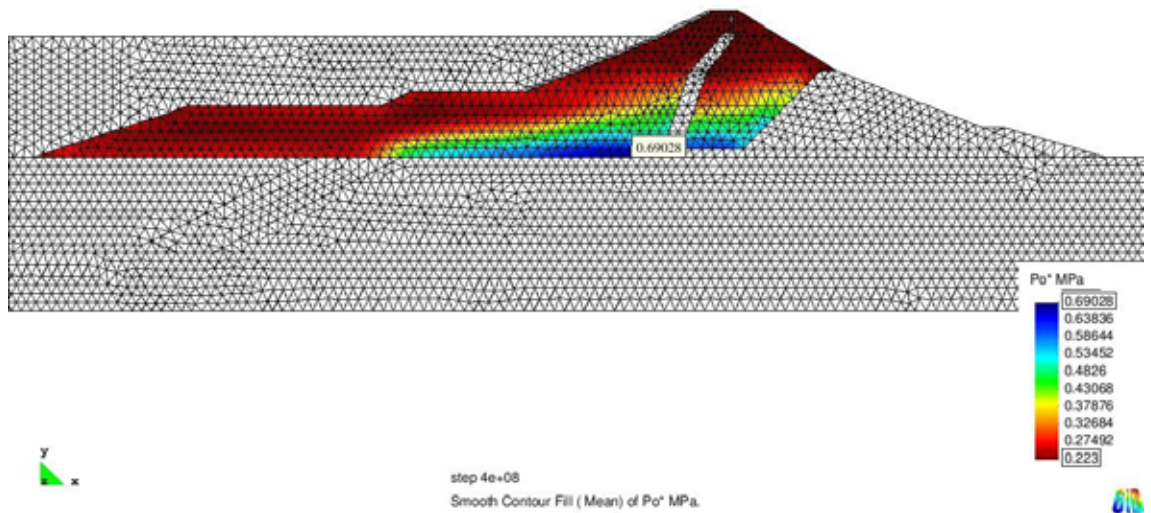


Figura 6.30 – Evolução da distribuição da tensão de pré-adensamento no maciço e fundação da barragem, ao final de treze anos de funcionamento.

No Gráfico 6.1 pode-se observar a evolução da distribuição dos deslocamentos ao longo do tempo, no elemento 46, que fica na primeira camada compactada, próximo do filtro de areia, onde ocorreu a maior parte do colapso.

Quando o reservatório enche e começa a hidratação do maciço ao longo do primeiro ano, observa-se a ocorrência do colapso e depois os deslocamentos praticamente se mantêm constantes.

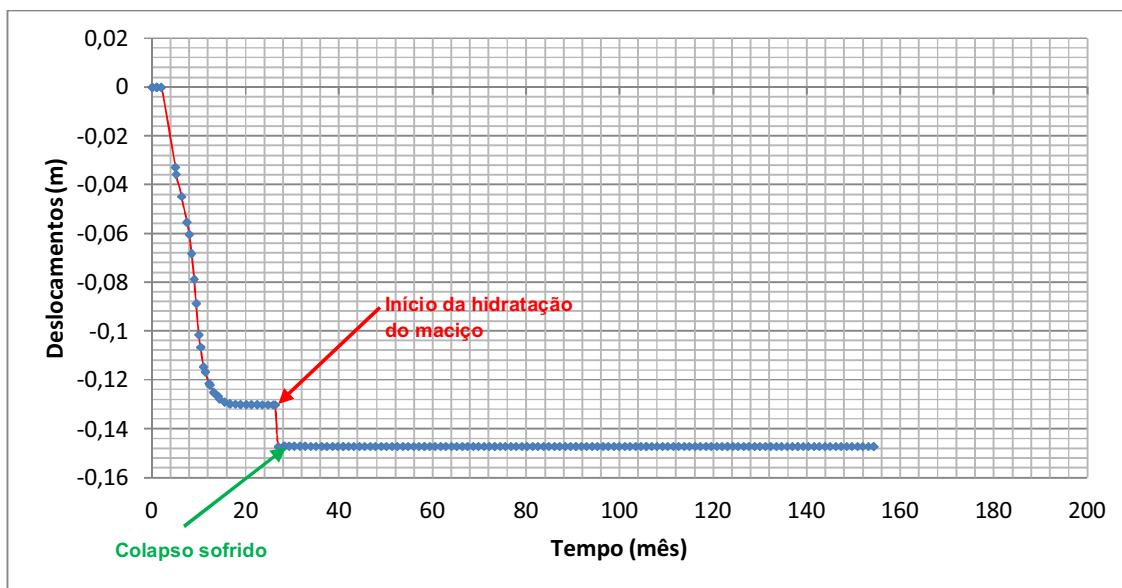


Gráfico 6.1 – Evolução dos deslocamentos verticais no elemento 46 da malha ao longo do tempo.

Na Figura 6.31 observa-se a distribuição dos deslocamentos ao final dos treze anos de comportamento da barragem, após sua conclusão, obtidos na modelagem para os tassômetros T9, T8, T7 e T6, que comparados com as leituras obtidas na instrumentação do maciço da barragem.

Na Tabela 6.2 observa-se a relação entre os dados de leituras dos deslocamentos verticais na instrumentação e os obtidos na modelagem numérica, nos medidores de deslocamentos verticais (Tassômetros) T6, T7, T8 e T9, e no Gráfico 6.2 pode-se comparar os dados obtidos na modelagem numérica e os lidos nos instrumentos.

Observa-se que há uma boa aproximação entre os resultados.

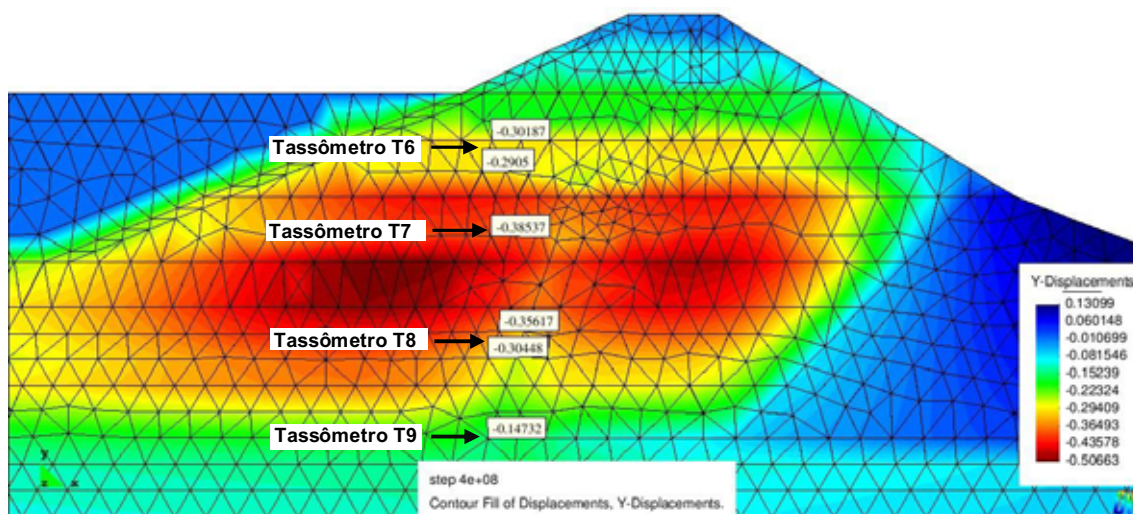


Figura 6.31 - Deslocamentos nos tassômetros T9\_T8\_T7\_T6, após treze anos de funcionamento.

Tabela 6.2 – Dados da instrumentação e modelagem sobre os deslocamentos verticais ocorridos ao longo do tempo.

| Tassômetro | Modelagem (m) | Instrumentação (m) |
|------------|---------------|--------------------|
| T6         | -0,29619      | -0,33890           |
| T7         | -0,39317      | -0,39971           |
| T8         | -0,342205     | -0,25280           |
| T9         | -0,14732      | -0,12530           |

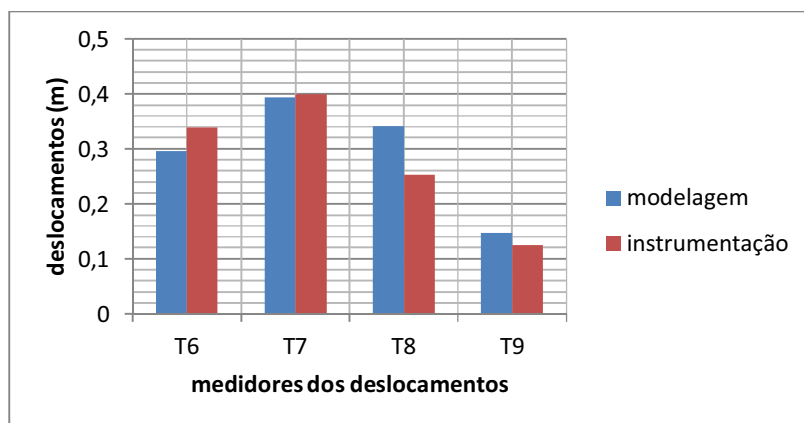


Gráfico 6.2 - Comparação entre os deslocamentos verticais obtidos na modelagem e instrumentação.

Na Figura 6.32 pode-se observar a distribuição dos deslocamentos verticais lidos nos tassômetros T1, sendo tomada a média dos três valores de deslocamento, que são variáveis nodais, já que o instrumento está localizado na coordenada do centro do elemento finito, formado pelas três leituras (-0,19704; -0,14664 e -0,16402, sendo o sinal negativo relacionado a deslocamentos no sentido de recalque) e pelo tassômetro T2 a média dos dois valores das leituras, já que se encontra no meio da linha vertical, conforme mostra a seta, -0,16402 e -0,24034.

Na Figura 6.33, observam-se os valores das leituras médias nos tassômetros T3 (média das três leituras -0,058384; -0,034834 e -0,041076) e T4 (média das duas leituras -0,019279 e -0,0088561), bem como pode ser observado na Tabela 6.3.

Verifica-se que há uma concordância razoável de valores entre as leituras da modelagem e instrumentação para os tassômetros T2, T3 e T4, quando se comparam os valores lidos na instrumentação e os obtidos na modelagem numérica.

Vale salientar que estas comparações estão sendo feitas entre os valores obtidos na modelagem e os valores máximos dos deslocamentos vertical obtido nas instrumentação.

A posição correta das placas de deslocamentos (Tassômetros) são exatamente para onde aponta a seta na Figura 6.32 e na Figura 6.33, onde temos as leituras para Tassômetros T3 e T4, por isso, foi considerado um valor médio na modelagem entre os valores obtidos nos nós, em torno da posição dos tassômetros.

A comparação entre os resultados obtidos na modelagem e na instrumentação estão apresentados no Gráfico 6.3.

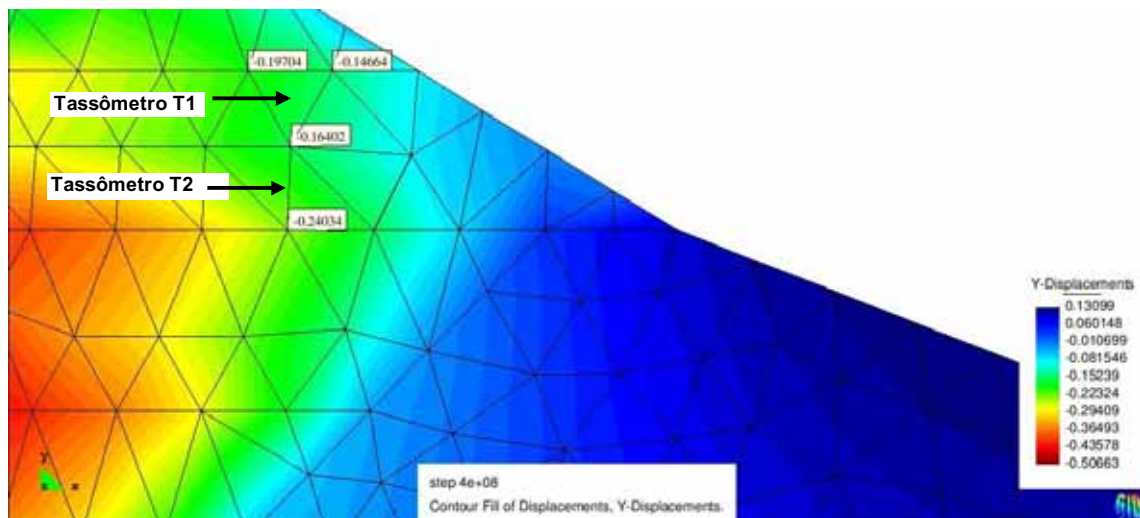


Figura 6.32 - Leituras nos Tassômetros T1 e T2 obtidas na modelagem numérica.

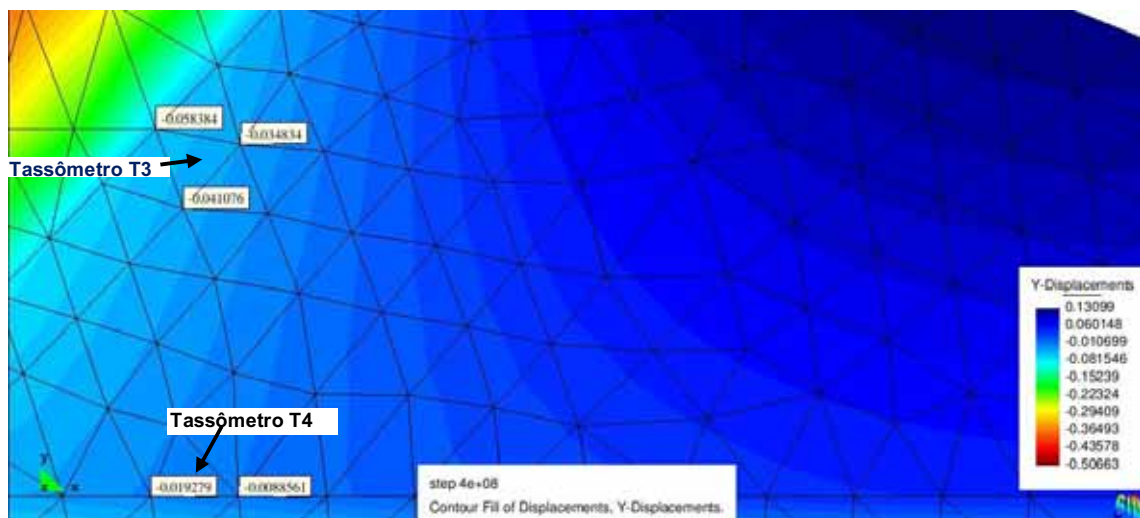


Figura 6.33 – Leituras dos deslocamentos, obtidos na modelagem numérica nos tassômetros T3 e T4.

Na tabela 6.3 e Gráfico 6.3, pode-se observar as leituras efetuadas nos instrumentos de medição de deslocamento vertical, T1, T2, T3 e T4, instalados no espaldar de jusante da do maciço da barragem e comparar com as leituras obtidas na modelagem numérica.

Os resultados obtidos na modelagem, estão coerentes com as leituras nos registradas pelos instrumentos.

Tabela 6.3 – Dados dos deslocamentos nos instrumentos, na modelagem e instrumentação.

| Tassômetro | Modelagem (m) | Instrumentação (m) |
|------------|---------------|--------------------|
| T1         | 0,17184       | 0,2760             |
| T2         | 0,20218       | 0,2341             |
| T3         | 0,04973       | 0,01940            |
| T4         | 0,014068      | 0,010350           |

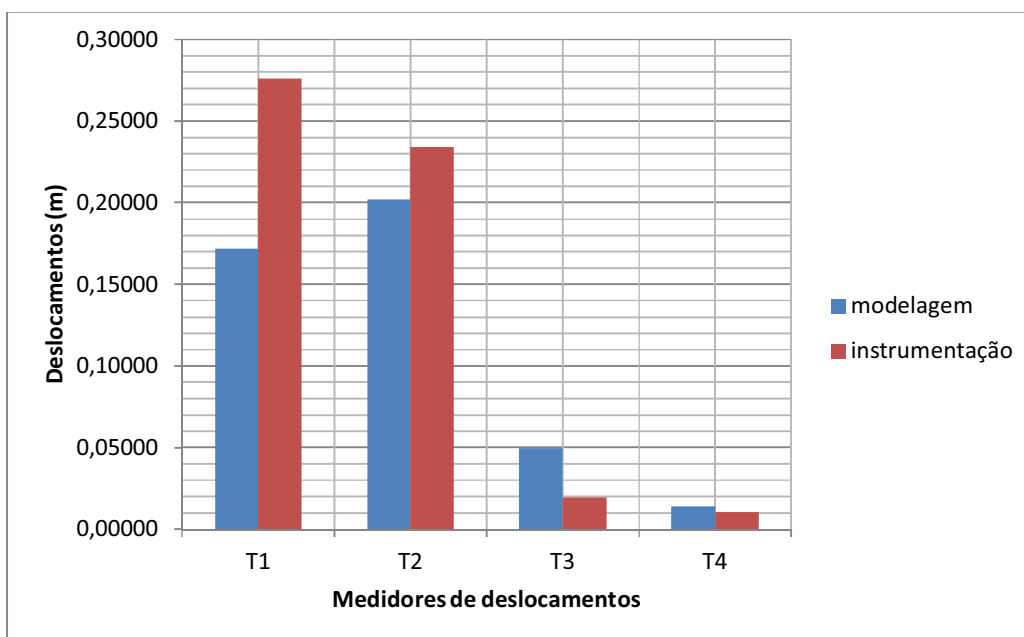


Gráfico 6.3 - Comparação entre os deslocamentos verticais obtidos na modelagem e instrumentação.

No Gráfico 6.4 observa-se a evolução dos deslocamentos nos tassômetros T1, T2, T3 e T4, quando da construção do maciço, enchimento do reservatório, consequentemente, hidratação do maciço da barragem, expansão do solo e comportamento do maciço da barragem ao longo do tempo.

No Gráfico 6.5 pode-se observar a evolução dos deslocamentos verticais nos tassômetros T6, T7, T8 e T9, quando da construção do maciço da barragem, enchimento do reservatório, consequentemente hidratação do maciço, colapso do solo e comportamento do maciço da barragem ao longo do tempo.

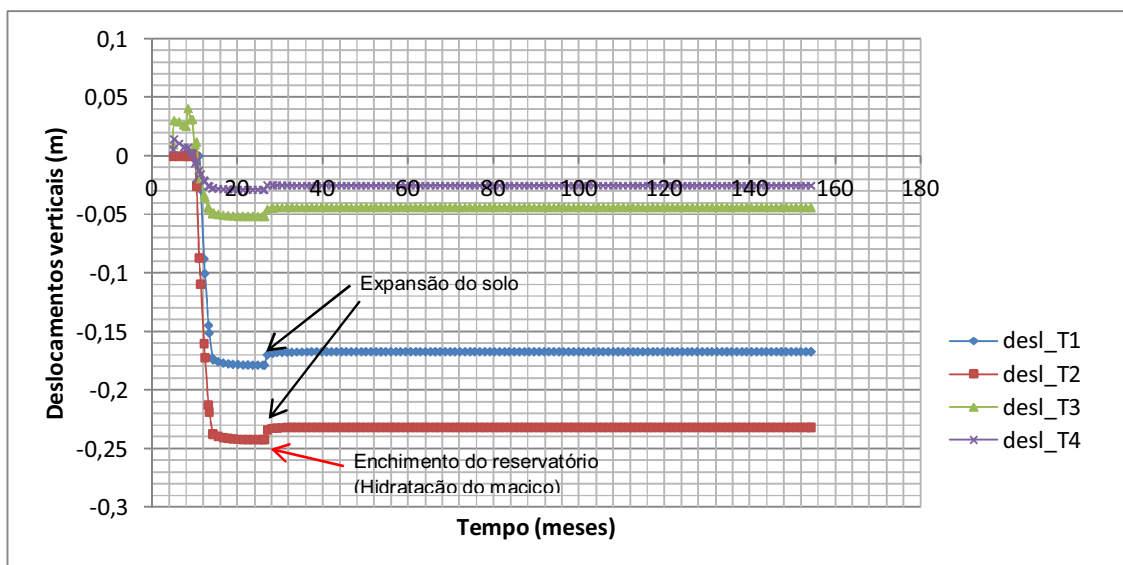


Gráfico 6.4 – Evolução dos deslocamentos nos tassômetros T1, T2, T3 e T4, ao longo do tempo.

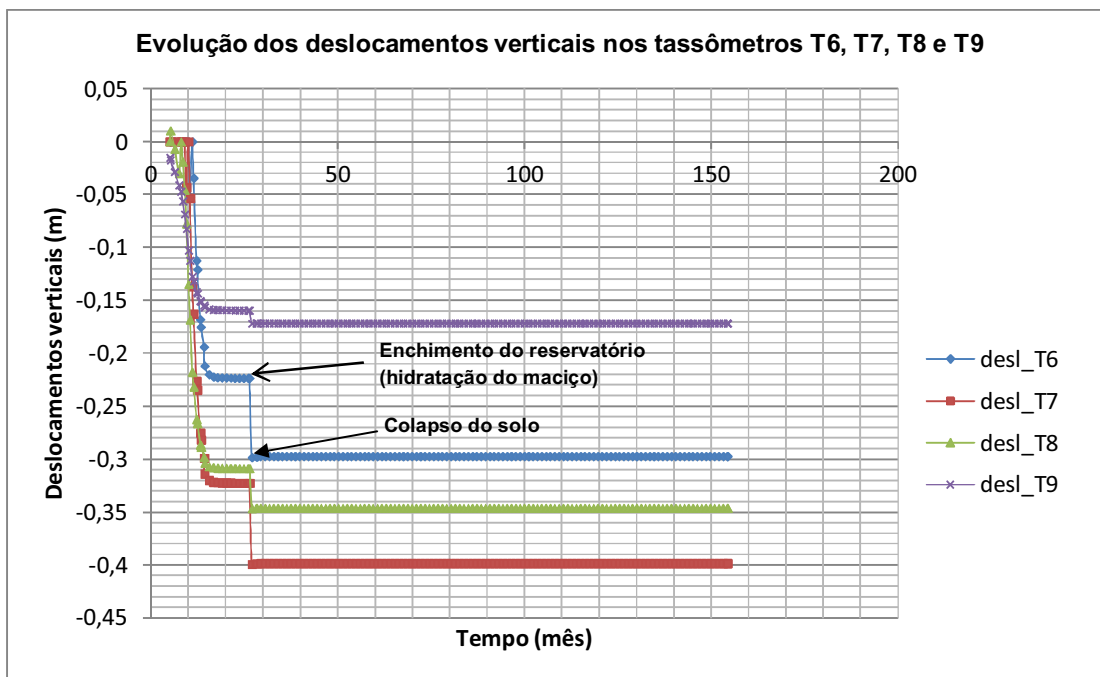


Gráfico 6.5 – Evolução dos deslocamentos ao longo do tempo nos tassômetros T6, T7, T8 e T9.

Na Figura 6.34 pode-se observar a divisão das camadas para construção do maciço da barragem, assim como, os elementos seleccionados no meio de cada

camada, para se obter a evolução dos deslocamentos verticais durante a construção, enchimento do reservatório, observação do colapso e/ou expansão do solo e seu comportamento ao longo dos anos.

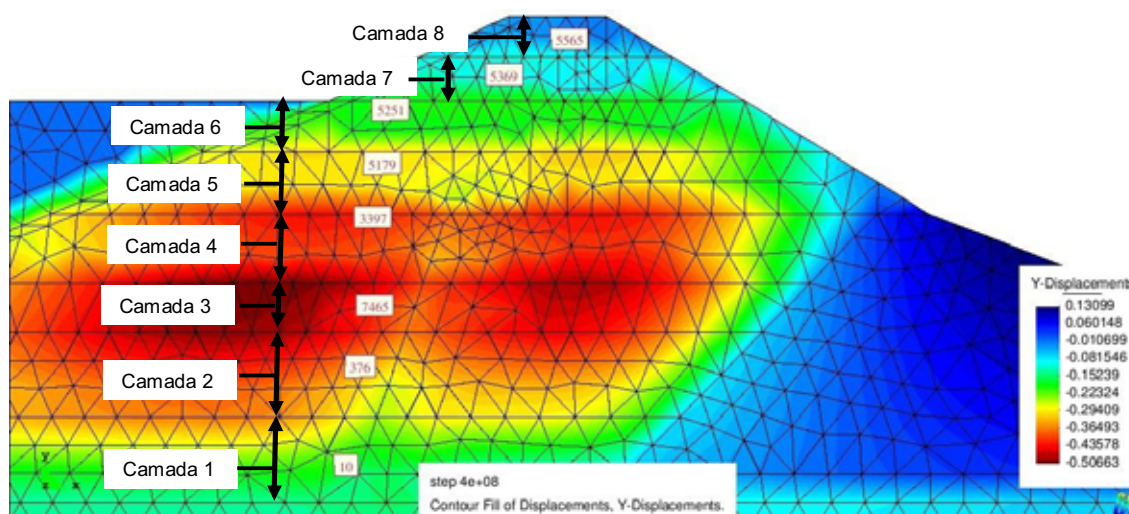


Figura 6.34 - Elementos selecionados para análise da evolução dos deslocamentos verticais em cada camada.

#### 6.4 – Análise das tensões desenvolvidas no maciços e fundação

O desenvolvimento das tensões no maciço e fundação da barragem podem ser observados desde a colocação da primeira camada até o término da construção da barragem e o enchimento do reservatório, assim como, durante o comportamento da barragem ao longo do tempo, após a sua construção.

Na figura 6.28 pode-se observar a distribuição das tensões média líquida ( $p$  mean) nos materiais (rocha de fundação, aluvião de fundação, solo 1C, filtro de areia, vertical e horizontal e enrocamento de proteção do talude de montante) nos

quais foram usados na análise o modelo de Drucker - Prager, observando-se um efeito de arqueamento na parte central da fundação e no filtro vertical de areia.

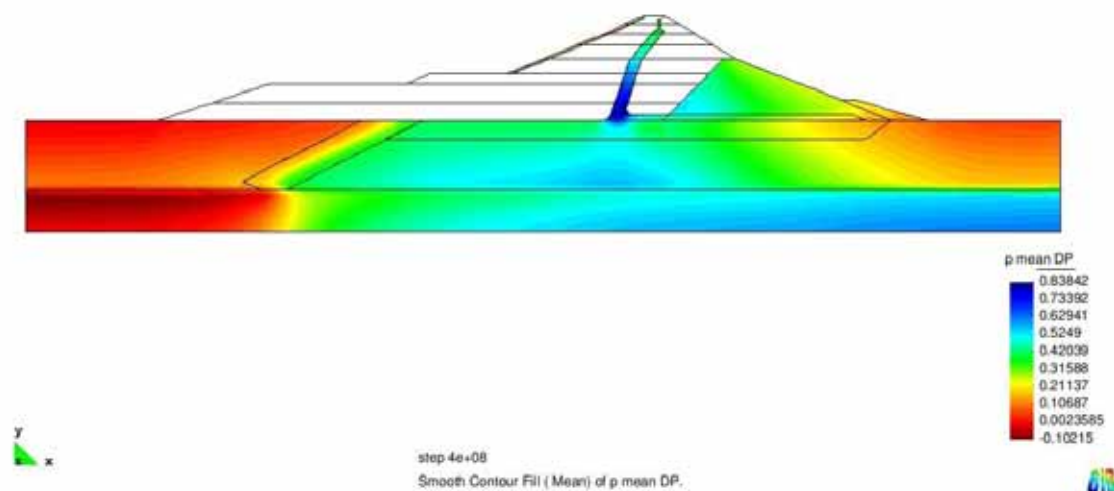


Figura 6.28 - Distribuição das tensões médias efetivas nos materiais não analisados pelo BBM.

Na Figura 6.29 observa-se a distribuição das tensões médias efetivas ( $p$  mean) nos materiais componentes do maciço e que foram analisados através da aplicação do modelo elastoplástico BBM.

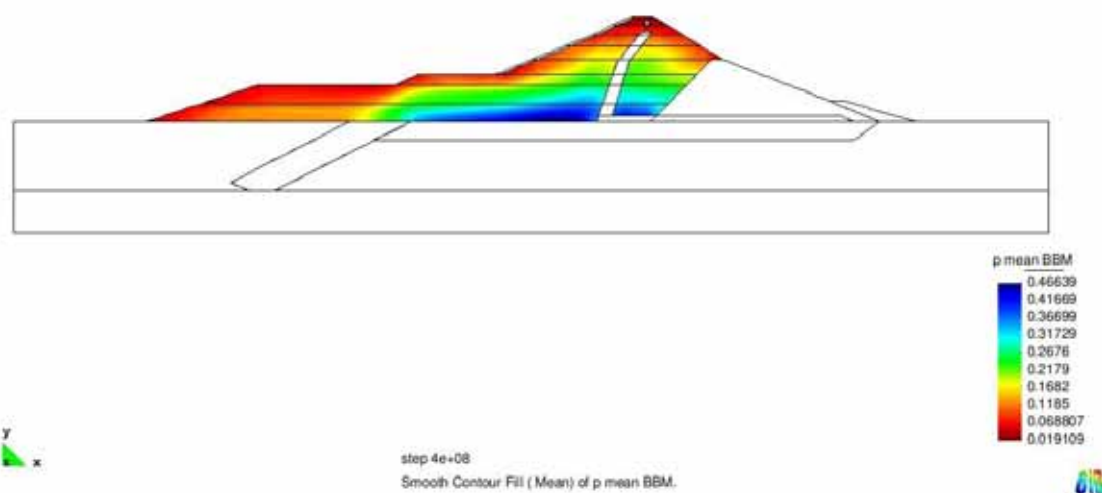


Figura 6.29 - Distribuição das tensão média efetivas ao final de treze anos do término de sua construção.

Na Figura 6.30 se observa a distribuição das tensões desviadoras (de Mises) ao longo de treze anos de funcionamento em toda a seção transversal da barragem.

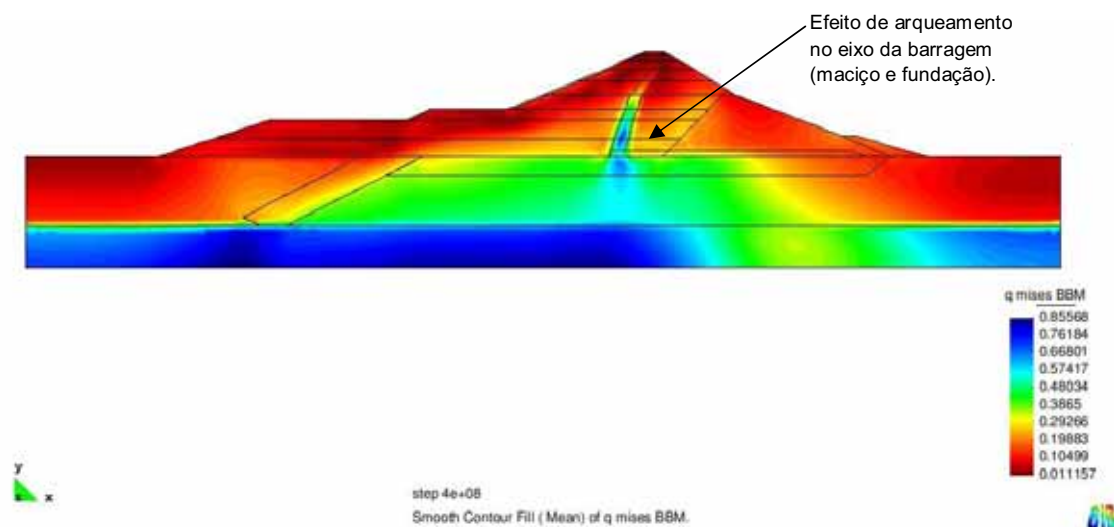


Figura 6.30 – Distribuição das tensões desviadoras ao final de treze anos após o término de sua construção.

Na Figura 6.31 esta representado a distribuição das tensões verticais ao longo de treze anos de funcionamento da barragem, observando-se o efeito de arqueamento na parte central da barragem, onde o filtro vertical de areia está funcionando como uma coluna, descarregando no aluvião de fundação compactado.

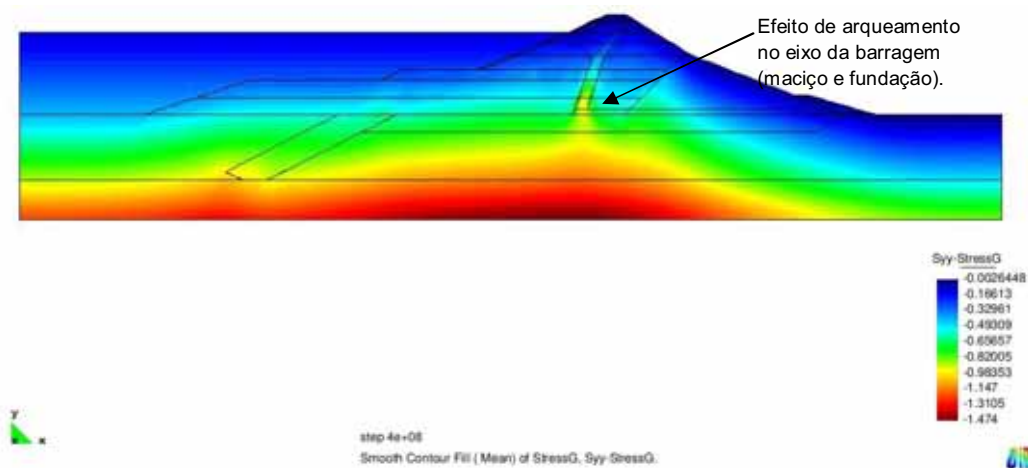


Figura 6.31 – Distribuição das tensões verticais ao final de treze anos após a construção da barragem.

## 6.5 – Análise do fluxo no maciço e fundação da barragem

Nas Figuras 6.32 pode-se observar, respectivamente os vetores de fluxo no maciço e fundação da barragem, de forma bem coerente, estando o filtro vertical e o filtro horizontal de areia desempenhando bem a sua função.

Como a fundação é de aluvião em sua predominância de material arenoso, a mesma funciona como um filtro, daí se observar os vetores de fluxo na fundação, praticamente paralelo aos vetores de fluxo no filtro horizontal de areia.

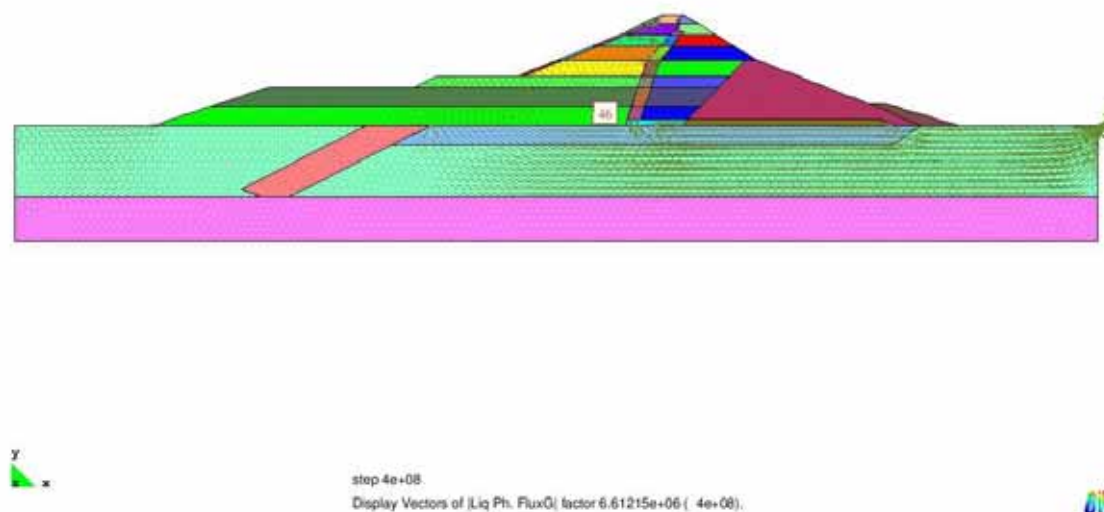


Figura 6.32 – Vetores de fluxo no maciço e fundação da barragem, após atingir o estacionário.

Na Figura 6.33 observa-se a saturação do maciço da barragem na parte central. Pode-se observar o solo à montante do filtro vertical de areia com um grau de saturação elevado, enquanto que o solo à jusante do filtro, apresenta um grau de saturação relativamente baixo, quando comparado com o solo à montante do filtro.

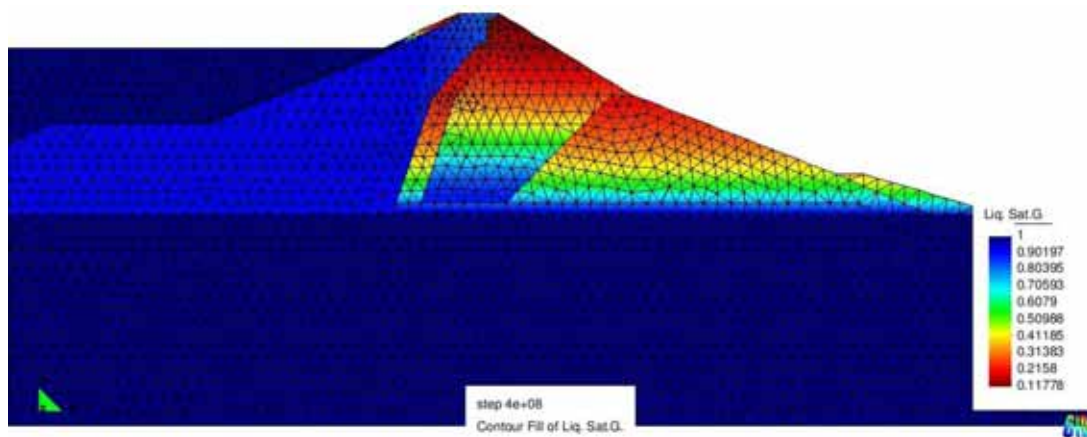


Figura 6.33 – Observa-se a saturação do maciço da barragem, após decorridos 13 anos.

O desenvolvimento das pressões de líquido no maciço e fundação da barragem foram medidos através da instrumentação instalada na barragem.

Foram instalados piezômetros de CasaGrande e piezômetros pneumáticos a fim de medirem as poropressões no maciço e as subpressões na fundação.

Na instrumentação de barragens é importante diferenciar poropressões medidas nos aterros de barragens daquelas medidas na fundação.

Enquanto que as poro pressões medidas no aterro são designadas de poro pressões propriamente ditas, as observadas na fundação da barragem recebem a designação de subpressões, em decorrência de atuarem invariavelmente de baixo para cima.

As subpressões são de relevante importância na análise das condições de estabilidade da barragem e devem ser observadas nos principais horizontes da fundação, a saber:

- Contato solo-rocha ou saprolito-rocha;
- Níveis e camadas mais permeáveis da fundação;
- Proximidades da base da barragem.

O filtro horizontal de uma barragem é outra região de particular interesse, mas, por fazer parte da barragem propriamente dita, integrará a instrumentação do maciço e não da fundação (SILVEIRA, 2006).

Os piezômetros de CasaGrande PzC1; PzC3 e PzC5 instalados à montante do septo impermeabilizante da fundação (cut-off) e os piezômetros de CasaGrande PzC2; PzC4 e PzC6, instalados à jusante do septo impermeabilizante, fornece uma indicação do desempenho desse dispositivo de vedação.

Não foi possível encontrar relatórios com os dados referentes a estes piezômetros, assim como, as leituras dos marcos superficiais.

Na Figura 6.33 observa-se as subpressões registradas na modelagem, nos piezômetros PzC1, PzC3 e PzC5, instalados à montante do septo impermeabilizante, bem maiores que as subpressões registradas na modelagem nos piezômetros PzC2, PzC4 e PzC6, instalados à jusante do septo impermeabilizante, mostrando com isso, que o mesmo está funcionando como se esperava.

Com relação as leituras dos inclinômetros, não foi possível fazer comparações entre a modelagem numérica e as leituras obtidas pelos instrumentos pois em sua Dissertação de Mestrado o professor Valdeci Osvaldo da Rocha comenta: “Os resultados obtidos, com exceção daqueles fornecidos pelos inclinômetros, cujas leituras e interpretação dos dados não foram bem conduzidas, indicam que a barragem e fundação têm apresentado comportamento absolutamente satisfatório”.

Na Figura 6.34 pode-se observar as leituras na modelagem nos piezômetros instalados à montante do septo impermeabilizante, assim como, as leituras nos piezômetros instalados à jusante do septo impermeabilizante.

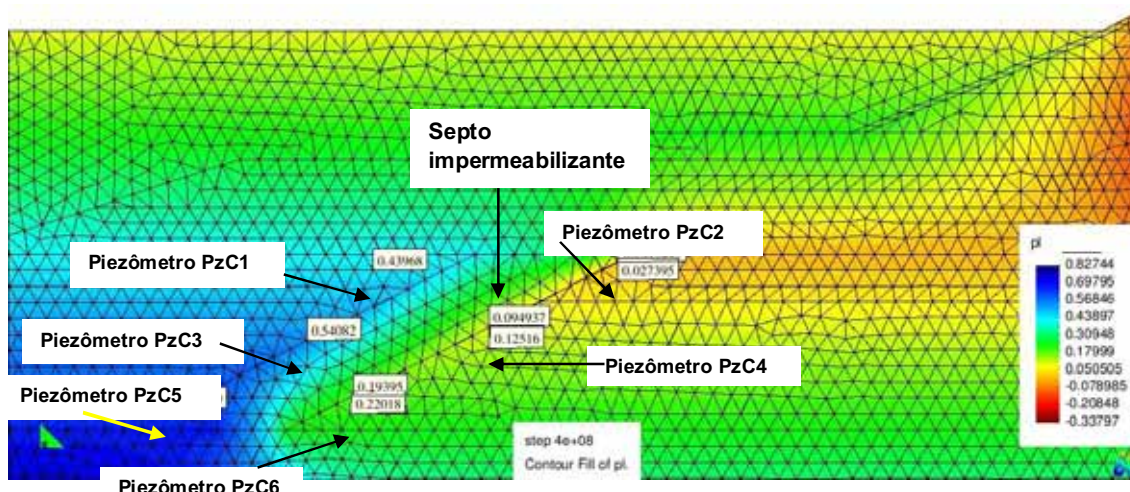


Figura 6.34– Mostra as subpressões lidas na modelagem nos piezômetros à montante do septo impermeabilizante (PzC1, PzC3 e PzC5) e nos piezômetros à jusante do septo (PzC2, PzC4 e PzC6).

No Gráfico 6.6, , pode-se observar a evolução das subpressões nos piezômetros que estão instalados à montante do septo impermeabilizante (PzC1, PzC3 e PzC5), assim como, no Gráfico 6.7, observa-se a evolução das subpressões nos piezômetros de CasaGrande instalados à jusante do septo impermeabilizante (PzC2, PzC4 e PzC6), onde se constata que o septo impermeabilizante está desenvolvendo bem a sua função (as subpressões à montante do septo são bem maiores que as subpressões desenvolvidas à jusante).

Na análise da evolução de poropressões em cada uma das camadas construídas na elevação do maciço, observou-se picos de excesso de poropressão relacionados ao comportamento não drenado do material utilizado na construção do maciço da barragem, assim como, nos piezômetros pneumáticos e de CasaGrande instalados no maciço e fundação da barragem.

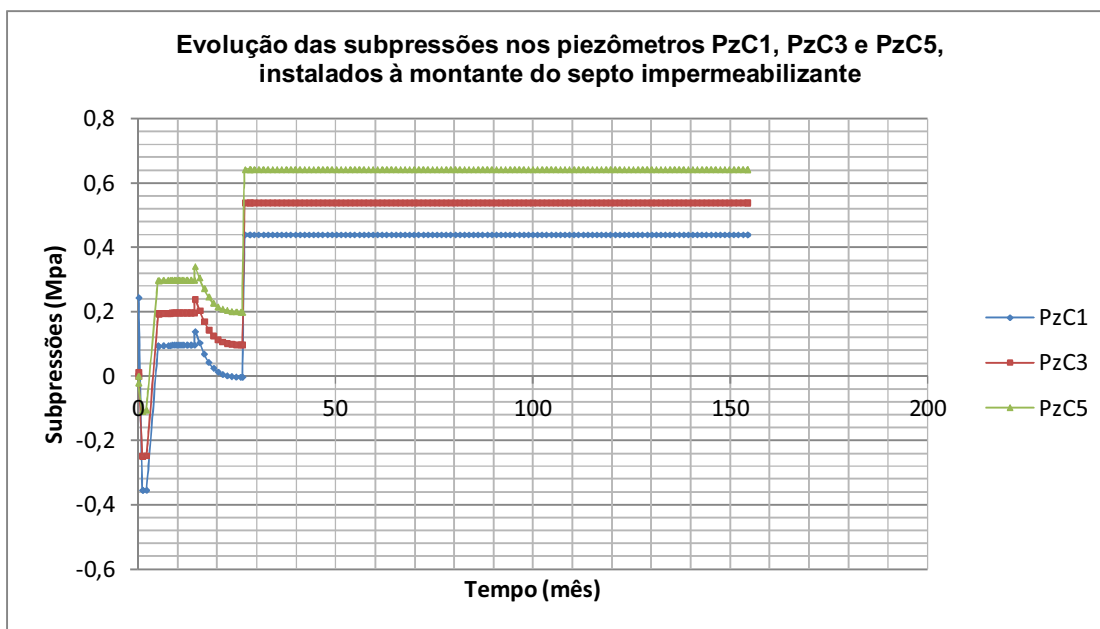


Gráfico 6.6 – Evolução das leituras nos piezômetros PzC1, PzC3 e PzC5 na modelagem numérica ao longo do tempo.

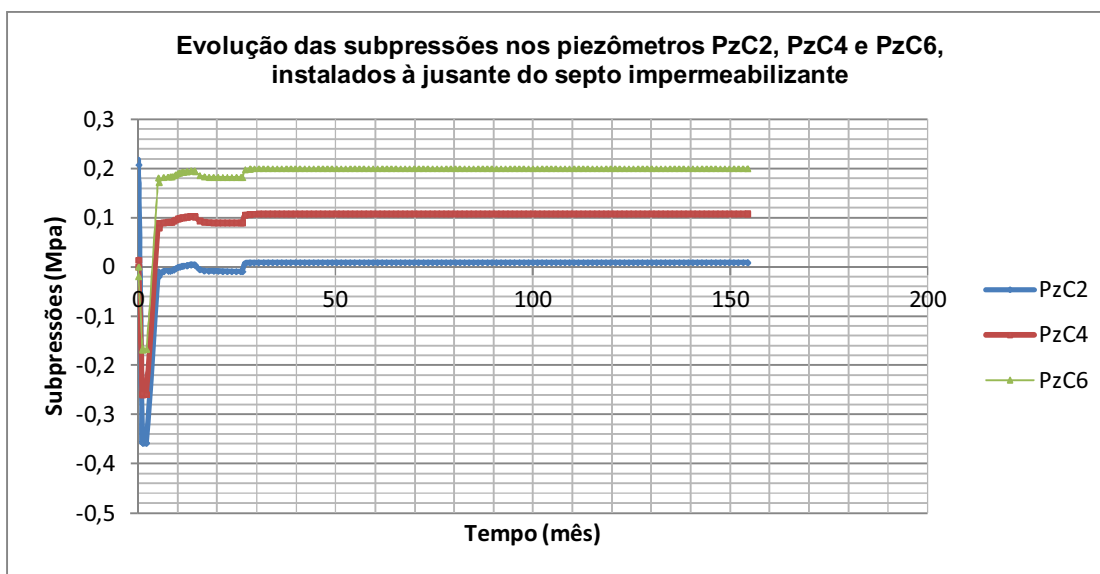


Gráfico 6.7 – Evolução das subpressões nos piezômetros PzC2, PzC4 e PzC6.

Na Figura 6.35 observam-se as leituras nos piezômetros pneumáticos PzP1, PzP2 e PzP3 e a evolução das poropressões desenvolvidas.

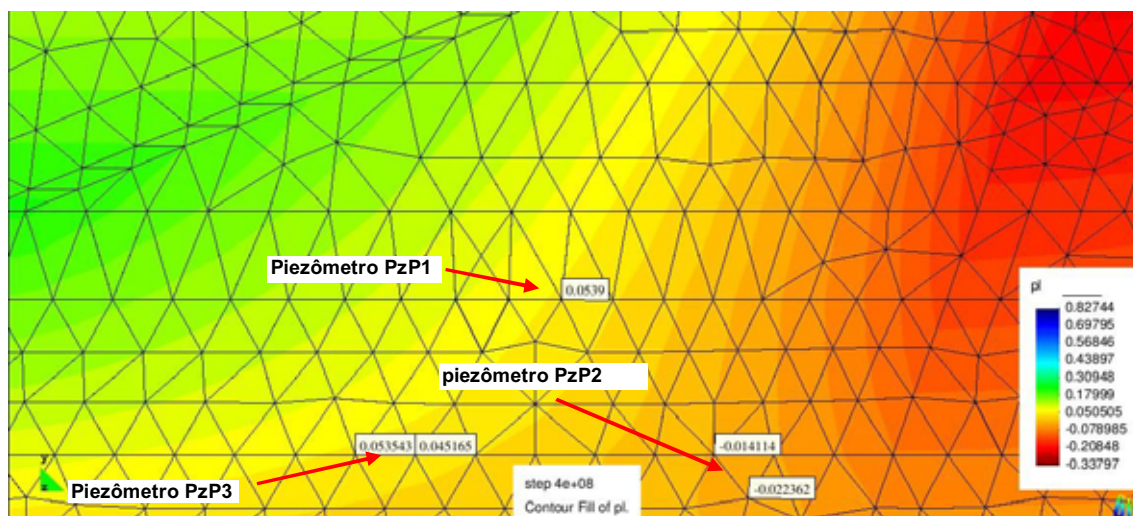


Figura 6.35 – Leituras nos piezômetros pneumáticos PzP1, PzP2 e PzP3.

No gráfico 6.8 pode-se observar a evolução das poro pressões desenvolvidas no maciço da barragem à montante do filtro vertical de areia, nos piezômetros pneumáticos PzP1, PzP2 e PzP3, em que se observa uma elevação de poro pressões quando da compactação das camadas em que estão instalados os piezômetros, para em seguida ocorrer um diminuição das poro pressões até o enchimento do reservatório.

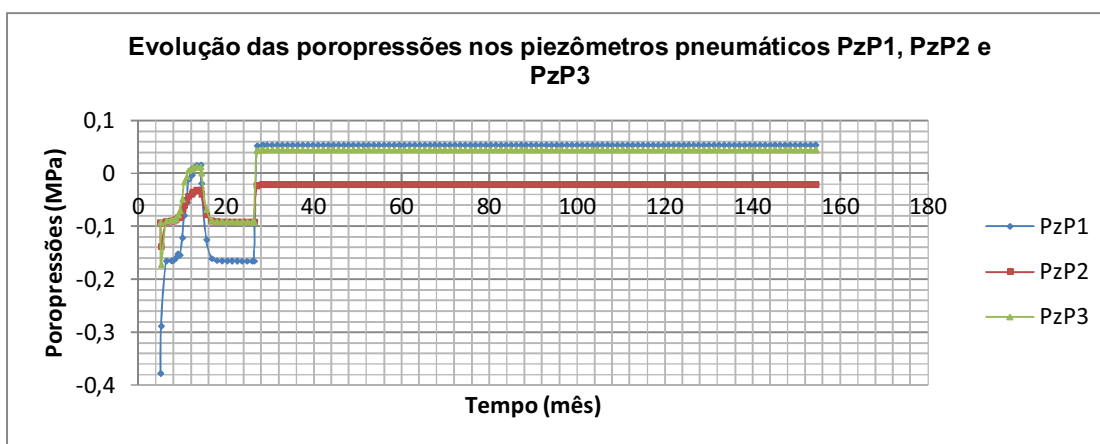


Gráfico 6.8 – Evolução das poropressões nos piezômetros pneumáticos PzP1, PzP2 e PzP3.

Tabela 6.4 – Resumo das leituras nos piezômetros pneumáticos PzP1, PzP2 e PzP3 em MPa.

| Leituras nos piezômetros | PzP1  | PzP2   | PzP3  |
|--------------------------|-------|--------|-------|
| Modelagem                | 0,054 | -0,018 | 0,05  |
| Instrumentação           | 0,113 | 0,053  | 0,102 |

No gráfico 6.9 esta a comparação entre as poropressões lidas nos piezômetros pneumáticos, instalados no maciço da barragem, à montante do filtro vertical de areia e as leituras obtidas na modelagem. Houve uma concordância razoável entre as leituras lidas nos piezômetros PzP1 e PzP3 e os resultados na modelagem.

No piezômetro PzP2 não houve uma boa concordância entre os valores lidos no instrumento e os valores obtidos na modelagem numérica.

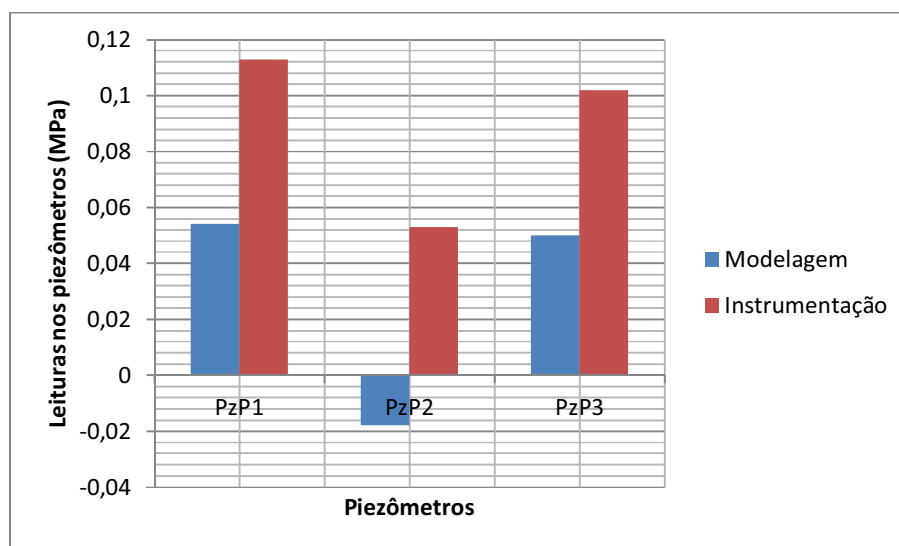


Gráfico 6.9 – Gráfico relacionando leituras piezométricas na instrumentação e na modelagem.

Na Figura 6.36 Constam as leituras nos piezômetros PzC7, PzC8 e PzC9 e sua evolução ao longo do tempo.

Os piezômetros se encontram localizados na parte central do maciço da barragem, o piezômetro PzC7 encontra-se instalado à jusante do filtro vertical de areia e acima do filtro horizontal de areia.

A cota de instalação do piezômetro de CasaGrande PzC7 é de 26,50 m, acima da cota do filtro de areia horizontal que é de 23,00 m. A primeira leitura no piezômetro PzC7, quando do término da construção da barragem, foi de 32,075 m, ou seja, em torno de 5,575 m de coluna d'água, leitura que chama atenção pela posição em que o piezômetro se encontra instalado, numa área protegida pelo filtro vertical e pelo filtro horizontal.

O piezômetro PzC9 esta localizado no filtro horizontal de areia, com a finalidade de verificar o funcionamento do mesmo. Uma elevação de poro pressão no filtro horizontal de areia, poderá indicar uma colmatagem do mesmo. O piezômetro PzC8 encontra-se localizado na fundação, na parte central da barragem.

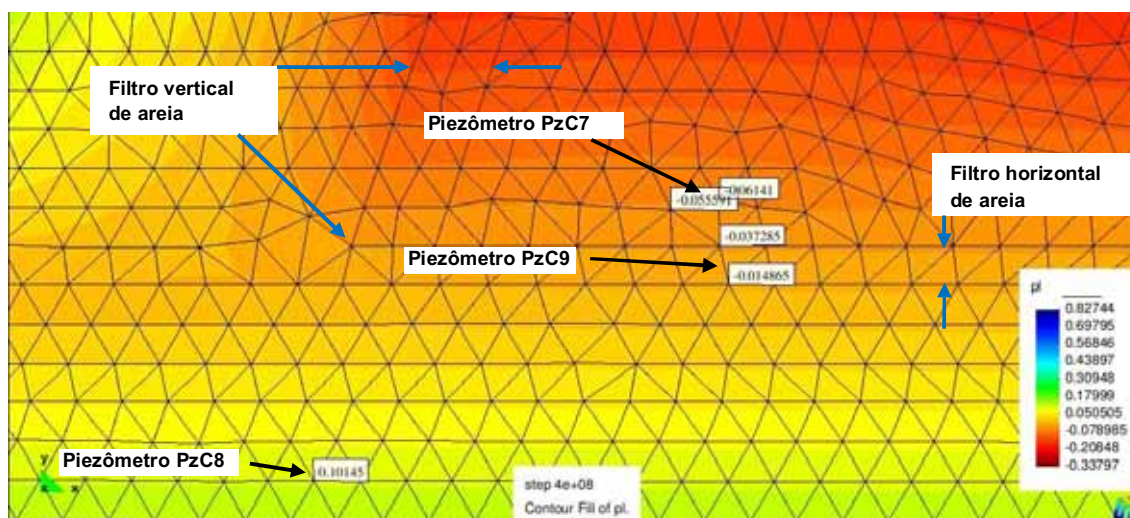


Figura 6.36 – Leituras nos piezômetros PzC8, PzC7 e PzC9.

No Gráfico 6.10 observa-se a evolução do desenvolvimento das poro pressões nos piezômetros de CasaGrande PzC7 e PzC9 e o desenvolvimento das subpressões no piezômetro PzC8, que foi instalado na fundação da barragem.

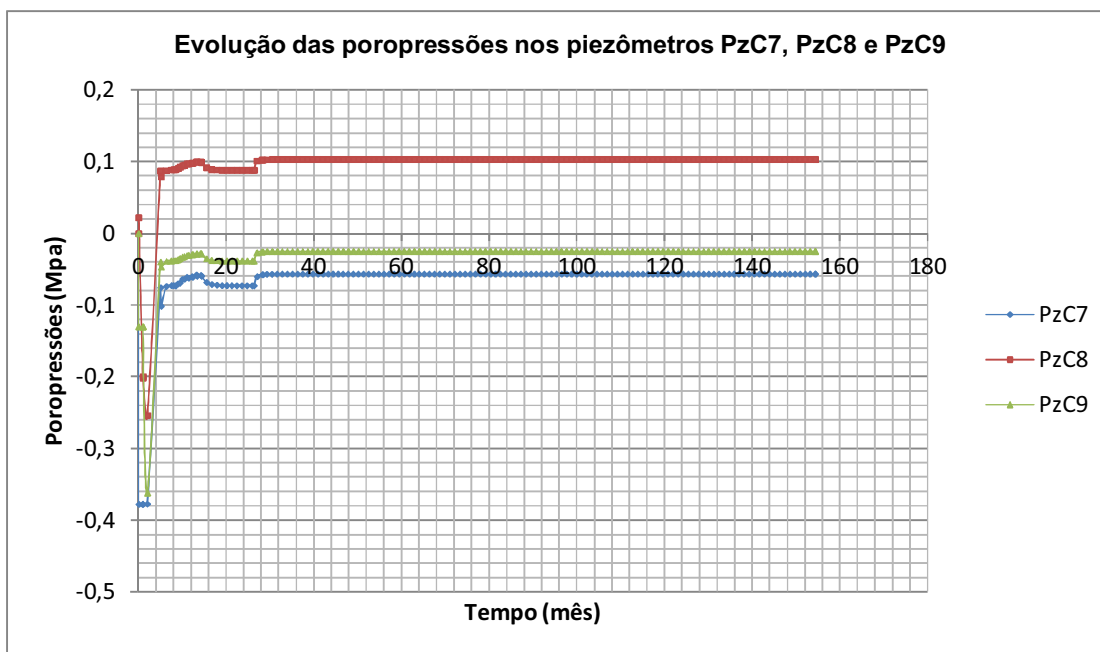


Gráfico 6.10 – Evolução das leituras nos piezômetros PzC7, PzC8 e PzC9 ao longo do tempo.

A leitura da cota piezométrica no piezômetro PzC7, se manteve constante desde 25/06/1985, praticamente, dois anos e meio, desde a instalação do piezômetro até a realização da última leitura em 01/02/1988, ou seja, igual a cota da instalação do piezômetro, o que faz sentido, uma vez que o mesmo, está localizado à jusante do filtro vertical, e pouco acima do filtro Horizontal.

O acidente de final de construção da barragem foi em dezembro de 1981, mais ou menos, um ano depois, no mês de dezembro de 1982, quando do primeiro enchimento do reservatório, foram realizadas as primeira leitura nos piezômetros PzC7, PzC8 e PzC9.

Tabela 6.5 – Resumo das leituras nos piezômetros pneumáticos PzC7, PzC8 e PzC9.

| Leituras nos piezômetros (MPa) | PzC7    | PzC8    | PzC9     |
|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Modelagem                      | -0,0590 | 0,10145 | -0,02608 |
| Instrumentação                 | 0,00107 | 0,11023 | -0,00486 |

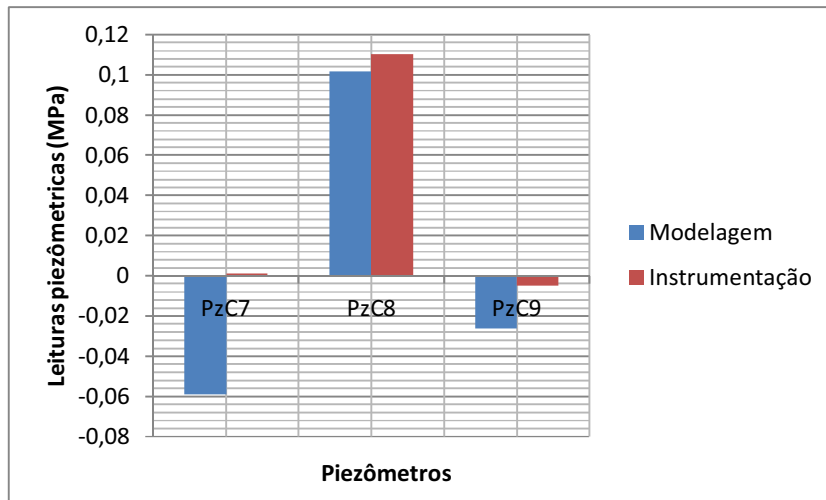


Gráfico 6.11 – Evolução das leituras nos piezômetros PzC7, PzC8 e PzC9.

No gráfico 6.12, pode-se observar a evolução das poropressões desenvolvidas, quando da etapa de construção, enchimento e comportamento da barragem em 13 anos, das três primeiras camadas compactadas: primeira camada (PC) foi analisada no elemento 10, na segunda camada (SC), foi analisada as poropressões no elemento 376 e na terceira camada (TC), foi analisada as poropressões no elemento 7462.

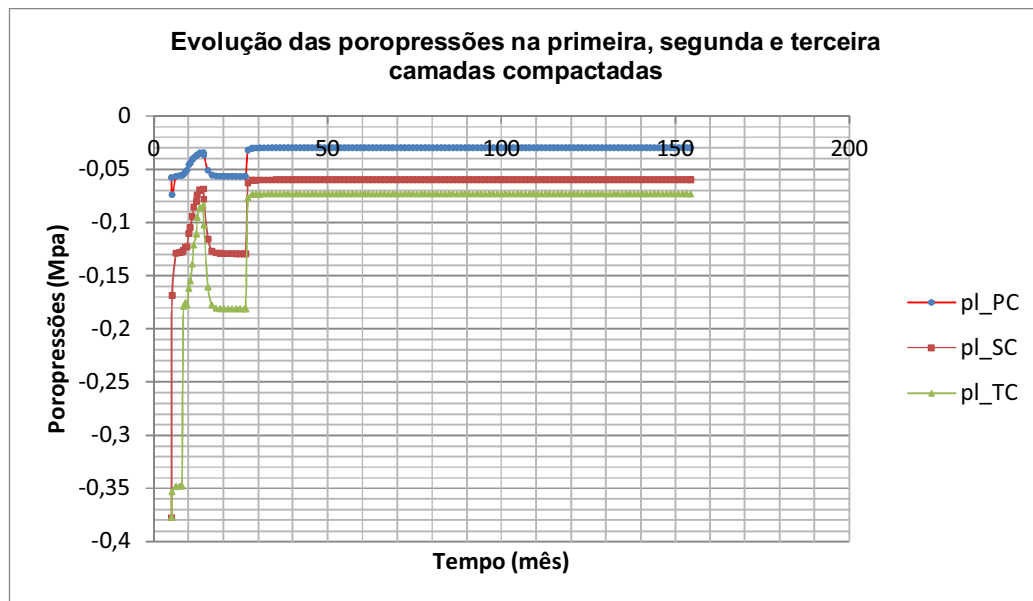


Gráfico 6.12 – Evolução das poropressões quando da construção das três primeiras camadas.

No gráfico 6.13 observa-se a evolução das poro pressões desenvolvidas durante a construção, enchimento e comportamento do maciço da barragem, na compactação da quarta camada (QC) no elemento 3397, na compactação da quinta camada (QTAC) no elemento 5179 e na compactação da sexta camada de aterro, no elemento 5251, onde se pode observar picos de poropressões desenvolvidas nas camadas, em virtude das mesmas serem compactadas na condição não drenada.

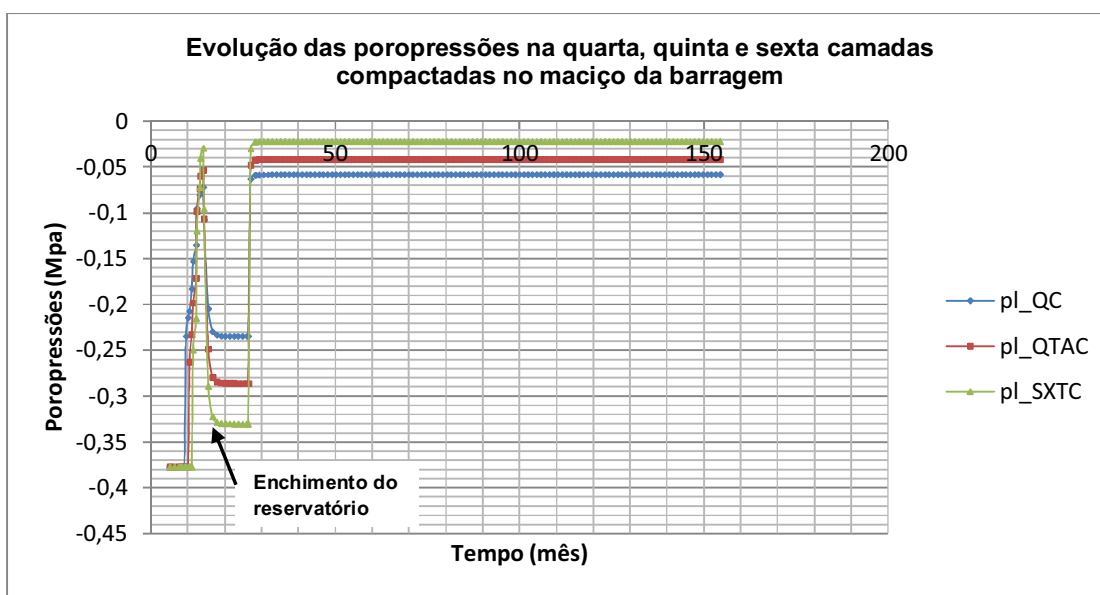


Gráfico 6.13 – Evolução das poro pressões na execução do aterro do maciço da barragem, nas camadas quatro, cinco e sexta.

No gráfico 6.14 pode-se observar a evolução das poropressões desenvolvidas, quando da construção, enchimento do reservatório e comportamento da barragem nas camadas: sétima (SETC), no elemento 5369 e na oitava (OC) e última camada do aterro compactado do maciço, no elemento 5565, observando-se o aparecimento de picos de poropressões, quando da compactação das camadas na condição não drenada.

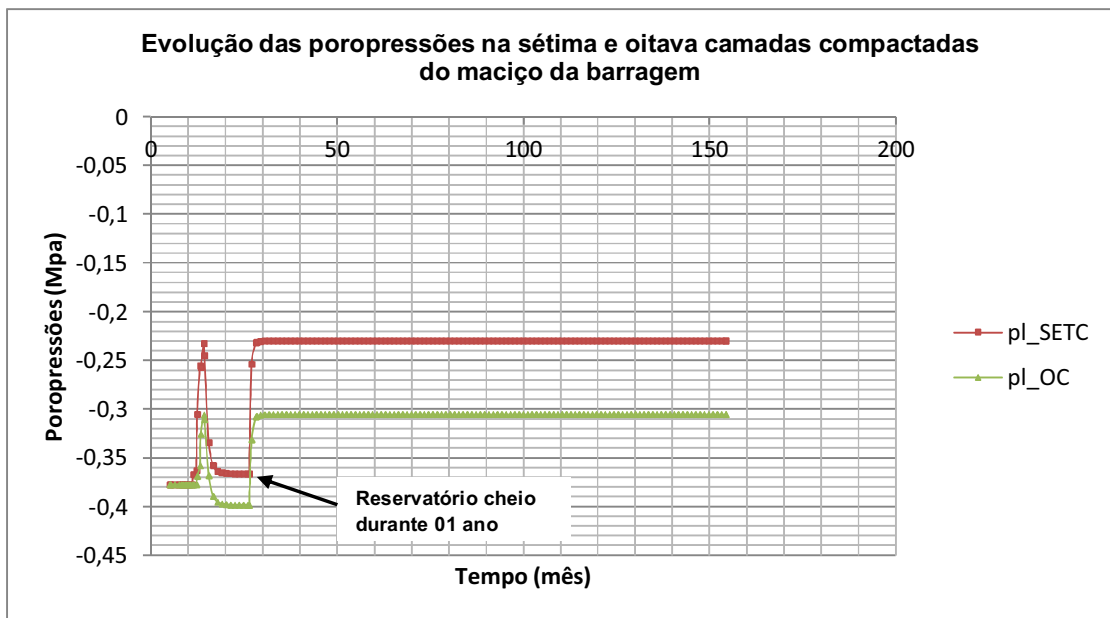


Gráfico 6.14 – Evolução das poro pressões na sexta, sétima e oitava (e última) camada.

## Capítulo 7: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

- A modelagem numérica apresentou resultados coerentes no que diz respeito ao comportamento mecânico do maciço da barragem (deformações, deslocamentos verticais) quando comparados aos dados das instrumentações de medição de deslocamentos verticais (tassômetros).
- O modelo representou de forma coerente a construção do maciço da barragem, o comportamento do maciço após o enchimento do reservatório, o colapso observado durante a elevação do maciço, camada por camada, assim como, o colapso ocorrido, quando da saturação de parte do maciço da barragem.
- As poropressões desenvolvidas quando da construção do maciço da barragem, camada a camada, foi bem representada pelo modelo, onde foi possível observar em cada camada o desenvolvimento de picos de poropressões, em virtude do material usado na confecção de cada camada do maciço da barragem, estar na condição não drenada.
- Com relação aos resultados obtidos na modelagem do fluxo de água pela fundação da barragem, no piezômetro de CasaGrande, os valores deram coerentes com os obtidos na instrumentação.
- Nos ensaios edométricos e de cisalhamento direto com sucção controlada, foi possível identificar os corpos de prova na condição pré-adensada (quando a tensão normal aplicada no ensaio de cisalhamento direto é menor do que a tensão de pré-adensamento obtida no ensaio edométrico) e normalmente adensada (quando a tensão normal aplicada no ensaio de cisalhamento direto

com sucção controlada, é maior que a tensão de pré-adensamento do corpo de prova, obtido no ensaio edométrico).

- Os ensaios realizados permitiram obter parâmetros que serviram diretamente ao Modelo Básico de Barcelona (BBM), utilizado na modelagem do acoplamento hidro-mecânico da reconstrução, enchimento e comportamento da barragem ao longo dos anos.
- É interessante que se proceda a realização de uma campanha de ensaios mais completa para caracterização hidro-mecânica dos materiais envolvidos na barragem, através da retirada de amostras indeformadas no corpo da barragem (maciço e fundação).
- É importante que se proceda a instrumentação da barragem, ao longo de toda a sua parte central reconstruída, através de piezômetros de CasaGrande à jusante do eixo da barragem e no pé do talude de jusante, a fim de monitorar as subpressões desenvolvidas naquela área, uma vez que a mesma se apresenta muito úmida, próximo ao pé do talude de jusante, assim como, marcos superficiais no talude de jusante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ÁGUAS, M.F.F., 1999, "Avaliação da barragem de serra da mesa nas fases construtivas e de enchimento do reservatório com auxílio de modelagem numérica". Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ALONSO, E., June, 1993, Constitutive Modelling of Unsaturated Soils, Barcelona-Espanha.

ALONSO, E., "Unsaturated Soil Recent Developments and Application Constitutive Modelling of Unsaturated Soil", Barcelona, 1993.

ALONSO, E. E., GENS; A. & HIGHT, D.W; 1987, "Special problem Soils". General Report. In Proc. 9<sup>th</sup> European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, vol. 3, pp 1087 – 1146.

BEAR, Jacob, 1973, "Dinamics of fluids in porous média".

BEZERRA. L.B. de S., 2010, "Implementação de algoritimos de integração implícita para modelos constitutivos elasto-plásticos na simulação geomecânica" LMCG, CTG, UFPE. Recife.

BOTELHO, B. S. S., 2007. "Equipamento triaxial cúbico para ensaios em solos saturados e não saturados com sucção matricial controlada". Universidade Federal de Viçosa - MG, Dissertação de Mestrado.

CARVALHO, L. H. 1982, "Curso de Barragens de terra com vistas ao Nordeste Brasileiro".

CASTILLO, S. L. M., Modelagem do comportamento Estático e Sísmico da Barragem de Terra de Pomacocha- Peru; Rio de Janeiro, abril de 2003.

CORDÃO NETO, M. P., "Análise Hidromecânica de Barragens de Terra Construídas Com Materiais Colapsíveis", Universidade de Brasília – UNB, Julho de 2005.

COSTA, L. M., análise de fluxo de água em meios porosos não saturados.

COSTA, L. M., 2000, "Análise hidro mecânica de solos não saturados com aplicação a barragens de terra". Tese de Doutorado, COPPE/RJ, Rio de Janeiro.

CRUZ, P. T. da, 1996, “100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto”. São Paulo – S.P.

D.N.O.C.S., 1990, BARRAGENS NO NORDESTE BRASILEIRO.

DURAND, R. D. F., “Análise Tridimensional de Estruturas Geotecnicas submetidas a Reforço e Drenagem”, Uiversidade de Brasília - UNB, março de 2008.

ESTEVES, V. P., 1964, Barragens de terra. Escola Politécnica da Universidade da Paraíba. Campina Grande – PB.

FRANÇA, P. D., Estudo de comportamento de túneis – análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos; São Paulo, 2006

FREDLUND, D. G. and RAHARDJO, H., 1993, Soil mechanics for unsaturated soils.

FUTAI, M. M., 1997, “Análise de ensaios edométricos com sucção controlada em solos colapsíveis”. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

FUTAI, M. M., Modelos elastoplásticos para solos não saturados; Rio de Janeiro, setembro de 1997.

GARCIA, O. da C., 2005, “Influência da qualidade da compactação dos reaterros na capacidade de carga de fundação submetidas a esforço de tração”. COOPE, UFRJ.

GEHLING, W.Y.; BICA, A.V.D; FEWERHARMEL,C; PEREIRA, A.; 2004. “Determinação das curvas características de solos coluvionares pelo uso combinado de placa de sucção e método do papel filtro” - 5º Simpósio Brasileiro de solos não saturados, Brasília, D.F.

GENS, A., “Unsaturated Soil Mechanical Behaviour and Constitutive Modelling”. Georgia Institute of Technology, Atlanta, April 2006,

GENS, A. & OLIVELLA, S., 2001, “THM phenomena in saturated and unsaturated porous media” Revue Francaise de Génie Civil – Environmental Geomechanes, V. 5, 6, pp 693 -717.

GENS, A. & PRAT, P., Febrero 2003, “Leis de Comportamiento de Materiales”, Barcelona.

GEOTÉCNICA S.A., Proposta de execução e preços da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, fevereiro de 1979.

GOMES, F. I., Implementação de métodos explícitos de integração com controle de erro para modelos elastoplásticos e visco-elastoplásticos; Recife, fevereiro de 2006.

GUIMARÃES, L. J. do N.; COSTA, L. M.; ARRUDA NETO, M. R.; MALTA, B. P. da S.; PONTES FILHO, I. D.; 2004. “análise numérica de vazamento de gás natural em gasoduto enterrado.

GUIMARÃES, L. J. do N.; MORAIS, M. H. M. F. de; COSTA, L. M.; VASCONCELOS, R. B., 2004, “Análise paramétrica da Permeabilidade e da viscosidade em simulação de fluxo em reservatórios”

HASTENRATH, S. (1990) “Tropical Climate Prediction: A Progress Report, 1985 – 90”. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 71, Issue. 6, PP. 819-825.

HIDROTERRA S.A, Proposta de estudos e projeto da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, julho de 1978.

IBAÑEZ, J. P., “Modelagem Constitutiva Para Solos Com ênfase em Solos Não Saturados”. PUC, DEC, 2003.

INOUE, N., Um modelo acoplado para fluxo bifásico em modelos porosos elastoplásticos; Rio de Janeiro, abril de 2005.

IRMAY, S., 1954. “On the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, Trans. Amer. Geoph. Union. 35, p. 463 – 468.

JUCÁ, J. F. T., 1990, “Comportamiento de suelos parcialmente saturados” Tese de Doutorado, Universidad Politécnica de Madrid - ESPANHA.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V., 1976, “Mecânica de suelos” , M.I.T. Nova York.

LIGOCKI, L. P., “Comportamento Geotécnico da Barragem de Curuá-Uma, Rio de Janeiro, PUC, DEC, 2003.

LODI, P. C., Aplicação do modelo Cam-clay modificado a um solo arenoso; São Paulo, 1998.

MARINHO, F. A. M. & PEREIRA, J. H. F., 1998, XI COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Geotécnia – Mecânica dos solos não saturados, Brasília –D.F.

MARSAL, R. J y NUÑEZ, D. R, 1975, “Presas de tierra y enrocamiento”. México.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C., “Curvas características de sucção do solo laterítico da região de Loundrina, PR. RCT 24 book Page 63, janeiro 2006. Revista Ciência e Tecnologia, V12, nº24 – PP 63 – 74.

MOLANO, N. A. G., “Influencia De La Succion em el Comportamiento Volumétrico de Suelos Compactados”, Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, 2005.

MORENO, M. G. M.,2005, “Modelagem numérica de elevação de subpressão no dique A da UHS- CHESF; Dissertação de Mestrado – CTG, DEC, UFPE.

MOTTA, E. de Q., 2006 “Análise do colapso de um solo compactado devido a inundação e á interação solo - líquido contaminante” CTG, DEC, UFPE.

MUALEM, Y. ,1973, “Modified approach to capillary hysteresis base don a similarity hypothesis” WaterResource Research, V. 9, N.5. p 1321 - 1331.

MUALEM, Y. ,1976, Histerical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media” , Water Resouece Research, v. 12 ; n.6, p1248 – 1254.

OLIVELLA, S., 1998, “CODE-BRIGHT – User’s guide”. Departamiento de Ingenieria del Terreno”. Universidade Politécnica da Catalunya, Barcelona.

OLLER, S. “Fractura Mecánica Un Enfoque Global”, CIMNE y Ediciones UPC, Barcelona, outubro 2000.

PEDROSO, D. M., “Representação Matemática do Comportamento Mecânico Cíclico de Solos Saturados e Não saturados”, Universidade de Brasília – UNB, 2006.

PEREIRA, E. M., 2004, “Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. E.E. São Carlos, USP, 2004, Tese de Doutorado.

POTTS, D. M., DOUNIAS, G. T. and VAUGHAN, P. R., “Finite Elements Analysis and Progressive Failure of Carsington Embankment”, Géotechnique 40 nº 1, 79–101.

POTTS, D. M. AND ZDRAVKOVIC, L., Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Theory”, (Imperial College of Science, Technology and Medicine), London, 1999.

POULOVASSILIS, A.; 1962. “Hysteresis of pore water, na application of the concept of independent domains”. Soil Science, 93, p. 405 – 412.

RIOS, M. G. F., 2006 “ Comportamento de um aterro compactado em campo e laboratório, COPPE, UFRJ.

ROCHA, D. de O., 2007 “Análise hidro-mecânica da Barragem de terra e enrocamento UHE Emborcação. Faculdade de Tecnologia, DECA, UNB.

ROCHA, V. O., 2003, “Barragem Armando Ribeiro Gonçalves: Histórico e Avaliação do Comportamento Atual”. Dissertação de Mestrado, CT/UFRN, Natal-RN.

RODRIGUES, R. A., Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático; São Paulo, 2007.

SANTOS, É. A., 2002, “Estudos de casos utilizando o método dos Elementos Finitos para simulação de Reservatórios de Petróleo”. Tese de Mestrado, CTG/UFPE, Recife-PE.

SARÉ, A. R., Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Uma, Pará; Rio de Janeiro, Março de 2003.

SILVA FILHO, F. C., 1998, “Análise Numérica de problemas em solos não saturados: Modelagem, Implementação e Aplicações Práticas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVEIRA, J.F.A., 2006, “Instrumentação de barragens de terra e enrocamento”, Oficina de Texto, São Paulo.

SOUSA, R. M., Modelagem acoplada hidro-mecânica da perfuração de poços em rochas frágeis; Recife, 2004.

SOUZA NETO, J. B., comportamento de solos colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso); Rio de Janeiro, agosto de 2004.

TECNOSOLO S.A., Reprojetamento da barragem Armando Ribeiro Gonçalves, 2º semestre de 1983.

VAN GENUTCHEN, M. T., 1980. "A closed form equation for predictina the hydraulic conductivity of unsaturated soil". Soil Science Journal American Society, v. 44, p. 892-898.

VELLOSO, R.Q., 2000, "Estudo numérico da estimativa de parâmetros hidráulicos em solos parcialmente saturados", Dissertação de mestrado, PUC, Rio de Janeiro.

## Apêndice A:

### Leituras dos instrumentos instalados no maciço e fundação da barragem.

Leitura dos instrumentos instalados no maciço e fundação da barragem, na seção analisada EST. 53+00

| Piezômetro PZC7 - Estaca 53+03 |                           |            |                           |
|--------------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|
| Data                           | Cotas<br>Piezométricas(m) | Data       | Cotas<br>Piezométricas(m) |
| 13/12/1982                     | 32,075                    | 12/6/1984  | 26,830                    |
| 23/12/1982                     | 31,328                    | 18/6/1984  | 26,800                    |
| 5/12/1982                      | 30,668                    | 25/6/1984  | 26,980                    |
| 11/1/1983                      | 30,638                    | 2/7/1984   | 26,770                    |
| 21/1/1983                      | 30,448                    | 9/7/1984   | 26,750                    |
| 30/1/1983                      | 30,108                    | 16/7/1984  | 26,750                    |
| 1/2/1983                       | 30,158                    | 23/7/1984  | 26,740                    |
| 5/2/1983                       | 30,238                    | 31/7/1984  | 26,720                    |
| 7/2/1983                       | 30,228                    | 6/8/1984   | 26,710                    |
| 9/2/1983                       | 30,198                    | 13/8/1984  | 26,690                    |
| 12/2/1983                      | 30,118                    | 21/8/1984  | 26,690                    |
| 18/2/1983                      | 29,958                    | 27/8/1984  | 26,670                    |
| 20/2/1983                      | 29,918                    | 5/9/1984   | 26,650                    |
| 22/2/1983                      | 29,888                    | 10/9/1984  | 26,630                    |
| 24/2/1983                      | 29,848                    | 18/9/1984  | 26,610                    |
| 26/2/1983                      | 29,597                    | 24/9/1984  | 26,610                    |
| 28/2/1983                      | 29,577                    | 2/10/1984  | 26,610                    |
| 2/3/1983                       | 29,597                    | 9/10/1984  | 26,600                    |
| 4/3/1983                       | 29,637                    | 17/10/1984 | 26,600                    |

|            |        |            |        |
|------------|--------|------------|--------|
| 7/3/1983   | 29,677 | 22/10/1984 | 26,590 |
| 10/3/1983  | 29,677 | 29/10/1984 | 26,580 |
| 13/3/1983  | 29,667 | 6/11/1984  | 26,580 |
| 15/3/1983  | 29,637 | 12/11/1984 | 26,580 |
| 11/10/1983 | 27,800 | 19/11/1984 | 26,550 |
| 17/10/1983 | 27,450 | 27/11/1984 | 26,630 |
| 21/10/1983 | 27,390 | 3/12/1984  | 26,650 |
| 31/10/1983 | 27,400 | 17/12/1984 | 26,600 |
| 7/11/1983  | 27,380 | 24/12/1984 | 26,590 |
| 14/11/1983 | 27,370 | 2/1/1985   | 26,570 |
| 22/11/1983 | 27,340 | 7/1/1985   | 26,550 |
| 28/11/1983 | 27,340 | 14/1/1985  | 26,530 |
| 5/12/1983  | 27,330 | 21/1/1985  | 26,530 |
| 19/12/1983 | 27,270 | 28/1/1985  | 26,530 |
| 27/12/1983 | 27,250 | 6/2/1985   | 26,510 |
| 3/1/1984   | 27,230 | 11/2/1985  | 26,430 |
| 9/1/1984   | 27,200 | 15/2/1985  | 26,420 |
| 16/1/1984  | 27,170 | 21/2/1985  | 26,420 |
| 20/2/1984  | 27,110 | 23/2/1985  | 26,430 |
| 12/3/1984  | 27,000 | 25/2/1985  | 26,440 |
| 19/3/1984  | 26,970 | 27/2/1985  | 26,430 |
| 24/3/1984  | 26,950 | 1/3/1985   | 26,420 |
| 2/4/1984   | 26,940 | 4/3/1985   | 26,460 |
| 6/4/1984   | 26,930 | 8/3/1985   | 26,410 |
| 10/4/1984  | 26,910 | 23/3/1985  | 26,400 |
| 16/4/1984  | 26,910 | 27/3/1985  | 26,430 |
| 23/4/1984  | 26,800 | 10/4/1985  | 26,370 |
| 30/4/1984  | 26,890 | 12/4/1985  | 26,430 |
| 7/5/1984   | 26,770 | 15/4/1985  | 26,440 |
| 21/5/1984  | 26,830 | 18/4/1985  | 26,400 |

|            |        |            |        |
|------------|--------|------------|--------|
| 29/5/1984  | 26,840 | 23/4/1985  | 26,390 |
| 4/6/1984   | 26,820 | 29/4/1985  | 26,410 |
| 3/5/1985   | 26,410 | 5/5/1986   | 26,500 |
| 7/5/1985   | 26,460 | 12/5/1986  | 26,500 |
| 10/5/1985  | 26,400 | 19/5/1986  | 26,500 |
| 15/5/1985  | 26,410 | 27/5/1986  | 26,500 |
| 30/5/1985  | 26,330 | 3/6/1986   | 26,500 |
| 3/6/1985   | 26,500 | 9/6/1986   | 26,500 |
| 7/6/1985   | 26,390 | 16/6/1986  | 26,500 |
| 10/6/1985  | 26,420 | 23/6/1986  | 26,500 |
| 17/6/1985  | 26,380 | 7/7/1986   | 26,500 |
| 25/6/1985  | 26,500 | 21/7/1986  | 26,500 |
| 1/7/1985   | 26,500 | 11/8/1986  | 26,500 |
| 4/7/1985   | 26,500 | 18/8/1986  | 26,500 |
| 18/7/1985  | 26,500 | 25/8/1986  | 26,500 |
| 12/7/1985  | 26,500 | 8/9/1986   | 26,500 |
| 15/7/1985  | 26,500 | 6/10/1986  | 26,500 |
| 22/7/1985  | 26,500 | 20/10/1986 | 26,500 |
| 29/7/1985  | 26,500 | 29/10/1986 | 26,500 |
| 5/8/1985   | 26,500 | 3/11/1986  | 26,500 |
| 12/8/1985  | 26,500 | 13/11/1986 | 26,500 |
| 19/8/1985  | 26,500 | 18/11/1986 | 26,500 |
| 26/8/1985  | 26,500 | 24/11/1986 | 26,500 |
| 3/9/1985   | 26,500 | 1/12/1986  | 26,500 |
| 29/10/1985 | 26,500 | 30/12/1986 | 26,500 |
| 4/11/1985  | 26,500 | 12/1/1987  | 26,500 |
| 11/11/1985 | 26,500 | 19/1/1987  | 26,500 |
| 18/11/1985 | 26,500 | 29/1/1987  | 26,500 |
| 26/11/1985 | 26,500 | 10/2/1987  | 26,500 |
| 3/12/1985  | 26,500 | 16/2/1987  | 26,500 |

|            |        |            |        |
|------------|--------|------------|--------|
| 9/12/1985  | 26,500 | 6/3/1987   | 26,500 |
| 16/12/1985 | 26,500 | 13/4/1987  | 26,500 |
| 24/12/1985 | 26,500 | 11/5/1987  | 26,500 |
| 4/1/1986   | 26,500 | 3/6/1987   | 26,500 |
| 20/1/1986  | 26,500 | 22/6/1987  | 26,500 |
| 28/1/1986  | 26,500 | 27/10/1987 | 26,500 |
| 3/2/1986   | 26,500 | 4/11/1987  | 26,500 |
| 13/2/1986  | 26,500 | 10/11/1987 | 26,500 |
| 18/2/1986  | 26,500 | 16/11/1987 | 26,500 |
| 24/2/1986  | 26,500 | 23/11/1987 | 26,500 |
| 3/3/1986   | 26,500 | 2/12/1987  | 26,500 |
| 10/3/1986  | 26,500 | 11/12/1987 | 26,500 |
| 17/3/1986  | 26,500 | 17/12/1987 | 26,500 |
| 24/3/1986  | 26,500 | 24/12/1987 | 26,500 |
| 31/3/1986  | 26,500 | 6/1/1988   | 26,500 |
| 7/4/1986   | 26,500 | 18/1/1988  | 26,500 |
| 14/4/1986  | 26,500 | 1/2/1988   | 26,500 |
| 28/4/1986  | 26,500 |            |        |

Piezômetro PZC8 - Estaca 53+03

| Data       | Cotas<br>Piezométricas(m) | Data         | Cotas<br>Piezométricas(m) |
|------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| 13/12/1982 | 20,284                    | 27/6/1983    | 20910                     |
| 23/12/1982 | 20,274                    | 1/7/1983     | 20910                     |
| 7/1/1983   | 20,414                    | 4/7/1983     | 20930                     |
| 21/1/1983  | 20,554                    | 8/7/1983     | 20950                     |
| 30/1/1983  | 20,438                    | Sem leituras | ----                      |
| 1/2/1983   | 20,458                    | 13/7/1983    | 20970                     |
| 5/2/1983   | 20,478                    | 18/7/1983    | 20970                     |

|              |        |            |       |
|--------------|--------|------------|-------|
| 7/2/1983     | 20,508 | 22/7/1983  | 21010 |
| 9/2/1983     | 20,518 | 25/7/1983  | 21020 |
| 12/2/1983    | 20,548 | 29/7/1983  | 21020 |
| 18/2/1983    | 20,678 | 2/8/1983   | 21020 |
| 20/2/1983    | 20,738 | 8/8/1983   | 21020 |
| 22/2/1983    | 20,778 | 12/8/1983  | 21020 |
| 24/2/1983    | 20,678 | 15/8/1983  | 21020 |
| 26/2/1983    | 20,648 | 22/8/1983  | 21020 |
| Sem leituras | ----   | 30/8/1983  | 21000 |
| 13/3/1983    | 20,610 | 14/9/1983  | 20970 |
| 15/3/1983    | 20,610 | 22/9/1983  | 20960 |
| 17/3/1983    | 20,630 | 27/9/1983  | 20960 |
| 18/3/1983    | 20,630 | 3/10/1983  | 20960 |
| 31/3/1983    | 20,720 | 11/10/1983 | 20980 |
| 2/4/1983     | 20,750 | 17/10/1983 | 20980 |
| 4/4/1983     | 20,710 | 24/10/1983 | 20980 |
| 5/4/1983     | 20,710 | 31/10/1983 | 20960 |
| 7/4/1983     | 20,730 | 7/11/1983  | 20960 |
| 11/4/1983    | 20,730 | 14/11/1983 | 20960 |
| 13/4/1983    | 20,710 | 22/11/1983 | 20960 |
| 15/4/1983    | 20,720 | 28/11/1983 | 20960 |
| 18/4/1983    | 20,730 | 5/12/1983  | 20970 |
| 20/4/1983    | 20,730 | 19/12/1983 | 20940 |
| 23/4/1983    | 20,760 | 27/12/1983 | 20940 |
| 25/4/1983    | 20,760 | 3/1/1984   | 20980 |
| 27/4/1983    | 20,790 | 9/1/1984   | 21030 |
| 29/4/1983    | 27,770 | 16/1/1984  | 21070 |
| 2/5/1983     | 20,750 | 20/2/1984  | 21060 |
| 6/5/1983     | 20,790 | 12/3/1984  | 21080 |
| 9/5/1983     | 20,780 | 19/3/1984  | 21160 |

|           |        |           |           |
|-----------|--------|-----------|-----------|
| 16/5/1983 | 20,840 | 26/3/1984 | 21200     |
| 19/5/1983 | 20,830 | 2/4/1984  | 21270     |
| 24/5/1983 | 20,870 | 6/4/1984  | 21300     |
| 27/5/1983 | 20,880 | 10/4/1984 | 21350     |
| 30/5/1983 | 20,900 | 16/4/1984 | 21300     |
| 6/6/1983  | 20,900 | 23/4/1984 | 21330     |
| 10/6/1983 | 20,900 | 30/4/1984 | 21320     |
| 13/6/1983 | 20,910 | 7/5/1984  | 21310     |
| 15/6/1983 | 20,900 | 21/5/1984 | Obstruído |
| 17/6/1983 | 20,900 |           |           |
| 20/6/1983 | 20,910 |           |           |
| 22/6/1983 | 20,915 |           |           |
| 24/6/1983 | 20,910 |           |           |

Piezômetro PZC9 - Estaca 53+03

| Data       | Cotas piezométricas(m) |
|------------|------------------------|
| 13/12/2002 | 22,500                 |
| 23/12/1982 | 22,500                 |
| 5/1/1983   | 22,500                 |
| 11/1/1983  | 22,500                 |
| 21/1/1983  | 22,500                 |
| 30/1/1983  | 22,500                 |
| 1/2/1983   | 22,500                 |
| 5/2/1983   | 22,500                 |
| 7/2/1983   | 22,500                 |
| 9/2/1983   | 22,500                 |
| 12/2/1983  | 22,500                 |
| 18/2/1983  | 22,500                 |
| 20/2/1983  | 22,500                 |

|           |        |
|-----------|--------|
| 22/2/1983 | 22,500 |
| 24/2/1983 | 22,500 |
| 26/2/1983 | 22,500 |
| 28/2/1983 | 22,500 |
| 2/3/1983  | 22,500 |
| 4/3/1983  | 22,500 |
| 7/3/1983  | 22,500 |
| 10/3/1983 | 22,500 |
| 13/3/1983 | 22,500 |
| 15/3/1983 | 22,500 |
| 17/3/1983 | 22,500 |
| 18/3/1983 | 22,500 |
| 19/3/1983 | 22,500 |
| 21/3/1983 | 22,500 |

Piezômetro PZP1 - Estaca 53+00

| Data       | Poropressões(kPa) | Data       | Poropressões(kPa) |
|------------|-------------------|------------|-------------------|
| 11/11/1982 | 0                 | 2/9/1983   | 0                 |
| 18/11/1982 | 0                 | 14/9/1983  | 0                 |
| 25/11/1982 | 0                 | 22/9/1983  | 0                 |
| 6/12/1982  | 0                 | 27/9/1983  | 0                 |
| 9/12/1982  | 0                 | 4/10/1983  | 0                 |
| 21/12/1982 | 0                 | 11/10/1983 | 0                 |
| 30/12/1982 | 0                 | 17/10/1983 | 0                 |
| 6/1/1983   | 0                 | 25/10/1983 | 0                 |
| 13/1/1983  | 0                 | 1/11/1983  | 0                 |
| 17/1/1983  | 0                 | 8/11/1983  | 0                 |
| 21/1/1983  | 0                 | 16/11/1983 | 0                 |
| 26/1/1983  | 0                 | 23/11/1983 | 0                 |

|           |   |            |      |
|-----------|---|------------|------|
| 29/1/1983 | 0 | 29/11/1983 | 0    |
| 3/2/1983  | 0 | 6/12/1983  | 0    |
| 7/2/1983  | 0 | 13/12/1983 | 0    |
| 11/2/1983 | 0 | 20/12/1983 | 0    |
| 17/2/1983 | 0 | 27/12/1983 | 0    |
| 21/2/1983 | 0 | 17/1/1984  | 0    |
| 25/2/1983 | 0 | 30/1/1984  | 0    |
| 28/2/1983 | 0 | 7/2/1984   | 0    |
| 5/3/1983  | 0 | 14/2/1984  | 0    |
| 10/3/1983 | 0 | 14/3/1984  | 0    |
| 13/3/1983 | 0 | 20/3/1984  | 0    |
| 17/3/1983 | 0 | 27/3/1984  | 0    |
| 22/3/1983 | 0 | 3/4/1984   | 0    |
| 28/3/1983 | 0 | 6/4/1984   | 0    |
| 7/4/1983  | 0 | 10/4/1984  | 0    |
| 12/4/1983 | 0 | 16/4/1984  | 0    |
| 16/4/1983 | 0 | 30/4/1984  | 0    |
| 19/4/1983 | 0 | 7/5/1984   | 0    |
| 25/4/1983 | 0 | 21/5/1984  | 0    |
| 5/5/1983  | 0 | 29/5/1984  | 0    |
| 12/5/1983 | 0 | 5/6/1984   | 0    |
| 19/5/1983 | 0 | 13/6/1984  | 0    |
| 25/5/1983 | 0 | 18/6/1984  | 0    |
| 1/6/1983  | 0 | 26/6/1984  | 0    |
| 8/6/1983  | 0 | 3/7/1984   | 0    |
| 16/6/1983 | 0 | 10/7/1984  | 0    |
| 21/6/1983 | 0 | 24/7/1984  | 0    |
| 29/6/1983 | 0 | 31/7/1984  | 0    |
| 6/7/1983  | 0 | 7/8/1984   | 0    |
| 12/7/1983 | 0 | 7/8/1984   | 0,15 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 18/7/1983  | 0    | 13/8/1984  | 0,18 |
| 25/7/1983  | 0    | 20/8/1984  | 0,18 |
| 1/8/1983   | 0    | 28/8/1984  | 0,23 |
| 8/8/1983   | 0    | 4/9/1984   | 0,22 |
| 8/8/1983   | 0    | 10/9/1984  | 0,23 |
| 15/8/1983  | 0    | 18/9/1984  | 0,26 |
| 22/8/1983  | 0    | 24/9/1984  | 0,28 |
| 1/10/1984  | 0,28 | 5/8/1985   | 0,89 |
| 9/10/1984  | 0,34 | 12/8/1985  | 0,89 |
| 16/10/1984 | 0,35 | 19/8/1985  | 0,89 |
| 22/10/1984 | 0,36 | 26/8/1985  | 0,89 |
| 29/10/1984 | 0,36 | 3/9/1985   | 0,89 |
| 6/11/1984  | 0,38 | 14/10/1985 | 0,89 |
| 12/11/1984 | 0,38 | 29/10/1985 | 0,89 |
| 19/11/1984 | 0,38 | 4/11/1985  | 0,89 |
| 27/11/1984 | 0,4  | 11/11/1985 | 0,89 |
| 3/12/1984  | 0,4  | 18/11/1985 | 0,89 |
| 16/12/1984 | 0,4  | 26/11/1985 | 0,89 |
| 24/12/1984 | 0,42 | 3/12/1985  | 0,89 |
| 2/1/1985   | 0,44 | 9/12/1985  | 0,89 |
| 7/1/1985   | 0,44 | 16/12/1985 | 0,89 |
| 14/1/1985  | 0,44 | 24/12/1985 | 0,89 |
| 21/1/1985  | 0,44 | 7/1/1986   | 0,89 |
| 28/1/1985  | 0,45 | 20/1/1986  | 0,89 |
| 6/2/1985   | 0,46 | 28/1/1986  | 0,87 |
| 11/2/1985  | 0,46 | 3/2/1986   | 0,87 |
| 15/2/1985  | 0,47 | 13/2/1986  | 0,87 |
| 19/2/1985  | 0,49 | 18/2/1986  | 0,87 |
| 21/2/1985  | 0,51 | 24/2/1986  | 0,87 |
| 23/2/1985  | 0,56 | 3/3/1986   | 0,89 |

|           |      |            |      |
|-----------|------|------------|------|
| 25/2/1985 | 0,61 | 10/3/1986  | 0,91 |
| 27/2/1985 | 0,65 | 17/3/1986  | 0,93 |
| 1/3/1985  | 0,69 | 24/3/1986  | 0,95 |
| 4/3/1985  | 0,71 | 29/3/1986  | 0,95 |
| 18/3/1985 | 0,71 | 31/3/1986  | 0,95 |
| 23/3/1985 | 0,77 | 7/4/1986   | 0,97 |
| 27/3/1985 | 0,77 | 10/4/1986  | 0,97 |
| 10/4/1985 | 0,83 | 14/4/1986  | 0,97 |
| 12/4/1985 | 0,85 | 22/4/1986  | 0,99 |
| 15/4/1985 | 0,87 | 28/4/1986  | 0,99 |
| 18/4/1985 | 0,89 | 5/5/1986   | 1,01 |
| 23/4/1985 | 0,93 | 12/5/1986  | 1,01 |
| 29/4/1985 | 0,93 | 19/5/1986  | 1,01 |
| 3/5/1985  | 0,93 | 27/5/1986  | 1,01 |
| 7/5/1985  | 0,93 | 3/6/1986   | 0,99 |
| 10/5/1985 | 0,93 | 9/6/1986   | 0,99 |
| 15/5/1985 | 0,93 | 16/6/1986  | 0,99 |
| 21/5/1985 | 0,93 | 23/6/1986  | 0,99 |
| 27/5/1985 | 0,93 | 7/7/1986   | 0,99 |
| 30/5/1985 | 0,91 | 21/7/1986  | 0,99 |
| 3/6/1985  | 0,91 | 11/8/1986  | 0,97 |
| 7/6/1985  | 0,91 | 18/8/1986  | 0,97 |
| 10/6/1985 | 0,89 | 25/8/1986  | 0,97 |
| 17/6/1985 | 0,89 | 8/9/1986   | 0,95 |
| 5/6/1985  | 0,89 | 16/9/1986  | 0,95 |
| 1/7/1985  | 0,89 | 22/9/1986  | 0,95 |
| 4/7/1985  | 0,89 | 6/10/1986  | 0,95 |
| 8/7/1985  | 0,89 | 20/10/1986 | 0,95 |
| 15/7/1985 | 0,89 | 29/10/1986 | 0,95 |
| 22/7/1985 | 0,89 | 4/11/1986  | 0,95 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 1/8/1985   | 0,89 | 13/11/1986 | 0,93 |
| 18/11/1986 | 0,93 | 11/8/1988  | 1,01 |
| 24/11/1986 | 0,93 | 30/8/1988  | 1,01 |
| 1/12/1986  | 0,91 | 16/9/1988  | 1,01 |
| 2/12/1986  | 0,91 | 22/9/1988  | 1,01 |
| 11/12/1986 | 0,91 | 29/9/1988  | 1,01 |
| 15/12/1986 | 0,91 | 6/10/1988  | 1,01 |
| 23/12/1986 | 0,91 | 13/10/1988 | 1,01 |
| 30/12/1986 | 0,91 | 28/10/1988 | 1,01 |
| 12/1/1987  | 0,89 | 3/11/1988  | 1,01 |
| 19/1/1987  | 0,89 | 1/12/1988  | 1,01 |
| 29/1/1987  | 0,89 | 15/12/1988 | 0,97 |
| 10/2/1987  | 0,89 | 12/1/1989  | 0,97 |
| 16/2/1987  | 0,89 | 27/1/1989  | 0,97 |
| 6/3/1987   | 0,89 | 9/2/1989   | 0,95 |
| 16/3/1987  | 0,87 | 24/2/1989  | 0,95 |
| 13/4/1987  | 0,87 | 11/5/1989  | 0,99 |
| 11/5/1987  | 0,93 | 22/5/1989  | 0,99 |
| 19/5/1987  | 0,95 | 31/5/1989  | 1,03 |
| 25/5/1987  | 0,95 | 15/6/1989  | 1,03 |
| 3/6/1987   | 0,97 | 26/6/1989  | 1,04 |
| 22/6/1987  | 0,97 | 5/7/1989   | 1,04 |
| 27/10/1987 | 0,97 | 3/8/1989   | 1,04 |
| 4/11/1987  | 0,97 | 23/8/1989  | 1,03 |
| 10/11/1987 | 0,97 | 6/9/1989   | 1,03 |
| 16/11/1987 | 0,97 | 15/9/1989  | 1,03 |
| 23/11/1987 | 0,97 | 2/10/1989  | 1,03 |
| 2/12/1987  | 0,95 | 11/10/1989 | 1,03 |
| 11/12/1987 | 0,96 | 23/10/1989 | 1,05 |
| 17/12/1987 | 0,93 | 30/10/1989 | 1,05 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 24/12/1987 | 0,93 | 8/11/1989  | 1,07 |
| 30/12/1987 | 0,93 | 17/11/1989 | 1,07 |
| 6/1/1988   | 0,93 | 27/11/1989 | 1,07 |
| 18/1/1988  | 0,93 | 4/12/1989  | 1,07 |
| 25/1/1988  | 0,93 | 14/12/1989 | 1,09 |
| 1/2/1988   | 0,93 | 21/12/1989 | 1,09 |
| 11/2/1988  | 0,93 | 8/1/1990   | 1,09 |
| 22/2/1988  | 0,93 | 26/1/1990  | 1,09 |
| 2/3/1988   | 0,93 | 31/1/1990  | 1,09 |
| 16/3/1988  | 0,93 | 5/2/1990   | 1,09 |
| 27/3/1988  | 0,93 | 19/2/1990  | 1,09 |
| 7/4/1988   | 0,91 | 1/3/1990   | 1,09 |
| 21/4/1988  | 0,91 | 9/3/1990   | 1,11 |
| 28/4/1988  | 0,91 | 13/3/1990  | 1,11 |
| 4/5/1988   | 0,93 | 21/3/1990  | 1,11 |
| 11/5/1988  | 0,93 | 29/3/1990  | 1,11 |
| 23/5/1988  | 0,93 | 9/4/1990   | 1,11 |
| 1/6/1988   | 0,93 | 16/4/1990  | 1,11 |
| 8/6/1988   | 0,99 | 24/4/1990  | 1,11 |
| 13/6/1988  | 0,99 | 2/5/1990   | 1,11 |
| 27/6/1988  | 1,01 | 8/5/1990   | 1,11 |
| 6/7/1988   | 1,01 | 22/5/1990  | 1,11 |
| 13/7/1988  | 1,01 | 5/6/1990   | 1,11 |
| 20/7/1988  | 1,01 | 15/6/1990  | 1,09 |
| 2/8/1988   | 1,01 | 22/6/1990  | 1,11 |
| 2/7/1990   | 1,11 | 21/11/1991 | 1,13 |
| 18/7/1990  | 1,11 | 28/11/1991 | 1,13 |
| 26/7/1990  | 1,11 | 11/12/1991 | 1,11 |
| 7/8/1990   | 1,11 | 30/12/1991 | 1,11 |
| 21/8/1990  | 1,11 | 9/1/1992   | 1,11 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 29/8/1990  | 1,11 | 16/1/1992  | 1,13 |
| 11/9/1990  | 1,11 | 5/2/1992   | 1,13 |
| 20/9/1990  | 1,13 | 13/2/1992  | 1,13 |
| 1/10/1990  | 1,11 | 5/3/1992   | 1,11 |
| 9/10/1990  | 1,11 | 12/3/1992  | 1,11 |
| 15/10/1990 | 1,11 | 19/3/1992  | 1,11 |
| 23/10/1990 | 1,11 | 30/3/1992  | 1,11 |
| 30/10/1990 | 1,11 | 9/4/1992   | 1,11 |
| 6/11/1990  | 1,11 | 30/4/1992  | 1,11 |
| 16/11/1990 | 1,11 | 27/5/1992  | 1,13 |
| 27/11/1990 | 1,11 | 4/6/1992   | 1,13 |
| 4/12/1990  | 1,11 | 10/6/1992  | 1,13 |
| 13/12/1990 | 1,11 | 22/6/1992  | 1,13 |
| 20/12/1990 | 1,11 | 30/6/1992  | 1,13 |
| 28/12/1990 | 1,11 | 18/7/1992  | 1,13 |
| 4/1/1991   | 1,09 | 15/7/1992  | 1,13 |
| 8/1/1991   | 1,09 | 20/7/1992  | 1,13 |
| 15/1/1991  | 1,09 | 29/7/1992  | 1,13 |
| 22/1/1991  | 1,09 | 3/8/1992   | 1,13 |
| 29/1/1991  | 1,09 | 10/8/1992  | 1,13 |
| 5/2/1991   | 1,09 | 17/8/1992  | 1,13 |
| 19/2/1991  | 1,09 | 24/8/1992  | 1,13 |
| 28/2/1991  | 1,09 | 1/9/1992   | 1,13 |
| 12/3/1991  | 1,09 | 8/9/1992   | 1,13 |
| 19/3/1991  | 1,09 | 14/9/1992  | 1,13 |
| 28/3/1991  | 1,07 | 29/9/1992  | 1,13 |
| 4/4/1991   | 1,07 | 7/10/1992  | 1,13 |
| 11/4/1991  | 1,07 | 13/10/1992 | 1,13 |
| 16/4/1991  | 1,07 | 27/10/1992 | 1,13 |
| 23/4/1991  | 1,07 | 3/11/1992  | 1,13 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 9/5/1991   | 1,07 | 9/11/1992  | 1,13 |
| 16/5/1991  | 1,07 | 3/3/1993   | 1,11 |
| 23/5/1991  | 1,07 | 4/3/1993   | 1,11 |
| 31/5/1991  | 1,07 | 9/3/1993   | 1,11 |
| 6/6/1991   | 1,07 | 16/3/1993  | 1,11 |
| 13/6/1991  | 1,07 | 29/3/1993  | 1,09 |
| 23/6/1991  | 1,07 | 6/4/1993   | 1,09 |
| 1/7/1991   | 1,07 | 12/4/1993  | 1,09 |
| 8/7/1991   | 1,09 | 19/4/1993  | 1,09 |
| 15/7/1991  | 1,09 | 29/4/1993  | 1,09 |
| 22/7/1991  | 1,09 | 4/5/1993   | 1,09 |
| 1/8/1991   | 1,09 | 10/5/1993  | 1,09 |
| 30/8/1991  | 1,11 | 3/11/1993  | 1,03 |
| 19/9/1991  | 1,11 | 18/11/1993 | 1,03 |
| 1/10/1991  | 1,11 | 25/11/1993 | 1,01 |
| 10/10/1991 | 1,11 | 1/12/1993  | 1,01 |
| 24/10/1991 | 1,11 | 10/12/1993 | 1,01 |
| 7/11/1991  | 1,11 | 23/12/1993 | 1,01 |
| 13/11/1991 | 1,13 | 24/1/1994  | 0,99 |
| 10/2/1994  | 0,99 | 25/6/1996  | 1,03 |
| 17/2/1994  | 0,97 | 2/7/1996   | 1,03 |
| 1/3/1994   | 0,97 | 3/9/1996   | 1,05 |
| 10/3/1994  | 0,97 | 19/9/1996  | 1,05 |
| 17/3/1994  | 0,97 | 9/10/1996  | 1,05 |
| 25/3/1994  | 0,95 | 25/11/1996 | 1,05 |
| 20/4/1994  | 0,93 | 17/12/1996 | 1,05 |
| 6/6/1994   | 0,93 | 8/1/1997   | 1,03 |
| 19/7/1994  | 0,91 | 7/2/1997   | 1,03 |
| 4/8/1994   | 0,91 | 17/2/1997  | 1,03 |
| 22/8/1994  | 0,93 | 25/6/1997  | 0,99 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 25/8/1994  | 0,93 | 28/7/1997  | 0,99 |
| 1/9/1994   | 0,93 | 12/8/1997  | 0,99 |
| 8/9/1994   | 0,93 | 19/8/1997  | 0,99 |
| 13/9/1994  | 0,91 | 8/9/1997   | 0,99 |
| 6/10/1994  | 0,95 | 23/9/1997  | 0,99 |
| 18/10/1994 | 0,95 | 13/10/1997 | 0,99 |
| 1/11/1994  | 0,95 | 17/10/1997 | 0,99 |
| 17/11/1994 | 0,95 | 27/10/1997 | 0,99 |
| 16/12/1994 | 0,95 | 13/1/1998  | 0,99 |
| 27/12/1994 | 0,95 | 27/1/1998  | 0,99 |
| 10/1/1995  | 0,95 | 12/2/1998  | 0,97 |
| 6/2/1995   | 0,95 | 23/4/1998  | 0,99 |
| 20/2/1995  | 0,95 | 26/5/1998  | 0,97 |
| 6/3/1995   | 0,95 | 26/6/1998  | 0,97 |
| 11/4/1995  | 0,95 | 14/7/1998  | 0,97 |
| 19/4/1995  | 0,95 | 26/8/1998  | 0,97 |
| 16/5/1995  | 0,95 | 15/9/1998  | 0,95 |
| 26/5/1995  | 0,95 | 14/10/1998 | 0,95 |
| 31/5/1995  | 0,95 | 4/11/1998  | 0,95 |
| 12/6/1995  | 0,93 | 16/11/1998 | 0,91 |
| 28/8/1995  | 1,01 | 18/12/1998 | 0,91 |
| 28/9/1995  | 1,01 | 14/1/1999  | 0,89 |
| 11/10/1995 | 1,01 | 4/2/1999   | 0,89 |
| 18/10/1995 | 1,01 | 23/2/1999  | 0,89 |
| 26/10/1995 | 1,01 | 15/3/1999  | 0,91 |
| 13/11/1995 | 1,01 | 12/4/1999  | 0,87 |
| 6/12/1995  | 1,01 | 30/6/1999  | 0,83 |
| 14/12/1995 | 1,01 | 18/10/1999 | 0,81 |
| 21/12/1995 | 1,01 | 15/12/1999 | 0,79 |
| 15/1/1996  | 0,99 |            |      |

|           |      |  |  |
|-----------|------|--|--|
| 29/1/1996 | 0,99 |  |  |
| 23/2/1996 | 1,01 |  |  |
| 11/3/1996 | 0,99 |  |  |
| 26/3/1996 | 0,99 |  |  |
| 1/4/1996  | 0,99 |  |  |
| 10/4/1996 | 0,99 |  |  |
| 17/4/1996 | 0,99 |  |  |
| 22/4/1996 | 0,99 |  |  |
| 7/5/1996  | 0,99 |  |  |
| 21/5/1996 | 0,99 |  |  |
| 4/6/1996  | 1,03 |  |  |
| 11/6/1996 | 1,03 |  |  |
| 18/6/1996 | 1,03 |  |  |

Piezômetro PZP2 - Estaca 53+00

| Data       | Poropressões(kPa) | Data       | Poropressões(kPa) |
|------------|-------------------|------------|-------------------|
| 11/11/1982 | 0                 | 27/9/1983  | 0                 |
| 18/11/1982 | 0                 | 4/10/1983  | 0                 |
| 25/11/1982 | 0                 | 11/10/1983 | 0                 |
| 6/12/1982  | 0                 | 17/10/1983 | 0                 |
| 9/12/1982  | 0                 | 25/10/1983 | 0                 |
| 21/12/1982 | 0                 | 1/11/1983  | 0                 |
| 30/12/1982 | 0                 | 8/11/1983  | 0                 |
| 6/1/1983   | 0                 | 16/11/1983 | 0                 |
| 13/1/1983  | 0                 | 23/11/1983 | 0                 |
| 17/1/1983  | 0                 | 29/11/1983 | 0                 |
| 21/1/1983  | 0                 | 6/12/1983  | 0                 |
| 26/1/1983  | 0                 | 13/12/1983 | 0                 |
| 29/1/1983  | 0                 | 20/12/1983 | 0                 |

|           |   |            |   |
|-----------|---|------------|---|
| 3/2/1983  | 0 | 27/12/1983 | 0 |
| 7/2/1983  | 0 | 17/1/1984  | 0 |
| 11/2/1983 | 0 | 30/1/1984  | 0 |
| 17/2/1983 | 0 | 7/2/1984   | 0 |
| 21/2/1983 | 0 | 14/2/1984  | 0 |
| 25/2/1983 | 0 | 14/3/1984  | 0 |
| 28/2/1983 | 0 | 20/3/1984  | 0 |
| 5/3/1983  | 0 | 27/3/1984  | 0 |
| 10/3/1983 | 0 | 3/4/1984   | 0 |
| 13/3/1983 | 0 | 6/4/1984   | 0 |
| 17/3/1983 | 0 | 10/4/1984  | 0 |
| 22/3/1983 | 0 | 16/4/1984  | 0 |
| 28/3/1983 | 0 | 30/4/1984  | 0 |
| 7/4/1983  | 0 | 7/5/1984   | 0 |
| 12/4/1983 | 0 | 21/5/1984  | 0 |
| 16/4/1983 | 0 | 29/5/1984  | 0 |
| 19/4/1983 | 0 | 5/6/1984   | 0 |
| 25/4/1983 | 0 | 13/6/1984  | 0 |
| 5/5/1983  | 0 | 18/6/1984  | 0 |
| 12/5/1983 | 0 | 26/6/1984  | 0 |
| 19/5/1983 | 0 | 3/7/1984   | 0 |
| 25/5/1983 | 0 | 10/7/1984  | 0 |
| 1/6/1983  | 0 | 24/7/1984  | 0 |
| 8/6/1983  | 0 | 31/7/1984  | 0 |
| 16/6/1983 | 0 | 7/8/1984   | 0 |
| 21/6/1983 | 0 | 7/8/1984   | 0 |
| 29/6/1983 | 0 | 13/8/1984  | 0 |
| 6/7/1983  | 0 | 20/8/1984  | 0 |
| 12/7/1983 | 0 | 28/8/1984  | 0 |
| 18/7/1983 | 0 | 4/9/1984   | 0 |

|            |   |            |   |
|------------|---|------------|---|
| 25/7/1983  | 0 | 10/9/1984  | 0 |
| 1/8/1983   | 0 | 18/9/1984  | 0 |
| 8/8/1983   | 0 | 24/9/1984  | 0 |
| 15/8/1983  | 0 | 1/10/1984  | 0 |
| 22/8/1983  | 0 | 9/10/1984  | 0 |
| 2/9/1983   | 0 | 16/10/1984 | 0 |
| 14/9/1983  | 0 | 22/10/1984 | 0 |
| 22/9/1983  | 0 | 29/10/1984 | 0 |
| 6/11/1984  | 0 | 14/10/1985 | 0 |
| 12/11/1984 | 0 | 29/10/1985 | 0 |
| 19/11/1984 | 0 | 4/11/1985  | 0 |
| 27/11/1984 | 0 | 11/11/1985 | 0 |
| 3/12/1984  | 0 | 18/11/1985 | 0 |
| 16/12/1984 | 0 | 26/11/1985 | 0 |
| 24/12/1984 | 0 | 3/12/1985  | 0 |
| 2/1/1985   | 0 | 9/12/1985  | 0 |
| 7/1/1985   | 0 | 16/12/1985 | 0 |
| 14/1/1985  | 0 | 24/12/1985 | 0 |
| 21/1/1985  | 0 | 7/1/1986   | 0 |
| 28/1/1985  | 0 | 20/1/1986  | 0 |
| 6/2/1985   | 0 | 28/1/1986  | 0 |
| 11/2/1985  | 0 | 3/2/1986   | 0 |
| 15/2/1985  | 0 | 13/2/1986  | 0 |
| 19/2/1985  | 0 | 18/2/1986  | 0 |
| 21/2/1985  | 0 | 24/2/1986  | 0 |
| 23/2/1985  | 0 | 3/3/1986   | 0 |
| 25/2/1985  | 0 | 10/3/1986  | 0 |
| 27/2/1985  | 0 | 17/3/1986  | 0 |
| 1/3/1985   | 0 | 24/3/1986  | 0 |
| 4/3/1985   | 0 | 29/3/1986  | 0 |

|           |   |            |   |
|-----------|---|------------|---|
| 18/3/1985 | 0 | 31/3/1986  | 0 |
| 23/3/1985 | 0 | 7/4/1986   | 0 |
| 27/3/1985 | 0 | 10/4/1986  | 0 |
| 10/4/1985 | 0 | 14/4/1986  | 0 |
| 12/4/1985 | 0 | 22/4/1986  | 0 |
| 15/4/1985 | 0 | 28/4/1986  | 0 |
| 18/4/1985 | 0 | 5/5/1986   | 0 |
| 23/4/1985 | 0 | 12/5/1986  | 0 |
| 29/4/1985 | 0 | 19/5/1986  | 0 |
| 3/5/1985  | 0 | 27/5/1986  | 0 |
| 7/5/1985  | 0 | 3/6/1986   | 0 |
| 10/5/1985 | 0 | 9/6/1986   | 0 |
| 15/5/1985 | 0 | 16/6/1986  | 0 |
| 21/5/1985 | 0 | 23/6/1986  | 0 |
| 27/5/1985 | 0 | 7/7/1986   | 0 |
| 30/5/1985 | 0 | 21/7/1986  | 0 |
| 3/6/1985  | 0 | 11/8/1986  | 0 |
| 7/6/1985  | 0 | 18/8/1986  | 0 |
| 10/6/1985 | 0 | 25/8/1986  | 0 |
| 17/6/1985 | 0 | 8/9/1986   | 0 |
| 5/6/1985  | 0 | 16/9/1986  | 0 |
| 1/7/1985  | 0 | 22/9/1986  | 0 |
| 4/7/1985  | 0 | 6/10/1986  | 0 |
| 8/7/1985  | 0 | 20/10/1986 | 0 |
| 15/7/1985 | 0 | 29/10/1986 | 0 |
| 22/7/1985 | 0 | 4/11/1986  | 0 |
| 1/8/1985  | 0 | 13/11/1986 | 0 |
| 5/8/1985  | 0 | 18/11/1986 | 0 |
| 12/8/1985 | 0 | 24/11/1986 | 0 |
| 19/8/1985 | 0 | 1/12/1986  | 0 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 26/8/1985  | 0    | 2/12/1986  | 0    |
| 3/9/1985   | 0    | 11/12/1986 | 0    |
| 15/12/1986 | 0    | 9/3/1990   | 0,17 |
| 23/12/1986 | 0    | 13/3/1990  | 0,19 |
| 30/12/1986 | 0    | 21/3/1990  | 0,21 |
| 12/1/1987  | 0    | 29/3/1990  | 0,21 |
| 19/1/1987  | 0    | 9/4/1990   | 0,23 |
| 29/1/1987  | 0    | 24/4/1990  | 0,23 |
| 10/2/1987  | 0    | 2/5/1990   | 0,25 |
| 16/2/1987  | 0    | 22/5/1990  | 0,25 |
| 6/3/1987   | 0    | 5/6/1990   | 0,27 |
| 16/3/1987  | 0    | 15/6/1990  | 0,27 |
| 13/4/1987  | 0    | 22/6/1990  | 0,29 |
| 11/5/1987  | 0    | 2/7/1990   | 0,29 |
| 19/5/1987  | 0    | 18/7/1990  | 0,31 |
| 25/5/1987  | 0    | 26/7/1990  | 0,33 |
| 3/6/1987   | 0,05 | 11/9/1990  | 0,33 |
| 22/6/1987  | 0    | 20/9/1990  | 0,35 |
| 27/10/1987 | 0    | 15/10/1990 | 0,35 |
| 4/11/1987  | 0    | 23/10/1990 | 0,33 |
| 10/11/1987 | 0,05 | 6/11/1990  | 0,33 |
| 23/11/1987 | 0,05 | 16/11/1990 | 0,35 |
| 2/12/1987  | 0,07 | 27/11/1990 | 0,35 |
| 11/12/1987 | 0,06 | 4/12/1990  | 0,37 |
| 17/12/1987 | 0,07 | 13/12/1990 | 0,35 |
| 24/12/1987 | 0,07 | 20/12/1990 | 0,35 |
| 30/12/1987 | 0,07 | 28/12/1990 | 0,37 |
| 6/1/1988   | 0,07 | 8/1/1991   | 0,37 |
| 18/1/1988  | 0,07 | 15/1/1991  | 0,35 |
| 25/1/1988  | 0,07 | 22/1/1991  | 0,35 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 1/2/1988   | 0,07 | 29/1/1991  | 0,37 |
| 11/2/1988  | 0,07 | 5/2/1991   | 0,37 |
| 22/2/1988  | 0,07 | 19/2/1991  | 0,39 |
| 2/3/1988   | 0,07 | 11/4/1991  | 0,39 |
| 16/3/1988  | 0,07 | 16/4/1991  | 0,41 |
| 27/3/1988  | 0,07 | 1/8/1991   | 0,41 |
| 7/4/1988   | 0,07 | 30/8/1991  | 0,43 |
| 21/4/1988  | 0,09 | 19/9/1991  | 0,43 |
| 1/5/1988   | 0,09 | 1/10/1991  | 0,45 |
| 8/5/1988   | 0,07 | 10/10/1991 | 0,47 |
| 22/5/1989  | 0,07 | 21/11/1991 | 0,47 |
| 31/5/1989  | 0,08 | 28/11/1991 | 0,45 |
| 5/7/1989   | 0,08 | 11/12/1991 | 0,47 |
| 3/8/1989   | 0,09 | 30/12/1991 | 0,45 |
| 23/8/1989  | 0,11 | 16/1/1992  | 0,45 |
| 6/9/1989   | 0,09 | 5/2/1992   | 0,47 |
| 8/11/1989  | 0,09 | 13/2/1992  | 0,47 |
| 17/11/1989 | 0,11 | 5/3/1992   | 0,45 |
| 27/11/1989 | 0,09 | 19/3/1992  | 0,47 |
| 4/12/1989  | 0,11 | 30/3/1992  | 0,45 |
| 21/12/1989 | 0,11 | 9/4/1992   | 0,45 |
| 8/1/1990   | 0,13 | 30/4/1992  | 0,47 |
| 26/1/1990  | 0,15 | 27/5/1992  | 0,45 |
| 31/1/1990  | 0,15 | 4/6/1992   | 0,47 |
| 5/2/1990   | 0,13 | 10/6/1992  | 0,49 |
| 19/2/1990  | 0,17 | 22/6/1992  | 0,45 |
| 30/6/1992  | 0,47 | 28/9/1995  | 0,45 |
| 8/7/1992   | 0,45 | 11/10/1995 | 0,45 |
| 10/8/1992  | 0,45 | 18/10/1995 | 0,45 |
| 17/8/1992  | 0,47 | 26/10/1995 | 0,49 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 4/8/1992   | 0,45 | 13/11/1995 | 0,45 |
| 1/9/1992   | 0,47 | 6/12/1995  | 0,45 |
| 14/9/1992  | 0,47 | 14/12/1995 | 0,45 |
| 7/10/1992  | 0,45 | 26/12/1995 | 0,45 |
| 13/10/1992 | 0,45 | 15/1/1996  | 0,49 |
| 27/10/1992 | 0,47 | 29/1/1996  | 0,49 |
| 3/11/1992  | 0,45 | 23/2/1996  | 0,49 |
| 9/11/1992  | 0,45 | 11/3/1996  | 0,47 |
| 3/3/1993   | 0,47 | 26/3/1996  | 0,49 |
| 4/3/1993   | 0,47 | 1/4/1996   | 0,49 |
| 9/3/1993   | 0,49 | 10/4/1996  | 0,51 |
| 6/4/1993   | 0,49 | 17/4/1996  | 0,51 |
| 12/4/1993  | 0,47 | 22/4/1996  | 0,49 |
| 19/4/1993  | 0,47 | 7/5/1996   | 0,49 |
| 29/4/1993  | 0,45 | 21/5/1996  | 0,49 |
| 4/5/1993   | 0,45 | 4/6/1996   | 0,49 |
| 10/5/1993  | 0,47 | 11/6/1996  | 0,49 |
| 3/11/1993  | 0,47 | 18/6/1996  | 0,49 |
| 18/11/1993 | 0,45 | 25/6/1996  | 0,47 |
| 25/11/1993 | 0,49 | 2/7/1996   | 0,47 |
| 1/12/1993  | 0,51 | 3/9/1996   | 0,47 |
| 10/12/1993 | 0,49 | 19/9/1996  | 0,47 |
| 23/12/1993 | 0,51 | 9/10/1996  | 0,47 |
| 24/1/1994  | 0,49 | 25/10/1996 | 0,47 |
| 17/3/1994  | 0,49 | 17/12/1996 | 0,53 |
| 25/3/1994  | 0,47 | 8/1/1997   | 0,53 |
| 19/7/1994  | 0,47 | 7/2/1997   | 0,53 |
| 4/8/1994   | 0,45 | 17/2/1997  | 0,53 |
| 22/8/1994  | 0,45 | 25/6/1997  | 0,51 |
| 25/8/1994  | 0,45 | 28/7/1997  | 0,53 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 1/9/1994   | 0,45 | 12/8/1997  | 0,53 |
| 3/9/1994   | 0,45 | 19/8/1997  | 0,51 |
| 13/9/1994  | 0,43 | 8/9/1997   | 0,51 |
| 6/10/1994  | 0,43 | 23/9/1997  | 0,51 |
| 18/10/1994 | 0,43 | 13/10/1997 | 0,51 |
| 1/11/1994  | 0,43 | 17/11/1997 | 0,51 |
| 12/11/1994 | 0,43 | 27/11/1997 | 0,49 |
| 16/12/1994 | 0,43 | 13/1/1998  | 0,49 |
| 27/12/1994 | 0,43 | 27/1/1998  | 0,49 |
| 10/1/1995  | 0,43 | 12/2/1998  | 0,51 |
| 16/2/1995  | 0,43 | 23/4/1998  | 0,53 |
| 20/2/1995  | 0,43 | 26/5/1998  | 0,53 |
| 6/3/1995   | 0,43 | 26/6/1998  | 0,53 |
| 11/4/1995  | 0,45 | 14/7/1998  | 0,53 |
| 19/4/1995  | 0,45 | 26/8/1998  | 0,53 |
| 16/5/1995  | 0,47 | 15/9/1998  | 0,51 |
| 26/5/1995  | 0,47 | 14/10/1998 | 0,51 |
| 31/5/1995  | 0,47 | 4/11/1998  | 0,51 |
| 12/6/1995  | 0,47 | 16/11/1998 | 0,43 |
| 28/8/1995  | 0,49 | 8/12/1998  | 0,49 |
| 14/1/1999  | 0,49 | 12/4/1999  | 0,47 |
| 4/2/1999   | 0,51 | 30/6/1999  | 0,45 |
| 23/2/1999  | 0,47 | 18/10/1999 | 0,45 |
| 15/3/1999  | 0,45 | 15/10/1999 | 0,43 |

| Piezômetro PZP3 - Estaca 53+00 |                   |           |                   |
|--------------------------------|-------------------|-----------|-------------------|
| Data                           | Poropressões(kPa) | Data      | Poropressões(kPa) |
| 11/11/1982                     | 0                 | 14/9/1983 | 0                 |
| 18/11/1982                     | 0                 | 22/9/1983 | 0                 |

|            |   |            |   |
|------------|---|------------|---|
| 25/11/1982 | 0 | 27/9/1983  | 0 |
| 6/12/1982  | 0 | 4/10/1983  | 0 |
| 9/12/1982  | 0 | 11/10/1983 | 0 |
| 21/12/1982 | 0 | 17/10/1983 | 0 |
| 30/12/1982 | 0 | 25/10/1983 | 0 |
| 6/1/1983   | 0 | 1/11/1983  | 0 |
| 13/1/1983  | 0 | 8/11/1983  | 0 |
| 17/1/1983  | 0 | 16/11/1983 | 0 |
| 21/1/1983  | 0 | 23/11/1983 | 0 |
| 26/1/1983  | 0 | 29/11/1983 | 0 |
| 29/1/1983  | 0 | 6/12/1983  | 0 |
| 3/2/1983   | 0 | 13/12/1983 | 0 |
| 7/2/1983   | 0 | 20/12/1983 | 0 |
| 11/2/1983  | 0 | 27/12/1983 | 0 |
| 17/2/1983  | 0 | 17/1/1984  | 0 |
| 21/2/1983  | 0 | 30/1/1984  | 0 |
| 25/2/1983  | 0 | 7/2/1984   | 0 |
| 28/2/1983  | 0 | 14/2/1984  | 0 |
| 5/3/1983   | 0 | 14/3/1984  | 0 |
| 10/3/1983  | 0 | 20/3/1984  | 0 |
| 13/3/1983  | 0 | 27/3/1984  | 0 |
| 17/3/1983  | 0 | 3/4/1984   | 0 |
| 22/3/1983  | 0 | 6/4/1984   | 0 |
| 28/3/1983  | 0 | 11/4/1984  | 0 |
| 7/4/1983   | 0 | 16/4/1984  | 0 |
| 12/4/1983  | 0 | 30/4/1984  | 0 |
| 16/4/1983  | 0 | 7/5/1984   | 0 |
| 19/4/1983  | 0 | 21/5/1984  | 0 |
| 25/4/1983  | 0 | 29/5/1984  | 0 |
| 5/5/1983   | 0 | 5/6/1984   | 0 |

|            |   |            |   |
|------------|---|------------|---|
| 12/5/1983  | 0 | 13/6/1984  | 0 |
| 19/5/1983  | 0 | 18/6/1984  | 0 |
| 25/5/1983  | 0 | 26/6/1984  | 0 |
| 1/6/1983   | 0 | 3/7/1984   | 0 |
| 8/6/1983   | 0 | 10/7/1984  | 0 |
| 16/6/1983  | 0 | 24/7/1984  | 0 |
| 21/6/1983  | 0 | 31/7/1984  | 0 |
| 29/6/1983  | 0 | 7/8/1984   | 0 |
| 6/7/1983   | 0 | 13/8/1984  | 0 |
| 12/7/1983  | 0 | 20/8/1984  | 0 |
| 18/7/1983  | 0 | 28/8/1984  | 0 |
| 25/7/1983  | 0 | 4/9/1984   | 0 |
| 1/8/1983   | 0 | 10/9/1984  | 0 |
| 8/8/1983   | 0 | 18/9/1984  | 0 |
| 15/8/1983  | 0 | 24/9/1984  | 0 |
| 22/8/1983  | 0 | 1/10/1984  | 0 |
| 2/9/1983   | 0 | 9/10/1984  | 0 |
| 16/10/1984 | 0 | 19/8/1985  | 0 |
| 22/10/1984 | 0 | 26/8/1985  | 0 |
| 29/10/1984 | 0 | 3/9/1985   | 0 |
| 6/11/1984  | 0 | 14/10/1985 | 0 |
| 12/11/1984 | 0 | 29/10/1985 | 0 |
| 19/11/1984 | 0 | 4/11/1985  | 0 |
| 27/11/1984 | 0 | 11/11/1985 | 0 |
| 3/12/1984  | 0 | 18/11/1985 | 0 |
| 16/10/1984 | 0 | 26/11/1985 | 0 |
| 24/12/1984 | 0 | 3/12/1985  | 0 |
| 2/1/1985   | 0 | 9/12/1985  | 0 |
| 7/1/1985   | 0 | 16/12/1985 | 0 |
| 14/1/1985  | 0 | 24/12/1985 | 0 |

|           |   |           |   |
|-----------|---|-----------|---|
| 21/1/1985 | 0 | 7/1/1986  | 0 |
| 28/1/1985 | 0 | 20/1/1986 | 0 |
| 6/2/1985  | 0 | 28/1/1986 | 0 |
| 11/2/1985 | 0 | 3/2/1986  | 0 |
| 15/2/1985 | 0 | 13/2/1986 | 0 |
| 19/2/1985 | 0 | 18/2/1986 | 0 |
| 21/2/1985 | 0 | 24/2/1986 | 0 |
| 23/2/1985 | 0 | 3/3/1986  | 0 |
| 25/2/1985 | 0 | 10/3/1986 | 0 |
| 27/2/1985 | 0 | 17/3/1986 | 0 |
| 1/3/1985  | 0 | 24/3/1986 | 0 |
| 4/3/1985  | 0 | 29/3/1986 | 0 |
| 18/3/1985 | 0 | 31/3/1986 | 0 |
| 23/3/1985 | 0 | 7/4/1986  | 0 |
| 27/3/1985 | 0 | 10/4/1986 | 0 |
| 10/4/1985 | 0 | 14/4/1986 | 0 |
| 12/4/1985 | 0 | 22/4/1986 | 0 |
| 15/4/1985 | 0 | 28/4/1986 | 0 |
| 18/4/1985 | 0 | 5/5/1986  | 0 |
| 23/4/1985 | 0 | 12/5/1986 | 0 |
| 29/4/1985 | 0 | 19/5/1986 | 0 |
| 3/5/1985  | 0 | 27/5/1986 | 0 |
| 7/5/1985  | 0 | 3/6/1986  | 0 |
| 10/5/1985 | 0 | 9/6/1986  | 0 |
| 15/5/1985 | 0 | 16/6/1986 | 0 |
| 21/5/1985 | 0 | 23/6/1986 | 0 |
| 27/5/1985 | 0 | 7/7/1986  | 0 |
| 30/5/1985 | 0 | 21/7/1986 | 0 |
| 3/6/1985  | 0 | 11/8/1986 | 0 |
| 7/6/1985  | 0 | 18/8/1986 | 0 |

|           |   |            |      |
|-----------|---|------------|------|
| 10/6/1985 | 0 | 25/8/1986  | 0    |
| 17/6/1985 | 0 | 8/9/1986   | 0    |
| 25/6/1985 | 0 | 16/9/1986  | 0    |
| 1/7/1985  | 0 | 22/9/1986  | 0    |
| 4/7/1985  | 0 | 6/10/1986  | 0    |
| 8/7/1985  | 0 | 20/10/1986 | 0    |
| 15/7/1985 | 0 | 29/10/1986 | 0    |
| 22/7/1985 | 0 | 4/11/1986  | 0    |
| 1/8/1985  | 0 | 19/5/1987  | 0,07 |
| 5/8/1985  | 0 | 25/5/1987  | 0,07 |
| 12/8/1985 | 0 | 3/6/1987   | 0,07 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 22/6/1987  | 0,07 | 5/7/1989   | 0,66 |
| 27/10/1987 | 0,07 | 3/8/1989   | 0,7  |
| 4/11/1987  | 0,07 | 23/8/1989  | 0,72 |
| 10/11/1987 | 0,05 | 6/9/1989   | 0,73 |
| 16/11/1987 | 0,05 | 15/9/1989  | 0,72 |
| 23/11/1987 | 0,05 | 2/10/1989  | 0,74 |
| 2/12/1987  | 0,09 | 11/10/1989 | 0,74 |
| 11/12/1987 | 0,09 | 23/10/1989 | 0,76 |
| 17/12/1987 | 0,05 | 30/10/1989 | 0,76 |
| 24/12/1987 | 0,07 | 8/11/1989  | 0,78 |
| 30/12/1987 | 0,07 | 17/11/1989 | 0,78 |
| 6/1/1988   | 0,07 | 27/11/1989 | 0,8  |
| 18/1/1988  | 0,05 | 4/12/1989  | 0,78 |
| 25/1/1988  | 0,05 | 14/12/1989 | 0,8  |
| 1/2/1988   | 0,05 | 21/12/1989 | 0,8  |
| 11/2/1988  | 0,05 | 8/1/1990   | 0,8  |
| 22/2/1988  | 0,05 | 26/1/1990  | 0,8  |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 2/3/1988   | 0,05 | 31/1/1990  | 0,82 |
| 16/3/1988  | 0,05 | 5/2/1990   | 0,8  |
| 27/3/1988  | 0,05 | 19/2/1990  | 0,8  |
| 7/4/1988   | 0,05 | 1/3/1990   | 0,8  |
| 21/4/1988  | 0,07 | 9/3/1990   | 0,82 |
| 28/4/1988  | 0,07 | 13/3/1990  | 0,82 |
| 4/5/1988   | 0,07 | 21/3/1990  | 0,82 |
| 11/5/1988  | 0,07 | 29/3/1990  | 0,82 |
| 23/5/1988  | 0,07 | 9/4/1990   | 0,84 |
| 1/6/1988   | 0,07 | 16/4/1990  | 0,84 |
| 8/6/1988   | 0,23 | 24/4/1990  | 0,84 |
| 13/6/1988  | 0,25 | 2/5/1990   | 0,82 |
| 27/6/1988  | 0,27 | 8/5/1990   | 0,84 |
| 6/7/1988   | 0,27 | 22/5/1990  | 0,84 |
| 13/7/1988  | 0,29 | 5/6/1990   | 0,84 |
| 20/7/1988  | 0,29 | 15/6/1990  | 0,84 |
| 2/8/1988   | 0,35 | 22/6/1990  | 0,84 |
| 11/8/1988  | 0,35 | 2/7/1990   | 0,84 |
| 30/8/1988  | 0,39 | 18/7/1990  | 0,84 |
| 16/9/1988  | 0,39 | 26/7/1990  | 0,84 |
| 22/9/1988  | 0,43 | 7/8/1990   | 0,84 |
| 29/9/1988  | 0,43 | 21/8/1990  | 0,86 |
| 6/10/1988  | 0,43 | 29/8/1990  | 0,86 |
| 13/10/1988 | 0,43 | 11/9/1990  | 0,86 |
| 28/10/1988 | 0,43 | 20/9/1990  | 0,86 |
| 3/11/1988  | 0,47 | 1/10/1990  | 0,86 |
| 1/12/1988  | 0,51 | 9/10/1990  | 0,86 |
| 15/12/1988 | 0,51 | 15/10/1990 | 0,86 |
| 12/1/1989  | 0,53 | 23/10/1990 | 0,86 |
| 27/1/1989  | 0,53 | 30/10/1990 | 0,86 |

|           |      |            |      |
|-----------|------|------------|------|
| 9/2/1989  | 0,57 | 6/11/1990  | 0,86 |
| 24/2/1989 | 0,57 | 16/11/1990 | 0,86 |
| 11/5/1989 | 0,64 | 27/11/1990 | 0,86 |
| 22/5/1989 | 0,64 | 4/12/1990  | 0,86 |
| 31/5/1989 | 0,64 | 13/12/1990 | 0,88 |
| 15/6/1989 | 0,66 | 20/12/1990 | 0,86 |
| 26/6/1989 | 0,66 | 28/12/1990 | 0,88 |
| 4/1/1991  | 0,86 | 20/7/1992  | 0,94 |
| 8/1/1991  | 0,86 | 29/7/1992  | 0,94 |
| 15/1/1991 | 0,86 | 10/8/1992  | 0,96 |
| 22/1/1991 | 0,86 | 17/8/1992  | 0,94 |
| 29/1/1991 | 0,88 | 24/8/1992  | 0,96 |
| 5/2/1991  | 0,86 | 1/9/1992   | 0,96 |
| 19/2/1991 | 0,86 | 14/9/1992  | 0,94 |
| 28/2/1991 | 0,86 | 7/10/1992  | 0,94 |
| 12/3/1991 | 0,86 | 13/10/1992 | 0,96 |
| 19/3/1991 | 0,86 | 27/10/1992 | 0,96 |
| 28/3/1991 | 0,86 | 3/11/1992  | 0,96 |
| 4/4/1991  | 0,86 | 9/11/1992  | 0,94 |
| 11/4/1991 | 0,86 | 3/3/1993   | 0,94 |
| 16/4/1991 | 0,86 | 4/3/1993   | 0,96 |
| 23/4/1991 | 0,86 | 9/3/1993   | 0,96 |
| 9/5/1991  | 0,86 | 16/3/1993  | 0,96 |
| 16/5/1991 | 0,86 | 24/3/1993  | 0,94 |
| 23/5/1991 | 0,86 | 29/3/1993  | 0,96 |
| 31/5/1991 | 0,86 | 6/4/1993   | 0,96 |
| 6/6/1991  | 0,88 | 12/4/1993  | 0,94 |
| 13/6/1991 | 0,88 | 19/4/1993  | 0,94 |
| 23/6/1991 | 0,88 | 29/4/1993  | 0,94 |
| 1/7/1991  | 0,88 | 4/5/1993   | 0,96 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 8/7/1991   | 0,88 | 10/5/1993  | 0,9  |
| 15/7/1991  | 0,88 | 3/11/1993  | 0,9  |
| 22/7/1991  | 0,88 | 18/11/1993 | 0,9  |
| 1/8/1991   | 0,9  | 25/11/1993 | 0,9  |
| 30/8/1991  | 0,9  | 1/12/1993  | 0,9  |
| 19/9/1991  | 0,92 | 10/12/1993 | 0,9  |
| 1/10/1991  | 0,9  | 23/12/1993 | 0,9  |
| 10/10/1991 | 0,9  | 24/1/1994  | 0,9  |
| 24/10/1991 | 0,92 | 10/2/1994  | 0,9  |
| 7/11/1991  | 0,94 | 17/2/1994  | 0,9  |
| 13/11/1991 | 0,92 | 1/3/1994   | 0,9  |
| 21/11/1991 | 0,92 | 10/3/1994  | 0,9  |
| 28/11/1991 | 0,92 | 17/3/1994  | 0,88 |
| 11/12/1991 | 0,92 | 25/3/1994  | 0,88 |
| 30/12/1991 | 0,92 | 20/4/1994  | 0,88 |
| 9/1/1992   | 0,92 | 6/6/1994   | 0,86 |
| 16/1/1992  | 0,92 | 19/7/1994  | 0,86 |
| 5/2/1992   | 0,92 | 4/8/1994   | 0,86 |
| 13/2/1992  | 0,92 | 22/8/1994  | 0,86 |
| 5/3/1992   | 0,92 | 25/8/1994  | 0,86 |
| 19/3/1992  | 0,94 | 1/9/1994   | 0,86 |
| 30/3/1992  | 0,92 | 8/9/1994   | 0,86 |
| 9/4/1992   | 0,94 | 13/9/1994  | 0,88 |
| 30/4/1992  | 0,94 | 6/10/1994  | 0,88 |
| 27/5/1992  | 0,94 | 18/10/1994 | 0,88 |
| 4/6/1992   | 0,94 | 1/11/1994  | 0,88 |
| 10/6/1992  | 0,92 | 17/11/1994 | 0,88 |
| 22/6/1992  | 0,94 | 16/12/1994 | 0,88 |
| 30/6/1992  | 0,94 | 27/12/1994 | 0,88 |
| 8/7/1992   | 0,94 | 10/1/1995  | 0,88 |

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 15/7/1992  | 0,94 | 6/2/1995   | 0,88 |
| 20/2/1995  | 0,88 | 9/10/1996  | 1,00 |
| 6/3/1995   | 0,88 | 25/11/1996 | 1,00 |
| 11/4/1995  | 0,88 | 17/12/1996 | 1,00 |
| 19/4/1995  | 0,88 | 8/1/1997   | 1,02 |
| 16/5/1995  | 0,9  | 7/2/1997   | 1,02 |
| 26/5/1995  | 0,92 | 17/2/1997  | 1,02 |
| 31/5/1995  | 0,92 | 25/6/1997  | 1,02 |
| 12/6/1995  | 0,92 | 28/7/1997  | 1,02 |
| 28/8/1995  | 0,94 | 12/8/1997  | 1,02 |
| 28/9/1995  | 0,96 | 19/8/1997  | 1,02 |
| 11/10/1995 | 0,94 | 8/9/1997   | 1,00 |
| 18/10/1995 | 0,94 | 23/9/1997  | 1,00 |
| 26/10/1995 | 0,94 | 13/10/1997 | 1,00 |
| 13/11/1995 | 0,94 | 17/11/1997 | 1,02 |
| 6/12/1995  | 0,94 | 27/11/1997 | 1,00 |
| 14/12/1995 | 0,94 | 25/6/1997  | 1,02 |
| 26/12/1995 | 0,94 | 28/7/1997  | 1,02 |
| 15/1/1996  | 1,00 | 12/8/1997  | 1,02 |
| 29/1/1996  | 1,00 | 19/8/1997  | 1,02 |
| 23/2/1996  | 1,00 | 8/9/1997   | 1,00 |
| 11/3/1996  | 0,98 | 23/9/1997  | 1,00 |
| 23/6/1996  | 1,00 | 13/10/1997 | 1,00 |
| 1/4/1996   | 1,00 | 17/11/1997 | 1,02 |
| 10/4/1996  | 1,00 | 27/11/1997 | 1,00 |
| 17/4/1996  | 1,00 | 13/1/1998  | 1,00 |
| 22/4/1996  | 1,00 | 27/1/1998  | 1,00 |
| 7/5/1996   | 1,00 | 12/2/1998  | 1,00 |
| 21/5/1996  | 1,00 | 23/4/1998  | 1,02 |
| 4/6/1996   | 1,00 |            |      |

|           |      |  |  |
|-----------|------|--|--|
| 11/6/1996 | 1,00 |  |  |
| 18/6/1996 | 1,00 |  |  |
| 25/6/1996 | 1,00 |  |  |
| 2/7/1996  | 1,00 |  |  |
| 3/9/1996  | 1,00 |  |  |
| 19/9/1996 | 1,00 |  |  |

Extensômetro da estaca 53+03 - 18,00m Jusante (Deslocamentos em mm)

| Data       | Camada1<br>(T1-T2) | Camada2<br>(T2-T3) | Camada3<br>(T3-T4) | Camada4<br>(T4-T5) | Placa<br>1 | Placa 2 | Placa 3 | Placa 4 |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|---------|---------|---------|
| 30/11/1982 |                    |                    | 11                 | 5                  |            |         | 16      | 5       |
| 23/12/1982 |                    | 0                  | 38                 | 15,5               |            | 0       | 53,5    | 15,5    |
| 5/1/1983   | 0                  | 14,5               | 46,5               | 19,5               | 0          | 27      | 66      | 19,5    |
| 12/1/1983  | 11                 | 27,5               | 53                 | 22,5               | 33,5       | 49,5    | 75,5    | 22,5    |
| 27/1/1983  | 30                 | 48                 | 66                 | 30,5               | 94         | 91      | 96,5    | 30,5    |
| 5/2/1983   | 39                 | 56,5               | 73,5               | 32                 | 120,5      | 108,5   | 105,5   | 32      |
| 8/2/1983   | 40,5               | 59,5               | 73,5               | 34,5               | 127,5      | 114     | 108     | 34,5    |
| 19/2/1983  | 45                 | 62,5               | 78,5               | 32,5               | 138        | 120     | 111     | 32,5    |
| 23/2/1983  | 44                 | 59,5               | 78                 | 38                 | 139        | 122     | 116     | 38      |
| 7/3/1983   | 53,5               | 68                 | 84,5               | 36                 | 164,5      | 138     | 120,5   | 36      |
| 12/3/1983  | 57,5               | 69,5               | 87,5               | 35,5               | 172,5      | 142     | 123     | 35,5    |
| 18/3/1983  | 61                 | 73                 | 92                 | 40                 | 188,5      | 154,5   | 132     | 40      |
| 23/3/1983  | 64                 | 75,5               | 94,5               | 39,5               | 196        | 159     | 134     | 39,5    |
| 5/4/1983   | 64                 | 76,5               | 95                 | 43,5               | 201,5      | 164,5   | 138,5   | 43,5    |
| 13/4/1983  | 63                 | 80,5               | 95,5               | 43                 | 201,5      | 165,5   | 138,5   | 43      |
| 22/4/1983  | 65,5               | 81                 | 96,5               | 43,5               | 206        | 167,5   | 140     | 43,5    |
| 27/4/1983  | 66                 | 83,5               | 94                 | 43,5               | 206,5      | 167,5   | 137,5   | 43,5    |
| 4/5/1983   | 64,5               | 82                 | 96,5               | 46,5               | 209        | 171,5   | 143     | 46,5    |
| 17/5/1983  | 64                 | 87                 | 99                 | 48,5               | 218        | 181     | 147,5   | 48,5    |

|            |      |      |       |      |       |       |       |      |
|------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 30/5/1983  | 65,5 | 85,5 | 100,5 | 50   | 221   | 182,5 | 150,5 | 50   |
| 9/6/1983   | 68,5 | 86   | 100   | 50,5 | 224,5 | 183   | 150,5 | 50,5 |
| 15/6/1983  | 66   | 87   | 100   | 53   | 225,5 | 186,5 | 153   | 53   |
| 23/6/1983  | 68,5 | 85,5 | 100   | 53   | 226,5 | 185   | 153   | 53   |
| 28/6/1983  | 67   | 87,5 | 102   | 52   | 228   | 188   | 154   | 52   |
| 12/7/1983  | 67,4 | 87,6 | 102   | 52,6 | 228,2 | 188   | 154   | 52,6 |
| 20/7/1983  | 67,9 | 87,5 | 103,1 | 52,6 | 230,2 | 189,3 | 155,7 | 52,6 |
| 27/7/1983  | 69,4 | 87,5 | 103,1 | 54,6 | 233,7 | 191,3 | 157,7 | 54,6 |
| 5/8/1983   | 54,6 | 102  | 87,5  | 68,4 | 231,2 | 189,8 | 156,2 | 54,6 |
| 17/8/1983  | 68,9 | 88,1 | 103,1 | 53,6 | 233,2 | 191,3 | 156,7 | 53,6 |
| 25/8/1983  | 67,9 | 87,6 | 103,1 | 54,6 | 232,7 | 191,8 | 157,7 | 54,6 |
| 8/9/1983   | 68,9 | 87,6 | 104,6 | 54,6 | 235,2 | 193,3 | 159,2 | 54,6 |
| 29/9/1983  | 67,4 | 89,6 | 102   | 55,6 | 233,7 | 193,3 | 157,2 | 55,6 |
| 6/10/1983  | 68,4 | 89,6 | 102,6 | 54,6 | 234,7 | 193,3 | 157,2 | 54,6 |
| 21/10/1983 | 68,4 | 87,5 | 102,6 | 54,6 | 231,7 | 190,3 | 157,2 | 54,6 |
| 27/10/1983 | 68,4 | 87,6 | 102   | 55,6 | 232,7 | 191,3 | 157,2 | 55,6 |
| 10/11/1983 | 67,9 | 87,5 | 104,1 | 54,6 | 232,7 | 191,8 | 158,7 | 54,6 |
| 17/11/1983 | 68,9 | 87,5 | 103,1 | 56,1 | 234,7 | 192,8 | 159,2 | 56,1 |
| 25/11/1983 | 67,9 | 87,5 | 106,6 | 54,6 | 234,7 | 193,8 | 161,2 | 54,6 |
| 1/12/1983  | 68,9 | 87,5 | 103,6 | 55,6 | 234,7 | 192,8 | 159,2 | 55,6 |
| 8/12/1983  | 69,9 | 87,5 | 104,6 | 53,6 | 234,7 | 191,8 | 158,2 | 53,6 |
| 15/12/1983 | 69,4 | 87,5 | 105,1 | 55,6 | 235,7 | 193,3 | 160,7 | 55,6 |
| 22/12/1983 | 69,4 | 87,5 | 105,1 | 55,6 | 236,7 | 189   | 160,7 | 55,6 |
| 30/12/1983 | 71,4 | 87,5 | 106,1 | 55,6 | 238,7 | 189   | 161,7 | 55,6 |
| 12/1/1984  | 67,9 | 87,5 | 106,1 | 59,6 | 239,7 | 193,5 | 165,7 | 59,6 |
| 27/1/1984  | 69,4 | 87,5 | 108,1 | 57,6 | 239,7 | 192   | 165,7 | 57,6 |
| 22/2/1984  | 67,9 | 87,5 | 109,1 | 58,6 | 241,2 | 194   | 167,7 | 58,6 |
| 28/3/1984  | 69,9 | 87,5 | 110,1 | 62,6 | 248,7 | 200,5 | 172,7 | 62,6 |
| 7/4/1984   | 69,9 | 98,1 | 112,6 | 66,6 | 266,7 | 218,5 | 179,2 | 66,6 |
| 11/4/1984  | 70,4 | 87,5 | 111,6 | 63,6 | 251,7 | 203   | 175,2 | 63,6 |

|            |      |      |       |      |       |       |       |      |
|------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 17/4/1984  | 70,4 | 88,6 | 109,6 | 64,6 | 252,7 | 204   | 174,2 | 64,2 |
| 24/4/1984  | 70,4 | 87,5 | 112,1 | 64,6 | 252,2 | 203,5 | 176,7 | 64,6 |
| 10/5/1984  | 71,4 | 87,5 | 112,1 | 52   | 233,7 | 188   | 158,7 | 52   |
| 23/5/1984  | 70,4 | 87,6 | 112,6 | 65,6 | 255,7 | 207   | 178,2 | 65,6 |
| 30/5/1984  | 72,4 | 87,5 | 112,6 | 64,6 | 254,7 | 204   | 177,2 | 64,6 |
| 7/6/1984   | 71,4 | 87,5 | 111,1 | 65,6 | 253,7 | 204   | 176,7 | 65,6 |
| 15/6/1984  | 68,4 | 87,5 | 109,6 | 80,6 | 253,7 | 217,5 | 190,2 | 80,6 |
| 29/6/1984  | 69,9 | 87,5 | 110,6 | 62,6 | 247,7 | 199,5 | 173,2 | 62,6 |
| 5/7/1984   | 69,9 | 87,5 | 111,1 | 62,6 | 247,2 | 199   | 173,7 | 62,6 |
| 20/7/1984  | 69,9 | 87,5 | 111,1 | 63,6 | 247,7 | 199,5 | 174,7 | 63,6 |
| 2/8/1984   | 68,9 | 87,5 | 111,1 | 62,6 | 246,7 | 199,5 | 173,7 | 62,6 |
| 9/8/1984   | 68,9 | 87,5 | 111,6 | 63,6 | 247,7 | 200,5 | 175,2 | 63,6 |
| 16/8/1984  | 71,4 | 87,5 | 111,6 | 62,6 | 248,7 | 199   | 174,2 | 62,6 |
| 23/8/1984  | 69,4 | 87,5 | 111,1 | 52   | 228   | 188   | 154,7 | 52   |
| 30/8/1984  | 70,4 | 87,5 | 110,6 | 65,1 | 249,7 | 201   | 175,7 | 65,1 |
| 13/9/1984  | 68,9 | 87,5 | 112,1 | 62,6 | 247,7 | 200,5 | 174,7 | 62,6 |
| 20/9/1984  | 67   | 87,5 | 114,1 | 62,6 | 233,7 | 204,5 | 176,7 | 62,6 |
| 27/9/1984  | 85,4 | 87,5 | 127,1 | 52   | 247,7 | 188   | 173,7 | 52   |
| 10/10/1984 | 70,4 | 87,5 | 102   | 65,6 | 241,7 | 193   | 167,2 | 65,6 |
| 24/10/1984 | 67   | 87,5 | 111,1 | 66,6 | 241,2 | 203   | 177,7 | 66,6 |
| 7/11/1984  | 69,4 | 87,5 | 111,6 | 52   | 234,7 | 188   | 161,2 | 52   |
| 20/11/1984 | 70,4 | 87,5 | 113,1 | 65,6 | 252,7 | 204   | 178,7 | 65,6 |
| 29/11/1984 | 67   | 87,5 | 113,1 | 66,6 | 241,7 | 206   | 179,7 | 66,6 |
| 5/12/1984  | 81,4 | 87,5 | 126,1 | 52   | 242,7 | 188   | 171,7 | 52   |
| 18/12/1984 | 67   | 87,5 | 113,1 | 65,6 | 243,7 | 204   | 178,7 | 65,6 |
| 27/12/1984 | 72,4 | 87,5 | 110,6 | 66,6 | 247,7 | 197   | 177,2 | 66,6 |
| 3/1/1985   | 70,4 | 87,5 | 111,1 | 58,6 | 242,7 | 194   | 169,7 | 58,6 |
| 8/1/1985   | 69,4 | 87,5 | 113,1 | 52   | 230,7 | 188   | 156,7 | 52   |
| 15/1/1985  | 67   | 87   | 111,1 | 61,6 | 235,7 | 199   | 172,7 | 61,6 |
| 22/1/1985  | 68,4 | 97,1 | 112,1 | 67,6 | 264,7 | 218   | 179,7 | 67,6 |

|            |    |       |       |      |       |     |       |      |
|------------|----|-------|-------|------|-------|-----|-------|------|
| 31/1/1985  | 67 | 97,1  | 111,1 | 52   | 230,7 | 195 | 156,7 | 52   |
| 26/3/1985  | 67 | 97,1  | 113,1 | 52   | 231,7 | 196 | 157,7 | 52   |
| 11/4/1985  | 67 | 97,1  | 112,1 | 52   | 230,7 | 195 | 156,7 | 52   |
| 16/4/1985  | 67 | 97,1  | 113,1 | 52   | 230,7 | 195 | 156,7 | 52   |
| 22/4/1985  | 67 | 98,6  | 111,6 | 52   | 232,7 | 197 | 157,2 | 52   |
| 25/4/1985  | 68 | 97,1  | 113,1 | 52   | 233,7 | 197 | 158,7 | 52   |
| 2/5/1985   | 68 | 97,1  | 112,1 | 52   | 232,7 | 196 | 157,7 | 52   |
| 8/5/1985   | 67 | 97,1  | 115,1 | 52   | 234,7 | 199 | 160,7 | 52   |
| 12/5/1985  | 68 | 97,1  | 114,1 | 52   | 234,7 | 198 | 159,7 | 52   |
| 22/5/1985  | 67 | 98,1  | 114,1 | 53   | 235,7 | 200 | 160,7 | 53   |
| 29/5/1985  | 68 | 97,1  | 114,6 | 53,5 | 235,7 | 199 | 161,7 | 53,5 |
| 5/6/1985   | 68 | 97,1  | 115,1 | 53   | 235,7 | 199 | 161,7 | 53   |
| 14/6/1985  | 67 | 97,1  | 116,1 | 53   | 235,7 | 200 | 162,7 | 53   |
| 20/6/1985  | 68 | 99,1  | 113,1 | 55   | 238,7 | 202 | 161,7 | 53   |
| 28/6/1985  | 68 | 97,1  | 114,1 | 55   | 237,7 | 201 | 160,7 | 55   |
| 3/7/1985   | 68 | 97,1  | 114,1 | 56   | 238,7 | 202 | 163,7 | 56   |
| 10/7/1985  | 68 | 97,6  | 113,6 | 55   | 237,7 | 201 | 162,2 | 55   |
| 17/7/1985  | 68 | 97,1  | 115,1 | 55   | 238,7 | 202 | 161,7 | 55   |
| 30/7/1985  | 68 | 97,1  | 115,1 | 56   | 239,7 | 203 | 164,7 | 56   |
| 15/8/1985  | 69 | 98,1  | 111,1 | 56   | 240,7 | 203 | 163,7 | 56   |
| 22/8/1985  | 69 | 98,1  | 114,1 | 58   | 242,7 | 205 | 165,7 | 58   |
| 5/9/1985   | 68 | 98,1  | 115,1 | 57   | 241,7 | 205 | 165,7 | 57   |
| 12/9/1985  | 69 | 98,1  | 114,1 | 56   | 240,7 | 203 | 163,7 | 56   |
| 10/10/1985 | 69 | 99,1  | 113,1 | 58   | 242,7 | 205 | 164,7 | 58   |
| 31/10/1985 | 69 | 99,1  | 116,1 | 56   | 243,7 | 206 | 165,7 | 56   |
| 6/11/1985  | 68 | 98,1  | 115,1 | 57   | 241,7 | 205 | 165,7 | 57   |
| 12/11/1985 | 68 | 98,1  | 115,1 | 57   | 241,7 | 205 | 165,7 | 57   |
| 20/11/1985 | 69 | 98,1  | 116,1 | 56   | 242,7 | 205 | 165,7 | 56   |
| 27/11/1985 | 69 | 98,1  | 115,1 | 52   | 236,7 | 199 | 159,7 | 52   |
| 5/12/1985  | 70 | 104,1 | 115   | 57   | 249,7 | 211 | 165   | 57   |

|            |      |       |       |      |       |       |       |      |
|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 10/12/1985 | 70   | 98,1  | 115,1 | 58   | 244,4 | 206   | 167,7 | 58   |
| 17/12/1985 | 69   | 99,1  | 116,1 | 57   | 244,7 | 207   | 166,7 | 57   |
| 9/1/1986   | 69   | 99,1  | 114,1 | 58   | 243,7 | 206   | 163,7 | 58   |
| 16/1/1986  | 70   | 98,1  | 115,1 | 58   | 244,7 | 206   | 166,7 | 58   |
| 24/1/1986  | 70   | 97,1  | 116,1 | 52   | 230,7 | 195   | 156,7 | 52   |
| 5/2/1986   | 70   | 98,1  | 116,1 | 62   | 249,7 | 211   | 170,7 | 62   |
| 17/2/1986  | 70   | 99,1  | 117,1 | 62   | 251,7 | 213   | 172,7 | 62   |
| 27/2/1986  | 70   | 100,1 | 116,1 | 61   | 250,7 | 212   | 170,7 | 61   |
| 6/3/1986   | 69   | 99,1  | 116,1 | 62   | 249,7 | 212   | 171,7 | 62   |
| 13/3/1986  | 71   | 99,1  | 115,1 | 63   | 251,7 | 212   | 171,7 | 63   |
| 20/3/1986  | 72   | 99,1  | 116,1 | 61   | 251,7 | 211   | 170,7 | 61   |
| 25/3/1986  | 72   | 98,1  | 116,1 | 52   | 234,7 | 195   | 156,7 | 52   |
| 3/4/1986   | 70   | 98,1  | 118,1 | 63   | 252,7 | 214   | 174,7 | 63   |
| 10/4/1986  | 71   | 98,1  | 117,1 | 64   | 253,7 | 214   | 174,7 | 64   |
| 20/4/1986  | 72   | 100,1 | 117,1 | 63   | 255,7 | 215   | 173,7 | 63   |
| 29/4/1986  | 72   | 99,1  | 115,6 | 64,5 | 254,7 | 214   | 173,7 | 64,5 |
| 6/5/1986   | 70,5 | 99,6  | 118,1 | 62   | 253,7 | 214,5 | 173,7 | 62   |
| 13/5/1986  | 71   | 99,6  | 117,6 | 62,5 | 254,2 | 214,5 | 173,7 | 62,5 |
| 21/5/1986  | 70   | 100,1 | 117,1 | 63   | 253,7 | 215   | 173,7 | 63   |
| 28/5/1986  | 72   | 98,1  | 116,6 | 65,5 | 253   | 215   | 175,7 | 65,5 |
| 2/7/1986   | 69   | 99,1  | 120,1 | 63   | 254,7 | 217   | 176,7 | 63   |
| 12/8/1986  | 72   | 98,1  | 111,1 | 66   | 241,2 | 200,5 | 161,2 | 66   |
| 22/8/1986  | 72   | 100,6 | 115,6 | 65,5 | 257,2 | 216,5 | 174,7 | 65,5 |
| 9/9/1986   | 70   | 101,1 | 116,1 | 67   | 257,7 | 219   | 176,7 | 67   |
| 10/10/1986 | 71   | 100,1 | 117,6 | 64,5 | 256,7 | 217   | 175,7 | 64,5 |
| 5/11/1986  | 74   | 100,1 | 116,6 | 67,5 | 258,7 | 219   | 177,7 | 67,5 |
| 12/11/1986 | 71   | 98,1  | 116,1 | 69   | 257,7 | 218   | 178,7 | 69   |
| 30/11/1986 | 71   | 97,1  | 183,1 | 52   | 256,7 | 217,2 | 192,7 | 52   |
| 1/12/1986  | 71   | 97,1  | 124,1 | 67,5 | 257,2 | 217,5 | 185,2 | 67,5 |
| 2/12/1986  | 71   | 98,1  | 118,1 | 67,5 | 259,7 | 219   | 178,7 | 67,5 |

|            |      |       |       |      |       |       |       |      |
|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 10/12/1986 | 72   | 100,1 | 115,1 | 70   | 260,7 | 220   | 178,7 | 70   |
| 18/12/1986 | 71,5 | 101,1 | 117,1 | 67,5 | 260,7 | 220,5 | 178,2 | 67,5 |
| 14/1/1987  | 71,5 | 101,6 | 115,1 | 67,5 | 259,2 | 219   | 176,2 | 67,5 |
| 5/2/1987   | 71,5 | 99,6  | 135,6 | 52   | 261,7 | 221,5 | 180,7 | 52   |
| 12/2/1987  | 67   | 98,1  | 117,1 | 68,5 | 243,7 | 218,5 | 179,2 | 68,5 |
| 19/2/1987  | 71   | 98,1  | 117,1 | 69   | 258,7 | 219   | 179   | 69   |
| 15/4/1987  | 73   | 99,1  | 117,6 | 61   | 254,2 | 212,5 | 172,2 | 61   |
| 18/5/1987  | 67   | 99,6  | 118,6 | 69   | 247,7 | 222   | 181,2 | 69   |
| 8/6/1987   | 71   | 98,6  | 117,6 | 70,5 | 261,2 | 221,5 | 181,7 | 70,5 |
| 13/3/1989  | 71   | 98,6  | 119,6 | 71   | 263   | 223,3 | 184,2 | 71   |
| 10/4/1989  | 71,5 | 98,6  | 118,6 | 71   | 263   | 222,8 | 183,2 | 71   |
| 9/5/1989   | 71   | 98,6  | 119,6 | 71   | 263   | 223,3 | 184,2 | 71   |
| 12/6/1989  | 71   | 99,9  | 120,1 | 71   | 263,5 | 225,8 | 184,7 | 71   |
| 16/8/1989  | 72   | 98,9  | 120,1 | 70,5 | 261,2 | 221,5 | 181,7 | 70,5 |
| 19/9/1989  | 71   | 99,4  | 123,1 | 70,5 | 263,5 | 226,8 | 186,2 | 70,5 |
| 20/10/1989 | 73   | 98,7  | 121,6 | 72   | 268   | 226,3 | 187,2 | 72   |
| 13/11/1989 | 71,5 | 98,9  | 120,1 | 73   | 267   | 226,8 | 186,7 | 73   |
| 29/11/1989 | 71   | 99,4  | 119,6 | 72   | 263   | 225,8 | 185,2 | 72   |
| 18/12/1989 | 72   | 98,6  | 121,1 | 73   | 268   | 227,3 | 187,7 | 73   |
| 2/2/1990   | 71,5 | 98,6  | 122,1 | 70,5 | 266   | 225,8 | 186,2 | 70,5 |
| 5/3/1990   | 71   | 98,9  | 121,6 | 70,5 | 261,2 | 221,5 | 181,7 | 70,5 |
| 15/3/1990  | 71   | 98,9  | 121,6 | 72,5 | 267   | 227,8 | 187,7 | 72,5 |
| 27/3/1990  | 72   | 98,9  | 120,6 | 70,5 | 261,2 | 221,5 | 181,7 | 70,5 |
| 4/4/1990   | 71   | 98,9  | 121,6 | 74   | 269   | 229,3 | 189,2 | 74   |
| 18/4/1990  | 71,5 | 98,6  | 121,6 | 75   | 270   | 229,8 | 190,2 | 75   |
| 26/4/1990  | 71   | 99,4  | 120,6 | 72,5 | 267   | 227,3 | 161,7 | 54   |
| 10/5/1990  | 71   | 100,4 | 120,6 | 74,5 | 270   | 230,3 | 188,7 | 74,5 |
| 31/5/1990  | 71   | 99,9  | 117,6 | 78,5 | 269,5 | 229,8 | 188,7 | 78,5 |
| 11/6/1990  | 71,5 | 99,4  | 117,6 | 80   | 270   | 229,8 | 189,2 | 80   |
| 26/6/1990  | 71   | 98,6  | 117,6 | 80,5 | 270,5 | 230,8 | 191,7 | 80,5 |

|            |      |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6/7/1990   | 71,5 | 98,6  | 118,6 | 78    | 270   | 229,8 | 190,2 | 78    |
| 9/8/1990   | 72,5 | 98,6  | 119,6 | 77    | 271   | 229,8 | 190,2 | 77    |
| 21/8/1990  | 73   | 98,6  | 118,1 | 82    | 274,5 | 232,8 | 193,7 | 82    |
| 6/9/1990   | 72,5 | 98,9  | 117,6 | 80,5  | 271   | 229,8 | 189,7 | 80,5  |
| 27/9/1990  | 72,5 | 98,6  | 120,1 | 80    | 271,5 | 230,3 | 193,7 | 80    |
| 11/10/1990 | 71   | 100,9 | 117,6 | 103,5 | 270,5 | 230,8 | 188,7 | 103,5 |
| 1/11/1990  | 72   | 99,4  | 118,6 | 76,5  | 270   | 229,3 | 188,7 | 76,5  |
| 22/11/1990 | 71   | 99,4  | 119,6 | 77,5  | 270,5 | 231,3 | 190,7 | 77,5  |
| 29/11/1990 | 72,5 | 98,6  | 117,6 | 82,5  | 273   | 231,8 | 192,2 | 82,5  |
| 11/12/1990 | 71,5 | 99,4  | 117,6 | 78    | 270   | 229,8 | 189,2 | 78    |
| 18/12/1990 | 71,5 | 99,4  | 117,6 | 78    | 270   | 229,8 | 189,2 | 78    |
| 26/12/1990 | 71,5 | 98,6  | 118,6 | 79    | 271   | 230,8 | 191,2 | 79    |
| 2/1/1991   | 71,5 | 100,4 | 117,6 | 79    | 271   | 230,8 | 189,2 | 79    |
| 10/1/1991  | 71,5 | 98,9  | 119,6 | 78    | 271,5 | 231,3 | 191,2 | 78    |
| 17/1/1991  | 71,5 | 100,4 | 117,6 | 81    | 271,5 | 231,3 | 189,7 | 81    |
| 24/1/1991  | 72,5 | 98,6  | 119,6 | 79,5  | 273   | 231,8 | 192,7 | 79,5  |
| 31/1/1991  | 72   | 98,6  | 118,6 | 78    | 270   | 229,3 | 190,2 | 78    |
| 14/2/1991  | 73,5 | 98,6  | 118,6 | 79    | 273   | 230,8 | 191,2 | 79    |
| 21/2/1991  | 72   | 98,9  | 117,6 | 80,5  | 271,5 | 230,8 | 190,7 | 80,5  |
| 7/3/1991   | 71   | 100,4 | 118,1 | 79    | 271,5 | 232,3 | 190,7 | 79    |
| 14/3/1991  | 72   | 99,4  | 118,1 | 79,5  | 272,5 | 231,8 | 191,2 | 79,5  |
| 21/3/1991  | 71   | 99,9  | 117,6 | 80,5  | 272,5 | 232,8 | 191,7 | 80,5  |
| 9/4/1991   | 72   | 99,4  | 118,1 | 80,5  | 273,5 | 232,8 | 192,2 | 80,5  |
| 18/4/1991  | 72   | 98,6  | 119,6 | 79,5  | 273   | 232,3 | 192,7 | 79,5  |
| 25/4/1991  | 71   | 99,9  | 117,6 | 83,5  | 273,5 | 234,3 | 193,2 | 83,5  |
| 9/5/1991   | 72   | 99,9  | 118,1 | 80    | 273,5 | 232,8 | 191,7 | 80    |
| 16/5/1991  | 71,5 | 99,4  | 117,6 | 81,5  | 273,5 | 233,3 | 192,7 | 81,5  |
| 23/5/1991  | 72   | 99,4  | 117,6 | 82,5  | 274   | 233,3 | 192,7 | 82,5  |
| 13/6/1991  | 71   | 99,9  | 118,1 | 81,5  | 274   | 234,3 | 193,2 | 81,5  |
| 28/6/1991  | 72,5 | 99,9  | 117,6 | 82,5  | 276   | 234,8 | 193,7 | 82,5  |

|            |      |       |       |      |       |       |       |      |
|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 11/7/1991  | 72   | 99,4  | 117,6 | 79,5 | 271,5 | 230,8 | 190,2 | 79,5 |
| 9/8/1991   | 71   | 98,9  | 119,6 | 80   | 273   | 233,3 | 193,2 | 80   |
| 5/9/1991   | 71,5 | 98,9  | 118,1 | 82   | 274   | 233,8 | 193,7 | 82   |
| 3/10/1991  | 71,5 | 99,9  | 118,1 | 77,5 | 270,5 | 230,3 | 189,2 | 77,5 |
| 24/10/1991 | 71   | 99,9  | 117,6 | 83   | 274,5 | 235,3 | 194,2 | 83   |
| 7/11/1991  | 72   | 99,9  | 117,6 | 83   | 275   | 234,3 | 193,2 | 83   |
| 21/11/1991 | 71,5 | 100,9 | 117,6 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,2 | 74   |
| 26/12/1991 | 71,5 | 100,9 | 120,3 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,9 | 74,5 |
| 9/1/1992   | 71,5 | 100,9 | 119,3 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,2 | 74,5 |
| 23/1/1992  | 71,5 | 100,9 | 117,6 | 75   | 267,5 | 227,3 | 185,4 | 75   |
| 13/2/1992  | 71,5 | 100,9 | 118,3 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,4 | 74,5 |
| 10/3/1992  | 71,5 | 100,9 | 117,6 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,2 | 74,5 |
| 24/3/1992  | 71,5 | 100,9 | 119,3 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,9 | 74,5 |
| 31/3/1992  | 71,5 | 100,9 | 119,3 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 186,4 | 74,5 |
| 11/5/1992  | 71,5 | 100,9 | 117,8 | 74,5 | 267,5 | 227,3 | 185,2 | 74,5 |
| 24/4/1992  | 73   | 100,9 | 120,3 | 74,5 | 268   | 227,3 | 186,9 | 74,5 |
| 9/9/1996   | 73   | 101,2 | 121,3 | 74,5 | 268,7 | 228   | 187,3 | 74,5 |
| 31/10/1996 | 76   | 100,9 | 120,8 | 74,5 | 269,2 | 227,3 | 187,3 | 74,5 |
| 20/8/1997  | 76   | 102,1 | 120,8 | 74,5 | 269,2 | 227,3 | 187,3 | 74,5 |
| 22/10/1997 | 76   | 102,1 | 120,8 | 74,5 | 269,2 | 227,3 | 187,3 | 74,5 |
| 9/12/1997  | 76   | 103,1 | 120,8 | 74,8 | 269,2 | 227,3 | 187,3 | 74,8 |
| 5/8/1998   | 76   | 103,1 | 120,8 | 74,5 | 269,2 | 227,3 | 187,3 | 74,5 |
| 30/9/1998  | 76   | 103,6 | 120,8 | 74,5 | 269,2 | 227,3 | 187,3 | 74,5 |
| 9/12/1998  | 76   | 103,1 | 120,8 | 76,3 | 269,2 | 227,6 | 187,3 | 76,3 |

Extensômetros da estaca 53+03 - 16,50m Montante (Deslocamentos em mm)

| Data | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 | Camada 4 | Placa 6 | Placa 7 | Placa 8 | Placa 9 |
|------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
|------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|

|            | (T6-T7) | (T7-T8) | (T8-T9) | (T9-T10) |       |       |       |       |
|------------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 29/11/1982 |         |         | 26,6    | 9,9      |       |       | 36,5  | 9,9   |
| 23/12/1982 |         | 61,5    | 69,6    | 32,9     |       | 127,5 | 102,5 | 32,9  |
| 5/1/1983   |         | 79,5    | 79,6    | 42,4     |       | 165   | 122   | 42,4  |
| 11/1/1983  | 8       | 92,5    | 84,6    | 45,4     | 29    | 186   | 130   | 45,4  |
| 27/1/1983  | 26,5    | 112     | 97,6    | 56,9     | 91,5  | 230   | 154,5 | 56,9  |
| 2/2/1983   | 31,5    | 120,5   | 99,6    | 60,9     | 111   | 244,5 | 160,5 | 60,9  |
| 5/2/1983   | 33      | 123     | 101,1   | 62,9     | 118,5 | 250,5 | 164   | 62,9  |
| 8/2/1983   | 34      | 128,5   | 100,6   | 63,4     | 125   | 256   | 164   | 63,4  |
| 19/2/1983  | 35      | 128     | 103,1   | 64,9     | 129,5 | 259,5 | 168   | 64,9  |
| 23/2/1983  | 39      | 127     | 107,1   | 66,4     | 138   | 264   | 173,5 | 66,4  |
| 26/2/1983  | 40      | 133,5   | 106,1   | 66,4     | 144,5 | 269,5 | 172,5 | 66,4  |
| 7/3/1983   | 46,5    | 144     | 111,6   | 73,9     | 174,5 | 293   | 185,5 | 73,9  |
| 12/3/1983  | 49      | 147,5   | 113,6   | 76,4     | 185   | 301   | 190   | 76,4  |
| 18/3/1983  | 52      | 150,5   | 144,6   | 79,4     | 195   | 308   | 194   | 79,4  |
| 23/3/1983  | 52      | 154,5   | 116,1   | 79,4     | 200,5 | 313,5 | 195,5 | 79,4  |
| 29/3/1983  | 55,5    | 155,5   | 117,1   | 81,4     | 208   | 317,5 | 198,5 | 81,4  |
| 5/4/1983   | 56,5    | 157     | 117,6   | 84,9     | 214,5 | 323   | 202,5 | 84,9  |
| 13/4/1983  | 56      | 159,5   | 118,1   | 85,9     | 218   | 327   | 204   | 85,9  |
| 22/4/1983  | 57,5    | 160     | 119,6   | 87,4     | 223   | 330,5 | 207   | 87,4  |
| 27/4/1983  | 57,5    | 161     | 119,6   | 89,4     | 226   | 333,5 | 209   | 89,4  |
| 3/5/1983   | 58      | 162     | 120,1   | 89,9     | 228,5 | 335,5 | 210   | 89,9  |
| 17/5/1983  | 59,5    | 164     | 121,6   | 95,4     | 239   | 344,5 | 217   | 95,4  |
| 30/5/1983  | 60,5    | 166     | 122,1   | 95,4     | 242,5 | 347   | 217,5 | 95,4  |
| 9/6/1983   | 60,5    | 166,5   | 123,1   | 96,9     | 245,5 | 350   | 220   | 96,9  |
| 15/6/1983  | 60,5    | 164     | 126,1   | 96,9     | 246   | 350,5 | 223   | 96,9  |
| 23/6/1983  | 60,5    | 165     | 123,6   | 98,9     | 246,5 | 351   | 222,5 | 98,9  |
| 28/6/1983  | 61      | 168,5   | 122,6   | 99,9     | 250,5 | 354,5 | 222,5 | 99,9  |
| 12/7/1983  | 61,8    | 168,8   | 122,6   | 99,9     | 251,4 | 354,5 | 222,5 | 99,9  |
| 20/7/1983  | 61,8    | 168,8   | 122,6   | 101,3    | 252,9 | 356,1 | 223,8 | 101,3 |

|            |      |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 27/7/1983  | 61   | 170,8 | 123,5 | 101,3 | 254,9 | 359,1 | 224,8 | 101,3 |
| 5/8/1983   | 61   | 169,8 | 124,5 | 102,3 | 255,9 | 360,1 | 226,8 | 102,3 |
| 17/8/1983  | 61,8 | 168,8 | 128,5 | 99,9  | 253,9 | 357,1 | 224,8 | 99,9  |
| 25/8/1983  | 62,8 | 168,8 | 123,5 | 104,3 | 257,9 | 360,1 | 227,8 | 104,3 |
| 8/9/1983   | 61,8 | 171,8 | 123,5 | 105,3 | 260,9 | 364,1 | 228,8 | 105,3 |
| 29/9/1983  | 61,8 | 171,8 | 124,5 | 106,3 | 262,9 | 366,1 | 230,8 | 106,3 |
| 6/10/1983  | 61,8 | 172,8 | 124,5 | 105,3 | 262,9 | 366,1 | 229,8 | 105,3 |
| 21/10/1983 | 61   | 171,8 | 123,5 | 104,3 | 258,9 | 363,1 | 227,8 | 104,3 |
| 27/10/1983 | 62,8 | 168,5 | 125,5 | 103,3 | 257,9 | 360,1 | 228,8 | 103,3 |
| 10/11/1983 | 61,8 | 170,8 | 125,5 | 103,3 | 259,9 | 363,1 | 224,5 | 103,3 |
| 17/11/1983 | 61   | 172,8 | 123,5 | 107,3 | 262,9 | 367,1 | 230,8 | 107,3 |
| 25/11/1983 | 61,8 | 171,8 | 123,5 | 106,3 | 261,9 | 365,1 | 229,8 | 106,3 |
| 1/12/1983  | 61,8 | 170,8 | 124,5 | 105,3 | 260,9 | 364,1 | 229,8 | 105,3 |
| 15/12/1983 | 61   | 170,8 | 126,5 | 105,3 | 260,9 | 366,1 | 231,8 | 105,3 |
| 22/12/1983 | 62,8 | 170,8 | 124,5 | 107,3 | 263,9 | 366,1 | 231,8 | 107,3 |
| 30/12/1983 | 63,8 | 168,8 | 125,5 | 108,3 | 264,9 | 366,1 | 233,8 | 108,3 |
| 12/1/1984  | 62,8 | 170,8 | 125,5 | 107,3 | 264,9 | 367,1 | 232,8 | 107,3 |
| 27/1/1984  | 62,8 | 170,8 | 125,5 | 107,3 | 264,9 | 367,1 | 232,8 | 107,3 |
| 9/2/1984   | 61,8 | 170,8 | 126,5 | 107,3 | 264,9 | 368,1 | 233,8 | 107,3 |
| 22/2/1984  | 61,8 | 170,8 | 126,5 | 107,3 | 264,9 | 368,1 | 233,8 | 107,3 |
| 21/3/1984  | 63,8 | 173,8 | 127,5 | 114,3 | 277,9 | 379,1 | 241,8 | 114,3 |
| 7/4/1984   | 61   | 172,8 | 127,5 | 128,3 | 285,9 | 392,1 | 225,4 | 128,3 |
| 8/4/1984   | 68,8 | 172,8 | 128,5 | 114,3 | 282,9 | 379,1 | 242,8 | 114,3 |
| 11/4/1984  | 67,8 | 174,8 | 127,5 | 115,3 | 283,9 | 381,1 | 242,8 | 115,3 |
| 16/4/1984  | 70,8 | 168,5 | 127,5 | 125,3 | 284,9 | 379,1 | 252,8 | 125,3 |
| 24/4/1984  | 73,8 | 174,8 | 127,5 | 114,3 | 288,9 | 380,1 | 241,8 | 114,3 |
| 9/5/1984   | 77,8 | 171,8 | 126,5 | 118,3 | 292,9 | 380,1 | 244,8 | 118,3 |
| 21/5/1984  | 80,8 | 171,8 | 127,5 | 117,3 | 295,9 | 380,1 | 244,8 | 117,3 |
| 30/5/1984  | 83,8 | 170,8 | 128,5 | 117,3 | 298,9 | 380,1 | 245,8 | 117,3 |
| 7/6/1984   | 84,8 | 172,8 | 128,5 | 118,3 | 302,9 | 383,1 | 246,8 | 118,3 |

|            |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15/6/1984  | 85,8  | 170,8 | 128,5 | 115,3 | 298,9 | 378,1 | 243,8 | 115,3 |
| 28/6/1984  | 86,8  | 171,8 | 127,5 | 115,3 | 299,9 | 378,1 | 242,8 | 115,3 |
| 5/7/1984   | 88,8  | 170,8 | 128,5 | 116,3 | 302,9 | 379,1 | 244,8 | 116,3 |
| 20/7/1984  | 90,8  | 172,8 | 127,5 | 116,3 | 305,9 | 380,1 | 243,8 | 116,3 |
| 26/7/1984  | 72,8  | 172,8 | 128,5 | 117,3 | 289,9 | 382,1 | 245,8 | 117,3 |
| 2/8/1984   | 92,8  | 171,8 | 129,5 | 117,3 | 309,9 | 382,1 | 246,8 | 117,3 |
| 9/8/1984   | 93,8  | 171,8 | 122,6 | 117,3 | 292,9 | 364,1 | 228,8 | 117,3 |
| 16/8/1984  | 95,8  | 171,8 | 128,5 | 100,3 | 294,9 | 364,1 | 228,8 | 100,3 |
| 23/8/1984  | 96,8  | 171,8 | 129,5 | 117,3 | 313,9 | 382,1 | 246,8 | 117,3 |
| 13/9/1984  | 100,8 | 171,8 | 130,5 | 117,3 | 318,9 | 383,1 | 247,8 | 117,3 |
| 20/9/1984  | 102,8 | 172,8 | 129,5 | 119,3 | 322,9 | 385,1 | 248,8 | 119,3 |
| 27/9/1984  | 102,8 | 173,8 | 128,5 | 118,3 | 321,9 | 384,1 | 246,8 | 118,3 |
| 10/10/1984 | 95,8  | 172,8 | 129,5 | 120,3 | 316,9 | 386,1 | 249,8 | 120,3 |
| 24/10/1984 | 97,8  | 172,8 | 130,5 | 120,3 | 319,9 | 387,1 | 250,8 | 120,3 |
| 7/11/1984  | 108,8 | 173,8 | 130,5 | 118,3 | 329,9 | 386,1 | 248,8 | 118,3 |
| 20/11/1984 | 107,8 | 174,8 | 130,5 | 122,3 | 333,9 | 391,1 | 252,8 | 122,3 |
| 29/11/1984 | 108,8 | 174,8 | 122,6 | 122,3 | 323,9 | 380,1 | 241,8 | 122,3 |
| 5/12/1984  | 114,8 | 168,5 | 128,5 | 123,3 | 328,9 | 379,1 | 251,8 | 123,3 |
| 18/12/1984 | 101,8 | 176,8 | 130,5 | 121,3 | 328,9 | 392,1 | 251,8 | 121,3 |
| 27/12/1984 | 101,8 | 179,8 | 131,5 | 120,3 | 331,9 | 395,1 | 251,8 | 120,3 |
| 3/1/1985   | 103,8 | 177,8 | 130,5 | 120,3 | 330,3 | 392,1 | 250,8 | 120,3 |
| 8/1/1985   | 100,8 | 179,8 | 130,5 | 121,3 | 330,9 | 395,1 | 251,8 | 121,3 |
| 15/1/1985  | 99,8  | 182,8 | 129,5 | 121,3 | 331,9 | 397,1 | 250,8 | 121,3 |
| 22/1/1985  | 107,8 | 180,8 | 130,5 | 121,3 | 338,9 | 396,1 | 251,8 | 121,3 |
| 31/1/1985  | 107,8 | 180,8 | 129,5 | 122,3 | 338,9 | 396,1 | 251,8 | 122,3 |

---

Extensômetros da estaca 53+03 - 81,50m Montante (Deslocamentos em mm)

---

| Data       | Camada 1<br>(T10-T11) | Camada 2<br>(T11-T12) | Placa 11 | Placa 12 |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|
| 7/10/1982  | 1                     | 1                     | 2        | 1        |
| 16/10/1982 | 2                     | 0,5                   | 2,5      | 0,5      |
| 23/10/1982 | 1,5                   | 2                     | 3,5      | 2        |
| 31/10/1982 | 2,5                   | 2,5                   | 5        | 2,5      |
| 16/11/1982 | 3                     | 3                     | 6        | 3        |
| 30/11/1982 | 3                     | 3                     | 6        | 3        |
| 13/12/1982 | 3,5                   | 4                     | 7,5      | 4        |
| 17/12/1982 | 3                     | 4                     | 7        | 4        |
| 16/12/1982 | 3                     | 5                     | 8        | 5        |
| 22/12/1982 | 3,5                   | 4                     | 7,5      | 4        |
| 29/12/1982 | 3                     | 5,5                   | 8,5      | 5,5      |
| 29/1/1983  | 13,5                  | 11                    | 24,5     | 11       |
| 2/2/1983   | 14,5                  | 13,5                  | 28       | 13,5     |
| 7/2/1983   | 15,5                  | 13                    | 28,5     | 13       |
| 12/2/1983  | 14,5                  | 14,5                  | 29       | 14,5     |
| 19/2/1983  | 16                    | 11                    | 27       | 11       |
| 22/2/1983  | 14,5                  | 13                    | 27,5     | 13       |
| 26/2/1983  | 18,5                  | 12,5                  | 31       | 12,5     |
| 1/3/1983   | 16,5                  | 11                    | 27,5     | 11       |
| 7/3/1983   | 17                    | 12                    | 20       | 12       |
| 12/3/1983  | 17                    | 12                    | 29       | 12       |
| 18/3/1983  | 16,5                  | 12,5                  | 29       | 12,5     |
| 23/3/1983  | 18,5                  | 12,5                  | 31       | 12,5     |
| 29/3/1983  | 18                    | 12,5                  | 30,5     | 12,5     |
| 5/4/1983   | 17,5                  | 13,5                  | 31       | 13,5     |
| 13/4/1983  | 18                    | 12,5                  | 30,5     | 12,5     |
| 22/4/1983  | 17,5                  | 13,5                  | 31       | 13,5     |
| 27/4/1983  | 19                    | 14,5                  | 33,5     | 14,5     |

|            |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|
| 10/5/1983  | 19,5 | 17,5 | 37   | 17,5 |
| 18/5/1983  | 20,5 | 15,5 | 36   | 15,5 |
| 26/5/1983  | 19,5 | 19   | 38,5 | 19   |
| 1/6/1983   | 20   | 18   | 38   | 18   |
| 10/6/1983  | 19,5 | 18   | 37,5 | 18   |
| 15/6/1983  | 21   | 17,5 | 38,5 | 17,5 |
| 23/6/1983  | 20,5 | 19,5 | 40   | 19,5 |
| 27/6/1983  | 21   | 18,5 | 39,5 | 18,5 |
| 14/7/1983  | 19,9 | 21   | 39,5 | 19,9 |
| 19/7/1983  | 20,9 | 21   | 40,9 | 20,9 |
| 27/7/1983  | 19,9 | 21   | 39,9 | 19,9 |
| 5/8/1983   | 21   | 19,4 | 40,4 | 19,4 |
| 17/8/1983  | 21   | 18,5 | 39,5 | 18,5 |
| 24/8/1983  | 22   | 20,4 | 42,9 | 20,4 |
| 8/9/1983   | 22   | 20,4 | 42,9 | 20,4 |
| 29/9/1983  | 22   | 21,4 | 42,5 | 21,4 |
| 6/10/1983  | 21   | 22,4 | 42,5 | 22,4 |
| 18/10/1983 | 21   | 22,4 | 42,9 | 22,4 |
| 26/10/1983 | 22   | 18,5 | 39,5 | 18,5 |
| 3/11/1983  | 21   | 20,4 | 41,4 | 20,4 |
| 9/11/1983  | 18,5 | 21   | 39,5 | 18,5 |
| 24/11/1983 | 23   | 19,4 | 42,4 | 19,4 |
| 30/11/1983 | 21   | 18,5 | 39,5 | 18,5 |
| 15/12/1983 | 21   | 20,4 | 41,4 | 20,4 |
| 21/12/1983 | 21   | 20,4 | 41,4 | 20,4 |
| 30/12/1983 | 21   | 21,4 | 42,4 | 21,4 |
| 20/1/1984  | 22   | 19,4 | 41,4 | 19,4 |
| 27/1/1984  | 22   | 19,4 | 41,4 | 19,4 |
| 8/2/1984   | 22   | 19,4 | 41,4 | 19,4 |

