

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

**AUSCULTAÇÃO POR INSTRUMENTAÇÃO DE  
BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ESTUDO DE  
CASO DAS BARRAGENS DA UHE SÃO SIMÃO**

**AUTOR: ALESSANDRA DA ROCHA FONSECA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes**

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

Ouro Preto, dezembro de 2003

# **AUSCULTAÇÃO POR INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ESTUDO DE CASO DAS BARRAGENS DA UHE SÃO SIMÃO**

**AUTOR: ALESSANDRA DA ROCHA FONSECA**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em dezembro de 2003, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Prof. Dr. Adilson do Lago Leite (UFOP)

Prof. Dr. Judy Norka Rodo de Mantilla (UFMG)

Fonseca, Alessandra da Rocha.  
F676a Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento  
para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São  
Simão / Alessandra da Rocha Fonseca. – Ouro Preto : UFOP, 2003.  
xxiii, 158p. : il. color. grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de  
pós-graduação em Engenharia Civil.

1. Usinas Hidrelétricas – São Simão. 2. Geotecnia. 3. Barragens.  
4. Instrumentação Geotécnica. I. Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. II. Título.

CDU: 621.311.21

Catálogo : sisbin@sisbin.ufop.br

## **Dedicatória**

*Especialmente aos meus pais pelo carinho, amizade e respeito  
dedicados ao longo de toda a vida.*



## **Agradecimentos**

A Deus por me dar fé e esperança, em quantidade tal, para que eu conseguisse finalizar essa tese.

*“Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende da nossa vontade e perseverança”. (Albert Einstein)*

Ao meu pai, José, e a minha mãe, Juraci, por terem dado apoio, carinho, tranquilidade e amizade, e por terem me mostrado o que o poder da fé e da esperança podem fazer em nossas vidas.

Ao meu irmão, José Darlan, e a minha cunhada, Luciene, pelo apoio, amizade e força.

Aos meus familiares pela torcida e orações no sucesso desta empreitada. Em especial a Jussara, pela palavra amiga dada nos momentos mais delicados. Obrigada por ser mais do que tia, ser a minha amiga querida!

Ao professor Romero César Gomes, pela ajuda prestada nessa caminhada tão árdua e desejada em busca da realização deste sonho. Sem a sua ajuda e apoio nada disso seria possível! Muito obrigada pela orientação, apoio, aprendizado, paciência, palavras de incentivo e lições de vida, que contribuíram para a realização deste trabalho.

À professora Teresinha de Jesus Bonuccelli que introduziu a Geotecnia no meu coração. Agradeço enormemente pelo incentivo dado na época do meu ingresso no mestrado. Pena que você não pode participar desse processo...

A CEMIG pelo apoio financeiro e pela disponibilidade total dos dados aqui publicados permitindo assim o desenvolvimento do tema. Em especial gostaria de agradecer aos engenheiros da GE/SM Gilson Furtado, Adelaide de Linhares Carvalho, Teresa Cristina Fusaro e Reinaldo Campos Machado e demais funcionários do GE/SM e da CEMIG. Obrigada pela amizade, força e orientação prestados neste período. Que saudade!

Ao Ernane pelo carinho mostrado, principalmente, nos momentos mais difíceis.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Geotecnia, Luís Gonzaga Araújo, Christianne Nogueira, Frederico Sobreira, Waldyr Lopes Filho, Luís Fernando Martins e Saulo Gutemberg pelo apoio, pela convivência e pela experiência compartilhada.

Aos colegas do mestrado, obrigada pela convivência e pelo companheirismo. Principalmente ao Ednelson (meu quase irmão), Marcelo (Pajé), William, Roberto, Bruno (Tumate), Luciana e Zé Bernardo, meus amigos das horas mais incertas. Obrigada pelo ombro amigo e pelos melhores momentos desta caminhada!

Ao Jânder Faria Leitão e a Ana Cristina Moreira, da Leme Engenharia pela ajuda na busca de dados e informações de projeto, meu muito obrigada.

Aos examinadores da banca, Prof. Dr. Adilson do Lago Leite (UFOP), Prof. Dr. Judy Norka Rodo de Mantilla (UFMG) e Msc. Hamilton França (Convidado especial) pela contribuição tão valiosa neste trabalho e por terem se dispostos a participar da defesa em uma época tão desfavorável.

Às amigas da República Serena, Kátia, Érika, Juliana, Milena, Gilmara e Thalyta pela amizade, companheirismo e pelos momentos de descontração. Foi de fundamental importância essa época que passei com vocês. Pena que o mestrado ocupou a maior parte do tempo.

Aos amigos adquiridos ao longo do tempo, em especial aos amigos da República Canaan, Franciely de Barros, Aldo, Flávio, Cleide, Viviane Bispo, Nilda e Débora.

Ao Professor Walter Dornelas, Róvia, Rosa e Josafá pela amizade e colaboração.

A todos os funcionários da UFOP, pessoal da biblioteca, faxineiros, porteiros, etc...

À Fundação Gorceix pelo apoio e auxílio financeiro.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente na realização deste trabalho.

## **Resumo**

Os procedimentos de controle e monitoramento de obras geotécnicas de grande porte constituem parte integrante do projeto de tais estruturas, visando, entre outros objetivos, a previsão do comportamento da obra ao longo de sua vida útil e a aferição das premissas adotadas em projeto. Em projetos de barragens de terra e enrocamento, destinadas a projetos de geração de energia elétrica, estes estudos abrangem a fase construtiva, de enchimento e pós-enchimento do reservatório.

Este trabalho contempla as análises dos resultados da instrumentação instalada em barragens de terra e enrocamento de um dos mais complexos e bem instrumentados empreendimentos hidrelétricos do Brasil - UHE São Simão, implantado na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás. Estas estruturas foram analisadas como estudo de caso por comportar complexidades específicas em termos da geometria geral, materiais de construção e condicionantes geológico-geotécnicos de fundação.

A auscultação por instrumentação geotécnica das barragens da UHE São Simão incluiu piezômetros (Casagrande Modificado, pneumáticos Hall e corda vibrante tipo Maihak), medidores de N.A., medidores de recalque IPT, caixas suecas, marcos de superfície, inclinômetros, células de tensão total e medidores de vazão. As análises abrangeram os principais resultados e conclusões deste monitoramento desde a fase construtiva até os dias atuais, após 25 anos de plena operação das barragens, ratificando as premissas de projeto e a segurança global destas estruturas.

## **Abstract**

The control and monitoring procedures constitute an integrant part of the design of large geotechnical structures, aiming, among others things, a previous analysis of its future behavior and the validation or not of the prescriptions adopted. In earth and rockfill dams design for power generation impoundments, these studies include steps like construction, filling and post-filling of the reservoir.

This work presents the main results from the instrumentation installed in earth and rockfill dams of one of the most complex and well instrumented power impoundments performed in Brazil - the São Simão Hydroelectric Project, located in South-Central Brazil, between the states of Minas Gerais and Goiás. These structures were analyzed as a case study for as they have complex and specific features in terms of the general geometry, construction materials and foundation geological – geotechnical conditions.

The auscultation process via instrumentation from the São Simão dams included piezometers (Modified Casagrande, pneumatic kind Hall and electrical kind Maihak), water level measuring devices, IPT settlement devices, Swedish gauges, surface landmarks, inclinometers, earth pressure cells and seepage measurements. The analyses involved the main results and conclusions of this monitoring since the construction stage up to current days, after 25 years of full operation of the dams. They ratified the design premises and the global safety of these structures.

## Índice

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Importância da Pesquisa.....	2
1.2 - Objetivos do Trabalho.....	3
1.3 - Metodologia dos Estudos .....	3
1.4 - Estruturação do Trabalho .....	3
<b>Capítulo 2 - Instrumentação Geotécnica Aplicada a Barragens de Terra e Enrocamento .....</b>	<b>6</b>
2.1. - Introdução .....	6
2.2. - Instrumentação das Barragens de Terra e Enrocamento .....	9
2.2.1. - Princípios e Instrumentos para a Medição de Vazões.....	12
2.2.2. - Princípios e Instrumentos para a Medição de Deslocamentos .....	12
2.2.2.1 - Marcos de Deslocamento Superficial .....	12
2.2.2.2 - Placas de Recalque com Tubos Telescópicos.....	12
2.2.2.3 - Medidores de Recalque Tipo KM .....	12
2.2.2.4 - Medidores de Recalque Magnéticos.....	12
2.2.2.5 - Medidores de Recalque Tipo USBR .....	12
2.2.2.6 - Medidores de Recalques Tipo Caixa Sueca .....	12
2.2.2.7 - Medidores Pneumáticos Tipo Hall .....	12
2.2.2.8 - Perfilômetro de Recalques .....	12
2.2.2.9 - Inclinômetros de Recalques .....	12
2.2.2.10 - Eletrônicos .....	12
2.2.2.11 - Extensômetros de Hastes .....	12
2.2.2.12 - Medidores Magnéticos .....	12
2.2.2.13 - Inclinômetros Horizontais .....	12

2.2.3 - Princípios e Instrumentos para a Medição de Tensões .....	12
2.2.4 - Princípios e Instrumentos para a Medição do Nível D'água.....	12
2.2.5 - Princípios e Instrumentos para a Medição de Poropressões .....	12
2.2.5.1 - Piezômetros de Tubo Aberto (Tipo Casagrande) .....	12
2.2.5.2 - Piezômetros Hidráulicos.....	12
2.2.5.3 - Piezômetros Pneumáticos .....	12
2.2.5.4 - Piezômetros Elétricos .....	12
2.2.5.5 - Piezômetros de Corda Vibrante .....	12
2.3 - Programas de Instrumentação das Barragens na CEMIG.....	12
 <b>Capítulo 3 - Instrumentação Geotécnica das Barragens da UHE São Simão .....</b>	<b>48</b>
3.1. - Introdução .....	48
3.2. - Geologia Regional.....	50
3.3. - Geologia Local .....	53
3.4. - Concepção, Arranjo Geral e Materiais das Barragens da UHE São Simão	60
3.4.1. - Arranjo Geral.....	60
3.4.2. - Materiais de Construção.....	62
3.4.3. - Geometria e Seções Típicas das Barragens.....	64
3.5. - Auscultação por Instrumentação das Barragens da UHE São Simão .....	73
3.5.1. - Descrição Geral dos Instrumentos Utilizados .....	73
3.5.2. - Quantitativo da Instrumentação e Seções Instrumentadas .....	76
3.6. - Valores Limites e Valores de Controle Propostos para a Instrumentação das Barragens da UHE São Simão.....	81
3.6.1. - Valores de Projeto para a Piezometria .....	81
3.6.2. - Valores de Projeto para Deslocamentos Verticais e Horizontais .....	85
3.6.3. - Valores de Projeto para Tensões Totais .....	88
3.6.4. - Valores de Projeto para Vazões de Drenagem .....	89
 <b>Capítulo 4 - Análise dos Dados de Instrumentação das Barragens da UHE São Simão - Parte I – Deslocamentos Verticais e Horizontais .....</b>	<b>90</b>
4.1. - Introdução .....	90
4.2. - Deslocamentos Verticais.....	90

4.2.1. - Marcos de Superfície.....	91
4.2.2. - Medidores de Recalques IPT.....	99
4.2.3. - Inclinômetros.....	103
4.3. - Deslocamentos Horizontais.....	108
4.3.1. - Inclinômetros.....	108
 <b>Capítulo 5 - Análise dos Dados de Instrumentação das Barragens da UHE São Simão - Parte II – Poropressões, Tensões Totais e Vazões de Percolação.....</b>	 122
5.1. - Introdução .....	122
5.2. - Piezometria.....	122
5.3. - Células de Tensões Totais.....	141
5.4. - Medidores de Vazão.....	143
 <b>Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Futuras Pesquisas.....</b>	 146
6.1. - Considerações Finais.....	146
6.2. - Conclusões .....	147
6.2.1. - Deslocamentos Verticais e Horizontais.....	147
6.2.2. - Poropressões, Tensões Totais e Vazões .....	149
6.3 - Sugestões para Futuras Pesquisas .....	151
 <b>Referência Bibliográfica.....</b>	 153
 <b>Anexo I - Seções Instrumentadas da UHE São Simão</b>	
 <b>Anexo II - Marcos de Superfície - Barragem de Terra - Margem Direita -</b>	
 <b>Anexo III - Marcos de Superfície - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -</b>	
 <b>Anexo IV - Medidores de Recalque Tipo IPT - Barragem de Terra - Margem Direita -</b>	

**Anexo V - Medidores de Recalque Tipo IPT - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**

**Anexo VI - Inclinômetros de Recalque - Barragem de Terra - Margem Direita -**

**Anexo VII - Inclinômetros de Recalque - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**

**Anexo VIII - Inclinômetros de Deflexão - Barragem de Terra - Margem Direita -**

**Anexo IX - Inclinômetros de Deflexão - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**

**Anexo X - Piezômetros – Casagrande e Pneumático Tipo Hall - Barragem de Terra - Margem Direita -**

**Anexo XI - Piezômetros – Casagrande, Pneumático Tipo Hall e Elétrico Tipo Maihak - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**

**Anexo XII - Células de Tensão Total - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**

**Anexo XIII - Medidores de NA - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**

**Anexo XIV - Medidores de Vazão - Barragem de Terra - Margem Direita -**

**Anexo XV - Medidores de Vazão - Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento - Margem Esquerda -**



## Lista de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2.1 - Auscultação de Barragens de Terra e Enrocamento (CBGB, 1996, Adaptado).....	7
Figura 2.2 - Instalação de Marcos Superficiais.....	16
Figura 2.3 - Medidor de Recalques de Tubos Telescópicos .....	17
Figura 2.4 - Medidores Magnéticos de Recalques.....	19
Figura 2.5 - Esquema Geral da Caixa Sueca .....	20
Figura 2.6 - (a) Perfilômetro de Recalques e (b) Torpedo de Medição .....	22
Figura 2.7 - Inclinômetro: (a) Horizontal, (b) Inclinado e (c) Vertical .....	23
Figura 2.8 - Princípio Geral de Funcionamento - Inclinômetro Instalado na Horizontal .....	24
Figura 2.9 - Inclinômetro de Recalque - Pescador - Posição de Leitura .....	26
Figura 2.10 - Sensores Eletrolíticos .....	26
Figura 2.11 - Princípio Geral de Funcionamento - Inclinômetro Instalado na Vertical .	29
Figura 2.12 - Tipos Mais Comuns de Células de Tensões Utilizadas em Solos.....	31
Figura 2.13 - Distribuição Irregular de Tensões sobre Células de Medição.....	32
Figura 2.14 - Esquema do Medidor de Nível D'Água.....	33
Figura 2.15 - Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande.....	37
Figura 2.16 - Esquema Geral do Piezômetro Hidráulico.....	38
Figura 2.17 - Esquema e Detalhamento do Piezômetro Pneumático.....	40
Figura 2.18 - Esquema do Piezômetro Elétrico .....	42
Figura 2.19 - Esquema do Piezômetro de Corda Vibrante .....	42
Figura 2.20 - Tela de Entrada no Programa MONITOR .....	44
Figura 2.21 - Exemplo da Saída Gráfica do Programa MONITOR (Leituras de Piezômetros da UHE Piau) .....	45
Figura 2.23 - Localização de Algumas Hidrelétricas Pertencentes a CEMIG.....	46

### Capítulo 3

Figura 3.1 - Localização da UHE São Simão .....	48
---	----

Figura 3.2 - Posição Geográfica da UHE São Simão .....	49
Figura 3.3 - Localização da UHE São Simão .....	49
Figura 3.4 - Mapa Geológico Regional da UHE São Simão .....	51
Figura 3.5 - Estratigrafia Local - Margem Direita (Viotti et al., 1983).....	56
Figura 3.6 - Arranjo Geral das Estruturas da UHE São Simão (Viotti et al., 1983).....	61
Figura 3.7 - Barragem de Terra da Margem Direita - BTMD .....	64
Figura 3.8 - Seção Típica da BTMD - Seção 5 - Estaca 1 + 240,0.....	65
Figura 3.9 - Seção Típica da Zona de Transição N <sup>o</sup> 1 - Seção 6 - Estaca 1 + 440,0 .....	67
Figura 3.10 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - BTME.....	67
Figura 3.11 - Seção Típica da BTME - Seção 5 - Estaca 2 + 780,0 .....	68
Figura 3.12 - Barragem de Terra e Enrocamento no Leito do Rio (Margem Esquerda) .....	69
Figura 3.13 - Seção Típica da Barragem de Terra e Enrocamento - Estaca 2 + 410,0... 70	
Figura 3.14 - Seção Típica da Transição N <sup>o</sup> 2 - Seção 9 - Estaca 2 + 016,0 .....	72
Figura 3.15 - Planta da Instrumentação Instalada na Barragem de Terra da Margem Direita (BD) da UHE São Simão .....	79
Figura 3.16 - Planta da Instrumentação Instalada na Barragem de Terra e na Barragem de Terra e Enrocamento da Margem da UHE São Simão .....	80

#### **Capítulo 4**

Figura 4.1 - Perfil dos Recalques Medidos pelos Marcos de Superfície Instalados na Crista da BTMD (até maio/2003) .....	92
Figura 4.2 - Perfil dos Recalques Medidos pelos Marcos de Superfície Instalados na Crista da BTME (até maio/2003).....	96
Figura 4.3 - Resultados Típicos dos Medidores de Recalques IPT .....	100
Figura 4.4 - Curvas dos Recalques para Segmentos do Inclinômetro IR100/BTMD... 104	
Figura 4.5 - Curvas dos Recalques para Segmentos do Inclinômetro IR300/BTME ... 107	
Figura 4.6 - Curvas dos Recalques para Segmentos do Inclinômetro IR400/BTME... 108	
Figura 4.7 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID100 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita .....	110
Figura 4.8 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID100 (Fase de Enchimento e Direção Montante-Jusante) .....	110

Figura 4.9 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID100 (Fase de Pós-Enchimento e Direção Montante-Jusante) .....	111
Figura 4.10 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID200 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita .....	112
Figura 4.11 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID200 (Fase de Enchimento):(a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita..	113
Figura 4.12 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID200 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda- Direita .....	114
Figura 4.13 - Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID300 (Direção Montante-Jusante:Fase Construtiva (a), Enchimento (b) e Pós- Enchimento (c)) .....	115
Figura 4.14 - Deslocamentos Horizontais Medidos pelos Inclinômetros na BTME (Fase Construtiva e Direção Montante-Jusante): a-d: ID100-ID200-ID300 e ID400.....	117
Figura 4.15 - Deslocamentos Horizontais Medidos pelos Inclinômetros na BTME (Fase de Enchimento e Direção Montante-Jusante): a-d: ID100-ID200-ID300 e ID400 .....	119
Figura 4.16 - Deslocamentos Horizontais Medidos pelos Inclinômetros na BTME (Fase de Pós-Enchimento e Direção Montante-Jusante): a-d: ID100 - ID200 - ID300 e ID400 .....	121

## Capítulo 5

Figura 5.1 - Registros Típicos das Leituras dos Piezômetros Instalados na BTMD ....	127
Figura 5.2 - Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 3 - BTMD .	128
Figura 5.3 - Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 5 - BTMD .	130
Figura 5.4 - Esquema da Localização dos Piezômetros Pneumáticos - Transição N <sup>o</sup> 1 .....	131
Figura 5.5 - Registros das Leituras de Alguns Piezômetros Instalados na Transição N <sup>o</sup> 1 .....	132
Figura 5.6 - Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 1 - BTME..	135
Figura 5.7 - Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 6 - BTME..	137
Figura 5.8a - Registros das Leituras de Piezômetros Instalados na Seção 8 - BTME..	138
Figura 5.8b - Registros das Leituras de Piezômetros Instalados na Seção 8 - BTME..	139

Figura 5.9 - Registros das Leituras de Piezômetros Instalados na Seção 9 - BTME.... 140

Figura 5.10 - Leituras das Células de Tensões Totais Instaladas na Seção 9 - BTME. 142

Figura 5.11 - Registros das Leituras de Vazões dos Medidores Instalados na BTME. 145

## **Anexo I**

Figura I.1 - Arranjo Geral - UHE São Simão

Figura I.2 - Locação dos Marcos de Superfície e Medidores de Vazão - MD e ME

Figura I.3 - Localização dos Instrumentos na Barragem de Terra da Margem Direita - BTMD

Figura I.4 - Barragem de Terra da Margem Direita - Seção 1 - Estaca 0 + 460,0

Figura I.5 - Barragem de Terra da Margem Direita - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0

Figura I.6 - Barragem de Terra da Margem Direita - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0

Figura I.7 - Barragem de Terra da Margem Direita - Seção 4 - Estaca 0 + 870,0

Figura I.8 - Barragem de Terra da Margem Direita - Seção 5 - Estaca 1 + 240,0

Figura I.9 - Barragem de Terra da Margem Direita - Seção 6 - Estaca 1 + 440,0

Figura I.10 - Localização dos Instrumentos na Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda - BTME

Figura I.11 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - Seção 0 - Estaca 3 + 485,0

Figura I.12 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0

Figura I.13 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - Seção 2 - Estaca 2 + 963,0

Figura I.14 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - Seção 3 - Estaca 2 + 913,0

Figura I.15 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - Seção 4 - Estaca 2 + 863,0

Figura I.16 - Barragem de Terra da Margem Esquerda - Seção 5 - Estaca 2 + 780,0

Figura I.17 - Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda - Seção 6 - Estaca 2 + 500,0

Figura I.18 - Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda - Seção 7 - Estaca 2 + 460,0

Figura I.19 - Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0

Figura I.20 - Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda - Seção 8A - Estaca 2 + 325,0

Figura I.21 - Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda - Seção 9 - Estaca 2 + 016,0

## **Anexo II**

Figura II.1 - Marcos de Superfície - BTMD (Distância ao eixo: 49,6 e 100,0 m à Jusante (a) e 5,0 e 25,0 m à Jusante (b))

Figura II.2 - Marcos de Superfície - BTMD - Instalados à Montante do Eixo

## **Anexo III**

Figura III.1 - Marcos de Superfície - BTME (Distância ao eixo: 5,0 m à Jusante (a), 25,0 m à Jusante (b) e 50,0 e 57,0 m à Jusante (c))

Figura III.2 - Marcos de Superfície - BTME (Distância ao eixo: 25,0 m à Montante (a) e 5,0 m à Montante (b))

## **Anexo IV**

Figura IV.1 - Medidores de Recalque IPT - BTMD - Seção 1 - Estaca 0 + 460,0

Figura IV.2 - Medidores de Recalque IPT - BTMD - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0

Figura IV.3 - Medidores de Recalque IPT - BTMD - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0

Figura IV.4 - Medidores de Recalque IPT - BTMD - Seção 4 - Estaca 0 + 870,0

Figura IV.5 - Medidores de Recalque IPT - BTMD - Seção 5 - Estaca 1 + 240,0

## **Anexo V**

Figura V.1 - Medidores de Recalque IPT - BTME - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0

Figura V.2 - Medidores de Recalque IPT - BTME - Seção 6 - Estaca 2 + 500,0

## **Anexo VI**

Figura VI.1 - Inclinômetro de Recalque - IR100 - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0 (Segmentos: IR102 - IR113 (a) e IR114 - IR125 (b))

Figura VI.2 - Inclinômetro de Recalque - IR200 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Segmentos: IR205 - IR214 (a), IR215 - IR222 (b) e IR223 - IR231 (c))

Figura VI.3 - Inclinômetro de Recalque - IR300 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Segmentos: IR309 - IR316 (a) e IR317 - IR325 (b))

## **Anexo VII**

Figura VII.1 - Inclínômetro de Recalque - IR100 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Segmentos: IR102 - IR112 (a), IR113 - IR122 (b) e IR123 - IR132 (c))

Figura VII.2 - Inclínômetro de Recalque - IR200 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Segmentos: IR202 - IR209 (a) e IR210 - IR219 (b))

Figura VII.3 - Inclínômetro de Recalque - IR300 - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0 (Segmentos: IR302 - IR313 (a), IR314 - IR325 (b), IR326 - IR337 (c), IR338 - IR350 (d), IR351 - IR363 (e) e IR364 - IR375(f))

Figura VII.4 - Inclínômetro de Recalque - IR400 - Seção 8A - Estaca 2 + 325,0 (Segmentos: IR403 - IR414 (a), IR415 - IR428 (b), IR429 - IR439 (c) e IR440 - IR451 (d))

## **Anexo VIII**

Figura VIII.1 - Inclínômetro de Deflexão - ID100 - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.2 - Inclínômetro de Deflexão - ID100 - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.3 - Inclínômetro de Deflexão - ID100 - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.4 - Inclínômetro de Deflexão - ID200 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.5 - Inclínômetro de Deflexão - ID200 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (a) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.6 - Inclínômetro de Deflexão - ID200 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.7 - Inclínômetro de Deflexão - ID300 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.8 - Inclínômetro de Deflexão - ID300 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura VIII.9 - Inclínômetro de Deflexão - ID300 - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

## **Anexo XI**

Figura XI.1 - Inclínômetro de Deflexão - ID100 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.2 - Inclínômetro de Deflexão - ID100 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.3 - Inclínômetro de Deflexão - ID100 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.4 - Inclínômetro de Deflexão - ID200 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.5 - Inclínômetro de Deflexão - ID200 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.6 - Inclínômetro de Deflexão - ID200 - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.7 - Inclínômetro de Deflexão - ID300 - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.8 - Inclínômetro de Deflexão - ID300 - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.9 - Inclínômetro de Deflexão - ID300 - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.10 - Inclínômetro de Deflexão - ID400 - Seção 8A - Estaca 2 + 325,0 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.11 - Inclínômetro de Deflexão - ID400 - Seção 8A - Estaca 2 + 325,0 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

Figura IX.12 - Inclínômetro de Deflexão - ID400 - Seção 8A - Estaca 2 + 325,0 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante - Jusante; (b) Direção Esquerda - Direita

## **Anexo X**

Figura X.1 - Piezômetros de Casagrande - Seção 1 - Estaca 0 + 460,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.2 - Piezômetros de Casagrande - Seção 2 - Estaca 0 + 670,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.3 - Piezômetros de Casagrande - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.4 - Piezômetros Pneumático (PH301-PH305) - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.5 - Piezômetros Pneumático (PH306-PH311) - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.6 - Piezômetros Pneumático (PH312-PH316) - Seção 3 - Estaca 0 + 810,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.7 - Piezômetros de Casagrande - Seção 5 - Estaca 1 + 240,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.8 - Piezômetro de Casagrande - Seção 6 - Estaca 1 + 440,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.9 - Piezômetros Pneumáticos (PH602-PH603, PH605-PH606) - Seção 6 - Estaca 1 + 440,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura X.10 - Piezômetros Pneumáticos (PH608-PH609, PH611-PH612) - Seção 6 - Estaca 1 + 440,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

## **Anexo XI**

Figura XI.1 - Piezômetros de Casagrande - Seção 0 - Estaca 3 + 485,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.2 - Piezômetros de Casagrande - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.3 - Piezômetros Pneumáticos (PH101-PH105) - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.4 - Piezômetros Pneumáticos (PH106-PH112) - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.5 - Piezômetros Pneumáticos (PH113-PH116) - Seção 1 - Estaca 3 + 160,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.6 - Piezômetros de Casagrande - Seção 5 - Estaca 2 + 780,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.7 - Piezômetros de Casagrande - Seção 6 - Estaca 2 + 500,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



Figura XI.8 - Piezômetros de Casagrande - Seção 7 - Estaca 2 + 460,0: Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.9 - Piezômetros de Casagrande - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.10 - Piezômetros Pneumáticos (PH801-PH805) - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.11 - Piezômetros Pneumáticos (PH806-PH810) - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.12 - Piezômetros Pneumáticos (PH811-PH815) - Seção 8 - Estaca 2 + 410,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.13 - Piezômetros Pneumáticos (PH910-PH915) - Seção 9 - Estaca 2 + 016,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.14 - Piezômetros Pneumáticos (PH916-PH921) - Seção 9 - Estaca 2 + 016,0: Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

Figura XI.15 - Piezômetros Maihak (PM901-PM906) - Seção 9 - Estaca 2 + 016,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

## **Anexo XII**

Figura XII.1 - Células de Tensão Total - Seção 9 - Estaca 2 + 016,0

## **Anexo XIII**

Figura XIII.1 - Medidor de NA - Seção 0 - Estaca 3 + 485,0

Figura XIII.2 - Medidores de NA - Seção 2 - Estaca 2 + 963,0

Figura XIII.3 - Medidores de NA - Seção 3 - Estaca 2 + 913,0

Figura XIII.4 - Medidores de NA - Seção 4 - Estaca 2 + 863,0

## **Anexo XIV**

Figura XIV.1 - Medidores de Vazão - BTMD

## **Anexo XV**

Figura XV.1 - Medidores Vazão (VV004-VV007 e VV009) - BTME

Figura XV.2 - Medidores Vazão (VV010-VV013) - BTME

## Lista de Tabelas

### Capítulo 2

Tabela 2.1 - Características Gerais dos Instrumentos de Medida.....	11
Tabela 2.2 - Situação Geral da Instrumentação Instalada nas Principais Hidrelétricas Pertencentes a CEMIG até 2003 .....	47

### Capítulo 3

Tabela 3.1 - Seqüência Estratigráfica dos Diversos Derrames e Interderrames da Área de Projeto (IESA, 1980a) .....	54
Tabela 3.2 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento - Solos Transportados .....	59
Tabela 3.3 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento - Solos Residual Denso e Vesicular de Fundação .....	60
Tabela 3.4 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento - Areia Argilosa do Núcleo das Barragens .....	62
Tabela 3.5 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento - Areia Argilosa do Núcleo das Barragens (Ensaio Complementares) .....	66
Tabela 3.6 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento - Cascalho de Terraço .....	66
Tabela 3.7a - Quantitativo da Instrumentação - Barragem de Terra / Margem Direita..	77
Tabela 3.7b - Quantitativo da Instrumentação - Barragem de Terra / Margem Esquerda.....	77
Tabela 3.7c - Quantitativo da Instrumentação - Barragem de Terra e Enrocamento / Leito do Rio (ME).....	78
Tabela 3.7d - Quantitativo da Instrumentação - Transições N <sup>o</sup> 1 (MD) e N <sup>o</sup> 2 (ME) ....	78
Tabela 3.8a - Valores Limites e de Controle: Piezometria da BTMD.....	82
Tabela 3.8b - Valores Limites e de Controle: Piezometria da BTME.....	83
Tabela 3.9 - Valores dos Recalques Previstos - Fundações da BTMD .....	85
Tabela 3.10 - Valores dos Recalques Previstos - Crista da BTMD .....	86
Tabela 3.11 - Valores dos Recalques Previstos - Crista da BTME .....	86
Tabela 3.12 - Valores de Controle - Marcos Superficiais - Jusante do Eixo - BTMD (Silveira e Ávila, 1995).....	87

Tabela 3.13 - Valores de Controle - Marcos Superficiais - Montante do Eixo - BTME (Silveira e Ávila, 1995).....	87
Tabela 3.14 - Valores de Controle - Inclínômetros (Silveira e Ávila, 1995).....	88
Tabela 3.15 - Vazões Previstas - Silveira e Ávila (1995).....	89

## **Capítulo 4**

Tabela 4.1 - Recalques por Fases - Marcos Superficiais da BTMD - Crista.....	91
Tabela 4.2 - Recalques Medidos x Recalques Previstos - Marcos Superficiais da BTMD.....	93
Tabela 4.3 - Recalques Diferenciais Longitudinais - Marcos Superficiais da BTMD ...	94
Tabela 4.4 - Recalques Diferenciais Transversais - Marcos Superficiais da BTMD .....	94
Tabela 4.5 - Recalques por Fases - Marcos Superficiais das Barragens de Terra e de Terra e Enrocamento - Crista.....	95
Tabela 4.6 - Recalques Medidos x Recalques Previstos - Marcos Superficiais da BTME .....	97
Tabela 4.7 - Recalques Diferenciais Longitudinais - Marcos Superficiais da BTME....	98
Tabela 4.8 - Recalques Diferenciais Transversais - Marcos Superficiais da BTME.....	98
Tabela 4.9 - Recalques Acumulados Totais - Medidores IPT .....	99
Tabela 4.10 - Recalques Acumulados Totais - Inclínômetro IR100 / BTMD.....	104
Tabela 4.11 - Recalques Acumulados Totais – Inclínômetros IR200 e IR300 / BTMD.....	104
Tabela 4.12 - Recalques Acumulados Totais - Inclínômetros IR100 e IR200 / BTME .....	106
Tabela 4.13 - Recalques Acumulados Totais - Inclínômetro IR300/BTME .....	106
Tabela 4.14 - Recalques Acumulados Totais - Inclínômetro IR400/BTME .....	107
Tabela 4.15 - Deslocamentos Horizontais Máximos Medidos pelos Inclínômetros ....	108

## **Capítulo 5**

Tabela 5.1 – Níveis Piezométricos Medidos x Níveis Piezométricos Previstos - Piezômetros da BTMD.....	123
Tabela 5.2 - Níveis Piezométricos Medidos x Níveis Piezométricos Previstos - Piezômetros da BTME .....	125

Tabela 5.3 - Características Gerais dos Piezômetros Pneumáticos - Transição Nº 1 ...	131
Tabela 5.4 - Distribuição de Tensões na Área da Transição Nº 2 - Seção 9 .....	141
Tabela 5.5 - Valores de Vazões nas Barragens da UHE São Simão .....	144
Tabela 5.6 - Vazões Totais e Específicas das Barragens da UHE São Simão.....	144

## **Capítulo 6**

Tabela 6.1 - Correlação Entre Valores de Recalques - Seção 2 da BTMD .....	148
--	-----

## **Capítulo 1**

### **Introdução**

#### **1.1. – Importância da Pesquisa**

A instrumentação geotécnica de obras de engenharia constitui uma das ferramentas empregadas para a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições da segurança global do empreendimento. Ela permite fazer um processo de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos, a partir dos instrumentos de medida instalados em diferentes seções e zonas dos maciços investigados. Nessas análises são incluídos valores limites no programa de instrumentação de forma a facilitar a detecção imediata de possíveis anomalias. Assim, em condições adequadas, um programa de instrumentação tende a garantir acurácia, bem como fornecer parâmetros relacionados à confiabilidade das leituras, e à compatibilidade em relação às metodologias construtivas e às premissas de projeto.

Os instrumentos geotécnicos são instalados em vários tipos de obras como barragens, taludes, encostas, túneis, aterros, estruturas de contenção, etc, com o intuito de medir grandezas de interesse (tensões, deslocamentos, poropressões e vazões), verificando-se, assim, a adequabilidade destes dados relativamente ao comportamento global previsto para as estruturas. Em túneis, por exemplo, o monitoramento das tensões dos maciços no entorno da escavação e/ou atuantes nos revestimentos adotados, permitem a adequação do projeto às seções subseqüentes, com base na avaliação dos resultados obtidos nas seções já concluídas. Um outro exemplo clássico desta metodologia refere-se à adoção de aterros experimentais instrumentados para se obter os parâmetros de projeto da obra final a ser implantada.

Especificamente para o caso de obras civis de grande porte, como é o caso das barragens de terra e enrocamento para fins de aproveitamento hidrelétrico, as bases e os procedimentos de auscultação por instrumentação constitui parte integrante do projeto

de tais estruturas, visando, entre outros objetivos, a previsão do comportamento da obra e a aferição das premissas adotadas em projeto. Nessas estruturas os instrumentos são instalados nos aterros e espaldares da barragem, nas fundações, em interfaces solos – estruturas, em obras auxiliares (ensecadeiras, vertedores, etc) ou ao longo do próprio reservatório.

Assim, com os dados obtidos em campo pela instrumentação é feito um processamento dessas leituras envolvendo frequência e abrangência, de forma a desenvolver uma sistemática para a composição e interpretação dos resultados, possibilitando, desta forma, a criação de diretrizes para eventuais intervenções no comportamento da obra. Neste contexto, impõe-se estabelecer determinados procedimentos para aferição e comparações destes dados com os critérios prescritos em projeto.

## **1.2. – Objetivos do Trabalho**

Este trabalho pretende estabelecer comparações entre os dados relativos ao comportamento geotécnico das estruturas com os respectivos critérios adotados em projeto, bem como o espectro de suas eventuais reavaliações. O estudo foi realizado a partir da análise detalhada dos dados de instrumentação geotécnica instalada num estudo de caso completo, no caso as barragens de terra e de terra e enrocamento da UHE São Simão, pertencente à CEMIG – Centrais Energéticas de Minas Gerais S.A., uma das obras geotécnicas mais bem instrumentadas do Brasil.

Estas barragens representam diferentes condições de projeto, envolvendo variações singulares dos condicionantes geológico-geotécnicos da fundação, dos materiais de construção, da geometria geral das estruturas e dos quantitativos e períodos de medições das grandezas de controle via instrumentação. As análises permitiram caracterizar estas variáveis de projeto e a avaliação global da metodologia de auscultação por instrumentação adotada em cada uma destas barragens, bem como as diretrizes que se revelaram adequadas e aquelas que conduziram a resultados pouco relevantes e/ou inconclusivos. Mais ainda, estes estudos propuseram subsidiar eventuais reorientações de projetos de instrumentação de barragens de terra e enrocamento.

### **1.3. – Metodologia dos Estudos**

A metodologia adotada consistiu em uma ampla abordagem dos documentos técnicos do empreendimento, buscando associar, de forma sistêmica e integrada, os princípios da instrumentação adotada com as características específicas de cada projeto das barragens envolvidas.

Numa etapa preliminar, foram levantados detalhadamente os aspectos gerais de cada barragem, tais como arranjo geral, geologia regional e local, seções típicas, materiais de construção, critérios de projeto e instrumentação instalada. Este trabalho desenvolveu-se a partir de ampla pesquisa do acervo técnico do GE/SM (Gerência de Segurança de Barragem e Manutenção Civil) da CEMIG, relativo aos empreendimentos e barragens analisadas. Muitos dos dados, praticamente históricos, encontravam-se “perdidos” ou inacessíveis, exigindo, portanto, um longo período de “garimpagem” de documentos, organização de acervos e triagem de dados técnicos.

Os registros de instrumentação propriamente ditos foram sistematizados e plotados em gráficos e/ou tabelas, até meados de 2003, com base no Programa MONITOR 1.2.0 de auscultação de barragens. Com base nos valores de referência adotados em projeto e nos registros de instrumentação, procedeu-se a uma análise global do comportamento das barragens correlacionando resultados previstos e efetivamente observados. O estudo foi concluído mediante o estabelecimento das diretrizes propostas para a futura auscultação destas barragens a partir das análises implementadas.

### **1.4. – Estruturação do Trabalho**

O trabalho foi subdividido em 6 capítulos, de acordo com a seguinte abordagem:

Na Introdução, são caracterizados a importância da pesquisa, os objetivos e a metodologia adotada nos trabalhos, bem como a estruturação e subdivisão dos assuntos abordados nos diferentes capítulos.

No Capítulo 2, faz-se uma extensa revisão bibliográfica relativa à instrumentação geotécnica aplicada a barragens de terra e enrocamento, em termos de medidores de deslocamentos, de tensões, de poropressões, de vazões e de NA. Nesta abordagem, são descritos os princípios e as características gerais dos principais instrumentos utilizados na auscultação, enfatizando-se suas vantagens e desvantagens e potenciais aplicações no âmbito dos projetos de barragens de terra e enrocamento.

No Capítulo 3, faz-se uma abordagem geral e abrangente dos condicionantes geotécnicos das barragens da UHE São Simão. No capítulo, são expostos os aspectos gerais das barragens, incluindo o arranjo geral, geologia regional e local, seções típicas, materiais de construção, critérios de projeto e instrumentação instalada. Adicionalmente, são apresentados os valores limites e de controle previstos para as grandezas de referência e a reavaliação destes dados durante a fase de operação das barragens.

Nos Capítulos 4 e 5, são apresentados os resultados obtidos pela instrumentação geotécnica das barragens de terra e de terra e enrocamento da UHE São Simão, bem como a sua representação através do Programa MONITOR. Estes resultados são, então, interpretados distintamente para as etapas de construção, primeiro enchimento e pós-enchimento do reservatório e posteriormente comparados com as premissas de projeto.

No Capítulo 4, estes estudos foram efetuados inicialmente em termos das medições dos deslocamentos verticais, obtidos por meio de marcos superficiais, medidores de recalques tipo IPT e inclinômetros, e de deslocamentos horizontais, através das medições de inclinômetros.

No Capítulo 5, as análises foram complementadas em termos das medições de poropressões (registradas pelos piezômetros tipo Casagrande e pneumáticos tipo Hall), tensões totais (através de células de tensões totais) e vazões de percolação através dos aterros, sistemas drenantes, fundações e ombreiras das barragens (quantificadas através de medidores dotados de vertedor triangular).



No Capítulo 6, são feitas as considerações relativas à síntese dos resultados obtidos da instrumentação, integrando-se aos estudos em termos de análises globais, comparações dos resultados e propostas de eventuais reorientações das diretrizes para as etapas subsequentes da auscultação e/ou outros projetos. O capítulo é concluído com a apresentação das principais conclusões do trabalho e com algumas sugestões de pesquisas complementares.

## **Capítulo 2**

### **Instrumentação Geotécnica Aplicada a Barragens de Terra e Enrocamento**

#### **2.1. - Introdução**

Chama-se auscultação de uma barragem ao conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global. A auscultação pode ser feita por:

- Inspeções Visuais : é o processo da auscultação qualitativa, através de vistorias periódicas de campo (FERC, 2003).
- Instrumentação: é o processo de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos a partir dos instrumentos de medida instalados no aterro ou nas fundações da barragem.

Estes processos devem ser realizados em conjunto durante toda a vida útil da barragem, de forma a fornecer subsídios necessários para uma eventual revisão (Kuperman et al., 2005a) ou adaptação dos procedimentos adotados na construção, operação ou manutenção da barragem, definindo a etapa de controle do empreendimento, permitindo ainda verificar se uma dada condição de risco está se desenvolvendo ou se é potencialmente viável de ocorrer (Fusaro, 2005).

As inspeções podem ter diferentes níveis de abordagem, detalhamento e periodicidade, constituindo elementos fundamentais no controle de uma barragem, normalmente elas são divididas em: rotineiras ou informais, periódicas, supervisão e extraordinárias.

Essas inspeções são realizadas a partir de uma análise prévia dos resultados da instrumentação, de forma a verificar problemas específicos nas áreas auscultadas e observar o estado de conservação dos aparelhos de medição, além disso é feito o acompanhamento dos problemas pré-existentes na área, bem como, a detecção de novas anomalias que possam prejudicar a segurança da obra (Balbi et al., 2005).

Surgências d'água, fissuras superficiais, erosões e abatimentos localizados são exemplos de problemas que somente podem ser detectados por meio de inspeções de campo, normalmente, essas inspeções são realizadas por meio de caminhadas ao longo da barragem e do reservatório, bem como em áreas próximas a região do barramento.

Muitos problemas, entretanto, não são passíveis de caracterização tão simples, demandando uma maior abordagem de gerenciamento, em termos de dados e do tempo das observações. Assim, o controle eficiente das condições de segurança de uma barragem exige a adoção de práticas de monitoramento sistemático da magnitude e das faixas de variação de certas grandezas físicas, que permitem a auscultação prévia destes problemas, mediante a implantação de um programa específico de instrumentação.

A Figura 2.1 mostra uma correlação entre os diversos tipos de instrumentos, instalados para a auscultação das barragens de terra e enrocamento, ao longo do aterro e da fundação, conjuntamente com as inspeções visuais, e os possíveis problemas passíveis de serem detectados ao longo de toda a sua vida útil. A partir dessa figura é possível observar a importância das inspeções visuais neste tipo de estrutura.

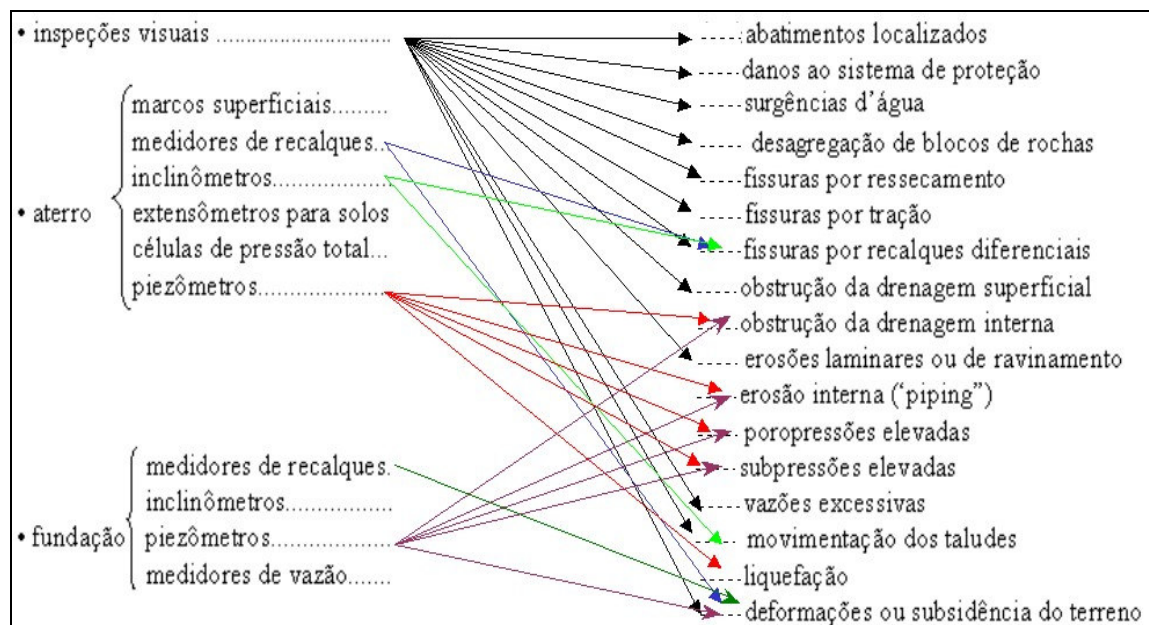


Figura 2.1 – Auscultação de Barragens de Terra e Enrocamento (CBGB, 1996, Adaptado)

Assim, para uma auscultação adequada das barragens é necessário um plano completo de monitoramento que abranja todas as fases da vida da barragem, bem como as atividades a serem realizadas (Piasentini, 2005):

- projeto de instrumentação que contemple desde a concepção do arranjo até os detalhes e as especificações da instalação e montagem;
- fixação dos valores de alerta e de controle para todos os instrumentos instalados e para as diversas fases de sua vida;
- plano de operação da instrumentação, abrangendo frequências das leituras nas diversas fases da vida da obra e durante possíveis eventos excepcionais;
- planos de observação visuais e inspeções in situ;
- plano de análise e interpretação do comportamento da obra com bases nos resultados da instrumentação e das inspeções visuais.

Portanto, um programa de auscultação por instrumentação de barragem apresetam objetivos que dependem basicamente da fase operacional considerada: construção, enchimento do reservatório e pós-enchimento (Vaughan, 1975). Em termos gerais, na fase construtiva, estes objetivos podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- obtenção de parâmetros geotécnicos mais realistas e representativos das condições in situ;
- aferição de soluções técnicas menos conservadoras adotadas na fase de projeto, que resultaram em economia significativa para a obra;
- previsão de possíveis zonas de risco durante a fase de construção;
- avaliação de eventos não previstos ou detecção de eventuais anomalias durante a construção;
- possibilidade de revisões ou reavaliações das premissas de projeto ou das metodologias construtivas então adotadas.

Na fase operacional da barragem, o monitoramento e controle da barragem através da instrumentação têm os seguintes objetivos:

- verificação do desempenho geral da estrutura em conformidade ou não com as especificações de projeto;

- caracterização do comportamento dos materiais dos aterros compactados e das fundações ao longo do tempo, monitorando a evolução das tensões, deslocamentos, vazões e poropressões;
- previsão de possíveis zonas de risco durante o período de operação;
- avaliação de eventos não previstos ou detecção de eventuais anomalias pós-construção;
- reavaliação das condições de segurança da estrutura e/ou alterações e/ou extrapolações do projeto original.

A evolução das técnicas de instrumentação geotécnica de barragens está diretamente associada ao aprimoramento tecnológico dos instrumentos de medida e à incorporação das especificações técnicas de projeto de metodologias padronizadas para a avaliação e controle das condições gerais de segurança das estruturas. No Brasil, até cerca de 30 ou 40 anos atrás, predominava a sistemática de diagnóstico através de inspeções visuais realizadas por grupos de consultores independentes de nível internacional. No caso de detecção de anomalias graves do comportamento da barragem, as observações do problema eram intensificadas e, eventualmente, eram feitos os reparos e/ou correções recomendadas pelos especialistas.

Nas décadas seguintes, a formulação de planos gerais de monitoramento e controle das barragens brasileiras levou a adoção de sistemas integrados, incorporando a aquisição automática e a análise sistemática de dados de poropressões, tensões totais, vazões, deslocamentos horizontais e verticais obtidos ao longo das seções mais representativas do comportamento global da estrutura. Este processo levou à substituição dos instrumentos inicialmente importados, ao desenvolvimento de instrumentos nacionais cada vez mais confiáveis e a uma reestruturação geral dos princípios e das metodologias a serem adotadas num plano de auscultação por instrumentação de uma barragem.

As barragens de Santa Branca (Light), Euclides da Cunha, Limoeiro, Graminha (CESP) e Três Marias (CEMIG) são consideradas as primeiras barragens a serem instrumentadas de forma adequada no Brasil, e a de Ilha Solteira, a referência em

termos dos projetos de instrumentação geotécnica das barragens brasileiras (CBGB, 1996). Em barragens de terra e enrocamento, adotou-se recentemente a prática de se instrumentar também os enrocamentos, a exemplo do monitoramento convencional do aterro compactado e das fundações. Dentre as barragens de terra e enrocamento melhor instrumentadas no Brasil, destacam-se as de Salto Osório, Foz do Areia, Salto Santiago e Emborcação (Marques Filho, 1983; Maurer, 1983).

Nas condições atuais, esta reestruturação dos princípios da instrumentação de barragens pode ser caracterizada nos seguintes pontos (Rosso e Piasentin, 1996):

- o número de instrumentos deve ser o mínimo possível, representativo da compartimentação da barragem e suficiente para garantir uma avaliação global do desempenho da estrutura;
- cuidados especiais devem ser tomados com a instrumentação das fundações, mais susceptíveis a incertezas, comportamentos ou desvios imprevistos;
- a escolha deve privilegiar instrumentos com menor interferência sobre as atividades de construção e que permitam facilidade de acesso para manutenção e eventual substituição;
- a localização dos instrumentos deve aproveitar ao máximo as instalações pré – existentes (galerias, dutos, poços, etc);
- para a escolha do tipo de instrumento, os seguintes aspectos devem ser priorizados:
  - simplicidade;
  - confiabilidade;
  - sensibilidade e faixa de medição;
  - durabilidade;
  - resistência;
  - estabilidade;
  - custos de aquisição, instalação, operação e manutenção;
  - experiência prévia com a sua utilização;
  - disponibilidade e assistência técnica do fabricante.

A Tabela 2.1 sumariza as principais características de um instrumento de medida.

Tabela 2.1 – Características Gerais dos Instrumentos de Medida

Acurácia	Essa característica expressa a diferença entre a medição nele efetuada e o valor de referência aceito como verdadeiro. O valor da exatidão de um instrumento é definido pelos limites dos erros intrínsecos e pelos limites da variação da indicação. Ela está diretamente relacionada com as características próprias dos instrumentos, ou seja, como ele foi projetado e construído. Além disso, essa característica é avaliada durante a sua calibração. Quanto maior a exatidão do instrumento, mais caro ele custa e mais cuidados ele requer para a sua utilização
Precisão	Característica que expressa o afastamento mútuo entre as diversas medidas obtidas de uma dada grandeza, em relação à média aritmética dessas medidas. Esta grandeza expressa o grau de consciência ou reprodução nas indicações de uma medida sob as mesmas condições
Resolução	É a menor divisão na escala de leitura do instrumento, ou seja, é o menor incremento que se pode assegurar na leitura de um instrumento
Sensibilidade	É a característica que expressa a relação entre o valor da grandeza medida e o deslocamento da indicação. Alta sensibilidade não indica alta acurácia ou alta precisão
Linearidade	Característica que traduz uma condição de proporcionalidade direta entre as leituras fornecidas pelo instrumento e os valores da grandeza que está sendo medida
Histerese	Um instrumento apresenta histerese quando a grandeza medida está sujeita a variações cíclicas, tendo seu valor variável com as tendências distintas de aumento ou de redução da grandeza medida.
Ruído	Termo utilizado para relatar medidas aleatórias induzidas por fatores externos, gerando falta de precisão e acurácia
Conformidade	Característica que expressa a influência específica da implantação do instrumento em relação aos valores da grandeza a ser medida. Uma maior conformidade implica em uma acurácia maior do instrumento.
Erro	<p>É definido como o desvio entre o valor medido e o valor real ou o valor admitido como correto (erro grosseiro). O erro relativo é o quociente entre o erro absoluto e o valor real da leitura.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erros grosseiros: geralmente causados por descuido, fadiga ou inexperiência do operador;</li> <li>- Erros sistemáticos: causados por calibração imprópria, alterações da calibração com o tempo, histerese e não-linearidade;</li> <li>- Erros de conformidade: causados pela seleção errada dos procedimentos de instalação ou pelas limitações no projeto do instrumento;</li> <li>- Erros ambientais: causados pelos efeitos de calor, umidade, vibrações, pressão, etc sobre o instrumento de medida;</li> <li>- Erros observacionais: causados pela atuação de diferentes observadores (equipes de medições) usando diferentes técnicas observacionais;</li> <li>- Erros de amostragem: causados pela instalação do instrumento em local inadequado e pela variabilidade do material sendo instrumentado;</li> <li>- Erros acidentais: erros imponderáveis, essencialmente variáveis e não susceptíveis de prevenção.</li> </ul>

A regra essencial, entretanto, é a garantia de um projeto criterioso e integrado da instrumentação da barragem. Neste sentido, não existe uma única formulação e nem mesmo uma metodologia ideal, mas alguns princípios podem ser estabelecidos, devendo os mesmos ser devidamente adaptados às complexas e diversificadas condições de campo.

Estes princípios gerais incluem um projeto elaborado por especialistas em instrumentação geotécnica e compatibilizado com as condições do projeto da própria barragem, uma instalação por equipes experientes de campo e a adoção de especificações claras e adequadas em relação aos procedimentos de aquisição, registro e apresentação dos dados das grandezas a ser medidas, incluindo-se os valores limites prescritos para detecção imediata de eventuais anomalias / desvios dos valores admissíveis.

De forma complementar, a análise dos dados da instrumentação deverá ser realizada por uma equipe técnica treinada e especializada, concomitantemente com a execução das leituras, devendo os dados ser continuamente correlacionados com os parâmetros adotados em projeto. Adicionalmente, procedimentos de reavaliação e manutenção dos instrumentos e inspeções de campo devem ser feitas periodicamente, devendo ser entendidas como atividades indissociáveis e complementares às análises dos dados da instrumentação.

## **2.2. - Instrumentação das Barragens de Terra e Enrocamento**

Os instrumentos geotécnicos são compostos geralmente por um transdutor, um sistema de aquisição de dados e de um sistema de comunicação entre eles. O transdutor, de forma geral, é o dispositivo que faz a conversão da variação física de uma dada grandeza (como uma subpressão ou um deslocamento horizontal, por exemplo) em um sinal de saída correspondente. Estes transdutores podem ser mecânicos, resistivos, acústicos, indutivos, hidráulicos ou pneumáticos, apresentando princípios de funcionamento específicos e diferentes campos de aplicabilidade (Cruz, 1966; Lindquist, 1983; Hanna, 1985; Dunnicliff e Green, 1988; Palmeira, 1996).



Em barragens de terra e de enrocamento, os instrumentos podem ser instalados nos aterros e espaldares da barragem, nas fundações, nas ombreiras, em interfaces solos – estruturas, em obras auxiliares (ensecadeiras, vertedores, etc) ou ao longo do próprio reservatório. No escopo do presente trabalho, o contexto da instrumentação geotécnica de barragens de terra e enrocamento será abordado apenas em relação ao aterro e às fundações da barragem. Os instrumentos são instalados basicamente para permitir o monitoramento das vazões, dos deslocamentos, das tensões e das poropressões.

### **2.2.1. – Princípios e Instrumentos para a Medição de Vazões**

Medidas de vazões constituem um dos parâmetros de correlação direta com a análise do desempenho de uma barragem. Com efeito, as características de locação, quantidade e qualidade da água de percolação ao longo da barragem ou da sua fundação e, particularmente, variações bruscas destas características, podem indicar problemas associados à obstrução dos drenos, erosão interna e aumento de poropressões. Isto é particularmente evidente na fase operacional, a partir da caracterização dos valores de referência das vazões de percolação.

O procedimento típico para a medida de vazões é promover a concentração do fluxo em caixas ou galerias de concreto, às quais se incorporam vertedores de seção triangular ou trapezoidal ou calhas Parshall. Os vertedores triangulares possibilitam maior precisão de leituras no caso de vazões mais reduzidas, até 30,0 l/s (CPRH, 2000). Assim, a saída da drenagem é forçada a passar através de uma chapa metálica com abertura triangular em V, com lados iguais e ortogonais, medindo-se, então, a altura da lâmina d'água passante. As vazões são quantificadas de forma simples e direta pela fórmula de Thomson dada por:

$$q = 1,4.H^{5/2} \quad (2.1)$$

onde q é a vazão em m<sup>3</sup>/s e H é a altura da lâmina d'água em m, medida a partir do vértice da abertura triangular. A rigor, o coeficiente numérico pode variar entre 1,40 e 1,46.

O medidor Parshall é constituído por um dispositivo para a medição de vazões em canais abertos. Esse medidor é composto por três partes: uma seção convergente, uma seção estrangulada intermediária e uma seção divergente, obedecendo a relações geométricas padronizadas e tendo o nível do fundo do canal na secção convergente mais alto do que o nível na secção divergente (Azevedo Netto e Alvarez, 1977). A partir da altura da lâmina d'água medida na secção convergente é possível medir a vazão aproximada pela seguinte relação:

$$q = 2,2.WH^{3/2} \quad (2.2)$$

onde q é a vazão em m<sup>3</sup>/s; W é a largura da garganta em m e H é a altura da lâmina d'água em m.

Em geral, as vazões pelas fundações tendem a ser significativamente maiores que aquelas que percolam através do aterro compactado da barragem. Um aspecto de especial interesse é o de se estabelecer a individualização das medições, de modo a se aferir às contribuições distintas das diferentes fontes de infiltração (drenos, ombreiras, etc). Por outro lado, correlações diretas podem ser estabelecidas entre a magnitude das vazões de percolação com as correspondentes variações das cotas do nível do reservatório, levando-se em conta, naturalmente, o tempo de retardo destas influências.

Cuidados específicos devem ser tomados em termos do isolamento das zonas de saída dos sistemas de drenagem em relação à infiltração de possíveis águas superficiais. É recomendável também a antecipação das leituras das vazões em relação à fase de enchimento do reservatório (cerca de um a dois meses) para aferição de possíveis captações advindas do lençol freático das ombreiras. Complementarmente, amostras das águas efluentes podem ser coletadas para a execução de análises físico-químicas e medição dos teores de sólidos em suspensão e em dissolução. Variações abruptas da turbidez da água podem ser, eventuais, sinais de “piping” na barragem ou na fundação ou indicarem lixiviação de materiais solúveis ou de preenchimento ao longo de descontinuidades geológicas.

### **2.2.2. – Princípios e Instrumentos para a Medição de Deslocamentos**

O monitoramento dos deslocamentos ocorridos ao longo de seções críticas do conjunto barragem/fundação é particularmente importante em termos da quantificação e distinção dos recalques oriundos do próprio maciço compactado e da fundação (principalmente no caso de estruturas assentes em solos compressíveis), da locação de superfícies críticas de ruptura em profundidade e da avaliação do potencial de desenvolvimento de trincas de tração na barragem por recalques diferenciais ou de trincas de cisalhamento induzidas por deslocamentos horizontais diferenciais.

Os deslocamentos verticais são comumente verificados ao longo de uma seção paralela ou longitudinal ao eixo da barragem, uma vez que a variação da forma destas curvas de recalques, após a construção da barragem, permite a extrapolação do comportamento observado, em termos da definição da magnitude dos recalques finais e dos respectivos tempos de estabilização.

Em fundações de baixa resistência, é imprescindível o controle sistemático dos deslocamentos horizontais e verticais ao longo de algumas seções normais ao eixo da barragem, de forma a se caracterizar as zonas mais críticas de instabilização. Deslocamentos horizontais devem ser medidos sistematicamente nas fases de construção, enchimento e operacionais da barragem, ao longo de verticais pelo talude de montante, nos casos de previsão de rebaixamentos periódicos do reservatório ou, em diferentes seções do maciço na fase construtiva, no caso da necessidade de se executar o aterro compactado com solos com umidades superiores à umidade ótima.

Diversos instrumentos podem ser utilizados para a quantificação dos deslocamentos ocorridos em uma barragem. Estes deslocamentos podem ser medidos em termos absolutos ou relativos. As características principais e os princípios gerais de funcionamento dos instrumentos para medidas de deslocamentos verticais (itens 2.2.2.1 a 2.2.2.10) e horizontais (itens 2.2.2.1 e 2.2.2.11 a 2.2.2.13), convencionalmente usados na auscultação de barragens de terra e enrocamento, são apresentados resumidamente a seguir.

- **Medidores de Deslocamentos Verticais**

### **2.2.2.1. - Marcos de Deslocamento Superficial**

São instrumentos destinados à determinação dos deslocamentos verticais (e também horizontais) dos maciços de terra e enrocamento, bem como das estruturas de concreto. Os marcos de superfície são construídos com vergalhões de aço CA-50 1½” de diâmetro e 1,1 m de comprimento. Na parte superior do vergalhão é instalada uma semi-esfera de 15 mm de diâmetro. Esta estrutura é então chumbada com um bloco de concreto com 0,3 m de diâmetro e 1,2 m de profundidade, nas regiões da crista, bermas e talude de jusante. A Figura 2.2 mostra o esquema da locação e instalação dos marcos superficiais.

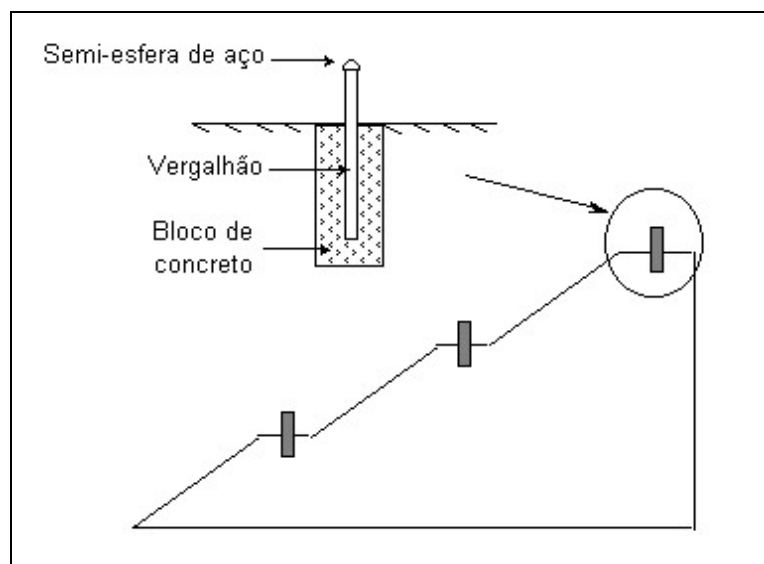


Figura 2.2 – Instalação de Marcos Superficiais

Os deslocamentos são medidos de forma bastante simples, através de levantamentos topográficos periódicos, em relação a marcos fixos (marcos de referência) instalados em locais ou pontos indeformáveis fora da região de influência da barragem. As leituras obtidas por esses instrumentos são consideradas satisfatórias e o seu custo é relativamente baixo para um número não muito elevado de marcos. Para uma seleção maior de marcos superficiais, as campanhas de monitoramento topográfico podem implicar custos muito elevados, que podem inviabilizar a sua utilização.

#### 2.2.2.2. – Placas de Recalque com Tubos Telescópicos

Constituem os medidores de recalques mais utilizados em barragens brasileiras, sendo instalados durante a construção da barragem tanto nas fundações como ao longo do aterro compactado. No modelo convencional, as placas são solidarizadas a hastes ou tubos rígidos concêntricos (Figura 2.3), cujos deslocamentos são as referências para as medidas dos recalques.

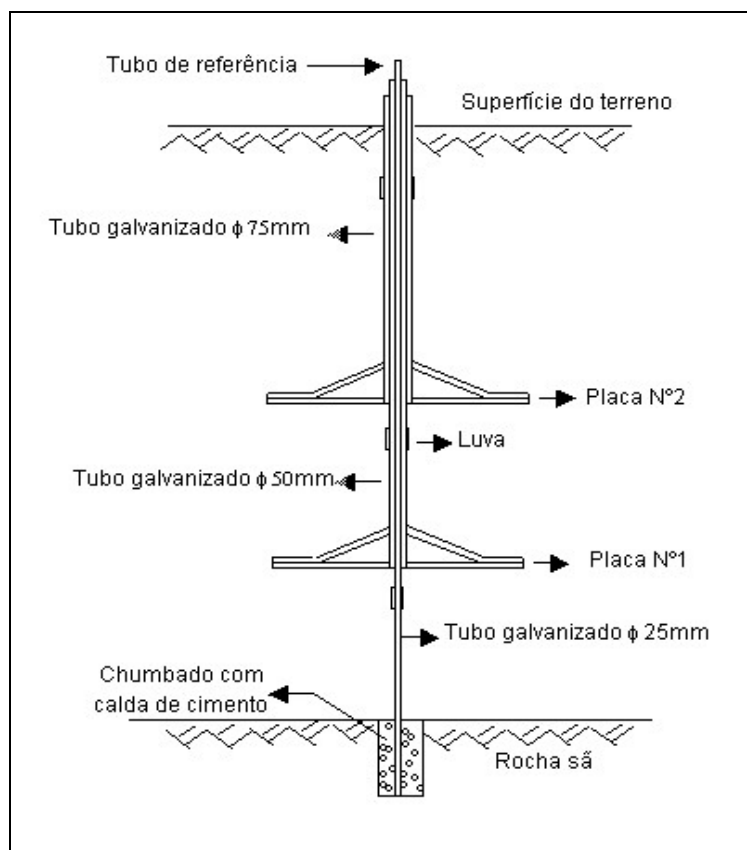


Figura 2.3 – Medidor de Recalques de Tubos Telescópicos

Para instrumentos instalados na fundação, a placa é colocada sobre a superfície do terreno e é soldada a um tubo de aço que envolve verticalmente outro tubo de diâmetro inferior, cravado ou chumbado em rocha ou em camada resistente em profundidade. Os recalques da fundação são determinados diretamente pela distância vertical entre os topos destes tubos, que podem ser sucessivamente emendados, de acordo com o avanço da obra. Problemas específicos referem-se ao elevado potencial de danos passíveis de ocorrer a estes tubos durante as fases de terraplenagem.

Analogamente, estes medidores de placas acopladas a tubos telescópicos, envolvendo verticalmente um tubo de referência, podem ser utilizados para a medição de deslocamentos verticais em pontos específicos dos maciços compactados de barragens de terra. Nestas condições, as limitações óbvias são representadas pela necessidade de aumento crescente dos diâmetros dos tubos coaxiais com o número de medições. Na prática, estes medidores (também conhecidos como tipo IPT) podem incorporar até 4 placas, uma na fundação e outras três em cotas distintas do aterro da barragem (Cruz, 1996).

De forma a minimizar os efeitos dos esforços axiais de compressão nos tubos externos, utiliza-se comumente cobrir os tubos com graxa e fita de material plástico, colocando-se também anéis de material de elevada deformabilidade nas zonas das luvas de emendas dos vários segmentos dos tubos.

#### **2.2.2.3. – Medidores de Recalque Tipo KM**

Os medidores de recalque tipo KM (desenvolvidos pioneiramente por técnicos da CESP) constituem uma variante do processo anterior, em que os tubos telescópicos são substituídos por um sistema de hastes conjugadas. A instalação tem início pelo chumbamento, na rocha sã, de um tubo galvanizado de 25,0 mm, tomado como referência. À medida que o aterro é executado, são instaladas chapas de aço solidarizadas a hastes de 10 mm de diâmetro, conectada em segmentos contínuos, com o avanço da construção do aterro. Cada uma dessas hastes é mantida na vertical, em torno do tubo de referência, através da utilização de discos perfurados que funcionam como espaçadores.

As leituras dos deslocamentos são realizadas através de um paquímetro adaptado, cujo corpo se encaixa adequadamente no tubo de referência e cujo bico móvel é apoiado na extremidade superior da cada haste. O número de estações de leituras pode ser sensivelmente maior que no caso anterior, podendo chegar a até 12 ao longo de uma dada vertical. No caso, porém, de um número maior de placas, aumentam os efeitos de interação em função do atrito lateral e das tensões de compressão no tubo externo.

#### 2.2.2.4. – Medidores de Recalque Magnéticos

Neste tipo de medidores de recalques, anéis magnéticos (“aranhas magnéticas”) são instalados em profundidade e ao longo de um tubo vertical de PVC rígido, dotado de emendas telescópicas dispostas de 1,5 m em 1,5 m e protegido externamente por um tubo corrugado (Figura 2.4).

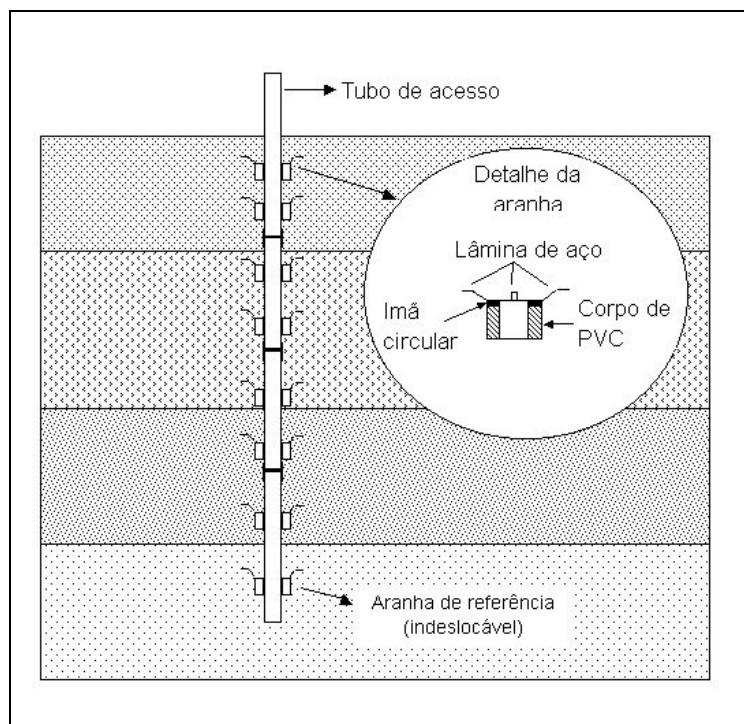


Figura 2.4 – Medidores Magnéticos de Recalques

As leituras são obtidas por um conjunto torpedo (sonda eletromagnética), trena e alarme em superfície. A sonda, com a trena afixada à mesma, é descida através do tubo interno até a posição de um anel magnético. Nesse instante, o campo magnético local aciona um contato no interior da sonda, fazendo soar o alarme em superfície.

Os recalques são obtidos pela diferença entre as medidas obtidas pela trena e pela distância fixa entre o topo do tubo e a posição de um anel magnético de referência, instalado em profundidade e em zona do terreno não passível de deslocamentos (Figura 2.4). O número de pontos de medida é praticamente ilimitado e o controle dos recalques, portanto, não exige campanhas periódicas de nivelamento topográfico.

#### 2.2.2.5. – Medidores de Recalque Tipo USBR

Como alternativa ao processo anterior, os medidores de recalques desenvolvidos pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR,1987) utilizam também um sistema de torpedo e trena para efetuar medidas de deslocamentos em relação a posições pré-determinadas ao longo de um tubo-guia. Neste caso, porém, os elementos de referência são constituídos por um sistema mecânico de cunhas móveis que se fixam às juntas telescópicas do tubo - guia. As leituras são feitas de cima para baixo sendo que, na base do tubo de acesso, é instalada uma conexão especial que, ao final das medições, permite a retração das cunhas e a livre retirada do torpedo ao longo do tubo.

#### 2.2.2.6. – Medidores de Recalques Tipo Caixa Sueca

Este instrumento é utilizado para determinar recalques em pontos pré-determinados no interior do maciço, tanto no núcleo da barragem como nos espaldares de enrocamento de jusante. O seu princípio de funcionamento é o dos vasos comunicantes, mas, mesmo tendo um funcionamento bastante simples, cuidados especiais devem ser tomados na sua locação e instalação em campo.

A caixa sueca (Figura 2.5) é constituída por uma célula metálica ou de PVC dotada de quatro tubos e inserida em uma caixa de concreto armado.

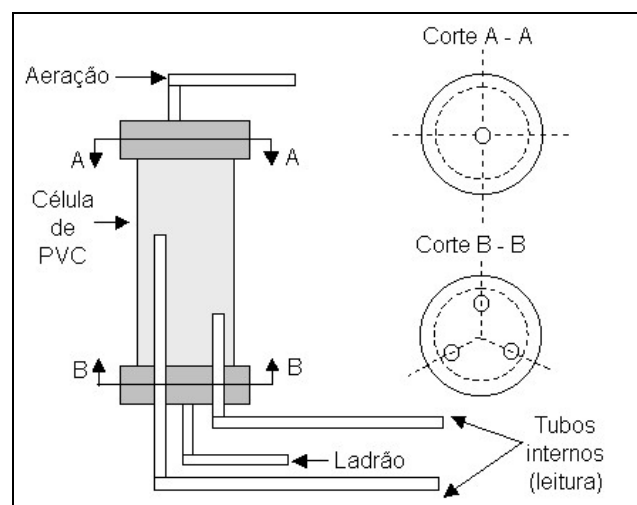


Figura 2.5 – Esquema Geral da Caixa Sueca



Os tubos instalados no topo e na base da célula funcionam como duto de aeração e ladrão, respectivamente, enquanto os outros dois tubos, internos à célula, são conectados ao painel de leituras localizado no talude de jusante da barragem. Estes tubos são saturados com água deaerada de forma a estabelecer no seu interior uma pressão atmosférica. As medições de recalques são obtidas através da diferença nas leituras dos níveis d'água no interior de cada um dos tubos internos, medidos por meio de uma régua graduada afixada junto às extremidades finais destes tubos no painel de leitura, em relação a uma referência situada no terminal de leitura (cabine). Ambos os tubos encontram-se em elevações diferentes e a partir das medidas calcula-se, de forma independente, as cotas da célula, permitindo, assim, a aferição do funcionamento da célula ao longo do tempo. Periodicamente deve-se aferir o referencial topográfico da cabine para se detectar eventual recalque.

A confiabilidade dos instrumentos está diretamente associada à garantia da integridade do conjunto. Atualmente, são muito utilizados tubos de polietileno como conexões com proteção especial de resina epóxi nas emendas (Gonçalves et al. 1996) e devidamente inseridos em tubos rígidos de proteção, com declividades superiores a 5% da célula até a cabine de leitura, tal procedimento evita a formação de bolhas no interior dos tubos internos. Problemas específicos destes medidores referem-se à formação de bolhas ou acúmulo de lodo no interior dos tubos de conexão.

#### **2.2.2.7. – Medidores Pneumáticos Tipo Hall**

O medidor de recalques tipo Hall utiliza um processo pneumático (expresso em termos da injeção de um gás, geralmente nitrogênio) que consiste basicamente em um transdutor de pressão de aço colocado dentro de um tubo de PVC especial, dotado de diafragma interno. O transdutor é conectado por meio de dois tubos flexíveis a um medidor externo de pressões (painel com buretas) localizado na casa de leituras. Um dos tubos é preenchido com água e exerce uma pressão correspondente a esta coluna de água sobre uma das faces do diafragma. Pelo outro tubo, injeta-se o gás sob pressão. Quando ocorre o equilíbrio das pressões, o gás passa pelo diafragma e retorna por um outro tubo ligado a um painel portátil de leitura, que acusa o valor da pressão injetada.

Assim, conhecendo-se a pressão de gás aplicada e o peso específico da água, determina-se a altura da coluna d'água que, neste caso, representa a diferença entre a cota do instrumento e a cota do painel de leituras. As leituras obtidas devem ser corrigidas com base nos valores dos recalques da própria casa de leituras, obtidos por meio de nivelamento topográfico.

#### 2.2.2.8. – Perfilômetro de Recalques

São medidores que permitem a determinação de perfis de recalques ao longo de um tubo horizontal ou sub-horizontal de PVC, utilizando o princípio dos vasos comunicantes (Figura 2.6). No caso geral, o tubo de acesso, totalmente preenchido com água, é conectado por uma de suas extremidades ao painel de leitura externa (referenciado a um RN absoluto ou relativo) e, pela outra, a uma câmara de compensação (reservatório de água dotado de um transdutor de pressão). As pressões de água são convertidas em alturas de ascensão de água em uma bureta graduada acoplada à extremidade externa do medidor (unidade de leitura) que são, então, diretamente correlacionadas com a magnitude dos recalques. Estes medidores permitem a obtenção de recalques em diferentes seções do tubo (perfis de recalques) e são especialmente indicados no caso de recalques excessivos (barragens sobre fundações muito compressíveis, por exemplo). Este equipamento admite, entretanto, variantes diversas deste princípio geral de medição.

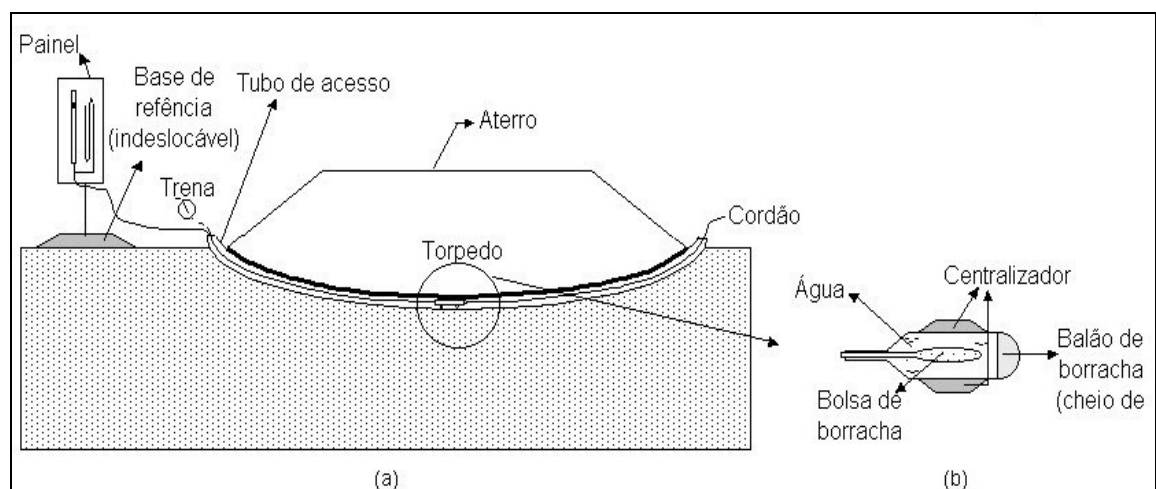


Figura 2.6 – (a) Perfilômetro de Recalques e (b) Torpedo de Medição

Uma destas variantes consiste na inserção no tubo de acesso de um torpedo preenchido com água e contendo uma bolsa interna de borracha, que é conectada a um sistema de aplicação de pressões de ar (Figura 2.6b). Quando se aumenta a pressão de ar na bolsa de borracha e esta se iguala à pressão de água no interior do torpedo, a bolsa de borracha infla, produzindo o deslocamento da água. Estes deslocamentos são detectados através das alturas de ascensão do nível de água na bureta graduada presente no painel externo de leituras e são, no contexto do princípio geral destes instrumentos, correlacionados diretamente com a magnitude dos recalques (Palmeira e Ortigão, 1981).

#### 2.2.2.9. – Inclínômetros de Recalques

Os inclinômetros são instrumentos destinados a determinação dos perfis de recalques e dos deslocamentos horizontais, mediante a movimentação de um torpedo, pescado e / ou aranha ao longo do tubo-guia. Este instrumento pode ter a sua tubulação guia instalada na horizontal, num plano inclinado e na vertical (Figura 2.7), sendo diferenciado apenas a forma como é realizada a medição da grandeza de interesse.

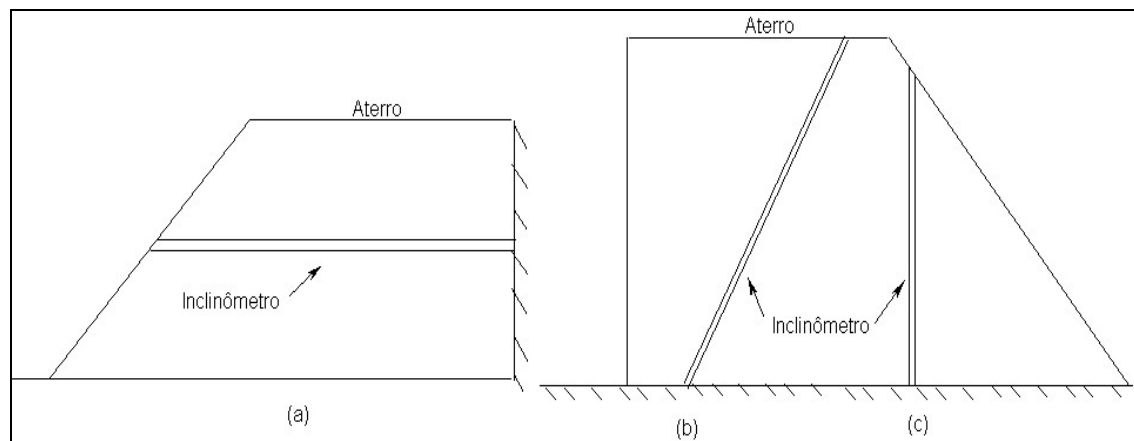


Figura 2.7 – Inclínômetro: (a) Horizontal, (b) Inclinado e (c) Vertical

O tubo-guia é formado por segmentos de 1,5 m de tubo ranhurado de alumínio, aço ou PVC, emendados entre si com luvas telescópicas, contendo 4 rebites por seção, diametralmente opostos, que impedem inicialmente a movimentação entre os segmentos. Após algum tempo os rebites são rompidos, devido à solicitação do aterro no tubo-guia, permitindo o movimento de um segmento de tubo em relação ao outro.

Ainda, com o intuito de preencher o espaço entre o segmento e a luva telescópica, são utilizados solo, cimento e bentonito (traço 8:1:1), com o intuito de impedir a entrada de solo no interior do tubo-guia, durante o processo de compactação do aterro.

Normalmente esse instrumento começa a ser instalado logo no início da construção do aterro, através da fixação do primeiro tubo-guia em rocha sã ou em um ponto considerado indeslocável. Outra forma é a instalação do tubo-guia ao final da construção do aterro, onde todos os tubos são instalados em um furo de sondagem estando fixados em um ponto considerado indeslocável.

- **Inclinômetro de Recalque – Tubo-Guia Instalado na Horizontal**

O torpedo é o instrumento utilizado para determinar o recalque, quando a tubulação está instalada na horizontal (Figura 2.8) ou em um plano inclinado. Trata-se de uma peça cilíndrica de aço ou alumínio, que aloja em seu interior sensores de inclinação, e dois pares de rodas externas, sendo conectado a uma unidade de leitura exterior.

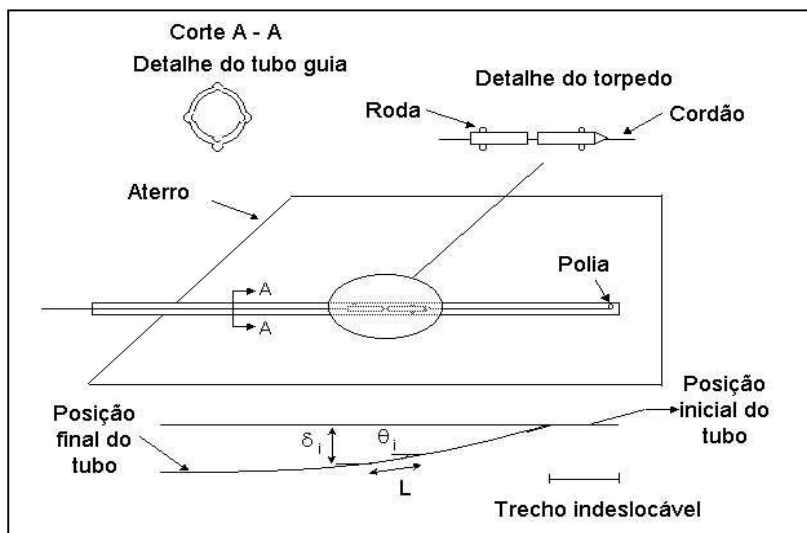


Figura 2.8 – Princípio Geral de Funcionamento – Inclinômetro Instalado na Horizontal

No processo de monitoramento, o torpedo é guiado ao longo de duas das ranhuras do tubo por meio de rodas fixas, que giram sobre rolamentos de esferas, selados e preenchidos com óleo. Duas outras rodas, opostas às anteriores, são forçadas, por meio de molas, contra as ranhuras diametralmente opostas das faces internas do tubo-guia.

Em cada ponto de medição, os recalques são estimados com base na integração dos deslocamentos calculados a partir das leituras das deflexões dadas pelos acelerômetros, em relação à horizontal e a um ponto fixo. Os ângulos são obtidos pela média de duas leituras em cada ponto, efetuadas com as rodas fixas do torpedo posicionadas, de cada vez, em ranhuras opostas do tubo de acesso CEMIG (1982).

O deslocamento vertical ( $\delta_i$ ) em um dado ponto do tubo é calculado pela expressão:

$$\delta_i = L \sin \theta_i \quad (2.3)$$

sendo  $L$  o segmento de leitura (a chamada bitola do instrumento, ou seja, a distância padronizada entre as rodas-guias do torpedo) e  $\theta$  é o valor do ângulo de inclinação correspondente, dado pelo acelerômetro. O deslocamento vertical total ( $\delta_i^T$ ) na seção genérica  $i$  será dado, então, pela seguinte relação:

$$\delta_i^T = \sum L \sin \theta_i \quad (2.4a)$$

No caso de baixos valores de  $\theta_i$  ( $\sin \theta_i \cong \theta_i$ ), a relação anterior pode ser reescrita como:

$$\delta_i^T = \sum L \theta_i \quad (2.4b)$$

- **Inclinômetro de Recalque – Tubo-Guia Instalado na Vertical e / ou num Plano Inclinado**

O pescador é utilizado para medir o recalque em cada segmento do tubo-guia quando instalado totalmente na vertical . Já a aranha, apresenta a mesma função do pescador, mas é utilizada apenas quando o tubo-guia for instalado num plano inclinado. Assim, as medidas de recalque são realizadas mecanicamente introduzindo a aranha e o pescador no tubo-guia, estando estes preso na ponta de uma trena .

Para a situação do tubo-guia instalado totalmente na vertical (Figura 2.9), o pescador, na posição de leitura, fica preso na base inferior de cada segmento do tubo, e a trena é lida na boca do tubo. O recalque é a variação da cota de cada segmento do tubo-guia.

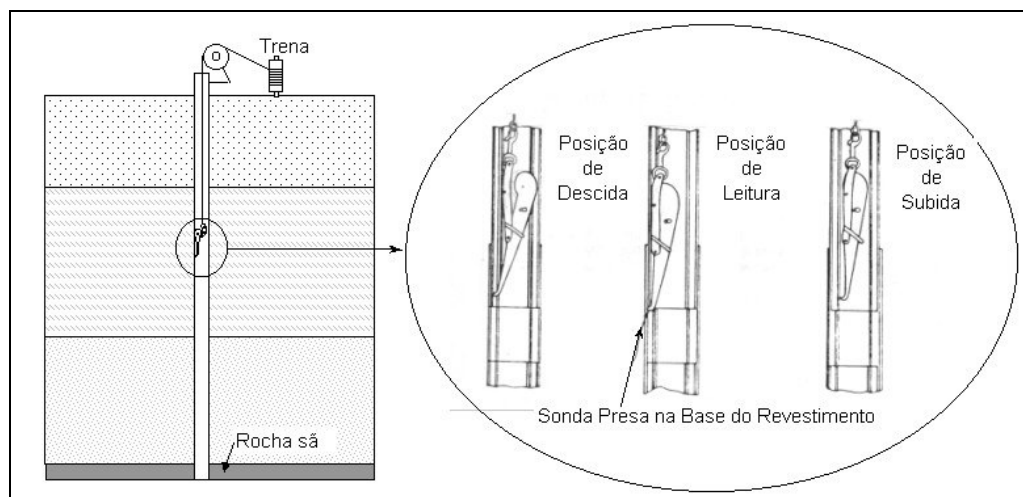


Figura 2.9 – Inclinômetro de Recalque – Pescador – Posição de Leitura

Para a situação do tubo-guia instalado num plano inclinado, o recalque corresponde a associação entre as leituras obtidas pela aranha e pelas leituras de inclinação fornecidas pelo torpedo LEME ENGENHARIA (1981).

#### 2.2.2.10. – Eletrônicos

Os eletrônicos são essencialmente similares aos inclinômetros horizontais, mas baseados em um sistema resistivo de medição, usando um torpedo dotado de sensores eletrolíticos em vez de acelerômetros. Os sensores eletrolíticos são instrumentos elétricos utilizados para obter a inclinação através da variação da resistência entre dois trechos (Figura 2.10).

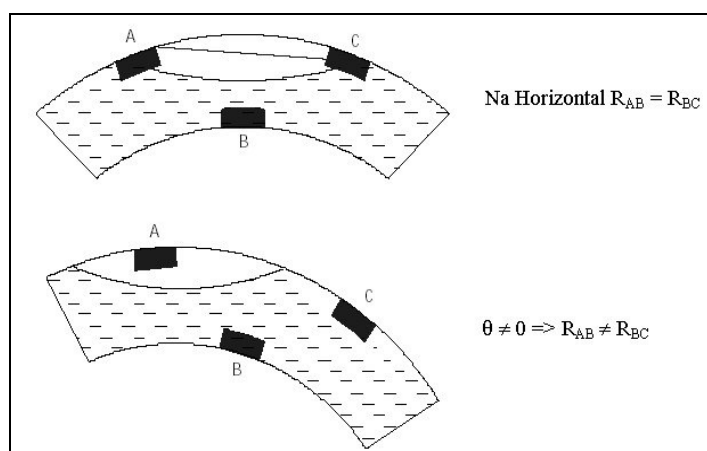


Figura 2.10 – Sensores Eletrolíticos

Todos os procedimentos de medição e estimativa dos recalques são similares à metodologia utilizada para os resultados obtidos com inclinômetros. Estes medidores têm sido utilizados com muito sucesso em programas de instrumentação de deslocamentos da face de concreto em barragens de enrocamento (Cavalcanti et al. 1994; Freitas Jr. et al., 1999).

- **Medidores de Deslocamentos Horizontais**

Os medidores de deslocamentos horizontais comumente utilizados em barragens de terra e enrocamento, além dos próprios marcos superficiais (item 2.2.2.1), constituem basicamente variações limitadas de instrumentos convencionalmente adotados para a medição de recalques.

#### **2.2.2.11. – Extensômetros de Hastes**

O princípio de funcionamento dos extensômetros de hastes é análogo para a medição tanto de deslocamentos horizontais como verticais. No caso de deslocamentos horizontais, placas de aço quadradas são dispostas horizontalmente no terreno e conectadas a hastes de 6 mm de diâmetro, capazes de se movimentar livremente no interior de tubos de proteção, também dispostos horizontalmente ao longo do terreno.

As medidas de deslocamentos horizontais entre placas contíguas (deformações específicas) são feitas a partir da movimentação relativa das extremidades externas das hastes de conexão, por meio de nivelamentos topográficos convencionais, utilizando-se bases fixas de concreto como referências de nível. Alternativamente, blocos de concreto, instalados junto às interfaces aterro/fundação da barragem e conectados por meio de hastes às bases de referência, podem atuar também como elementos de medida das deformações específicas (Werneck, 1975; Mercolin et al., 2005).

Variantes deste processo são empregados comumente para a medição de deslocamentos horizontais em maciços rochosos. Embora de baixo custo e operação simples, estes instrumentos têm propiciado excelentes resultados em obras geotécnicas.

#### **2.2.2.12. – Medidores Magnéticos**

Trata-se também de um medidor com princípios de funcionamento essencialmente semelhantes ao seu equivalente para a medida de deslocamentos verticais, utilizando, entretanto, placas quadradas com ímãs em vez das aranhas magnéticas usadas nos medidores magnéticos de recalques. As placas são afixadas por meio de flanges ao longo do tubo de acesso, normalmente segmentado e de PVC rígido.

Os procedimentos de leitura são bastante semelhantes ao processo utilizado com os medidores de recalques. Um sensor magnético é deslocado através do tubo de acesso, por meio de uma corda fina de nylon ou por uma coluna de hastes. As leituras são obtidas por um conjunto torpedo (sonda eletromagnética), trena e alarme em superfície. Os deslocamentos das placas internas ao maciço são estabelecidos em função da posição de uma placa magnética de referência, instalada numa zona do terreno externa às solicitações e não passível de deslocamentos.

#### **2.2.2.13. – Inclinômetros Horizontais**

Estes medidores permitem a determinação de deslocamentos horizontais em profundidade, com base nos mesmos equipamentos e princípios dos inclinômetros relatados no item 2.2.2.9. Os tubos dos inclinômetros podem ser de alumínio, plástico ou PVC rígido, com diâmetros entre 48 e 85 mm. A leitura de deflexão é obtida introduzindo o torpedo no tubo-guia até o fundo do furo e, após sua estabilização à temperatura ambiente (10 a 20 minutos), o mesmo é puxado através do cabo de ligação que passa por uma polia no topo do furo (para centralização do cabo do torpedo) e por uma catraca (que permite a fixação do cabo e impede a queda da sonda).

Analogamente, em cada ponto de medição, os deslocamentos horizontais são estimados com base na integração dos deslocamentos relativos a um ponto fixo em profundidade. As inclinações com a vertical são obtidas pelos indicadores de inclinação, efetuadas com as rodas fixas do torpedo posicionadas, de cada vez, em ranhuras opostas do tubo de acesso (Figura 2.11).



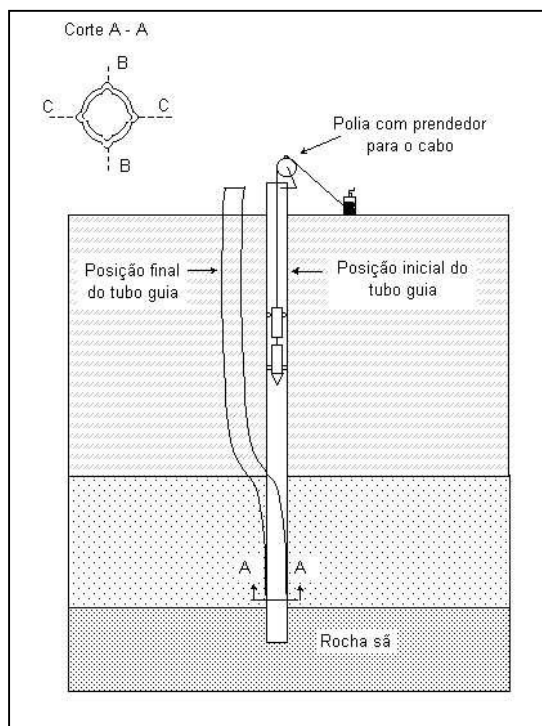


Figura 2.11 – Princípio Geral de Funcionamento – Inclinômetro Instalado na Vertical

O tubo-guia dos inclinômetros utilizados em barragens é instalado de maneira que as direções das medidas dos deslocamentos horizontais coincidam com as direções paralela e perpendicular ao eixo da barragem. Assim, a partir da composição de movimentos, pode-se determinar a direção geral dos deslocamentos resultantes em cada ponto de medição.

Estes dados, analisados em conjunto com as premissas de projetos e as características geológico-geotécnicas das fundações, permitem análises das evoluções dos deslocamentos e mesmo análises expeditas da estabilidade da barragem. Outro cuidado essencial é garantir o perfeito alinhamento das ranhuras durante a instalação do tubo, de forma a garantir o pleno funcionamento do inclinômetro durante toda a vida útil da barragem.

Inclinômetros podem também utilizar diversos acelerômetros, com espaçamentos variáveis (usualmente de 1,0 a 4,0 m), instalados ao longo do tubo. Estes inclinômetros são chamados de fixos em contraposição aos inclinômetros convencionais, que utilizam os mesmos acelerômetros para medir os deslocamentos ao longo de todo o tubo.

Eletrônicos podem também ser usados para a medição de ângulos de inclinação do torpedo com a vertical. A utilização conjugada de torpedos fixos com eletrônicos, em várias profundidades, permite o monitoramento remoto dos deslocamentos horizontais ao longo de uma dada vertical, sem a necessidade de medições *in situ*. Esta alternativa é particularmente interessante em situações de risco ou em locais de difícil acesso.

### **2.2.3. – Princípios e Instrumentos para a Medição de Tensões**

Em projetos de barragens, medidas de tensões totais são comumente feitas em encontros e/ou interfaces do maciço compactado com estruturas de concreto, galerias ou condutos enterrados. Também em zonas de interface entre diferentes materiais, entre materiais do aterro e materiais da fundação ou entre materiais do aterro e as ombreiras, estas medidas são particularmente interessantes, pois visam quantificar os efeitos de interação entre eles na distribuição global dos esforços atuantes. Estes efeitos podem gerar zonas de tração, zonas de plastificação e/ou causar fissuramentos do maciço compactado. Medidas de tensões em pontos específicos de maciços compactados têm interesse apenas para finalidades de pesquisa.

Os instrumentos utilizados para a medição destas grandezas em barragens de terra e enrocamento são as chamadas células de tensões totais. Estes medidores consistem basicamente em uma almofada de aço inoxidável, circular ou retangular, contendo sensores internos dotados de extensômetros elétricos, de corda vibrante ou pneumáticos. (Palmeira, 1996). Os tipos de células de tensões mais comumente utilizadas em solos estão indicadas na Figura 2.12: pistão (Figura 2.12a), em que as tensões são calculadas com base em correlações com os esforços de compressão medidos ao longo de um eixo central dotados de extensômetros elétricos ou de dispositivos de corda vibrante; com diafragmas dotados de extensômetros elétricos ou inseridos em fluido (óleo) confinante (Figuras 2.12b,c) e pneumáticas (Figura 2.12d). Neste último caso, a almofada é totalmente preenchida com óleo deaerado e acoplada a um transdutor pneumático de pressão que permite medir a pressão do óleo no interior da célula, que é igual à tensão total induzida pelo solo sobrejacente.

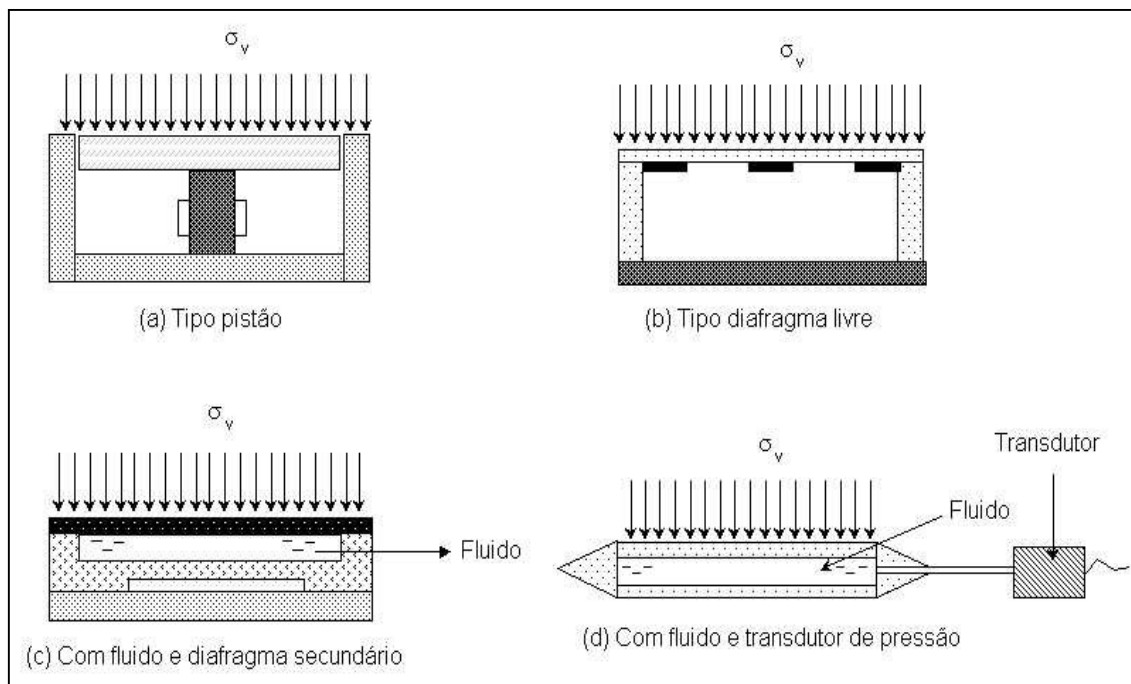


Figura 2.12 – Tipos Mais Comuns de Células de Tensões Utilizadas em Solos

As células de tensões totais distinguem-se das células de carga, destinadas especificamente à medição de esforços concentrados de tração ou compressão que, embora também de ampla utilização na engenharia geotécnica, têm aplicabilidade muito restrita em projetos de auscultação geotécnica de barragens de terra e enrocamento.

Em “pontos” ou zonas estratégicas da barragem, a caracterização completa dos estados de tensões atuantes implica a instalação de, no mínimo, quatro destas células: duas verticais (dispostas nas direções paralela e normal ao eixo longitudinal do maciço), uma horizontal e uma inclinada de  $45^\circ$  em relação à horizontal. Em geral, as medições de tensões totais estão associadas a medidas de poropressões, de forma a se avaliar a distribuição das tensões efetivas atuantes nas estruturas e os correspondentes gradientes de pressões.

A instalação destas células requer cuidados especiais de forma a garantir a continuidade das características do solo adjacente às células em relação ao maciço compactado e a prevenção de eventuais deslocamentos das mesmas após sua instalação. Com efeito, deslocamentos excessivos das células implicarão alterações significativas das direções

das tensões medidas conduzindo, conseqüentemente, a erros substanciais nas medidas dos estados de tensões.

Um outro aspecto de extrema relevância na representatividade dos resultados refere-se à compatibilidade das rigidezes entre o solo e o material das células, uma vez que, em função destas diferenças, as células podem atuar como elementos singulares de concentração ou de arqueamento das tensões no interior da massa de solo (Figura 2.13).

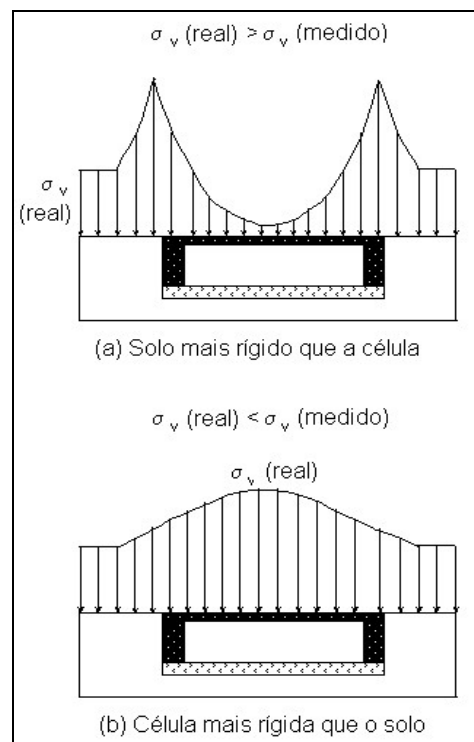


Figura 2.13 - Distribuição Irregular de Tensões sobre Células de Medição

Em relação à forma da célula (relação entre sua espessura  $T$  e seu diâmetro  $D$ , quanto mais espessa for a almofada, maiores serão os efeitos de alteração sobre o estado de tensões no solo adjacente, sendo recomendada uma relação  $T/D < 0,2$  (Weiler e Kulhawy, 1982) ou  $T/D < 0,1$  (Dunnicliff e Green, 1988). Estes autores apresentam ainda uma série de outros procedimentos a serem adotados quando da instalação destas células, de forma a minimizar as influências das alterações propiciadas pelos próprios medidores nos estados de tensões in situ (por exemplo, devido a aspectos relacionados à orientação da célula, excentricidades, efeitos de corrosão e de temperatura, etc).

#### 2.2.4. – Princípios e Instrumentos para a Medição do Nível D'água

A determinação da posição exata da linha freática no interior do maciço compactado de uma barragem constitui subsídio de grande relevância nas análises de sua estabilidade ou na interpretação dos resultados de sua piezometria (item 2.2.5). O princípio geral dos instrumentos para a medição do nível d'água em maciços de solo ou rocha consiste basicamente em se acessar diretamente a água em profundidade (por meio da simples execução de furos de trado ou sondagem, por exemplo) e medir a cota da sua superfície por meio de um dispositivo qualquer (usualmente por cabo graduado dotado de um sensor elétrico na extremidade inferior e um emissor sonoro ou luminoso na superfície).

Na prática de barragens, o medidor é constituído por um tubo de PVC perfurado que é instalado no furo de sondagem, envolvido por material filtrante (geotêxtil) e drenante (areia), neste caso visando garantir a completa integridade do furo. Uma camada selante é utilizada para vedar o espaço anular superior entre o tubo e o furo e uma estrutura de concreto é feita em superfície para proteção do instrumento contra atos de vandalismo (Figura 2.14). As principais causas de perda ou comprometimento destes medidores resultam da obstrução do tubo por objetos ou da colmatagem dos sistemas filtrante e drenante periféricos.

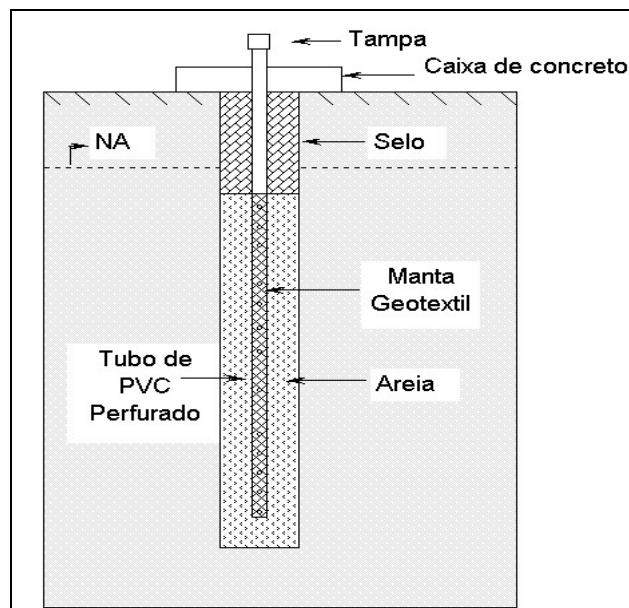


Figura 2.14 – Esquema do Medidor de Nível D'Água

Apresentam como principais vantagens a confiabilidade, simplicidade e a possibilidade de verificação do seu desempenho através de ensaios de equalização (adição ou retirada de água pelo tubo e leituras até próximo a estabilização). Em barragens de terra, os medidores de N.A. são frequentemente utilizados nas zonas dos tapetes horizontais e filtros verticais (com objetivos de avaliar a potencial colmatação ou detectar eventuais cargas hidráulicas ao longo do sistema de drenagem interna da barragem), nas ombreiras e nas zonas de jusante (monitoramento dos potenciais riscos de saturação, com conseqüente redução das condições de estabilidade do talude de jusante).

#### **2.2.5. – Princípios e Instrumentos para a Medição de Poropressões**

A avaliação das condições de segurança de barragens de terra e enrocamento dependem, em larga escala, do conhecimento da magnitude e da evolução das pressões intersticiais que se desenvolvem nos maciços compactados e nos solos de fundação, durante as fases contrutiva e de operação da barragem ou mesmo no caso de um rebaixamento do nível do reservatório. É necessário também o controle e monitoramento dos registros das poropressões nas zonas dos contatos com estruturas de concreto e ao longo do sistema de drenagem interna da barragem, durante e após a formação do reservatório, de forma a se avaliar criteriosamente o desempenho global das funções drenantes e filtrantes dos materiais utilizados.

Nos maciços de terra, as pressões na água e no ar intersticiais são geradas pelas tensões crescentes oriundas do próprio maciço em construção, pelo subsequente adensamento do material e pelo fluxo que se estabelece. Em geral, os solos compactados são parcialmente saturados e as medidas das pressões dos fluidos intersticiais devem ser feitas separadamente durante a construção da barragem, mesmo porque a água presente nos poros pode estar submetida a pressões negativas (sucção). Para medir sucções, a pedra porosa do piezômetro deve ser de cerâmica muito fina (ou seja, possuir elevada pressão de borbulhamento) e saturada com água deaerada durante a instalação. Pressões de ar impõem a instalação de pedras porosas mais grossas, de baixas pressões de borbulhamento.

A condição de saturação prevalece somente após a dissolução das bolhas de ar na água a partir de uma determinada cota do maciço. Por outro lado, esta saturação ocorre progressivamente ao longo dos materiais situados à montante do filtro vertical ou inclinado, à medida que se regularizam os fluxos de água através do maciço da barragem.

Nas fundações, as pressões intersticiais são geradas tanto pelas tensões de carregamento impostas pela construção do próprio maciço como pelos acréscimos das cargas hidráulicas oriundas da subida do nível do reservatório. O controle e o monitoramento destas poropressões permite a caracterização das condições reais de drenagem e a avaliação da eficiência dos dispositivos de impermeabilização eventualmente adotados. A abrangência e a distribuição espacial das medidas de pressões e subpressões, geradas pela percolação da água no terreno de fundação, devem estar embasadas na escolha estratégica de seções representativas dos condicionantes geológico-geotécnicos locais e da variabilidade e anisotropia naturais dos solos presentes (contatos de derrames basálticos, camadas fissuradas, interfaces maciço-fundação, etc).

Os instrumentos convencionalmente utilizados para a medida de poropressões em obras geotécnicas são os piezômetros. Estes instrumentos podem ter diferentes naturezas e princípios de funcionamento, compreendendo tanto a medição direta das poropressões (expressa, por exemplo, pela altura da coluna d' água no interior de um tubo de pequeno diâmetro, nos chamados piezômetros de tubo aberto ou de Casagrande) como a medição indireta através da correlação com medidas de outras grandezas (por exemplo, através das medidas das deformações de uma membrana elástica inserida no interior de um elemento poroso, nos chamados piezômetros de membrana).

De modo geral a escolha de um dado piezômetro é feita em função de características como confiabilidade, simplicidade, robustez, durabilidade, sensibilidade, facilidade de instalação, custo e possibilidade de monitoramento remoto. Em termos gerais, entretanto, a caracterização geotécnica de um dado piezômetro é feita com base nos seguintes parâmetros:

- Tempo de resposta (“Time-Lag”): é o tempo (t) necessário para o piezômetro detectar uma determinada variação na pressão ao nível da célula. Para efeitos práticos, adota-se para a caracterização deste parâmetro o tempo ( $t_{90\%}$ ) correspondente a 90% da equalização da variação de pressão.
- Fator de Volume ( $\lambda$ ): é a quantidade de água ( $V_0$ ) que deve percolar pela célula a célula de leitura para indicar uma variação unitária da pressão ao nível da célula.

$$\lambda = \frac{V_0}{\Delta V} \quad (2.5)$$

- Grau ou Porcentagem de Equalização (E): Está relacionada a variação de pressão ( $\Delta V$ ) indicada pelo sistema de medidas num dado tempo e a variação real de pressão ocorrida ao nível da célula do piezômetro ( $\Delta V_0$ ) :

$$E = 1 - \frac{\Delta V}{\Delta V_0} \quad (2.6)$$

- Tempo de retardo básico (T): é o tempo necessário para um piezômetro de tubo aberto equalizar um acréscimo ou decréscimo de pressões, admitindo-se uma vazão constante no início do fluxo.

O parâmetro T se correlaciona com a porcentagem de equalização através da seguinte relação (Hvorslev, 1951):

$$E = 1 - e^{-t/T} \quad (2.7)$$

T corresponde ao tempo necessário para que haja a equalização de 63 % do acréscimo  $\Delta V_0$  aplicado ao nível da célula. Esta expressão permite a estimativa da porcentagem de equalização do piezômetro após um dado tempo t (ou o valor de t para um dado E). Sua aplicação pode ser extrapolada a outros tipos de piezômetros, considerando-os em termos de piezômetros de tubo aberto equivalentes.



### 2.2.5.1. – Piezômetros de Tubo Aberto (Tipo Casagrande)

Estes piezômetros são constituídos por um tubo de PVC em cuja extremidade inferior é acoplada uma célula (trecho perfurado de tubo envolvido com geotêxtil). A célula fica inserida em um bulbo de material drenante e confinada num trecho limitado (usualmente de 1,0 a 1,5 m) por uma camada selante (usualmente bentonita ou solo-cimento), utilizada para vedar o espaço anular entre o tubo e o furo. Em superfície, o instrumento deve ser devidamente protegido contra atos de vandalismo (Figura 2.15). A pressão da água na região do bulbo é convertida diretamente em uma altura d' água equivalente. Os procedimentos de leitura são essencialmente similares àqueles descritos anteriormente para os medidores de nível d' água.

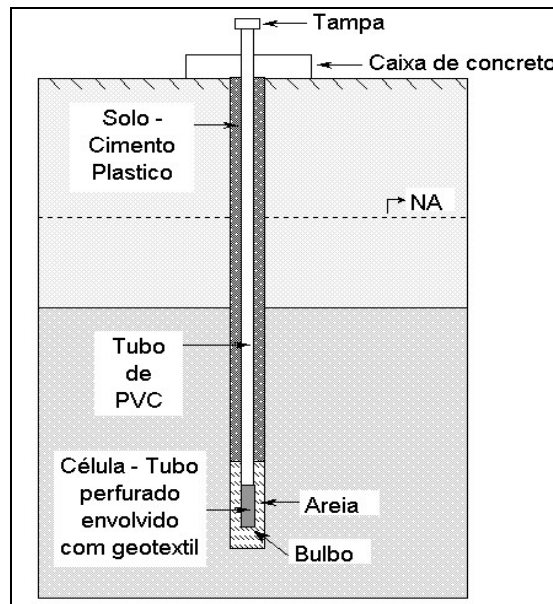


Figura 2.15 – Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande

As principais vantagens deste tipo de instrumento são: elevada confiabilidade, simplicidade, durabilidade e custos reduzidos, bem como a possibilidade de verificação do seu desempenho. Como desvantagens principais, podem ser citadas as seguintes: alto tempo de resposta para materiais de baixo valor de permeabilidade; interferência na praça de construção; não é adequado para a determinação das poropressões no período de construção; não permite a medição de pressões negativas; restrições de localização à montante da linha d' água e maiores dificuldades de acesso aos terminais de leitura em

relação a outros tipos de instrumento. Em função do diâmetro do furo de sondagem, podem ser instalados dois ou mais instrumentos em um mesmo furo, a diferentes profundidades

Os piezômetros de tubo aberto são freqüentemente utilizados em programas de auscultação de barragens de terra e enrocamento, sendo instalados convencionalmente nas fundações, ombreiras e também em zonas específicas no próprio maciço da barragem.

#### 2.2.5.2. – Piezômetros Hidráulicos

Os piezômetros hidráulicos são constituídos por uma pedra porosa, conectada a um painel de leitura externo por meio de dois tubos flexíveis de nylon revestidos de polietileno, e de pequeno diâmetro ( $\approx 3$  mm) (Figura 2.16), que são completamente saturados com água destilada e deaerada. Por meio da pedra porosa, a água contida nos poros do solo ou nas fraturas da fundação da barragem está em contato direto com a água no interior da tubulação e no painel de leituras. Assim, qualquer variação de poropressão junto à célula piezométrica será automaticamente registrada no indicador externo de pressões (manômetros mecânicos ou de mercúrio, transdutores elétricos de pressão, etc).

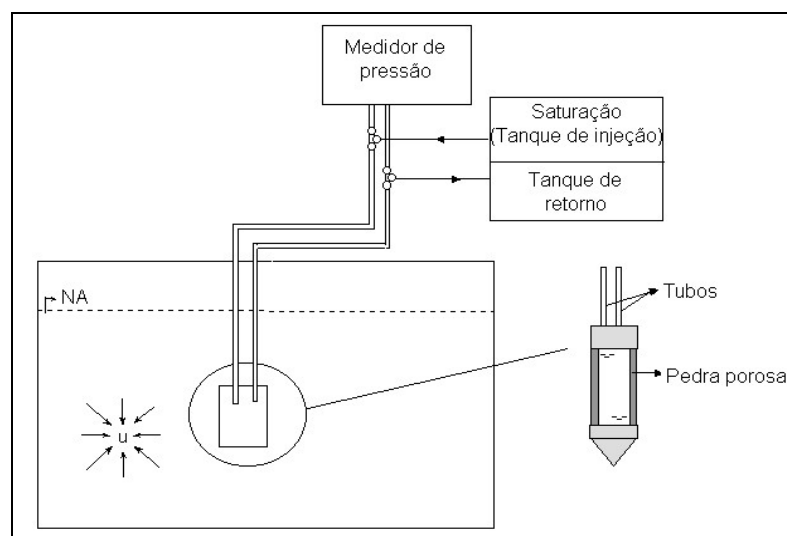


Figura 2.16 – Esquema Geral do Piezômetro Hidráulico

As medidas de pressões são feitas mediante a abertura dos registros que conectam cada um dos tubos provenientes dos piezômetros ao medidor externo, aguardando-se a completa estabilização das mesmas. Entretanto, ainda que a desaeração seja uma premissa na fase de instalação dos instrumentos e mesmo utilizando pedras porosas muito finas, é praticamente impossível garantir a condição de saturação do sistema ao longo de toda a vida útil do medidor. Neste fato, reside a grande vantagem dos piezômetros hidráulicos de tubos duplos em relação a outros tipos de piezômetros. Com efeito, leituras diferentes de pressões em ambos os tubos constituem claro sinal da presença de ar no sistema e a necessidade de trabalhos de desaeração in situ (Ortigão, 1975).

Como outras vantagens potenciais deste instrumento, podem ser citadas as seguintes: simplicidade, confiabilidade, bom tempo de resposta mesmo em solos de baixa permeabilidade, pode ser usado para ensaios de permeabilidade in situ (carga variável ou constante), pode medir poropressões negativas e não causa interferência com as atividades construtivas. Como desvantagem adicional, além daquelas inerentes às fases de desaeração periódica do instrumento, apresenta a impossibilidade de medir pressões quando o nível piezométrico (célula piezométrica) estiver muito abaixo do nível dos medidores de pressão (este desnível deve ser, no máximo, de 6 m para finalidades práticas, para se evitar problemas de cavitação no sistema) e serem instalados após a construção da obra.

#### **2.2.5.3. – Piezômetros Pneumáticos**

As análises das condições de estabilidade e de segurança de uma barragem exigem que os piezômetros nela instalados reflitam, com a máxima exatidão e rapidez possíveis, as variações de poropressões geradas nos maciços compactados das barragens de terra ou nos núcleos impermeáveis das barragens de enrocamento. Estes requisitos impõem a utilização de instrumentos que exigem pouca drenagem da água intersticial para serem plenamente ativados, característica principal dos chamados piezômetros de membrana. Dentre estes, os piezômetros pneumáticos têm sido os mais utilizados atualmente, basicamente por duas razões: por um lado, devido às limitações inerentes à locação das

cotas de instalação dos piezômetros hidráulicos e, por outro lado, aos freqüentes problemas de danos associados à aplicação de outras células piezométricas do tipo membrana. Para cumprir a contento estas condições, as pedras porosas dos medidores devem ser bastante finas para permitir medidas de sucção.

Os piezômetros pneumáticos, como o próprio nome identifica, efetuam as medidas das poropressões a partir de um processo pneumático (expresso em termos da injeção de um gás, geralmente nitrogênio) que tem por objetivos propiciar um regime de equalização de pressões internas na célula piezométrica e forçar a deflexão de um diafragma associado à mesma. A célula piezométrica é conectada a um medidor externo de pressões através de dois tubos flexíveis, designados como ‘tubo de alimentação’ e ‘tubo de retorno’ (Figura 2.17a).

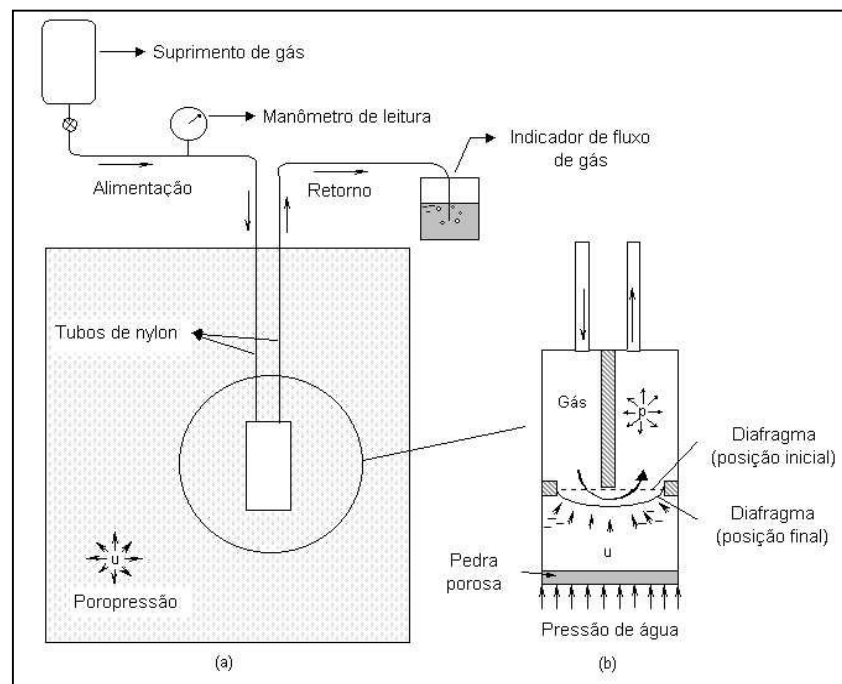


Figura 2.17 – Esquema e Detalhamento do Piezômetro Pneumático

Através do tubo de alimentação, o gás comprimido é injetado com pressão conhecida (valor dado através de um manômetro instalado na caixa de leituras do instrumento) até a célula piezométrica, atuando sobre uma das faces do diafragma flexível interno. No lado oposto do diafragma, atua a pressão da água intersticial que se deseja medir, atuando através da pedra porosa localizada na base da célula piezométrica.

Enquanto a pressão de gás aplicada (em estágios crescentes) for inferior à pressão da água, o diafragma mantém-se fechado, não permitindo o fluxo de gás em direção ao tubo de retorno (Figura 2.17b). Quando a pressão de gás torna-se maior que a pressão da água, o diafragma se abre, permitindo o fluxo de gás pela tubulação de retorno, que é detectado pelo operador em superfície. Neste momento, a injeção de gás é suspensa e a pressão de injeção reduz-se gradualmente até ocorrer a equalização das pressões da água e do gás no interior da célula piezométrica (diafragma fechado). O valor estabilizado da pressão do gás injetado é a medida indireta da poropressão desejada.

As principais vantagens deste tipo de instrumento são: confiabilidade, simplicidade, relativa rapidez das leituras, não interferência nas atividades construtivas, tempo de resposta relativamente pequeno, livre localização do aparelho de medições, tecnologia de construção não muito complexa, custo menor que o de outros piezômetros do tipo membrana e poder ser instalados após a construção da obra. Como desvantagens principais, citam-se os problemas decorrentes da sua inadequação ou menor confiabilidade para medidas de pressões negativas, necessidade de recarregamento periódico das ampolas de gás comprimido e menor sensibilidade que outros piezômetros do tipo membrana.

#### **2.2.5.4. – Piezômetros Elétricos**

São piezômetros constituídos por um diafragma de aço inoxidável no qual são fixados extensômetros elétricos de resistência (Figura 2.18), oferecendo os mais baixos tempos de resposta entre os piezômetros de membrana. As deflexões do diafragma são acompanhadas por variações imediatas da resistência dos extensômetros afixados na sua superfície e uma conseqüente resposta diferenciada do sinal elétrico de saída (de magnitude proporcional à poropressão medida) e captada em um medidor externo.

As potenciais vantagens deste instrumento são similares às dos demais piezômetros de membrana, enfatizando-se o já citado menor tempo de resposta obtido. Os principais inconvenientes estão associados aos custos elevados, impossibilidade de recuperação

em caso de danos e possibilidade de avarias devido a centelhamento (por sobretensões, descargas elétricas, etc).

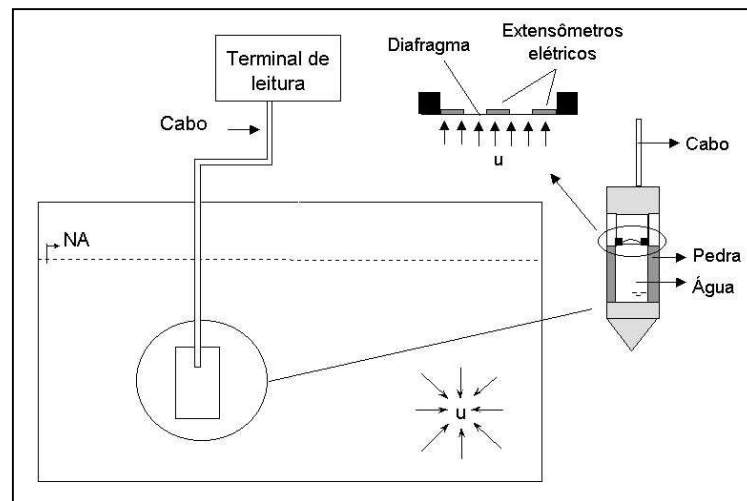


Figura 2.18 – Esquema do Piezômetro Elétrico

#### 2.2.5.5. – Piezômetros de Corda Vibrante

Os piezômetros de corda vibrante são instrumentos constituídos por um corpo cilíndrico de aço inox, alojando internamente uma pedra porosa e uma membrana de aço inox, em cuja face é fixado um fio de aço (corda) tensionado e passando através de um eletro-ímã (Figura 2.19). A blindagem dos cabos elétricos de conexão entre a célula piezométrica e o medidor externo constitui procedimento fundamental para garantir a integridade do instrumento contra efeitos de sobretensões e/ou descargas elétricas.

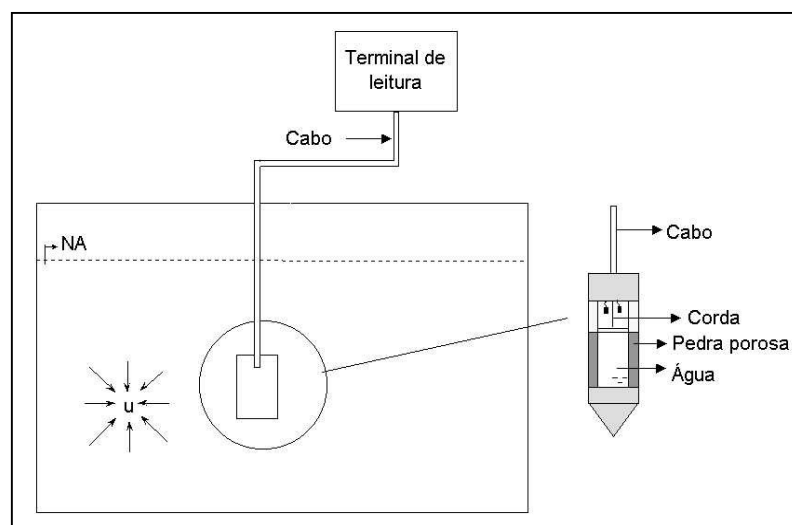


Figura 2.19 – Esquema do Piezômetro de Corda Vibrante

A água intersticial passa através da pedra porosa e impõe uma determinada deformação ao diafragma afetando, conseqüentemente, a tensão da corda que passa, então, a vibrar. Esta vibração do fio induz na bobina magnética do eletro-ímã uma oscilação elétrica de igual frequência que é, então, transmitida ao terminal das leituras através de cabos elétricos blindados. Posteriormente, as medições das frequências de oscilação da corda vibrante são correlacionadas diretamente às poropressões atuantes sobre o diafragma.

Estes piezômetros apresentam a grande vantagem de trabalhar a volume quase constante apresentando fatores de volume extremamente reduzidos, da ordem de alguns  $\text{mm}^3$  por décimo de MPa. Neste sentido, são instrumentos que oferecem respostas praticamente instantâneas, mesmo em solos de permeabilidade muito baixa. As desvantagens destes instrumentos estão associadas diretamente às limitações inerentes a dispositivos elétricos muito sensíveis a interferências eletromagnéticas de quaisquer naturezas.

Para medir sucções, a pedra porosa do piezômetro deve ser de cerâmica muito fina (ou seja, possuir elevadas pressões de borbulhamento) e saturadas com água deaerada. Para medida de pressões de ar impõem-se a instalação de pedras porosas mais grossas, de baixas pressões de borbulhamento. Após a saturação do solo, ambos os tipos de piezômetros tenderão a indicar iguais valores de poropressão.

### **2.3. – Programas de Instrumentação das Barragens na CEMIG**

O programa de ascultação das barragens da CEMIG é composto por inspeções periódicas de campo e de uma análise detalhada do comportamento das suas estruturas por instrumentação. Essas análises são avaliadas anualmente através da apresentação de um relatório técnico de inspeção civil com o intuito de avaliar a segurança da barragem.

Anualmente são programados inspeções periódicas no local da barragem com o objetivo de detectar deteriorações e / ou anomalias (fissuras superficiais, erosões, abatimentos localizados, etc) que possam, porventura, comprometer a segurança da barragem. Estas inspeções mostram de forma qualitativa os potenciais problemas que podem ocorrer na barragem. Esses indícios podem ser prontamente detectados nas inspeções de campo e nem sempre são passíveis de caracterização por instrumentos.

O processo de auscultação por instrumentação de uma barragem tem início com a coleta manual de dados realizada por equipes técnicas de campo da CEMIG. Essa coleta segue uma seqüência pré-estabelecida através do preenchimento de um formulário padronizado. Estes formulários contemplam campos para dados de identificação da usina e dos instrumentos, número de página e código emitido pelo sistema, valores medidos, datas das leituras, horário da leitura para alguns instrumentos, observação quanto ao tipo de leitura feita, identificação do leiturista e data do preenchimento do formulário.

Após preenchimento, esses formulários são encaminhados para o GE/SM para serem introduzidos no banco de dados do programa MONITOR. Essa operação é realizada em ambiente de rede, de forma on-line, sendo possível verificar quaisquer tipos de alteração de forma rápida e objetiva, facilitando a aquisição, processamento e análise dos dados. Basicamente, o programa MONITOR consiste de um sistema que trata os dados através de recursos de processamento automático, facilitando o gerenciamento e análise dos dados da instrumentação. Este programa desempenha, entre outras funções, a geração de gráficos dos dados dos instrumentos, em especial das séries históricas. A Figura 2.20 mostra a tela de entrada no programa MONITOR.

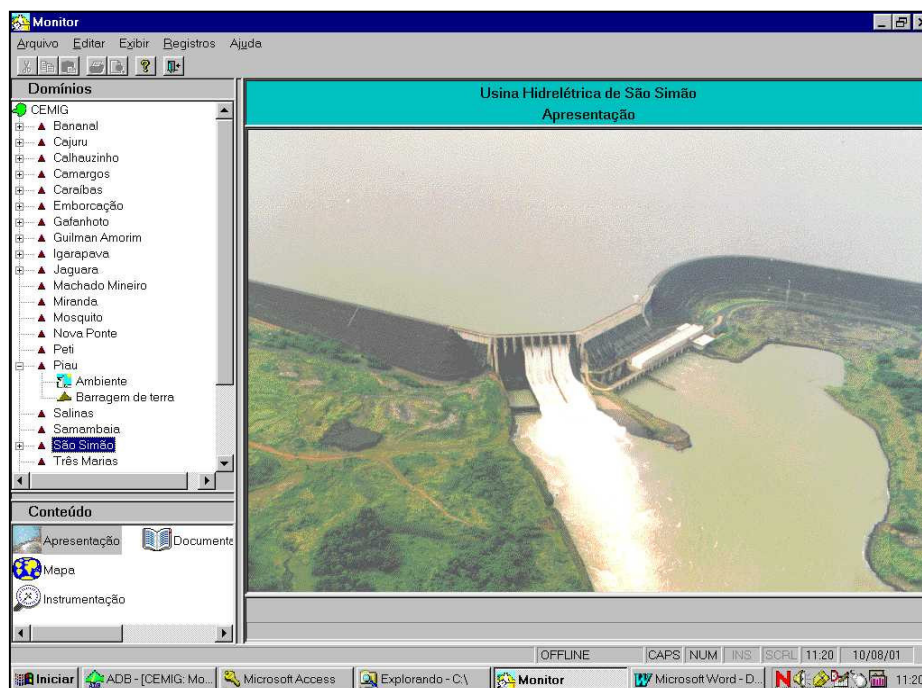


Figura 2.20 – Tela de Entrada no Programa MONITOR



A partir dessa tela inicial, é possível selecionar uma dada barragem específica e assim visualizar as estruturas que constituem a barragem, bem como o conjunto de instrumentos nela instalados.

Para a visualização dos gráficos, deve ser selecionado um dado tipo de instrumento por vez e até 15 instrumentos simultaneamente. A visualização do gráfico é obtida após a seleção das grandezas desejadas, formato do gráfico, escalas e legendas. A Figura 2.21 mostra a saída gráfica dos dados da instrumentação de alguns piezômetros instalados na UHE Piau. Nesta figura são mostradas as elevações piezométricas de 9 piezômetros de Casagrande em função do tempo (série histórica) e do NA do reservatório.

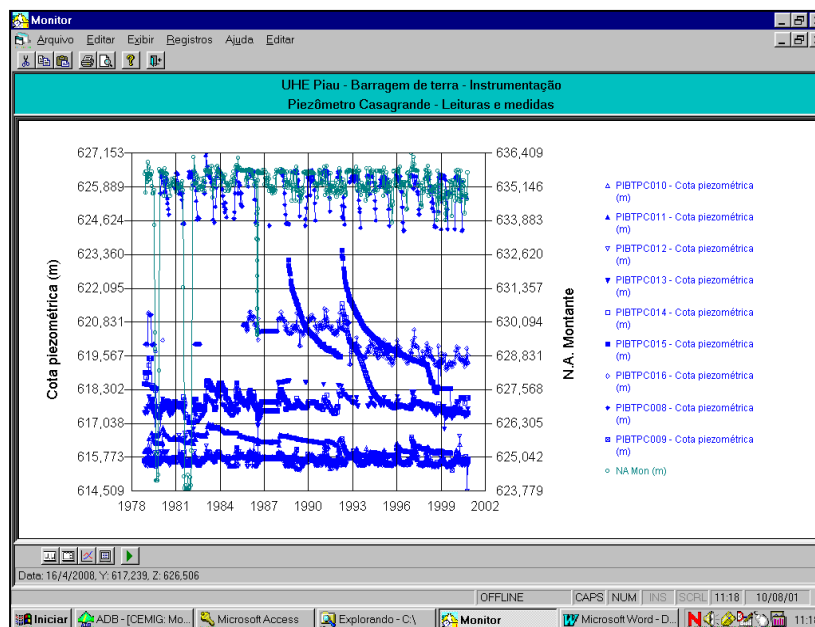


Figura 2.21 – Exemplo da Saída Gráfica do Programa MONITOR  
(Leituras de Piezômetros da UHE Piau)

Este sistema é de fácil utilização e de grande utilidade no processamento dos dados. Ele permite o gerenciamento rápido e fácil do banco de dados. Com o intuito de melhorar o gerenciamento das informações sobre as barragens da CEMIG, atualmente está sendo implantado um novo programa denominado Sistema Inteligente de Controle e Segurança de Barragens - INSPETOR. Este programa irá compilar as informações de 14 módulos em um único programa geral (Balbi et al., 2005): MONITOR,

DETECTOR, PHOTOR, GESTOR, EXECUTOR, RELATOR, CADASTOR, PRETOR, PINTOR, GEDOC, GEOCEMIG, EDITOR e TUTOR.

A CEMIG, atualmente, possui um total de 46 hidrelétricas, sendo 15 de grande a médio porte e 31 de pequeno porte. Muitas dessas barragens de pequeno porte são de perenização. O monitoramento pelo programa MONITOR é realizado em 24 hidrelétricas. As principais usinas hidrelétricas da CEMIG encontram-se localizadas conforme indicado na Figura 2.23, onde a UHE de São Simão se encontra na região do triângulo mineiro, fronteira com o estado de Goiás.

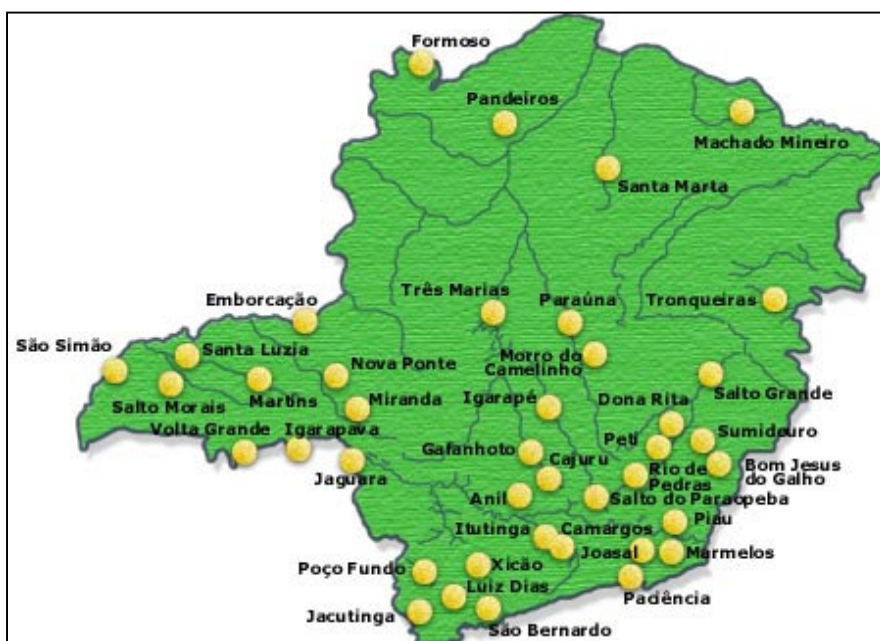


Figura 2.23 – Localização de Algumas Hidrelétricas Pertencentes a CEMIG

Alguns dos instrumentos instalados em uma dada barragem, por acidentes, problemas de fabricação ou instalação ou por recomendações de especialistas, são desativados após alguns anos de uso. A CEMIG possui um controle destes dados, mostrando a quantidade de instrumentos instalados e em operação para cada tipo de medidor, quantidade de terminais de leituras, quantitativos anuais de leitura, etc. Na Tabela 2.2, indica-se a situação geral da instrumentação instalada nos principais empreendimentos hidrelétricos da CEMIG até 2003. Estes dados incluem a quantidade global dos instrumentos geotécnicos instalados, número de instrumentos em operação, número de terminais de leituras ativos e quantitativos anuais das leituras realizadas para cada barragem.

Tabela 2.2 – Situação Geral da Instrumentação Instalada nas Principais Hidrelétricas  
Pertencentes a CEMIG até 2003

Nome da usina	Sigla	Quantidade Instalada	Quantidade em Operação	Terminais de Leituras	Total Anual de Leituras
Cajuru	CJ	2	2	2	389
Camargos	CA	15	15	15	1383
Emborcação	EM	478	397	498	8490
Gafanhoto	GF	2	2	2	389
Guilman Amorim	GU	16	16	16	725
Igarapava	IG	72	72	72	2050
Jaguara	JG	69	69	74	2911
Machado Mineiro	MM	27	27	27	1226
Martins	MT	2	2	2	389
Miranda	MR	154	118	315	6343
Nova Ponte	NP	291	253	449	10479
Peti	PE	12	12	15	1370
Piau	PI	33	33	33	1133
Rio de Pedras	RP	22	22	22	743
São Simão	SS	816	625	1279	16331
Três Marias	TM	146	106	106	1744
Volta Grande	VG	384	224	224	3523
Xicão	XI	2	2	2	389
Total		2543	1997	3153	60007

## Capítulo 3

### Instrumentação Geotécnica das Barragens da UHE São Simão

#### 3.1. – Introdução

A UHE São Simão (Figura 3.1) é a maior hidrelétrica da CEMIG e constitui parte integrante do sistema de aproveitamento hidrelétrico do Rio Paranaíba, fronteira entre os estados de Minas Gerais e Goiás. Está localizada entre as coordenadas 19° 01' 05'' S e 50° 29' 57'' W (Figura 3.2 e Figura 3.3) do trecho inferior do rio Paranaíba. As empresas IESA/IECO (consórcio CIE) elaboraram os projetos básico e executivo da barragem e a construção da mesma foi realizada pelo consórcio Impregilo/C.R.Almeida, em quatro etapas distintas, no período entre junho de 1973 a junho de 1977.



Figura 3.1 – Vista Geral da UHE São Simão

O enchimento do reservatório foi realizado entre agosto de 1977 a dezembro de 1978, com uma velocidade de enchimento do reservatório que variou entre 1,5 m/dia no primeiro mês até 0,3 m/dia na parte final do processo. O reservatório apresenta uma área de inundação de 722,25 km<sup>2</sup>, para um NA máximo normal de 401,0 m, com volume total e útil de, respectivamente, 12,5 e 8,79 bilhões de m<sup>3</sup> de água (Viotti et al., 1983).



Figura 3.2 – Posição Geográfica da UHE São Simão

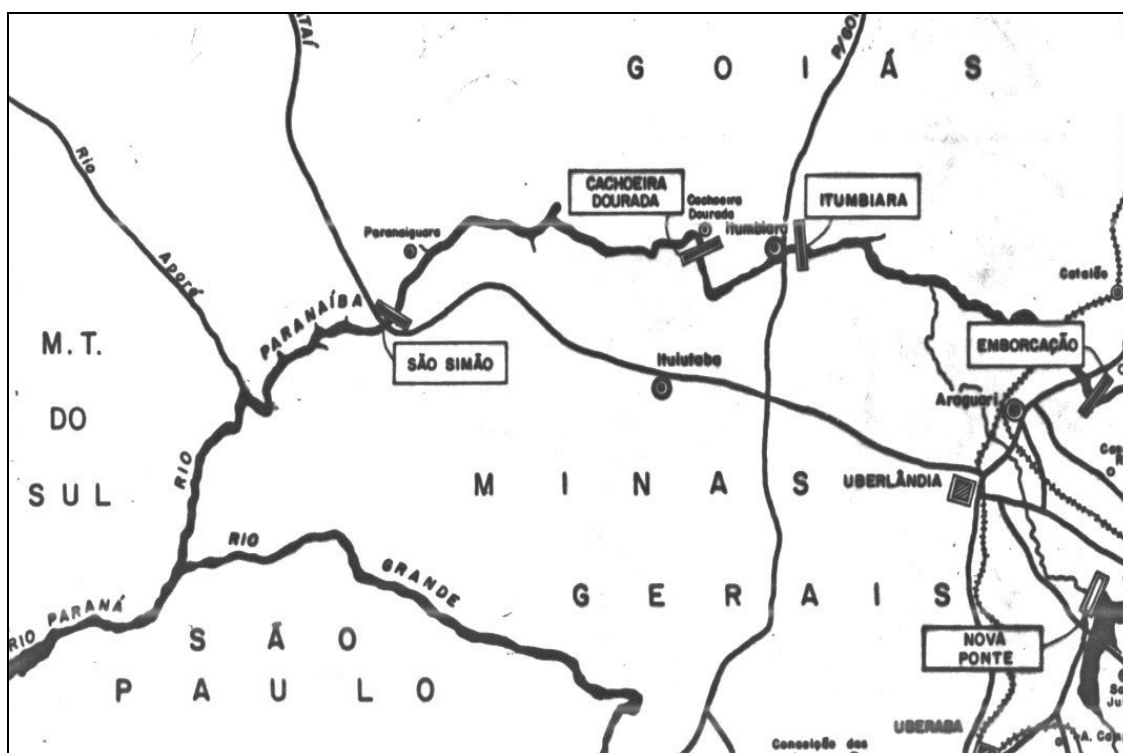


Figura 3.3 – Localização da UHE São Simão

A bacia hidrográfica referente a UHE São Simão é formada por uma área de 171.000,0 km<sup>2</sup> e corresponde a 72 % de toda a área da bacia do Paranaíba. Os principais corpos d'água da bacia são constituídos pelo Rio Paranaíba e os seus tributários, Rios Alegre, Rio Preto, São Francisco, da Prata, Tijuco e Verde, além do Ribeirão São Jerônimo.

### **3.2. – Geologia Regional**

A UHE São Simão encontra-se localizada na porção NE da Bacia do Paraná. Esta bacia abrange, em território brasileiro, uma área superior a 1.000.000,0 km<sup>2</sup>, caracterizada como uma bacia sedimentar subsidente, desde o período Paleozóico até o final do Mesozóico. A tectônica regional condicionou diversos ambientes de sedimentação, compreendendo depósitos marinhos, estuarinos, lacustres, glaciais, desérticos e fluviais, recobertos, em grande parte, por um espesso pacote vulcânico representado pelas rochas basálticas da formação Serra Geral. A cobertura sedimentar detrítica, correspondente aos materiais inconsolidados do Grupo Bauru, encontra-se presente em toda a extensão da bacia, ao norte do paralelo 24°.

Do ponto de vista das grandes obras de engenharia, as litologias mais relevantes são os basaltos juro-cretáceos da Formação Serra Geral e os arenitos do Grupo Bauru, do Cretáceo Médio a Superior (Figura 3.4), além dos depósitos coluvionares e aluvionares cenozóicos (Bartorelli, 1983).

As rochas basálticas constituem o substrato das seqüências sedimentares mais recentes, consistindo de sucessivos derrames sub-horizontais de lava, com espessuras individuais variando desde menos de 10,0 m até dezenas de metros, conformando pacotes de até 1600,0 m de espessura total, na parte central da bacia. Nestas litologias, estão localizadas geralmente as fundações das grandes barragens construídas na Bacia do Paraná. De uma maneira geral, os basaltos constituem fundações de boa qualidade, uma vez que as discontinuidades são quase sempre horizontais. Problemas específicos são resolvidos, na maioria das vezes, simplesmente pelo rebaixamento das cotas de escavação das fundações.



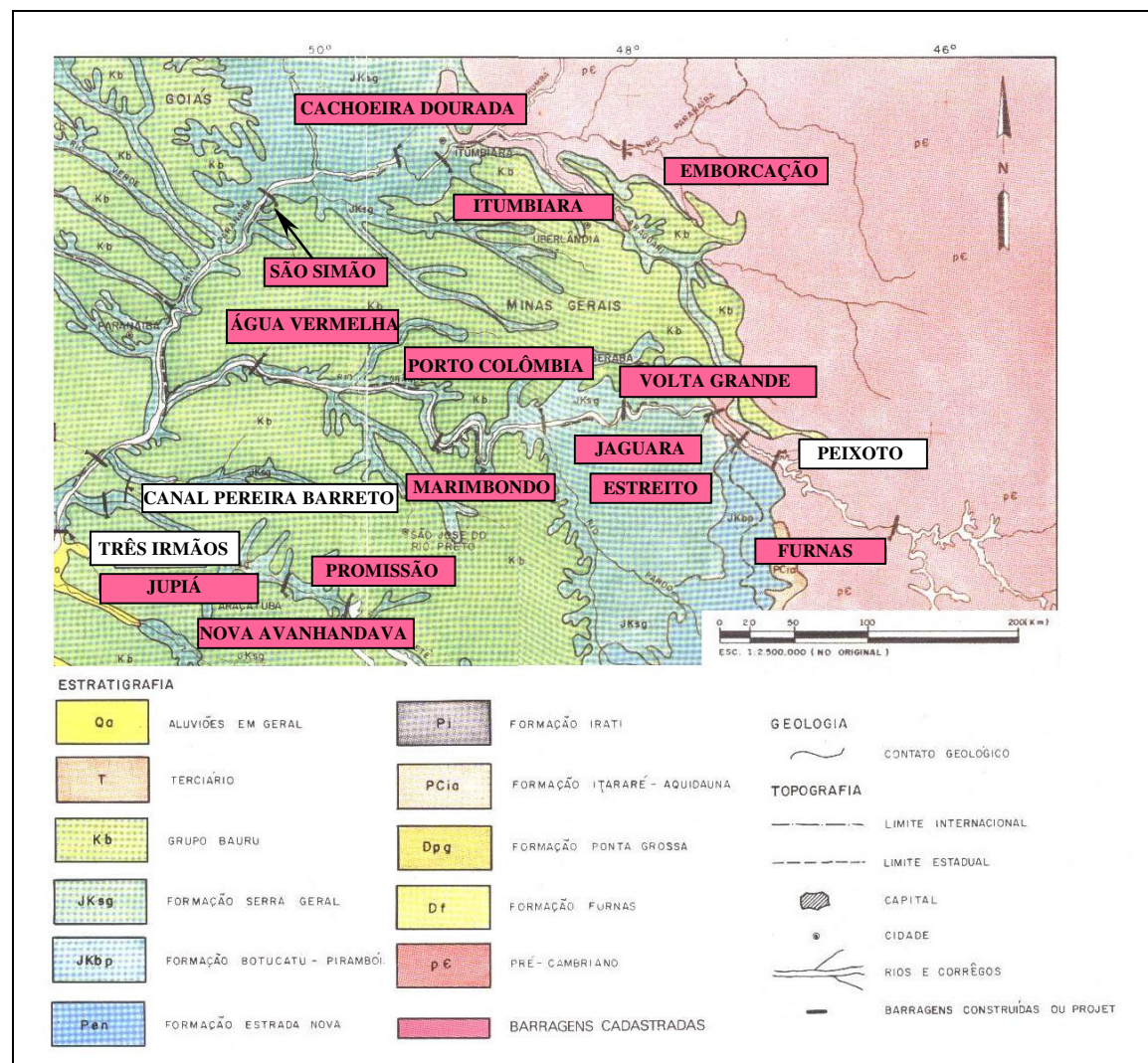


Figura 3.4 – Mapa Geológico Regional da UHE São Simão

Os basaltos apresentam fortes diaclasamentos na base e intercalações de brechas sedimentares e/ou basálticas. No topo, tendem a apresentar inúmeras vesículas e/ou amígdalas, preenchidas por diversos minerais como quartzo, calcitas e argilo-minerais. As zonas de brechas podem atingir espessuras superiores a 10,0 m. Devido ao tamanho dos blocos obtidos, estes materiais são freqüentemente utilizados em estruturas de enrocamento das barragens. A presença de argilas expansivas na constituição das rochas basálticas tem limitado sua utilização como material de enrocamento e como agregado.

Os arenitos do grupo Bauru, por sua vez, chegam a atingir espessuras de até 300,0 m, abrangendo as formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, que se sobrepõem numa seqüência cronológica pouco diferenciada. Trata-se de uma unidade composta por arenitos finos e médios, com intercalações de níveis de argilitos e siltitos, conglomerados e rochas calcáreas, constituindo as litologias de apoio de ombreiras de vários grandes barramentos da Bacia do Paraná. O elevado conteúdo de argilas montmoriloníticas presentes, especialmente nos arenitos da Formação Caiuá, conferem a estes materiais uma elevada desagregabilidade, inviabilizando geralmente o seu emprego como materiais de enrocamento. Em algumas situações, têm constituído os próprios materiais de fundação de barragens, embora, evidentemente, apresentem resistências bastante inferiores às das rochas basálticas.

Os depósitos cenozóicos são compostos pelas coberturas coluviais e aluviais mais antigas e pelos depósitos de terraço e planícies mais recentes. Os depósitos coluviais são representados principalmente por argilas siltosas e arenosas, muitas vezes com níveis de cascalho na base, sendo muito utilizados como materiais de empréstimo devido ao seu excelente comportamento geotécnico em maciços compactados. Os sedimentos mais recentes compõem-se principalmente de siltes, areias e cascalhos, largamente utilizados como agregados de concreto e como materiais de filtros e transições.

Os cascalhos basais têm sido, às vezes, utilizados como agregados de concreto. Entretanto, devido ao elevado teor de sílica contido nos seixos de grande parte destes cascalhos, esta aplicação tem sido inviabilizada em função dos sérios problemas de reatividade com o cimento.



### 3.3. – Geologia Local

Através de um programa de investigação de campo, foram determinadas as principais condicionantes geológico-geotécnicas e caracterizadas as diferentes litologias presentes no local da barragem. Esse programa de investigação consistiu basicamente de sondagens convencionais e integrais, mapeamento geológico através das galerias de inspeção e das superfícies de escavação (CEMIG, 1976).

Os solos de capeamento são formados por depósitos cenozóicos compostos por cascalhos de terraço e solos transportados. Os cascalhos de terraço formam camadas de até 17,0 m de espessura, em terraços elevados nas margens dos rios, acima da cota 400,0 m. Solos transportados ocorrem sobrejacentes ao cascalho ou contato direto com o basalto, nas partes mais elevadas da ombreira direita e com espessuras de até 7,0 m.

Depósitos mais recentes (quaternários) ocorrem nas elevações mais baixas, até a cota 340,0 m, correspondentes à planície de inundação do rio. Nesta área ocorrem camadas de uma mistura de areia fina argilosa e silte aluvionar, de até 5,0 m de espessura, e um depósito de areia fina a média misturada com cascalho no leito do rio, com até 20,0 m de espessura (IESA, 1980a).

As rochas basálticas na área do projeto compreendem sete derrames e seus respectivos interderrames, apresentando uma espessura total de 200,0 m, entre as cotas 220,0 e 420,0 m. A Tabela 3.1 sistematiza a estratigrafia destas seqüências, mostrando as características geométricas e as elevações aproximadas de ocorrência dos vários derrames e inter- derrames.

Constata-se que o derrame 1 é o mais espesso e o segundo mais antigo. Os demais apresentam uma espessura variando entre 25,0 a 30,0 m, exceto no caso do derrame 5, que foge à regra geral. Viotti et al. (1983) enfatizam os principais aspectos geomecânicos de toda a seqüência de derrames e interderrames. É relevante ainda ressaltar a presença freqüente entre os derrames de uma camada de arenito ou siltito, cuja espessura varia de poucos centímetros até 12,0 m (Figura 3.5).

Tabela 3.1 – Sequência Estratigráfica dos Diversos Derrames e Interderrames da Área de Projeto (IESA, 1980a)

Nº Derrame/ Interderrame	Tipo de Material	Espessura	Elevação Aproximada de Ocorrência
7	Apresenta-se sob a forma de um solo residual e/ou rocha extremamente decomposta de basalto denso com uma zona vesículo-amigdaloidal no topo.	25,0 a 30,0 m	Ombreira direita: El.400 a El.370.  Ombreira Esquerda: El.400 a El.375.
Interderrame 6	-	Ocorre raramente. É mais comum o contato direto entre os derrames 6 e 7.	Ombreira direita: El.370.  Ombreira Esquerda: El.375.
6	O topo do derrame é constituído de basalto vesicular amigdaloidal, às vezes extremamente alterado. O basalto denso é, de um modo geral, são, apresentando intenso fraturamento, com uma maior alteração nestas juntas de baixa resistência ao cisalhamento. A base do derrame é constituída de “spiracles” que são intrusões irregulares de gás, vapor d’água e material clástico, de um modo geral alterados.	26,0 m	Ombreira direita: El.370 a El.344.  Ombreira Esquerda: El.380 a El.354.
Interderrame 5	A superfície do contato é constituída de 0,10 m de material brechóide (matriz argilosa com fragmentos de basalto alterado). Apresenta-se normalmente mal consolidado, aberto e permeável.	Ocorre muito esparsamente	Ombreira direita: El.344.  Ombreira Esquerda: El.354.
5	Apresenta as mesmas características do derrame 6.	13,0 m	Ombreira direita: El.344 a El.344.  Ombreira Esquerda: El.354 a El.340.

Interderrame 4	Brecha sedimentar de siltito e arenito com fragmentos de basalto vesicular do topo do derrame 4/3. A sua resistência é função do grau de alteração dos fragmentos de basalto, sendo facilmente desagregável pela ciclagem natural e é friável. Nivelas irregularidades do topo do derrame 4/3, não o recobrimdo inteiramente.	Atinge espessura de até 3,0 m.	Ocorre nas Elevações 328 e 333.
4/3	É um complexo de subderrames. Basicamente cada subderrame tem uma zona superior de basalto vesicular amigdalóide de até 3,0 m de espessura, passando gradualmente para basalto denso. Na base ocorre uma camada de até 0,20 m de basalto vesicular. O complexo 4 e 3 se apresenta são e dotado de cavidades, cavernas e juntas horizontais. O subderrame superior apresenta uma junta-falha no topo do basalto denso, sendo esta junta localmente decomposta.	24,0 m	El.334 a El. 310.
Interderrame 2	Brecha sedimentar composta de fragmentos de basalto vesicular englobados por matriz de arenito e siltito. Apresenta contato nítido e irregular com a base do derrame 4/3, sendo o contato inferior irregular e de difícil definição. É impermeável, não tem fraturas e pouco ou não intemperizada.	3,0 a 4,0 m, podendo atingir 12,0 m, se se considera a ocorrência nas escórias do topo do derrame 2.	Base na El.312 podendo atingir a El.298 (base das escórias do derrame 2).
2	O basalto vesicular do topo do derrame 2 está quase totalmente incorporado ao interderrame 2. Na sequência, o derrame é constituído de basalto denso, constituindo a litologia mais sã da área de projeto.	38,0 a 28,0 m	El.308 a 270 ou El. 298,0, caso a escória seja considerada como interderrame 2.
Interderrame 1	É constituído de siltito ou arenito silicificado, altamente resistente, envolvendo na base alguns fragmentos de basalto vesicular.	0,50 m	270
1	Teve apenas o topo de basalto vesicular pesquisado pelas sondagens	50,0 m	270 (topo).
0	-	Desconhecido	-

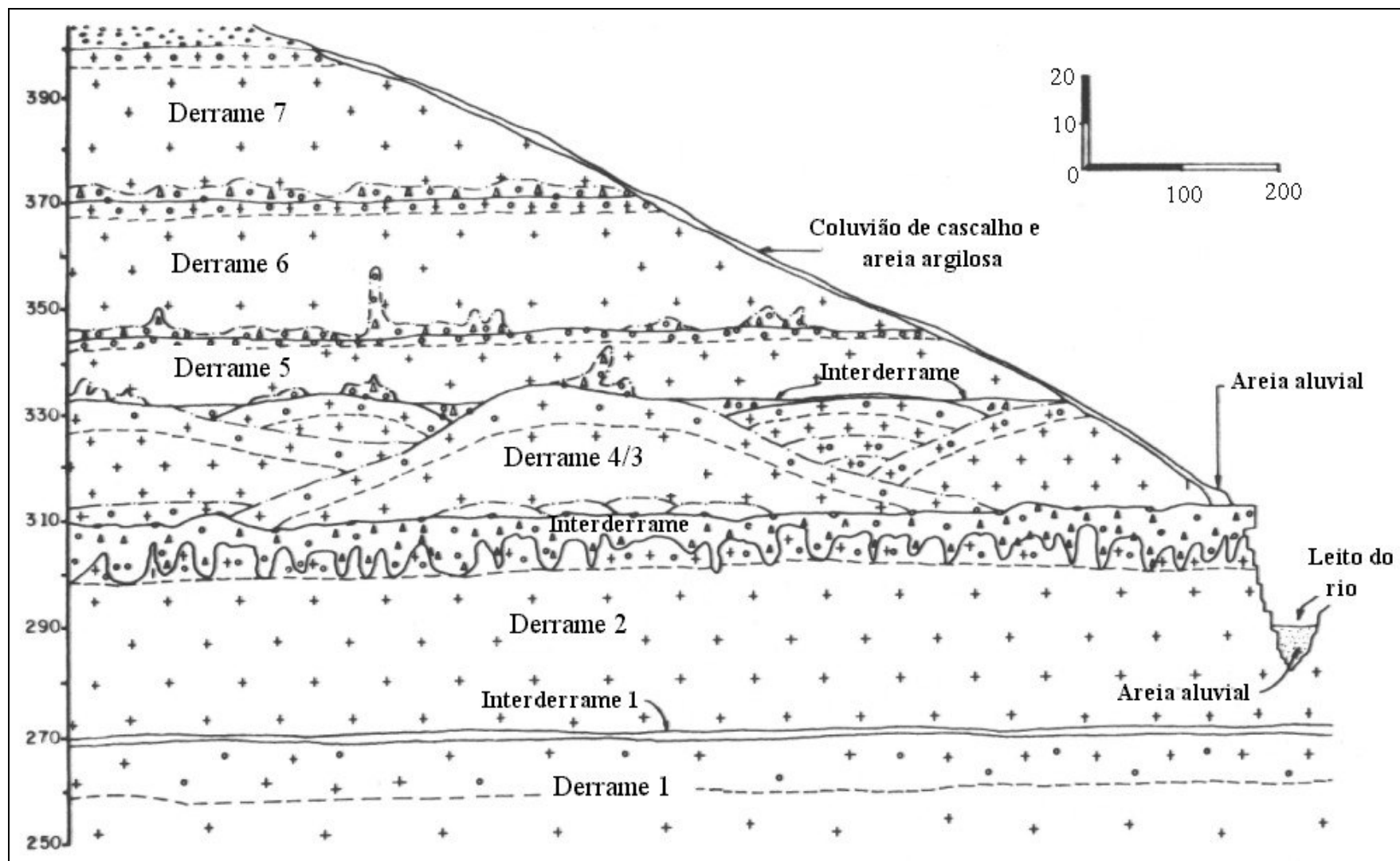


Figura 3.5 – Estratigrafia Local – Margem Direita (Viotti et al., 1983)

No caso da barragem de terra da margem esquerda e parte da barragem de enrocamento, os principais condicionantes geológico-geotécnicos detectados foram os seguintes:

- Existência de uma camada superficial de solo residual, com até 10,0 m de espessura, compressível e de baixa resistência ao cisalhamento, governando a estabilidade do aterro;
- Existência de rocha sã junto a solo residual, entre as Est. 3 + 0,0 e Est. 3 + 500,0, correspondentes ao derrame 6, com potencial risco de desenvolvimento de trincas no maciço compactado das barragens;
- Existência de camadas contínuas de baixa resistência, variando de solo residual a rocha extremamente decomposta, correspondentes aos interderrames 4 e 5, ocorrendo abaixo de material de boa resistência; aspecto também de grande relevância sobre as condições de estabilidade do maciço de terra;
- Ocorrência de derrames 5 e 6, rocha decomposta a sã e respectivos contatos, permeáveis, com pequeno capeamento, no vale à montante da barragem;
- Indícios de ocorrência de falhas escalonadas normais, cruzando-se em um esquema ortogonal, na região da ombreira esquerda. Estes indícios foram obtidos a partir da interpretação de levantamentos feitos a partir de fotografias aéreas; entretanto, estes indícios não foram confirmados em campo, nem pelas sondagens e nem pelos trabalhos de escavação;
- Ocorrência de elevadas perdas d'água na parte superior da brecha do interderrame 2, no contato com o derrame 4/3, entre as cotas 310,0 e 325,0 m, com potencial presença de brecha basáltica sem cimentação.

No caso da barragem de enrocamento e ensecadeiras da seção do canal do rio, os fatores geológico-geotécnicos mais relevantes foram os seguintes:

- Existência de uma camada de areia fina a média junto a matacões e cascalho, com espessura variável (até 20,0 m) e elevada permeabilidade nos eixos das ensecadeiras “D” e “E”; a rocha, imediatamente abaixo da areia, apresenta-se com juntas abertas, dotadas de alta permeabilidade até aproximadamente 7,0 m de sua superfície;

- Os estudos de refração sísmica e os perfis batimétricos revelaram o formato íngreme dos taludes da garganta do canal, bem como a presença de uma superfície irregular, que exigiram um projeto de escavação específico, de forma a se evitar o desenvolvimento de trincas no maciço.

Para as estruturas de concreto e parte da barragem de enrocamento, os condicionantes geológico - geotécnicos críticos foram os seguintes:

- O derrame 5 é o primeiro nesta área do projeto, apresentando alta permeabilidade devido ao seu intenso grau de fraturamento e juntas sub-horizontais (“juntas-falhas”) de grande extensão e baixa resistência, tornando-o impróprio como fundação das estruturas de concreto;
- O interderrame 4 é descontínuo e ocorre em bolsões de pouca espessura, tendo se revelado também inadequado como fundação devido à sua má qualidade mecânica e às suas características de desagregação quando exposto ao ar e à água;
- O derrame 4/3 revelou-se o mais apropriado para fundação devido a sua resistência, apresentando, porém, alta permeabilidade em função das cavernas existentes no seu interior, bem como devido à presença de juntas horizontais nos subderrames de maior espessura, tendo sido registradas perdas d’água totais entre as cotas 310,0 e 325,0 m;
- A brecha do interderrame 2 mostrou-se praticamente impermeável, apresentando resistência mais baixa que os demais extratos da fundação, condicionando, assim, os estudos de estabilidade;
- Os derrames 2 e 1 e o inter-derrame 1 apresentaram elevada resistência e baixa permeabilidade, não tendo influência nos estudos como fundação para as estruturas.

Em relação à barragem de terra da margem direita, o principal condicionante geológico-geotécnico foi expresso pela presença de um perfil geológico envolvendo materiais de baixa resistência, compressíveis e de alta permeabilidade, caracterizado por:

- Solo transportado, com espessura média de 5,0 m, de baixa resistência, alta permeabilidade e colapsível quando saturado;

- Cascalho argiloso coluvionar, com espessura média entre 1,0 e 2,0 m;
- Solos residuais e rochas extremamente decompostas, compressíveis, permeáveis e de baixa resistência, com espessuras de até 20,0 m;
- Existência de material de baixa resistência na base do derrame 5, suspeito de apresentar continuidade suficiente para comprometer a estabilidade do trecho de jusante da barragem de terra junto à Transição N<sup>o</sup> 1; as análises de estabilidade exigiram uma escavação de cerca de 8,0 m de profundidade em rocha.

A partir da coleta de amostras deformadas e indeformadas através de sondagens a trado e a percussão e de poços manuais executados na área de projeto, foram realizadas séries de ensaios de caracterização e de ensaios especiais (triaxiais e ensaios de adensamento). De modo geral, na margem direita foram ensaiadas amostras de solos transportados, de solos residuais de basalto vesicular (BV) e de solos residuais de basalto denso (BD), extremamente decomposto, que constituem parte integrante da fundação da barragem nesse trecho. A fundação na margem esquerda apresentou pouca ou nenhuma presença de solos transportados; os solos residuais presentes apresentaram resultados similares aos obtidos para a ombreira direita.

Com a evolução dos estudos de estabilidade, foram implementadas outras séries de ensaios triaxiais, incluindo, inclusive, diferentes condições de pré-adensamento, visando reproduzir ao máximo as condições reais de campo. As Tabelas 3.2 e 3.3 sintetizam os valores de referência de projeto para os parâmetros de resistência dos solos de fundação das barragens da UHE São Simão.

Tabela 3.2 – Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento – Solos Transportados

Ensaio	Parâmetros Totais		Parâmetros Efetivos	
	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)	c' (tf/m <sup>2</sup> )	φ' (°)
UU	4,0	11	-	-
CU	-	10	-	23
CkU <sup>1</sup>	-	18	-	-
CD	-	-	-	23

1: Relação  $\sigma_1/\sigma_3 = 1,6$  e adensamento anisotrópico

Tabela 3.3 – Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento – Solos Residual Denso e Vesicular de Fundação

Ensaio	Parâmetros Totais		Parâmetros Efetivos	
	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)	c' (tf/m <sup>2</sup> )	φ' (°)
UU	7,5	7,5	-	-
CU	7,5	7,5	-	25
CkU <sup>1</sup>	10,0	12	-	-
CkU <sup>2</sup>	7,5	15	-	-
CD	-	-	-	25

1: Relação  $\sigma_1/\sigma_3 = 1,6$  e adensamento anisotrópico; 2: Relação  $\sigma_1/\sigma_3 = 1,6$  e adensamento isotrópico.

### 3.4. – Concepção, Arranjo Geral e Materiais das Barragens da UHE São Simão

#### 3.4.1. – Arranjo Geral

O arranjo geral das estruturas da UHE São Simão (CBGB, 1982) é constituído, basicamente, por barragens de terra nas margens direita e esquerda, uma barragem de terra e enrocamento no leito do rio, uma barragem de gravidade em concreto, estruturas hidráulicas, ensecadeiras, canal de descarga, canal de desvio e subestação (Figura 3.6). Foram utilizados 21,5 milhões de m<sup>3</sup> de material compactado nas barragens, 4,0 milhões de m<sup>3</sup> nas ensecadeiras e um volume de concreto de 12,0 milhões de m<sup>3</sup>. Os volumes de escavação em solo e rocha totalizaram, respectivamente, 3.407,0 e 4.230,0 m<sup>3</sup>.

A barragem de concreto é do tipo gravidade e abrange as estruturas de concreto do vertedor, canal de força e canal de fuga, tubulação forçada, tomada d'água e duas transições laterais. O vertedor é do tipo superfície com nove comportadas de setor. A casa de força é do tipo abrigada, estando em operação 6 turbinas do tipo Francis (285 MW cada). A tomada d'água da barragem de concreto de gravidade é subdividida em 10 blocos de 20,0 m de largura, com condutos forçados de 9,50 m de diâmetro. As transições laterais, em concreto massa, encontram-se envolvidas parcialmente pelo aterro compactado das barragens de terra e de terra e enrocamento.



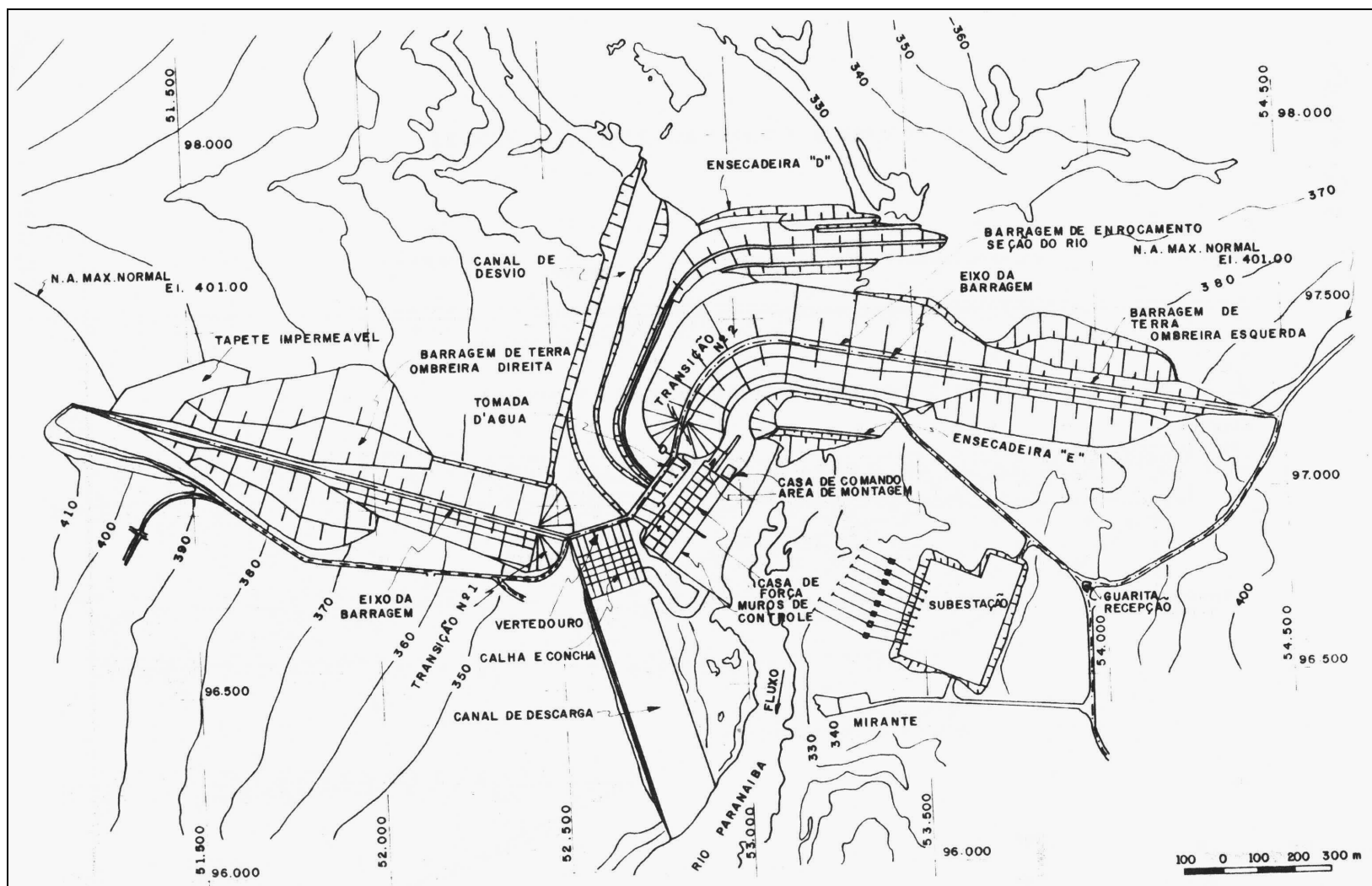


Figura 3.6 – Arranjo Geral das Estruturas da UHE São Simão (Viotti et al., 1983)

O maciço compactado da barragem de terra e enrocamento é dividido em três trechos distintos: margem direita, margem esquerda e leito do rio. Entre as barragens de terra das margens e a barragem de terra e enrocamento no leito do rio, foram executadas estruturas de transição. Além disso, duas ensecadeiras (designadas como “D” e “E”) foram incorporadas ao corpo da barragem. Bermas de equilíbrio foram construídas nas regiões em que as barragens de terra estão assentadas sobre solos de baixa resistência.

### 3.4.2. – Materiais de Construção

No processo de qualificação dos materiais de construção das barragens da UHE São Simão, foram investigadas diferentes jazidas e pedreiras, com o objetivo de se obter: materiais argilosos para o núcleo impermeável da barragem, materiais de transição, materiais granulares graúdos para enrocamento, rip-rap e agregados e materiais granulares finos para filtros, drenos e concreto (Geotécnica, 1978; IESA, 1980a).

O núcleo impermeável foi construído com solos provenientes das áreas de empréstimo 2 e 3, sendo caracterizados como areias argilosas (teores de areia variando entre 20 e 90 % na jazida 2 e, com maior homogeneidade, entre 45 e 85 % na jazida 3). Estes solos foram submetidos a ensaios de caracterização e especiais (ensaio de adensamento e triaxiais) em diferentes fases da implantação do projeto. Os parâmetros de projeto foram definidos a partir de análises. A Tabela 3.4 mostra os valores de referência que foram adotados em projeto como sendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material do núcleo das barragens.

Tabela 3.4 – Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento– Areia Argilosa do Núcleo das Barragens

Ensaio	Parâmetros Totais		Parâmetros Efetivos	
	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)	c' (tf/m <sup>2</sup> )	φ' (°)
UU	8,0	32	-	-
CU	10,0	12	-	30
CD	-	-	-	30

Durante a execução do aterro, foram extraídos blocos indeformados de um poço de inspeção junto à Transição N<sup>o</sup> 1 e executadas novas séries de ensaios triaxiais drenados e não-drenados, cujos resultados estão indicados na Tabela 3.5. Os parâmetros de compactação foram definidos a partir de observações prévias efetuadas em aterros experimentais, tendo sido realizadas algumas adaptações para as condições reais de campo.

Tabela 3.5 – Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento – Areia Argilosa do Núcleo das Barragens (Ensaio Complementares)

Bloco	Ensaio	Parâmetros Totais	
		c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)
1 (El.353,14)	UU	17,0	24
	CU	11,0	14
2 (El.352,87)	UU	17,0	25
	CU	8,0	16
3 (El.352,60)	UU	18,0	22
	CU	12,0	15

O cascalho de terraço, proveniente das áreas de empréstimos 3 e 4, foi utilizado como transição entre o núcleo argiloso e o rip-rap e nas ensecadeiras. Esse material foi amplamente utilizado devido às suas excelentes características, tais como elevada resistência, baixa deformabilidade e permeabilidade muito pequena, da ordem de 10<sup>-6</sup> cm/s depois de compactado. Trata-se de um solo bem graduado, com 30 a 70 % do material sendo retido na # N<sup>o</sup> 4 e cerca de 20 % passante na # 200. A Tabela 3.6 resume os parâmetros de resistência que caracterizam este material.

Tabela 3.6 – Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento – Cascalho de Terraço

Ensaio	Parâmetros Totais		Parâmetros Efetivos	
	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)	c' (tf/m <sup>2</sup> )	φ' (°)
UU	10,0	31	-	-
CU	10,0	22	-	35

Das oito pedreiras analisadas como potenciais fontes de materiais graúdos para as barragens, três forneceram materiais para a construção do enrocamento, rip-rap e agregados de concreto. O material da pedreira A foi empregado como agregado para o concreto, base superior do rip-rap e proteção de taludes. O material extraído da pedreira C foi empregado no enrocamento, na base superior do rip-rap, na proteção de taludes e como rocha alterada para as ensecadeiras. Finalmente, o material da pedreira G foi utilizado como matéria prima nas zonas de enrocamento e no rip-rap.

O material proveniente da pedreira A também foi utilizado na obtenção de areia e brita para os drenos. Os materiais de construção utilizados no filtro chaminé, no tapete drenante e como areia de concreto foram obtidos junto a diversos depósitos de areia e cascalho existentes no leito do rio.

### 3.4.3. – Geometria e Seções Típicas das Barragens

A barragem de terra da margem direita (Figura 3.7) apresenta um comprimento de crista de 1.260,0 m, uma altura máxima de 71,0 m, e uma seção típica zoneada com argila e cascalho. A crista encontra-se na El. 404,0 m e tem 10,0 m de largura. Para essa estrutura, estabeleceu-se uma sobre-elevação de 0,30 m, com o intuito de compensar os recalques a serem mobilizados na fase pós-constructiva.

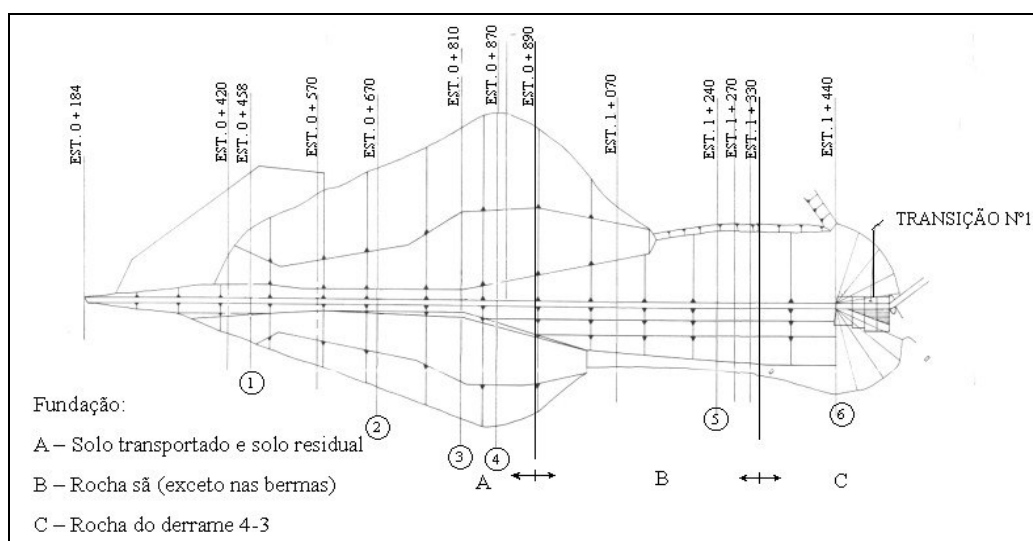


Figura 3.7 – Barragem de Terra da Margem Direita – BTMD

A seção típica da barragem de terra da margem direita está situada na seção 5 (estaca 1 + 240,0) e está representada na Figura 3.8. O núcleo impermeável (8A) é constituído por uma areia argilosa até a cota 395,0 m. Acima dessa cota e até a cota de 401,0 m, o maciço é formado por cascalho de terraço (5). A inclinação do talude de montante do núcleo impermeável é de 0,8H:1V, enquanto a de jusante varia entre 0,4H:1V e 0,5H:1V.

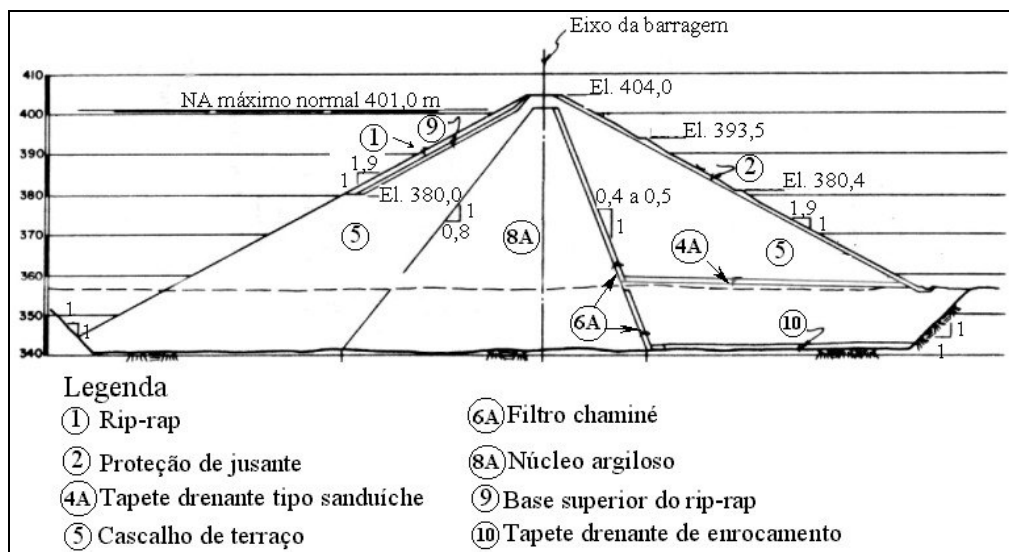


Figura 3.8 – Seção Típica da BTMD – Seção 5 – Estaca 1 + 240,0

O sistema de drenagem interna é constituído por um filtro chaminé de areia (6A) ligado ao nível do terreno natural através de um tapete drenante do tipo sanduíche de areia e brita (4A). Um tapete drenante de enrocamento (10), ao longo do contato com a superfície da escavação, encontra-se conectado a um trecho independente do filtro chaminé. O filtro sanduíche e o tapete de enrocamento são separados por uma camada de cascalho de terraço.

Os taludes externos de montante e jusante apresentam inclinações de 1,9H:1V e são protegidos por um rip-rap (1) e uma base superior do rip-rap (9) de 1,3 m de espessura total, localizado acima da cota 380,0 m no talude de montante e por uma “proteção de talude” (2), de 1,0 m de espessura, ao longo de todo o talude de jusante e até o terreno natural. A fundação da barragem, nessa seção, encontra-se totalmente apoiada em rocha sã.

Em toda a extensão da barragem (Figura 3.6 e Figuras I.4 a I.9 do Anexo I), o solo de assentamento da barragem varia bastante. Por exemplo, entre as estacas 0 e 0 + 890,0, a fundação da barragem é constituída por depósitos de solo transportado e solo residual. No sentido da ombreira direita para o leito do rio, a camada de solo transportado vai diminuindo de espessura, propiciando, em alguns trechos, o contato do núcleo argiloso apenas com o solo residual. Entre as estacas 0 + 890,0 a 1 + 330,0, por outro lado, a fundação é constituída por rocha sã, exceto na região das bermas de equilíbrio. No caso dos trechos entre as estacas 1 + 330,0 e 1 + 520,0, a fundação é constituída de rocha do derrame 4/3. Esta geometria constitui alteração de projeto, que estabelecia originalmente a fundação da barragem na cota de topo do derrame 5; entretanto, optou-se posteriormente pela remoção deste horizonte, por este se mostrar muito decomposto.

Devido às características geotécnicas dos solos de assentamento, construiu-se um tapete impermeabilizante entre as estacas 0 + 230,0 e 0 + 600,0, com a finalidade de reduzir a infiltração de água através da fundação; de espessura de pelo menos 1,0 m e apoiado sobre o solo transportado.

Além disso, executou-se um tratamento superficial entre o contato do núcleo argiloso e toda a fundação rochosa. Esse tratamento consistia de uma limpeza do local e a realização de um tratamento asfáltico ou com argamassa, para o caso da fundação ser, respectivamente, em rocha decomposta e rocha sã muito fraturada. O tratamento feito na fundação em solo tinha a única finalidade de correção dos teores locais de umidade.

A partir da estaca 1 + 270,0, ocorre a substituição gradual dos materiais constituintes do maciço pelo enrocamento, como procedimento para atingir as seções de abraço à Transição N<sup>o</sup> 1 (Figura 3.9). O maciço que envolve a estrutura de concreto na Transição N<sup>o</sup> 1 tem a sua fundação assentada no topo do derrame 4/3. A seção transversal dessa região é constituída por um núcleo impermeável (8A) de areia argilosa e uma transição de cascalho de terraço (5) e enrocamento (3). O sistema de drenagem é composto por um tapete drenante tipo sanduíche (4A), um filtro chaminé (6A) e um tapete drenante de enrocamento (10), no contato com a face de jusante da estrutura de concreto e ao longo da fundação.

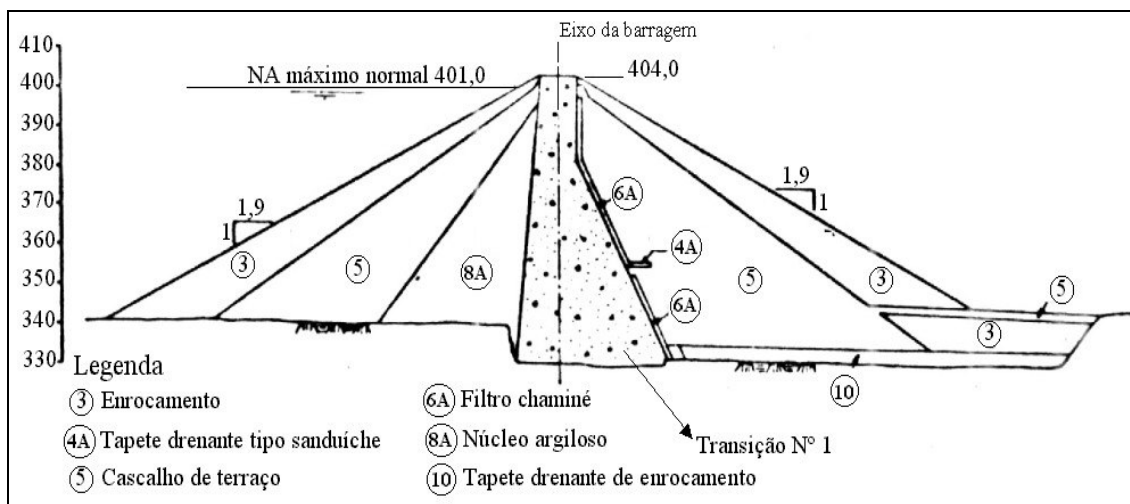


Figura 3.9 – Seção Típica da Zona de Transição Nº 1 – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0

A barragem de terra da margem esquerda (Figura 3.10) encontra-se localizada entre a estaca 2 + 663,0 até, aproximadamente, a estaca 3 + 600,0. Essa barragem apresenta uma extensão de 952,0 m, uma altura máxima de 64,0 m e uma seção típica zoneada em argila e cascalho. A crista encontra-se na El. 404,0 m e também tem 10,0 m de largura. Da mesma forma que na barragem de terra da margem direita, uma sobre-elevação de 0,30 m foi mantida para a compensação dos recalques futuros da barragem.

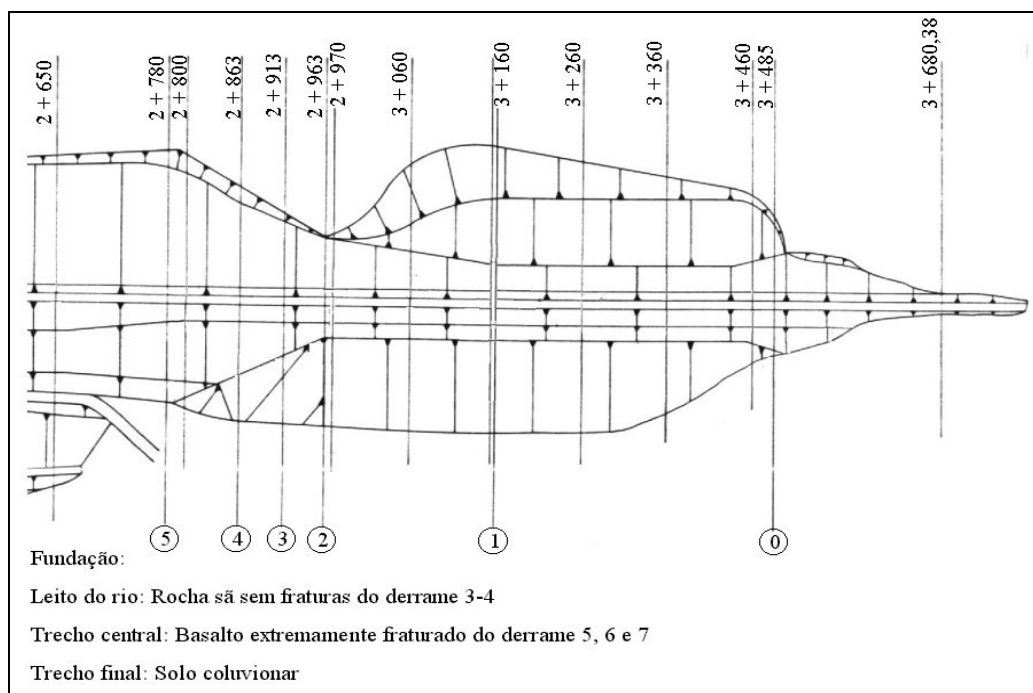


Figura 3.10 – Barragem de Terra da Margem Esquerda - BTME

A seção típica da barragem de terra da margem esquerda (Figura 3.11) encontra-se localizada na seção 5 (estaca 2 + 780,0). O núcleo impermeável (8A) é constituído por uma areia argilosa com topo na cota 395,0 m. Acima dessa cota e até a cota de 401,0 m, o maciço é composto por cascalho de terraço (5). Os taludes de montante e jusante do núcleo apresentam, respectivamente, inclinações de 0,8H:1V e 0,4H:1V.

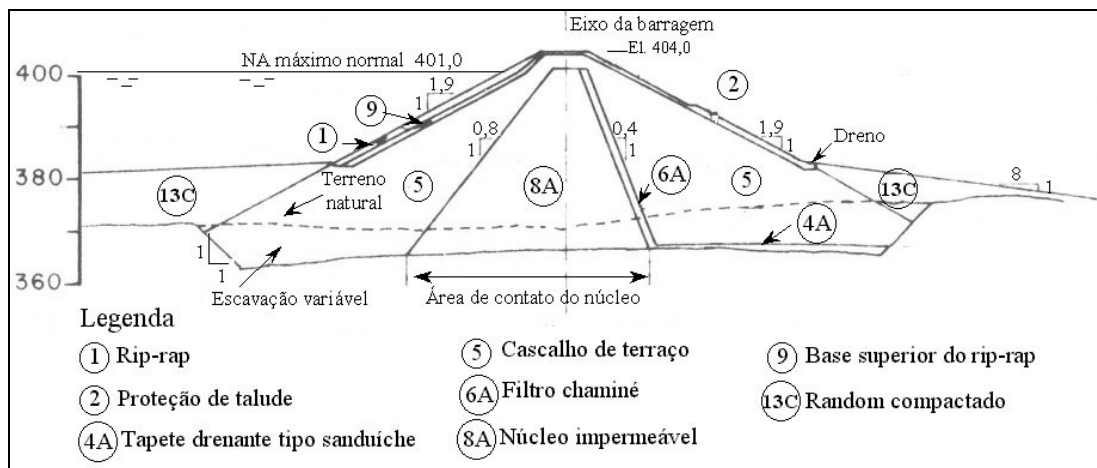


Figura 3.11 – Seção Típica da BTME – Seção 5 - Estaca 2 + 780,0

No talude de jusante do núcleo impermeável, existe um filtro chaminé (6A) de 1,0 m de espessura, entre as cotas 401,0 e 395,0 m, e de 1,50 m de espessura, entre a cota 395,0 m e o tapete drenante tipo sanduíche (4A) assentado sobre a fundação.

Os taludes de montante e jusante apresentam uma inclinação de 1,9H:1V a partir da crista da barragem. À montante da crista existe uma proteção de rip-rap (1) e uma base superior de rip-rap (9) com 1,30 m de espessura total, que vai da crista até a cota 380,0 m e/ou o topo da berma. A jusante existe uma “proteção de talude” (2), de 1,0 m de espessura, que vai da crista até a cota do terreno natural e/ou o topo da berma. As bermas executadas à montante e à jusante da barragem são constituídas por random compactado (13 C).

Implantou-se também um tapete impermeável à montante do eixo da barragem, entre as estacas 2 + 150,0 e 3 + 200,0, com o intuito de impermeabilização do seu vale, e constituído por um material argiloso.



Além disso, houve um tratamento superficial distinto para cada área de contato da barragem de terra e a fundação. No caso do núcleo, fez-se a limpeza manual com aplicação de jato de ar e água, enquanto a rocha fraturada nessa região recebeu uma aplicação de argamassa. Quanto a rocha sã superficialmente exposta e envolvida com material alterado, procedeu-se a um processo de tratamento com calda de cimento. O tratamento com argamassa foi também realizado sob a rocha fraturada do derrame 5, na zona de fundação do tapete impermeável (Viotti et al., 1983).

Technical drawing of a dam cross-section. The drawing shows a curved dam structure with various levels and structural details. Key labels include:

- 2+650 (top right)
- 2+500
- 2+450
- 2+410
- 2+325
- 2+240
- 2+060
- 2+016
- Transição Nº2 (bottom left)
- 9 (bottom center)
- 8A (bottom right)
- 8 (bottom right)
- 7 (bottom right)
- 6 (bottom right)
- ENSECADEIRA "E" (bottom right)

69

O comprimento dessa barragem é de, aproximadamente, 665,0 m, tendo uma altura máxima de 127,0 m e seção típica zoneada em argila e cascalho. A crista da barragem encontra-se na cota 404,0 m e largura de 10,0 m. Nesse trecho, a sobre-elevação prevista em projeto foi de 0,50 m.

A seção típica da barragem de terra e enrocamento encontra-se na estaca 2 + 410,0 e está representada na Figura 3.13. O núcleo impermeável (8A) é constituído por uma areia argilosa com topo na cota 401,0 m. Os taludes de montante e jusante do núcleo apresentam, respectivamente, uma inclinação de 0,5H:1V e 0,1H:1V.

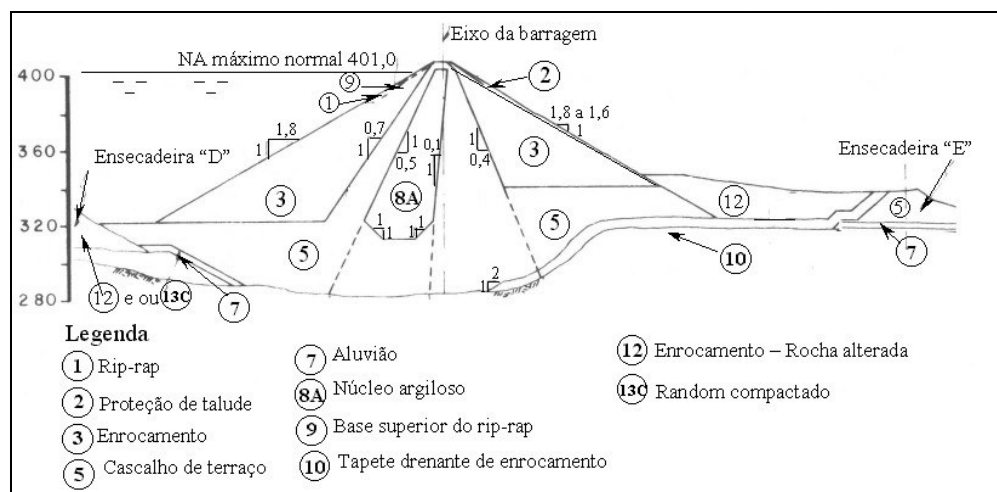


Figura 3.13 – Seção Típica da Barragem de Terra e Enrocamento – Estaca 2 + 410,0

Com o intuito de reduzir os recalques diferenciais nesse trecho o núcleo impermeável foi substituído por cascalho de terraço (5), em zonas abaixo da cota 310,0 m. Neste caso, os taludes de montante e jusante apresentam, respectivamente, inclinações de 0,7H:1V e 0,4H:1V, a partir da crista da barragem.

No canal profundo do rio, o cascalho de terraço foi estendido à montante até a ensecadeira “D” com topo na cota 320,0 m, com função impermeabilizante; e à jusante, esta extensão se fez até a projeção do talude externo (2) da barragem com topo na cota 338,0 m, visando isolar as águas de percolação pelas margens direita e esquerda, de modo a permitir medidas independentes de vazão. Esse cascalho de terraço funciona também como um tapete impermeabilizante.

O enrocamento (3) apresenta um talude de montante igual a 1,8H:1V, e de jusante variável igual a 1,6H:1V entre as cotas 404,0 e 383,0 m, 1,7H:1V, entre as cotas 383,0 e 354,0 m e 1,8H:1V, da cota 353,0 m até a fundação. Um rip-rap (1) e uma base superior de rip-rap (9), de 1,30 m de espessura total, foi executado a partir da cota 390,0 m. A fundação da barragem de terra e enrocamento é predominantemente em rocha do derrame 2. Constatou-se ainda a presença de uma camada de aluvião (7) logo abaixo da ensecadeira “E”, que acabou funcionando como um tapete drenante natural.

A zona existente entre a barragem de enrocamento e a ensecadeira “E” foi preenchida por rocha alterada (12), sendo que, na cota 343,0 m, executou-se uma berma de 14,0 m de largura, com o objetivo de permitir o acesso às estruturas de concreto. Por outro lado, a zona existente entre a barragem de enrocamento e a ensecadeira “D”, até a cota 320,0 m, foi preenchida por rocha alterada (12) e/ou random compactado (13C)

Para diminuir a percolação de água pela fundação, foram executados uma cortina de vedação, um tapete drenante (10) e um tapete impermeabilizante. A cortina de vedação foi executada na fundação da margem esquerda da barragem de enrocamento, entre as estacas 2 + 027,0 e 2 + 725,0, com o objetivo de preencher as fendas existentes na rocha e melhorar as condições de suporte, reduzindo-se o fluxo e melhorando a estabilidade por diminuição das subpressões geradas. Essa cortina foi implantada em duas linhas através do derrame 4/3 e até 2,0 m no interderrame 2, dispostas paralelamente e à montante ao eixo da barragem, tendo sido uma delas executada a partir da superfície do terreno e a outra, a partir da galeria de drenagem.

O tapete drenante encontra-se situado no trecho do canal profundo da barragem de terra e enrocamento e foi construído em rocha sã e limpa. O seu posicionamento estende-se desde a base do canal profundo (cota 290,0) até a crista da ensecadeira “E” (cota 334,0).

A fundação de toda a barragem de terra e enrocamento pode ser dividida em dois trechos (Figuras I.17 a I.21 do Anexo I): entre a Transição N<sup>o</sup> 2 e a margem do rio (trecho 1), ocorrem as rochas sãs do derrame 4/3. No leito do rio (trecho 2), a barragem é assentada sobre a brecha 2 e o derrame 2. Fez-se um tratamento superficial da fundação

em todo o canal profundo, através da execução de uma camada de concreto dental com espessura superior a 0,30 cm. Esse tratamento tinha o objetivo de regularizar o canal da fundação do canal e minimizar os trabalhos de lançamento do cascalho de terraço.

A seção típica da área de Transição N<sup>o</sup> 2, representada pelo contato entre a estrutura de concreto e o aterro compactado, está indicada na Figura 3.14. O núcleo impermeável (8A), de areia argilosa, apresenta um talude de montante com uma inclinação de 0,4H:1V. A face do talude de jusante estende-se até o encontro da face de Transição N<sup>o</sup> 2, transversal ao eixo da barragem.

A zona de transição de cascalho de terraço (5) tem seu topo situado na cota 402,0 m e os seus taludes de montante e jusante apresentam uma inclinação de 0,5H:1V. Entre a parede vertical da Transição N<sup>o</sup> 2 e o cascalho de terraço de jusante, existe uma camada de areia (11), de 1,0 m de espessura, que tem como finalidade evitar um deslocamento do maciço nesse contato.

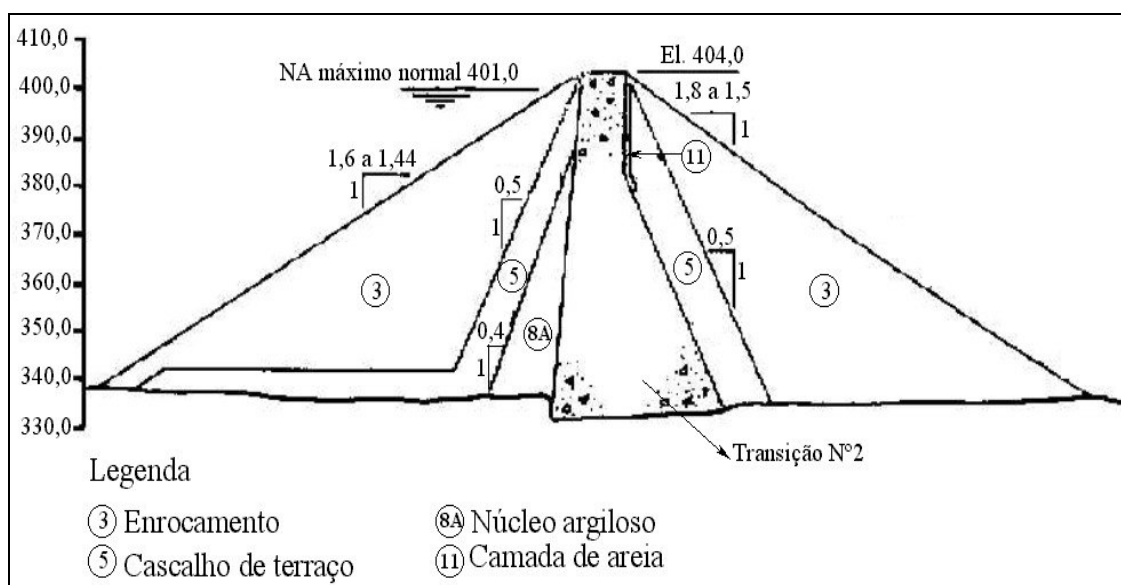


Figura 3.14 – Seção Típica da Transição N<sup>o</sup> 2 – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0

O enrocamento (3) apresenta uma inclinação variável de seus taludes: o de montante entre 1,8H:1V e 1,5H:1V e o de jusante entre 1,6H:1V e 1,44H:1V. A fundação da Transição N<sup>o</sup> 2 foi assentada no topo do derrame 4/3.

### **3.5. – Auscultação por Instrumentação das Barragens da UHE São Simão**

A auscultação por instrumentação geotécnica das barragens da UHE São Simão incluiu piezômetros (Casagrande Modificado, pneumáticos Hall e corda vibrante tipo Maihak), medidores de NA, medidores de recalque IPT, caixas suecas, marcos de superfície, inclinômetros, células de pressão total e medidores de vazão (IESA, 1975; CEMIG, 1977a; CEMIG, 1977b). Estes instrumentos são apresentados resumidamente a seguir.

#### **3.5.1. – Descrição Geral dos Instrumentos Utilizados**

- **Medidores de Vazão**

Os medidores de vazão utilizados foram do tipo dotado de vertedor triangular. No total, 11 medidores de vazão foram instalados em pontos estratégicos das diversas estruturas da barragem, com o intuito de quantificar isoladamente as vazões percoladas pela fundação e aterro. Deste total, apenas dois dispositivos encontram-se localizados na ombreira direita.

- **Marcos de Superfície**

Além dos medidores de recalques distribuídos no interior dos maciços, foram instalados 83 marcos de superfície ao longo da crista e do talude de jusante (35, 29 e 19 marcos nas barragens de terra da margem direita, da margem esquerda e da barragem de terra e enrocamento, respectivamente).

- **Medidores de Recalques Tipo IPT ou de Tubos Telescópicos**

Foram utilizados estes dispositivos para a medição de recalques, em colunas formadas por tubos galvanizados de 2”, 3” e 4” e placas de recalques quadradas de 1,0 m de lado e ¼” de espessura, instaladas em diferentes posições nos aterros ou fundações. Nas margens direita e esquerda existem, respectivamente, 9 e 3 medidores de recalque IPT.

- **Caixas Suecas**

Os medidores instalados são constituídos por um tubo de aço com 101,0 mm de diâmetro por 300,0 mm de altura. Os tubos de carga, descarga e aeração são também de aço e de 400,0 mm de comprimento unitário, sendo que o tubo de carga tem 13,0 mm de diâmetro e os de descarga e aeração têm 19,0 mm de diâmetro. Os tubos de conexão entre as caixas suecas e as casas de leituras externas são de polietileno com diâmetros de 13,0 e 19,0 mm (resistentes a pressões de até  $6,0 \text{ kg/cm}^2$ ). Foram instaladas 12 caixas suecas em 3 seções diferentes, todas localizadas na barragem de terra e enrocamento.

- **Inclinômetros**

Os instrumentos utilizados nas barragens da UHE São Simão foram os modelos 200B, fabricados pela Slope Indicator, com precisão da ordem de 1:1000 (1,0 mm/m). Este instrumento foi instalado na vertical, sendo formado por tubos de alumínio de 1,52 m de comprimento unitário por 76,0 mm de diâmetro, possuindo juntas telescópicas de 30,5 cm de comprimento, que garantem uma separação de 15,0 cm entre os tubos. Na margem direita e esquerda foram instalados, respectivamente, 3 e 4 inclinômetros.

- **Células de Tensão Total**

As células de tensão total empregadas na UHE São Simão utilizaram o princípio de funcionamento pneumático, sendo adotadas transdutores do tipo Hall, com diâmetro da célula de 23,0 cm, capacidade de carga de  $34,2 \text{ kg/cm}^2$ , sensibilidade de 0,005, receptividade de 0,01mm em 300m e acurácia correspondente a 0,25 % da escala completa, podendo atingir até 0,066 % da escala completa. Foram instaladas 7 células de pressão total ao longo dos contatos das estruturas de terra e enrocamento com o paramento de concreto da Transição N<sup>o</sup> 2, formando pares com as células piezométricas, com o objetivo de se determinar às tensões efetivas atuantes. Deste total, 6 células de tensão total encontram-se disposta normalmente à face de concreto, e apenas 1 célula encontra-se disposta horizontalmente contra o aterro.

- **Medidores de NA**

Desde o início da construção da barragem foram instalados 29 medidores de NA dispostos ao longo do pé das barragens de terra de terra e enrocamento a UHE São Simão. Deste total, apenas 1 medidor de NA encontra-se em funcionamento.

- **Piezômetros Casagrande Modificados de Tubo Aberto**

As células dos piezômetros tipo Casagrande utilizados foram constituídos por um tubo de PVC de 50,0 mm de diâmetro interno, apresentando ranhuras de 0,8 mm a cada 4,0 mm ao longo do seu comprimento e uma envoltória de nylon (malha N<sup>o</sup> 30) interna, separando uniformemente duas camadas de areia. A primeira camada de areia, colocada internamente à envoltória de nylon, foi preparada com granulometria compreendida entre as # 8 e 20. A segunda camada de areia, colocada entre a face externa da envoltória de nylon e a face interna do tubo de PVC, apresentava uma granulometria compreendida entre as # 20 e 200. Os tubos de PVC estenderam-se até a superfície do aterro sendo em todo o trecho protegido por dissipadores de recalque.

Os piezômetros do tipo Casagrande Modificado foram distribuídos ao longo de todo o complexo da barragem (barragens de terra, barragem de terra e enrocamento e zonas de transição), instalados à montante e à jusante do núcleo, em filtros e no dreno sanduíche, nas fundações em rocha, em solo residual e em solo transportado e no random compactado de jusante.

- **Piezômetros Pneumáticos Tipo Hall**

As células piezométricas pneumáticas utilizadas na UHE São Simão apresentavam uma proteção em fibra de vidro que a envolve totalmente, tendo no final uma pedra porosa com pressão de borbulhamento de até 15,0 kg/cm<sup>2</sup>. As células foram calibradas para uma temperatura de referência de 16,7° C. Estes instrumentos foram instalados também ao longo de toda a seção da barragem, distribuídos nas fundações, aterros e contatos entre as estruturas de terra e de concreto.

- **Piezômetros Elétricos de Corda Vibrante Tipo Maihak**

Os piezômetros elétricos de corda vibrante utilizados na barragem de terra e enrocamento da UHE São Simão foram do tipo Maihak, com células de 215,0 mm de comprimento e 42,0 mm de diâmetro. O seu diafragma é protegido por uma fina pedra porosa. Foram instalados 6 piezômetros elétricos na seção 9, estaca 2 + 035,0, posicionados no núcleo argiloso da Transição N<sup>o</sup> 2 da barragem de terra e enrocamento da UHE São Simão.

### **3.5.2. – Quantitativo da Instrumentação e Seções Instrumentadas**

A instrumentação geotécnica adotada nas barragens da UHE São Simão durante o período construtivo tinha o objetivo de analisar o comportamento previsto das estruturas e verificar as hipóteses adotadas em projeto. Conforme exposto previamente, esta instrumentação foi bastante diversificada, compreendendo uma auscultação distribuída ao longo de toda a seção do empreendimento (barragens de terra, barragem de terra e enrocamento e transições), em termos da quantificação de recalques, poropressões, tensões totais e efetivas atuantes, posição do NA e medidas das vazões de infiltração pelos aterros e fundações das estruturas.

Com o enchimento do reservatório, constatou-se a necessidade da instalação adicional de piezômetros, medidores de NA, medidores de recalque e medidores de vazão, em função da detecção de importantes infiltrações ocorridas na ombreira esquerda. Foram instalados também medidores de nível d'água ao longo do pé do talude da barragem de terra da margem direita, com o objetivo de fornecer informações complementares às obtidas pelos piezômetros instalados no aterro e na fundação da barragem.

Ao longo de toda a extensão da barragem, foram adotadas 17 seções instrumentadas que representam situações típicas das barragens, sendo 5 seções na barragem de terra da margem direita, 6 seções na barragem de terra da margem esquerda, 4 seções na barragem de terra e enrocamento do leito do rio (margem esquerda) e 2 seções no contato do aterro com as estruturas de concreto das Transições N<sup>o</sup> 1 e N<sup>o</sup> 2.



As seções denominadas como instrumentadas recebem essa identificação por conglomerar diferentes tipos de instrumentos instalados ao longo de sua seção transversal, bem como em estacas adjacentes. Não são identificadas com essa notação as estacas que apresentam instalados apenas marcos de superfície (Figura I.2 do Anexo I). A Tabela 3.7 sintetiza o projeto final da instrumentação geotécnica adotada nas barragens da UHE São Simão, indicando os quantitativos globais dos instrumentos utilizados nas diferentes seções, exceto para os marcos de superfície.

As Figuras 3.15 e 3.16, por outro lado, indicam a localização em planta de todos os instrumentos instalados na barragem de terra da margem direita (BTMD) e na barragem de terra da margem esquerda (BTME) e na barragem de terra e enrocamento da UHE São Simão, respectivamente. No Anexo I, são apresentadas todas as seções instrumentadas das barragens que constituem a UHE São Simão, na Figura I.1 do Anexo I, e no restante das figuras as seções com os instrumentos.

Tabela 3.7a – Quantitativo da Instrumentação - Barragem de Terra / Margem Direita

Instrumentos – Seções	1	2	3	4	5	Total
Piezômetros Casagrande	02	03	05	-	05	15
Piezômetros Pneumáticos Hall	-	-	16	-	-	16
Medidores de Recalque IPT	02	06	06	04	03	21
Inclinômetros	-	01	02	-	-	3
Marcos de Superfície	35					35

Tabela 3.7b – Quantitativo da Instrumentação - Barragem de Terra / Margem Esquerda

Instrumentos - Seções	0	1	2	3	4	5	Total
Piezômetros Casagrande	04	04	-	-	-	02	10
Piezômetros Pneumáticos Hall	-	16	-	-	-	-	16
Medidores de Recalque IPT	-	06	-	-	-	-	6
Inclinômetros	-	02	-	-	-	-	2
Medidores de NA	01	-	04	04	04	-	13
Marcos de Superfície	29						29

Tabela 3.7c – Quantitativo da Instrumentação - Barragem de Terra e Enrocamento /  
Leito do Rio (ME)

Instrumentos - Seções	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8A</b>	<b>Total</b>
Piezômetros Casagrande	06	04	02	-	12
Piezômetros Pneumáticos Hall	-	-	15	-	15
Medidores de Recalque IPT	03	-	-	-	3
Inclinômetros	-	-	01	01	2
Caixas Suecas	03	04	05	-	12
Marcos de Superfície	19				19

Tabela 3.7d – Quantitativo da Instrumentação - Transições N<sup>o</sup> 1 (MD) e N<sup>o</sup> 2 (ME)

Instrumentos - Seções	<b>6*</b>	<b>9**</b>	<b>Total</b>
Piezômetros Casagrande	01	-	1
Piezômetros Pneumáticos Hall	08	12	20
Piezômetros Maihak	-	06	6
Células de Tensão Total	-	07	7

\* Contato Barragem de Terra (MD)/ Transição N<sup>o</sup>1; \*\*Contato Barragem de Terra e Enrocamento (ME) / Transição N<sup>o</sup>2

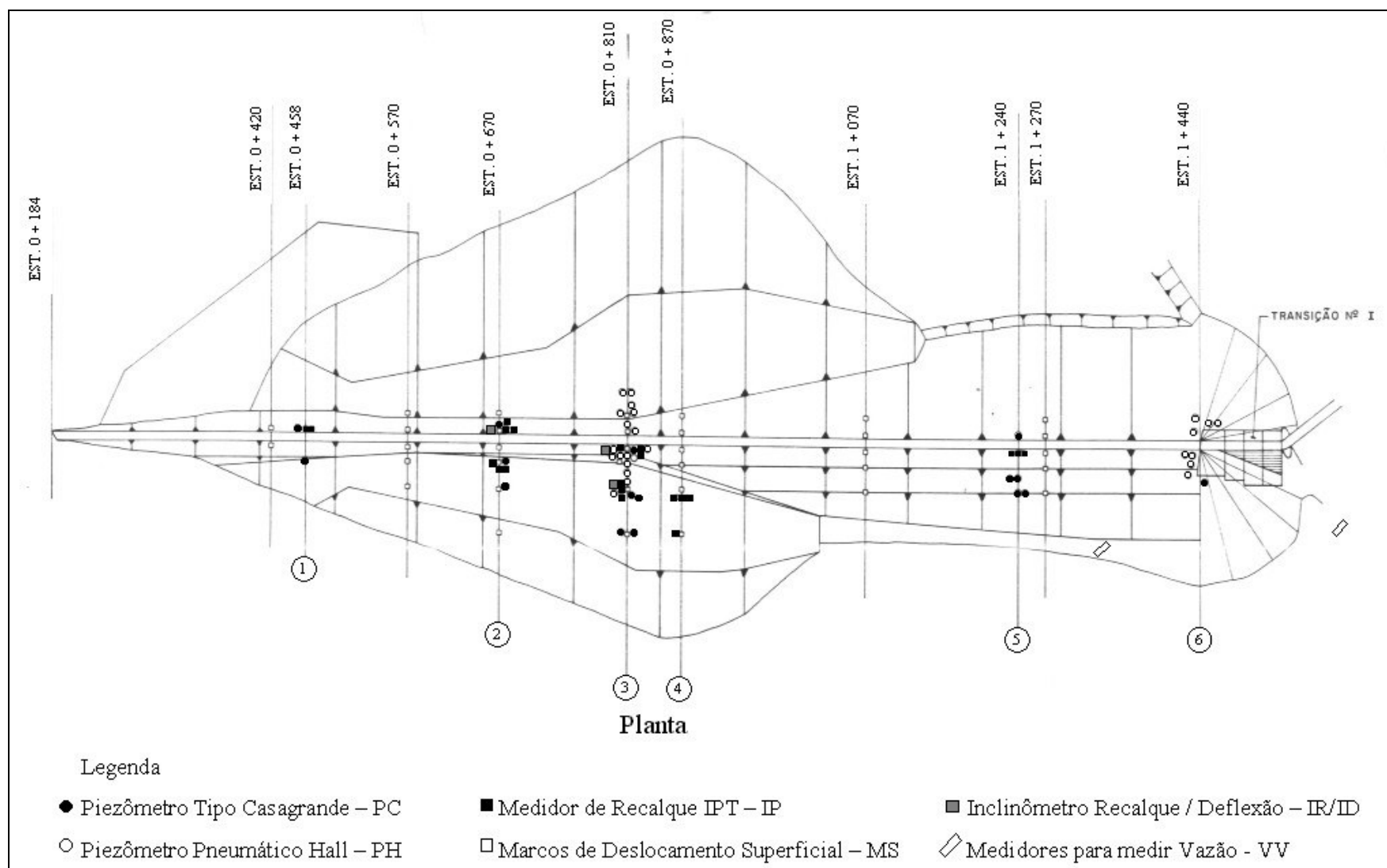


Figura 3.15 – Planta da Instrumentação Instalada na Barragem de Terra da Margem Direita (BD) da UHE São Simão

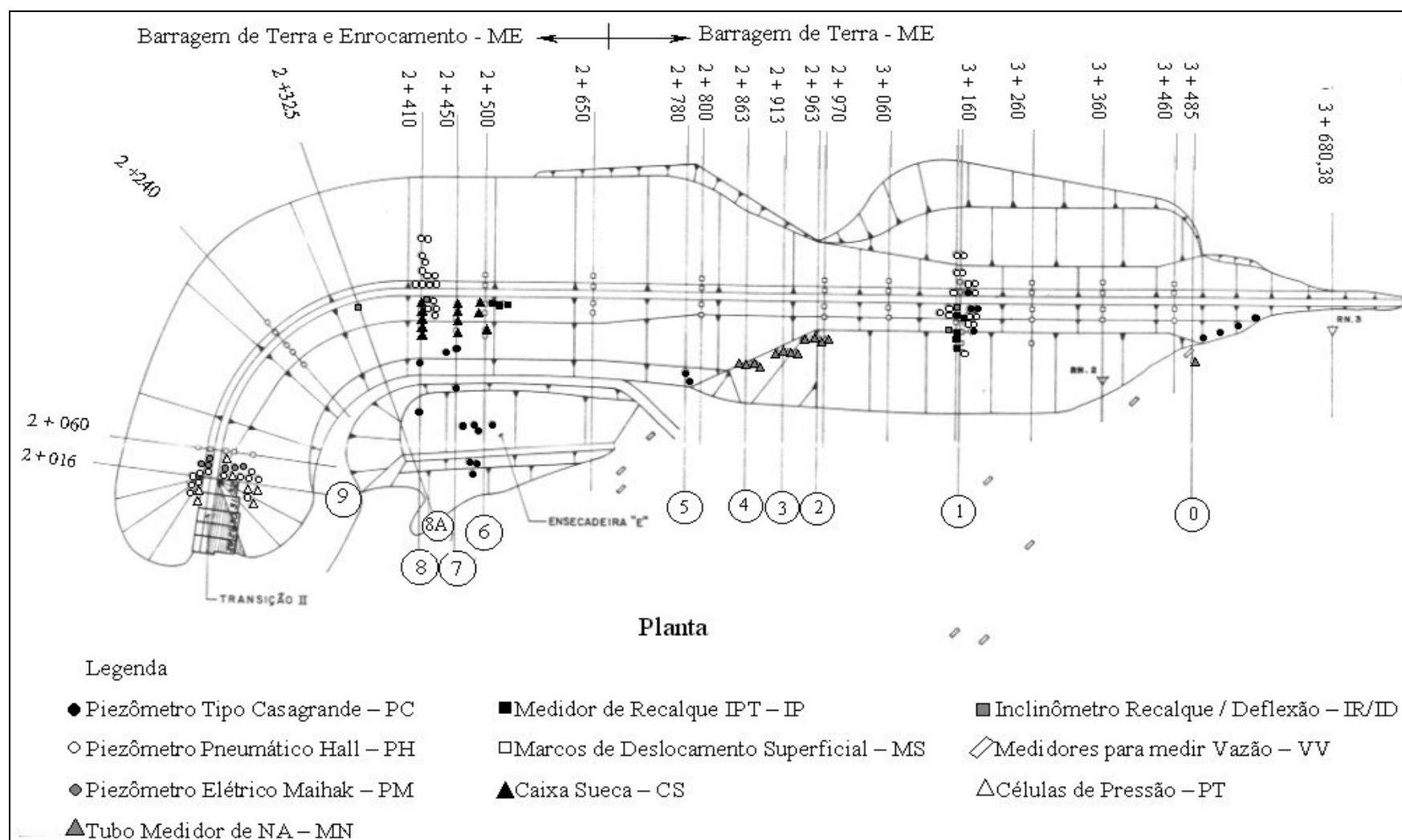


Figura 3.16 – Planta da Instrumentação Instalada na Barragem de Terra e na Barragem de Terra e Enrocamento da Margem da UHE São Simão

### **3.6. – Valores Limites e Valores de Controle Propostos para a Instrumentação das Barragens da UHE São Simão**

Os valores limites e de controle do conjunto das grandezas medidas na auscultação por instrumentação de uma barragem são estabelecidos por hipóteses de projeto em função da experiência prévia e/ou eventuais análises do comportamento anterior da mesma (Kuperman et al., 2005b). Caso os valores medidos pela instrumentação ultrapassem o valor de controle previsto, estudos específicos devem ser implementados para a avaliação destes dados e dos potenciais problemas que poderão causar às estruturas.

Uma vez que os valores limites constituem parâmetros estabelecidos para as condições limites de carregamento, os mesmos não podem ser superados em hipótese nenhuma. Caso isto ocorra, a segurança da barragem estará formalmente comprometida, tornando-se necessários estudos emergenciais para a avaliação global do problema e para a imediata adoção de medidas corretivas.

Os valores de controle e limites adotados para as barragens da UHE São Simão constavam do Relatório SS-RC-097 (Relatório Final do Projeto São Simão – Estruturas de Terra e Enrocamento). Infelizmente estes dados foram perdidos, uma vez que este relatório não pôde ser recuperado, apesar do exaustivo trabalho de triagem e pesquisa feito junto aos possíveis acervos técnicos que poderiam conte-lo, incluindo-se as fontes do GEDOC (Gerenciamento Eletrônico de Documentos) e da biblioteca do GE/SM (Gerência de Segurança de Barragem e Manutenção Civil) da CEMIG. Entretanto, alguns destes dados foram citados em outros relatórios disponíveis e puderam, assim, ser recuperados. Em trabalho posterior Silveira e Ávila (1995) propuseram novos valores para estes limites, os quais serão comparados nesta dissertação.

#### **3.6.1. – Valores de Projeto para a Piezometria**

Para a obtenção dos valores de projeto das elevações piezométricas, estabeleceu-se uma rede de fluxo bastante conservadora, considerando-se o conjunto aterro-fundação como sendo homogêneo e isotrópico. Para o trecho da barragem junto à Transição N<sup>o</sup> 2, a rede

de fluxo foi traçada de forma ainda mais simplificada, admitindo-se uma seção bidimensional e aterro homogêneo e isotrópico, desconsiderando-se a influência do trecho impermeável de montante, constituído de cascalho de terraço. Outro ponto de relevância adotado nestes estudos foi admitir a reduzida influência que pequenas elevações dos níveis piezométricos à montante do dreno acarretariam à estabilidade do maciço, desde que o piezômetro instalado no sistema drenante permanecesse seco. Os mesmos critérios adotados para a zona de Transição N<sup>o</sup> 2 também foram aplicados para a região do aterro próxima a Transição N<sup>o</sup> 1.

Para o caso da barragem de terra da margem esquerda, o fator de segurança com relação ao escorregamento obtido para a superfície de ruptura passando pela camada da fundação (contato dos derrames 5 e 6), para as condições de subpressões previstas, foi de 2,02. Entretanto, 2,5 anos após o enchimento do reservatório observou-se que para as condições de subpressões medidas na época, sensivelmente acima das previstas em projeto, o fator de segurança com relação ao escorregamento foi de 1,8.

As Tabelas 3.8a e 3.8b apresentam os valores de controle (projeto) e limite para a rede de piezometria instalada nas barragens das margens direita e esquerda da UHE São Simão, respectivamente.

Tabela 3.8a – Valores Limites e de Controle: Piezometria da BTMD

Seção Instrumentada	Nº Piezômetro	Cota de Instalação (m)	Elevação Piezométrica de Projeto (m) (Controle)	Elevação Piezométrica Limite (m)	
				Projeto	Silveira e Ávila (1995)
Seção 1 Est. 0 + 460,0	PC101	389,25	399,0	399,0	399,0
	PC102	389,29	396,0	396,0	397,0
Seção 2 Est. 0 + 670,0	PC201	374,50	398,5	398,5	396,0
	PC202	374,50	395,5	395,5	393,0
	PC203	374,50	391,5	391,5	390,0
Seção 3 Est. 0 + 810,0	PC301	363,55	395,5	395,5	393,6
	PC303	363,30	389,0	389,0	385,5
	PC303	363,30	381,5	381,5	378,0
	PC304	388,45	Seco	Seco	Não indicado
	PC305	382,75	Seco	Seco	Não indicado
	PH301	358,13	399,5	399,5	401,0
	PH302	363,11	400,0	400,0	401,0
	PH303	358,08	398,0	398,0	397,0
	PH304	362,20	398,0	398,0	395,0
	PH305	358,11	395,5	395,5	389,0

seção 3 Est. 0 + 810,0 (cont.)	PH306	362,20	395,5	395,5	393,0
	PH307	358,11	394,0	394,0	386,0
	PH308	362,95	389,0	389,0	386,0
	PH309	367,00	397,5	397,5	Não indicado
	PH310	367,00	394,0	394,0	391,0
	PH311	370,20	399,0	399,0	401,0
	PH312	370,80	392,5	392,5	385,0
	PH313	374,95	397,0	397,0	Não indicado
	PH314	374,98	395,0	395,0	395,0
	PH315	377,91	391,0	391,0	385,0
	PH316	385,00	396,0	396,0	395,0
Seção 5 Est. 1 + 240,0	PC501	341,61	371,0	382,0	385,0
	PC502	340,46	341,0 a 358,0	358,0	355,0
	PC503	340,77	341,0 a 358,0	358,0	355,0
	PC504	359,65	Seco	Seco	360,0
	PC505	359,25	Seco	Seco	360,0
Seção 6 Estaca a 10m da Transição N <sup>o</sup> 1	PH602	368,00	382,4	384,0	Não indicado
	PH606	368,01	377,2	382,0	Não indicado
	PH609	388,66	394,0	395,0	Não indicado
	PH612	385,00	386,8	388,0	Não indicado
Seção 6 Contato com a Transição N <sup>o</sup> 1	PC601	368,00	Seco	Seco	Não indicado
	PH603	368,01	379,4	384,0	Não indicado
	PH605	368,20	376,4	383,0	Não indicado
	PH608	388,70	394,0	397,5	Não indicado
	PH611	385,00	387,0	388,0	Não indicado

Tabela 3.8b – Valores Limites e de Controle: Piezometria da BTME

Seção Instrumentada	Nº Piezômetro	Cota de Instalação (m)	Elevação Piezométrica de Projeto (m) (Controle)	Elevação Piezométrica Limite (m)	
				Projeto	Silveira e Ávila (1995)
Seção 0 Est. 3 + 485,0	PC001	392,09	Não indicado	Não indicado	Não indicado
	PC002	388,93	Não indicado	Não indicado	Não indicado
	PC003	384,98	Não indicado	Não indicado	Não indicado
	PC004	380,75	Não indicado	Não indicado	Não indicado
Seção 1 Est. 3 + 160,0	PH101	354,71	399,5	399,5	401,0
	PH102	352,64	399,5	399,5	401,0
	PH103	352,63	394,0	394,0	391,0
	PH104	352,66	381,0	386,0	385,0
	PH105	354,13	371,0	385,0	383,0
	PH106	351,82	369,0	384,0	380,0
	PH107	352,31	368,5	384,0	380,0
	PH108	354,39	368,5	381,0	379,0
	PH109	363,00	384,5	387,0	385,5
	PH110	364,00	369,0	372,5	380,0
	PH111	365,45	399,0	391,0	375,0
	PH112	358,07	368,5	384,0	375,0
	PH113	370,00	388,5	388,5	390,0
	PH114	370,00	376,0	381,0	382,0
	PH115	365,00	368,5	370,0	375,0
	PH116	380,00	388,0	388,0	390,0
	PC101	355,65	380,0	386,0	383,5
	PC102	354,56	370,0	385,0	Não indicado
	PC103	353,25	368,5	382,0	379,0
	PC104	361,18	372,0	378,0	Não indicado

Seção 5 Est. 2 + 780,0	PC501	341,10	Seco	342,0	Não indicado
	PC502	338,30	341,0	344,0	342,0
Seção 6 Est. 2 + 500,0	PC601	293,27	334,0	334,0	342,0
	PC602	281,48	334,0	334,0	343,0
	PC603	288,66	334,0	334,0	342,0
	PC604	279,04	334,0	334,0	343,0
	PC605	310,04	334,0	334,0	342,0
	PC606	309,59	334,0	334,0	342,0
Seção 7 Est. 2 + 460	PC701	280,25	334,5	334,5	342,0
	PC702	285,25	334,5	334,5	342,0
	PC703	302,62	334,5	334,5	342,0
	PC704	285,40	334,0	334,0	342,0
Seção 8 Est. 2 + 410	PH801	271,00	392,0	392,0	380,0
	PH802	271,00	375,0	375,0	380,0
	PH803	270,50	353,0	374,0	380,0
	PH804	282,34	353,0	364,0	360,0
	PH805	286,39	335,0	335,0	345,0
	PH806	290,00	395,0	395,0	385,0
	PH807	290,00	370,0	375,0	380,0
	PH808	310,01	385,0	386,0	395,0
	PH809	310,00	363,0	363,0	360,0
	PH810	310,04	342,0	342,0	350,0
	PH811	329,69	380,0	385,0	390,0
	PH812	329,74	353,0	353,0	350,0
	PH813	350,00	382,0	382,0	Não indicado
	PH814	350,00	363,0	363,0	390,0
	PH815	373,90	391,0	391,0	390,0
	PC801	312,32	334,5	334,5	342,0
	PC803	322,87	334,0	334,0	342,0
Seção 9 Est. 2 + 016	PM901	357,00	390,8	396,5	Não indicado
	PM902	357,00	373,2	378,5	Não indicado
	PM903	357,00	364,0	364,0	Não indicado
	PM904	357,00	360,0	360,0	Não indicado
	PM905	374,04	396,4	401,0	Não indicado
	PM906	373,99	388,0	395,0	Não indicado
	PH910	354,34	366,5	366,5	Não indicado
	PH911	354,40	394,4	401,0	Não indicado
	PH912	354,34	382,6	389,0	Não indicado
	PH913	357,00	390,8	396,5	Não indicado
	PH914	374,04	396,4	401,0	Não indicado
	PH915	373,99	388,0	395,0	Não indicado
	PH916	374,03	378,8	383,0	Não indicado
	PH917	374,04	394,5	394,5	Não indicado
	PH918	374,01	385,0	389,0	Não indicado
	PH919	383,92	398,8	401,0	Não indicado
	PH920	383,77	394,5	394,5	Não indicado
	PH921	360,00	381,2	381,2	Não indicado

Silveira e Ávila (1995), procederam a uma retro-análise do comportamento da piezometria da barragem. Estes autores consideraram uma rede de fluxo em regime permanente, para a condição de nível máximo do reservatório. Os valores limites foram estabelecidos admitindo-se a hipótese de uma linha freática sub-horizontal, traçada do



limite de montante do núcleo até o seu limite de jusante, que é então extrapolada acompanhando o filtro chaminé entre o núcleo e as transições de jusante. As linhas equipotenciais foram admitidas como sendo paralelas ao limite de montante do núcleo. Como esses valores foram muito superiores aos observados pelos piezômetros naquela ocasião adotaram-se valores mais baixos, correspondendo aos valores máximos obtidos nas leituras dos instrumentos até aquela época, acrescidos de um valor residual (“folga”). Assim os valores limites estabelecidos por Silveira e Ávila (1995), para esta situação, estão apresentados também nas Tabelas 3.8.

### 3.6.2. – Valores de Projeto para Deslocamentos Verticais e Horizontais

Os valores dos recalques das fundações da barragem de terra da margem direita, previstos em projeto, estão indicados na Tabela 3.9. Os valores indicados entre parênteses referem-se, exclusivamente, à magnitude dos recalques estimados ao longo do perfil geotécnico correspondente às camadas de solos transportados. Foi prevista ainda uma sobre-elevação da crista de 15,0 cm na parte alta da margem direita, assente sobre espesso depósito de solos transportados, de forma a compensar os recalques excessivos observados ao final do período de enchimento do reservatório. No caso da barragem de terra e enrocamento, o recalque de fundação máximo previsto, ao longo do seu eixo, foi de 50,0 cm.

Tabela 3.9 – Valores dos Recalques Previstos – Fundações da BTMD

Recalques da Fundação			
Seção Instrumentada	Recalques Previstos (cm)		
	Montante	Eixo	Jusante
Seção 1 Est. 0 + 460,0	-	57,0 (45,0)	-
Seção 2 Est. 0 + 670,0	90,0 (68,0)	81,0 (33,0)	69,0 (53,0)
Seção 3 Est. 0 + 810,0	91,0 (48,0)	60,0 (0,0)	74,0 (56,0)
Seção 4 Est. 0 + 870,0	89,0 (60,0)	9,0 (0,0)	63,0 (52,0)

\* Valores entre (): Recalques da camada de solo transportado

Os valores dos recalques estimados em projeto, para a crista das barragens da margem direita e esquerda, estão indicados nas Tabelas 3.10 e 3.11, respectivamente. O valor limite de projeto para o recalque diferencial máximo, de acordo com as especificações de projeto, foi de 1:100.

Tabela 3.10 – Valores dos Recalques Previstos – Crista da BTMD

Seção Instrumentada	Recalques Previstos (cm)
Est. 0 + 420,0	19
Est. 0 + 560,0	22
Est. 0 + 670,0	24
Est. 0 + 810,0	27
Est. 0 + 870,0	29
Est. 1 + 070,0	30
Est. 1 + 270,0	30

Tabela 3.11 – Valores dos Recalques Previstos – Crista da BTME

Seção Instrumentada	Recalques Previstos (cm)
Est. 2 + 060,0	32,0
Est. 2 + 240,0	46,0
Est. 2 + 500,0	50,0
Est. 2 + 650,0	45,0
Est. 2 + 800,0	40,0
Est. 2 + 970,0	35,0
Est. 3 + 060,0	32,0
Est. 3 + 160,0	29,0
Est. 3 + 260,0	26,0
Est. 3 + 360,0	23,0
Est. 3 + 460,0	19,0

Silveira e Ávila (1995) estipularam valores de controle para alguns marcos de superfícies, conforme mostrado nas Tabelas 3.12 e 3.13. Esses valores foram estabelecidos a partir da hipótese de um acréscimo de 10% em relação aos valores

máximos obtidos das leituras até aquela época, admitindo a premissa complementar de que estes recalques já se encontravam praticamente estabilizados.

Tabela 3.12 – Valores de Controle – Marcos Superficiais – Jusante do Eixo – BTMD  
(Silveira e Ávila, 1995)

Marcos Superficial	Valores de Controle (cm)
MS023	20,1
MS024	12,6
MS025	8,4
MS026	1,2
MS026	1,2
MS028	4,3
MS029	4,7

Tabela 3.13 – Valores de Controle – Marcos Superficiais – Montante do Eixo – BTME  
(Silveira e Ávila, 1995)

Marcos Superficial	Valores de Controle (cm)
MS048	11,4
MS043	14,5
MS038	15,3
MS033	11,1
MS029	7,4
MS012	3,7
MS011	3,7
MS010	5,4
MS009	4,2
MS008	1,3
MS007	2,1

Adicionalmente, este critério foi estendido para a determinação dos valores de controle dos deslocamentos horizontais, obtidos através dos inclinômetros, ou seja, valores máximos observados acrescidos de 10% (Tabela 3.14).

Tabela 3.14 – Valores de Controle – Inclínômetros (Silveira e Ávila, 1995)

Estrutura	Instrumento	Montante (cm)	Jusante (cm)	Esquerda (cm)	Direita (cm)
Maciço Direito	ID100	-	-12,09	+6,40	-
	ID200	+2,62	-2,84	+3,61	-8,25
	ID300	-	-11,27	+1,04	-3,97
Maciço Esquerdo	ID100	+2,25	-5,23	+4,78	-5,64
	ID200	+1,85	-7,94	+2,57	-1,35
	ID300	-	-34,70	+15,20	-3,16
	ID400	-	-18,44	+13,17	-

### 3.6.3. – Valores de Projeto para Tensões Totais

As células de tensões totais são comumente instaladas de forma estratégica junto aos piezômetros, permitindo, assim, a aquisição dos valores tanto das tensões totais como das poropressões e a computação dos valores das tensões efetivas resultantes, particularmente em zonas de interface aterro – estruturas de concreto.

Os critérios são baseados comumente em valores limites para a relação  $\sigma_h/u$ , onde  $\sigma_h$  representa a tensão total horizontal atuante e  $u$ , a poropressão correspondente. No caso do projeto das barragens da UHE São Simão, os critérios adotados foram os seguintes:

- Nível normal de tensões:

$$\frac{\sigma_h}{u} \geq 1,30 \quad (3.1)$$

- Nível de alerta de tensões:

$$1,30 \leq \frac{\sigma_h}{u} \leq 1,15 \quad (3.2)$$

- Nível de emergência de tensões:

$$\frac{\sigma_h}{u} \leq 1,15 \quad (3.3)$$

### 3.6.4. – Valores de Projeto para Vazões de Drenagem

Os valores de controle para as vazões de drenagem estão apresentados na Tabela 3.15 e foram estipulados com base em acréscimos de 30 % em relação aos valores observados na época. A estimativa de projeto para a vazão do medidor localizado na Estaca 1 + 330,0 foi de 0,56 l/s e, para o medidor instalado no encontro da Transição N<sup>o</sup> 1 e o vertedor, de 0,6 l/s.

Tabela 3.15 – Vazões Previstas - Silveira e Ávila (1995)

Estrutura	Medidor de Vazão	Vazão de Controle (l/s)
Maciço Direito	VV001	25,5
	VV002	3,4
Maciço Esquerdo	VV004	9,3
	VV005	8,3
	VV006	11,3
	VV007	5,9
	VV009	1,0
	VV010	29,2
	VV011	49,8
	VV012	1,0
	VV013	10,3

## **Capítulo 4**

### **Análise dos Dados de Instrumentação das Barragens da UHE São Simão**

#### **Parte I – Deslocamentos Verticais e Horizontais**

##### **4.1. – Introdução**

Neste capítulo, são descritos os procedimentos de aquisição e interpretação dos dados de instrumentação das barragens da UHE São Simão, ao longo de um período que se estende até 25 anos de sua plena operação. Estes registros são confrontados com os valores de referência (valores limites e de controle) prescritos em projeto, de forma a se estabelecer comparações entre comportamentos reais e previstos para o conjunto das estruturas auscultadas. Estes estudos abrangem ainda uma interpretação detalhada dos registros e a sua evolução ao longo do tempo, a exemplo de trabalhos anteriores em períodos mais limitados (IESA, 1980b; CEMIG, 1986; CEMIG, 1994; Silveira, 1995).

As análises são divididas em quantificação dos deslocamentos verticais e horizontais, poropressões, tensões totais e vazões de infiltração, de acordo com a natureza, quantidade, distribuição e objetivos previstos para a instrumentação instalada. As seções instrumentadas da barragem de terra da margem direita e das barragens de terra e de terra e enrocamento da margem esquerda da UHE São Simão estão dadas no Anexo I. Os gráficos correspondentes às variações de todas as grandezas medidas ao longo do tempo (elaborados através do Programa MONITOR), até a data final das leituras (junho/2003), são apresentados nos Anexos II ao Anexo XV.

##### **4.2. – Deslocamentos Verticais ou Recalques**

Os recalques da fundação e dos aterros foram registrados por marcos de superfície, medidores de recalque tipo IPT, caixas suecas e inclinômetros, instalados em diferentes seções e zonas das barragens. A maior parte destes instrumentos ainda se encontra em perfeito funcionamento, com exceção das caixas suecas, que foram desativadas desde 1985, aproximadamente.

#### 4.2.1. – Marcos de Superfície

Nas estruturas de terra e enrocamento da UHE São Simão, foram instalados 84 marcos de superfície com o objetivo básico de se medir os recalques em várias seções da barragem. Atualmente, faz-se apenas o monitoramento dos marcos de superfície instalados na crista da barragem, tendo sido paralisadas as leituras relativas aos marcos instalados nos taludes de jusante desde 1995, a partir de recomendação feita pela comissão responsável pela inspeção periódica destas barragens. A aquisição das medidas é feita em períodos semestrais; os dados são coletados por uma equipe que faz o levantamento topográfico dos marcos instalados nas cristas das barragens.

- **Barragem de Terra da Margem Direita (BTMD)**

Na barragem de terra da ombreira direita, foram instalados 35 marcos de superfície ao longo da crista e dos taludes de montante e jusante. Deste total, apenas 14 marcos de superfície ainda se encontram ativos, todos instalados na crista. Nesta ombreira, o tratamento dos dados indica que os recalques ocorreram quase que totalmente durante o primeiro enchimento do reservatório (cerca de 90 % dos recalques totais medidos até maio/2003). A Tabela 4.1 apresenta os valores de recalques por fases, correspondentes às etapas de enchimento e pós-enchimento do reservatório, dos 14 marcos de superfície ativos

Tabela 4.1 – Recalques por Fases – Marcos Superficiais da BTMD – Crista

Marco Superficial			Recalques por Fases (cm)				Recalque Total (cm)
			Enchimento	% de Recalque	Pós-Enchimento	% de Recalque	
Jusante	Est. 0 + 420,0	MS016*	18,299	94,81	1,002	5,19	19,301
	Est. 0 + 570,0	MS017	10,098	90,97	1,002	9,03	11,100
	Est. 0 + 670,0	MS018	6,101	83,59	1,198	16,41	7,299
	Est. 0 + 810,0	MS019	0,101	8,42	1,099	91,58	1,200
	Est. 0 + 870,0	MS020	0,900	36,01	1,599	63,99	2,499
	Est. 1 + 070,0	MS021	1,701	38,67	2,698	61,33	4,399
	Est. 1 + 440,0	MS022	1,600	34,79	2,999	65,21	4,599

Montante	Est. 0 + 420,0	MS023	17,301	94,55	0,998	5,45	18,299
	Est. 0 + 570,0	MS24	9,900	85,35	1,700	14,66	11,599
	Est. 0 + 670,0	MS025	6,400	84,22	1,199	15,78	7,599
	Est. 0 + 810,0	MS026	0,000	0,00	1,299	100,00	1,299
	Est. 0 + 870,0	MS027	0,900	37,48	1,501	62,52	2,401
	Est. 1 + 070,0	MS028	1,602	37,26	2,697	62,74	4,299
	Est. 1 + 440,0	MS029	1,500	33,33	3,001	66,67	4,501

\* MSXXX: MS - Marco de Superfície / XXX - N<sup>o</sup> do Instrumento

Os valores atuais demonstram que os recalques da barragem estão praticamente estabilizados (Figuras II.1 e II.2 do Anexo II), observando-se pequenos incrementos de recalque após a fase de enchimento do reservatório (média de 0,115 cm/ano). A magnitude destes recalques é compatível com a geometria da barragem e com as características geotécnicas dos materiais empregados em sua construção.

A comparação entre os valores medidos dos recalques, ao longo do eixo da barragem, está mostrada na Figura 4.1 (valores até maio/2003), observando-se uma perfeita similaridade dos perfis de recalques medidos tanto à montante como à jusante do eixo da barragem. Tal comportamento evidencia a não geração de esforços de tração ao longo da crista da barragem.

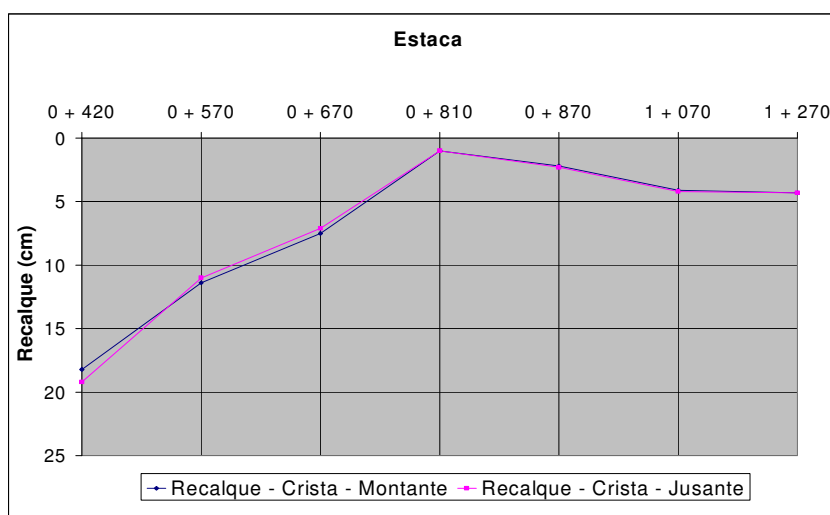


Figura 4.1 – Perfil dos Recalques Medidos pelos Marcos de Superfície Instalados na Crista da BTMD (até maio/2003)



Os maiores valores ocorreram entre as estacas 0 + 420,0 a 0 + 670,0, uma vez que, nesta zona, quase toda a barragem encontrava-se apoiada em solo transportado, com espessuras médias entre 4,0 a 6,0 m , elevados graus de porosidade (55 % a 65 %) e de compressibilidade (0,5 a 0,7). A camada de solo transportado estende-se até, aproximadamente, a estaca 0 + 900,0, sendo que, a partir da estaca 0 + 500,0, este solo não ocorre mais na região central da barragem, mas apenas nas áreas de fundação das bermas laterais de equilíbrio. A elevada magnitude dos recalques está, provavelmente, associada ao processo de colapso deste solo durante o período de enchimento do reservatório. A Tabela 4.2 apresenta a comparação entre estes valores medidos (até maio/2003) e os valores previstos de recalques em projeto (Tabela 3.10).

Tabela 4.2 – Recalques Medidos x Recalques Previstos - Marcos Superficiais da BTMD

Marco Superficial			Recalque Previsto em Projeto (cm)	Recalques Medidos (cm)
Jusante	Est. 0 + 420,0	MS016	19,0	19,301
	Est. 0 + 570,0	MS017	22,0	11,100
	Est. 0 + 670,0	MS018	24,0	7,299
	Est. 0 + 810,0	MS019	27,0	1,200
	Est. 0 + 870,0	MS020	29,0	2,499
	Est. 1 + 070,0	MS021	30,0	4,399
	Est. 1 + 440,0	MS022	30,0	4,599
Montante	Est. 0 + 420,0	MS023	19,0	18,299
	Est. 0 + 570,0	MS024	22,0	11,599
	Est. 0 + 670,0	MS025	24,0	7,599
	Est. 0 + 810,0	MS026	27,0	1,299
	Est. 0 + 870,0	MS027	29,0	2,401
	Est. 1 + 070,0	MS028	30,0	4,299
	Est. 1 + 440,0	MS029	30,0	4,501

Em geral, os valores observados estão bastante distantes dos valores estimados, à exceção dos valores obtidos para os marcos instalados na estaca 0 + 420,0, que indicam valores muito próximos (sinal de alerta) ou mesmo superiores (exigindo, portanto, monitoramento mais intensivo e seu potencial de impacto sobre a segurança da barragem) aos valores previstos em projeto.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os recalques diferenciais, longitudinais e transversais, medidos pelos marcos instalados na crista da barragem de terra da margem direita; os valores máximos foram obtidos para as seções situadas entre os marcos 016 / 017 e 023 / 016, respectivamente.

Tabela 4.3 – Recalques Diferenciais Longitudinais – Marcos Superficiais da BTMD

Marco Superficial		Distâncias entre Marcos (m)	Recalque Diferencial Longitudinal entre Estacas	
Jusante	MS016 / MS017	150,0	0,5470 (mm/m)	1:1829
	MS017 / MS018	100,0	0,3801	1:2631
	MS018 / MS019	140,0	0,4360	1:2295
	MS019 / MS020	60,0	0,2160	1:4618
	MS020 / MS021	200,0	0,0950	1:10526
	MS021 / MS022	200,0	0,0100	1:1000000
Montante	MS023 / MS024	150,0	0,447	1:2238
	MS024 / MS025	100,0	0,4000	1:2500
	MS025 / MS026	140,0	0,4500	1:2222
	MS026 / MS027	60,0	0,1840	1:5445
	MS027 / MS028	200,0	0,0950	1:10537
	MS028 / MS029	200,0	0,0101	1:99010

Tabela 4.4 – Recalques Diferenciais Transversais – Marcos Superficiais da BTMD

Marco Superficial		Distância entre Estacas (m)	Recalque Diferencial Transversal entre Estacas	
MS023 / MS016	Est. 0 + 420,0	10,0	1,002 (mm/m)	1:998
MS024 / MS017	Est. 0 + 570,0	10,0	0,499	1:2004
MS025 / MS018	Est. 0 + 670,0	10,0	0,300	1:3333
MS026 / MS019	Est. 0 + 810,0	10,0	0,099	1:10101
MS027 / MS020	Est. 0 + 870,0	10,0	0,098	1:10204
MS028 / MS021	Est. 1 + 1070,0	10,0	0,100	1:10000
MS029 / MS022	Est. 1 + 440,0	10,0	0,098	1:10204

Os valores obtidos foram muito reduzidos e estão muito longe dos valores limites especificados em projeto (distorção angular máxima de 1:100 e recalque diferencial máximo de 5,0 mm/m, conforme recomendação de Libby et al. ,1993). Estes dados, mais uma vez, estão bastante consistentes com a geometria da barragem e com as características pouco deformáveis dos materiais de construção utilizados.

- **Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda**

Os marcos de superfície, instalados na barragem de terra e na barragem de terra e enrocamento localizadas na margem esquerda do empreendimento, somaram um total de 48 marcos, atualmente, 21 deles encontram-se ativos. A Tabela 4.5 apresenta os valores de recalques por fases, correspondentes às etapas de enchimento e pós-enchimento do reservatório, dos 21 marcos de superfície atualmente ativos.

Tabela 4.5 – Recalques por Fases – Marcos Superficiais das Barragens de Terra e de Terra e Enrocamento – Crista

Marco Superficial			Recalques por Fase (cm)				Recalque Total (cm)
			Enchimento	% de Recalque	Pós-Enchimento	% de Recalque	
Montante	Est. 3 + 460,0	MS007	0,501	27,85	1,298	72,15	1,799
	Est. 3 + 360,0	MS008	0,098	6,12	1,503	93,88	1,601
	Est. 3 + 280,0	MS009	1,700	38,64	2,700	61,36	4,400
	Est. 3 + 160,0	MS010	2,398	42,81	3,203	57,19	5,601
	Est. 3 + 060,0	MS011	1,099	28,19	2,800	71,81	3,899
	Est. 2 + 970,0	MS012	1,199	32,40	2,502	67,60	3,701
	Est. 2 + 800,0	MS029	2,799	37,83	4,600	62,17	7,399
	Est. 2 + 650,0	MS033	5,399	50,46	5,301	49,54	10,700
	Est. 2 + 500,0	MS038	8,200	55,79	6,499	44,21	14,699
	Est. 2 + 240,0	MS043	6,598	47,13	7,402	52,87	14,000
Jusante	Est. 2 + 060,0	MS048	4,599	40,35	6,800	59,65	11,399
	Est. 3 + 460,0	MS013	0,598	29,89	1,403	70,11	2,001
	Est. 3 + 360,0	MS014	1,102	42,40	1,497	57,60	2,599
	Est. 3 + 280,0	MS015	1,501	41,71	2,098	58,29	3,599
	Est. 3 + 060,0	MS017	1,502	40,59	2,198	59,41	3,700
	Est. 2 + 970,0	MS018	1,199	37,47	2,001	62,53	3,200
	Est. 2 + 800,0	MS028	2,600	36,12	4,599	63,88	7,199
	Est. 2 + 650,0	MS032	4,999	49,01	5,200	50,99	10,199
	Est. 2 + 500,0	MS037	8,499	56,66	6,500	43,34	14,999
	Est. 2 + 240,0	MS042	5,600	52,83	5,001	47,17	10,601
	Est. 2 + 060,0	MS047	3,701	39,79	5,600	60,21	9,301

Constata-se que os valores dos recalques medidos durante o período de enchimento do reservatório foram, no máximo, iguais a 60 % dos recalques totais (maio/2003), para os marcos localizados na região do antigo leito do rio (032, 033, 037, 038, 042, 043, 047 e 048). Para os demais marcos, os recalques variaram de 55 a 94 % dos recalques totais.

Estes resultados evidenciam um processo de não estabilização dos recalques, que se encontram ainda em franco desenvolvimento. Esse comportamento é mais intenso para os marcos instalados na crista da barragem de terra e enrocamento (037, 038, 042, 043, 047 e 048) em relação aos marcos instalados na crista da barragem de terra. Estes resultados são plenamente justificados, uma vez que, nesta região da barragem, as fundações foram apoiadas em rocha sã ou no derrame 5-6. Eventuais acréscimos das taxas de recalques podem até ocorrer, mas, em geral, não devem ser preocupantes.

A Figura 4.2 representa os valores de recalque registrados para os marcos instalados na crista, à montante e à jusante do eixo, pela equipe topográfica em maio/2003. Os maiores recalques ocorrem na região do antigo leito do rio, estaca 0 + 500,0, e é também nessa região que foram registradas as maiores diferenças entre as parcelas de recalque à montante e à jusante do eixo. Os recalques foram bem menores nas demais seções e implicam também a exemplo da barragem de terra da margem direita, a não geração de esforços de tração ao longo da crista das barragens.

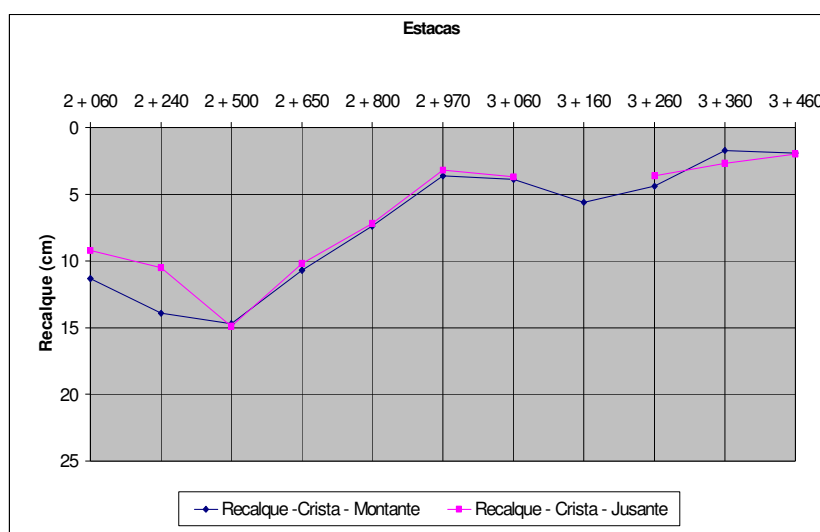


Figura 4.2 – Perfil dos Recalques Medidos pelos Marcos de Superfície Instalados na Crista da BTME (até maio/2003)

A Tabela 4.6 apresenta uma comparação entre os valores dos recalques medidos à montante e à jusante da crista das barragens de terra e de terra e enrocamento da ombreira esquerda (até maio/2003) e os valores previstos em projeto (Tabela 3.11).

A evolução completa dos recalques ao longo do tempo, para os marcos instalados na crista destas barragens, foi obtida com base no tratamento dos registros de campo pelo Programa MONITOR e os gráficos resultantes são apresentados no Anexo III.

Tabela 4.6 – Recalques Medidos x Recalques Previstos – Marcos Superficiais da BTME

Marco Superficial			Recalque Previsto em Projeto (cm)	Recalques Medidos (cm)
Montante	Est. 3 + 460,0	MS007	19,0	1,799
	Est. 3 + 360,0	MS008	23,0	1,601
	Est. 3 + 280,0	MS009	26,0	4,400
	Est. 3 + 160,0	MS010	29,0	5,601
	Est. 3 + 060,0	MS011	32,0	3,899
	Est. 2 + 970,0	MS012	35,0	3,701
	Est. 2 + 800,0	MS029	40,0	7,399
	Est. 2 + 650,0	MS033	45,0	10,700
	Est. 2 + 500,0	MS038	50,0	14,699
	Est. 2 + 240,0	MS043	46,0	14,000
	Est. 2 + 060,0	MS048	32,0	11,399
Jusante	Est. 3 + 460,0	MS013	23,0	2,001
	Est. 3 + 360,0	MS014	26,0	2,599
	Est. 3 + 280,0	MS015	29,0	3,599
	Est. 3 + 060,0	MS017	32,0	3,700
	Est. 2 + 970,0	MS018	35,0	3,200
	Est. 2 + 800,0	MS028	40,0	7,199
	Est. 2 + 650,0	MS032	45,0	10,199
	Est. 2 + 500,0	MS037	50,0	14,999
	Est. 2 + 240,0	MS042	46,0	10,601
	Est. 2 + 060,0	MS047	32,0	9,301

Todos os valores observados estão bastante inferiores aos previstos, apresentando, entretanto, taxas de variação maiores que as observadas para os marcos da barragem de terra da margem direita. Ainda assim, estes incrementos são bastante reduzidos e não acarretam problemas maiores quanto ao comprometimento da segurança da barragem.

Analogamente, considerou-se a mesma abordagem anterior em relação aos recalques diferenciais, longitudinais e transversais. Os valores observados foram muito inferiores aos estimados. As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os resultados dos recalques diferenciais medidos pelos marcos instalados nas cristas das barragens de terra e de terra e enrocamento da ombreira esquerda.

Constata-se que os recalques diferenciais transversais máximos ocorreram para os marcos 042 / 043 (estaca 2 + 240,0). Estes recalques foram bastante menores que os valores previstos, em escala muito superior aos recalques observados na BTMD.

Tabela 4.7 – Recalques Diferenciais Longitudinais – Marcos Superficiais da BTME

Marco Superficial		Distâncias entre Marcos (m)	Recalque Diferencial Longitudinal entre Estacas	
Montante	MS008 / MS007	100,0	0,0198 (mm/m)	1:50505
	MS009 / MS008	100,0	0,2800	1:3573
	MS010 / MS009	100,0	0,1200	1:8326
	MS011 / MS010	100,0	0,1700	1:5875
	MS012 / MS011	90,0	0,0220	1:45455
	MS029 / MS012	170,0	0,2180	1:4597
	MS033 / MS029	150,0	0,2200	1:4544
	MS038 / MS033	150,0	0,2670	1:3751
	MS043 / MS038	260,0	0,0270	1:37195
	MS048 / MS043	180,0	0,1445	1:6920
Jusante	MS014 / MS013	100,0	0,0600	1:16722
	MS015 / MS014	100,0	0,1000	1:10000
	MS017 / MS015	200,0	0,0051	1:198020
	MS018 / MS017	90,0	0,0560	1:18000
	MS028 / MS018	170,0	0,2350	1:4251
	MS032 / MS028	150,0	0,2000	1:5000
	MS037 / MS032	150,0	0,3200	1:3125
	MS042 / MS037	260,0	0,1690	1:5912
	MS047 / MS042	180,0	0,0720	1:13846

Tabela 4.8 – Recalques Diferenciais Transversais – Marcos Superficiais da BTME

Marco Superficial		Distância entre Estacas (m)	Recalque Diferencial Transversal entre Estacas	
Est. 3 + 460,0	MS007 / MS013	10,0	0,202 (mm/m)	1:4950
Est. 3 + 360,0	MS008 / MS014	10,0	0,998	1:1002
Est. 3 + 280,0	MS009 / MS015	10,0	0,801	1:1248
Est. 3 + 060,0	MS011 / MS017	10,0	0,199	1:5025
Est. 2 + 970,0	MS012 / MS018	10,0	0,501	1:1996
Est. 2 + 800,0	MS029 / MS028	10,0	0,2	1:5000
Est. 2 + 650,0	MS033 / MS032	10,0	0,501	1:1996
Est. 2 + 500,0	MS038 / MS037	10,0	0,3	1:3333
Est. 2 + 240,0	MS043 / MS042	10,0	3,4	1:294
Est. 2 + 060,0	MS048 / MS047	10,0	2,098	1:477

#### 4.2.2. – Medidores de Recalques IPT

Estes instrumentos encontram-se instalados em sete seções, sendo 5 localizadas na barragem de terra da margem direita e 2 nas barragens de terra e de terra e enrocamento da margem esquerda da UHE São Simão. Todos os medidores encontram-se em perfeito funcionamento e as suas leituras são realizadas periodicamente (todos os gráficos das leituras dos recalques medidos ao longo do tempo por estes instrumentos estão também apresentados nos Anexos IV e V), a cada 6 meses (as últimas leituras computadas nestas análises foram feitas em janeiro/2003).

A Tabela 4.9 apresenta os valores dos recalques obtidos para cada um destes medidores, cada um contendo uma, duas ou três placas de medição, diferenciados em termos das parcelas totais acumulados medidas nas fases de construção, enchimento e pós-enchimento.

Tabela 4.9 – Recalques Acumulados Totais – Medidores IPT

Medidores IPT	Recalque (cm)		
	Construção	Enchimento	Pós-Enchimento
IP101*-BTMD	31,2	48,8	49,6
IP102-BTMD	11,4	13,5	14,2
IP201-BTMD	35,2	39,0	39,1
IP202-BTMD	34,7	40,8	41,0
IP203-BTMD	18,9	25,3	25,8
IP204-BTMD	40,1	45,8	46,1
IP205-BTMD	34,6	41,2	41,9
IP206-BTMD	24,8	31,7	32,3
IP301-BTMD	16,5	15,9	16,0
IP302-BTMD	22,2	22,2	22,0
IP303-BTMD	9,1	9,1	9,4
IP304-BTMD	14,0	14,0	14,0
IP305-BTMD	15,1	16,3	16,5
IP306-BTMD	13,4	16,5	16,8
IP401-BTMD	8,8	8,6	8,6
IP402-BTMD	12,4	13,1	13,0
IP403-BTMD	8,6	9,7	9,2
IP404-BTMD	30,7	36,6	36,7

IP501-BTMD	11,0	12,4	13,0
IP502-BTMD	27,4	28,7	29,6
IP503-BTMD	15,9	17,8	19,4
IP101-BTME	9,1	12,4	13,2
IP102-BTME	18,7	24,6	25,3
IP103-BTME	1,0	8,1	9,7
IP104-BTME	4,0	4,9	5,0
IP105-BTME	3,9	5,0	4,9
IP106-BTME	2,2	3,6	4,1
IP601-BTME	14,3	26,7	27,3
IP602-BTME	12,0	23,2	24,4
IP603-BTME	1,8	16,3	17,8

\* IPXXX: IP - Medidor IPT / XXX - N<sup>o</sup> do Instrumento

Os valores iniciais contemplam os recalques imediatos quando da instalação de algumas placas, que atingiram, em alguns casos, magnitudes de até 5,6 cm. Cerca de 90 % dos recalques ocorreram até o final do período de enchimento do reservatório. Os incrementos dos recalques mostram-se bastante reduzidos, sendo no máximo, iguais a  $\pm 0,2$  a  $\pm 0,3$  cm/ano. Estes dados ratificam o processo efetivo de estabilização dos recalques (Figura 4.3), previamente demonstrado pelas análises dos resultados dos marcos superficiais. Em todos os casos, os valores de projeto pré-estabelecidos foram sensivelmente maiores que aqueles efetivamente registrados pela instrumentação.

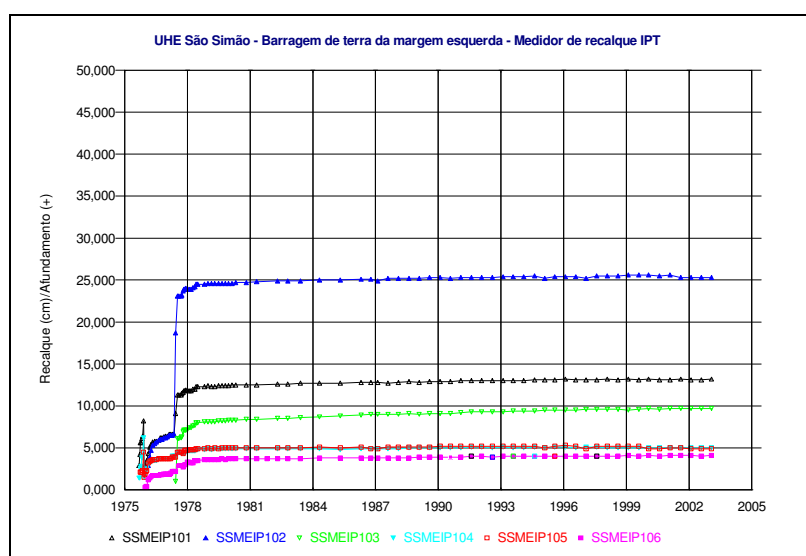


Figura 4.3 – Resultados Típicos dos Medidores de Recalques IPT



- **Barragem de Terra da Margem Direita**

Na BTMD, as 5 seções instrumentadas (seções 1, 2, 3, 4 e 5) contemplam 9 medidores de recalque IPT e um total de 21 placas de registro. Na seção 1 (Figura I.4 do Anexo I), existem dois medidores, cada um com uma única placa de registro (IP101 e IP102). Esses instrumentos foram instalados na fundação, com o intuito de monitorar os recalques devido às camadas dos solos residual e transportado existentes no local.

A placa IP101, encontra-se posicionada na interface entre o núcleo argiloso e o solo transportado de fundação, que apresenta, localmente, uma espessura entre 4,0 a 6,0 m, aproximadamente. Abaixo deste solo, ocorre uma lente laminar de cascalho de apenas 0,4 cm de espessura, sobrejacente a uma camada de solo residual com 25,0 m de espessura. A placa IP102 encontra-se apoiada na camada de solo residual, em estaca próxima à do medidor IP101 (cerca de 1,5 m). Os recalques totais acumulados nestas placas, até janeiro/2003, foram de 49,6 cm e 14,2 cm, respectivamente (Figura IV.1 do Anexo IV).

Os valores de projeto previstos nesta seção da barragem foram de 57,0 cm para o recalque total, com uma contribuição estimada de 45,0 cm devido às deformações da camada do solo transportado de fundação (Tabela 3.9). Os recalques medidos foram de 35,4 cm para a camada de solo transportado e de 14,2 cm para a camada de solo residual, totalizando, portanto, 49,6 cm (Tabela 4.9), valor inferior ao prescrito em projeto, conforme mencionado previamente.

Na seção 2 (Figura I.5 do Anexo I), foram instalados dois medidores de recalque IPT com três placas de registro cada um, ambos localizados na mesma estaca, um a 5,0 m à montante e o outro a 26,0 m à jusante do eixo da barragem. Em relação ao primeiro medidor, a placa IP201 encontra-se assente na interface entre o núcleo argiloso e o solo residual de fundação e as placas IP202 e IP203 encontram-se inseridas no núcleo argiloso. Para o segundo medidor, as duas placas superiores (IP205 e IP206) estão alocadas no cascalho de terraço e, portanto, medem os recalques ocorridos no domínio do maciço da BTMD. Já a placa inferior (IP204) encontra-se instalada na fundação da

barragem, na zona de interface entre o maciço e a camada de solo transportado com cerca de 3,0 m de espessura, abaixo da qual, ocorre uma camada de 10,0 m de espessura de solo residual.

Na seção 3 (Figura I.6 do Anexo I), foram instalados dois medidores de recalque IPT, cada um também com três placas de registro, ambos à jusante, um a 3,9 m e o outro a 50,0 m do eixo da barragem. No caso do primeiro medidor, a placa IP301, mais inferior, encontra-se assente na interface do núcleo argiloso e da fundação em solo residual, que apresenta, localmente, 13,0 m de espessura. As placas IP302 e IP303 encontram-se em diferentes elevações do núcleo argiloso. O segundo medidor também possui três placas: a placa IP304, posicionada na interface entre o cascalho de terraço e o solo residual existente na fundação (espessura local de 16,0 m) e as placas IP305 e IP306 instaladas, respectivamente, no cascalho de terraço e no random compactado. A diferença dos valores dos recalques das placas IP301 e IP304 refere-se às deformações devidas apenas ao solo residual de fundação (Figura IV.4 do Anexo IV).

Na seção 4 (Figura I.7 do Anexo I), foram instalados dois medidores à jusante do eixo da barragem, a distâncias de 60,0 e 97,7 m do eixo, respectivamente. O primeiro medidor possuía três placas de registro: a placa IP401 posicionada na interface entre o cascalho de terraço e o solo residual de fundação (espessura local da ordem de 7,0 m) e as placas IP402 e IP403 assentadas, respectivamente, no cascalho de terraço e no random compactado. O segundo medidor apresentava uma única placa de registro, que foi instalada na interface entre o random compactado e o solo transportado de fundação, de espessura local muito reduzida e sobreposta a uma camada de solo residual de, aproximadamente, 20,0 m de espessura. Os resultados registrados por esses medidores mostram que os recalques estão estabilizados desde o final do enchimento do reservatório. São observados incrementos de recalque com o tempo de, no máximo,  $\pm 0,3$  cm/ano (Figura IV.4 do Anexo IV).

Na seção 5 (Figura I.8 do Anexo I), foi instalado um único medidor dotado de três placas de registro, todas posicionadas no núcleo argiloso do maciço compactado. A fundação da barragem, nessa seção, é em rocha sã.

- **Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda**

Na BTME, as duas seções instrumentadas (seções 1 e 6) contemplam três medidores de recalque IPT e um total de nove placas de registro. Na seção 1 da BTME (Figura I.12 do Anexo I), foram instalados dois instrumentos, cada um com três placas de registro, a distâncias de 3,9 m e de 45,0 m à jusante do eixo da barragem. Todas as placas do primeiro medidor - IP101 a IP103 - encontram-se localizadas no núcleo argiloso da barragem, ao passo que todas as três placas de registro do segundo medidor - IP104 a IP106 - encontram-se instaladas no cascalho de terraço. Apenas a placa IP103 vem detectando ainda acréscimos graduais dos recalques nesta região da barragem (Figura V.1 do Anexo V).

Na seção 6 (Figura I.17 do Anexo I), instalou-se um terceiro medidor de recalques tipo IPT na BTME, dotado também de três placas - IP601 a IP603. Todas as placas encontram-se assentadas no cascalho de terraço. Nesta região, a fundação da barragem é em rocha sã e, assim, os valores medidos por esses instrumentos registram apenas os recalques oriundos do aterro compactado da barragem, que se encontram praticamente estabilizados.

#### **4.2.3. – Inclinômetros**

- **Barragem de Terra da Margem Direita**

Foram instalados sete inclinômetros para medir recalques nos maciços das barragens da UHE São Simão, sendo três na BTMD (designados por IR100, IR200 e IR300, terminologia adotada também para os instrumentos instalados na BTME). O inclinômetro IR100, instalado na seção 2 (estaca 0 + 670,0) da barragem de terra da ombreira direita (Figura I.5 do Anexo I), possui 25 segmentos (com 9, 14 e 2 segmentos em contato com os solos de fundação (solo transportado e solo residual), núcleo argiloso e o cascalho de terraço, respectivamente (seqüência inversa do perfil)). A Tabela 4.10 apresenta os valores dos recalques acumulados totais em três segmentos típicos do perfil geotécnico analisado por este instrumento (leituras até março/2003).

Tabela 4.10 – Recalques Acumulados Totais – Inclínômetro IR100 / BTMD

Inclinômetro	Recalque (cm)		
	Construção	Enchimento	Pós-Enchimento
IR109*	29,3	32,4	32,6
IR114	36,2	41,7	42,1
IR125	3,7	9,9	11,3

\* IRXXX: IR – Inclínômetro de Recalque / XXX - N<sup>o</sup> do Instrumento

Constata-se, mais uma vez, que a magnitude quase que total dos recalques ocorreram até o final do período de enchimento do reservatório e que os mesmos encontram-se praticamente estabilizados atualmente. O recalque acumulado até o final do período de enchimento do reservatório foi de 32,4 cm para as camadas locais de fundação (solo transportado + solo residual), medido no segmento IR109 (interface aterro / fundação). O recalque máximo ao longo da camada do aterro compactado foi de 42,1 cm (Figura VI.1a do Anexo VI), registrado pelo segmento IR114 (localizado no interior do maciço de solo compactado). No topo do perfil, o segmento IR125 indicou um valor de 11,3 cm. Os valores medidos foram bastante inferiores àqueles pré-estabelecidos em projeto. A Figura 4.4 apresenta as curvas da evolução dos recalques com o tempo para os segmentos IR108, IR114 e IR125 do inclinômetro IR100, da BTMD.

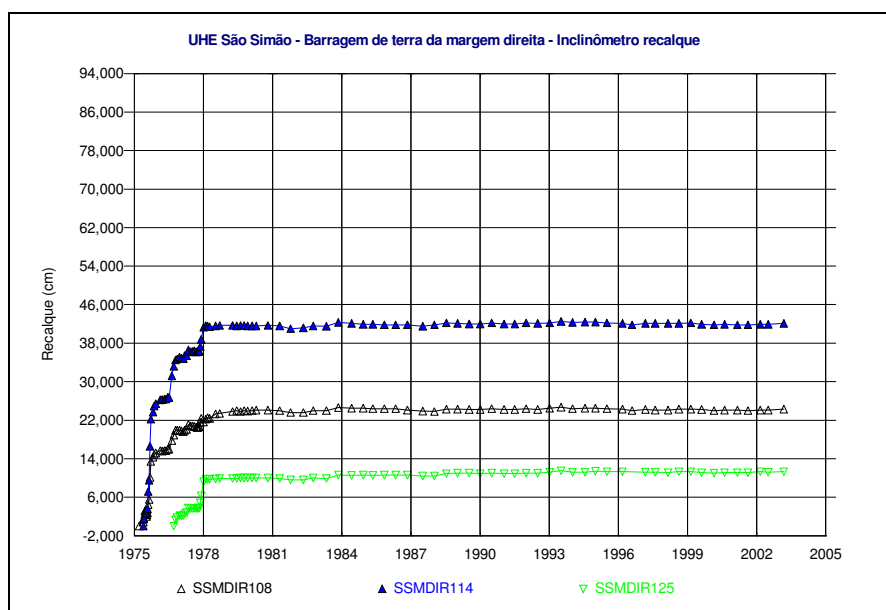


Figura 4.4 – Curvas dos Recalques para Segmentos do Inclínômetro IR100 / BTMD

Dois outros inclinômetros - IR200 e IR300 - encontram-se instalados na seção 3 (estaca 0 + 810,0), a 4,0 e 51,5 m à jusante do eixo da barragem, respectivamente. O primeiro destes inclinômetros possui 31 segmentos de tubo, com 9, 18 e 4 segmentos inseridos no solo residual, no núcleo argiloso e no cascalho de terraço, respectivamente. Atualmente, este instrumento encontra-se obstruído até o segmento IR207. O inclinômetro IR300 apresenta 25 segmentos (11, 6 e 8 segmentos localizados no solo residual, no cascalho de terraço e no random compactado, respectivamente) e tem sua cota de apoio na 352,3 m, encontrando-se também obstruído parcialmente. A Tabela 4.11 apresenta resultados típicos dos recalques acumulados totais medidos em segmentos específicos destes inclinômetros.

Tabela 4.11 – Recalques Acumulados Totais – Inclinômetros IR200 e IR300 / BTMD

Inclinômetro	Recalque (cm)		
	Construção	Enchimento	Pós-Enchimento
IR209	17,7	17,4	17,7
IR216	24,3	24,3	24,7
IR231	3,0	3,3	6,6
IR311	14,7	14,4	14,5
IR317	16,0	17,8	18,6
IR325	4,5	8,6	10,3

- **Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda**

Na BTME, 4 inclinômetros foram instalados em 3 seções diferentes. Na estaca 3 + 158,5, foram instalados os inclinômetros designados como IR100 e IR200 da margem esquerda, localizados, respectivamente a distâncias de 3,9 e 45,0 m à jusante do eixo.

O inclinômetro IR100 possui 32 segmentos de tubo, com 26 e 6 segmentos localizados, respectivamente, no núcleo argiloso e no cascalho de terraço do maciço. O inclinômetro IR200, por sua vez, foi instalado com 19 segmentos, sendo que, deste total, 2 e 17 segmentos estão localizados nas zonas do dreno e do cascalho de terraço. Os valores medidos de recalques foram muito reduzidos nesta região da barragem, não excedendo 6,0 cm (segmento IR213 – Figura VII.2b do Anexo VII).

A Tabela 4.12 apresenta valores dos recalques acumulados totais medidos em segmentos específicos destes inclinômetros.

Tabela 4.12 – Recalques Acumulados Totais – Inclinômetros IR100 e IR200 / BTME

Inclinômetro	Recalque (cm)		
	Construção	Enchimento	Pós-Enchimento
IR119	13,9	23,3	25,2
IR132	-	2,0	4,7
IR202	1,9	2,8	3,3
IR219	1,8	2,1	4,0

Os valores dos recalques medidos foram em geral bastante reduzidos; valores maiores foram obtidos apenas no terço central do núcleo argiloso e na seção próxima ao núcleo da barragem, com os valores máximos iguais a 25,2 cm (Tabela 4.12). Os recalques nesta região da barragem encontram-se praticamente estabilizados (Anexo VII).

O inclinômetro IR300 encontra-se localizado na seção 8 (estaca 2 + 410,0), e a 3,9 m à jusante do eixo. Todos os 75 segmentos desse instrumento encontram-se localizados nas zonas do cascalho de terraço. Trata-se de uma região da barragem ainda em processo contínuo de deformação do maciço, principalmente na zona superior limitada pelo segmento IR338, fato justificado pela maior altura da barragem nessa região e pelas características geotécnicas do cascalho de terraço. O valor máximo dos recalques atingiu 49,0 cm (no segmento IR334), sendo de 18,1 cm no topo do instrumento. A Tabela 4.13 apresenta os valores dos recalques acumulados totais medidos em segmentos específicos deste inclinômetro e a Figura 4.5 mostra a evolução dos recalques com o tempo para os segmentos IR334 e IR375.

Tabela 4.13 – Recalques Acumulados Totais – Inclinômetro IR300 / BTME

Inclinômetro	Recalque (cm)		
	Construção	Enchimento	Pós-Enchimento
IR334	31,6	44,8	49,0
IR375	-	10,9	18,1

O inclinômetro IR400 encontra-se localizado na seção 8A (estaca 2 + 325,0), possuindo 51 segmentos, integralmente inseridos no domínio do cascalho de terraço. Este instrumento registra também uma continuidade dos processos de recalque, particularmente na zona delimitada entre os segmentos IR415 e IR428, com valores totais, entretanto, inferiores aos registrados pelo inclinômetro IR300. Os demais segmentos, embora registrem incrementos de recalques, as taxas de variação observadas são bastante inferiores às do trecho anterior. O valor máximo dos recalques foi de 33,9 cm (no segmento IR431), sendo de 13,4 cm no topo do instrumento.

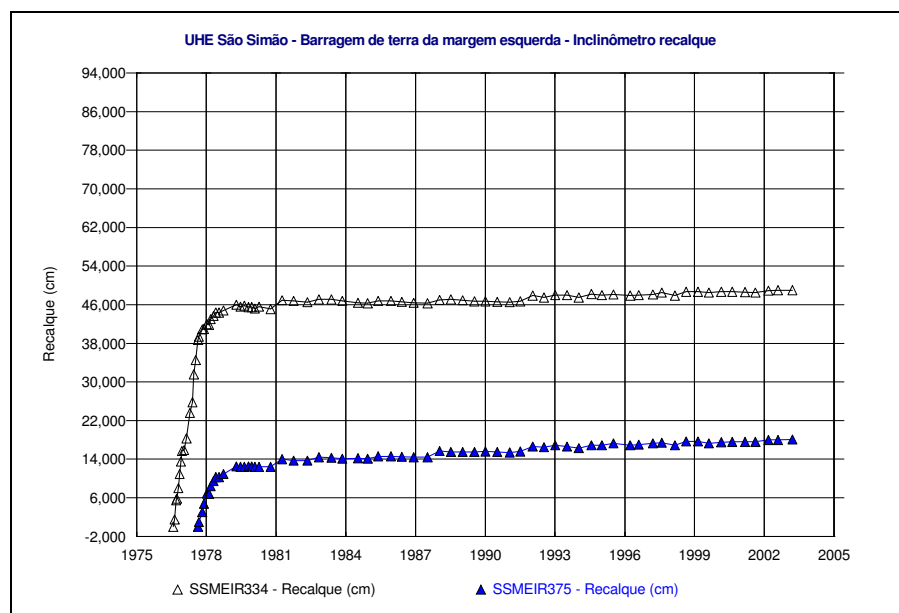


Figura 4.5 – Curvas dos Recalques para Segmentos do Inclinômetro IR300 / BTME

A Tabela 4.14 apresenta os valores dos recalques acumulados totais medidos em segmentos específicos deste inclinômetro, e a Figura 4.6 mostra a evolução dos recalques medidos com o tempo para os segmentos IR449 e IR451.

Tabela 4.14 – Recalques Acumulados Totais – Inclinômetro IR400 / BTME

Inclinômetro	Recalque (cm)		
	Construção	Enchimento	Pós-Enchimento
IR431	16,1	24,4	33,9
IR451	-	8,4	13,4

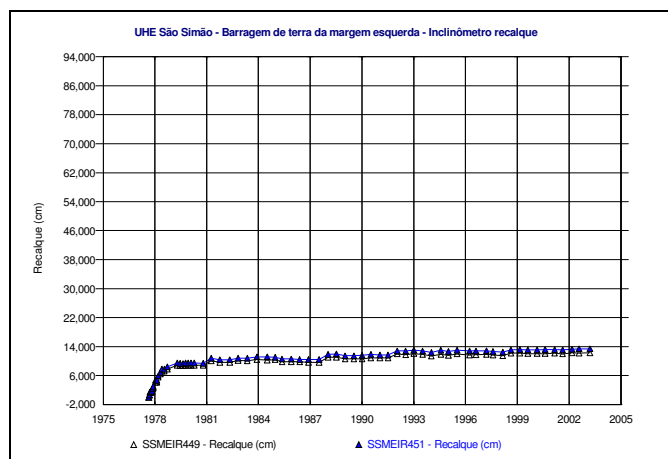


Figura 4.6 – Curvas dos Recalques para Segmentos do Inclinômetro IR400 / BTME

### 4.3. – Deslocamentos Horizontais

#### 4.3.1. – Inclinômetros

O controle dos deslocamentos horizontais tem sido feito, apenas, pelas leituras dos sete inclinômetros instalados nas margens direita e esquerda da UHE São Simão, não se utilizando os marcos superficiais para este tipo de monitoramento. A Tabela 4.15 apresenta os valores limites máximos dos deslocamentos horizontais, nas direções de montante-jusante e esquerda-direita, registrados por cada instrumento ao longo das diferentes fases (construtiva, enchimento e pós-enchimento do reservatório).

Tabela 4.15 – Deslocamentos Horizontais Máximos Medidos pelos Inclinômetros

Inclinômetro	Deslocamento Horizontal Acumulado (cm)					
	Construtivo		Enchimento		Pós-enchimento	
	Montante-Jusante	Esquerda-Direita	Montante-Jusante	Esquerda-Direita	Montante-Jusante	Esquerda-Direita
ID100-BTMD	-3,526	+4,223	-4,346	+5,699	-10,988	+5,863
ID200-BTMD	+2,378	+2,296	+2,665	+2,788	±2,624	-7,052
ID300-BTMD	-2,542	2,542	-5,781	+2,665	-10,250	-3,608
ID100*-BTME	+1,394**	+0,943***	+2,501	+2,091	-6,068	-6,314
ID200-BTME	-1,312	+1,107	-1,886	+1,681	-7,216	-2,542
ID300-BTME	+1,886	+2,091	-14,432	+6,970	-28,823	+13,817
ID400-BTME	-0,779	+0,820	-11,234	+6,970	-16,769	+12,628

\* IDXXX: ID – Inclinômetro de Deflexão / XXX - N<sup>o</sup> do Instrumento

\*\* (+) : Deslocamento para Montante; \*\*\* (+) : Deslocamento para a Esquerda

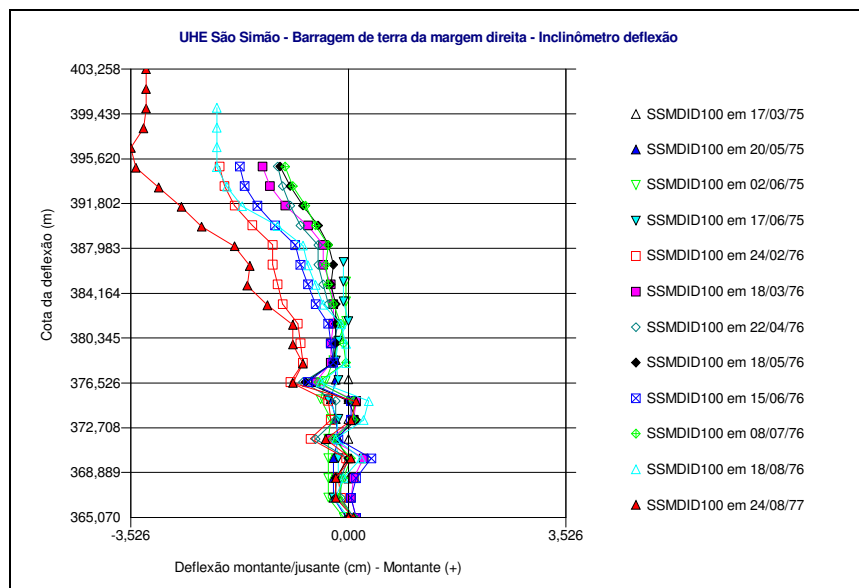


Registros típicos da evolução dos deslocamentos horizontais das barragens de terra e de terra e enrocamento da UHE São Simão durante as fases, construtiva, de enchimento e pós-enchimento do reservatório, obtidos através dos inclinômetros instalados em várias regiões do maciço tiveram seus dados tratados pelo Programa MONITOR (Anexos VIII e IX). Cada gráfico correspondente a um dado instrumento será analisado, em termos da direção geral dos deslocamentos e das seções analisadas.

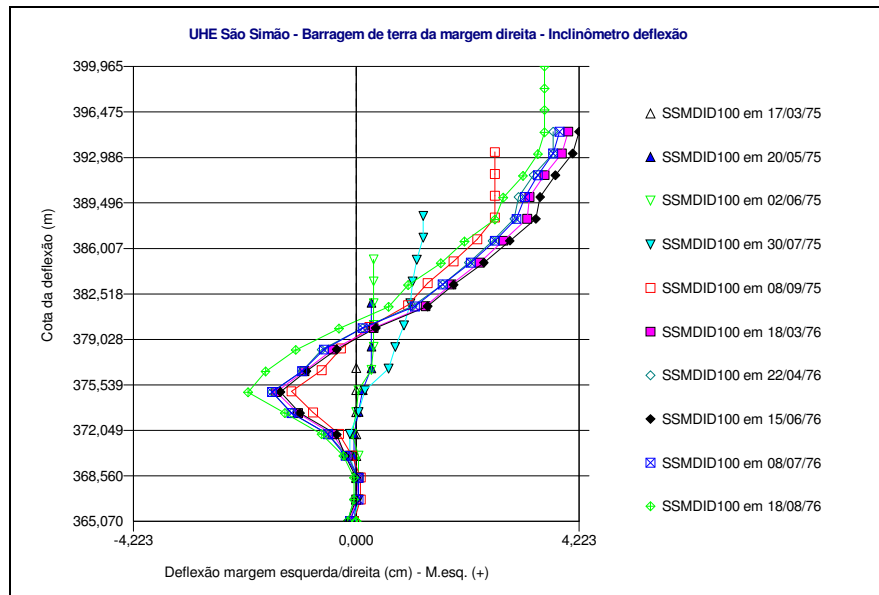
- **Barragem de Terra da Margem Direita**

Conforme exposto no item anterior, foram instalados três inclinômetros na BTMD da UHE São Simão. Os dados foram plotados e analisados para cada fase da vida útil da barragem. A Figura 4.7 ilustra a evolução destes deslocamentos, para a fase construtiva, conforme dados do inclinômetro ID100 (localizado próximo à ombreira direita).

Evidencia-se um comportamento bastante aleatório dos deslocamentos, fortemente condicionado pela seqüência construtiva adotada, com tendência geral de movimentação para jusante ao longo de todo o perfil (Figura 4.7a). Na direção esquerda-direita, a tendência geral é de movimentação para a ombreira esquerda (zonas superficiais do maciço), com movimentação inversa a maiores profundidades (Figura 4.7b).



(a)



(b)

Figura 4.7 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclínômetro ID100 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante – Jusante ; (b) Direção Esquerda – Direita

Estes efeitos foram intensificados durante a fase de enchimento e pós-enchimento (variações do NA), mantendo-se, entretanto, o comportamento geral observado em termos da direção montante–jusante (Figuras 4.8 e 4.9) e esquerda-direita.

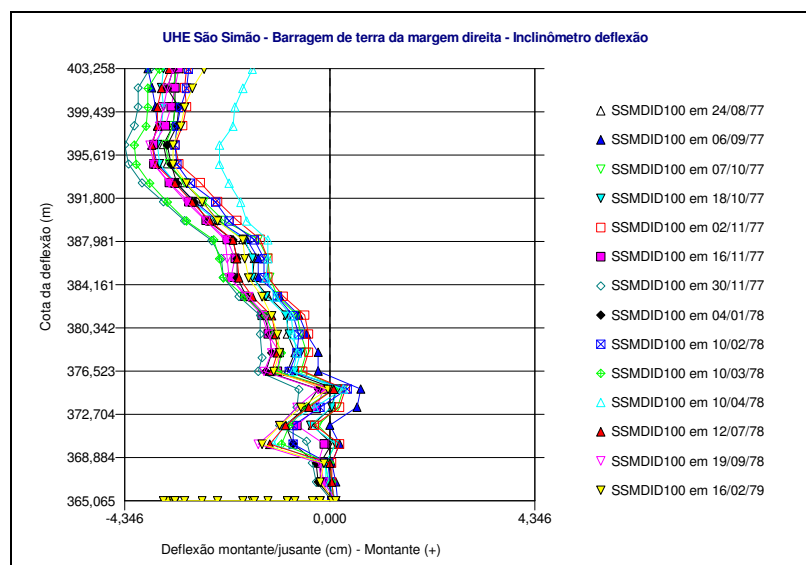


Figura 4.8 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclínômetro ID100 (Fase de Enchimento e Direção Montante – Jusante)

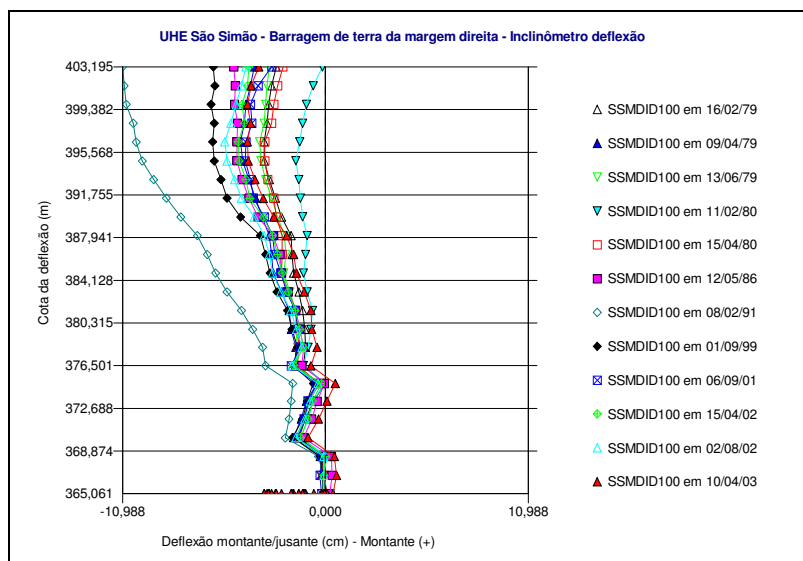
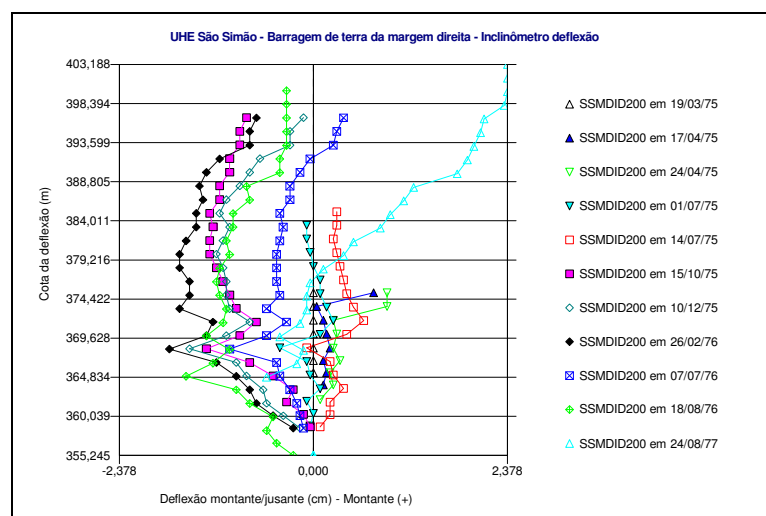


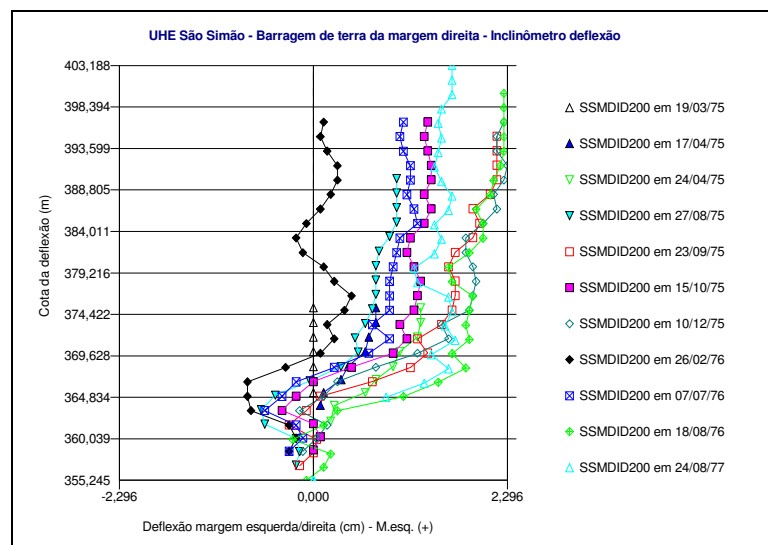
Figura 4.9 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclínômetro ID100  
(Fase de Pós-Enchimento e Direção Montante – Jusante)

Na condição mais recente, os deslocamentos máximos foram registrados no topo do instrumento, sendo da ordem de 4,0 cm para jusante (valor bem inferior ao de projeto, que é de 12,09 cm) e em torno de 5,0 cm em direção à ombreira esquerda, valor próximo ao valor limite prescrito por Silveira e Ávila (1995), igual a 6,4 cm.

No caso do inclinômetro ID200 (posicionado praticamente na região central da barragem), o comportamento observado é bastante distinto do anterior (Figura 4.10).



(a)



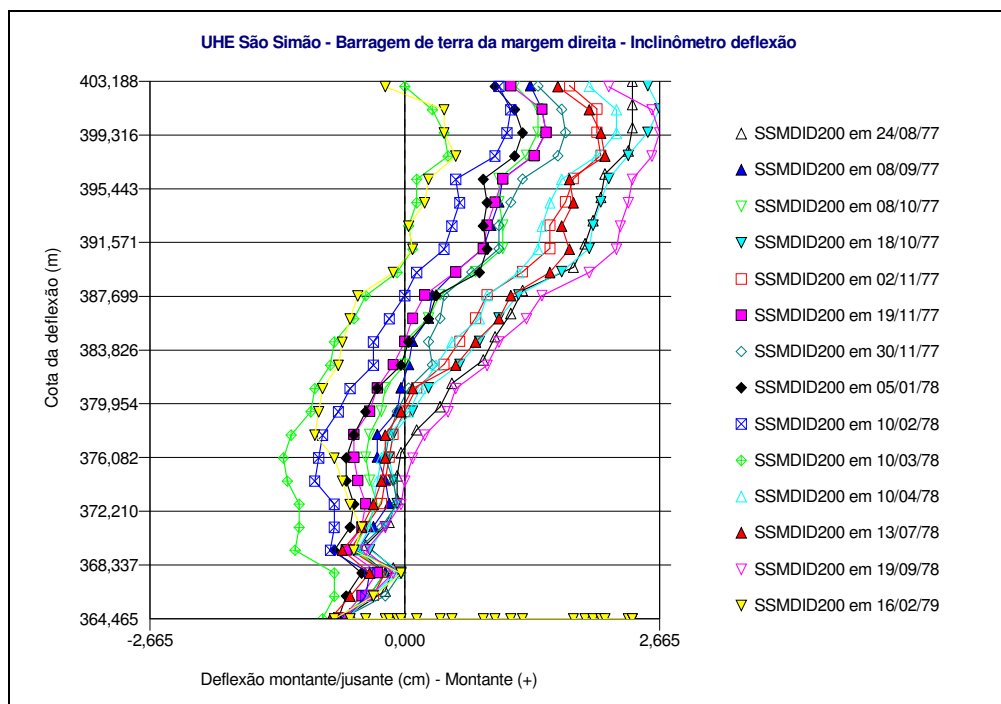
(b)

Figura 4.10 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID200 (Fase Construtiva): (a) Direção Montante – Jusante; (b) Direção Esquerda – Direita

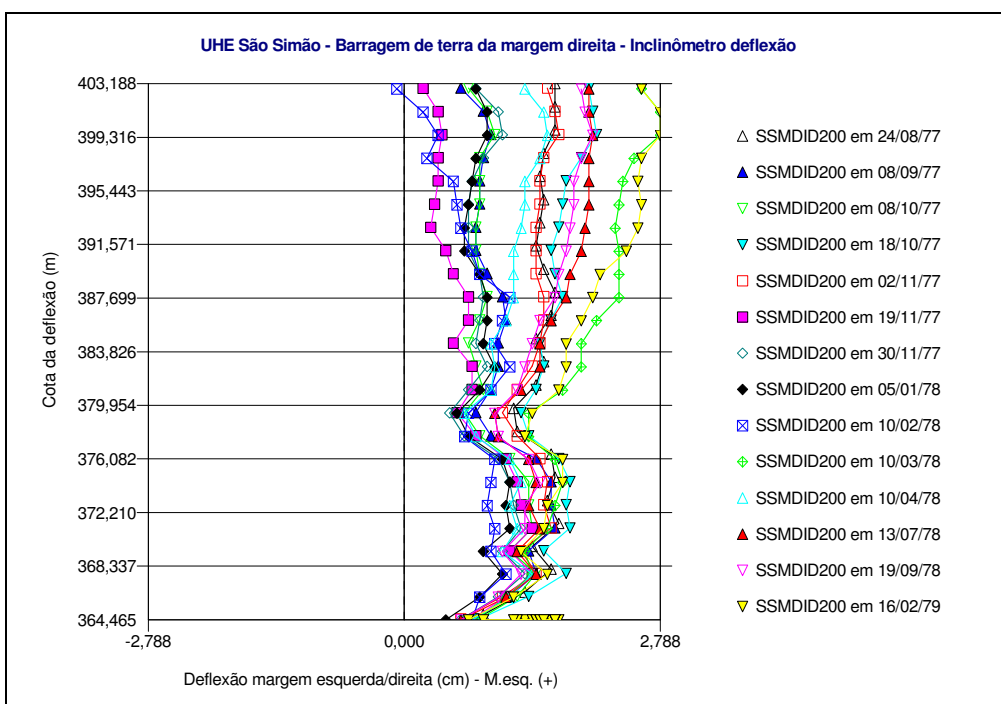
Nesta seção, os deslocamentos horizontais ocorreram tipicamente para jusante e para a esquerda, em uma distribuição quase regular ao longo do perfil geotécnico investigado no primeiro caso (com valores máximos no terço médio do perfil) e predominantemente para a esquerda no segundo caso, embora com oscilações aleatórias determinadas pelas variações complexas dos procedimentos construtivos inerentes a uma barragem zoneada e constituída por diferentes materiais de construção.

Nas fases seguintes, os registros do instrumento indicaram um comportamento bastante complexo, ora caracterizando uma tendência definida, ora evidenciando uma gama de variações aleatórias e irregularmente distribuídas ao longo do perfil (Figuras 4.11 e 4.12).

Aliado à própria variação dos registros, constata-se um claro deslocamento da base do instrumento (de difícil justificativa, face à regularidade e consistência dos registros ao longo do tempo). A repetibilidade dos registros na base do eixo dos deslocamentos horizontais dos gráficos, relativos à última leitura realizada, constitui um problema inerente ao próprio Programa MONITOR.

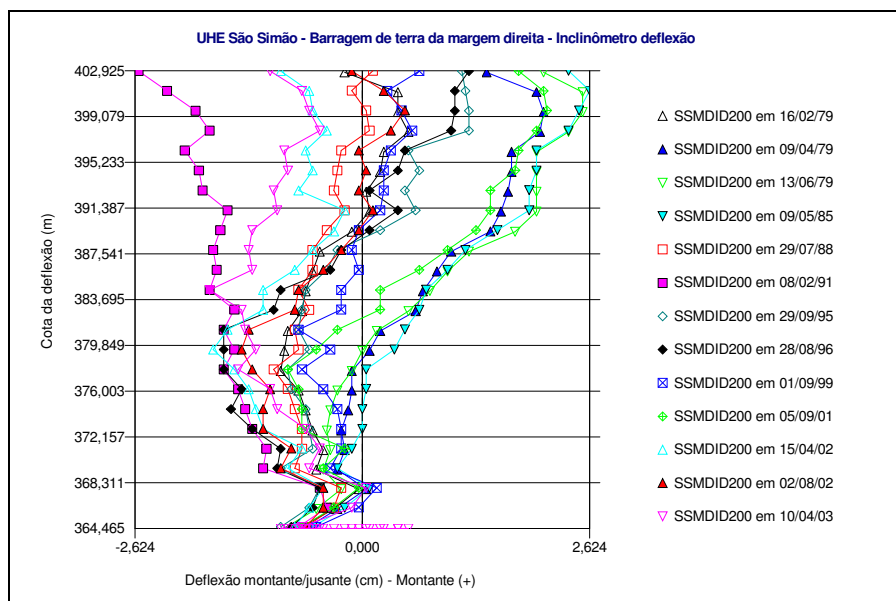


(a)

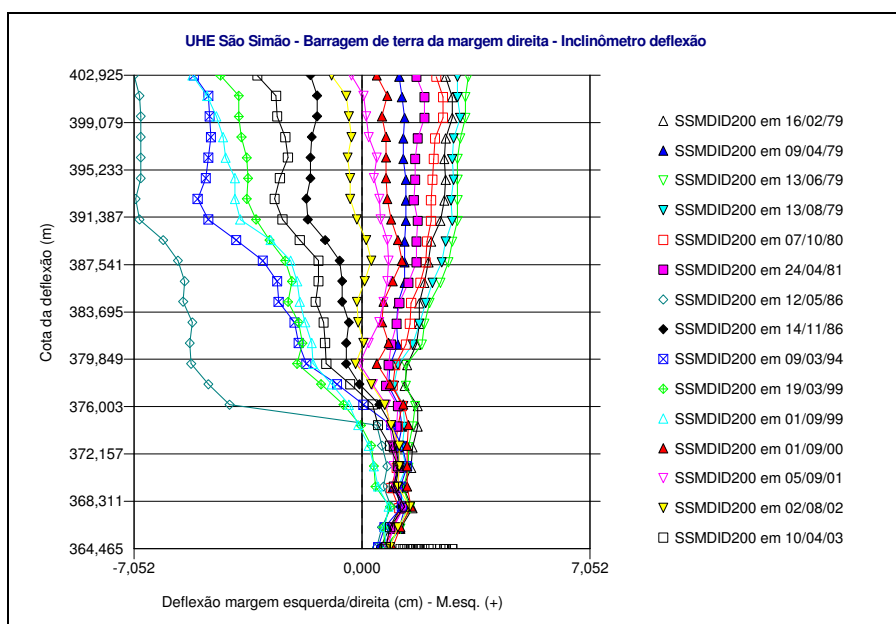


(b)

Figura 4.11 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclinômetro ID200 (Fase de Enchimento): (a) Direção Montante – Jusante; (b) Direção Esquerda – Direita



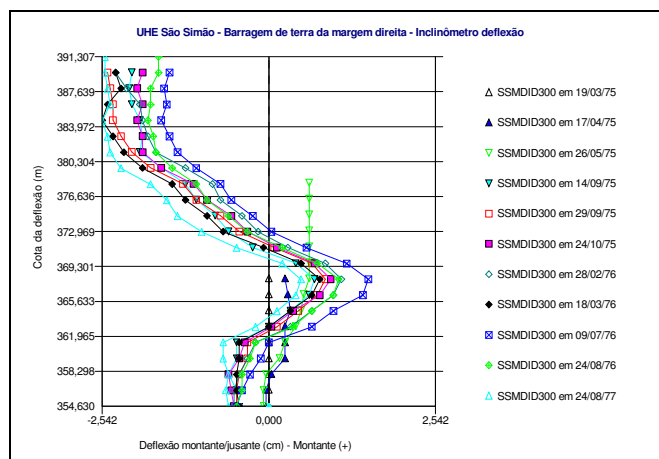
(a)



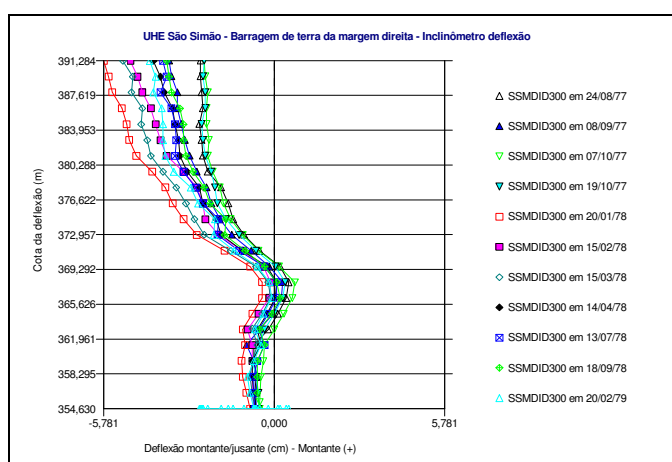
(b)

Figura 4.12 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclínômetro ID200 (Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante–Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

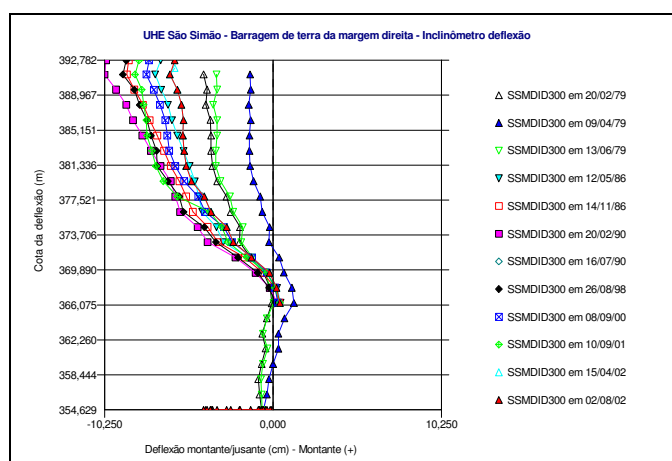
O terceiro inclinômetro – ID300 – está localizado na mesma estaca do inclinômetro anterior, mas deslocado de cerca de 50,0 m em direção ao talude de jusante. Os registros obtidos por este instrumento, nas fases construtiva, de enchimento e pós-enchimento (indicados apenas na direção montante-jusante) estão dados nas Figuras 4.13a a 4.13c.



(a)



(b)



(c)

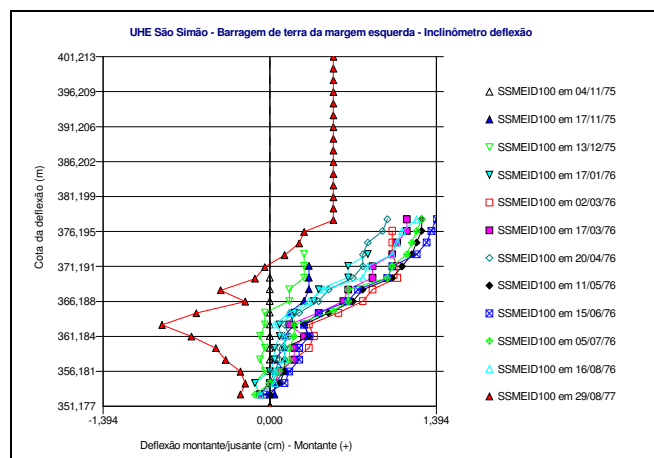
Figura 4.13 – Deslocamentos Horizontais da BTMD Medidos pelo Inclínômetro ID300 (Direção Montante-Jusante:Fase Construtiva (a), Enchimento (b) e Pós-Enchimento (c))

Os registros mostram uma forte tendência inicial de movimentação da barragem em direções opostas ao longo do perfil investigado (Figura 4.13a), processo que se acentua para os deslocamentos de montante e que se dilui para os deslocamentos de jusante nas fases seguintes, particularmente nas zonas superiores do perfil (Figuras 4.13b e 4.13c). Este processo, embora bastante aleatório e muito sensível às variações do nível do reservatório, implicou, entretanto, valores de oscilações sempre limitadas, com folga razoável, às faixas especificadas destas grandezas em termos de valores limites.

- **Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda**

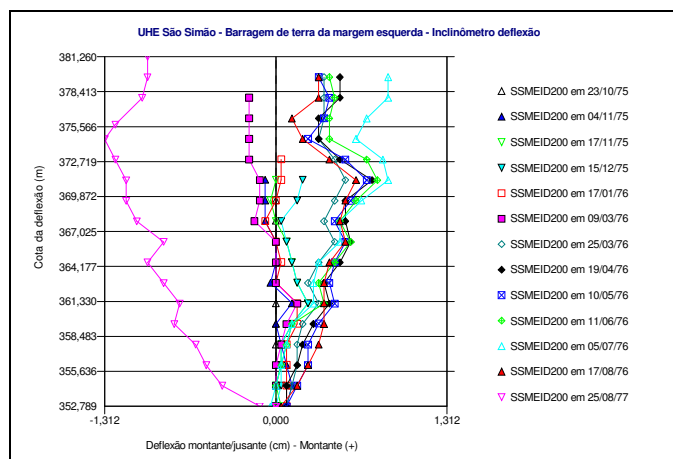
Os registros da evolução dos deslocamentos horizontais, medidos durante a fase construtiva pelos 04 inclinômetros instalados na margem esquerda da UHE São Simão e processados pelo Programa MONITOR, estão apresentados a seguir, em termos da direção geral montante – jusante dos deslocamentos ocorridos (a repetição incontrollada dos dados relativos à última leitura é problema do programa). Estes dados são apresentados para as fases de construção (Figura 4.14), enchimento (Figura 4.15) e pós-construção (Figura 4.16).

Na fase inicial, os registros foram limitados por imposições das etapas construtivas, sendo, em alguns casos, feitas apenas leituras parciais dos instrumentos. A movimentação ocorreu, em geral, para montante, com oscilações para jusante.

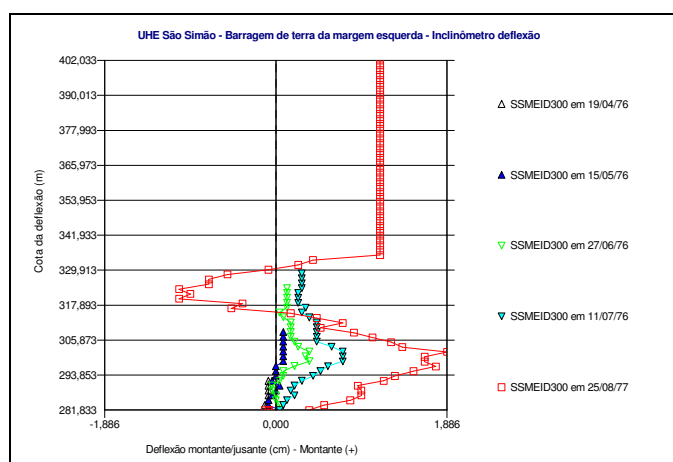


(a)

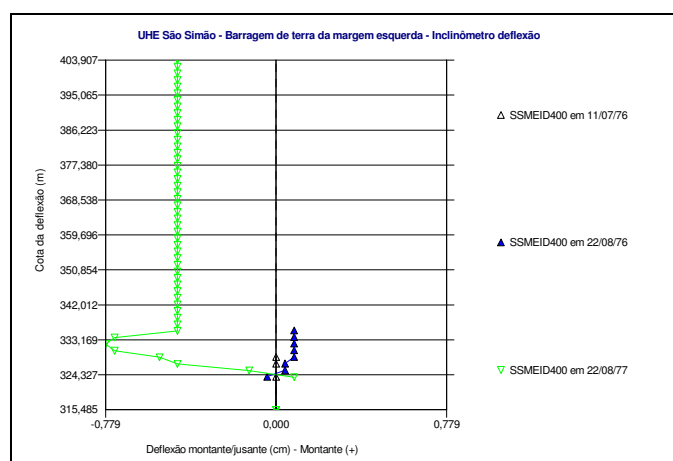




(b)



(c)

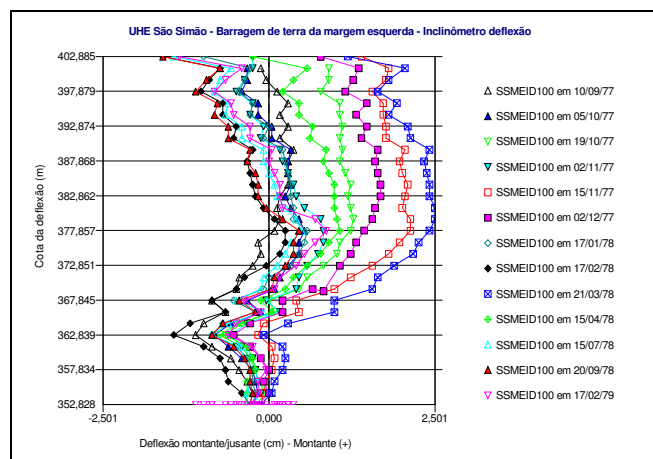


(d)

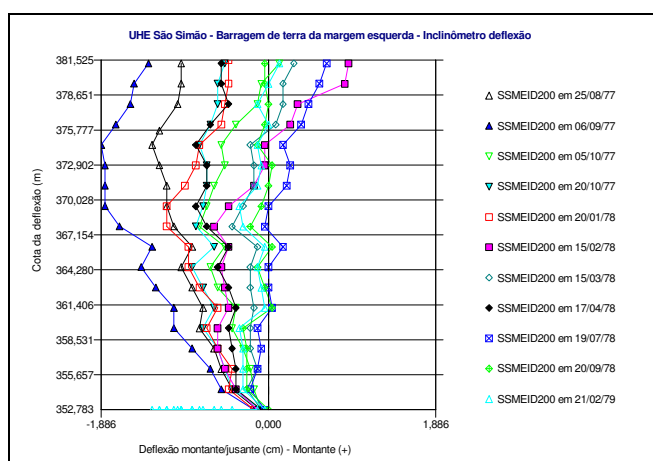
Figura 4.14 – Deslocamentos Horizontais Medidos pelos Inclínômetros na BTME (Fase Construtiva e Direção Montante – Jusante): a - d: ID100 – ID200 – ID300 e ID400

Na fase de enchimento do reservatório, os resultados mostram uma movimentação geral da barragem ora para jusante ora para montante. Este comportamento está intrinsicamente associado à magnitude dos recalques ocorridos nas zonas do maciço à montante, durante o enchimento.

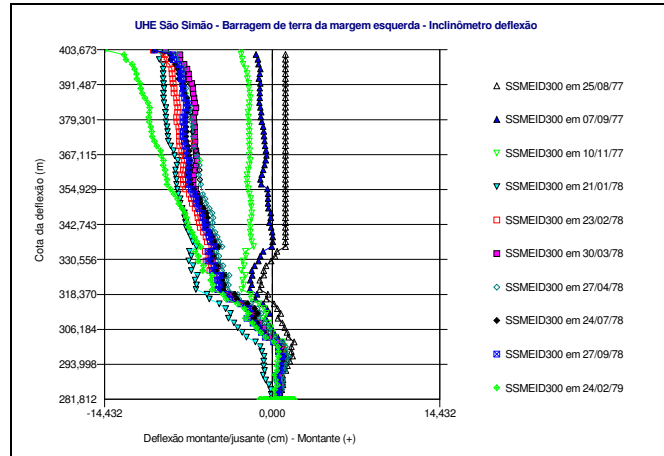
A regra geral é de uma movimentação para jusante como se verifica para as seções instrumentadas com os inclinômetros ID200, ID300 e ID400, todos localizados ao longo do cascalho de terraço. Entretanto, no caso de recalques de magnitude elevada, ocorre uma tendência inversa, ou seja, de movimentação da barragem para montante. Isto é evidenciado pelas leituras do inclinômetro ID100 (Figura 4.15a), inserido quase que totalmente no núcleo argiloso da barragem.



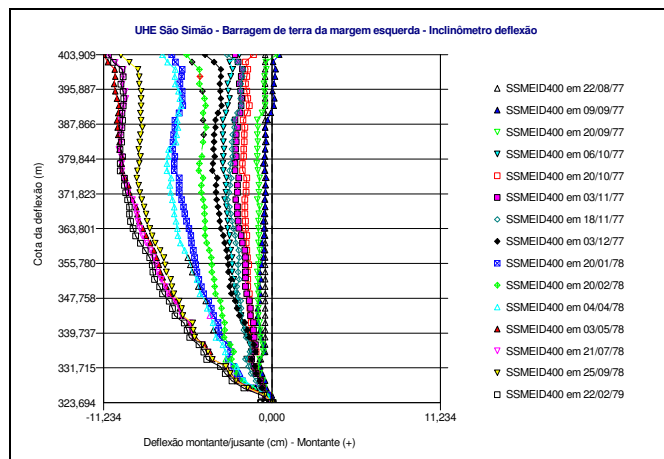
(a)



(b)



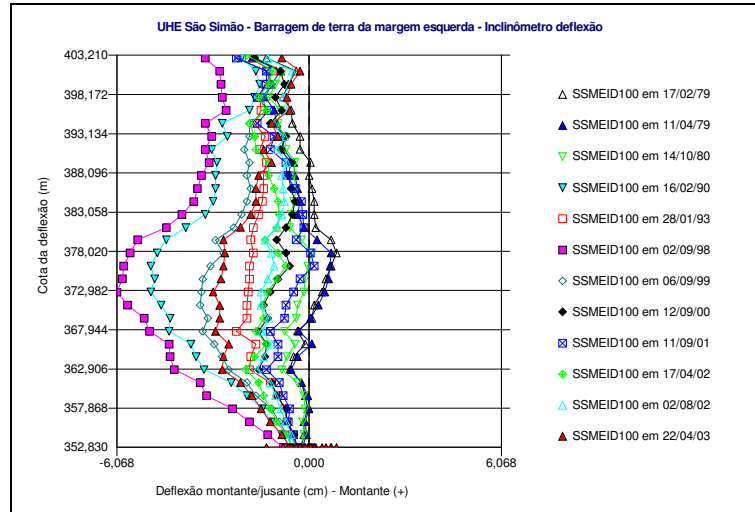
(c)



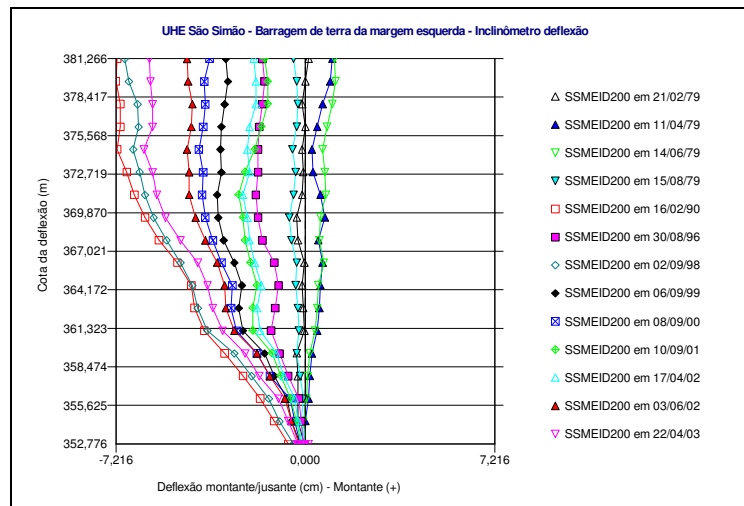
(d)

Figura 4.15 – Deslocamentos Horizontais Medidos pelos Inclínômetros na BTME (Fase de Enchimento e Direção Montante – Jusante): a - d: ID100 – ID200 – ID300 e ID400

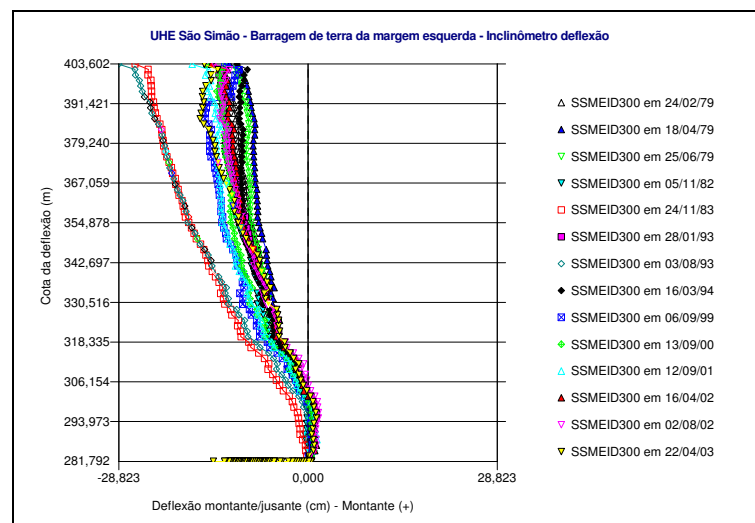
Na fase de pós-enchimento (Figura 4.16), observa-se uma tendência geral de movimentação da barragem para jusante, embora com oscilações diversas em função das variações do nível do reservatório. Os valores acumulados dos deslocamentos horizontais, entretanto, em todas as condições analisadas, mostraram-se sempre muito inferiores aos valores prescritos em projeto, à exceção do inclinômetro ID100, que registra atualmente um valor de 5,0 cm (esquerda) contra 4,8 cm previsto em projeto. A distribuição dos deslocamentos obtidos não configura também a possibilidade de concentração de deslocamentos cisalhantes na base do perfil, eliminando-se, assim, a possibilidade de potenciais zonas de ruptura nas fundações das barragens.



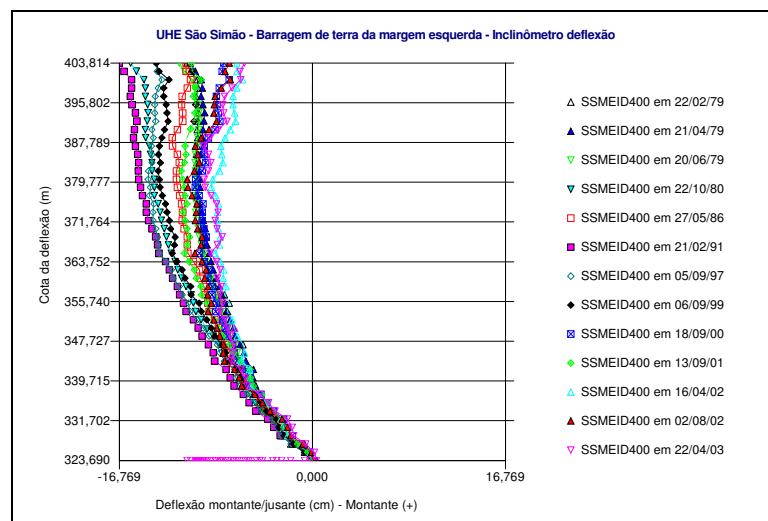
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.16 – Deslocamentos Horizontais Medidos pelos Inclínômetros na BTME (Fase de Pós-Enchimento e Direção Montante–Jusante): a - d: ID100 – ID200 – ID300 e ID400

## **Capítulo 5**

### **Análise dos Dados de Instrumentação das Barragens da UHE São Simão**

#### **Parte II – Poropressões, Tensões Totais e Vazões de Percolação**

##### **5.1. – Introdução**

Neste capítulo, será dada continuidade na descrição dos procedimentos de aquisição e interpretação dos dados de instrumentação das barragens da UHE São Simão, quanto a poropressões, tensões totais e vazões de percolação medidas ao longo dos 25 anos de sua plena operação. Os registros de campo foram tratados pelo Programa MONITOR, até junho/2003, os gráficos resultantes são apresentados nos Anexos X ao Anexo XV.

##### **5.2. – Piezometria**

Nas estruturas de terra e enrocamento da UHE São Simão, a instrumentação piezométrica foi composta pela instalação de 38 piezômetros tipo Casagrande (PC's), 67 piezômetros pneumáticos tipo Hall (PH's) e 6 piezômetros elétricos tipo Maihak (PM's), instalados ao longo dos maciços e fundações da barragem, nas seguintes seções:

###### **(i) BTMD:**

- Seção 1 – Estaca 0 + 460: PC101 e PC102;
- Seção 2 – Estaca 0 + 670: PC201, PC202 e PC203;
- Seção 3 – Estaca 0 + 810: PC301-PC305; PH301-PH316;
- Seção 5 – Estaca 1 + 240: PC501-PC505;
- Seção 6 – Estaca 1 + 428,7: PH602, PH606, PH609 e PH612;  
Estaca 1 + 439,7: PC601, PH603, PH605, PH608 e PH611.

###### **(ii) BTME:**

- Seção 0 – Estaca 3 + 485: PC001-PC004;
- Seção 1 – Estaca 3 + 160: PC101-PC104; PH101-PH116;

- Seção 5 – Estaca 2 + 780: PC501-PC502;
- Seção 6 – Estaca 2 + 500: PC601-PC606;
- Seção 7 – Estaca 2 + 460: PC801 e PC803; PH801-PH815;
- Seção 8 – Estaca 2 + 410: PC701-PC704;
- Seção 9 – Estaca 2 + 016: PH910-PH921; PM901-PM906.

As principais características destes instrumentos estão apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 a seguir, incorporando os seguintes dados: identificação do piezômetro, cotas de instalação, elevações piezométricas atuais (junho/2003) e valores de projeto. Alguns piezômetros encontram-se danificados e foram, portanto, abandonados. Entre estes, encontram-se todos os piezômetros Maihak, que sofreram danos irreversíveis (Figura XI.13 do Anexo XI).

A interpretação dos resultados da piezometria das barragens da UHE São Simão é feita a partir da consideração das premissas de fluxo geral sob regime permanente e NA invariável (correspondente ao NA máximo do reservatório, uma vez que as variações são muito pequenas e sem impacto significativo nas leituras piezométricas). Neste sentido, a análise global dos dados ratifica esta hipótese, caracterizando uma rede de fluxo uniforme ao longo da barragem, sem descontinuidades ou anomalias das perdas de carga detectadas. Na concepção dos valores de projeto, além destas condições, adotou-se ainda uma condição de homogeneidade e isotropia para o conjunto aterro – fundação (item 3.6.1). As sínteses dos registros de todos os piezômetros instalados nas barragens da UHE São Simão encontram-se nos Anexos X e XI do trabalho.

Tabela 5.1 – Níveis Piezométricos Medidos x Níveis Piezométricos Previstos –  
Piezômetros da BTMD

Piezômetro	Cota de Instalação (m)	El. Piezométrica de Projeto (m)	El. Piezométrica Limite (m)		El. Piezométrica Atual (m) (junho/2003)
			Projeto (m)	Silveira e Ávila (1995)	
PC101*	389,25	399,0	399,0	399,0	393,830
PC102	389,29	396,0	396,0	397,0	392,132
PC201	374,50	398,5	398,5	396,0	391,971
PC202	374,50	395,0	395,0	393,0	388,031

PC203	374,50	391,5	391,5	390,0	384,512
PC301	363,55	395,5	395,5	393,6	388,015
PC302	363,30	389,0	389,0	385,5	377,444
PC303	363,30	381,5	381,5	378,0	375,879
PC304	388,45	Seco	Seco	Não indicado	Seco
PC305	382,75	Seco	Seco	Não indicado	Seco
PH301 **	358,13	399,5	399,5	401,0	393,787
PH302	363,11	400,0	400,0	401,0	395,691
PH303	358,08	398,0	398,0	397,0	390,748
PH304	362,20	398,0	398,0	395,0	389,994
PH305	358,11	395,5	395,5	389,0	380,833
PH306	362,20	395,5	395,5	393,0	388,722
PH307	358,11	394,0	394,0	386,0	383,777
PH308	362,95	389,0	389,0	386,0	377,403
PH309	367,00	397,5	397,5	Danificado	Danificado
PH310	367,00	394,0	394,0	391,0	380,169
PH311	370,20	399,0	399,0	401,0	395,845
PH312	370,80	392,5	392,5	385,0	378,826
PH313	374,95	397,0	397,0	Danificado	Danificado
PH314	374,98	395,0	395,0	395,0	391,693
PH315	377,91	391,0	391,0	385,0	379,497
PH316	385,00	396,0	396,0	395,0	392,147
PC501	341,61	371,0	382,0	385,0	383,622
PC502	340,46	341,0 a 358,0	358,0	355,0	Seco
PC503	340,77	341,0 a 358,0	358,0	355,0	342,329
PC504	359,65	Seco	Seco	360,0	Seco
PC505	359,25	Seco	Seco	360,0	Seco
PC601	368,00	Seco	Seco	Não indicado	369,790
PH602	368,00	382,4	384,0	Não indicado	382,917
PH603	368,01	379,4	384,0	Não indicado	382,117
PH605	368,20	376,4	383,0	Não indicado	381,918
PH606	368,01	377,2	382,0	Não indicado	381,816
PH608	388,70	394,0	397,5	Não indicado	396,052
PH609	388,66	394,0	395,0	Não indicado	392,131
PH611	385,00	387,0	388,0	Não indicado	385,656
PH612	385,00	386,8	388,0	Não indicado	385,538

\* PCXXX: PC – Piezômetro de Casagrande / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento

\*\* PHXXX: PH – Piezômetro Pneumático Tipo Hall / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento



Tabela 5.2 – Níveis Piezométricos Medidos x Níveis Piezométricos Previstos –  
Piezômetros da BTME

Piezômetro	Cota de instalação (m)	El. Piezométrica de Projeto (m)	El. Piezométrica Limite (m)		El. Piezométrica Atual (m) (junho / 2003)
			Projeto	Silveira e Ávila (1995)	
PC001*	392,09	Não indicado	Não indicado	Não indicado	Seco
PC002	388,93	Não indicado	Não indicado	Não indicado	392,040
PC003	384,98	Não indicado	Não indicado	Não indicado	385,490
PC004	380,75	Não indicado	Não indicado	Não indicado	Seco
PH101**	354,71	399,5	399,5	401,0	378,350
PH102	352,64	399,5	399,5	401,0	379,924
PH103	352,63	394,0	394,0	391,0	378,011
PH104	352,66	381,0	386,0	385,0	374,273
PH105	354,13	371,0	385,0	383,0	375,257
PH106	351,82	369,0	384,0	380,0	373,232
PH107	352,31	368,5	384,0	380,0	374,016
PH108	354,39	368,5	381,0	379,0	372,202
PH109	363,00	384,5	387,0	385,5	383,783
PH110	364,00	369,0	372,5	380,0	369,497
PH111	365,45	399,0	391,0	375,0	384,208
PH112	358,07	368,5	384,0	375,0	373,788
PH113	370,00	388,5	388,5	390,0	379,729
PH114	370,00	376,0	381,0	382,0	376,389
PH115	365,00	368,5	370,0	375,0	368,058
PH116	380,00	388,0	388,0	390,0	380,903
PC101	355,65	380,0	386,0	383,5	392,632
PC102	354,56	370,0	385,0	Danificado	Danificado
PC103	353,25	368,5	382,0	379,0	372,143
PC104	361,18	372,0	378,0	Não indicado	372,784
PC501	341,10	Seco	342,0	Não indicado	Seco
PC502	338,30	341,0	344,0	342,0	342,268
PC601	293,27	334,0	334,0	342,0	332,140
PC602	281,48	334,0	334,0	343,0	332,620
PC603	288,66	334,0	334,0	342,0	331,910
PC604	279,04	334,0	334,0	343,0	332,420
PC605	310,04	334,0	334,0	342,0	329,050
PC606	309,59	334,0	334,0	342,0	330,820
PC701	280,25	334,5	334,5	342,0	333,280
PC702	285,25	334,5	334,5	342,0	333,420

PC703	302,62	334,5	334,5	342,0	332,690
PC704	285,40	334,0	334,0	342,0	332,640
PH801	271,00	392,0	392,0	380,0	376,161
PH802	271,00	375,0	375,0	380,0	Danificado
PH803	270,50	353,0	374,0	380,0	375,067
PH804	282,34	353,0	364,0	360,0	347,913
PH805	286,39	335,0	335,0	345,0	331,391
PH806	290,00	395,0	395,0	385,0	371,173
PH807	290,00	370,0	375,0	380,0	358,816
PH808	310,01	385,0	386,0	395,0	373,129
PH809	310,00	363,0	363,0	360,0	345,072
PH810	310,04	342,0	342,0	350,0	342,063
PH811	329,69	380,0	385,0	390,0	382,479
PH812	329,74	353,0	353,0	350,0	338,101
PH813	350,00	363,0	363,0	Não indicado	Leitura indeterminada
PH814	350,00	382,0	382,0	390,0	384,252
PH815	373,90	391,0	391,0	390,0	374,834
PC801	312,32	334,5	334,5	342,0	332,800
PC803	322,87	334,0	334,0	342,0	332,640
PH910	354,34	366,5	366,5	Não indicado	Danificado
PH911	354,40	394,4	401,0	Não indicado	399,616
PH912	354,34	382,6	389,0	Não indicado	387,558
PH913	357,00	390,8	396,5	Não indicado	Danificado
PH914	374,04	396,4	401,0	Não indicado	398,923
PH915	373,99	388,0	395,0	Não indicado	392,567
PH916	374,03	378,8	383,0	Não indicado	383,149
PH917	374,04	394,5	394,5	Não indicado	393,521
PH918	374,01	385,0	389,0	Não indicado	387,861
PH919	383,92	398,8	401,0	Não indicado	400,512
PH920	383,77	394,5	394,5	Não indicado	385,683
PH921	360,00	381,2	381,2	Não indicado	367,201
PM901***	357,00	390,8	396,5	Danificado	Danificado
PM902	357,00	373,2	378,5	Danificado	Danificado
PM903	357,00	364,0	364,0	Danificado	Danificado
PM904	357,00	360,0	360,0	Danificado	Danificado
PM905	374,04	396,4	401,0	Danificado	Danificado
PM906	373,99	388,0	395,0	Danificado	Danificado

\* PCXXX: PC – Piezômetro de Casagrande / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento

\*\* PHXXX: PH – Piezômetro Pneumático tipo Hall / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento

\*\*\* PMXXX: PM – Piezômetro Elétrico tipo Maihak / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento

- **Barragem de Terra - Margem Direita**

Nas cinco seções instrumentadas com piezômetros ao longo do aterro e fundações na BTMD (seções 1, 2, 3, 5 e 6), as leituras piezométricas mostram-se estabilizadas, onde as variações bruscas correspondem à fase do enchimento do reservatório e às oscilações do nível de água na fase de pós-enchimento (Figura 5.1).

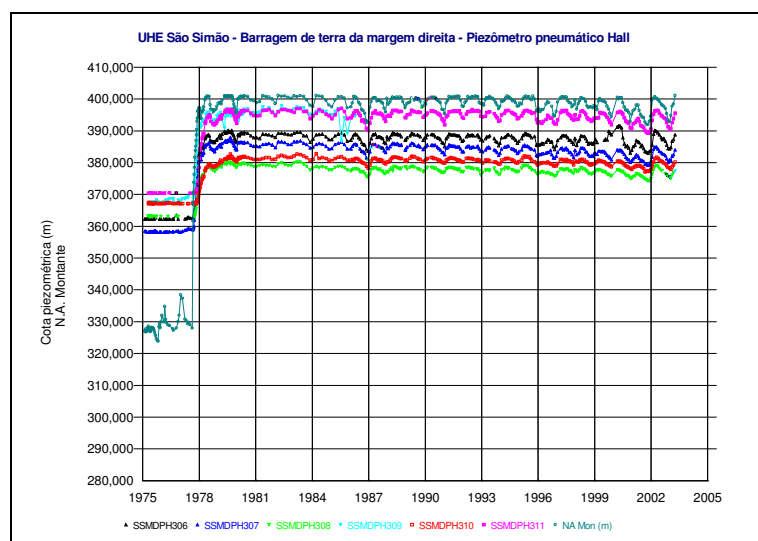


Figura 5.1 – Registros Típicos das Leituras dos Piezômetros Instalados na BTMD

No caso da seção 1 (Figura X.1 do Anexo X), as diferenças de elevação piezométricas entre os valores registrados pelos piezômetros Casagrande instalados na fundação - PC101 e PC102 – e os valores de projeto (Tabela 5.1) justificam-se devido às características geotécnicas dos solos locais de fundação. Com efeito, o solo transportado existente nesta zona da barragem possui uma elevada permeabilidade (da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  m /s, muito superiores à permeabilidade do aterro compactado, com valores estimados entre  $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s), atua como um tapete drenante, favorecendo o fluxo e contribuindo, assim, para a baixa geração de poropressões. Adicionalmente, a presença do tapete impermeabilizante à montante contribui também para esta condição favorável, indicando a boa eficiência deste sistema dispositivo (a perda de carga medida atualmente indica uma coluna de 1,7 m.c.a. entre os dois instrumentos, em uma distância horizontal de 29,0 m). As pequenas variações observadas nas leituras estão em sintonia com as oscilações correspondentes do nível do reservatório.

Na seção 2 (Figura X.2 do Anexo X), os piezômetros Casagrande de fundação também indicam leituras inferiores às de projeto, por razões similares às discutidas para a seção 1, em face dos fluxos concentrados em zonas mais permeáveis de solo transportado (PC202 e PC203) e de solo residual de basalto (PC201). As perdas de carga atualmente registradas entre os piezômetros PC201/PC202 e PC202/PC203 são de 3,94 m.c.a. e 3,52 m.c.a. em uma distância horizontal de 29,0 m e 25,0 m, respectivamente, configurando-se, assim, um fluxo bem regularizado.

A seção 3 (Figura I.6 do Anexo I) está situada no trecho da ombreira no qual foram executadas bermas de montante e de jusante, sem a implantação de sistema de drenagem interna. A remoção dos materiais permeáveis de fundação ocorreu apenas no trecho central da barragem, sendo mantidos, entretanto, nas zonas de fundação das bermas. A influência deste fato é bem evidenciado pela resposta distinta dada pelos piezômetros Casagrande instalados no trecho central – PC301 – e sob a berma de jusante – PC302 e PC303 (Tabela 5.1 e Figura 5.2).

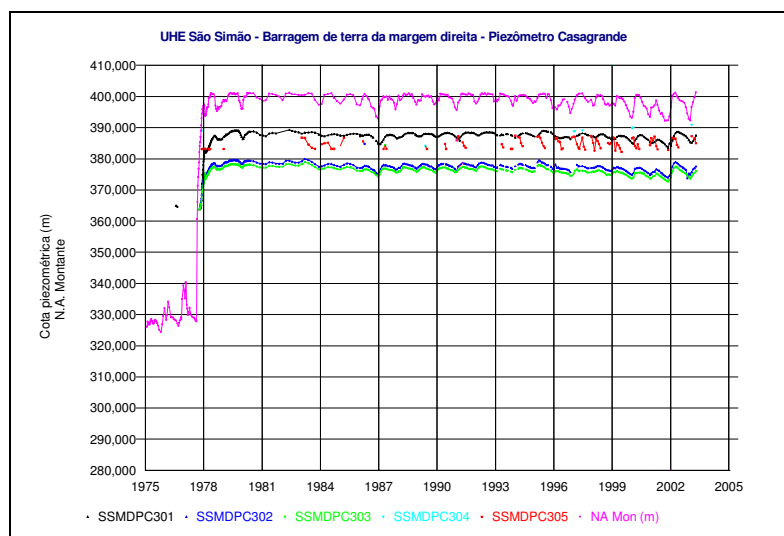


Figura 5.2 – Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 3 - BTMD

Para os piezômetros PC301 e PC302, ambos instalados em solo residual, a perda de carga é de 10,57 m.c.a. em uma distância vertical de 46,1 m e isso se deve ao fato de existir uma camada de solo transportado logo acima do bulbo drenante do PC302, que funciona como um tapete drenante, ajudando a diminuir a carga piezométrica. Por outro

lado, a perda de carga medida atualmente é de apenas 1,57 m.c.a. entre os piezômetros instalados na fundação sob a berma de jusante (PC302 e PC303), ao longo de uma distância horizontal de 50,0 m.

Oito piezômetros pneumáticos tipo Hall (PH301-PH308) estão também instalados nas zonas de fundação da seção 3 e ratificam os resultados anteriores, constatando-se a boa confiabilidade das leituras mediante a correlação entre os valores medidos pelos pares PH306/PC301 e PH308/PC302, instalados próximos entre si. Os registros demonstram também problemas de leituras envolvendo os piezômetros PH305 e PH307, uma vez que o segundo registra elevações piezométricas superiores às do primeiro, que se encontra, entretanto, localizado mais à montante. Assim, através da comparação com as leituras dos piezômetros vizinhos, constata-se que provavelmente isto se deve a erros de identificação dos dados destes dois piezômetros, cujos registros devem estar trocados. Outras possibilidades possíveis podem ser representadas pela quebra brusca do fluxo condicionado por estruturas permeáveis locais de caráter tridimensional ou problemas específicos de funcionamento do piezômetro PH305.

Três piezômetros pneumáticos (PH309 - PH311) estão instalados próximos à interface aterro compactado/fundação, sendo que o PH309 encontra-se danificado. A diferença de carga entre os piezômetros PH304 (fundação) e PH311 (aterro) é de 5,85 m.c.a. em uma distância vertical de cerca de 8,0 m. Esta diferença, no caso dos piezômetros PH307 (fundação) e PH310 (maciço/fundação), é da ordem de 3,6 m.c.a. em uma distância vertical de 8,9 m. Os gradientes correspondentes, 0,73 e 0,40, respectivamente, são pequenos e aceitáveis, não sendo motivo de maiores preocupações. Os piezômetros Casagrande PC304 e PC305, instalados no maciço de random compactado da berma de jusante encontram-se sistematicamente secos, com exceção de leituras mínimas e esporádicas em épocas de chuvas intensas (Figura 5.2). Outros cinco piezômetros pneumáticos (PH312 - PH316) foram instalados ao longo do aterro, sendo que o PH309 encontra-se danificado. Nesta região, as diferenças de cargas entre os piezômetros PH316 e PH314 e entre os piezômetros PH314 e PH310 são, respectivamente, de 0,45 m.c.a. em uma distância vertical de 10,0 m e de 11,52 m.c.a. em uma distância vertical de 8,0 m, valores aceitáveis e sem maiores restrições.

Na seção 5 (Figura I.8 do Anexo I), na região do contato núcleo argiloso / fundação, realizou-se um tratamento da fundação com argamassa e asfalto, estimando-se uma permeabilidade pós-tratamento da fundação de  $3 \times 10^{-8}$  m/s. Três piezômetros estão instalados nas fundações (PC501 - PC503) e dois do maciço, imediatamente acima do tapete drenante tipo sanduíche na zona do cascalho de terraço (PC504 e PC505).

O PC501 encontra-se no contato entre a rocha sã (fundação) e o núcleo argiloso e tem indicado, sistematicamente (desde o enchimento), leituras piezométricas muito elevadas (Figura 5.3) e superiores aos valores de projeto (Tabela 5.1). Ensaio de rebaixamento executado neste piezômetro indicou um valor de permeabilidade da fundação da ordem de 17 vezes superior ao valor previsto para a condição pós-tratamento. Entretanto, em função de sua posição no maciço, estes efeitos são pouco significativos em termos da estabilidade da barragem.

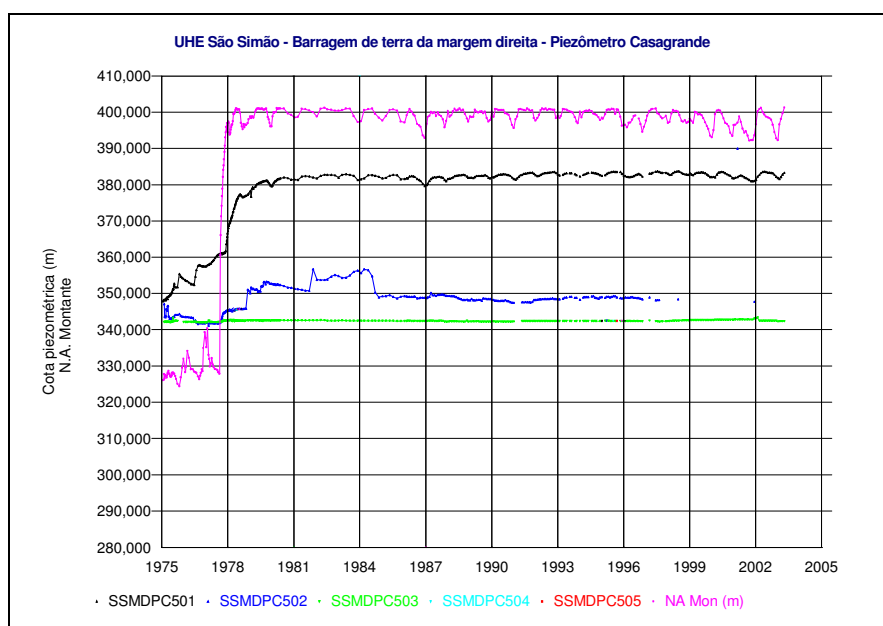


Figura 5.3 – Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 5 - BTMD

O PC502 encontra-se seco atualmente, mas trata-se de um instrumento que tem registrado um comportamento estranho desde a sua instalação; sendo assim, suas leituras não são confiáveis e recomenda-se, portanto, sua lavagem e posterior aferição de novas leituras.

O PC503 encontra-se em contato direto com o tapete drenante e suas leituras são coerentes com os valores previstos e evidenciam o bom desempenho do tapete drenante. Os piezômetros PC504 e PC505 encontram-se secos desde a sua instalação, ratificando também o ótimo desempenho do filtro chaminé e do tapete drenante “sanduíche”.

A instrumentação das zonas de transição entre as estruturas de concreto e as barragens da UHE São Simão consistiu basicamente na instalação de piezômetros posicionados nas interfaces ou próximos às interfaces concreto / maciços de terra. Na Transição N<sup>o</sup> 1 (BTMD), foram instalados 8 piezômetros pneumáticos tipo Hall, sendo 4 no contato com a face da estrutura de concreto e 4 a distâncias de 10,0 m da mesma (Figura 5.4 e Tabela 5.3).

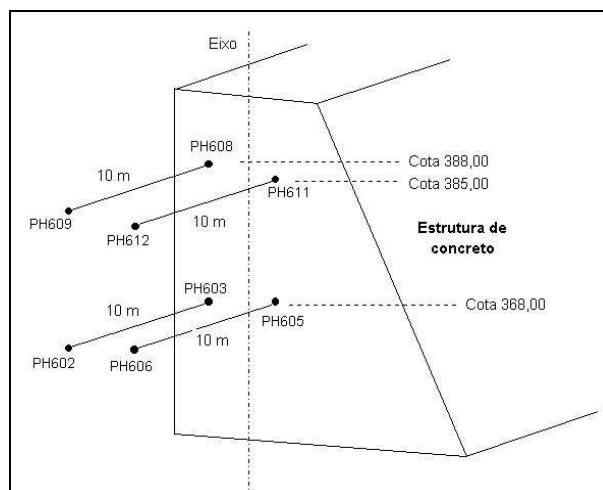


Figura 5.4 – Esquema da Localização dos Piezômetros Pneumáticos - Transição N<sup>o</sup> 1

Tabela 5.3 – Características Gerais dos Piezômetros Pneumáticos - Transição N<sup>o</sup> 1

Piezômetro		Distância à Face (m)	Estaca	Afast. (m)	Cota da Célula (m)	Cota Piez. Atual (m)
Seção 6	PH603	0,0	1 + 436,5	2,5 Mont.	368,0	382,1
	PH605	0,0	1 + 436,5	2,0 Jus.	368,0	381,9
	PH608	0,0	1 + 439,2	5,0 Mont.	388,7	396,1
	PH611	0,0	1 + 438,7	2,0 Jus.	385,0	385,7
	PH602	10,0	1 + 426,5	7,5 Mont.	368,0	382,9
	PH606	10,0	1 + 426,5	2,5 Jus.	368,0	381,8
	PH609	10,0	1 + 428,7	7,5 Mont.	388,7	392,1
	PH612	10,0	1 + 428,7	2,5 Jus.	385,0	385,5

Adicionalmente, instalou-se um piezômetro Casagrande (PC601) no interior do filtro inclinado e junto ao paramento de jusante para controle de potenciais anomalias do fluxo nesta região da interface (Figura I.9 do Anexo I deste trabalho).

Os dados dos piezômetros pneumáticos indicam uma condição geral de estabilidade, a menos das variações decorrentes das oscilações do nível do reservatório (Figura 5.5).

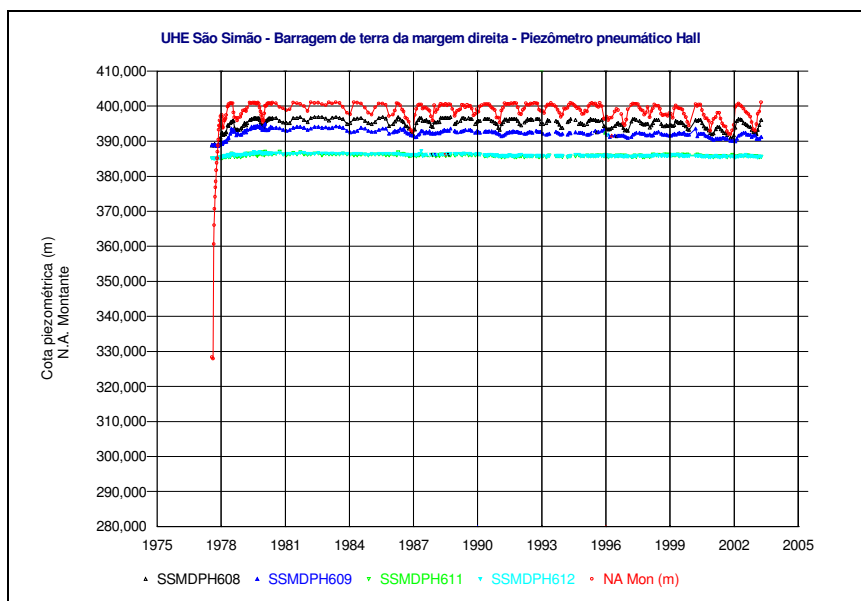


Figura 5.5 – Registros das Leituras de Alguns Piezômetros Instalados na Transição Nº 1

Quase todos os valores das elevações piezométricas atuais são superiores aos de projeto, exceto no caso dos piezômetros PH609, PH611 e PH612, sem que nenhum deles, contudo, ultrapasse os valores limites prescritos de projeto (Tabela 3.8a). Em geral, as diferenças de carga são reduzidas, a não ser no trecho mais elevado da interface, quando são significativas (piezômetros PH608 e PH609). Isto se justifica devido à mobilização crescente dos alvíos de tensão por atrito ao longo do contato núcleo – concreto.

A condição quase que de equalização das leituras piezométricas no caso dos medidores PH602, PH603, PH605 e PH606, todos instalados na mesma elevação, porém, a diferentes distâncias da interface, contraria o previsto, em função de que deveria ocorrer um gradiente maior de pressões no contato com a estrutura de concreto.



Uma possível explicação para isso é a existência de uma potencial intercomunicação entre os pontos de medida, todos localizados numa zona muito restrita da barragem. Tomando-se como referência a localização do piezômetro PH608 (Figura 5.5), as diferenças de carga atuais indicaram os seguintes valores: 13,94 m.c.a. em uma distância vertical de 30,0 m entre os piezômetros PH608 e PH603, 10,4 m.c.a. em uma distância vertical de 7,0 m entre os piezômetros PH608 e PH611 e 3,92 m.c.a. em uma distância horizontal de 10,0 m entre os piezômetros PH608 e PH609.

Os critérios de projeto estabeleceram que, mesmo registros da ordem de 5,0 m a 6,0 m superiores aos valores pré-estabelecidos de projeto para as elevações piezométricas destes instrumentos instalados nas zonas da Transição N<sup>o</sup> 1, não implicariam em problemas para as condições de segurança da barragem, desde que o medidor Casagrande PC601 permanecesse sempre seco. Isto, entretanto, não se verifica atualmente, uma vez que o piezômetro PC601 tem registrado cargas desde 1993, com tendência de incremento futuro. Tal fato é preocupante, na medida em que traduz um desempenho inadequado do filtro vertical, que apresenta potenciais efeitos de colmatção. Assim, recomenda-se a imediata lavagem do piezômetro e a execução de uma nova leitura; caso se confirme o indício de colmatção do sistema de drenagem interna, torna-se imprescindível uma reavaliação das condições de estabilidade da barragem para as novas condições operacionais.

- **Barragem de terra e enrocamento - Margem Esquerda**

Do conjunto das dez seções instrumentadas da barragem de terra e da barragem de terra e enrocamento da margem esquerda, sete (seções 0, 1, 5, 6, 7, 8 e 9) foram instrumentadas com piezômetros Casagrande (maciço e fundações), Pneumáticos Hall (fundações e filtro da barragem) e Maihak (maciço), estes últimos hoje totalmente desativados. As seções principais são a seção 8, localizada no canal do rio, a seção 9 junto à Transição N<sup>o</sup> 2 e a seção 1, situada na ombreira esquerda da barragem.

A seção 0 foi instrumentada posteriormente (1995) com o objetivo básico de se avaliar potenciais fluxos oriundos da ombreira esquerda da barragem. Os registros comprovam

este fluxo e seu total condicionamento para o sistema de drenagem interna da barragem, uma vez que o piezômetro PC004, localizado imediatamente acima do tapete drenante, encontra-se em estado seco a maior parte do tempo (Figura XI.1 do Anexo XI).

Aliados à piezometria, medidores de NA foram instalados em quatro seções adicionais (seções 0, 2, 3 e 4), ao longo da região da encosta lateral ao canal do rio (Figuras I.11 e I.13-I15). Atualmente, somente o medidor MN004, localizado na Seção 0, fornece ainda leituras sistemáticas, correspondentes às variações do NA do reservatório, com leitura atual de 380,31 m (Figura XIII.1 do Anexo XIII).

A seção 1 (Figura I.11 do Anexo I) é composta por espaldares de cascalho de terraço com núcleo central de argila, com tapete impermeabilizante à montante do eixo da barragem (entre as estacas 3 + 207,0 a 2 + 700,0) e assentada sobre os derrames 5 e 6 (Tabela 3.1). Além disso, em toda a extensão da fundação, procedeu-se a um processo de tratamento por injeção, ora pela aplicação de “slush-grout”, ora por calda de cimento.

Foram instalados 4 piezômetros Casagrande nas fundações da Seção 1 da BTME, sendo 3 ao longo do contato alterado entre os derrames 5 e 6 e o quarto - PC104 - próximo ao contato aterro / fundação. O medidor PC102 encontra-se danificado desde 1982. Ensaios de campo mostraram que os tempos de resposta obtidos para os piezômetros PC101 e PC103 foram excessivamente altos, inviabilizando a utilização operacional destes instrumentos para o monitoramento periódico da barragem. Mais ainda, as leituras do medidor PC101 mostram uma variação repentina não justificável (ocorrida em 1994), provavelmente relacionada a problemas com o próprio piezômetro (eventual ruptura da tubulação de PVC do medidor), tornando não confiáveis as suas leituras atuais (Figura XI.2 do Anexo XI).

Os dados dos piezômetros pneumáticos de fundação (PH101-PH108 e PH112) indicam a existência de um fluxo limitado ao longo do contato entre os derrames 5 e 6, de forma independente do fluxo através do maciço (Figuras XI.4-XI.5 do Anexo XI). Com efeito, as leituras piezométricas na direção montante – jusante, ao longo da fundação, indicam reduções contínuas e perdas de carga muito pequenas, demonstrando, assim, que este

fluxo não é afetado pelo tapete drenante localizado no contato aterro / fundação. O gradiente médio de fluxo na fundação comprova a eficiência do tapete impermeabilizante e do sistema de tratamento por injeções nesta região da barragem. Outro fator que ratifica estas análises corresponde às leituras discordantes em relação aos piezômetros pneumáticos instalados no maciço (Tabela 5.2), notadamente no trecho à jusante do eixo da barragem.

Por outro lado, a evolução das leituras indica uma contínua e generalizada redução ao longo do tempo (Figura 5.6). Este comportamento geral da piezometria não está associado a um aumento correspondente das vazões de percolação (Figuras XV.1-XV.2 do Anexo XV), medidos pelos medidores de vazão.

Assim, tal fato pode ser interpretado com base em uma mudança do mecanismo de fluxo nas zonas de fundação da barragem, induzido por gradientes hidráulicos mais elevados e associado a processos de carreamento de materiais alterados ao longo do contato entre os derrames 5 e 6 e caráter multidirecional das discontinuidades locais. Outra hipótese que justificaria tal comportamento seria uma provável siltagem do reservatório. De qualquer forma, este comportamento é atípico e mereceria uma avaliação específica, incluindo-se a instalação de piezômetros em seções adjacentes.

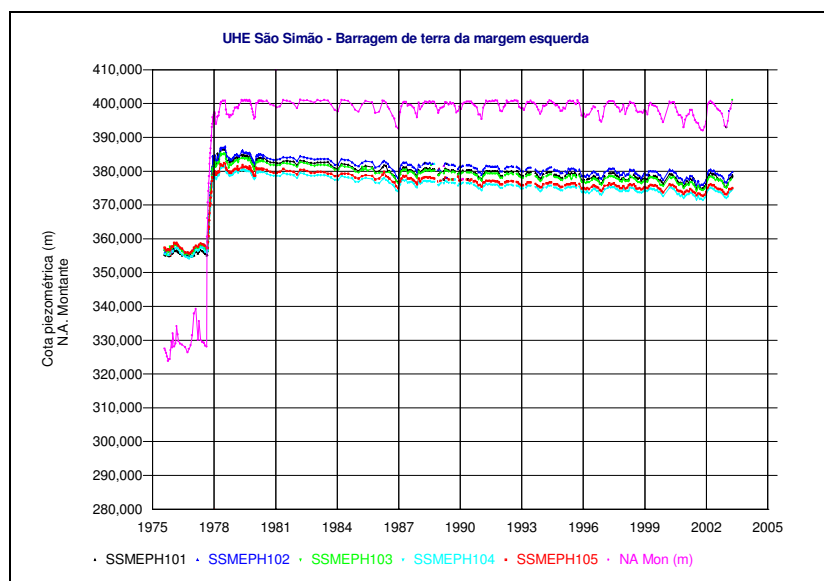


Figura 5.6 – Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 1 - BTME

No trecho à jusante, as leituras são sensivelmente superiores aos valores de projeto (PH105 a PH108 e PH112), embora inferiores aos limites. Estes valores, apesar de elevados, não são críticos, pois as análises de estabilidade mostram valores de FS com relação ao escorregamento em torno de 2,0 para superfícies de ruptura passantes pela fundação para esta distribuição de subpressões. Assim, os critérios de projeto admitiram valores de subpressões maiores que os valores previstos em projeto desde que os piezômetros do aterro nesta área mantenham-se dentro dos valores limites prescritos. Na situação atual, pode-se dizer que esta condição prevalece, uma vez que apenas os medidores PH114, PH110 e PC104 indicam valores ligeiramente superiores aos de projeto.

Por outro lado, as leituras atuais do piezômetro PH115, localizado imediatamente acima do tapete drenante, confirmam as prescrições de projeto e, assim, comprovam o bom desempenho desta estrutura drenante da barragem.

Na seção 5 (Figura I.16 do Anexo I), foram instalados apenas dois piezômetros: o PC501, posicionado no tapete drenante, acusa valores piezométricos sempre nulos desde a sua instalação e o PC502, posicionado nas rochas de fundação, registra uma elevação piezométrica superior à estipulada em projeto, mas inferior ao valor limite.

Entretanto, a variação dos registros ao longo do tempo indica problemas de mau funcionamento deste instrumento (Figura XI.6 do Anexo XI), fazendo-se necessária a sua recuperação por lavagem para posterior retomada das leituras.

Na seção 6 (Figura I.17 do Anexo I), foram instalados 4 piezômetros Casagrande (PC601 a PC604) na zona do derrame 2 da fundação e mais 2 (PC605 e PC606) na camada de aluvião subjacente ao aterro da ensecadeira de jusante (ensecadeira “E”).

Todos os medidores apresentam níveis piezométricos próximos ou inferiores à cota do topo da ensecadeira de jusante, evidenciando, então, que a camada de aluvião funciona como um tapete drenante natural, contribuindo de forma decisiva no processo de drenagem pela fundação.

Um outro aspecto interessante é que ambos os instrumentos, embora localizados bem à jusante da barragem, apresentam tempos de resposta muito rápidos em relação a variações do nível do reservatório (Figura 5.7), em função da conexão direta entre a camada de aluvião e o enrocamento de base da barragem, com provável continuidade através de feições ao longo da rocha de fundação, apesar da execução de uma cortina de injeção sob o trecho central da barragem.

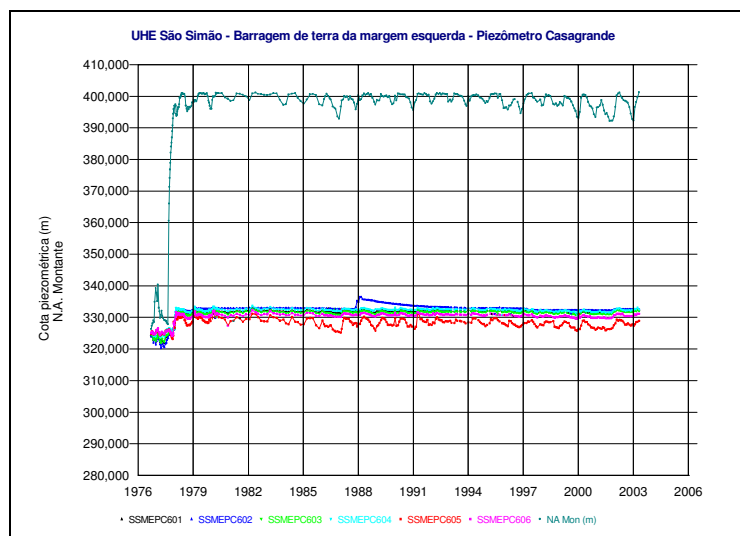


Figura 5.7 – Registros das Leituras dos Piezômetros Instalados na Seção 6 - BTME

Por outro lado, observa-se um comportamento discrepante entre as leituras dos piezômetros PC605 e PC606, em que o segundo (mais à jusante) indica uma elevação piezométrica maior que a do primeiro, tendo ambos a mesma cota de instalação. Neste contexto, a anomalia das diferenças das leituras somente se justifica em função de uma possível contribuição adicional ao piezômetro mais à jusante (PC606) através de descontinuidades na fundação.

Na seção 7 (Figura I.18 do Anexo I), foram instalados 2 piezômetros Casagrande no derrame 2 de fundação e 1 no enrocamento de base da barragem. Os níveis piezométricos indicam uma condição essencialmente similar à da seção anterior, sendo mantidos sempre abaixo da cota do topo da enscadeira de jusante, bem estabilizados e com valores muito próximos entre si, configurando-se, desta forma, um processo de drenagem incipiente na fundação que é condicionada pela presença da camada de

aluvião (a perda de carga total entre os piezômetros PC701 e PC704 é da ordem de 0,64 m.c.a. ao longo de uma distância horizontal de 100,73 m).

A seção 8 (Figura I.20 do Anexo I) corresponde a uma seção no leito do rio e, por isso, foi bem instrumentada, comportando piezômetros instalados na fundação, no maciço e no tapete drenante da barragem. Na fundação, foram instalados os piezômetros pneumáticos PH801, PH802 (danificado atualmente) e PH803 no interderrame 1 (trecho central da barragem) e o piezômetro Casagrande PC801 nos basaltos do derrame 2 (trecho à jusante).

Logo em seguida ao enchimento do reservatório, os piezômetros pneumáticos da fundação indicaram reduções bruscas de níveis, que chegaram a valores da ordem de 10,0 m (Figura 5.8a), recuperando os níveis originais apenas em meados de 1983, cerca de 5 anos de pós-enchimento. Como este comportamento não foi registrado pelo piezômetro PH804, trata-se de um fato intrinsecamente vinculado ao processo de tratamento da zona permeável delimitada pelo interderrame 1. Com a elevação do nível do reservatório, os maiores gradientes hidráulicos devem ter propiciado o carreamento de finos (materiais de preenchimento local de zonas mais susceptíveis à lixiviação no interior do interderrame 1), resultando em uma maior permeabilidade da fundação, e, conseqüentemente, a queda acentuada das subpressões medidas.

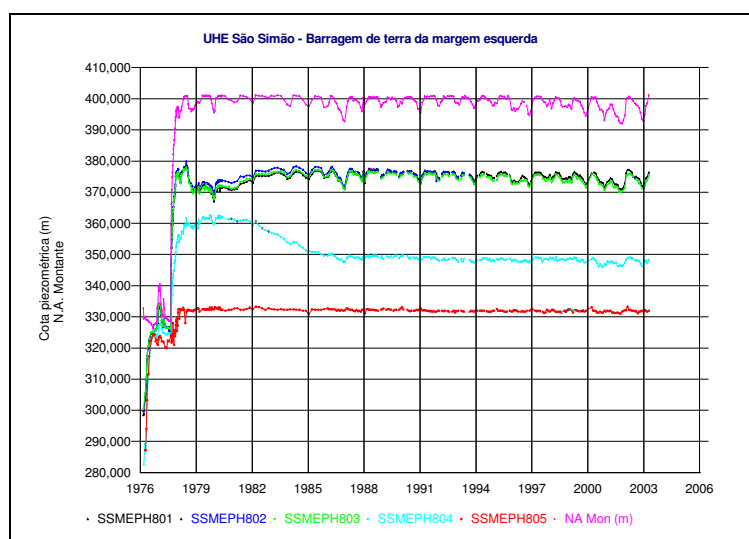


Figura 5.8a – Registros das Leituras de Piezômetros Instalados na Seção 8 - BTME

Os parâmetros de projeto consideraram uma perda de carga de, no mínimo, 19,0 m.c.a. entre os piezômetros PH801 e PH803, espaçados de 67,1 m e admitidos como instalados em zonas opostas da cortina de injeção. Nos valores atuais, entretanto, esta diferença de carga é de apenas 1,09 m.c.a., indicando que a zona de injeção estendeu-se ao domínio dos dois piezômetros. De qualquer forma, estes dados mostram que praticamente não se tem nenhum fluxo pela fundação e que as injeções de impermeabilização apresentam uma eficiência adequada.

Por outro lado, os piezômetros localizados na zona inferior do aterro e, portanto, próximos ao domínio da injeção de fundação, apresentam comportamentos opostos aos piezômetros de fundação, seja através de uma tendência contínua de redução das pressões medidas ao longo do tempo, como ocorre no caso dos medidores PH806, PH807 e PH808 (Figura 5.8b), seja através de uma redução mais rápida e brusca, como no caso do piezômetro PH804, localizado na região de interface entre o aterro e a zona tratada da fundação (Figura 5.8a). A diferença de carga entre os piezômetros PH804 (aterro) e PH803 (fundação) é de 27,15 m.c.a. em uma distância de apenas 12,0 m. Este gradiente elevado somente se explica admitindo-se uma condição de fluxo independente do maciço da barragem e o fluxo quase inexistente pela fundação, fato ratificado pelas cargas hidráulicas (leituras do piezômetro PC803) medidas no tapete drenante à jusante.

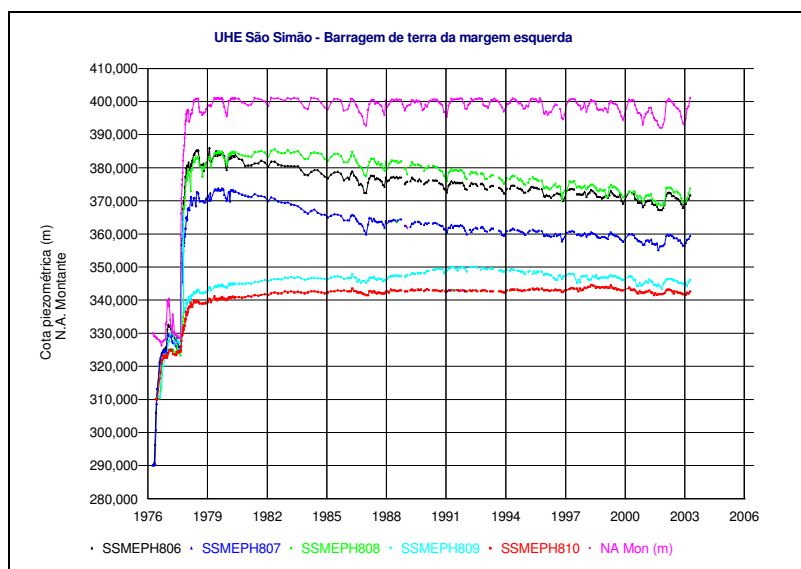


Figura 5.8b – Registros das Leituras de Piezômetros Instalados na Seção 8 – BTME

Os demais piezômetros do aterro indicam valores consistentes com os previstos e inferiores aos valores limites, demonstrando que o fluxo está concentrado praticamente no aterro da barragem, corroborando ainda o desempenho adequado do núcleo argiloso e do sistema de drenagem interna.

Na seção 9 (Figura I.21 do Anexo I), os estudos de piezometria visaram estudar o comportamento das poropressões geradas na zona de interface entre as estruturas de concreto e a BTME, através de 18 piezômetros (12 pneumáticos tipo Hall e 6 elétricos tipo Maihak, estes últimos inoperantes há muitos anos). Os piezômetros pneumáticos estão instalados tanto na face como afastados da mesma, para montante ou para jusante. Além dos piezômetros, foram instaladas 7 células de tensões, cujo comportamento é analisado no item seguinte.

A Figura 5.9 apresenta os registros de alguns destes instrumentos. De um modo geral, os piezômetros acusaram resposta imediata ao enchimento do reservatório e mostram-se sensíveis às variações do nível d'água. Esta seção constitui a mais crítica da UHE São Simão em termos do comprometimento e perda da instrumentação geotécnica. Com efeito, além dos piezômetros PH910 e PH913 danificados, o piezômetro PH916 mostra comportamento bastante atípico, ao passo que os piezômetros PH920 e PH921 indicam leituras incompatíveis com os valores da piezometria local. Estes problemas implicam a perda da confiabilidade nestes registros.

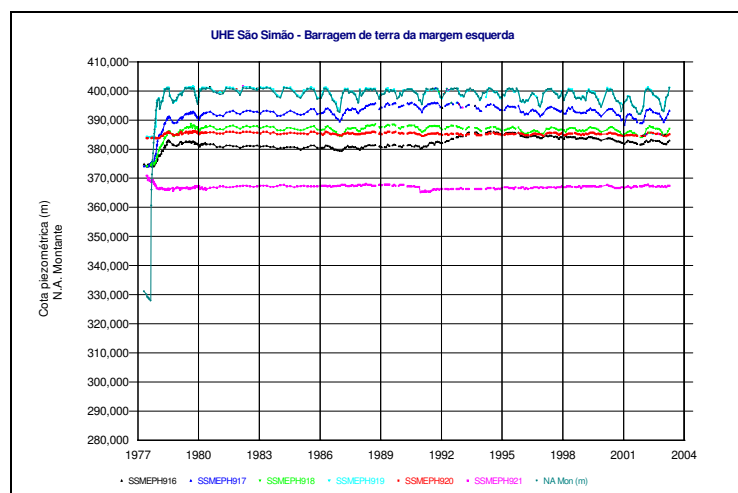


Figura 5.9 – Registros das Leituras de Piezômetros Instalados na Seção 9 - BTME



Por outro lado, as leituras atuais são genericamente superiores aos valores estimados em projeto e, no caso particular do piezômetro PH916, superiores inclusive ao valor limite prescrito. Os elevados níveis piezométricos indicados pelos piezômetros PH911, PH914 e PH919, localizados próximos à face de montante da Transição N<sup>o</sup> 2, essencialmente similares aos do reservatório, indicam problemas de eficiência da zona impermeável de abraço da estrutura de concreto. Estes resultados já tinham sido relatados previamente (IESA II, 1980), sendo sugerido naquela ocasião as possibilidades de um descolamento entre o aterro e a estrutura de concreto e/ou fraturamento hidráulico no trecho de contato. As perdas estão concentradas nas faces laterais e uma discussão mais abrangente das distribuições de tensões nesta zona da barragem é feita no item seguinte.

### 5.3. – Células de Tensões Totais

Foram instaladas 7 células de tensões totais na barragem de terra e enrocamento da UHE São Simão, todas concentradas na Seção 9 da Transição N<sup>o</sup> 2 (Tabela 5.4), posicionadas de forma estratégica junto aos piezômetros descritos previamente (Figura I.21 do Anexo I).

Assim, com base nas leituras das tensões totais horizontais das células (ou tensões totais verticais, no caso da célula PT903) e das poropressões registradas pelos piezômetros, torna-se possível estabelecer os valores correspondentes das tensões efetivas e a distribuição de tensões locais.

Tabela 5.4 – Distribuição de Tensões na Área da Transição N<sup>o</sup> 2 - Seção 9

Elevação (m)	Célula de Tensão Total	Piezômetro Adjacente	Poropressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão Total (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão Efetiva (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão Total / Poropressão
Aprox. 354,0	PT901*	PH911	4,522	4,276	-0,246	0,94
	PT902	PH910	-	1,896	-	-
	PT903	PH912	3,322	5,176	1,854	1,56
	PT904	PH912	3,322	4,181	0,859	1,26
Aprox. 383,0	PT905	PH919	1,66	2,175	0,515	1,31
	PT906	PH920	0,191?	1,403	1,212	7,14?
360	PT907	-	-	1,268	-	-

\* PTXXX: PT – Célula de Tensão Total / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento; ? valores não confiáveis.

As células de tensão total PT901a PT904 foram instaladas na cota 354,0 m, no contato entre o núcleo e o concreto, nas seguintes posições: a primeira na face de montante, a segunda no contato de jusante entre o cascalho de terraço e o concreto, a terceira no interior do núcleo e a 1,0 m de distância da face transversal e a quarta na face transversal da estrutura de transição. Por outro lado, as células PT905, PT906 e PT907 foram instaladas, respectivamente, nas faces montante, transversal e jusante da estrutura de concreto, na cota 384,0 m, estando as duas primeiras no contato do núcleo e a última no contato do filtro. Somente a célula PT907 não possui um piezômetro adjacente à mesma. Os valores registrados pelas células estão apresentados na Figura 5.10.

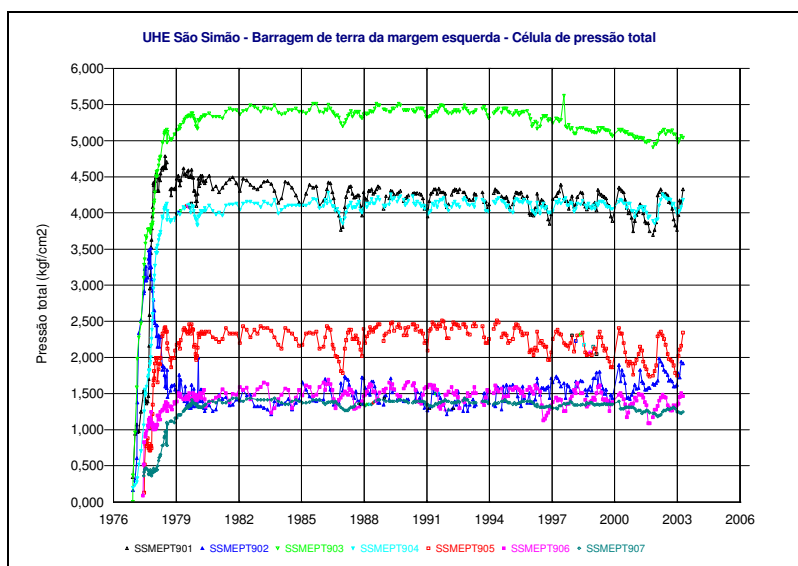


Figura 5.10 – Leituras das Células de Tensões Totais Instaladas na Seção 9 – BTME

Constata-se que as leituras dos instrumentos são fortemente condicionadas pelas variações do nível d' água do reservatório. Pelos comentários anteriores, as leituras das células não puderam ser associadas aos registros dos piezômetros PH910 (danificado) e PH920 (não confiável). É razoável admitir que as poropressões das células PT903 e PT904 sejam essencialmente iguais, uma vez que as mesmas estão interligadas por uma camada de areia e que as poropressões na área de influência da célula PT907 sejam nulas, pois a mesma está posicionada na região do filtro da barragem. Admite-se adicionalmente que o domínio das tensões registradas é consistente e representativo das condições in situ, apesar dos acentuados deslocamentos cisalhantes de interface.

Os valores de tensões horizontais efetivas virtualmente nulos junto á face de montante, detectados pela célula PT901, ratificam a possibilidade de descolamento ou de fraturamento hidráulico da interface solo/estrutura. De acordo com os critérios de controle pré-estabelecidos (item 3.6.3), a relação  $\sigma_h/u$  igual a 0,94 configura nível de emergência e, conseqüentemente, intervenção para um completo entendimento do problema e eventual intervenção.

Por outro lado, estes efeitos de movimentação do aterro e das estruturas de concreto tendem a ser mais significativos nas zonas superiores da interface, fato não indicado inicialmente pelas leituras da célula PT905. A partir de 1997, porém, os registros de tensões totais desta célula (idem para a célula PT901) têm indicado reduções contínuas dos valores de tensões totais horizontais, o mesmo ocorrendo para os valores das tensões totais verticais medidas pela célula PT903.

#### **5.4. – Medidores de Vazão**

Foram instalados 11 medidores de vazão (Figuras I.2-I.3 e I.10 do Anexo I), dotados de vertedor triangular, em pontos estratégicos das diversas estruturas, com o intuito de quantificar as vazões percoladas pela fundação e aterro.

Todas as medidas de vazões têm sido, sistematicamente, inferiores aos parâmetros de controle (Tabela 5.5) e acompanham as correspondentes oscilações do reservatório (Figura XIV.1 do Anexo XIV e Figuras XV.1-XV.2 do Anexo XV). Variações bruscas ou valores de pico das vazões estão associados comumente a épocas de chuvas elevadas. Valores médios das vazões totais e específicas atuais (junho/2003), percoladas pelas barragens da UHE São Simão, são dadas na Tabela 5.6.

Na BTMD, os medidores VV001 e VV002 estão posicionados, respectivamente, no nível do terreno natural, quantificando as vazões pelo aterro acima do tapete drenante tipo ‘sanduíche’, entre as estacas 0 + 900,0 e 1 + 444,5 (na área da Transição N<sup>o</sup> 1) e no nível de fundação, para a medida tanto das vazões pela fundação como aquelas coletadas pelo tapete de enrocamento no contato aterro / fundação.

Tabela 5.5 – Valores de Vazões nas Barragens da UHE São Simão

Medidor de Vazão	Vazão de Controle (l/s)	Vazão Medida (l/s) (junho/2003)
VV004*-BTME	9,3	1,261
VV005-BTME	8,3	1,54
VV006-BTME	11,3	3,978
VV007-BTME	5,9	1,854
VV009-BTME	1,0	0,328
VV010-BTME	29,2	14,643
VV011-BTME	49,8	21,051
VV012-BTME	1,0	0,003
VV013-BTME	10,3	4,522
VV001-BTMD	25,5	5,109
VV002-BTMD	3,4	0,039

\* VVXXX: VV – Medidor de vazão / XXX - N<sup>o</sup> do instrumento

Tabela 5.6 – Vazões Totais e Específicas das Barragens da UHE São Simão

Barragem	Extensão (m)	Altura Máxima (m)	Vazão Total (l/min)	Vazão Específica (l/min/m)
BTMD	1260	71	308,9	0,25
BTME	952	64	2950,8	3,10

Neste segundo caso, as vazões aumentam bastante na época de chuvas e chegaram a ser cerca de 37 vezes superior ao valor inicial estimado em projeto (0,6 l/s). As baixas leituras piezométricas dos medidores instalados nesta região da barragem demonstram, entretanto, que a capacidade drenante do sistema de drenagem interna da BTMD é muito superior à estimada em projeto e justifica a reavaliação substancial deste valor limite adotado por Silveira e Ávila, em 1995 (25,5 l/s).

No caso da BTME, diferentes medidores foram instalados para garantir a medição das vazões percoladas em diferentes zonas da barragem, captadas das fundações, aterro, sistema drenante e ombreiras. Em todos os casos, as vazões medidas apresentam nítida tendência de redução ao longo do tempo (Figura 5.11).

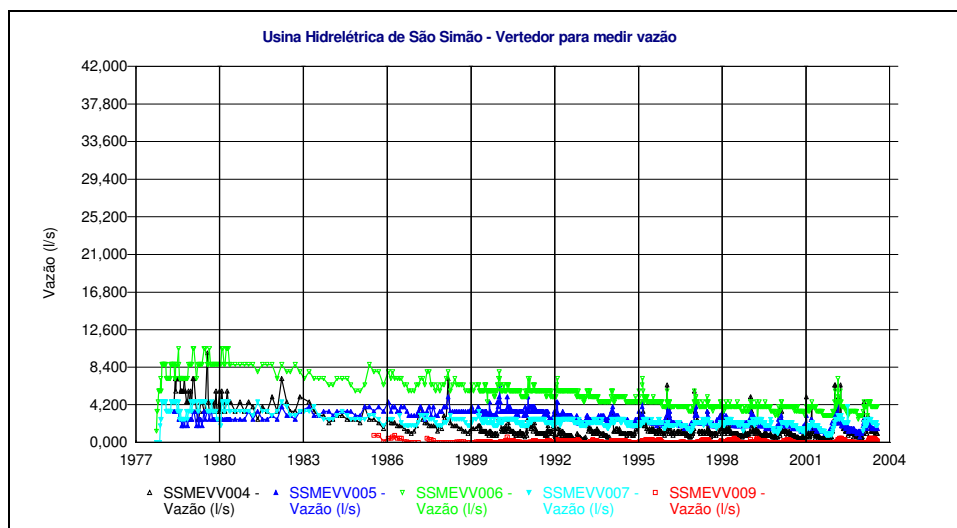


Figura 5.11 – Registros das Leituras de Vazões dos Medidores Instalados na BTME

O sistema de captação, instalado na região da estaca 2 + 763,0 (medidores VV004 - VV006), foi projetado para coletar as águas percoladas pela fundação e pelo aterro, entre as estacas 2 + 763,0 e 2 + 944,5. Na região da estaca 3 + 200,0 (medidor VV007), o sistema está localizado no pé do talude da berma de jusante e visa captar as vazões de fundação e percoladas pelo aterro, entre as estacas 2 + 944,5 e 3 + 562,0. Os mesmos comentários relativos à consistência dos procedimentos de reavaliação dos parâmetros de controle das vazões dos medidores da BTMD aplicam-se também nestes casos (Tabela 5.5).

Com o enchimento do reservatório, ocorreram uma série de infiltrações na parte alta da ombreira esquerda, a partir da estaca 3 + 200,0 e nos taludes de escavação para acesso à berma da barragem de enrocamento, próxima à estaca 2 + 690,0, que mereceram estudos e avaliações específicas por parte de consultores internacionais (Casagrande, 1978; Low, 1978). Medidores específicos de vazões foram projetados, então, especificamente para captar estas infiltrações (medidores VV009 - VV013).

## **Capítulo 6**

### **Conclusões e Sugestões Para Futuras Pesquisas**

#### **6.1. – Considerações Finais**

Este trabalho compreendeu a análise dos dados de auscultação por instrumentação de uma obra geotécnica de grande porte, representada por uma barragem de terra e enrocamento destinada à geração de energia elétrica. Neste contexto, os procedimentos de auscultação constituem parte integrante de projeto, visando, entre outros objetivos, a previsão do comportamento da obra e a aferição das premissas adotadas.

Preliminarmente, fez-se uma abordagem geral sobre os princípios, a natureza e as características dos principais instrumentos utilizados para aferição do comportamento geotécnico de uma barragem, durante suas fases de construção, enchimento e pós-enchimento. Especificamente, foram enfatizados os campos de aplicação de cada um destes instrumentos e a potencial localização dos mesmos neste tipo de estrutura, bem como as principais vantagens e limitações dos mesmos. Fez-se ainda uma abordagem geral sobre os princípios e metodologias adotadas num processo de auscultação por instrumentação de uma barragem de terra e enrocamento no contexto de um aproveitamento hidrelétrico.

A aplicação destes princípios a um estudo de caso caracterizou a síntese da proposta deste trabalho. No caso, optou-se por um empreendimento hidrelétrico de grande porte caracterizado pelos seguintes elementos (i) dotado de um excelente projeto de instrumentação, compreendendo instrumentos de diferentes naturezas e concepções; (ii) dotado de um histórico longo de medições, que contemplasse um registro circunstanciado da vida útil do empreendimento; (iii) dotado de um processo direto e consistente de aquisição de dados ao longo deste tempo; (iv) dotado de informações técnicas adequadas e coerentes em relação ao próprio projeto, geometria dos maciços e condicionantes geológico-geotécnicos das fundações; (v) disponibilidade e acesso a este conjunto de dados de projeto.

Através do apoio da CEMIG – Centrais Energéticas de Minas Gerais S.A., a escolha recaiu em um dos mais importantes empreendimentos hidrelétricos do Brasil e o de maior potencial de geração de energia elétrica do estado de Minas Gerais. Trata-se, na verdade, não de uma barragem, mas de três barragens associadas numa estrutura de barramento comum. Esta estrutura, com cerca de 3.600,0 m de extensão, engloba duas barragens de terra, uma barragem de concreto, duas transições laterais e uma barragem de terra e enrocamento. O trabalho proposto compreendeu a análise dos resultados da instrumentação destas barragens, ao longo de 25 anos de operação da usina hidrelétrica, em termos de deslocamentos verticais e horizontais, poropressões e tensões totais e vazões de percolação, após a integração e sistematização dos dados que caracterizaram a concepção e a implantação do projeto.

## **6.2. – Conclusões**

### **6.2.1. – Deslocamentos Verticais e Horizontais**

A comparação direta entre os recalques medidos pelos diferentes instrumentos instalados nas barragens da UHE São Simão deve ser feita com bastante cautela, levando-se em conta que os mesmos foram instalados em épocas distintas e, assim, a magnitude relativa dos valores deve contemplar estas diferenças de leituras. A título de ilustração, a Tabela 6.1 apresenta a comparação destes resultados para os medidores de recalques situados numa mesma zona de instrumentação da Seção 2 da barragem de terra da margem direita.

Assim, por exemplo, o inclinômetro IR116, instalado no núcleo argiloso da BTMD e cuja primeira leitura foi realizada em 13/07/75, apresentava um recalque prévio igual a + 0,7 cm (leitura feita em 27/07/75), quando da instalação do medidor de recalques tipo IPT designado como IP202, posicionado na mesma zona da barragem e próximo ao inclinômetro IR116, em 28/07/75. Análises similares foram feitas para os demais instrumentos e seções das barragens analisadas. Em todas as condições analisadas, os valores medidos pelos diferentes instrumentos mostraram-se bastante aproximados e consistentes com os valores previstos em projeto.

Tabela 6.1 – Comparações Entre Valores de Recalques – Seção 2 da BTMD

Instrumento	Segmento do Tubo	Local	Estaca	Recalque Medido (cm)	Data da Primeira Leitura	Recalque Adicional* (cm)
IR100	IR110	Topo do Solo Residual	0 + 668,5	07/03/03	20/05/1975	-
				33,8	(0,0 cm)	
	IR116	Núcleo Argiloso	0 + 668,5	07/03/03 40,0	13/07/1975 (0,0)	+ 0,7 (27/07/75)
	IR120	Núcleo Argiloso	0 + 668,5	07/03/03 33,8	21/09/1975 (0,0 cm)	-
	IR125	Crista da Barragem	0 + 668,5	07/03/03 11,3	16/09/76 (0,0 cm)	+ 3,7 (08/08/77)
IP201		Solo Transportado	0 + 670,0	27/01/03	01/11/1974	+ 3,3 (21/05/75)
				39,1	(0,0 cm)	
IP202		Núcleo Argiloso	0 + 670,0	27/01/03 41,0	28/07/1975 (0,0 cm)	-
IP203		Núcleo Argiloso	0 + 670,0	27/01/03 25,8	21/09/1975 (5,6 cm)	-
MS025		Crista da Barragem	0 + 670,0	13/05/03	20/08/1977	-
				7,6	(0,0 cm)	

\* valor de recalque indicado pelo instrumento da linha correspondente quando foi instalado outro medidor de recalque na mesma área da barragem, incluindo a leitura desta medição

Os valores atuais demonstram que os recalques da barragem estão praticamente estabilizados e, em geral, bastante inferiores aos de projeto. Os maiores valores ocorreram entre as estacas 0 + 420,0 a 0 + 670,0, uma vez que, nesta zona, quase toda a fundação da barragem encontrava-se apoiada em solo transportado, com espessuras médias entre 4,0 a 6,0 m. A elevada magnitude dos recalques é possível de estar associado ao processo de colapso deste solo durante o período de enchimento do reservatório.

Os marcos superficiais registraram pequenos incrementos de recalques após a fase de enchimento do reservatório (média de 0,115 cm/ano ao longo de um período de 25 anos pós-enchimento). Particularmente no caso da 0 + 420,0, os marcos superficiais indicam magnitudes equivalentes ou mesmo superiores às previstas, demandando, assim, procedimentos de controle futuro mais intensivos. Os medidores IPT e os inclinômetros de recalque ratificam estes dados e tendências, mostrando que cerca de 90 % dos recalques ocorreram até o final do período de enchimento do reservatório.



No caso dos inclinômetros de recalques instalados na BTMD, o recalque acumulado até o final do período de enchimento do reservatório foi de 32,4 cm para as camadas locais de fundação (solo transportado + solo residual) medido no segmento IR109 (interface aterro / fundação). O recalque máximo ao longo da camada do aterro compactado foi de 42,1 cm, tendo sido registrado pelo segmento IR114 (localizado no interior do maciço de solo compactado). Na fase de pós-enchimento, as leituras mostram-se essencialmente estabilizadas. No caso da BTME, os valores registrados de recalques da fundação foram muito reduzidos, mesmo na fase de enchimento do reservatório, não ultrapassando 6,0 cm (valor medido no segmento IR213).

Em termos do monitoramento dos deslocamentos horizontais, os dados indicam uma tendência de movimentação bastante aleatória e fortemente condicionada pela seqüência construtiva das barragens, com uma tendência geral de movimentação para jusante. Em se tratando, porém, de zonas com recalques elevados, ocorre uma tendência inversa, ou seja, de movimentação da barragem para montante.

Os valores acumulados dos deslocamentos horizontais, entretanto, em todas as condições analisadas, mostraram-se sempre muito inferiores aos valores prescritos em projeto, à exceção do inclinômetro ID100 da BTME, que registra atualmente um valor de 5,0 cm (esquerda) contra 4,8 cm previsto em projeto. A distribuição dos deslocamentos obtidos não configura, porém, concentrações de deslocamentos cisalhantes na base do perfil, eliminando-se, assim, a possibilidade de potenciais zonas de ruptura nas fundações das barragens.

### **6.2.2. – Poropressões, Tensões Totais e Vazões**

A interpretação dos resultados da piezometria das barragens da UHE São Simão foi feita a partir da hipótese de fluxo geral sob regime permanente e a partir da condição de N.A. máximo do reservatório, uma vez que as variações do nível d' água são muito pequenas e sem impacto significativo nas leituras piezométricas. A análise global dos dados é bastante consistente com esta hipótese, caracterizando uma rede de fluxo uniforme, sem descontinuidades ou anomalias das perdas de carga detectadas.

A interpretação dos resultados é complexa e fortemente condicionada por aspectos de natureza diversa e, por esta razão, foram discutidos separadamente para as diferentes seções e transições das barragens, no capítulo 5. Em geral, os dados de piezometria atestam o desempenho satisfatório e regularizado dos sistemas drenantes das barragens.

No caso da BTMD, em algumas seções caracterizadas pela forte presença do solo transportado na fundação, o fluxo é concentrado em zonas mais permeáveis do mesmo. Ao longo do aterro, o fluxo se mostra controlado e uniforme, apresentando gradientes hidráulicos aceitáveis e consistentes. Problemas específicos foram detectados nas zonas da Transição N<sup>o</sup> 1, uma vez que o piezômetro Casagrande instalado no interior do filtro inclinado e junto ao paramento de jusante tem registrado cargas desde 1993, com tendência de incremento futuro, quando deveria permanecer sempre seco. Com efeito, este piezômetro foi instalado nesta posição para desempenhar a função de controle de potenciais anomalias do fluxo na região da interface solo-estrutura. Tal fato demonstra um desempenho inadequado do filtro vertical, que apresenta potenciais efeitos de colmatção. Assim, recomenda-se a imediata lavagem do piezômetro e a execução de uma nova leitura; caso sejam confirmados os problemas de colmatção, recomenda-se cuidados específicos e a reavaliação das condições de estabilidade da barragem para as novas condições operacionais.

Os dados dos piezômetros pneumáticos instalados nas zonas da fundação da BTME, submetidas a tratamentos por injeções, demonstram a eficácia do processo e a existência de um fluxo limitado pela fundação, que ocorre de forma independente do fluxo através do maciço. Entretanto, a evolução das leituras destes instrumentos indica uma contínua e generalizada redução ao longo do tempo, comportamento que não tem similaridade em termos de um aumento correspondente das vazões de percolação. Assim, tal fato deve estar associado basicamente a uma mudança do mecanismo de fluxo nas zonas de fundação da barragem, induzido por gradientes hidráulicos mais elevados e vinculado a processos de carreamento de materiais alterados ao longo dos contatos entre diferentes derrames e também ao possível caráter multidirecional das descontinuidades locais. De qualquer forma, este comportamento é atípico e mereceria uma avaliação específica, incluindo-se a instalação de piezômetros em seções adjacentes.

Na zona da enseadeira de jusante da BTME, os níveis piezométricos medidos são próximos ou inferiores à cota do topo da enseadeira de jusante, evidenciando, assim, que a camada de aluvião da fundação local funciona como um tapete drenante natural, contribuindo de forma decisiva no processo de drenagem pela fundação.

Os valores das tensões fornecidas pelas células de tensões totais posicionadas na Seção 9 da Transição N<sup>o</sup> 2 são consistentes e bastante sensíveis às variações do nível d' água do reservatório. O aspecto mais relevante destes dados são os valores essencialmente nulos das tensões horizontais efetivas registradas junto à face de montante da estrutura de concreto. Estas medições configuram a hipótese de descolamento ou de fraturamento hidráulico da interface solo/estrutura. As leituras atuais registram uma relação  $\sigma_h/u$  igual a 0,94, que corresponde a uma condição de emergência. Este comportamento exige, portanto, estudos específicos para a obtenção do completo entendimento do problema e sua eventual correção.

Quanto às vazões de percolação, as medições têm sido, sistematicamente, inferiores aos parâmetros de controle. Variações bruscas ou concentradas estão associadas comumente a épocas de precipitações pluviométricas elevadas. Os dados de piezometria da BTMD mostram que a capacidade drenante do sistema de drenagem interna é muito superior à estimada em projeto. No caso da BTME, as vazões são igualmente controladas. Sistemas específicos de captação foram projetados nesta seção da barragem para captação e controle das infiltrações ocorridas na parte alta da ombreira esquerda, durante a fase de enchimento do reservatório.

### **6.3. – Sugestões para Futuras Pesquisas**

Como estudos complementares, recomenda-se a abordagem integrada e sistematizada deste programa de auscultação a outros empreendimentos de geração de energia elétrica ou a barragens de contenção de resíduos industriais e de mineração. Com efeito, o Programa MONITOR mostrou-se uma ferramenta bastante prática para a aquisição, tratamento e plotagem dos gráficos finais da evolução das medições ao longo do tempo. Finalizando, é imperativo ressaltar a importância da conjugação destas análises com as

observações que são obtidas a partir das inspeções visuais, que constituem, também, elemento fundamental para a garantia de um controle adequado e um monitoramento abrangente do comportamento geotécnico de barragens de terra e de barragens de terra e enrocamento associadas a aproveitamentos hidrelétricos de grande porte.

## **Referências Bibliográficas**

Ávila, J.P. (1995). Barragem de São Simão – Análise dos Resultados de Leituras Piezométricas. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

Azevedo Netto, J.M. e Alvarez, G.A. (1977). Manual de Hidráulica, Ed. Edgard Blucher Ltda, 6ª Edição, São Paulo.

Balbi, D.A.F.; Fusaro, T.C. e Magalhães, R.A. (2005). Inspetor – Sistema Inteligente de Controle e Segurança de Barragens. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 230-248, Salvador, BA.

Bartorelli, A. (1983). Geologia da Bacia do Alto Paraná. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, p. 11-15, São Paulo, SP.

Casagrande, A. (1978). São Simão Dam – Foundation Seepage. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. USA.

Cavalcanti, A.J.C.T.; Souza, R.J.B.; Rocha Filho, P. e Albuquerque Junior, F.S. (1994). Utilização de Eletrônives na Monitoração da Barragem de Xingó. XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 85-90, Rio de Janeiro, RJ.

CBGB (1982). Main Brazilian Dams – Design, Construction and Performance. Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. BCOLD Publications Committee.

CBGB (1996). II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens . Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil, Volume 1 e 2, Belo Horizonte, MG.

CEMIG (1976). Relatório Final de Geologia – Parte 1 – Interpretação Geológica. Diretoria de Projetos e Construção. Departamento de Engenharia Civil de Geração.

Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. 11128 – PG/PC-225.

CEMIG (1977a). Instrumentação nas Estruturas de Terra e Enrocamento – Relatório Final de Construção – Margem Direita. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. PG/PCSS-612.

CEMIG (1977b). Instrumentação nas Estruturas de Terra e Enrocamento – Relatório Final de Construção – Margem Esquerda. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. PG/PCSS-390.

CEMIG (1982). Instrumentação de Solos – Relatório Final – Volume I. Estruturas de Terra e Enrocamento. Usina Hidrelétrica de Emborcação. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

CEMIG (1986). Relatório de Inspeção da Barragem de Terra e Enrocamento. Departamento de Estudos Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. 11128 – PG/EE – 121.

CEMIG (1994). Análise do Comportamento das Estruturas e Fundações da UHE de São Simão. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. 11128-GR/EC3-025.

CPRH (2000). Norma Técnica: Medição de Vazão de Efluentes Líquidos – Escoamento Livre. CPRH N 2.004. Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Cruz, P.T. (1996). 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. Oficina de Textos, São Paulo.

Dunnicliff, J. e Green, G.E. (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley and Sons, New York, USA.

FERC (2003). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Chapter IX – Instrumentation and Monitoring. Federal Energy Regulatory Commission.

Freitas Jr., M.S.; Borgatti, L.; Araya, J.M. e Mori, R.T.(1999). China - Barragem de Tianshengqiao I – Monitoramento com Eletrôníveis da Face de Concreto. XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 105-116. Minas Gerais, Belo Horizonte.

Fusaro, T.C. (2005). Metodologia de Classificação de Barragens Baseada no Risco. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 59-71, Salvador, BA.

GEOTECNICA (1978). Aproveitamento Hidroelétrico de São Simão. Controle de Qualidade de Obras de Terra e Enrocamento e Injeção de Cimento. Dossier Técnico Final. Volume 1 Texto. Geotécnica S/A. PV-15/73. 31/01/78.

Gonçalves, E.S.; Carvalho, C.J. e Carim, A.L.C. (1996). Desempenho dos Medidores de Recalques Internos Instalados nas Barragens Mais Recentes da CEMIG. CBGB - II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens, pg. 43-52, Volume 2, Belo Horizonte, MG.

Hanna, T.H. (1985). Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. Trans Tech Publications.

Hvorslev, M.J. (1951). Time Lag and Soil Permeability in Groud Water Observation. Bulletin N° 36, Waterways Experimental Station, U. S. Corps of Engineers, U. S. Army.

IESA (1975). Manual de Instrumentação – Volume 1 – Barragens de Terra e Enrocamento. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, SS-RC-088, Belo Horizonte, MG.

IESA (1980a). Relatório Final do Projeto São Simão. Estruturas de Terra e Enrocamento. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Relatório SS-RC-097, Volume 1.

IESA (1980b). Instrumentação das Estruturas de Terra e Enrocamento – Relatório Interpretativo – Leituras Efetuadas de ago/1977 a dez/1979 (2,5 anos após o Enchimento do Reservatório). CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Relatório SS-RC-099.

Kuperman, S.C.; Moretti, M.R.; Re, G.; Pereira, P. N.; Santos, R.P. e Ferreira, W.V.F. (2005a). Reavaliação da Instrumentação de Auscultação Instalada em Barragens da CESP. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 116-134, Salvador, BA.

Kuperman, S.C.; Moretti, M.R.; Re, G.; Pereira, P. N.; Santos, R.P. e Ferreira, W.V.F. (2005b). Reavaliação da Segurança e dos Valores de Controle da Instrumentação das Estruturas Civas da UHE Jurumim. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 164-180, Salvador, BA.

LEME ENGENHARIA (1981). Manual de Instrumentação. Usina Hidrelétrica de Emborcação – Barragem de Terra e Enrocamento. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

Libby, J.W.; Pinto, N.L.S.; Brito, S.N.A. e Mello, V.F.B. (1993): Usina Hidrelétrica de São Simão. Junta de Consultores. Relatório da Inspeção Estrutural das Barragens e Casa de Força. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

Lindquist, L.N. (1983). Instrumentação Geotécnica: Tipos, Desempenhos, Confiabilidade, Eficiência da Qualidade e Quantidade. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, p. 279 – 317, São Paulo, SP.

Low, W.I. (1978). Inspection of São Simão Project: May 24-26 th 1978. Companhia Internacional de Engenharia. Voh Ito, Canadá.

Marques Filho, P.L. (1983). Barragens de Enrocamento - Problemas e Aspectos Típicos de Construção. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, p. 51 – 75, São Paulo, SP.



Maurer, E. (1983). Deformações e Deslocamentos em Barragens de Enrocamento. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, p. 319-334, São Paulo, SP.

Mercolin, H.C.; Ribeiro, J.A. e Matos, S.F. (2005). Comportamento dos Extensômetros Múltiplos de Haste após a Manutenção Geral. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 156-163, Salvador, BA.

Ortigão, J.R. (1975). Piezômetro Hidráulico Fabricados pelo I.P.R.. Anais do Simpósio Sobre Instrumentação de Campo em Engenharia de Solos e Fundações. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, p. 147-178, Volume 1, Rio de Janeiro, RJ.

Palmeira, E.M. (1996). Instrumentação Geotécnica. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil. Pós-Graduação em Geotecnia. Publicação Nº GAP 005A/96.

Palmeira, E.M. e Ortigão, J.A.M. (1981). Construção e Desempenho de um Medidor Contínuo de Recalque (“Perfilômetro”) para Aterros. Solos e Rochas 4 (2), p. 23-40.

Piasentini, C. (2005). Considerações Sobre a Importância das Observações Visuais na Auscultação de Barragens. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 149-155, Salvador, BA.

Pôssas, R.F.L. e Aquino, J.S. (1983). Inventário Civil de São Simão – Características da Usina – Volume 1. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

Rosso, J.A. e Piasentin, C. (1996). Critérios Usados nos Projeto de Auscultação da Barragem de Itaipu e a sua Reavaliação com Base no Desempenho da Instrumentação. CBGB - II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens, Volume 2, p. 33-42.

Silveira, J.A.S. (1995). Parecer Técnico Sobre o Comportamento da UHE de São Simão Tendo por Base a Inspeção Realizada entre 29 e 31/03/95. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. 11128 – GR/EC3-027.

Silveira, J.F. e Ávila, J.P. (1995) Estabelecimento de Valores Limites e de Controle para a Instrumentação de Auscultação das Obras Civas. Usina Hidrelétrica de São Simão. CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. 11128-GR/EC3-028.

U. S. Bureau of Reclamation (1987). Embankment Dam Instrumentation Manual. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation, Washington, USA.

Vaughan, P.R. (1975). Field Instrumentation and the Behavior of Embankment Dams. Anais do Simpósio Sobre Instrumentação de Campo em Engenharia de Solos e Fundações. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, p. 339-393, Volume 1, Rio de Janeiro, RJ.

Viotti, C.B. (1975). Estudo das Interfaces – Barragem de Terra – Estruturas de Concreto: Jaguará, Volta Grande e São Simão. Tema 4. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Curitiba, PR.

Viotti, C.B.; Zica, H.S. e Gonçalves, E.S. (1983). Cadastro das Barragens de São Simão. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, p. 677-713, São Paulo, SP.

Weiler, W.A. e Kulhawy, F.H. (1982). Factor Affecting Stress Cell Measurements in Soil. Journal of Geotechnical Engineering 108 (GT12), ASCE, p. 1529-1548.

Werneck, M.L.G. (1975). Um Exemplo de Medição “In situ” de Creep Não Drenado. Anais do Simpósio Sobre Instrumentação de Campo em Engenharia de Solos e Fundações. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, p. 238-258, Volume 1.

# **ANEXO I**

Seções Instrumentadas da UHE São Simão

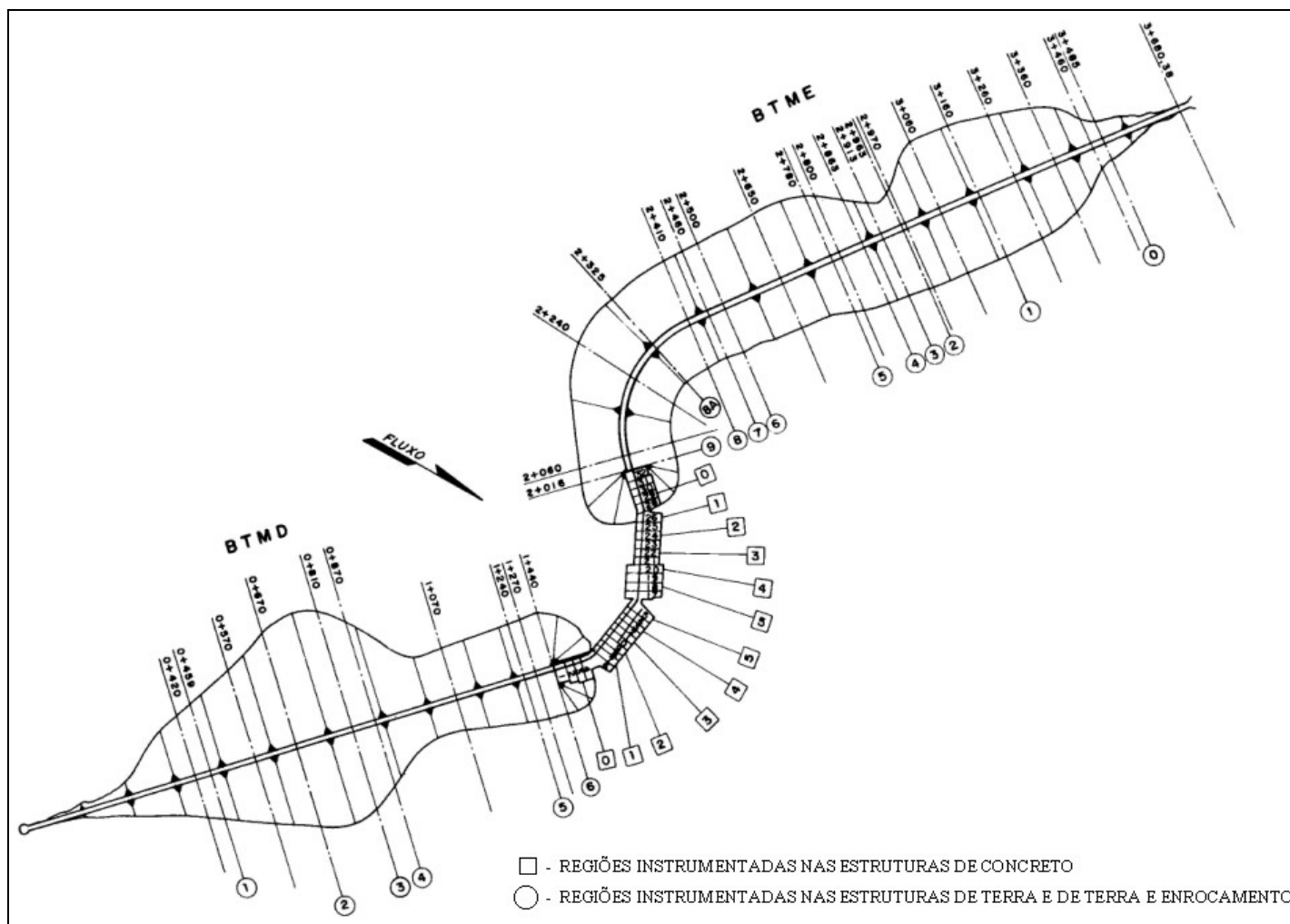


Figura I.1 – Arranjo Geral – UHE São Simão

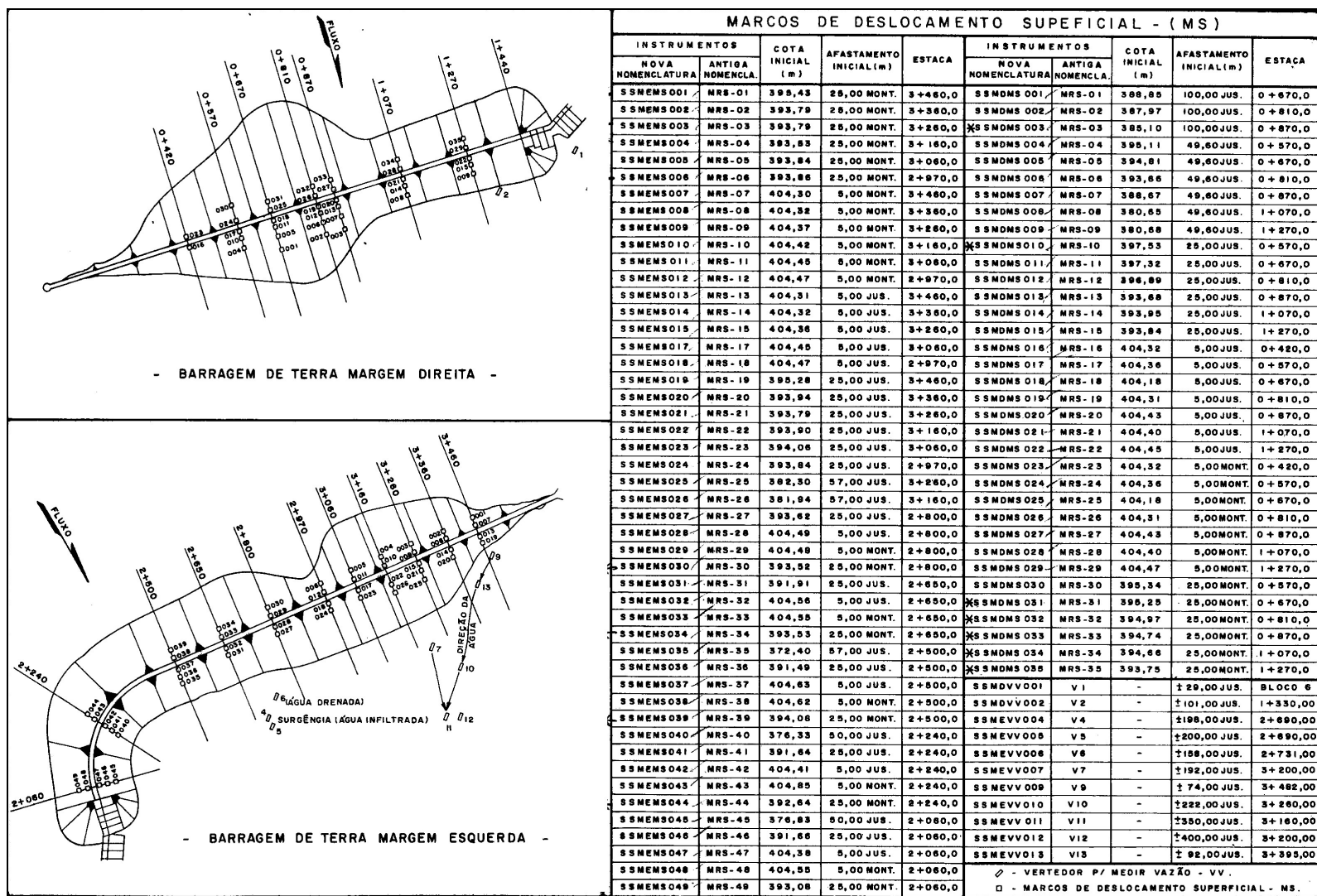


Figura I.2 – Localização dos Marcos de Superfície e Medidores de Vazão – MD e ME

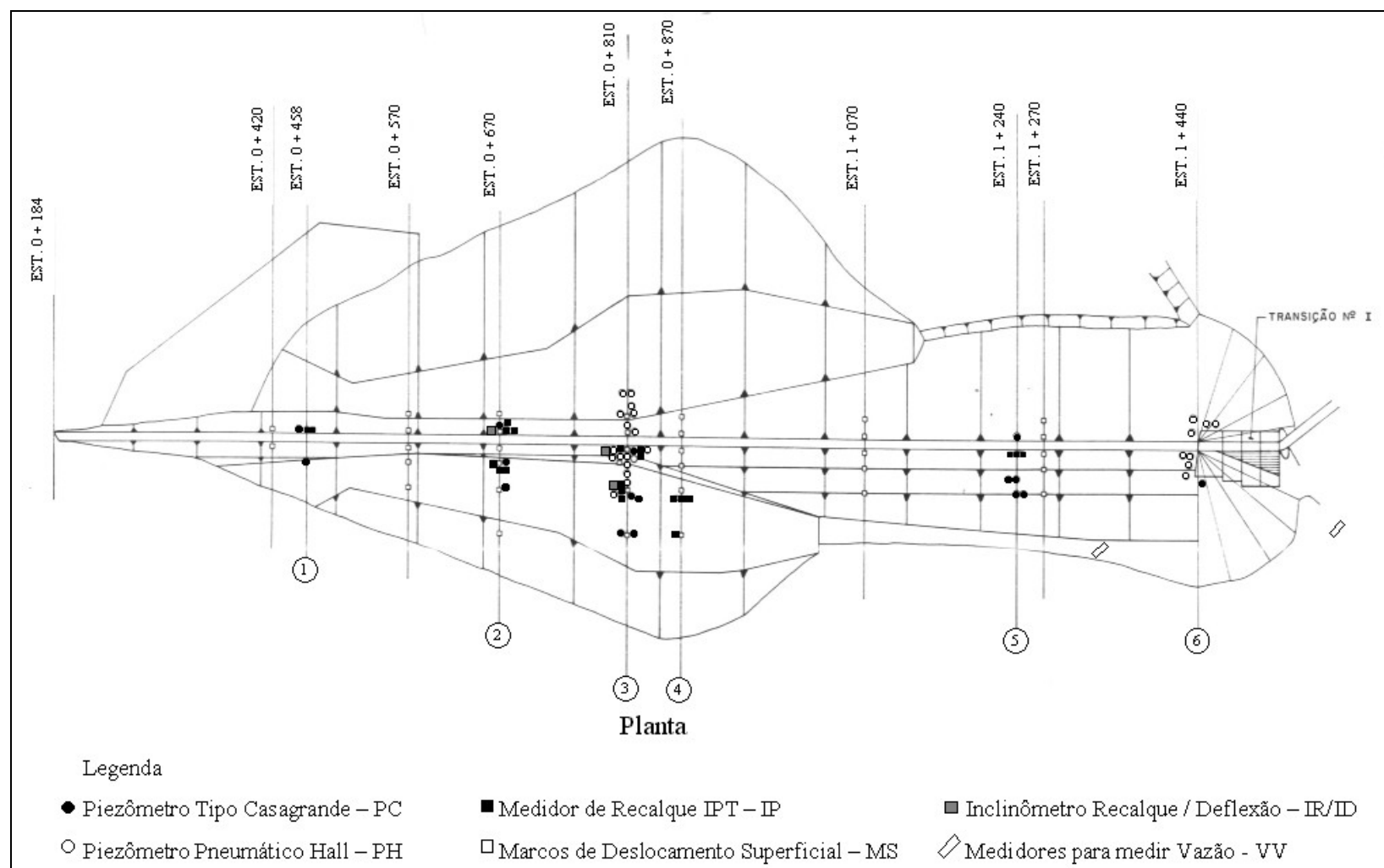


Figura I.3 – Localização dos Instrumentos na Barragem de Terra da Margem Direita – BTMD

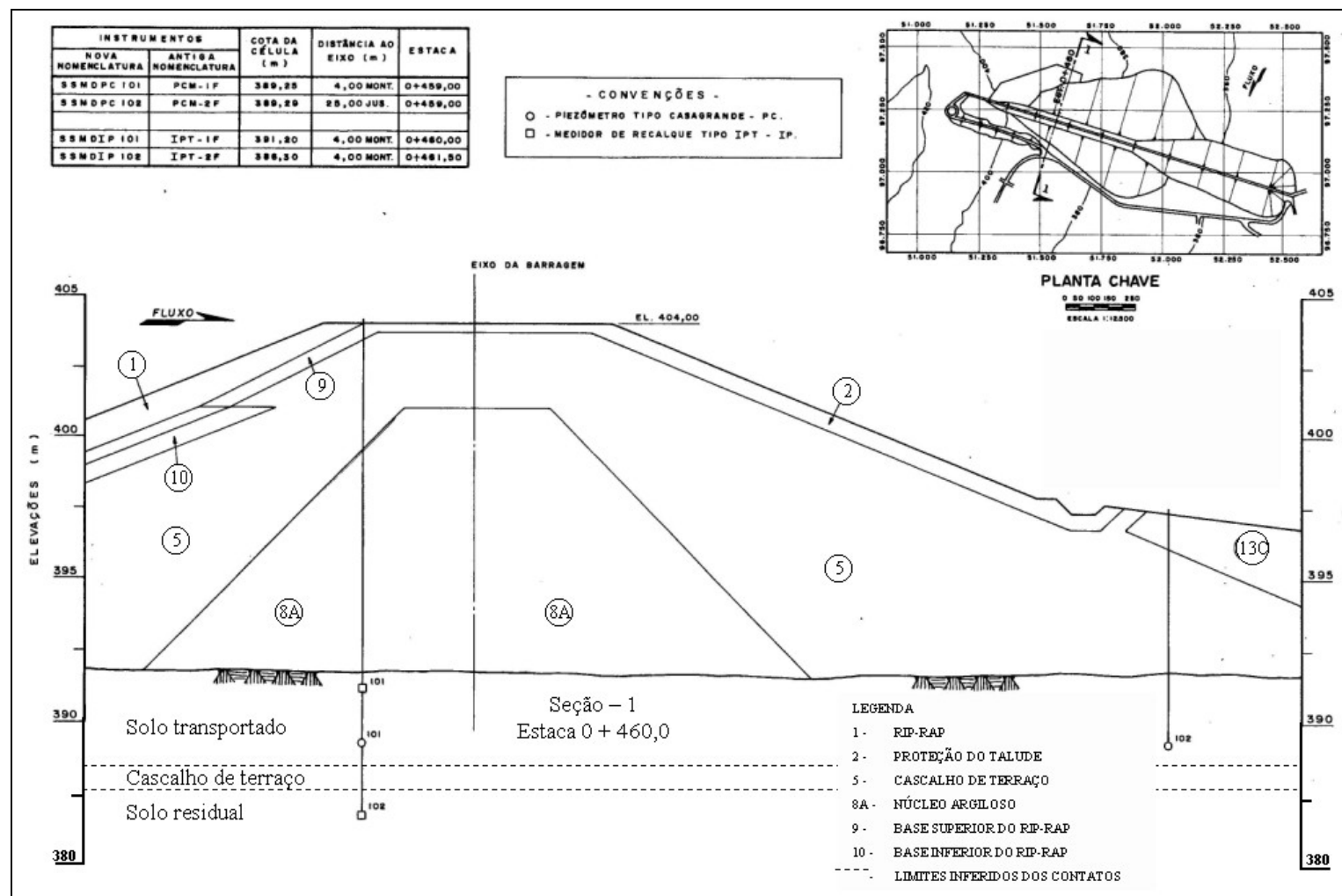


Figura I.4 – Barragem de Terra da Margem Direita – Seção 1 – Estaca 0 + 460,0

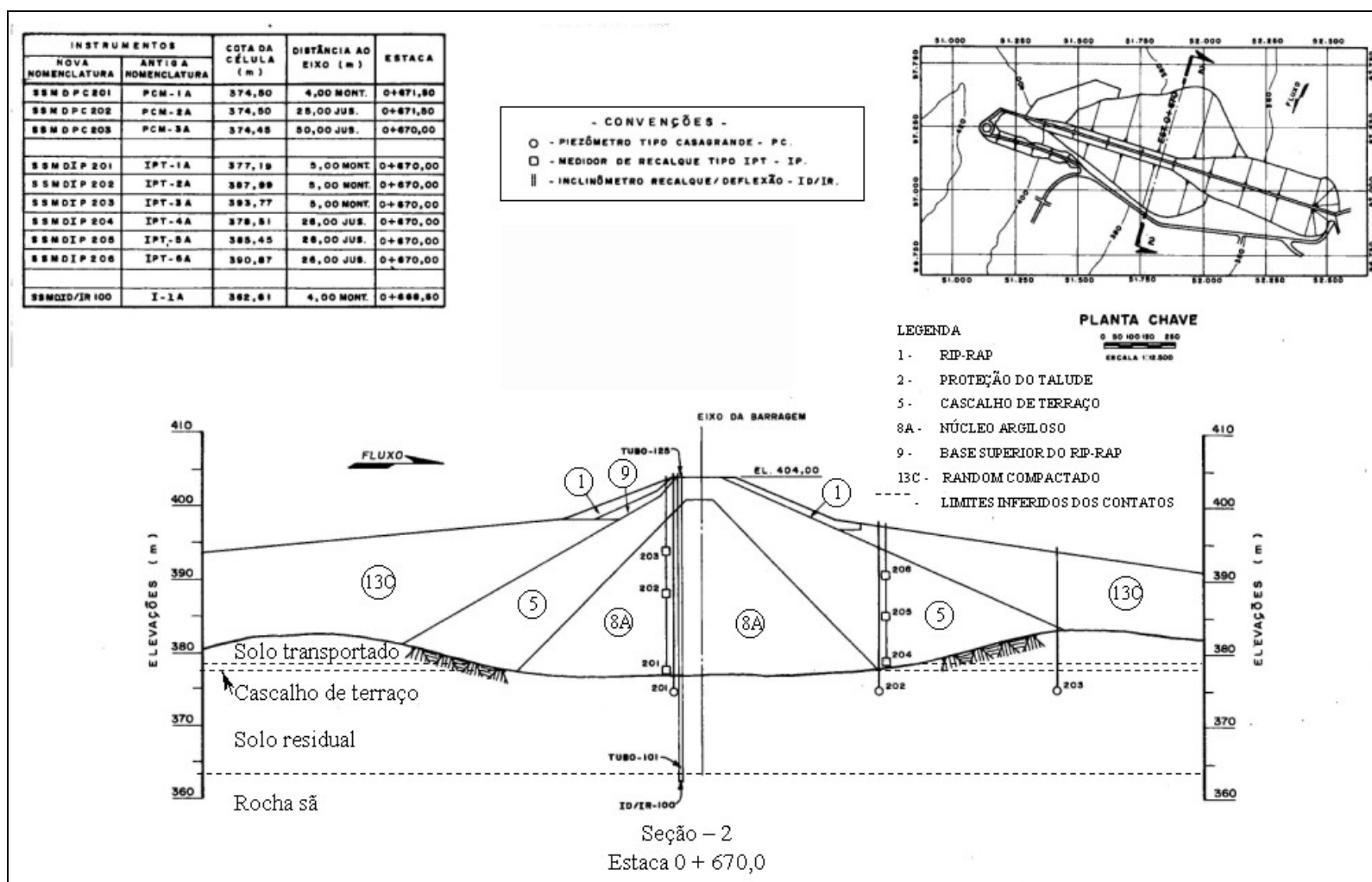


Figura I.5 – Barragem de Terra da Margem Direita – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0



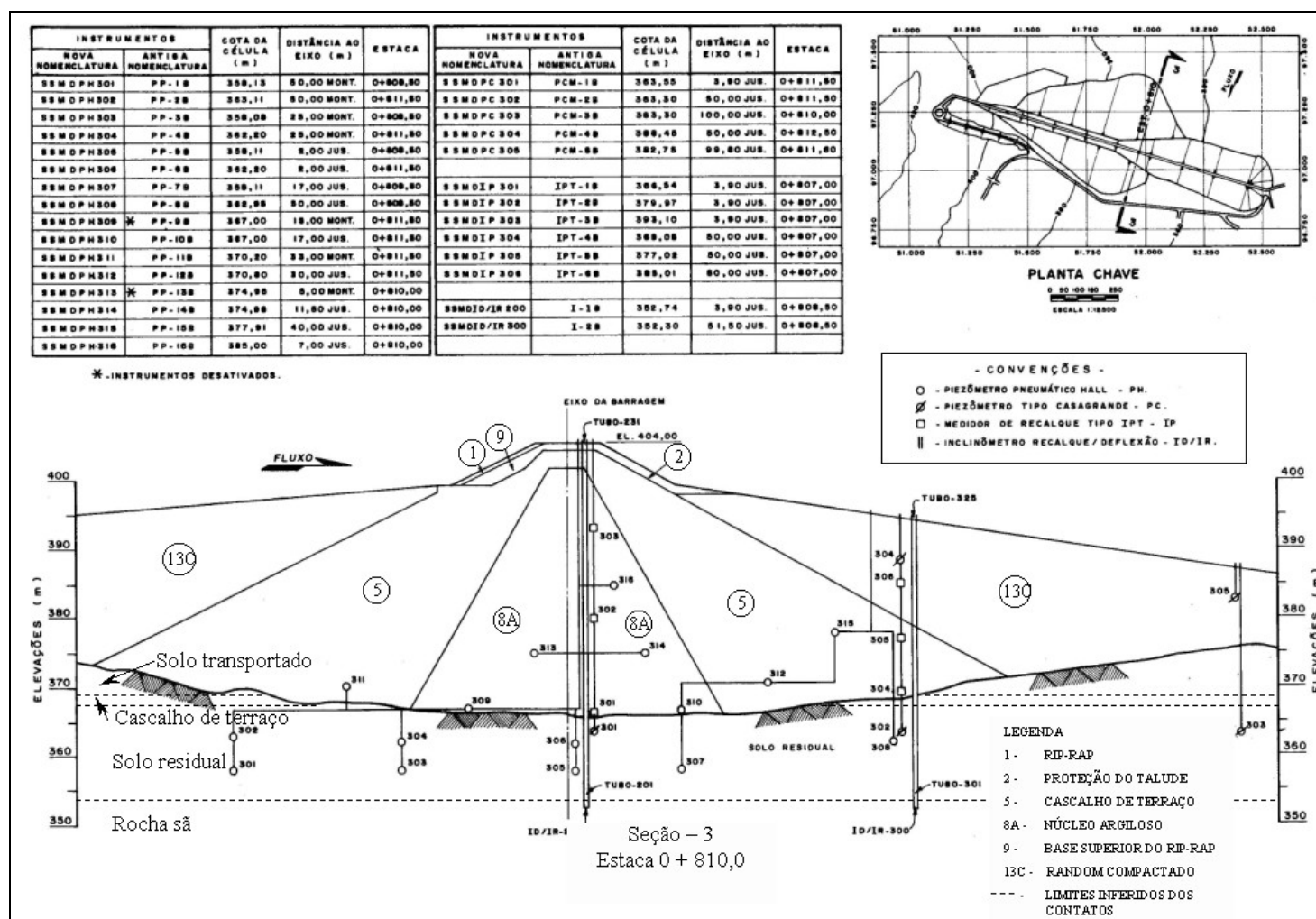


Figura I.6 – Barragem de Terra da Margem Direita – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0

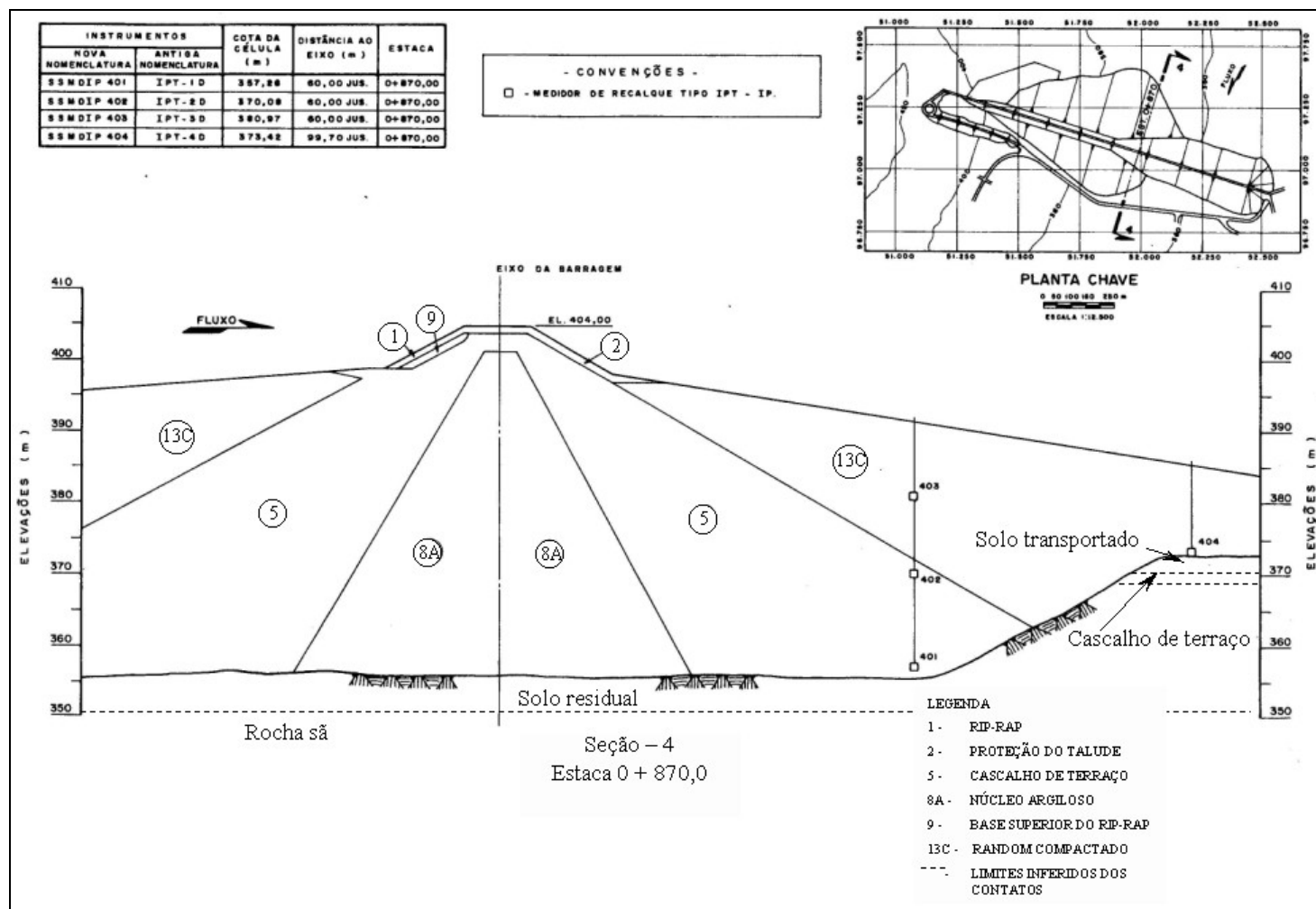


Figura I.7 – Barragem de Terra da Margem Direita – Seção 4 – Estaca 0 + 870,0

INSTRUMENTOS		COTA DA CÉLULA (m)	DISTÂNCIA AO EIXO (m)	ESTACA
NOVA NOMENCLATURA	ANTIGA NOMENCLATURA			
SSMDPC 501	PCM-1E	341,81	4,00 MONT.	1+239,50
SSMDPC 502	PCM-2E	340,48	32,00 JUS.	1+240,00
SSMDPC 503	PCM-3E	340,77	50,00 JUS.	1+239,50
SSMDPC 504	PCM-4E	359,65	32,00 JUS.	1+239,00
SSMDPC 505	PCM-5E	359,25	50,00 JUS.	1+240,50
SSMDIP 501	IPT-1E	352,00	4,00 JUS.	1+240,00
SSMDIP 502	IPT-2E	354,95	4,00 JUS.	1+240,00
SSMDIP 503	IPT-3E	355,13	4,00 JUS.	1+240,00

- CONVENÇÕES -  
 ○ - PIEZÔMETRO TIPO CASAGRANDE - PC.  
 □ - MEDIDOR DE RECALQUE TIPO IPT - IP.

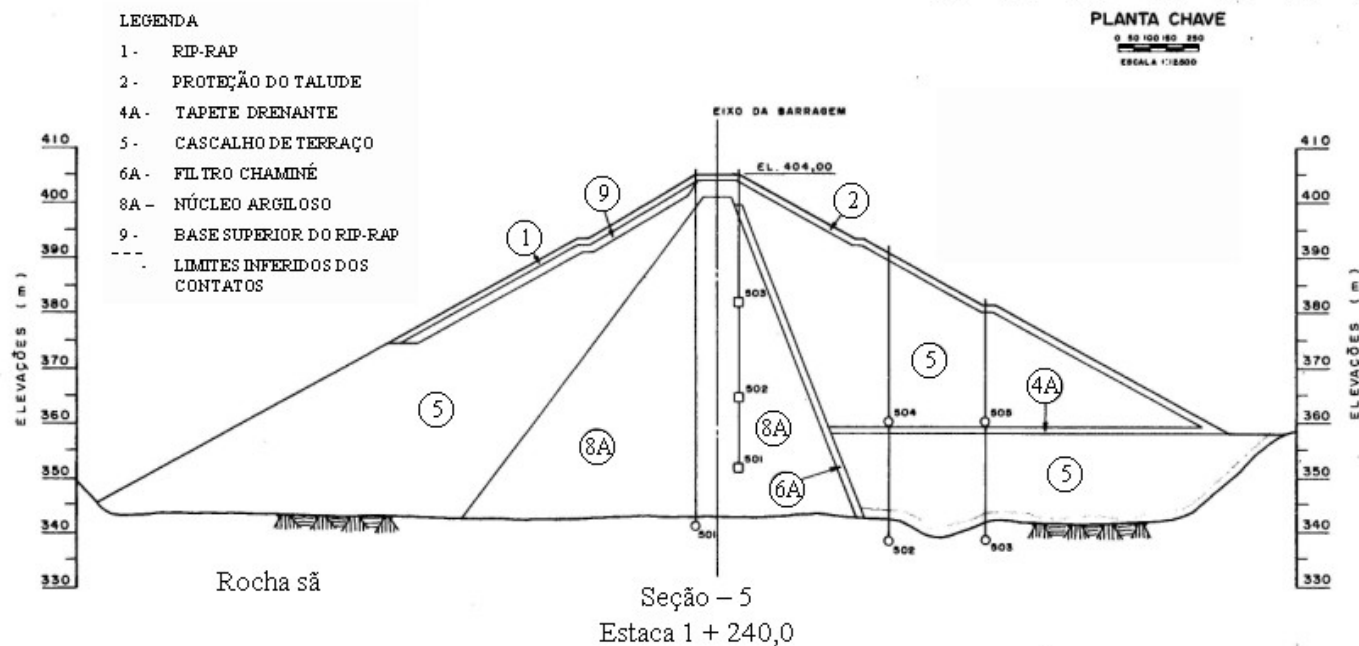
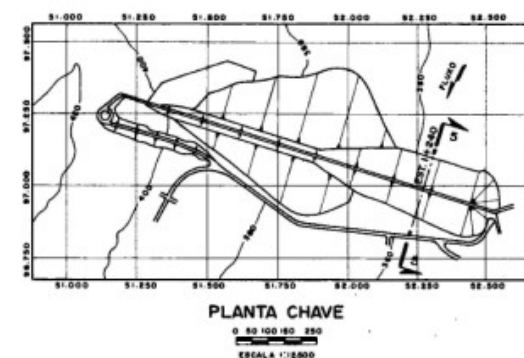


Figura I.8 – Barragem de Terra da Margem Direita – Seção 5 – Estaca 1 + 240,0

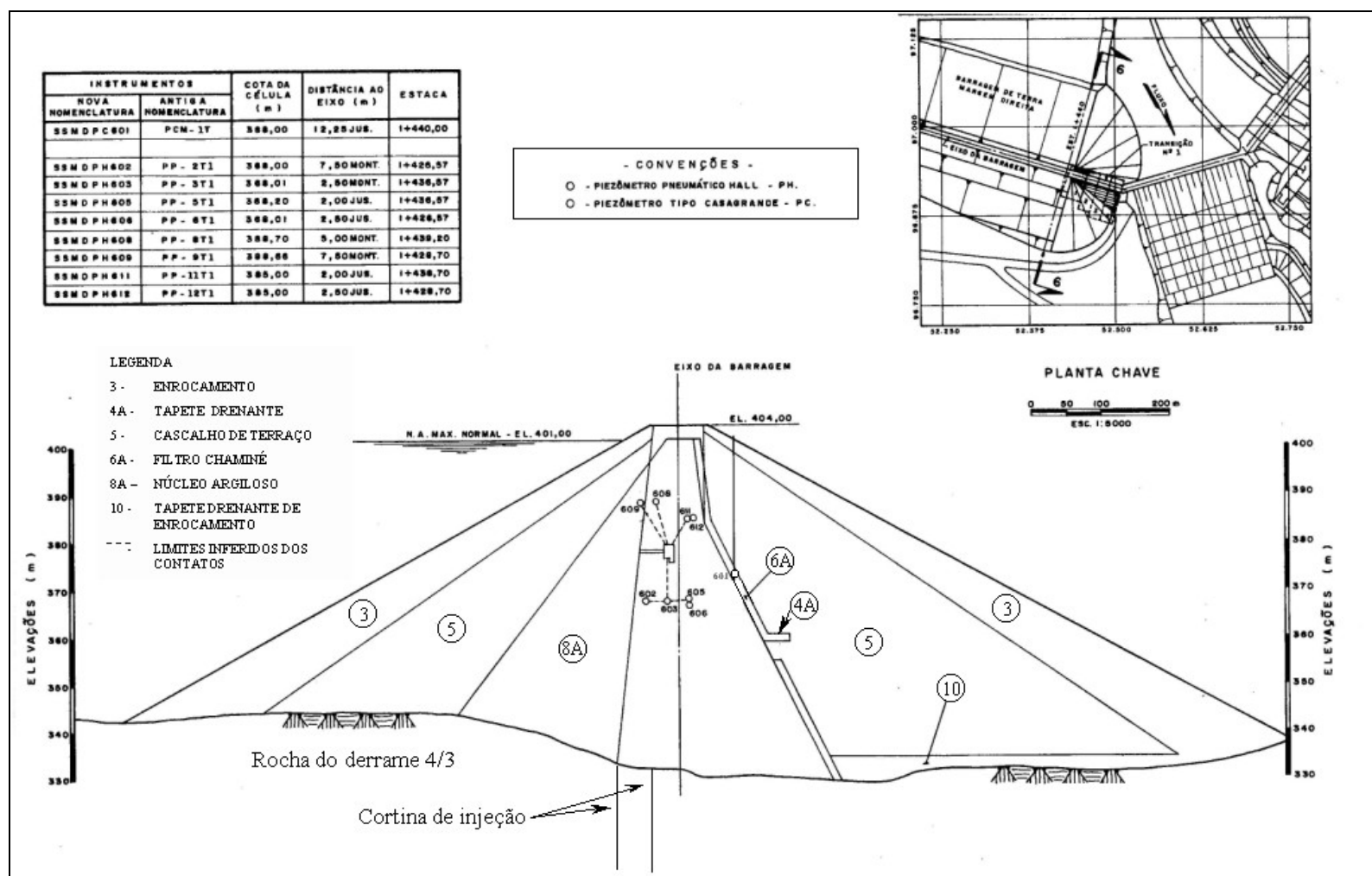


Figura I.9 – Barragem de Terra da Margem Direita – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0

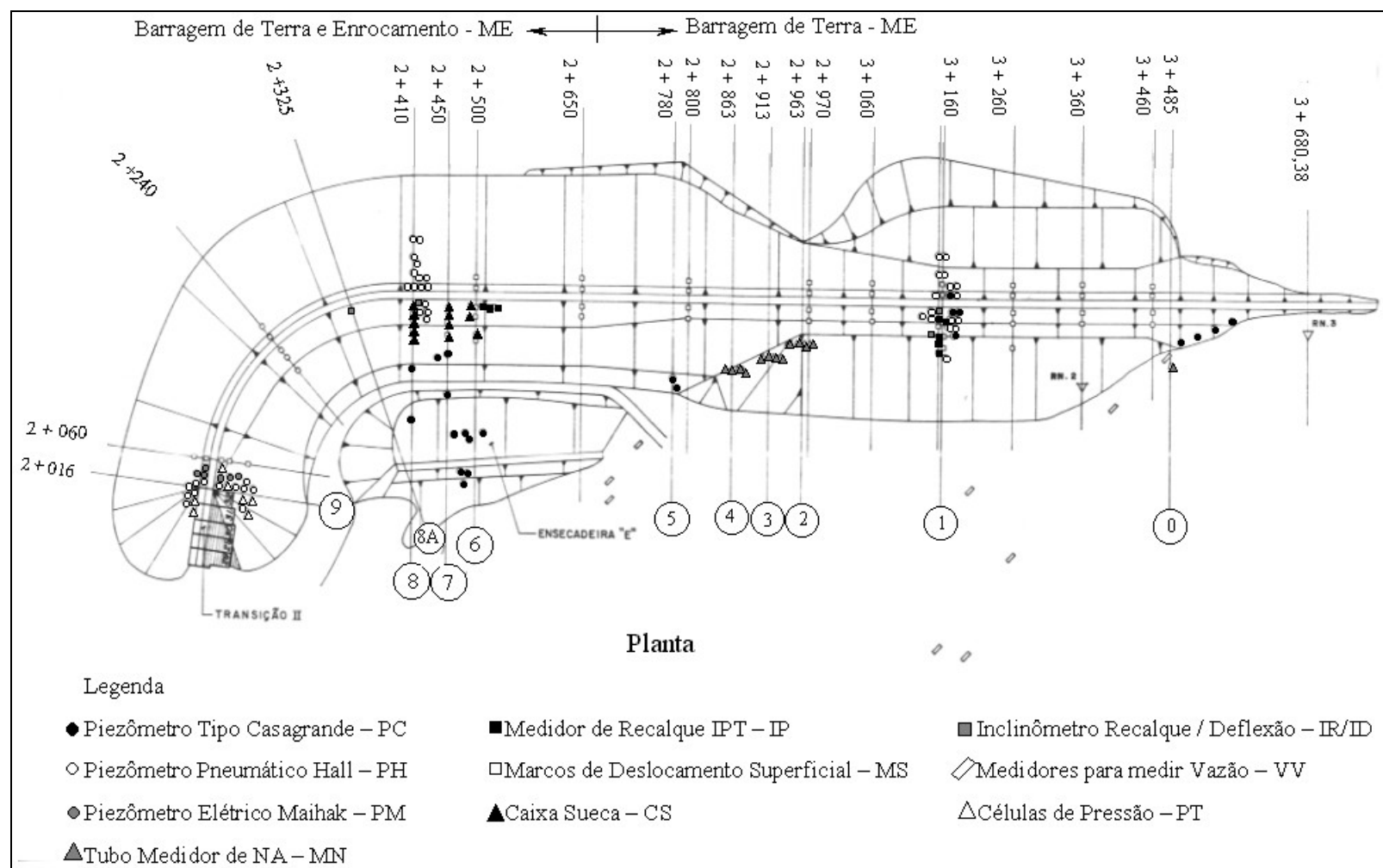


Figura I.10 – Localização dos Instrumentos na Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda – BTME

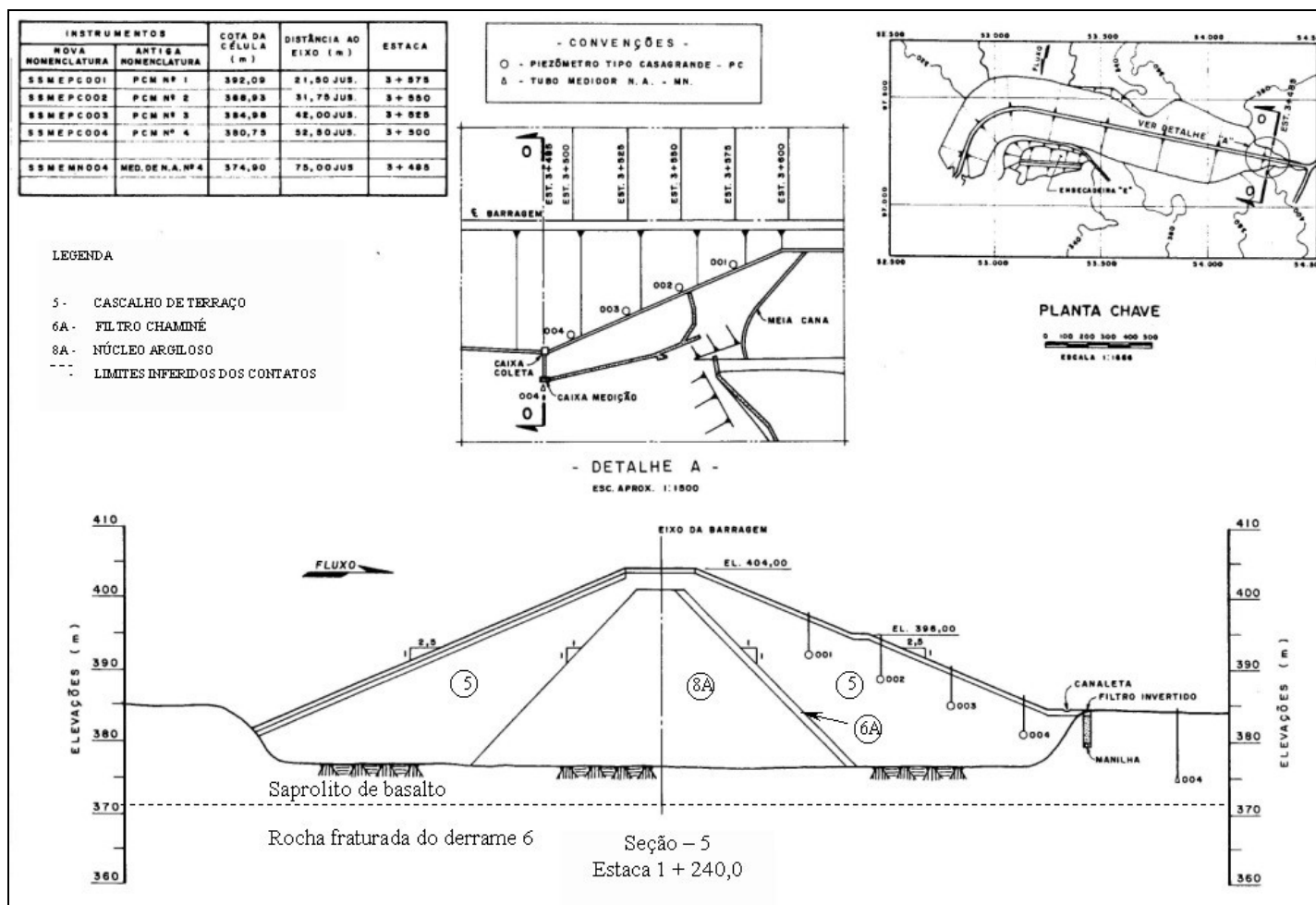


Figura I.11 – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Seção 0 – Estaca 3 + 485,0

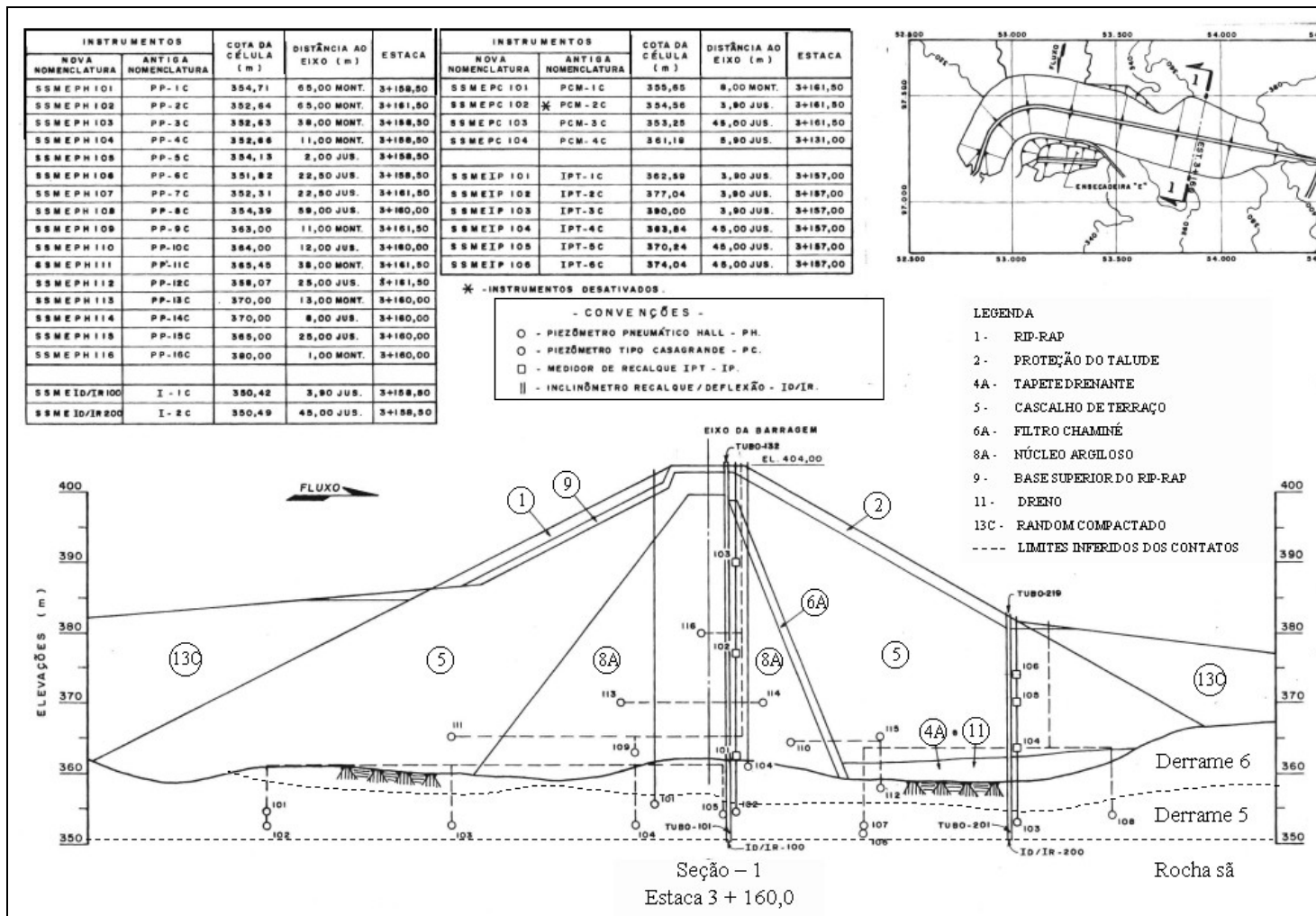


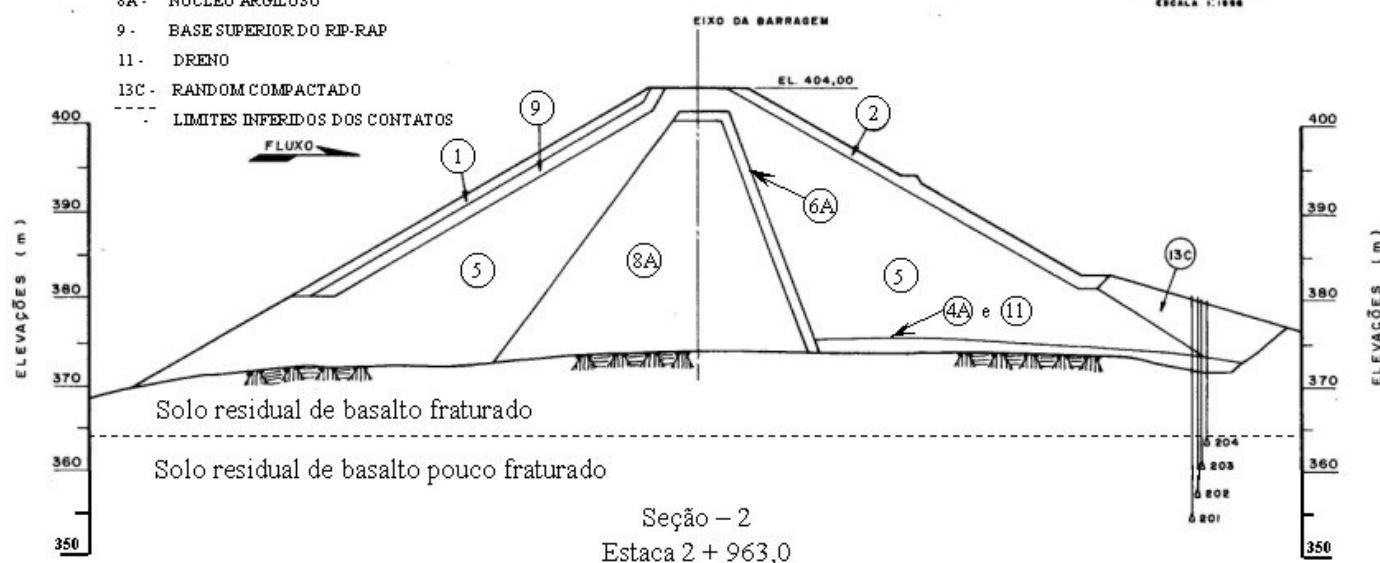
Figura I.12 – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0

INSTRUMENTOS		COTA DA CÉLULA (m)	DISTÂNCIA AO EIXO (m)	ESTACA
NOVA NOMENCLATURA	ANTIGA NOMENCLATURA			
SSMENN201	N.A.-1 L5	354,80	59,20 JUS.	2+963,00
SSMENN202	N.A.-2 L5	357,80	59,20 JUS.	2+963,00
SSMENN203	N.A.-3 L5	360,70	59,20 JUS.	2+963,00
SSMENN204	N.A.-4 L5	363,75	59,20 JUS.	2+963,00

- CONVENÇÃO -  
 $\Delta$  - TUBO MEDIDOR N.A. - M.N.

#### LEGENDA

- 1- RIP-RAP
- 2- PROTEÇÃO DO TALUDE
- 4A- TAPETE DRENANTE
- 5- CASCALHO DE TERRAÇO
- 6A- FILTRO CHAMINÉ
- 8A- NÚCLEO ARGILOSO
- 9- BASE SUPERIOR DO RIP-RAP
- 11- DRENO
- 13C- RANDOM COMPACTADO
- LIMITES INFERIORES DOS CONTATOS



#### PLANTA CHAVE

0 100 200 300 400 500  
 ESCALA 1:1000

Figura I.13 – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Seção 2 – Estaca 2 + 963,0



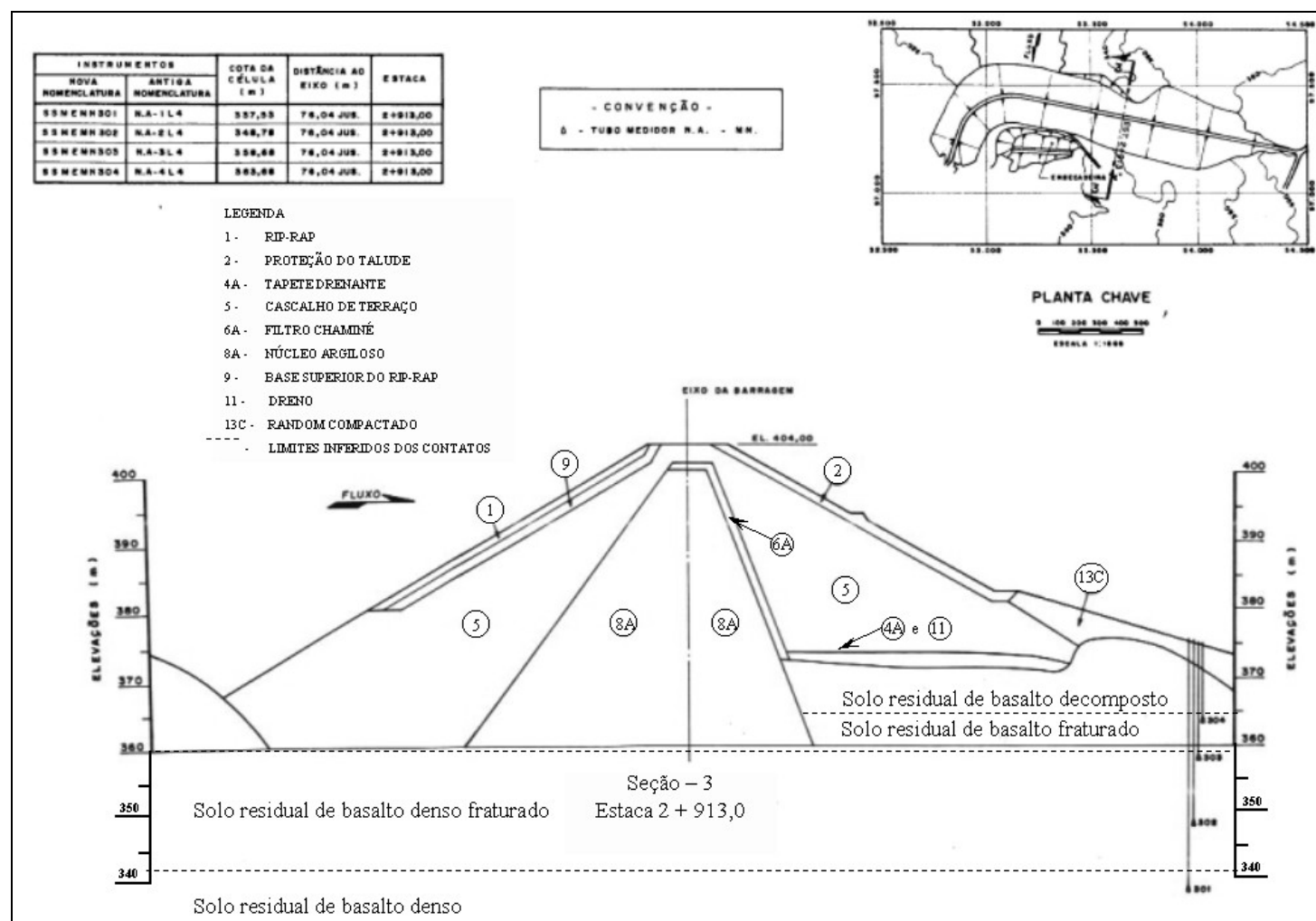


Figura I.14 – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Seção 3 – Estaca 2 + 913,0

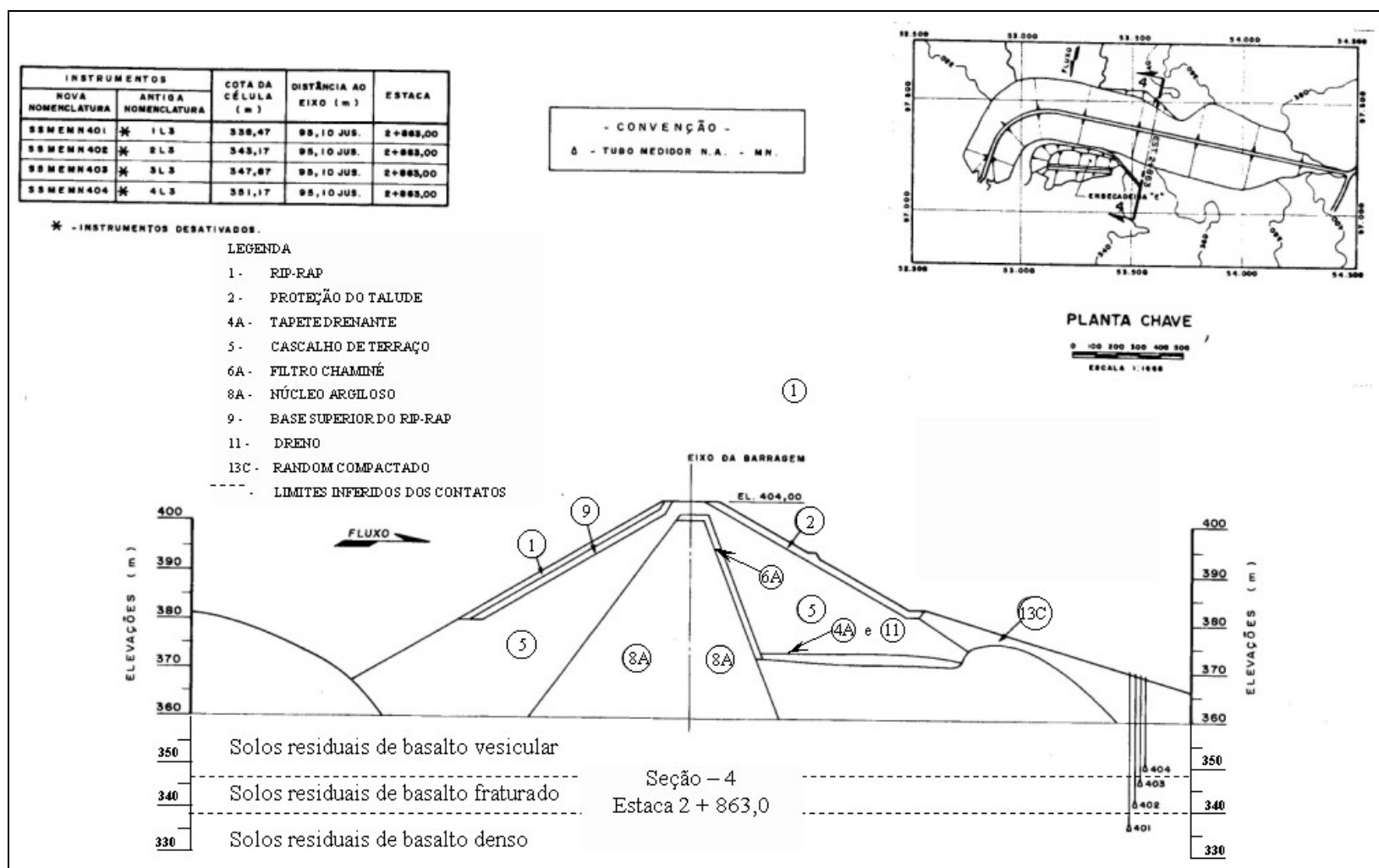


Figura I.15 – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Seção 4 – Estaca 2 + 863,0

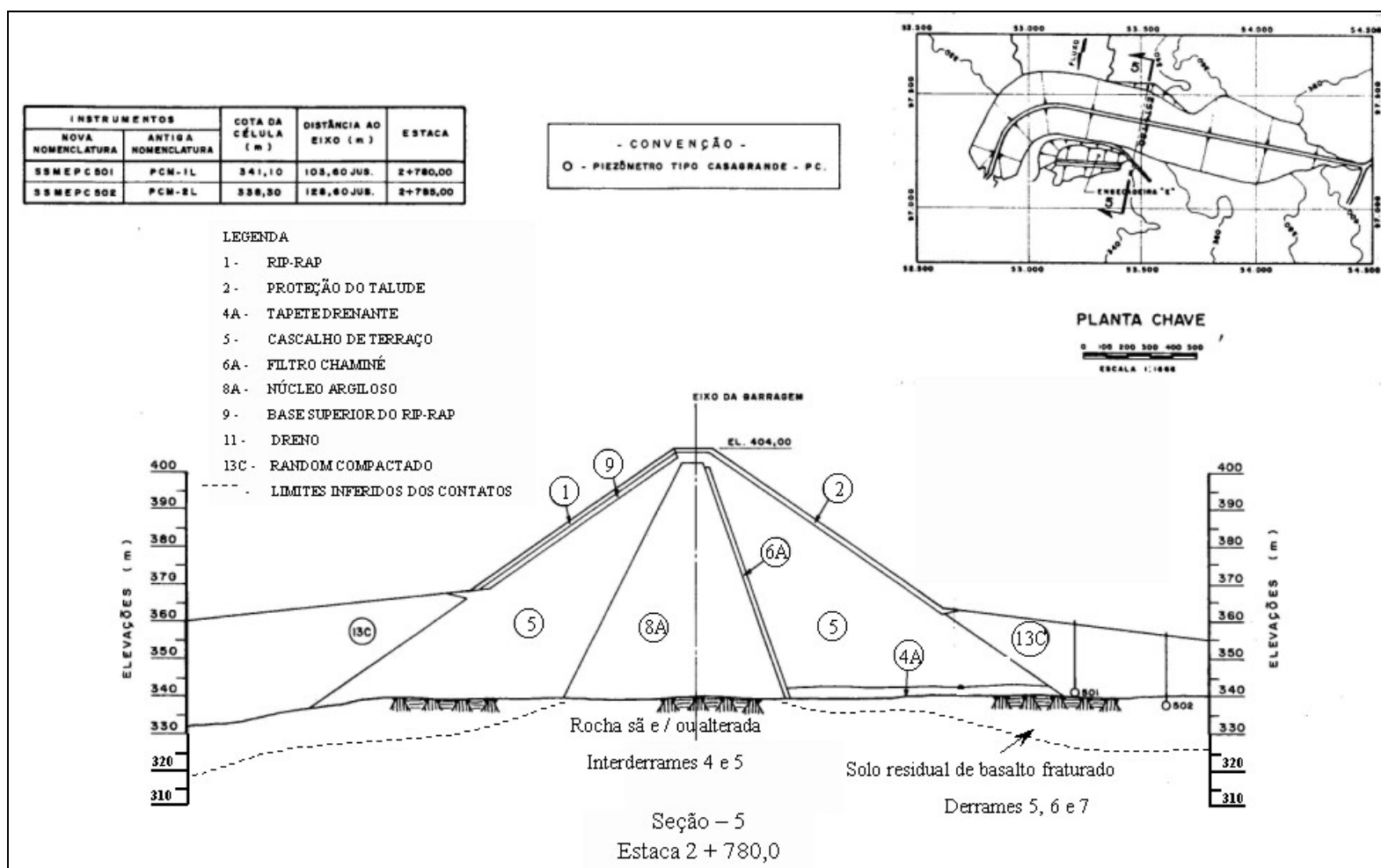


Figura I.16 – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Seção 5 – Estaca 2 + 780,0

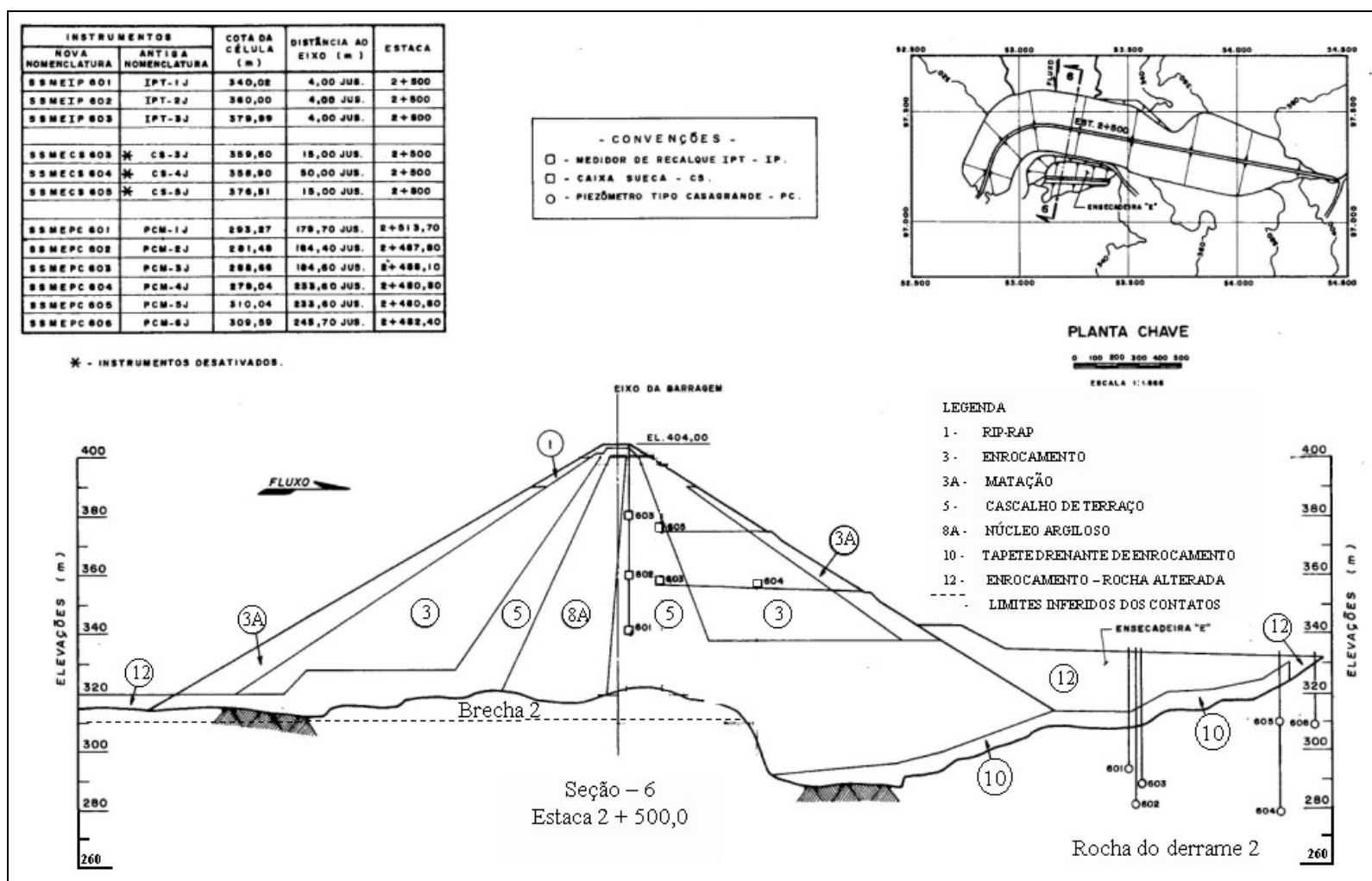


Figura I.17 – Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda – Seção 6 – Estaca 2 + 500,0

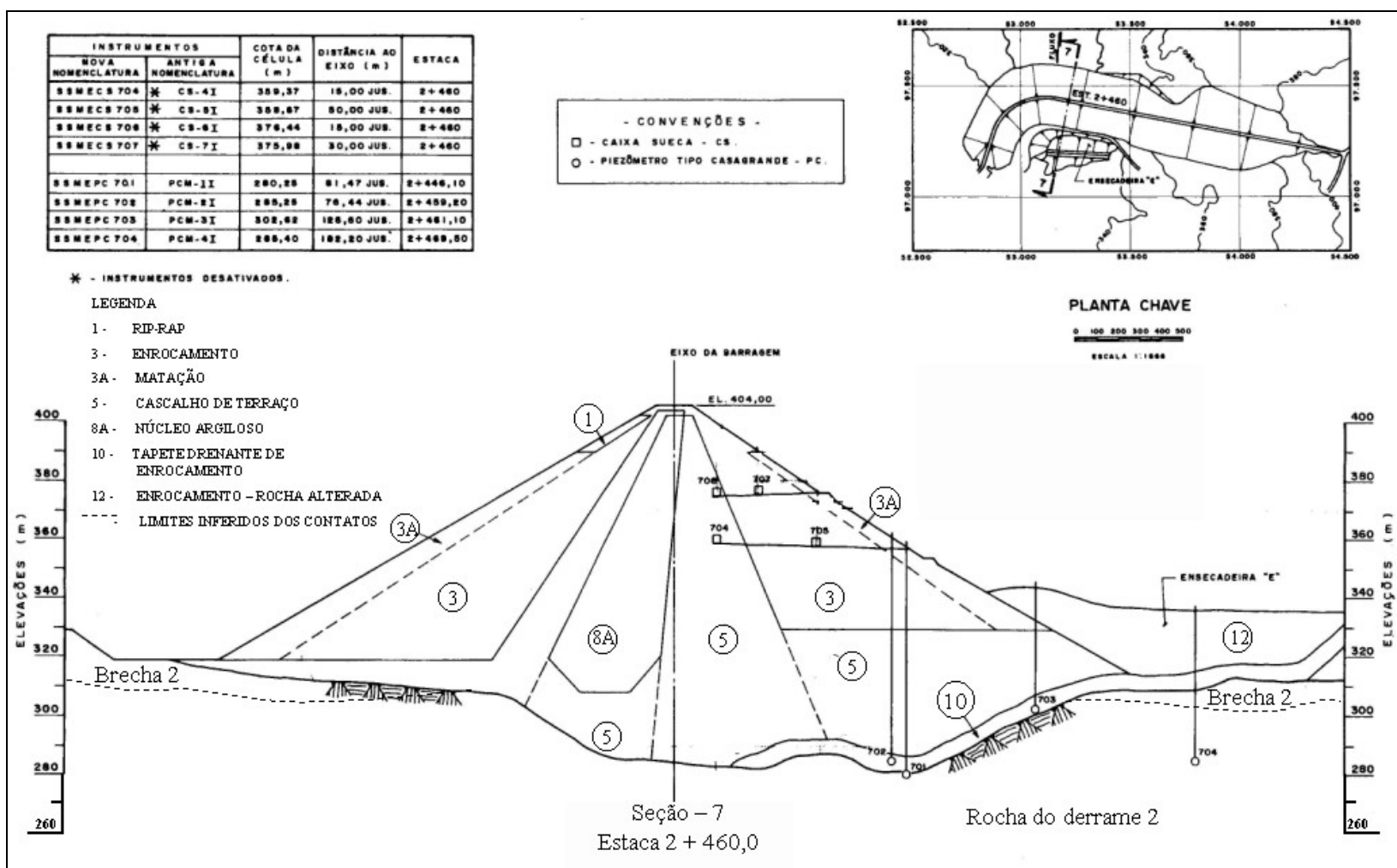


Figura I.18 – Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda – Seção 7 – Estaca 2 + 460,0

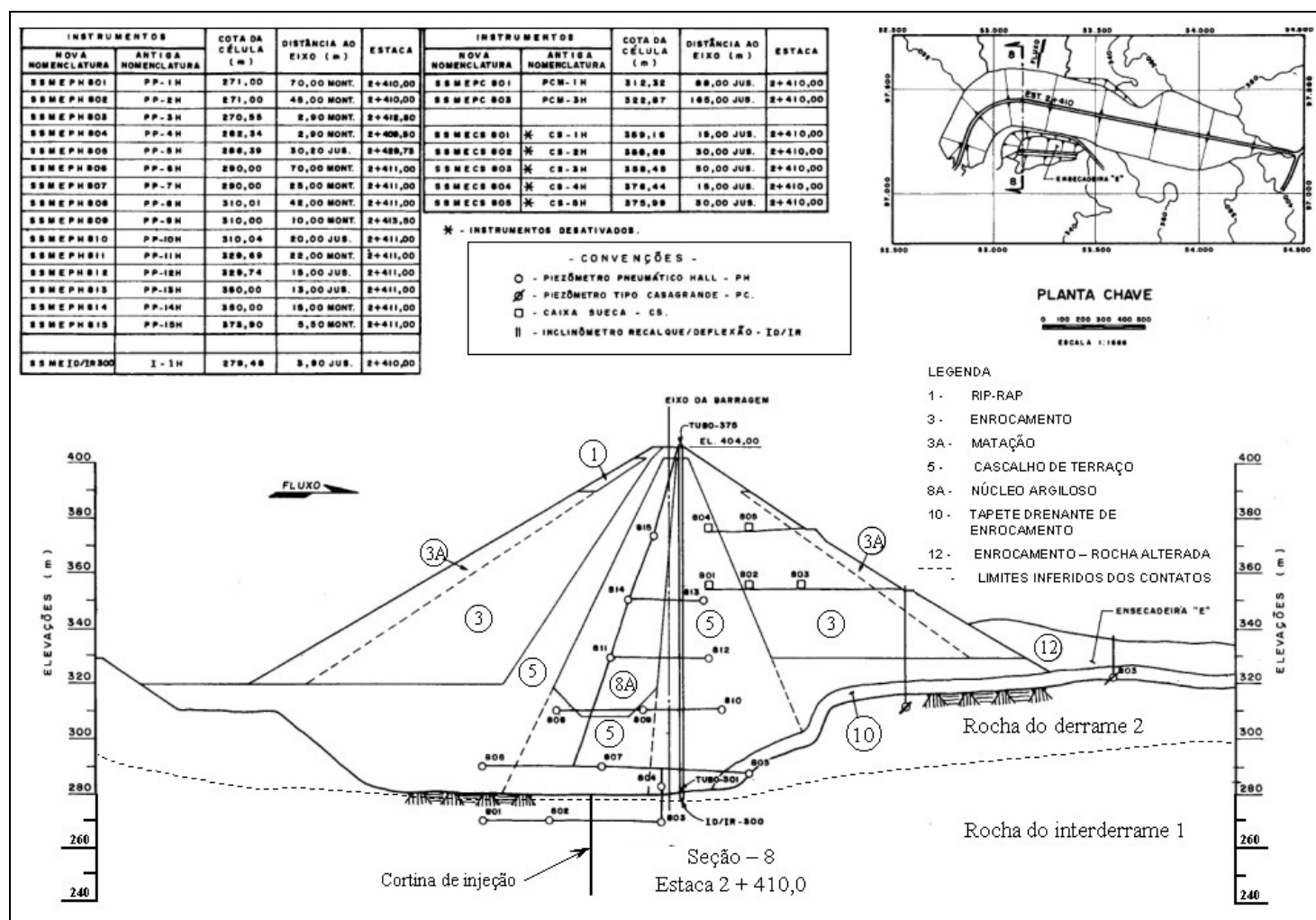


Figura I.19 – Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0

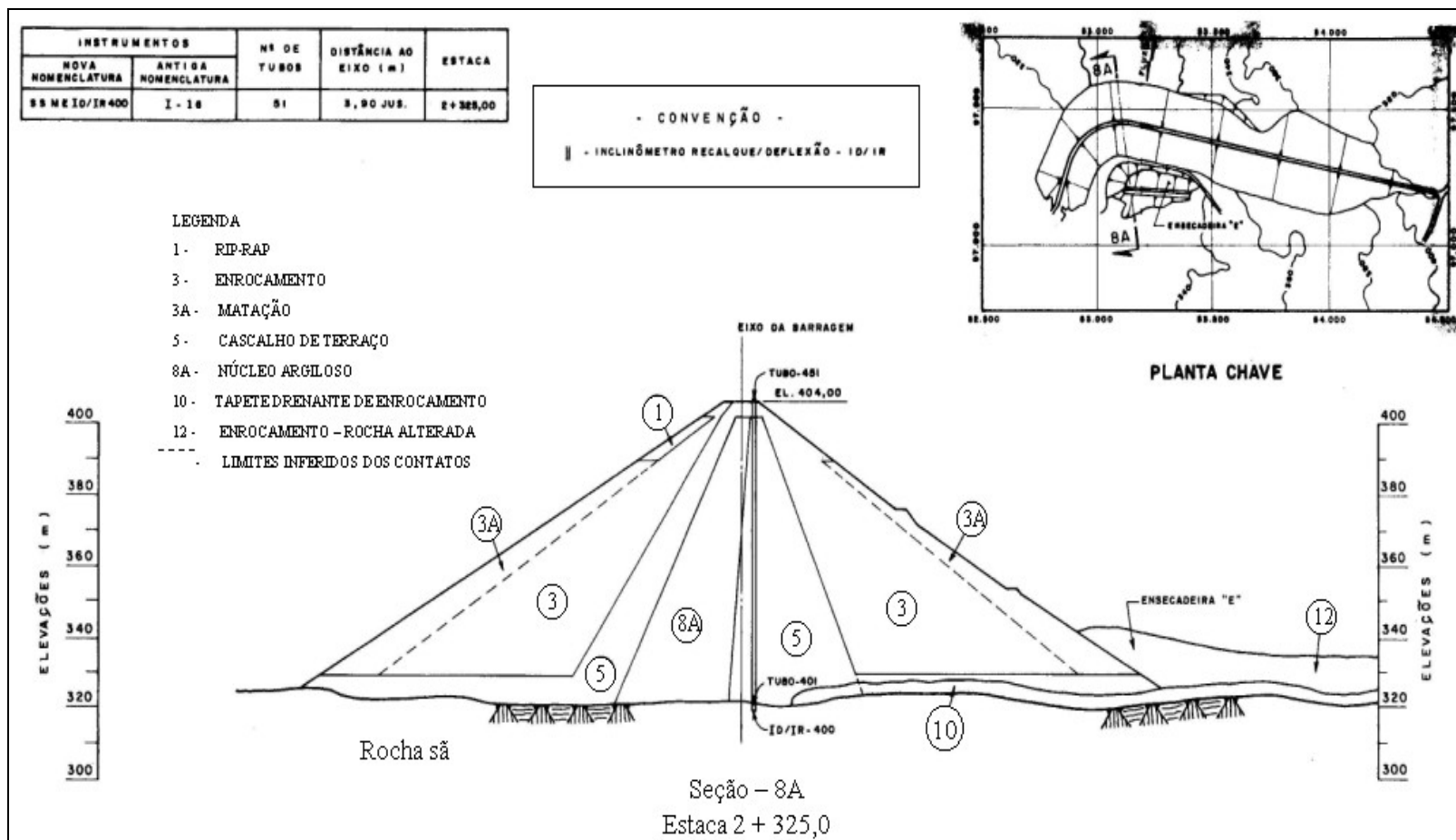


Figura I.20 – Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda – Seção 8A – Estaca 2 + 325,0

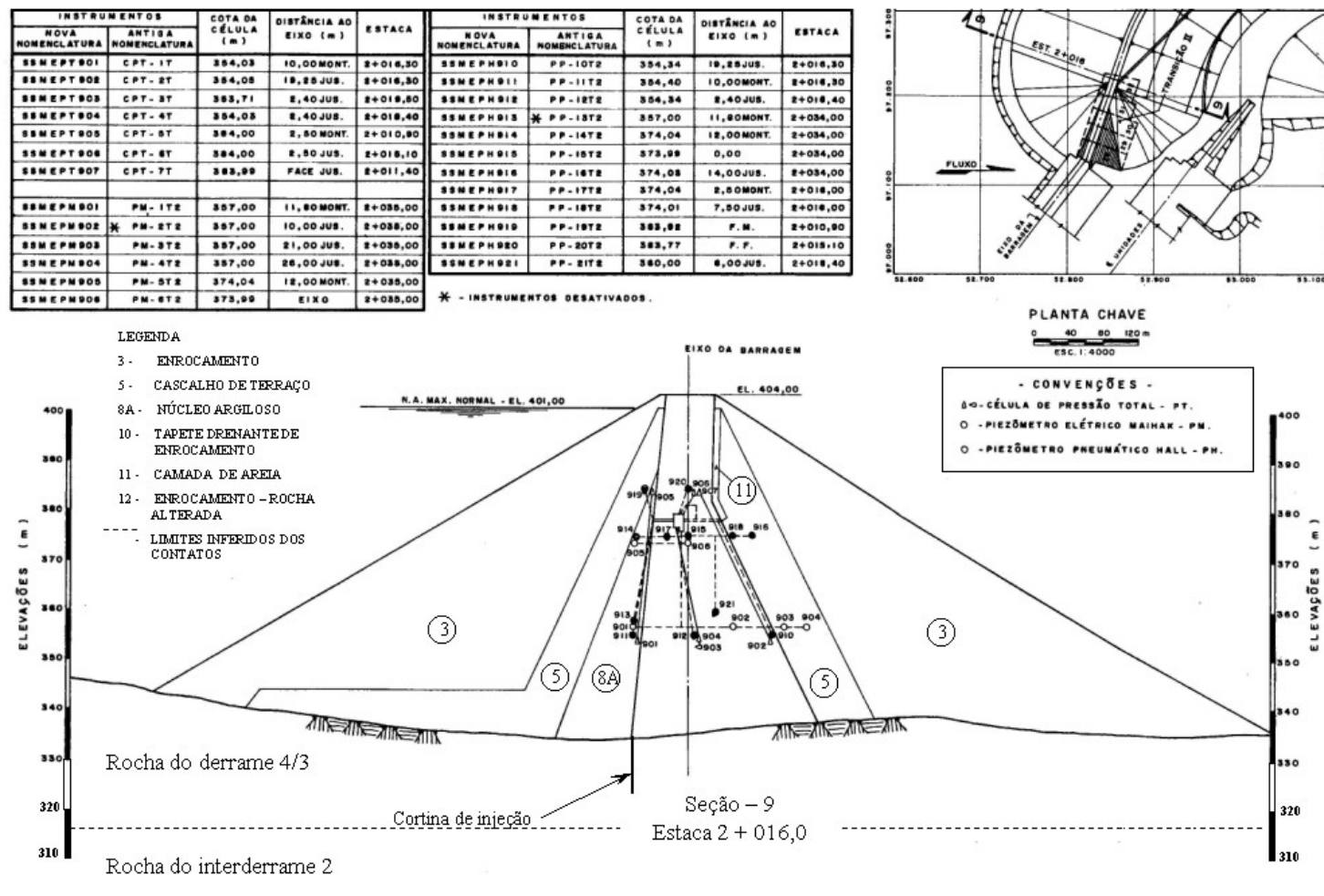


Figura I.21 – Barragem de Terra e Enrocamento da Margem Esquerda – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0

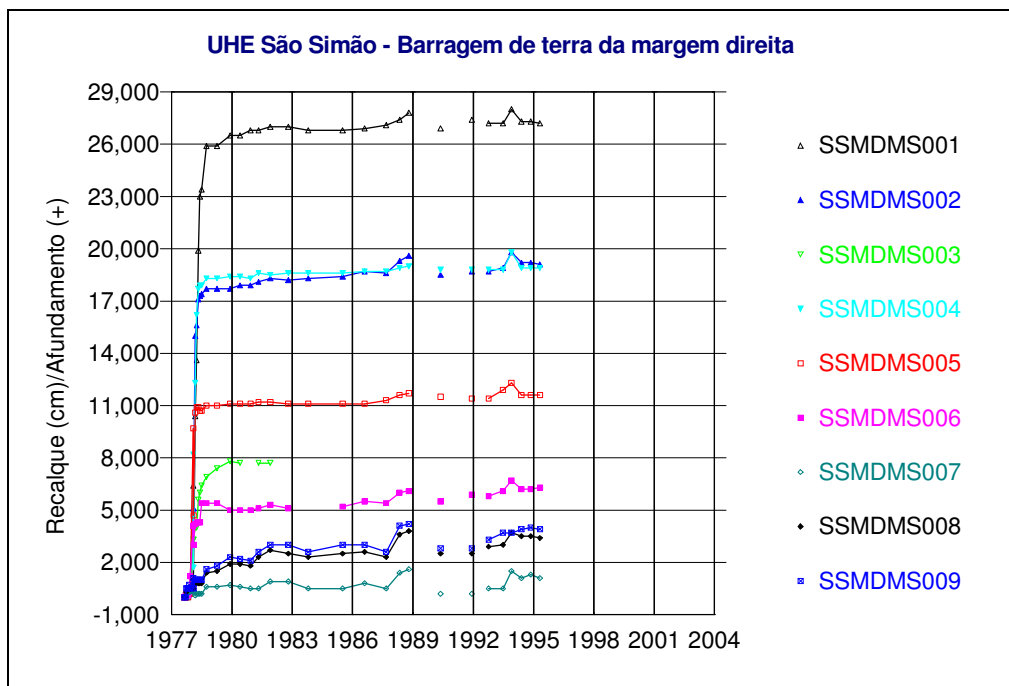


# **ANEXO II**

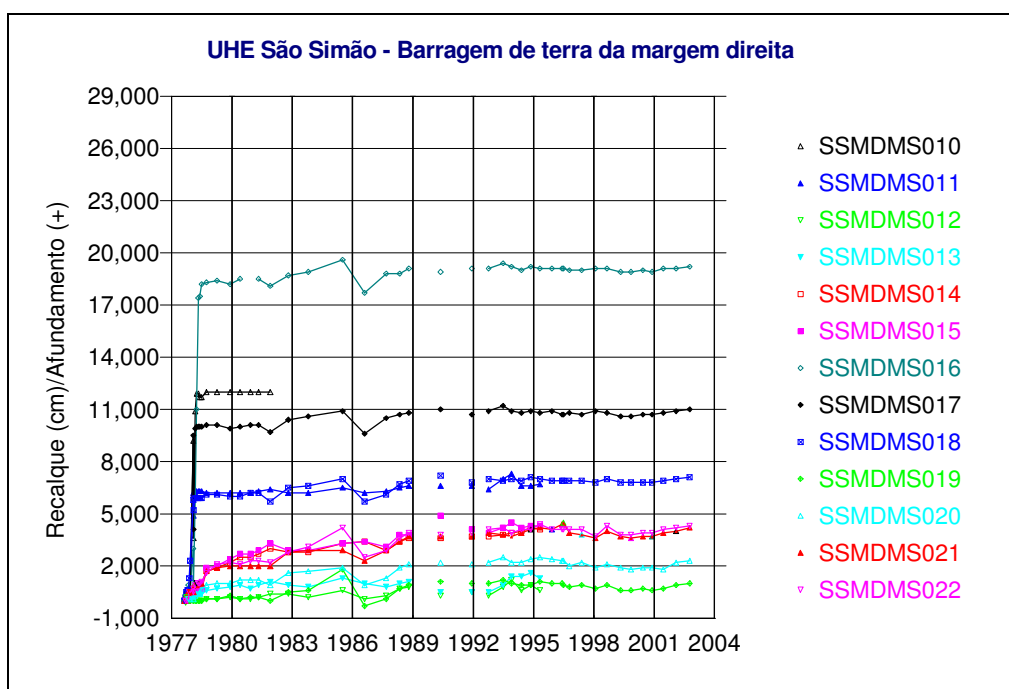
Marcos de Superfície

Barragem de Terra

- Margem Direita -



(a)



(b)

Figura II.1 – Marcos de Superfície – BTMD

(Distância ao eixo: 49,6 e 100,0 m à Jusante (a) e 5,0 e 25,0 m à Jusante (b))

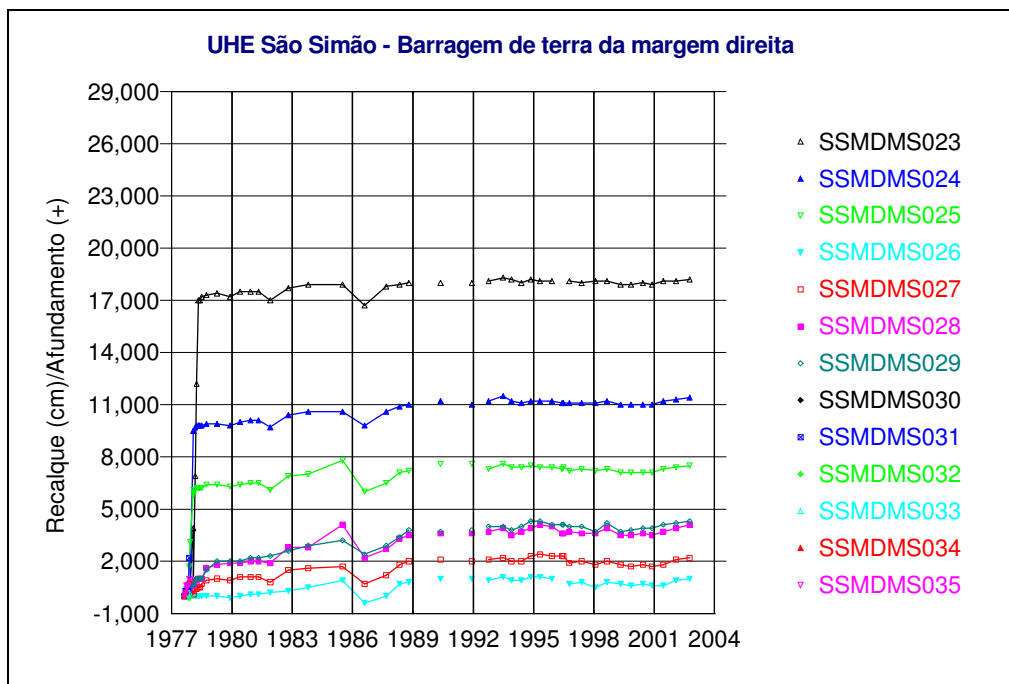


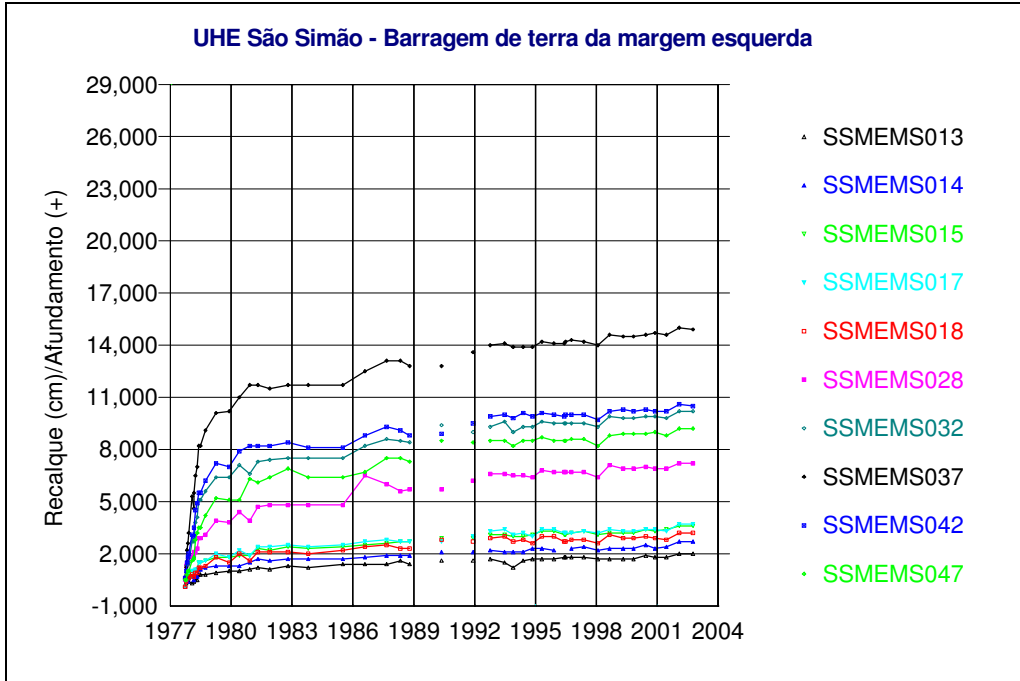
Figura II.2 – Marcos de Superfície –BTMD – Instalados à Montante do Eixo

# **ANEXO III**

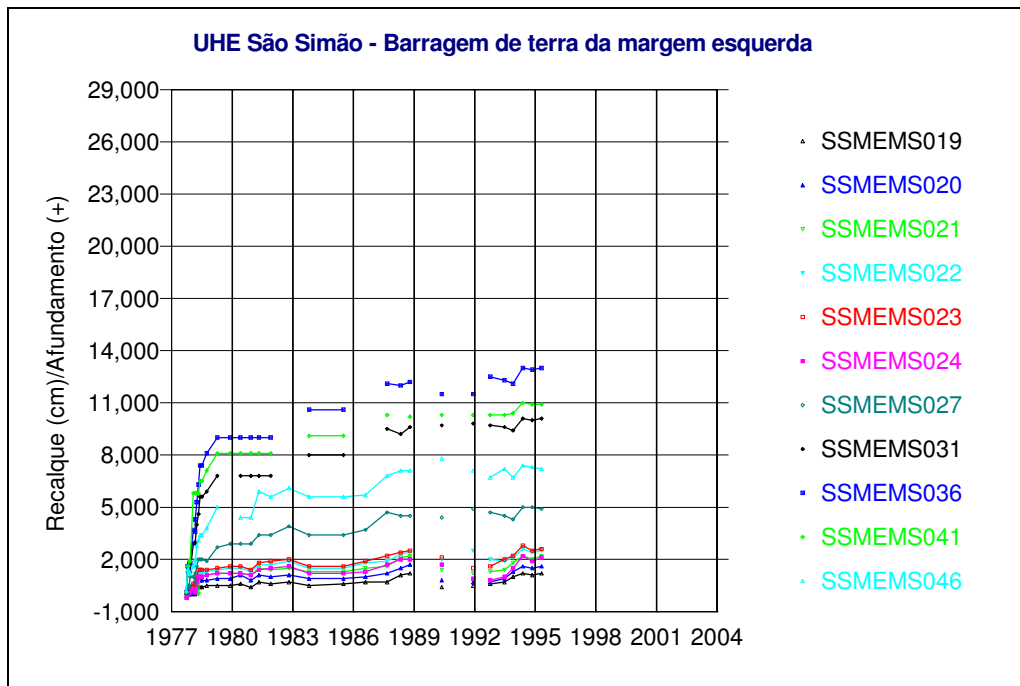
Marcos de Superfície

Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento

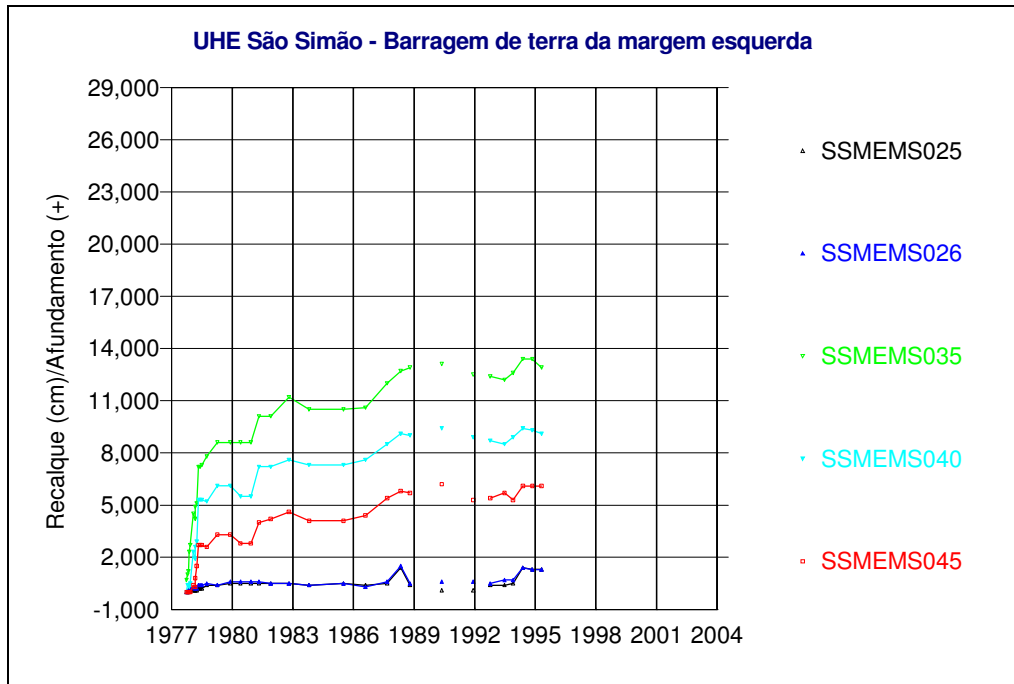
- Margem Esquerda -



(a)



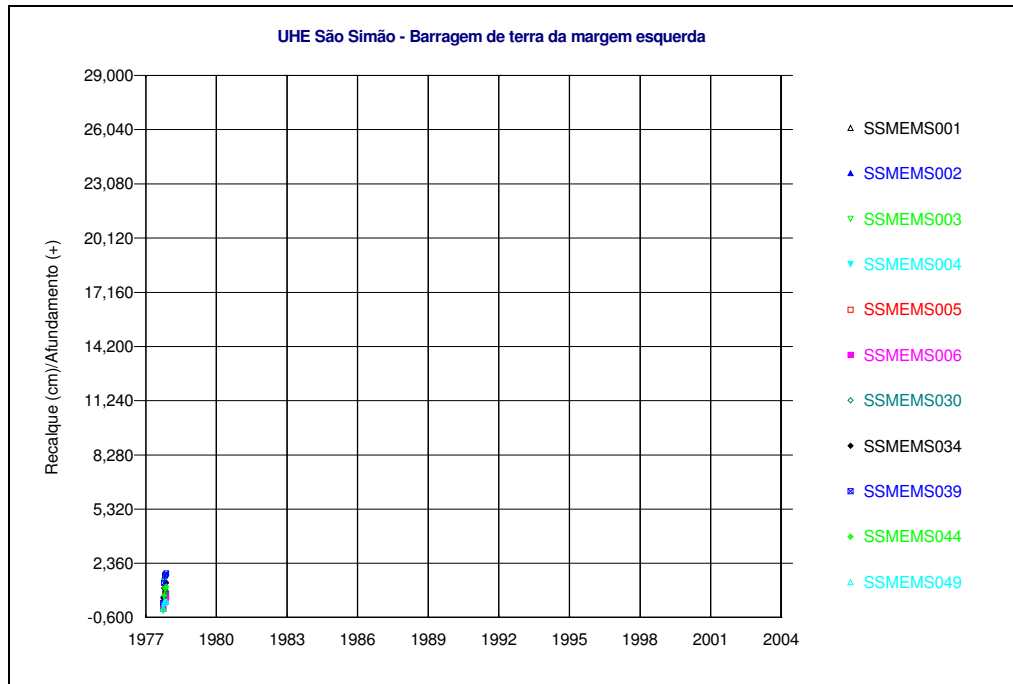
(b)



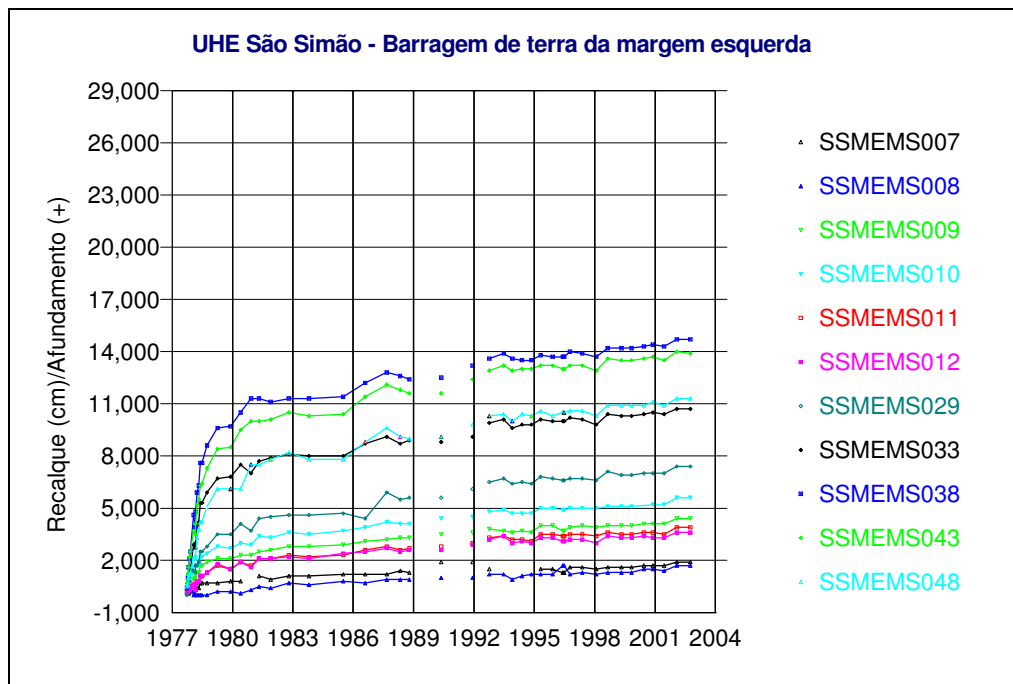
(c)

Figura III.1 – Marcos de Superfície – BTME

(Distância ao eixo: 5,0 m à Jusante (a), 25,0 m à Jusante (b) e 50,0 e 57,0 m à Jusante (c))



(a)



(b)

Figura III.2 – Marcos de Superfície – BTME  
(Distância ao eixo: 25,0 m à Montante (a) e 5,0 m à Montante (b))

# **ANEXO IV**

Medidores de Recalque Tipo IPT

Barragem de Terra

- Margem Direita -



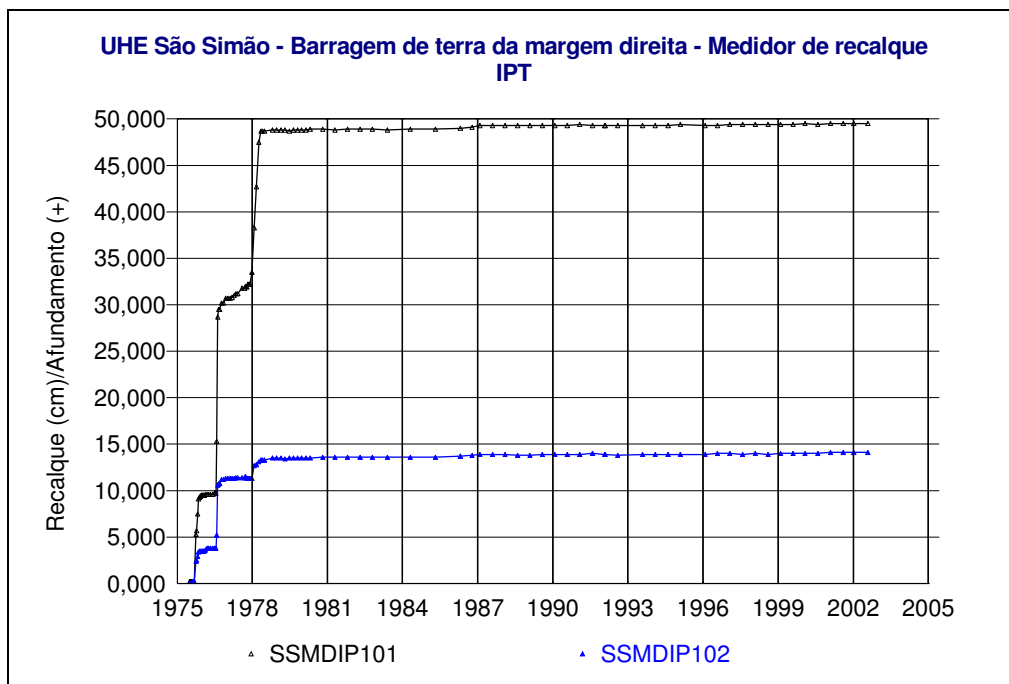


Figura IV.1 – Medidores de Recalque IPT – BTMD – Seção 1 – Estaca 0 + 460,0

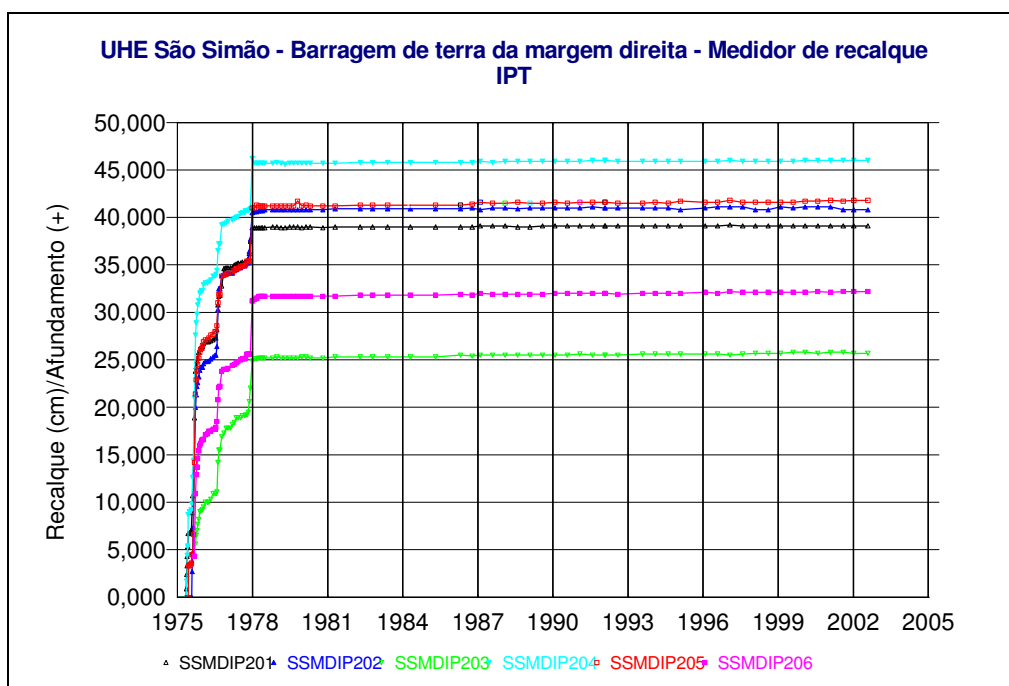


Figura IV.2 – Medidores de Recalque IPT – BTMD – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0

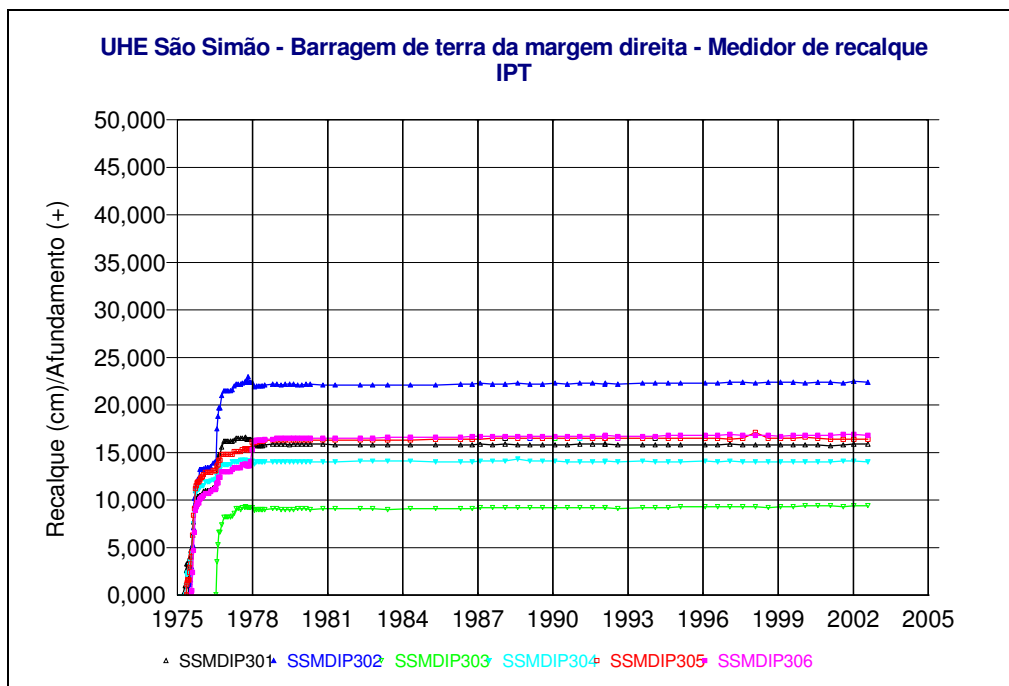


Figura IV.3 – Medidores de Recalque IPT – BTMD – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0

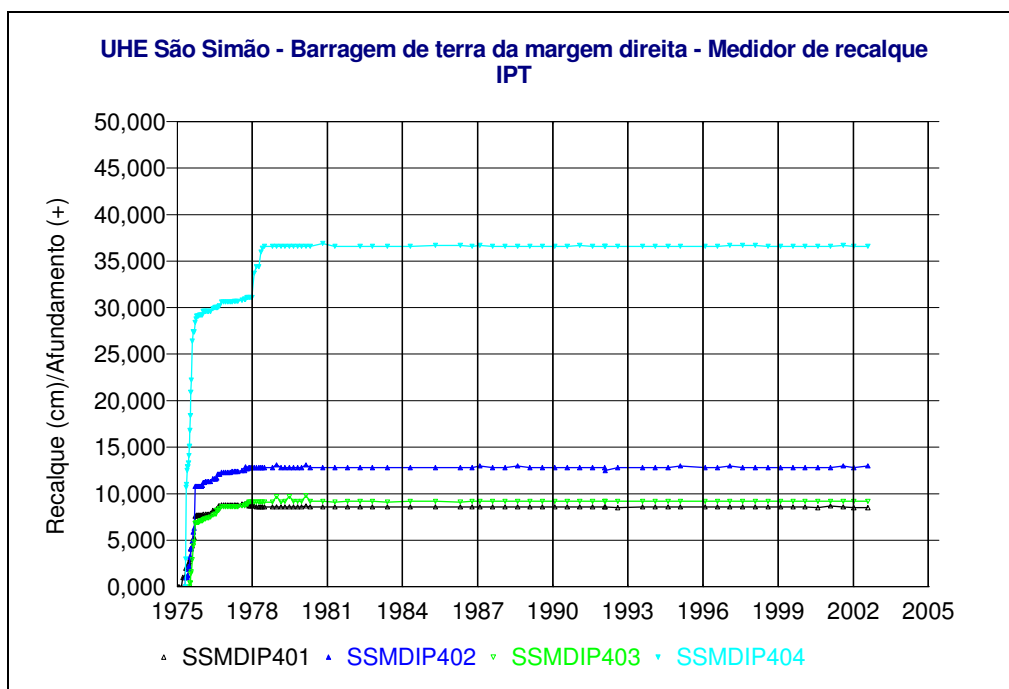


Figura IV.4 – Medidores de Recalque IPT – BTMD – Seção 4 – Estaca 0 + 870,0

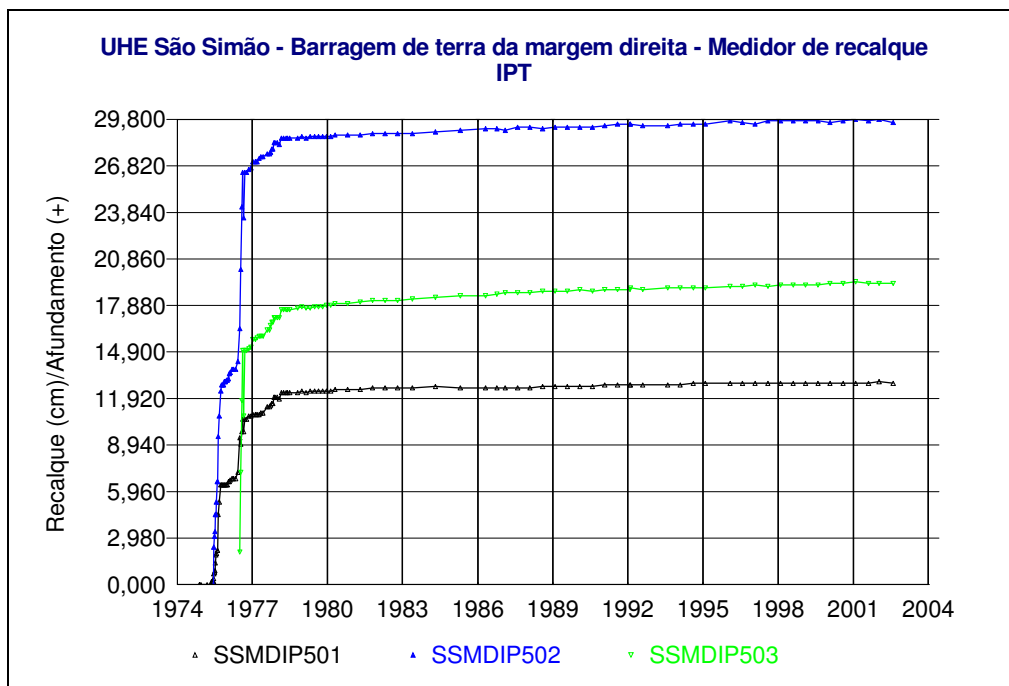


Figura IV.5 – Medidores de Recalque IPT – BTMD – Seção 5 – Estaca 1 + 240,0

# **ANEXO V**

Medidores de Recalque Tipo IPT  
Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento  
- Margem Esquerda -

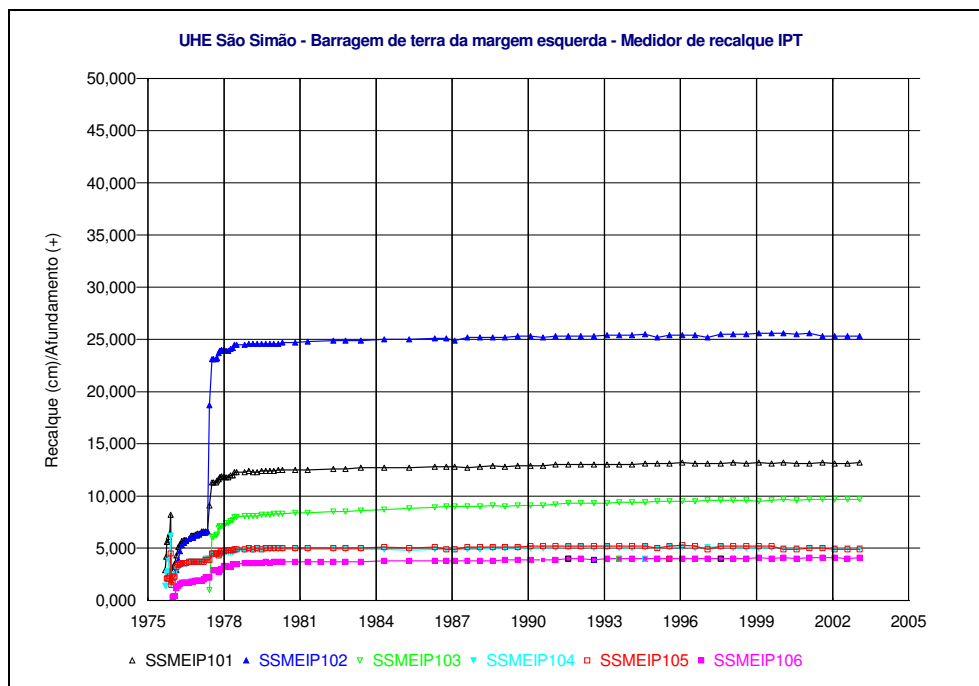


Figura V.1 –Medidores de Recalque IPT – BTME– Seção 1 – Estaca 3 + 160,0

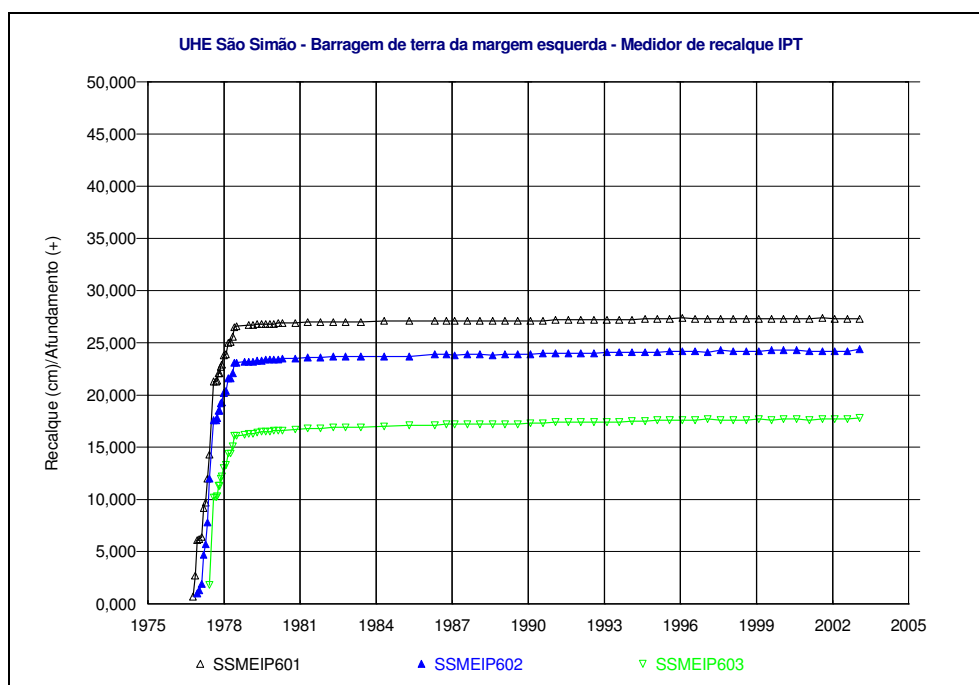


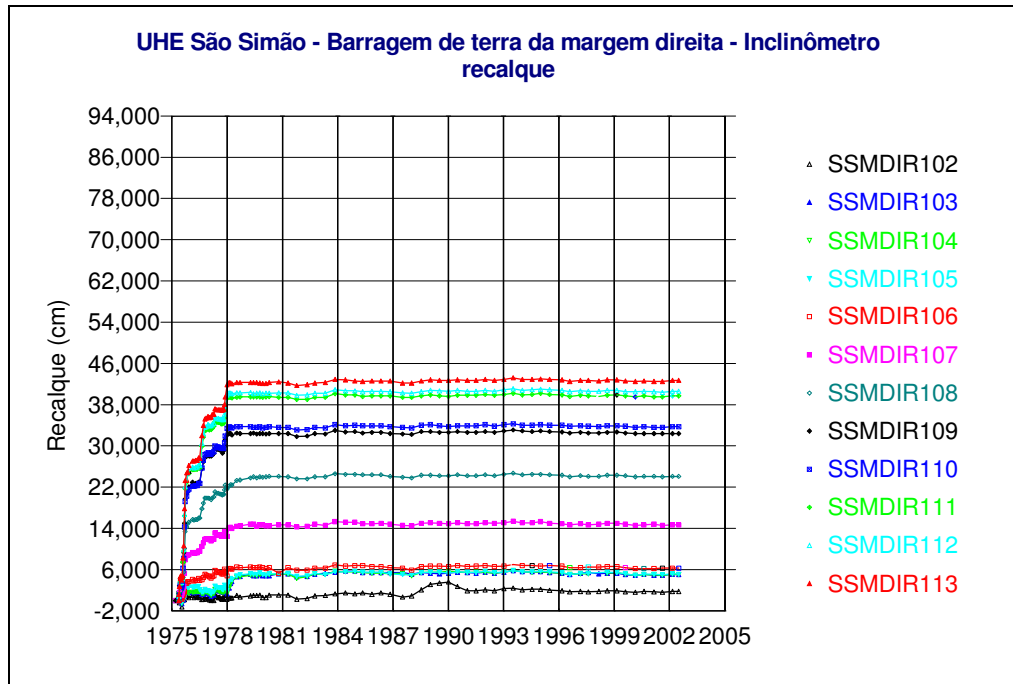
Figura V.2 – Medidores de Recalque IPT – BTME– Seção 6 – Estaca 2 + 500,0

# **ANEXO VI**

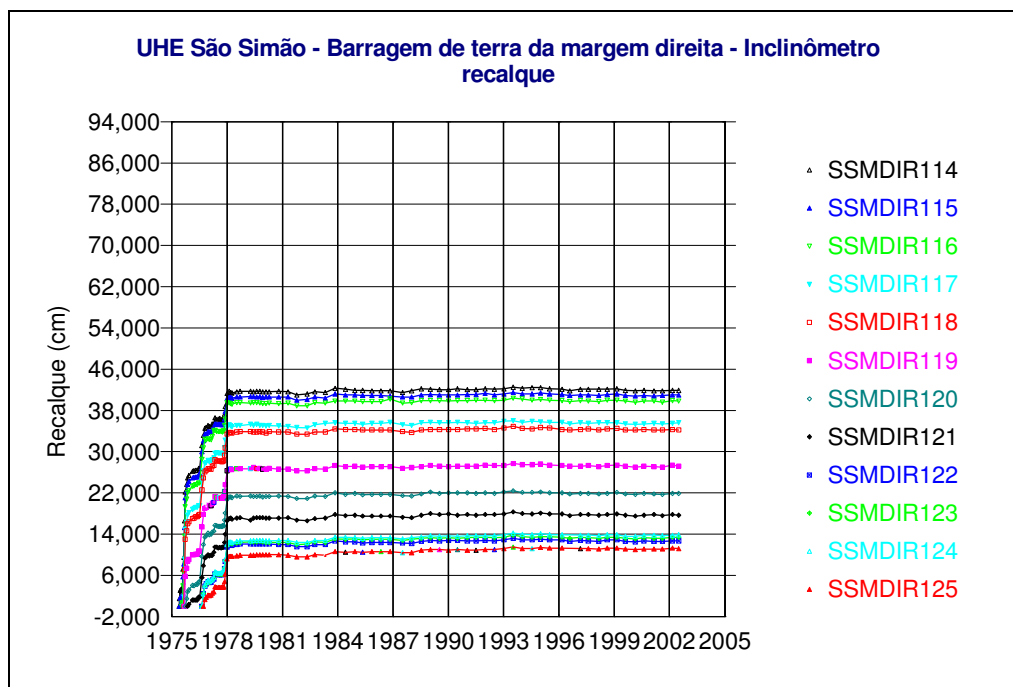
Inclinômetros de Recalque

Barragem de Terra

- Margem Direita -

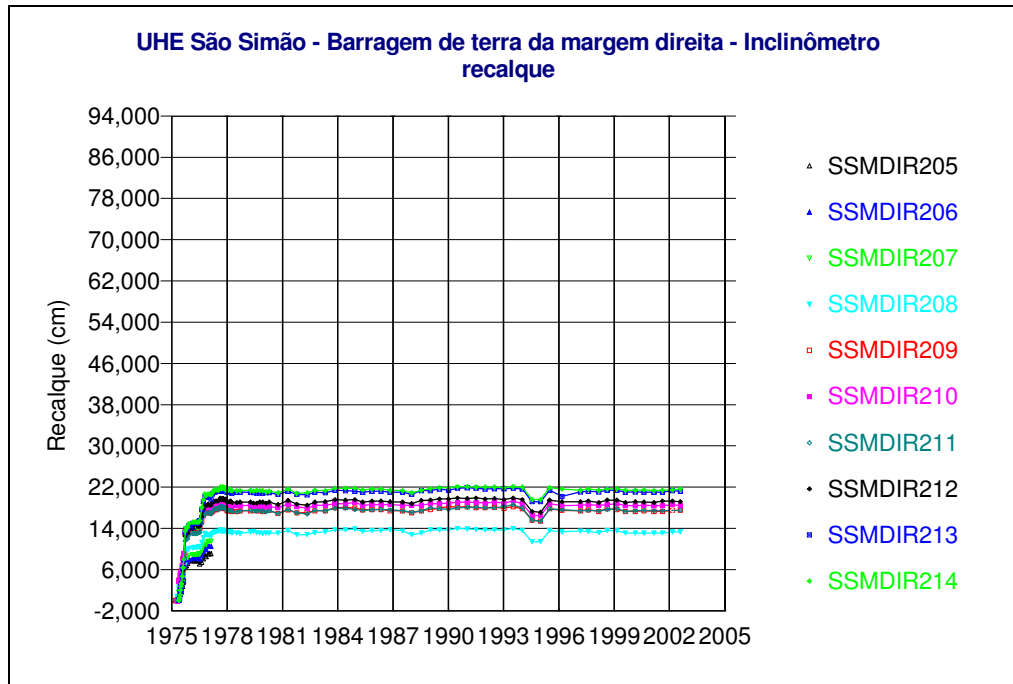


(a)

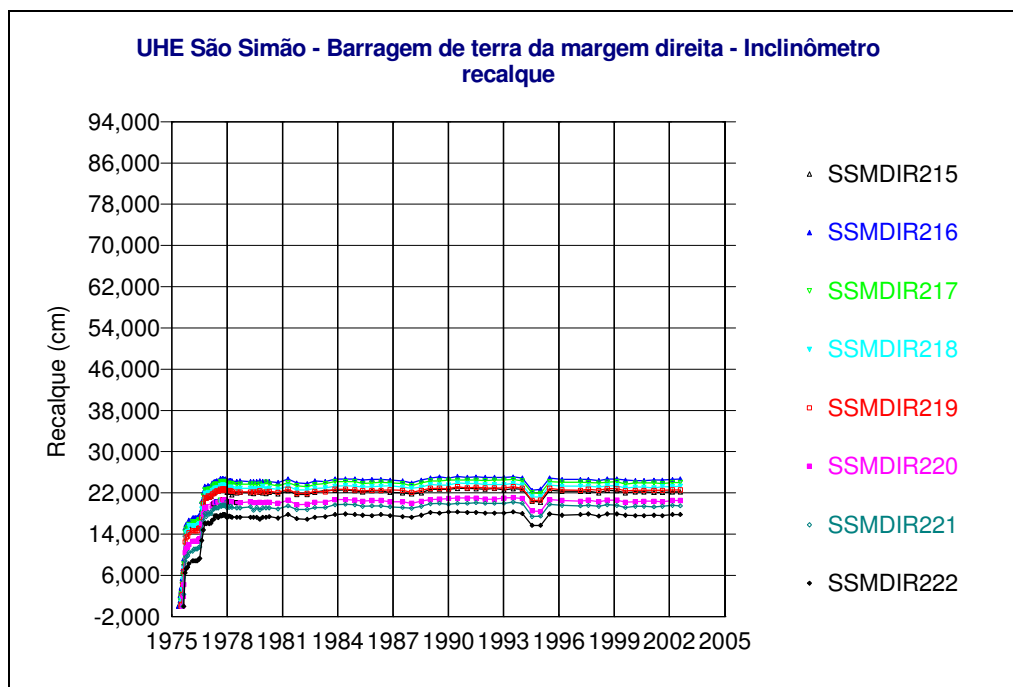


(b)

Figura VI.1 – Inclinômetro de Recalque – IR100 – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0  
(Segmentos: IR102-IR113 (a) e IR114-IR125 (b))

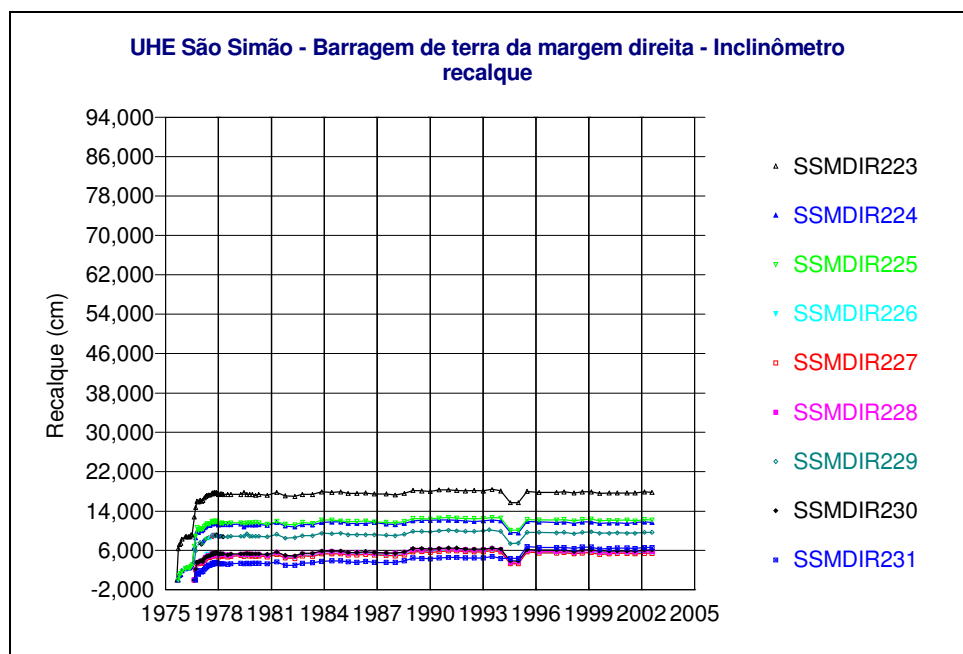


(a)



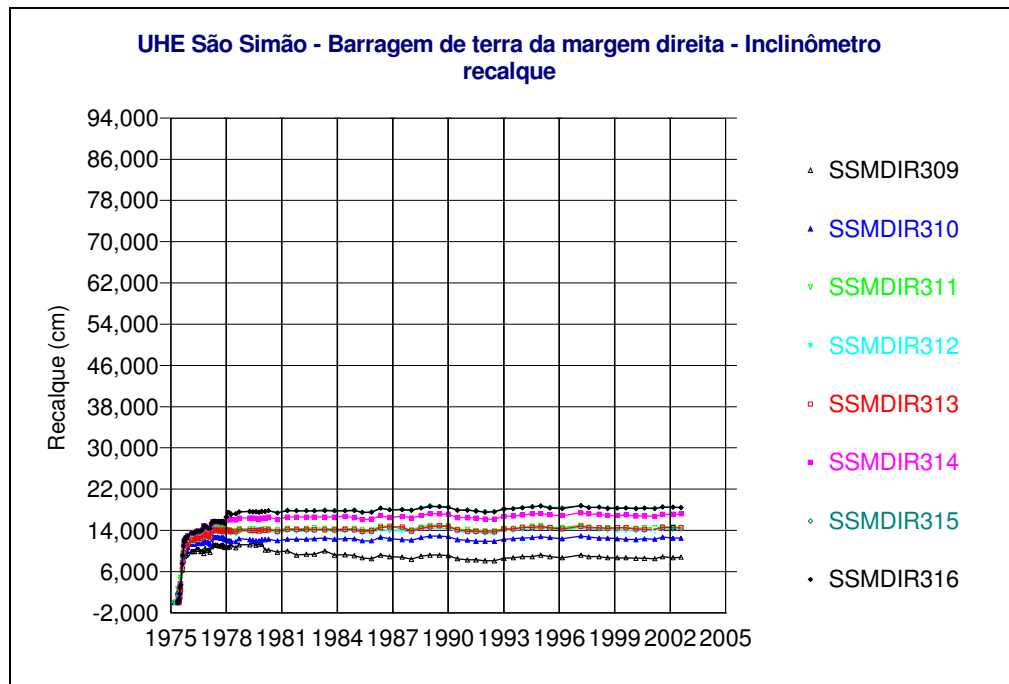
(b)



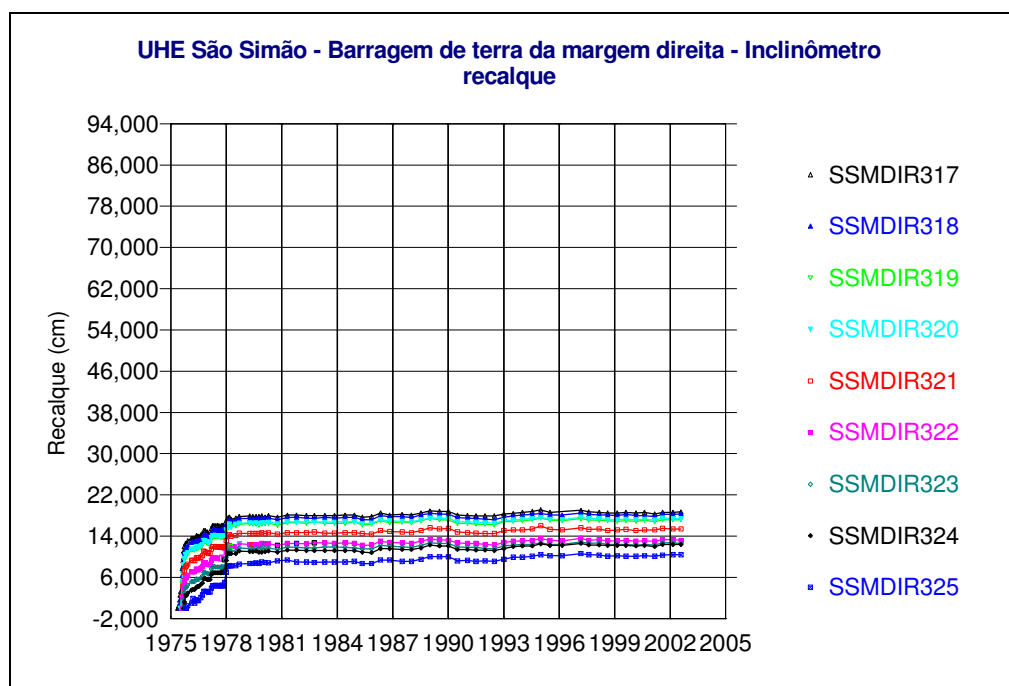


(c)

Figura VI.2 – Inclinômetro de Recalque – IR200 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Segmentos: IR205-IR214 (a), IR215-IR222 (b) e IR223-IR231 (c))



(a)

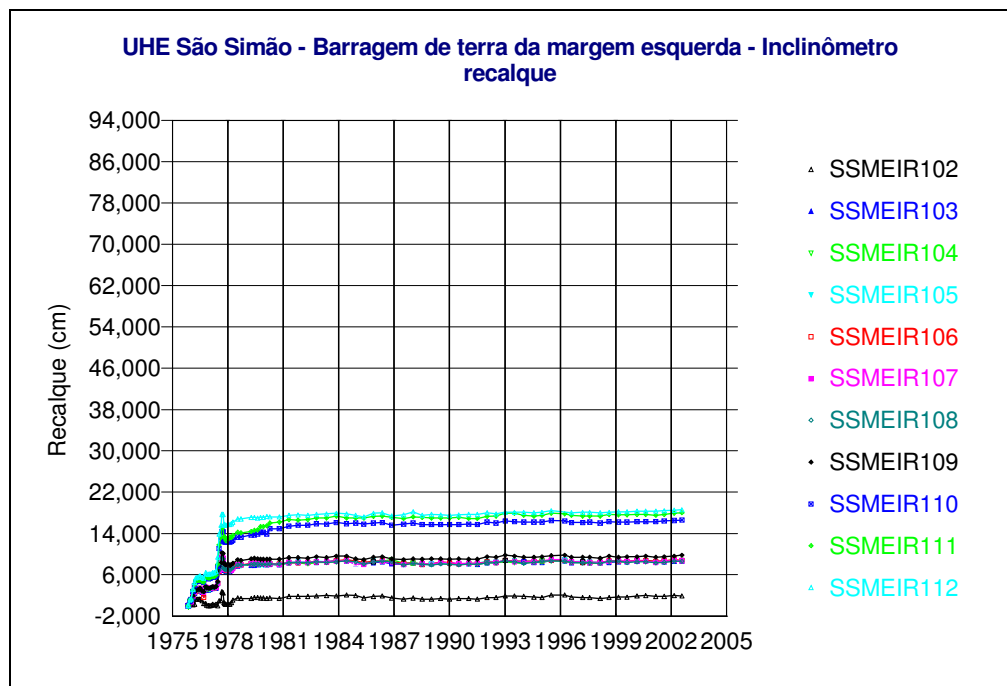


(b)

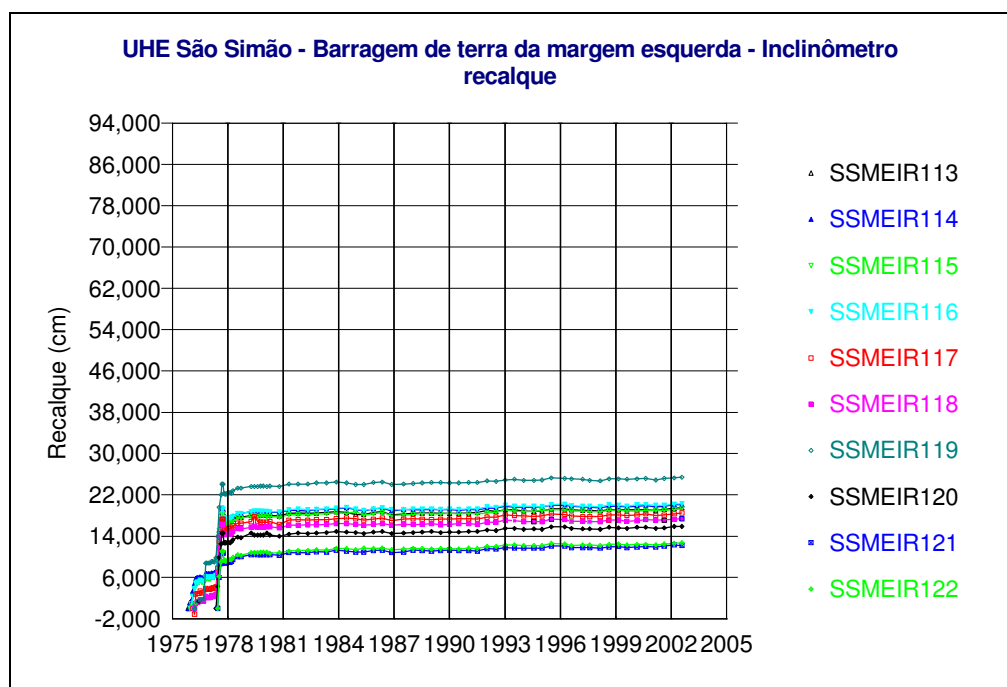
Figura VI.3 –Inclinômetro de Recalque – IR300 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Segmentos: IR309-IR316 (a) e IR317-IR325 (b))

# **ANEXO VII**

Inclinômetros de Recalque  
Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento  
- Margem Esquerda -



(a)



(b)

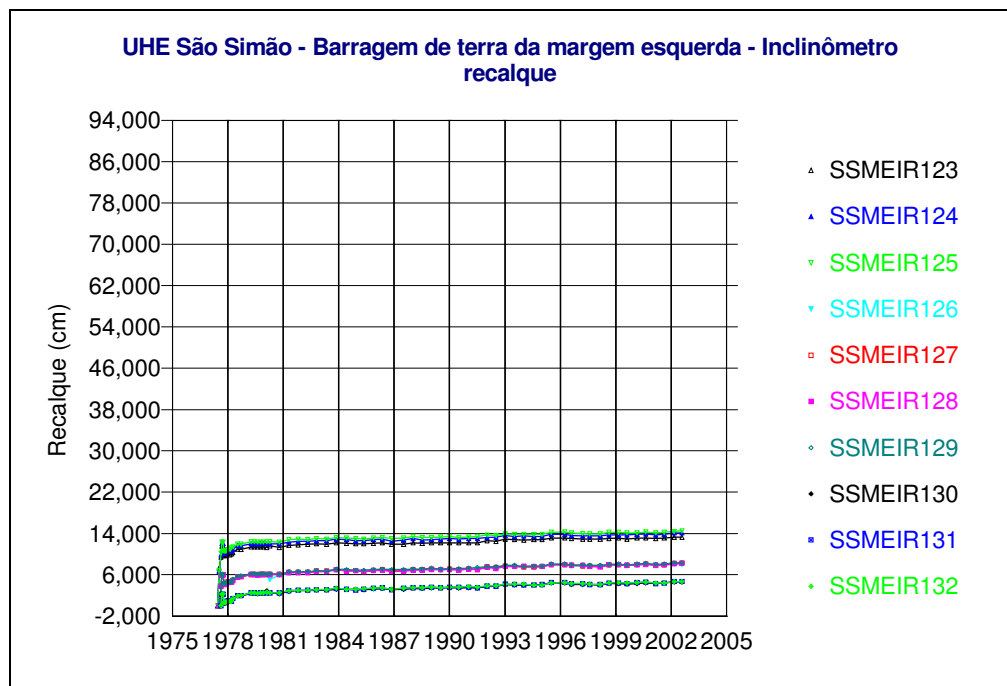
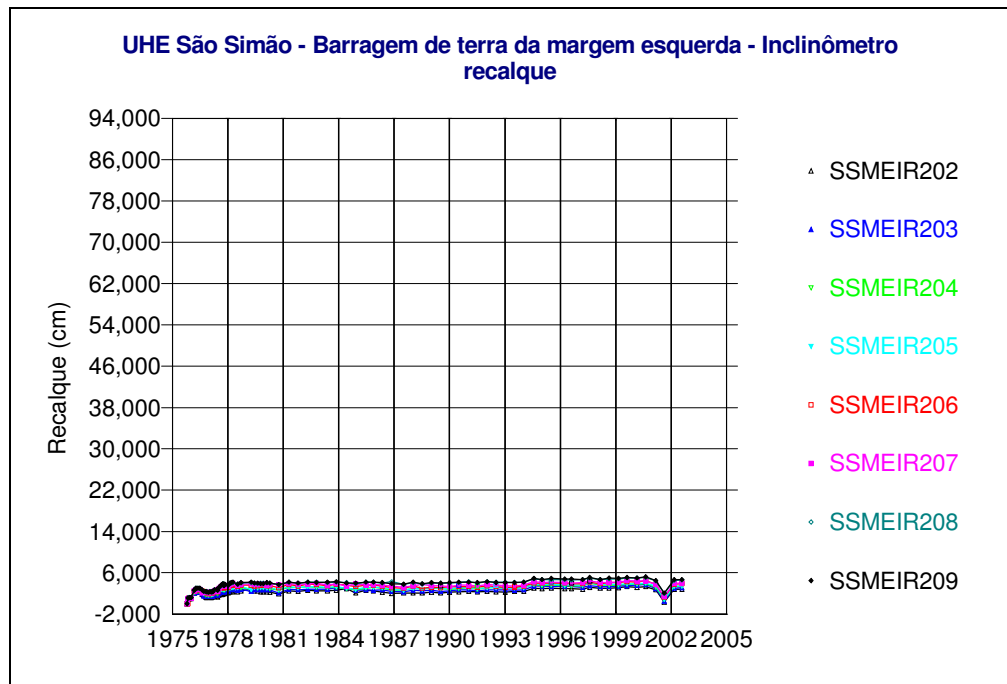
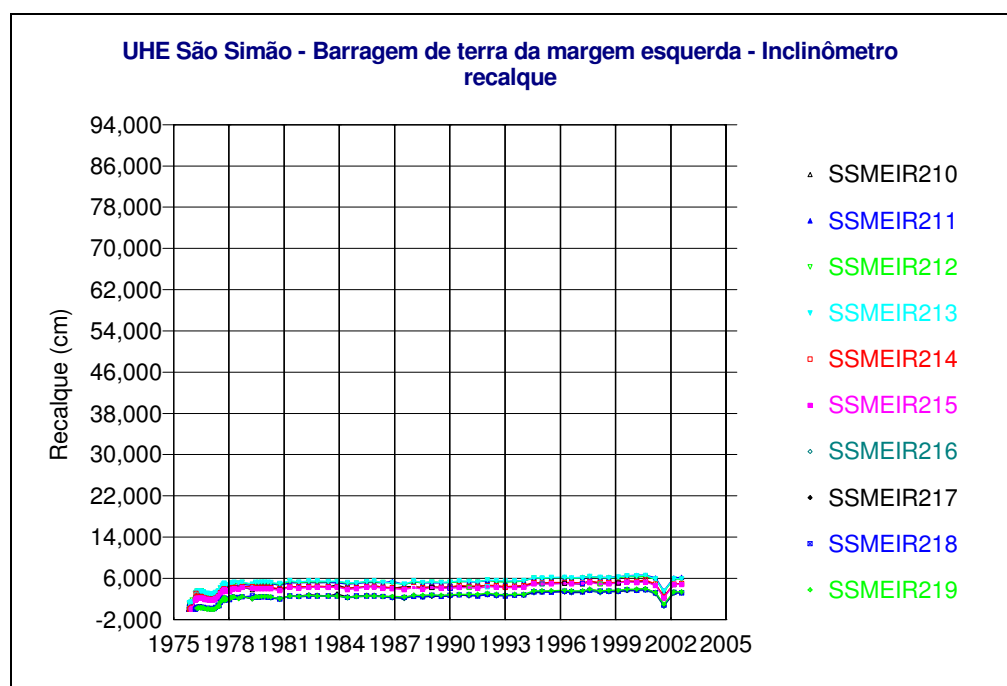


Figura VII.1 – Inclínômetro de Recalque – IR100 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Segmentos: IR102-IR112 (a), IR113-IR122 (b) e IR123-IR132 (c))

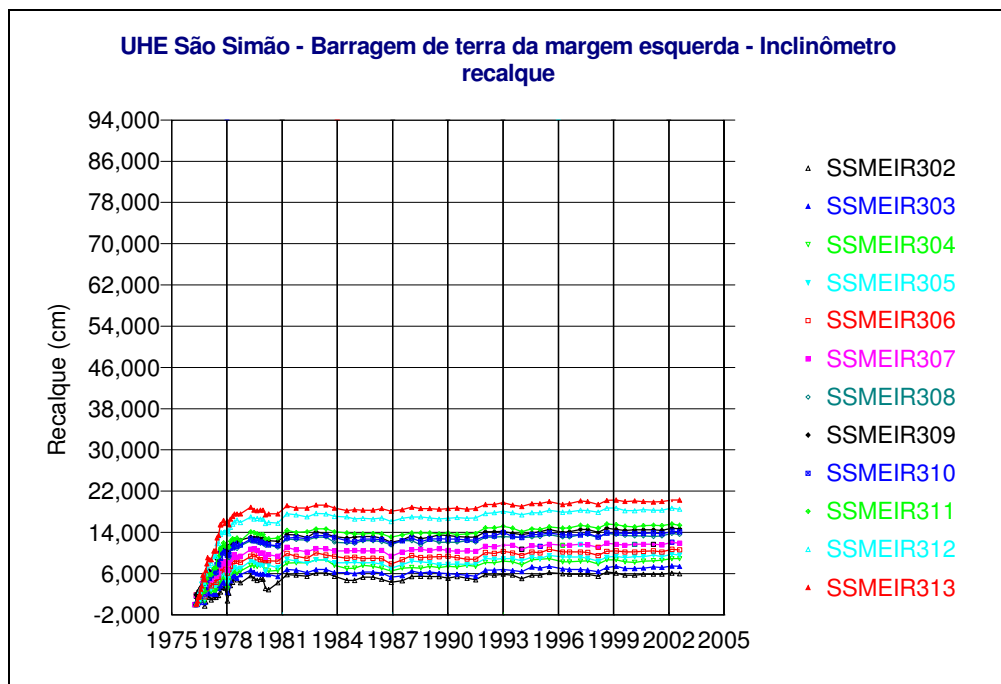


(a)

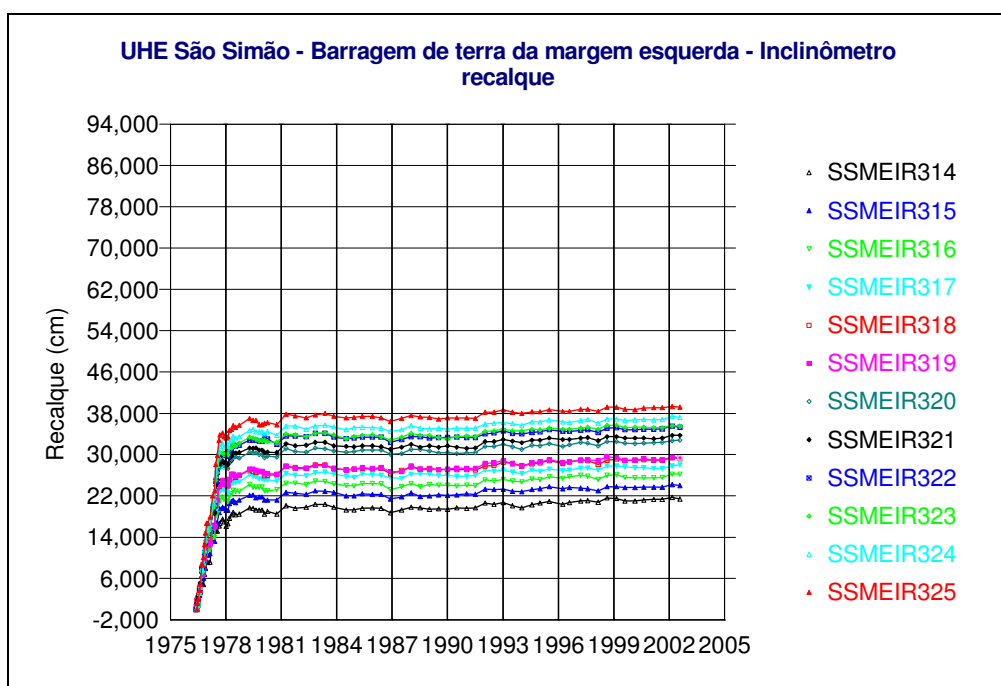


(b)

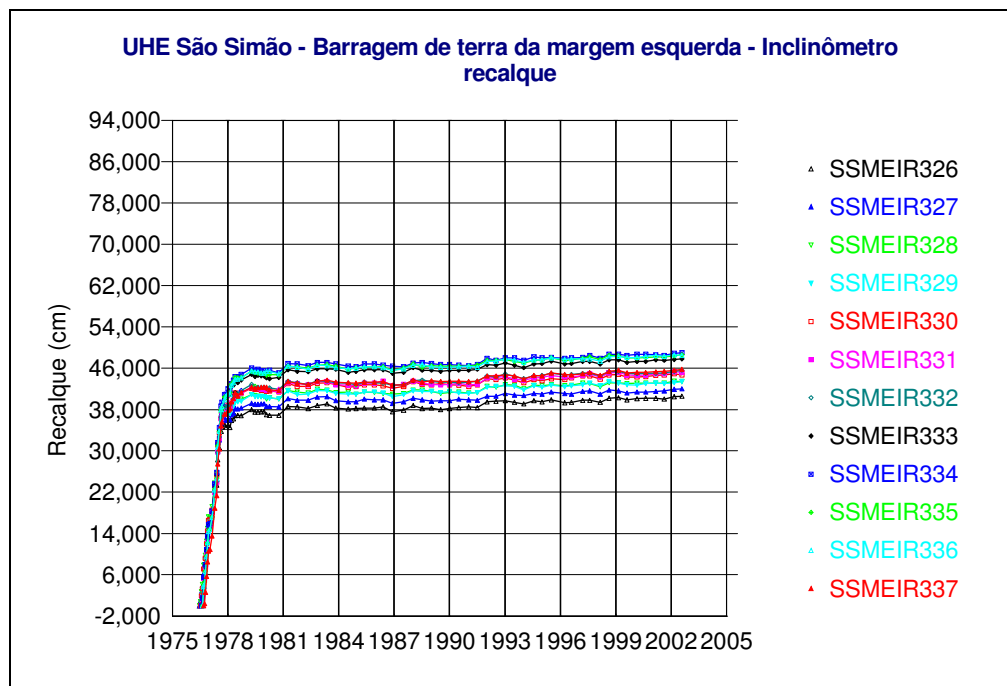
Figura VII.2 –Inclinômetro de Recalque – IR200 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Segmentos: IR202-IR209 (a) e IR210-IR219 (b))



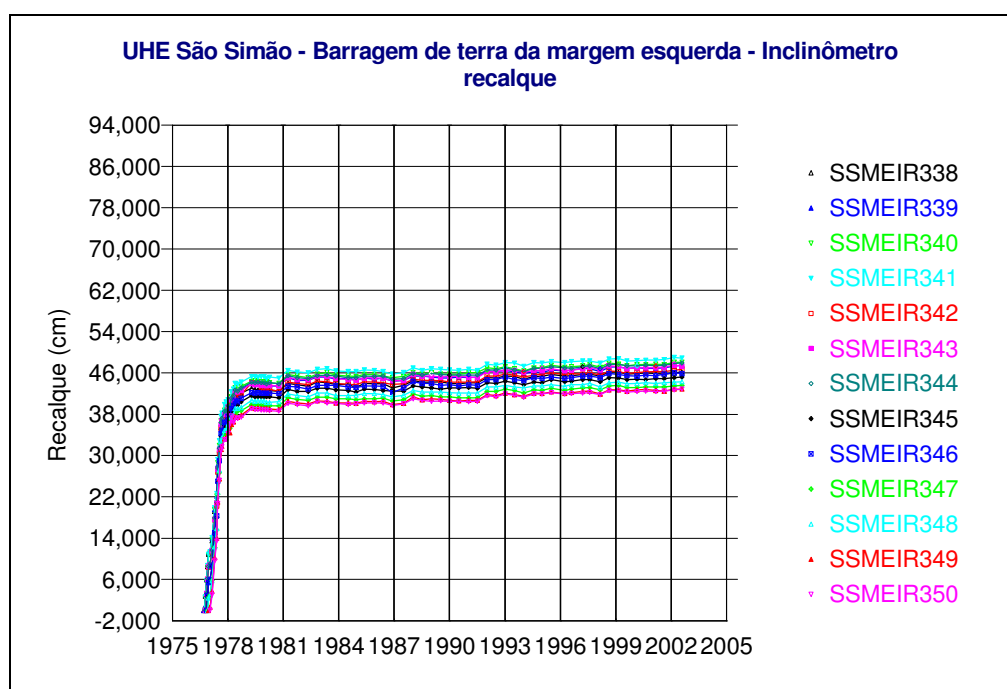
(a)



(b)

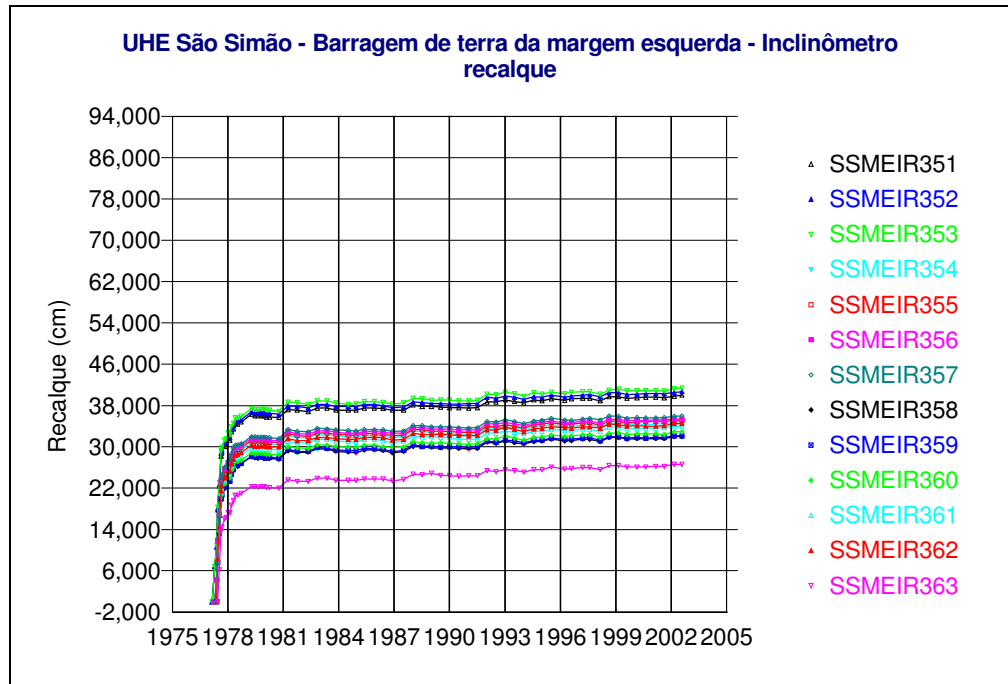


(c)

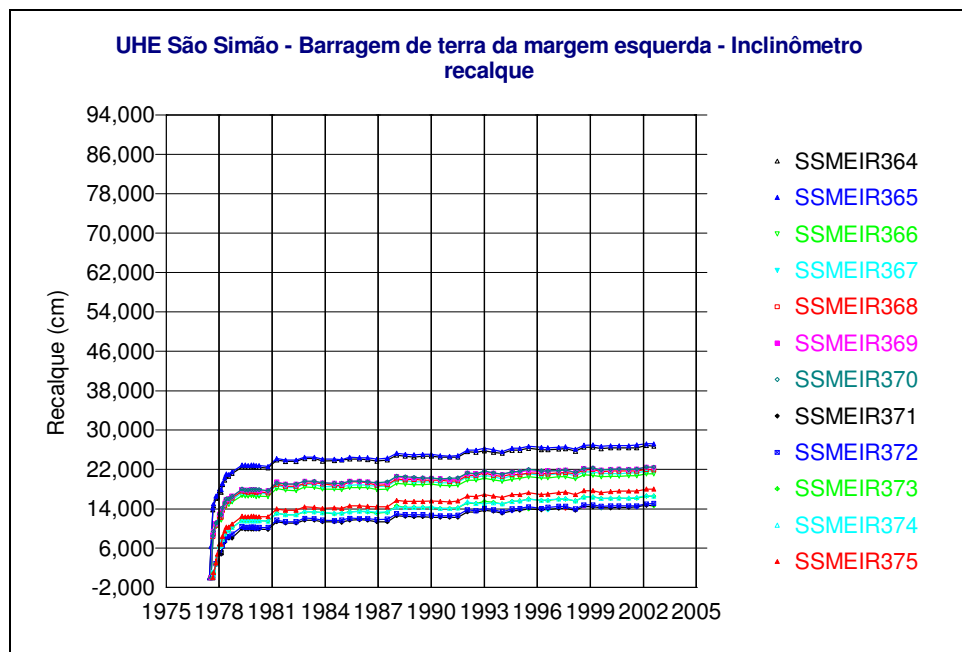


(d)



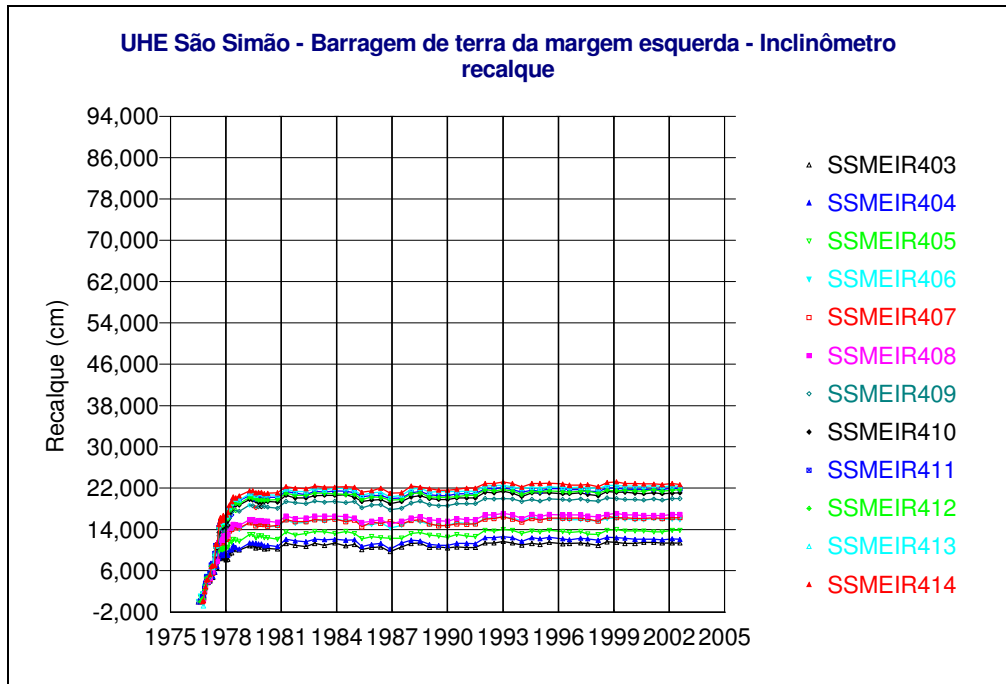


(e)

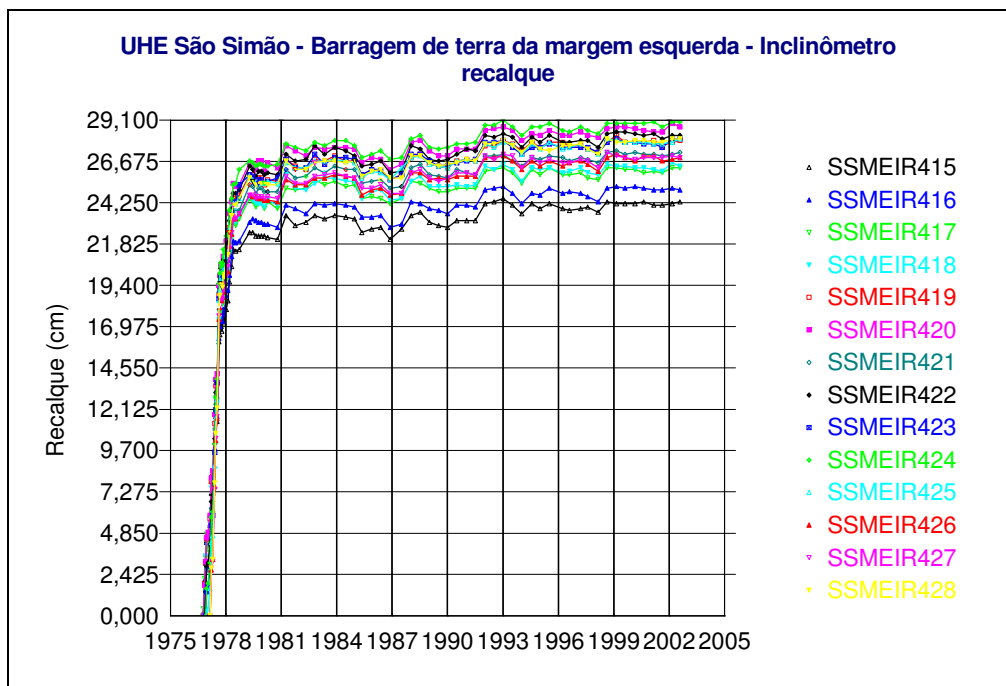


(f)

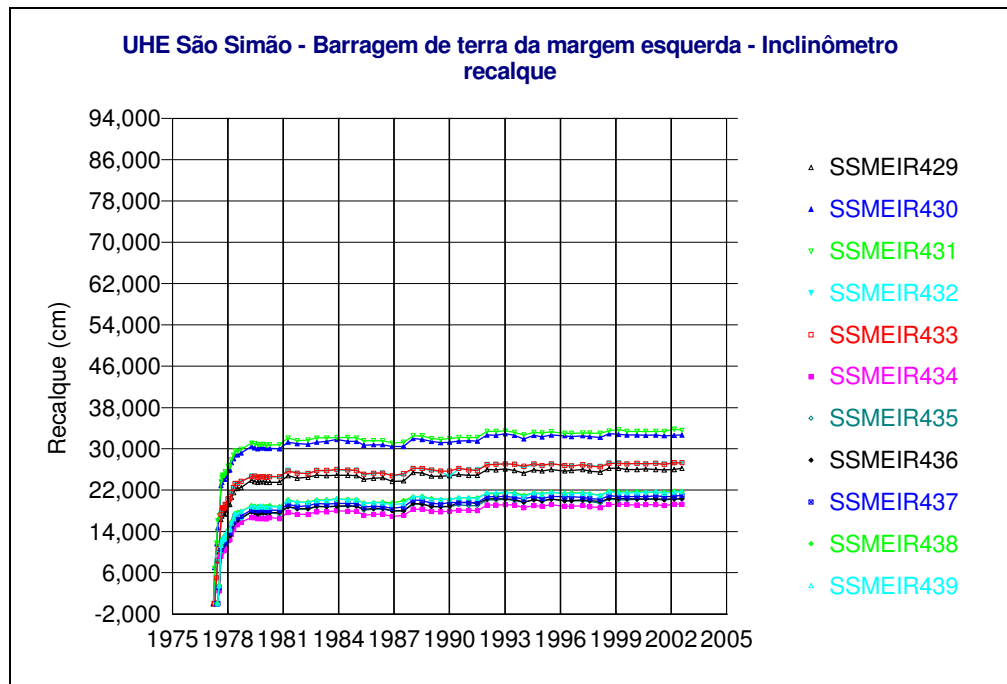
Figura VII.3 – Inclinômetro de Recalque – IR300 – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0  
(Segmentos: IR302-IR313 (a), IR314-IR325 (b), IR326-IR337 (c), IR338-IR350 (d),  
IR351-IR363 (e) e IR364-IR375(f))



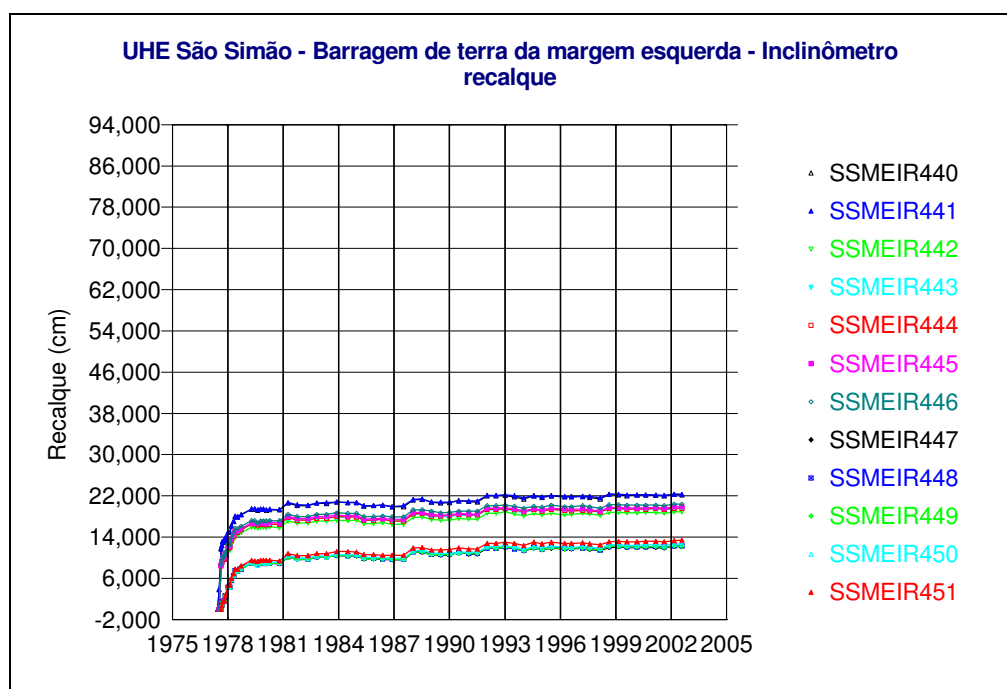
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura VII.4 – Inclinômetro de Recalque – IR400 – Seção 8A – Estaca 2 + 325,0  
(Segmentos: IR403-IR414 (a), IR415-IR428 (b), IR429-IR439 (c) e IR440-IR451 (d))

# **ANEXO VIII**

Inclinômetros de Deflexão

Barragem de Terra

- Margem Direita -

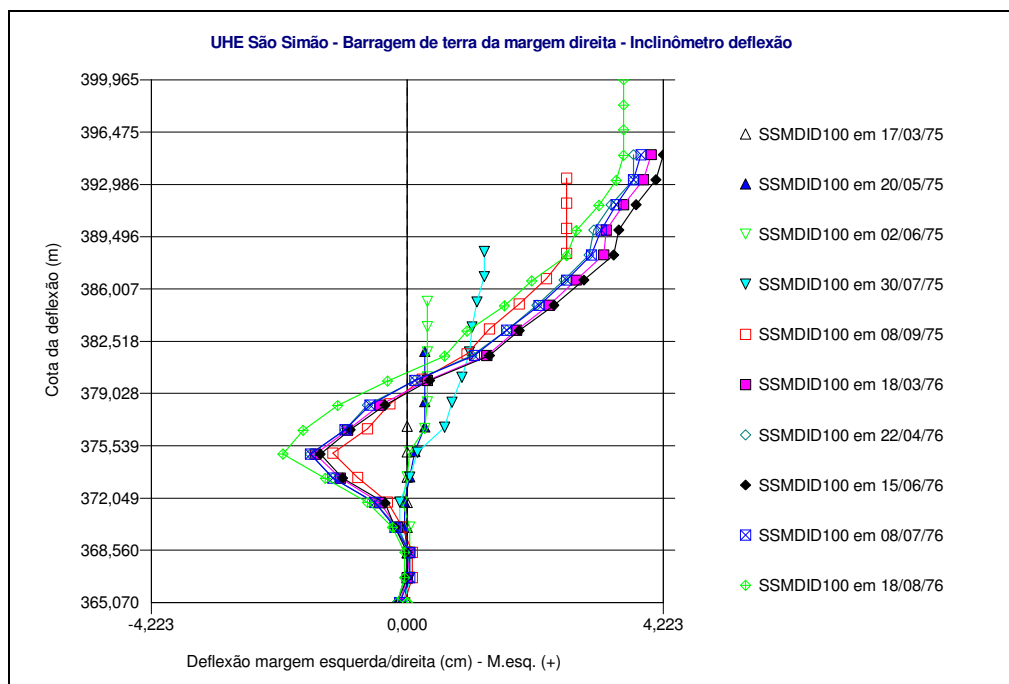
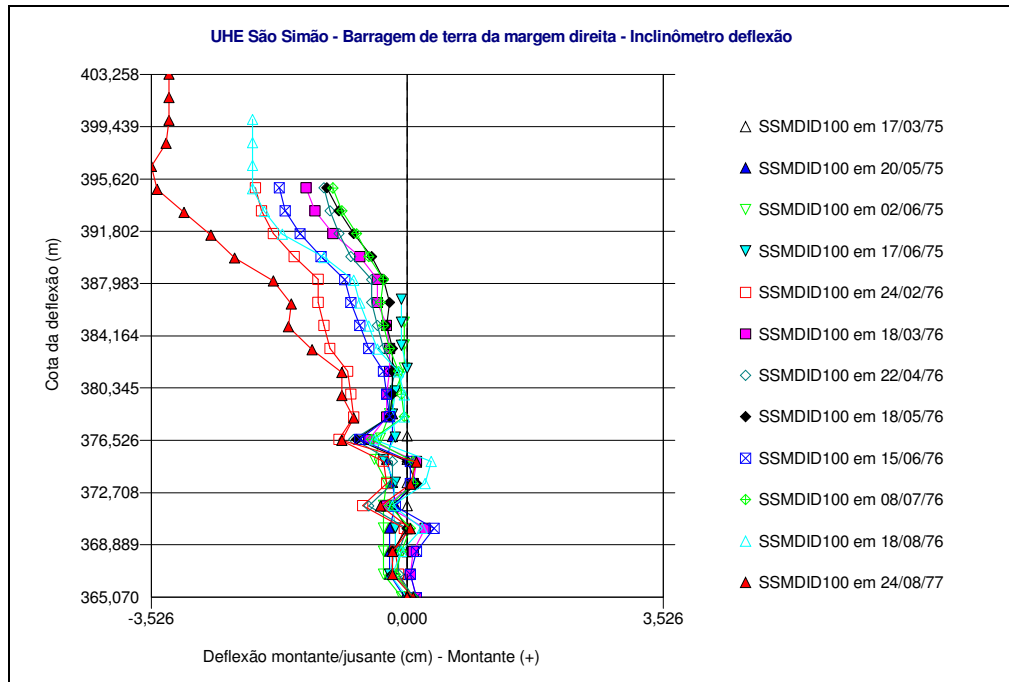
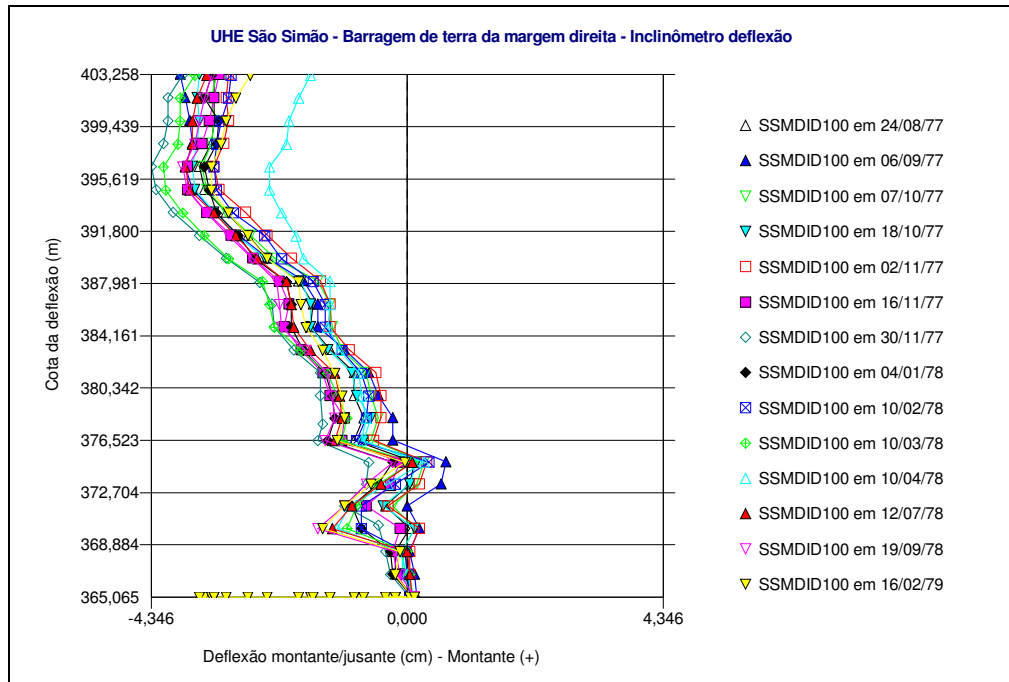
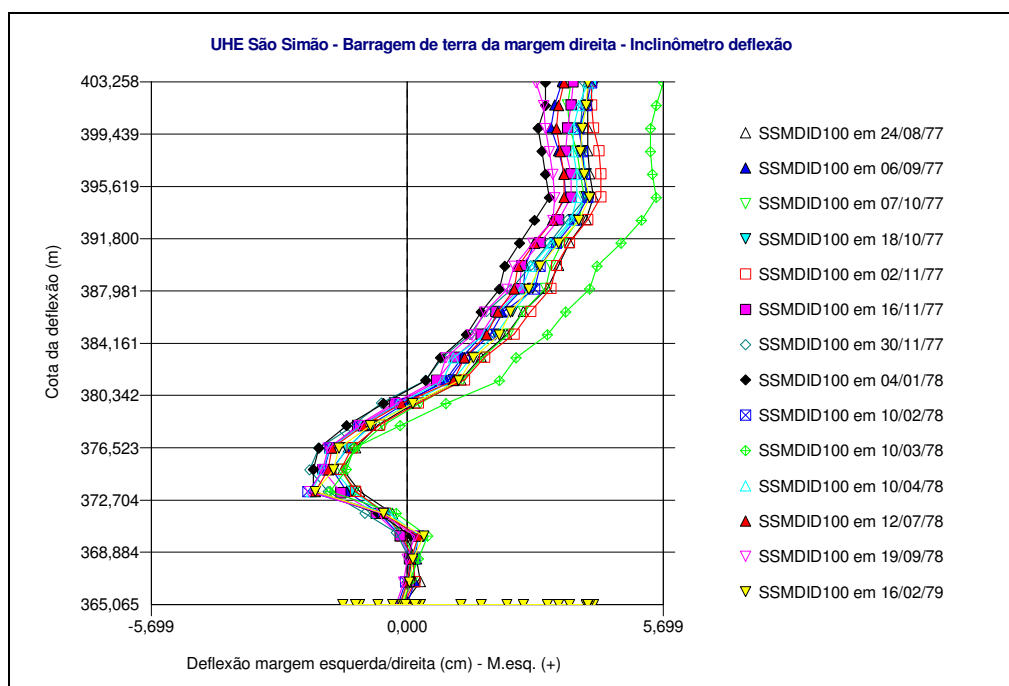


Figura VIII.1 – Inclínômetro de Deflexão – ID100 – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0  
(Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

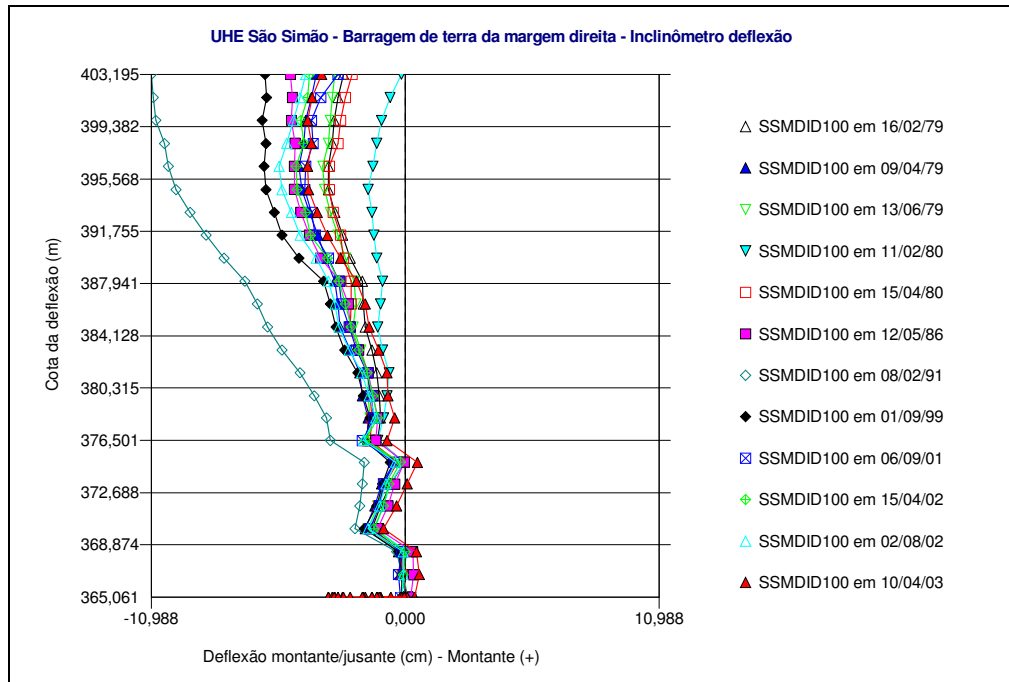


(a)

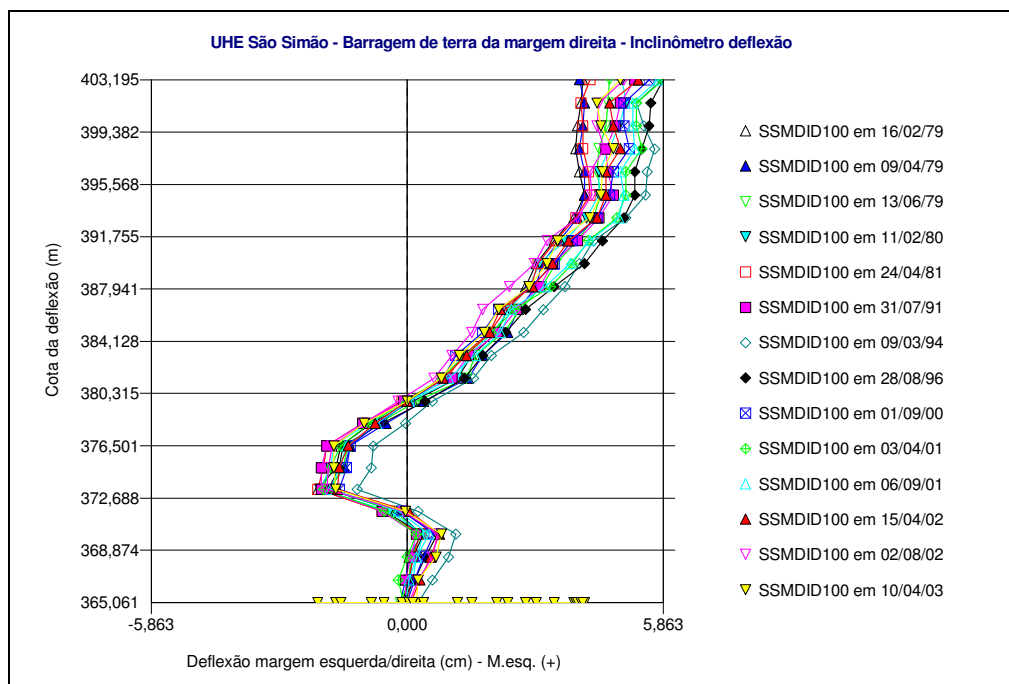


(b)

Figura VIII.2 – Inclínômetro de Deflexão – ID100 – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

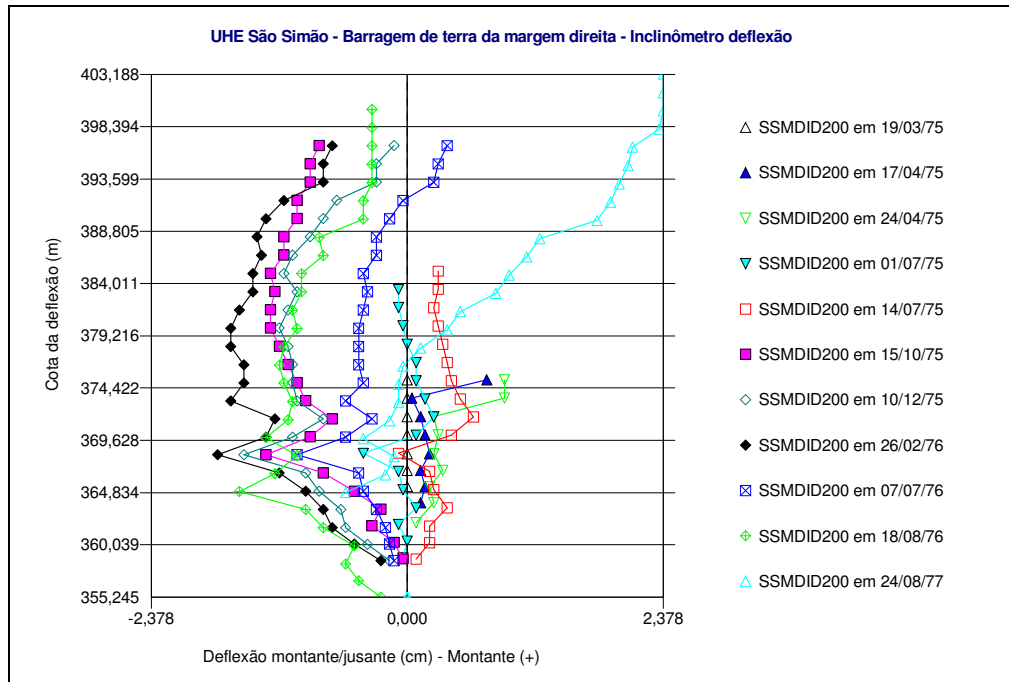


(a)

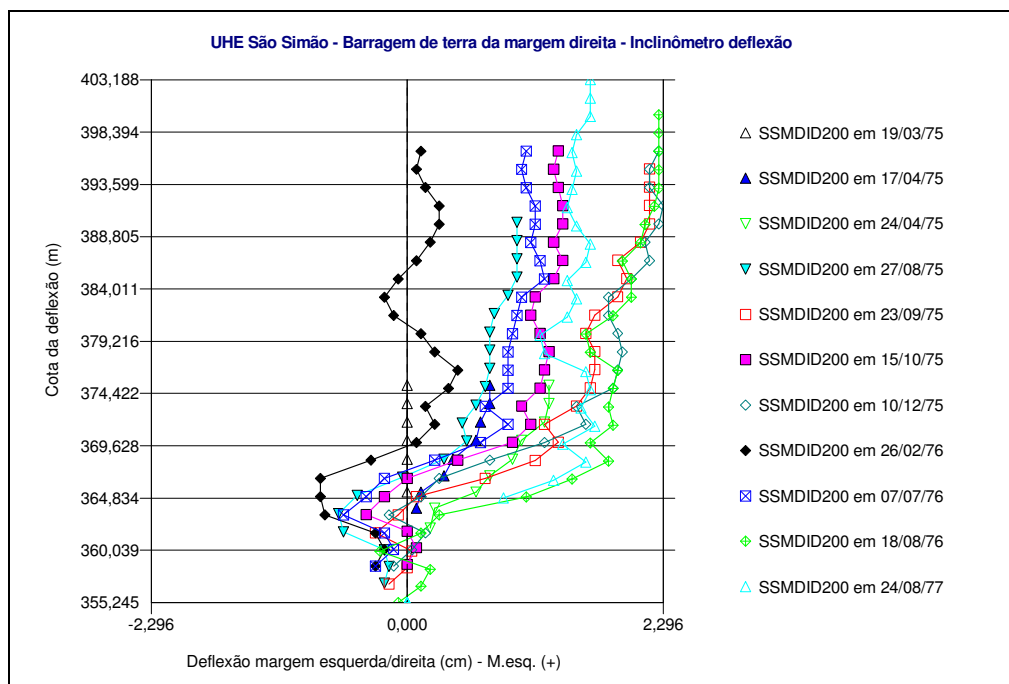


(b)

Figura VIII.3 – Inclinômetro de Deflexão – ID100 – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



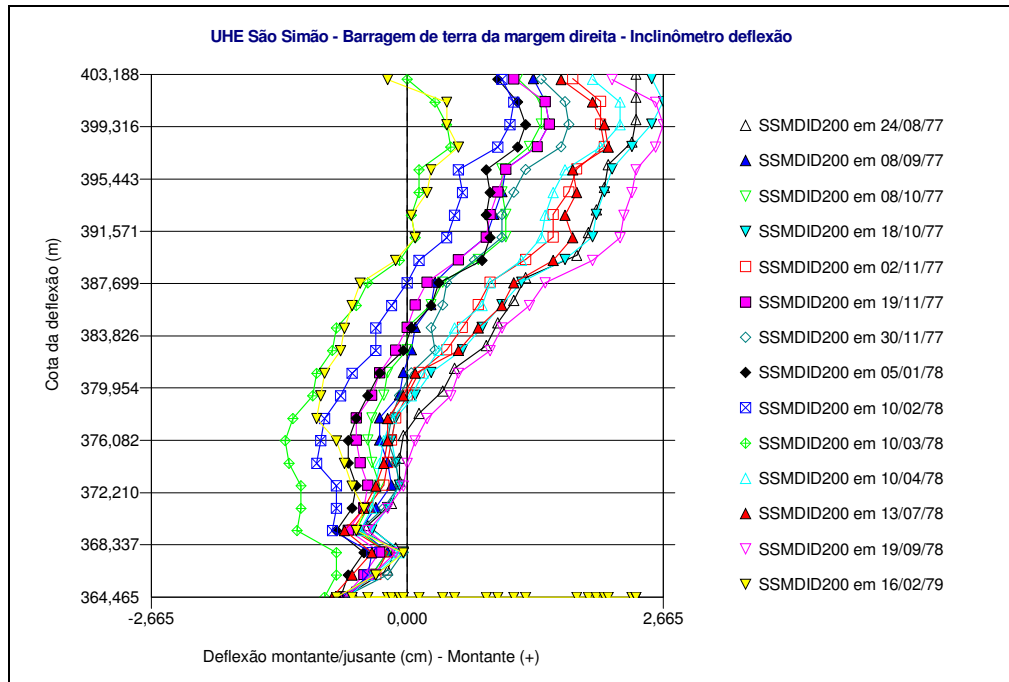
(a)



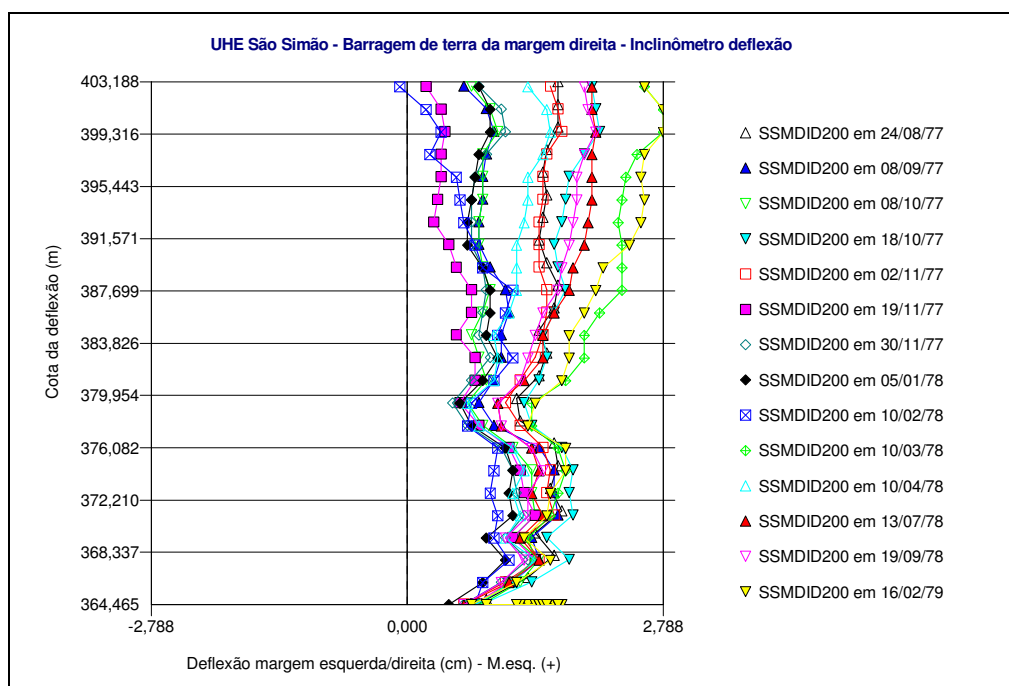
(b)

Figura VIII.4 – Inclinômetro de Deflexão – ID200 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



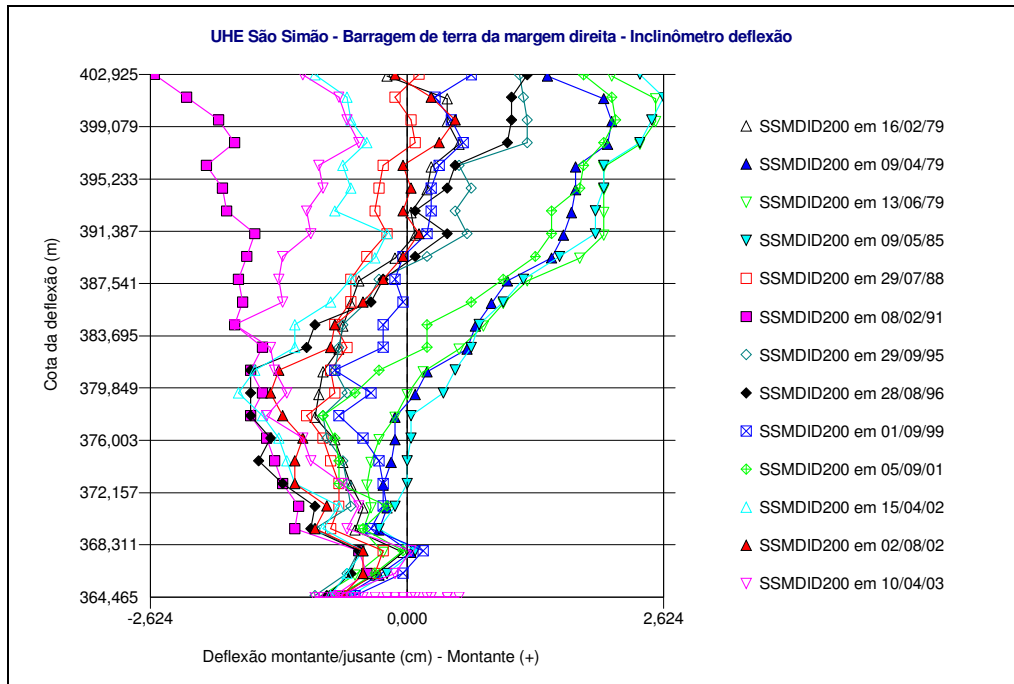


(a)

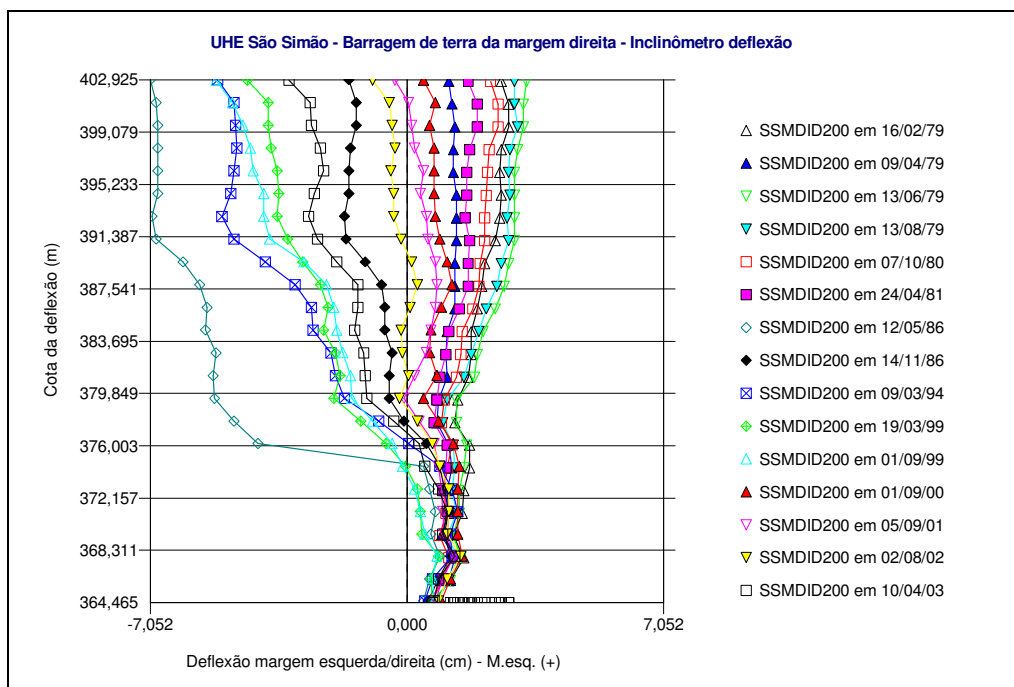


(b)

Figura VIII.5 – Inclínômetro de Deflexão – ID200 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (a) Direção Esquerda-Direita

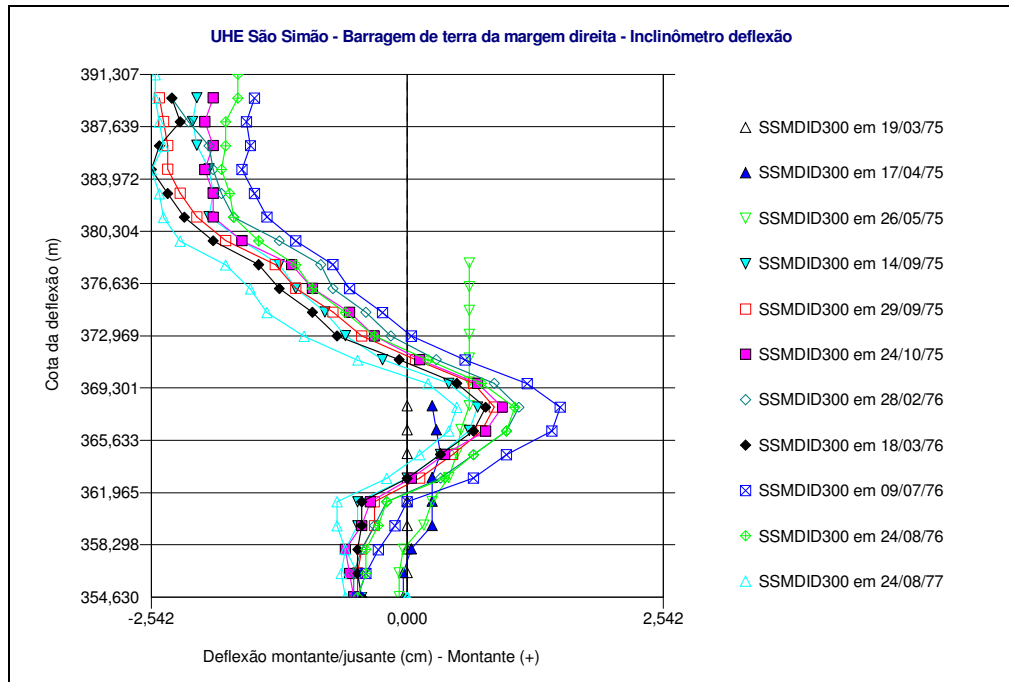


(a)

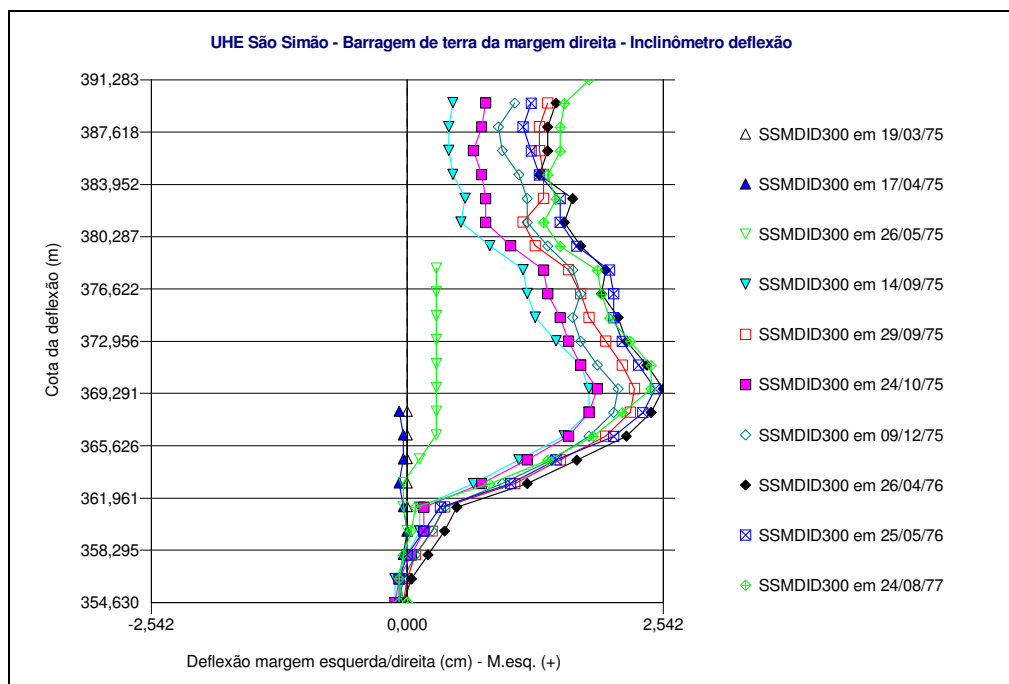


(b)

Figura VIII.6 – Inclinômetro de Deflexão – ID200 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

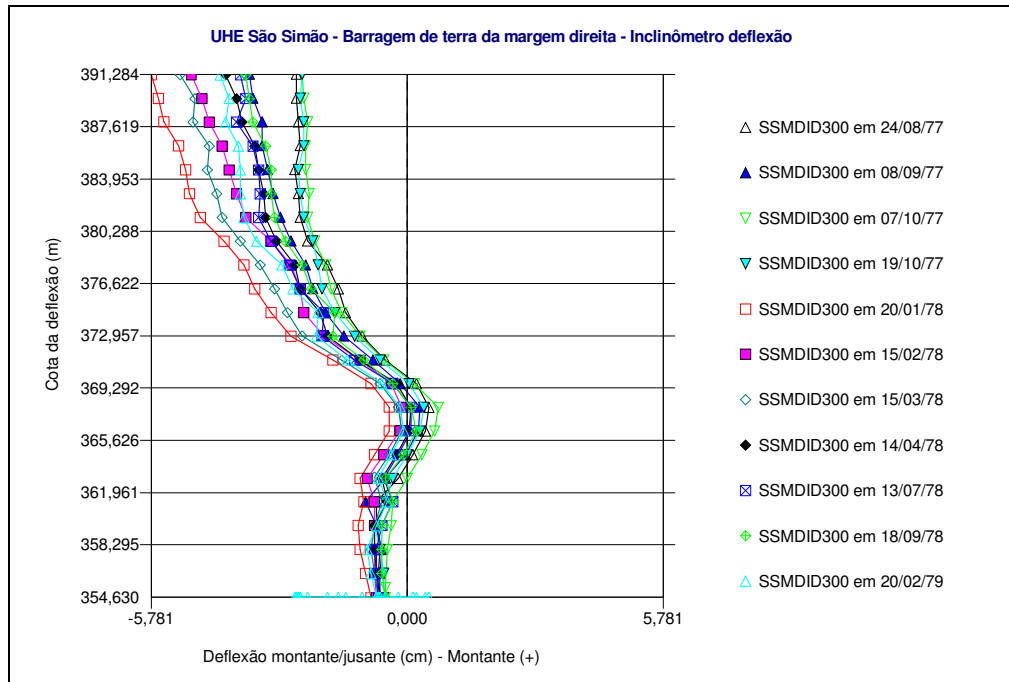


(a)

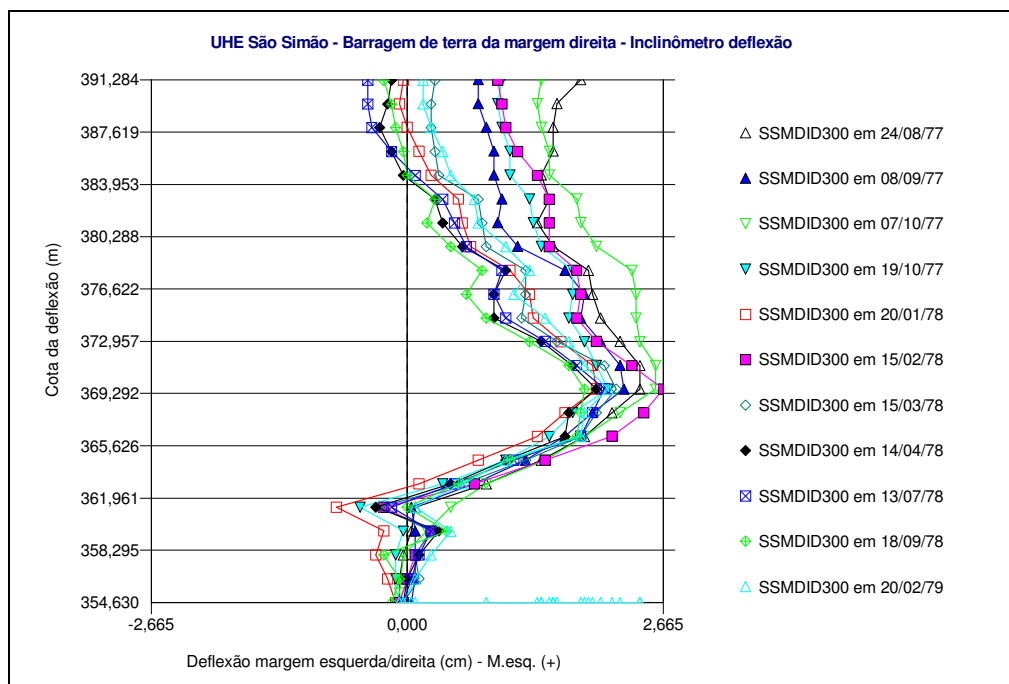


(b)

Figura VIII.7 – Inclinômetro de Deflexão – ID300 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

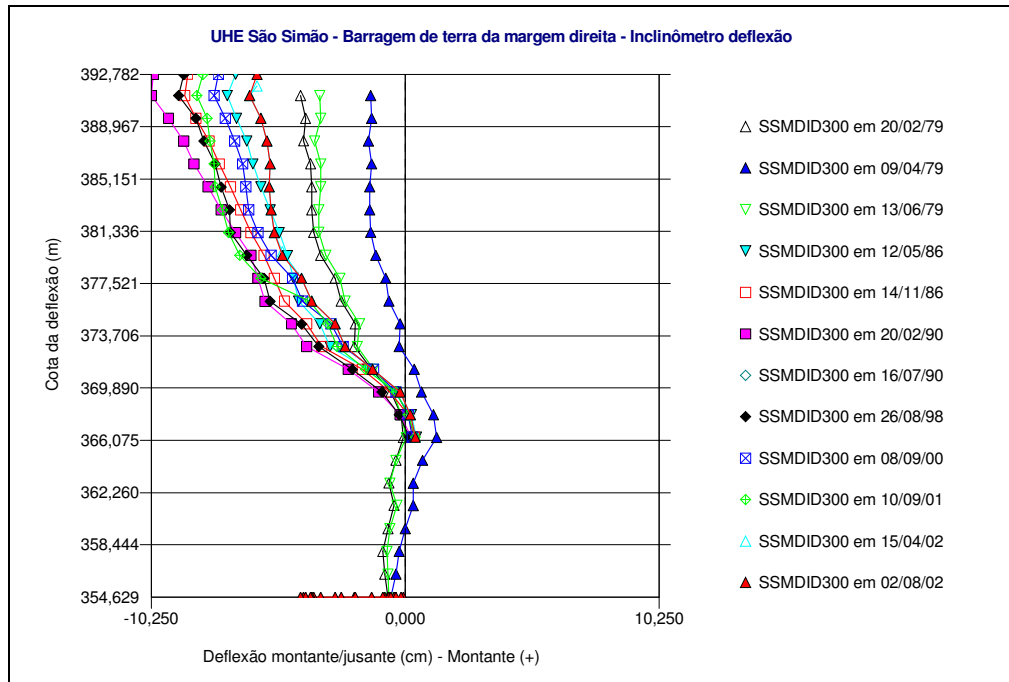


(a)

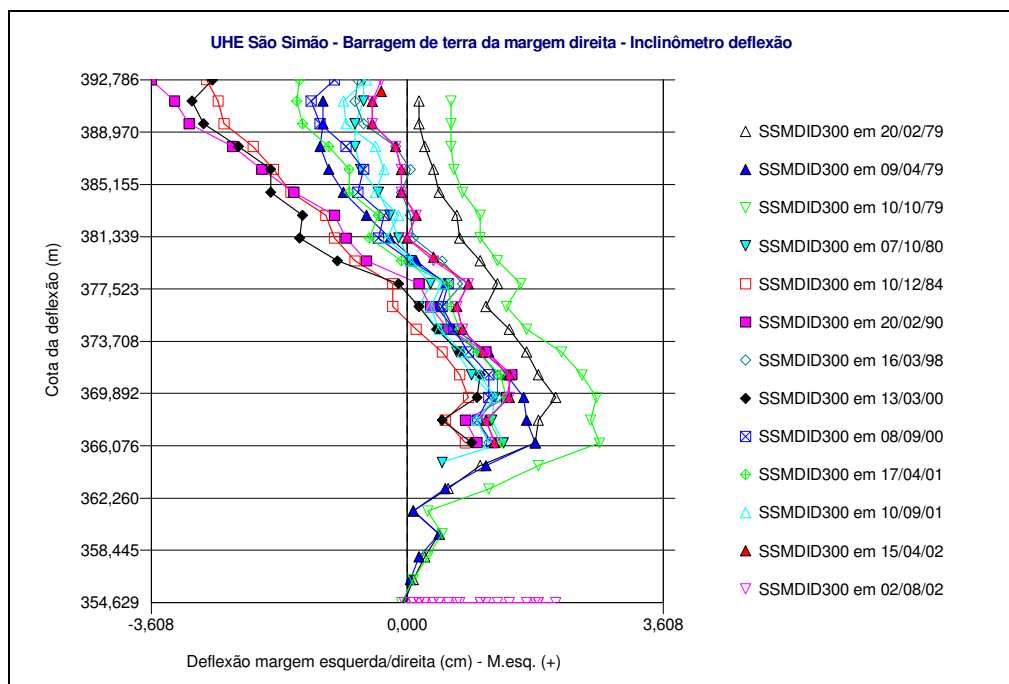


(b)

Figura VIII.8 – Inclinômetro de Deflexão – ID300 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



(a)

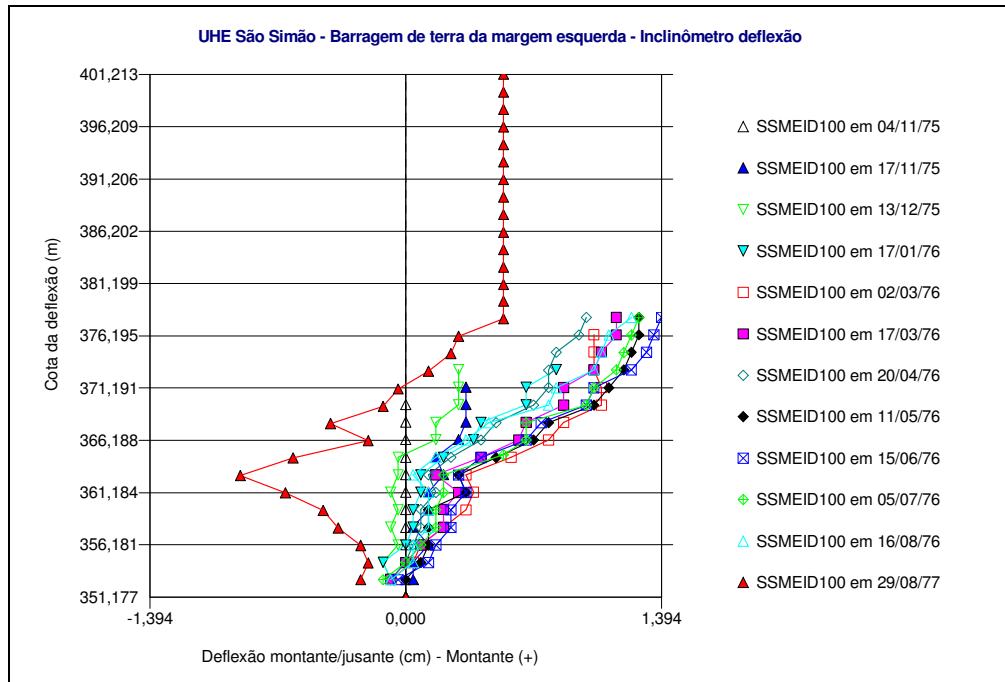


(b)

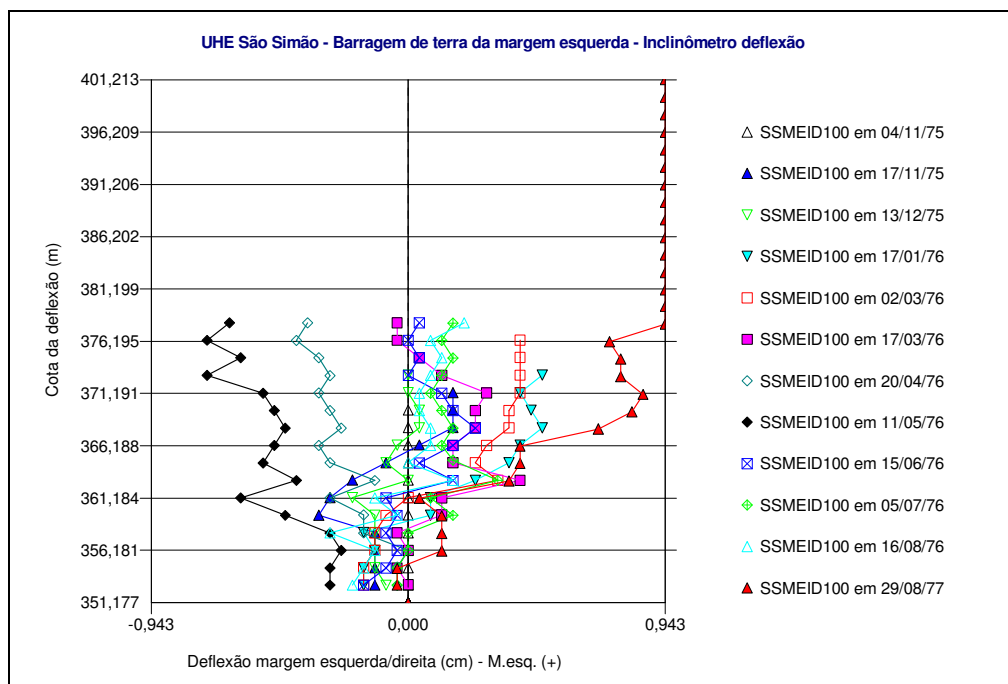
Figura VIII.9 – Inclínômetro de Deflexão – ID300 – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

# **ANEXO IX**

Inclinômetros de Deflexão  
Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento  
- Margem Esquerda -

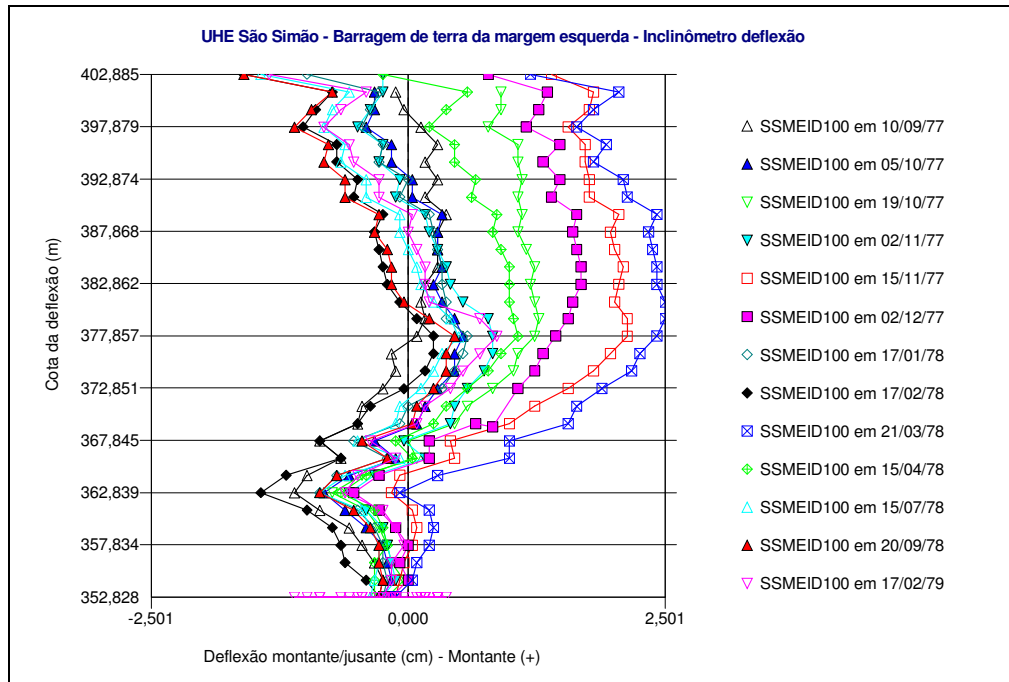


(a)

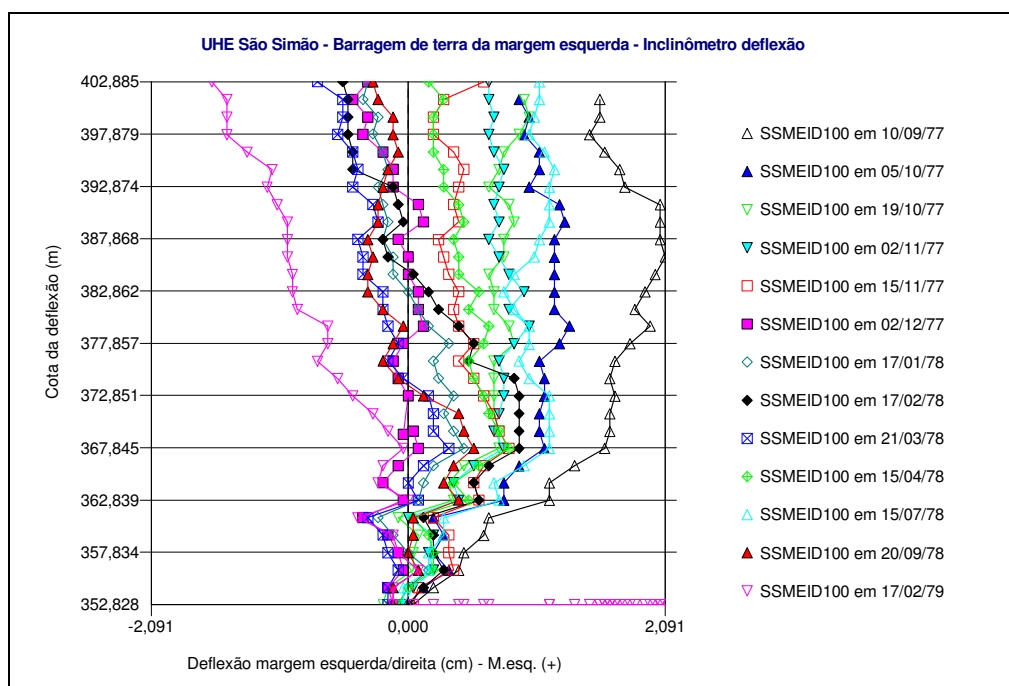


(b)

Figura XI.1 – Inclinômetro de Deflexão – ID100 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



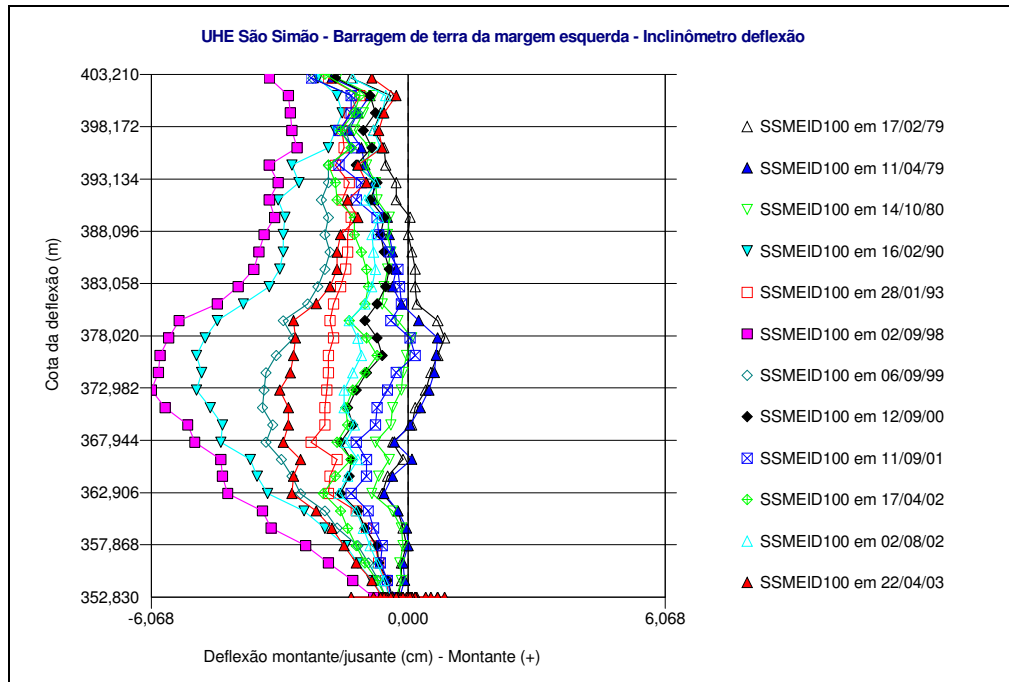
(a)



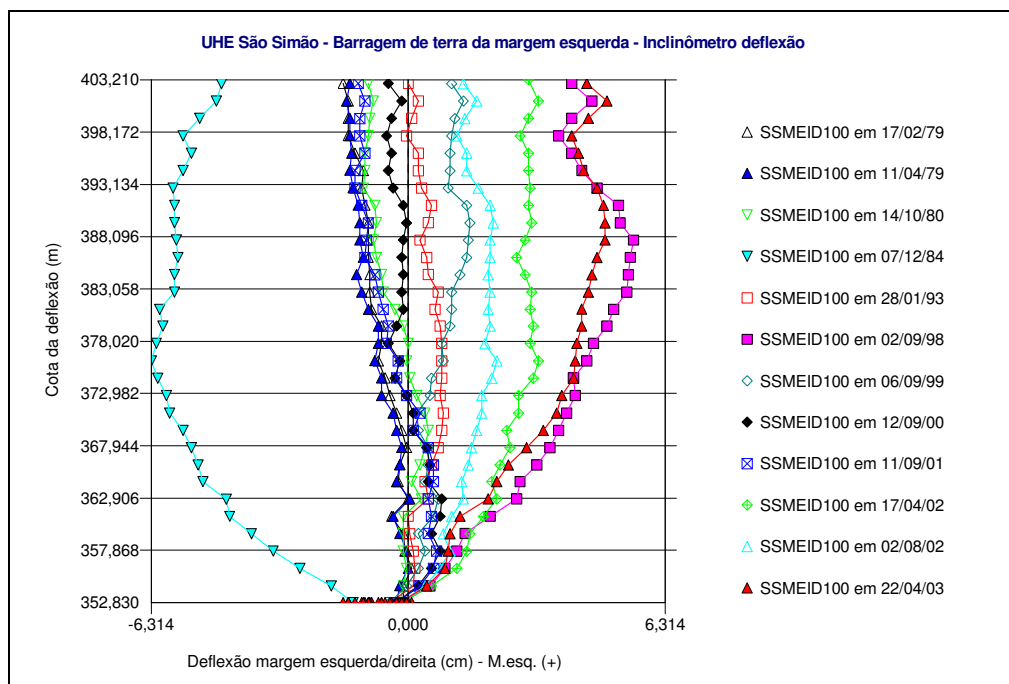
(b)

Figura IX.2 – Inclinômetro de Deflexão – ID100 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



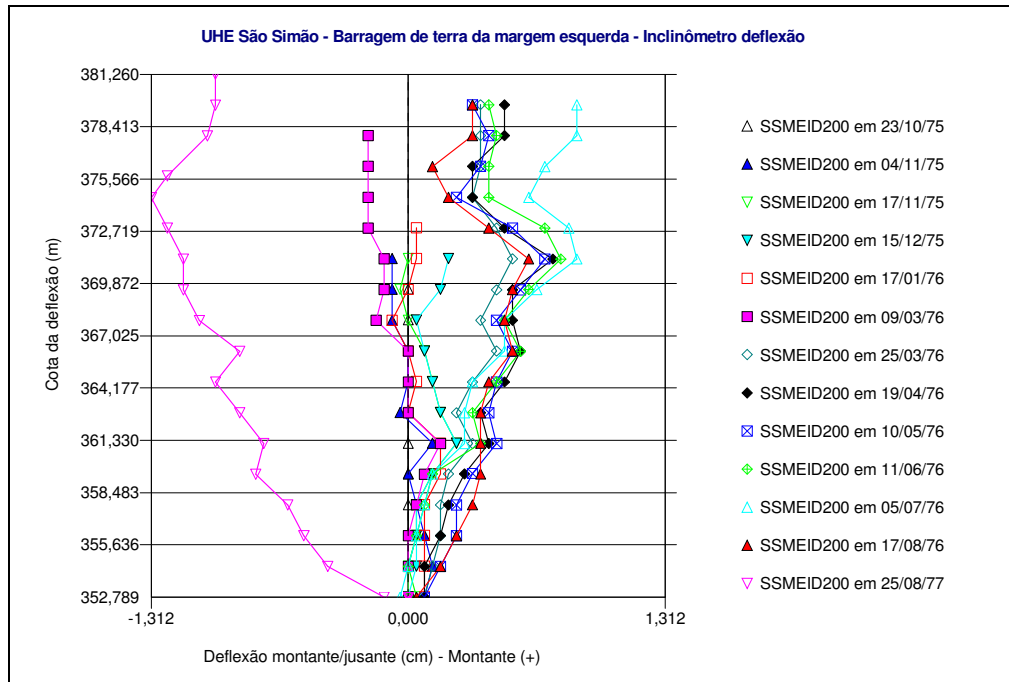


(a)

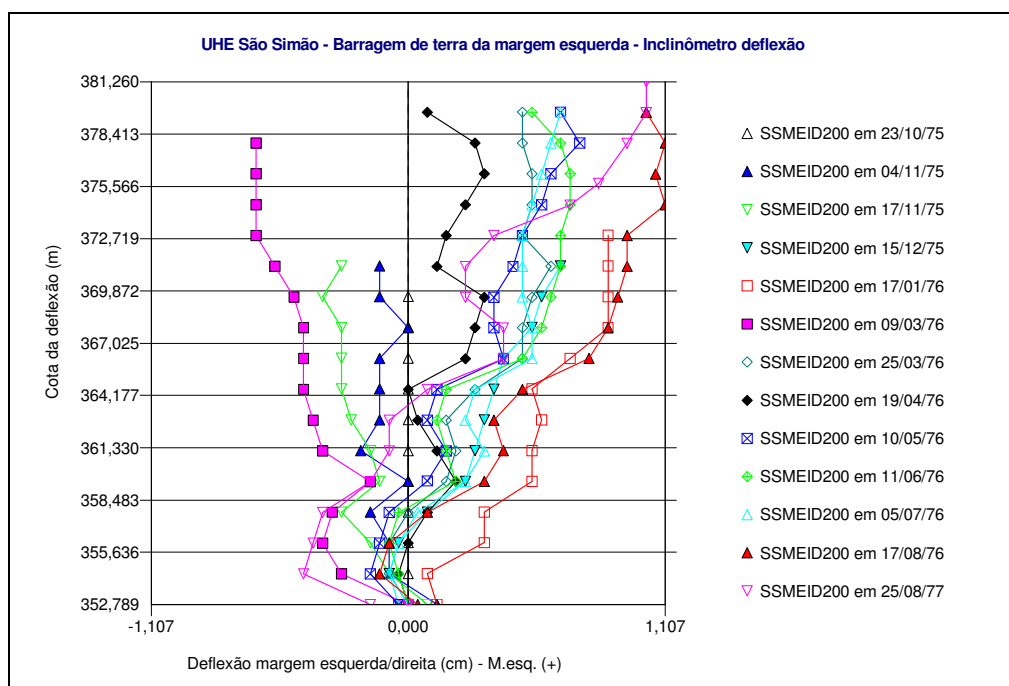


(b)

Figura IX.3 – Inclinômetro de Deflexão – ID100 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

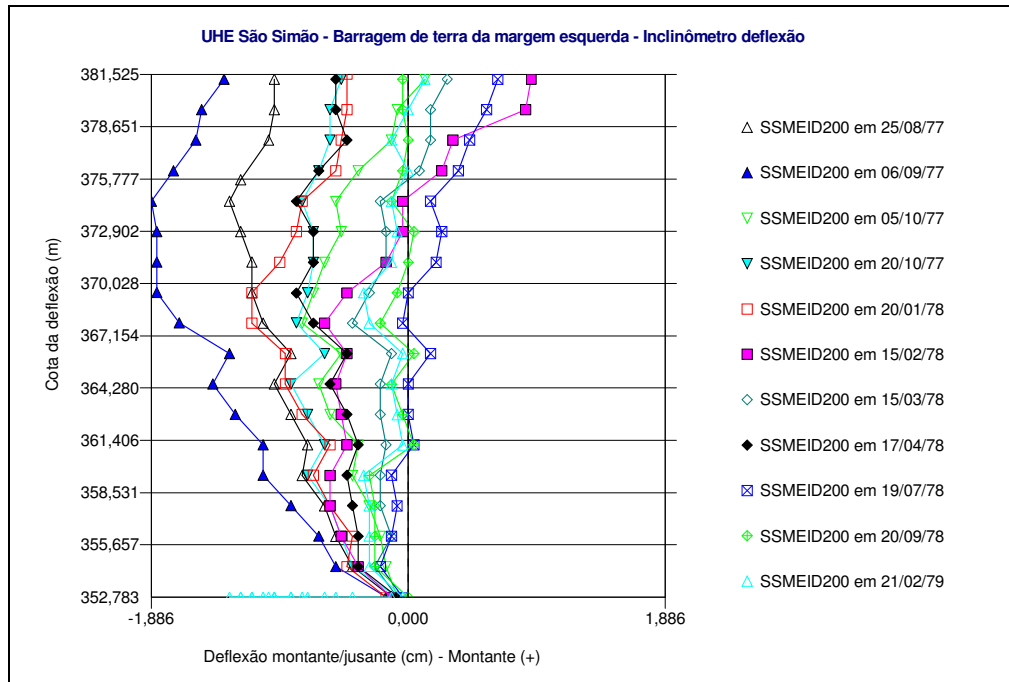


(a)

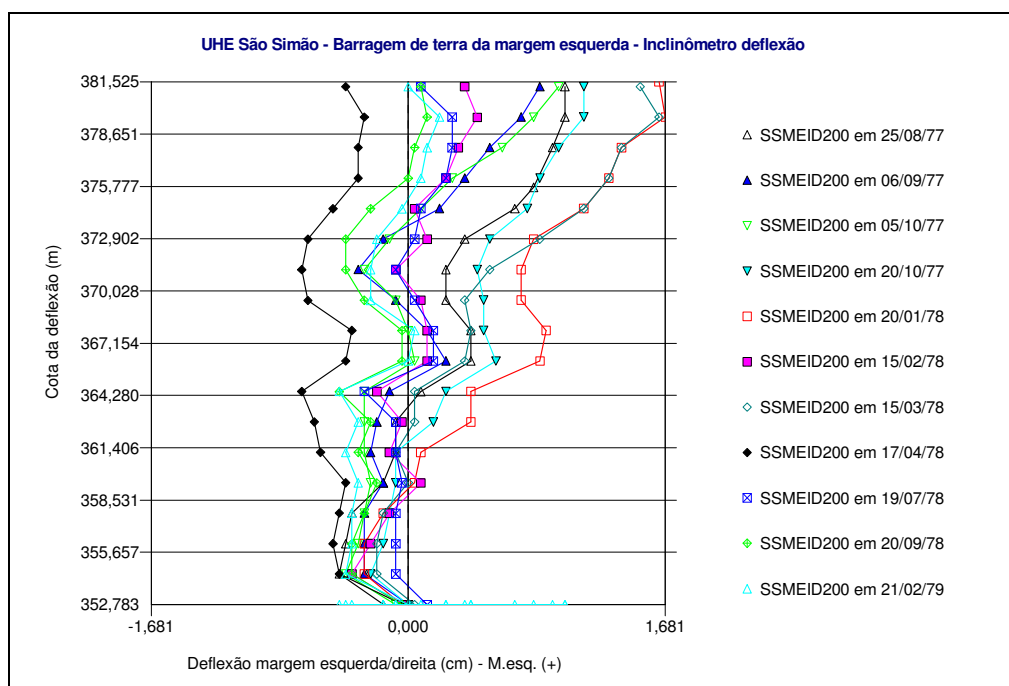


(b)

Figura IX.4 – Inclinômetro de Deflexão – ID200 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

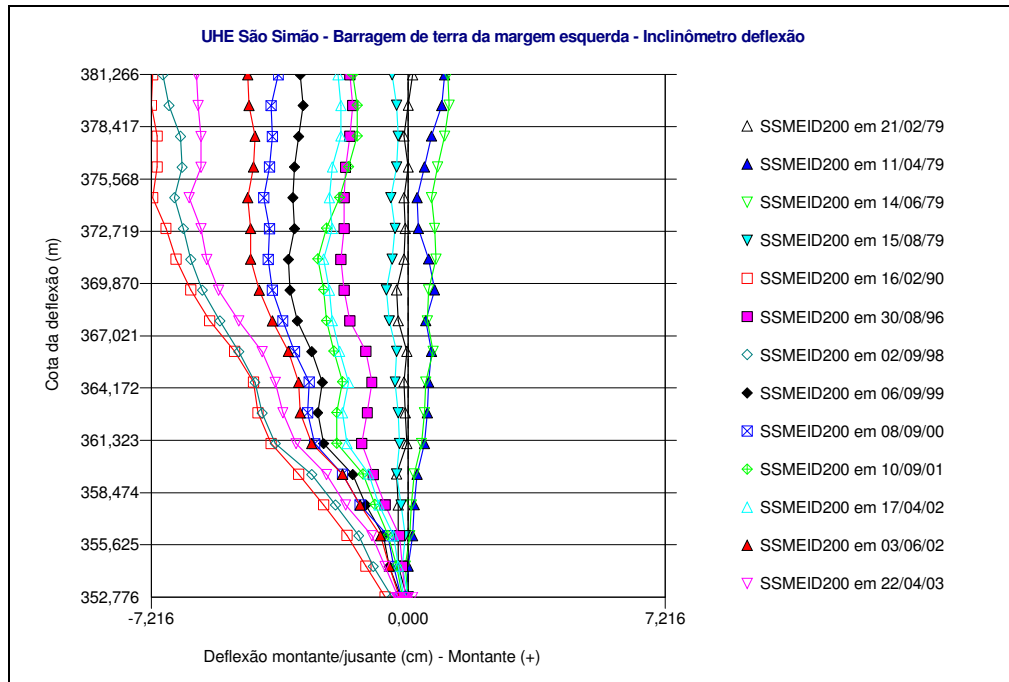


(a)

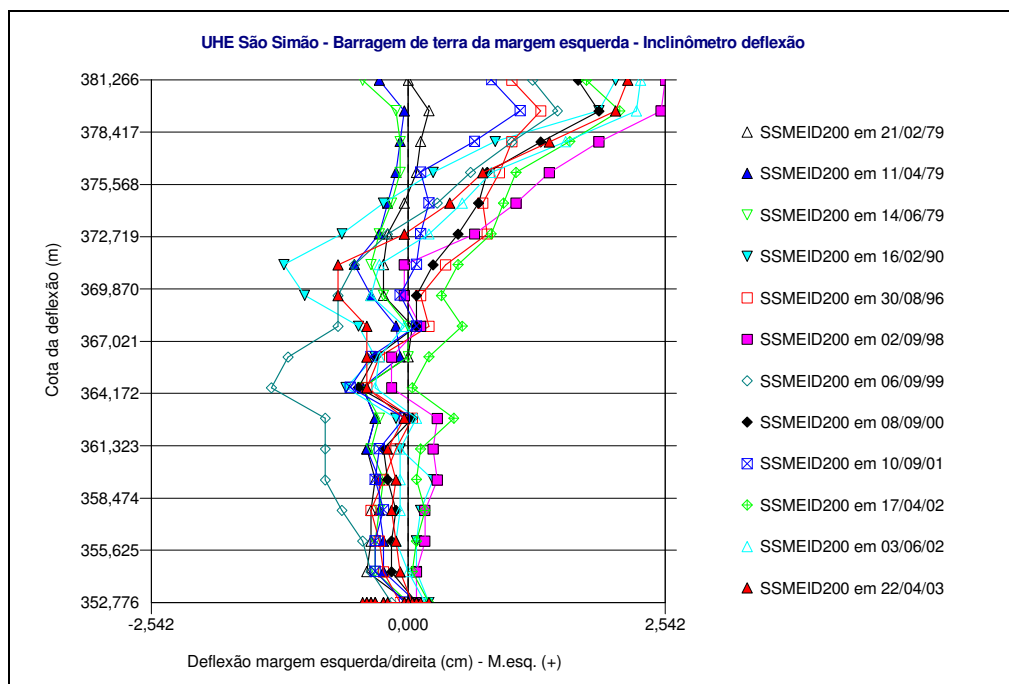


(b)

Figura IX.5 – Inclinômetro de Deflexão – ID200 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

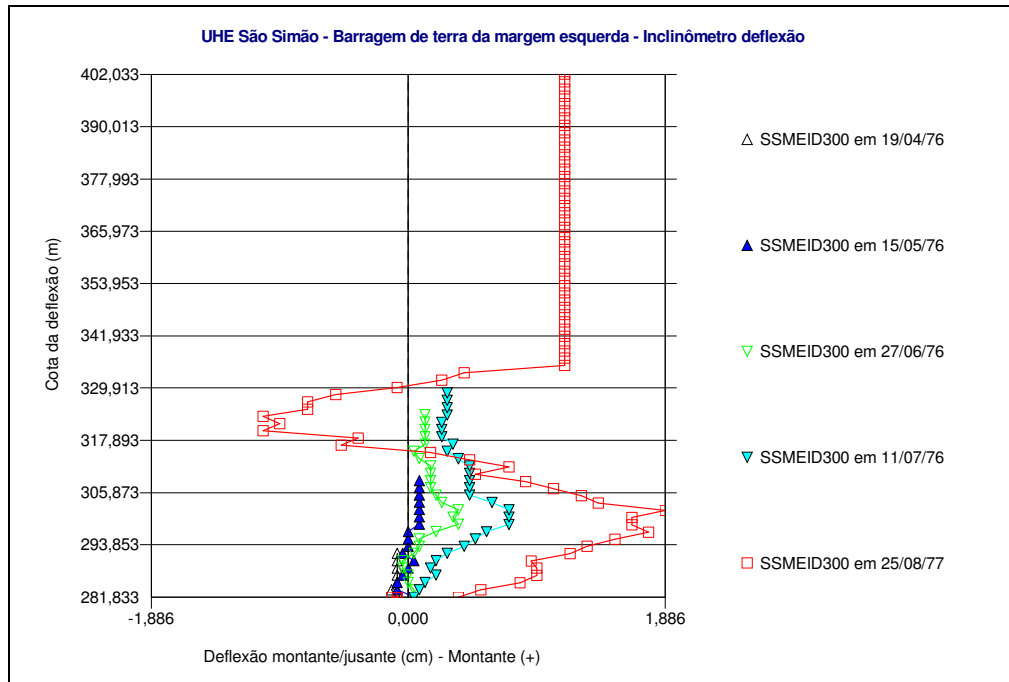


(a)

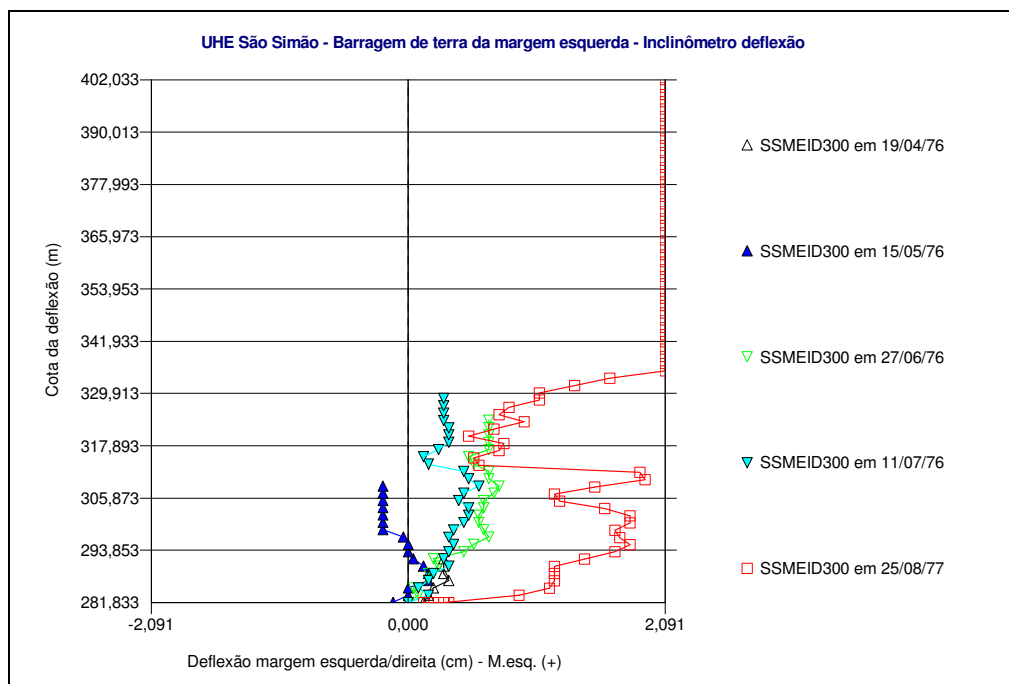


(b)

Figura IX.6 – Inclinômetro de Deflexão – ID200 – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

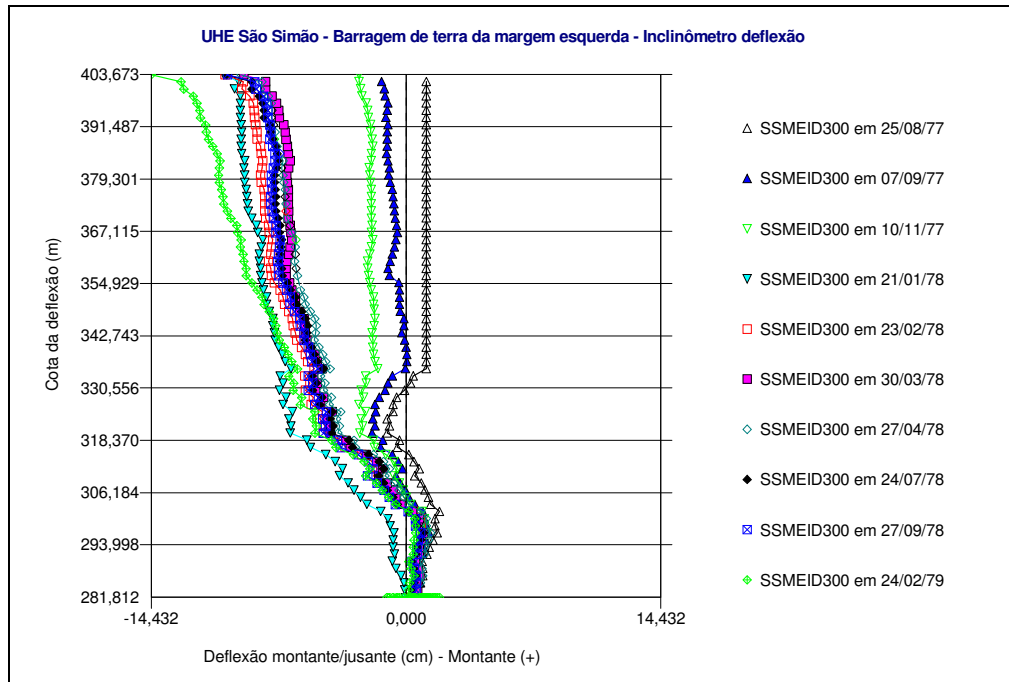


(a)

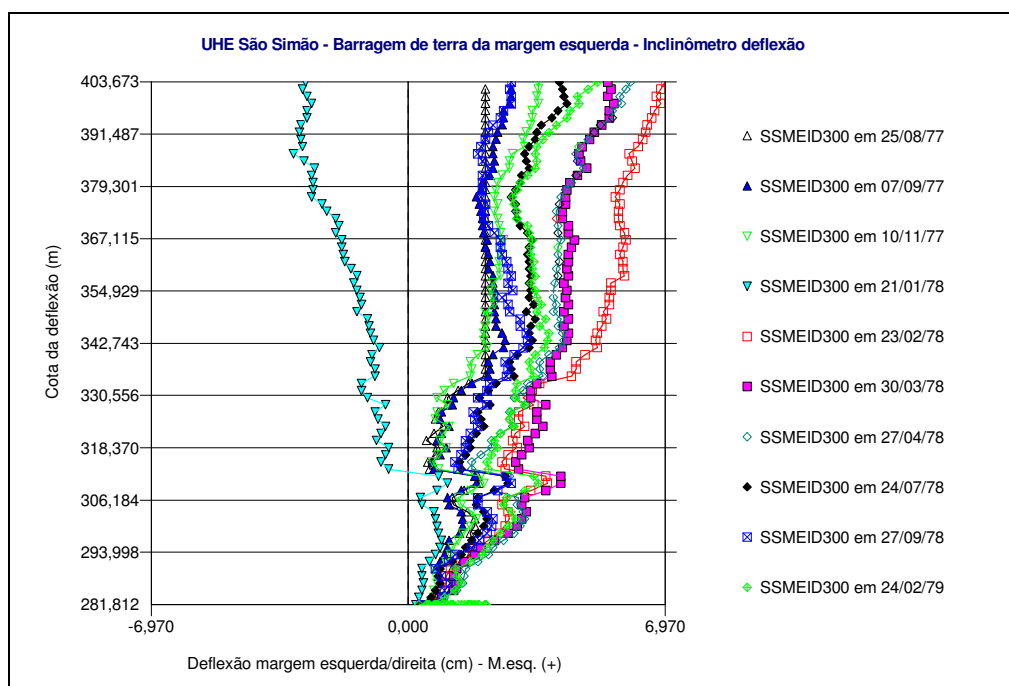


(b)

Figura IX.7 – Inclínômetro de Deflexão – ID300 – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0  
(Fase Construtiva): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

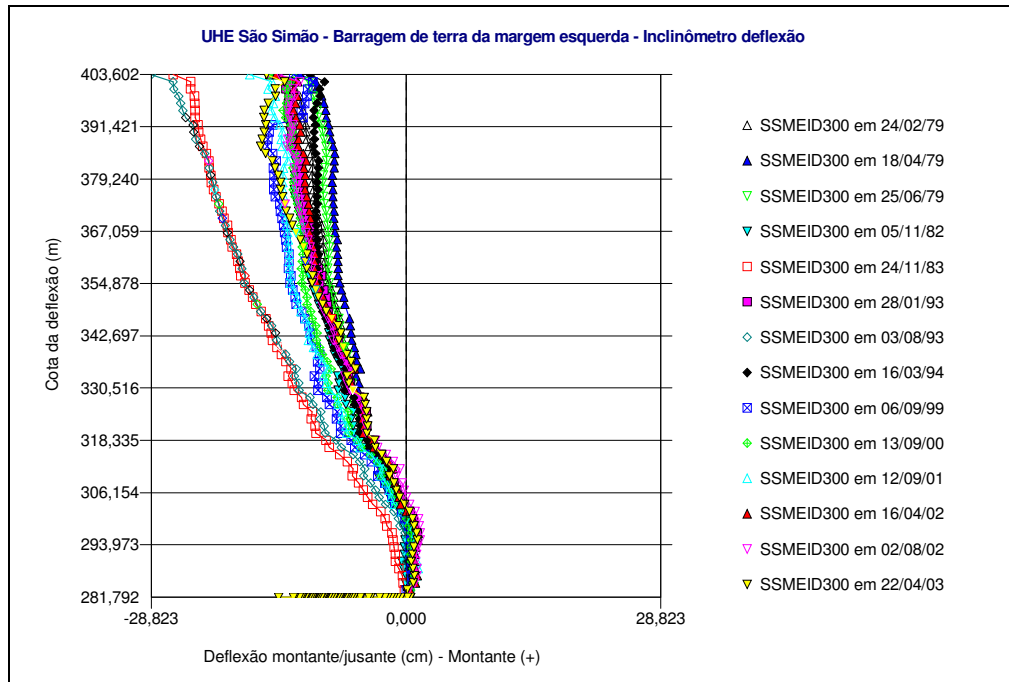


(a)

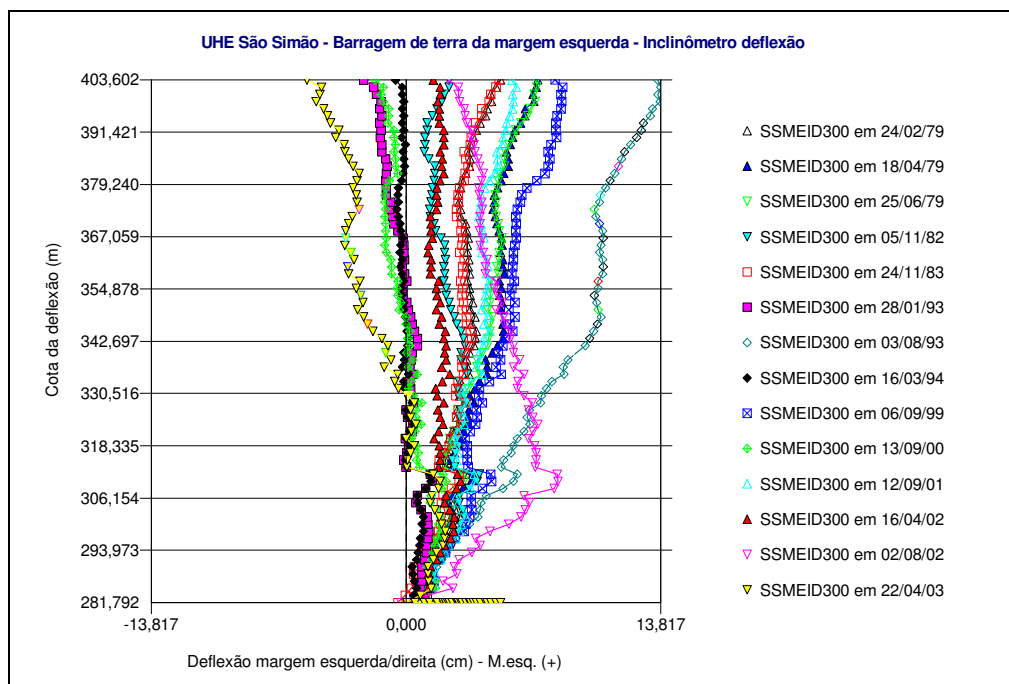


(b)

Figura IX.8 – Inclinômetro de Deflexão – ID300 – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



(a)

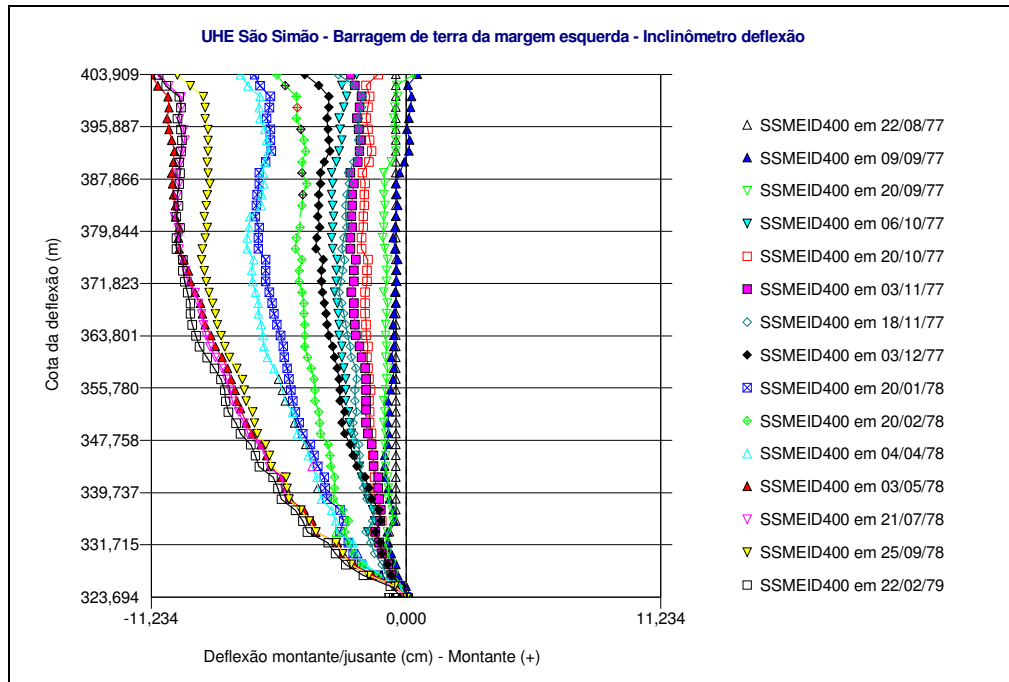


(b)

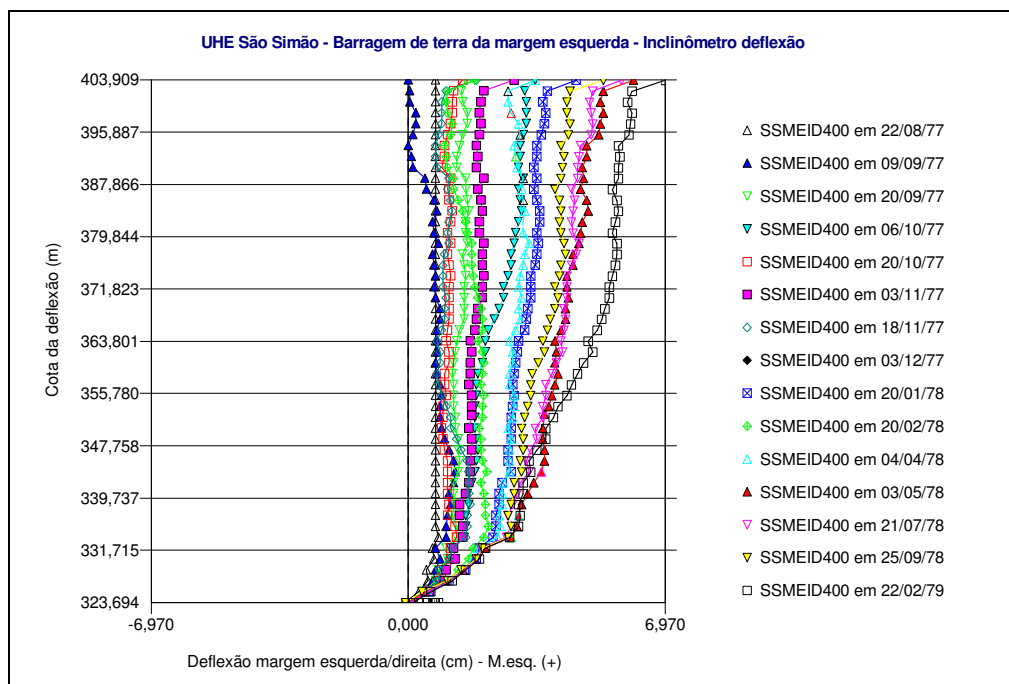
Figura IX.9 – Inclinômetro de Deflexão – ID300 – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita





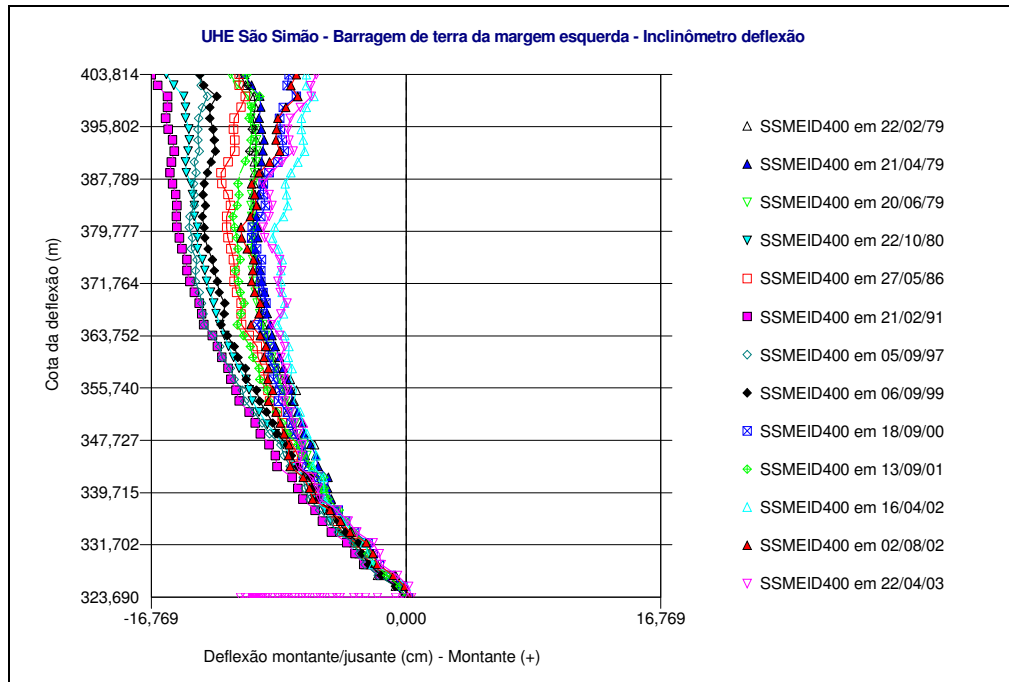


(a)

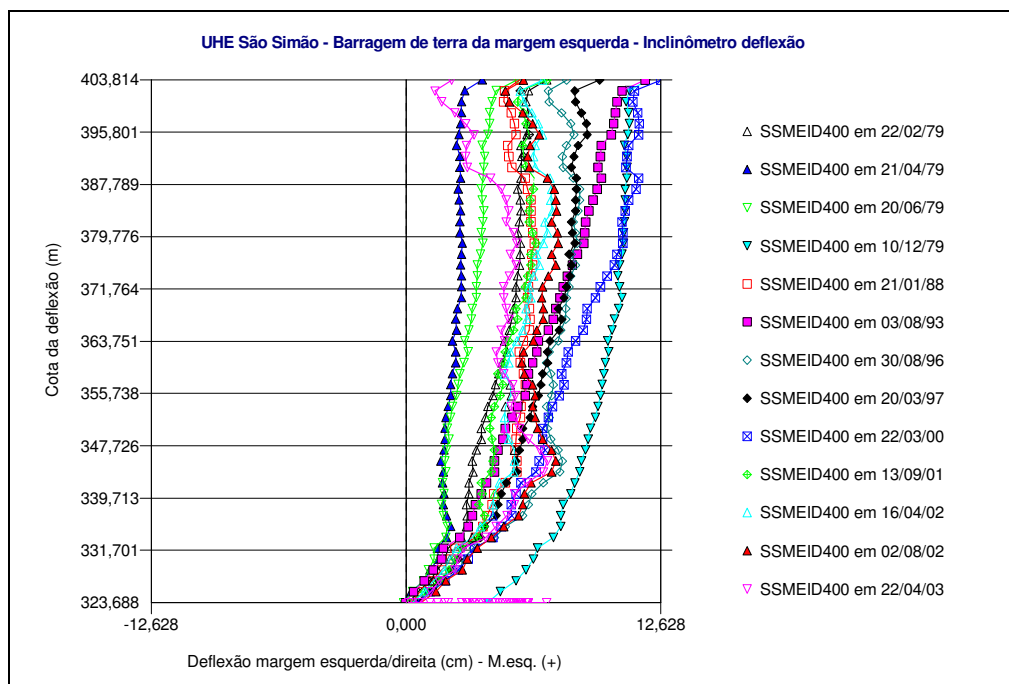


(b)

Figura IX.11 – Inclinômetro de Deflexão – ID400 – Seção 8A – Estaca 2 + 325,0  
(Fase de Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita



(a)



(b)

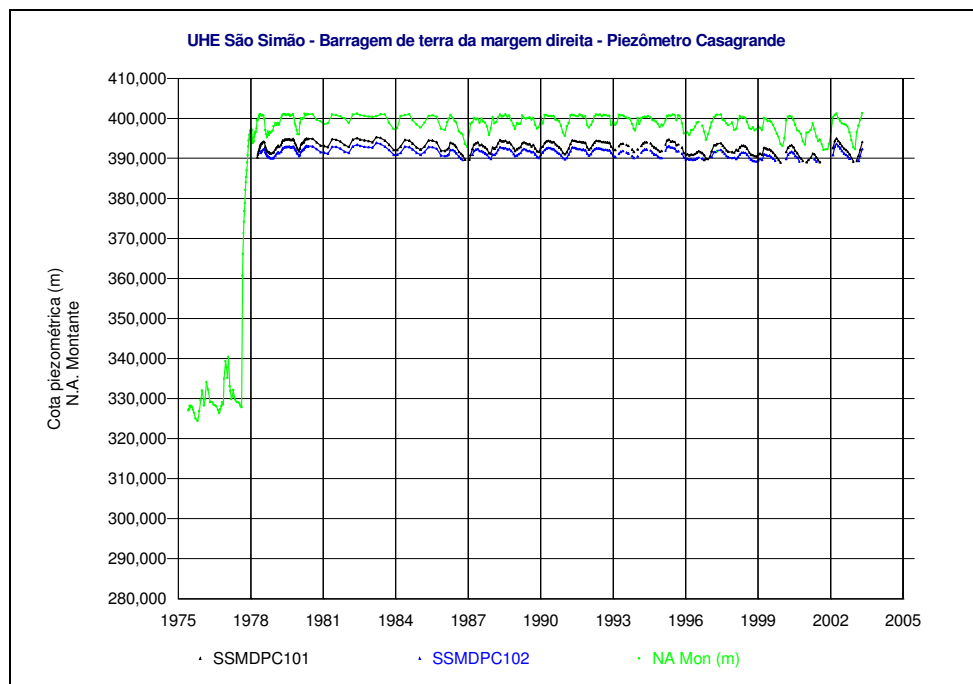
Figura IX.12 – Inclínômetro de Deflexão – ID400 – Seção 8A – Estaca 2 + 325,0  
(Fase de Pós-Enchimento): (a) Direção Montante-Jusante; (b) Direção Esquerda-Direita

# **ANEXO X**

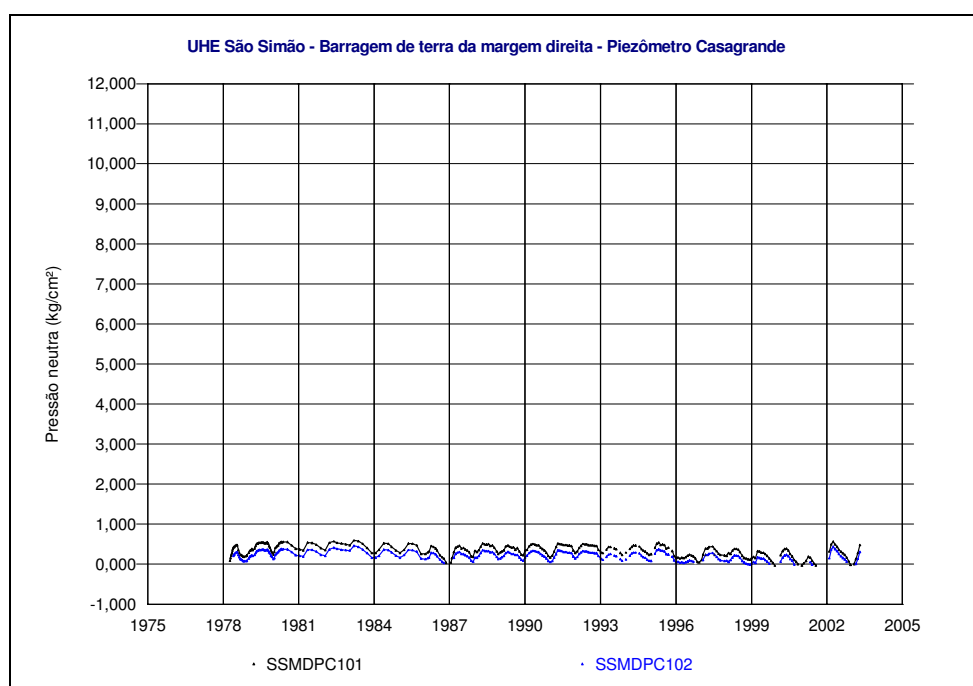
Piezômetros – Casagrande e Pneumático Tipo Hall

Barragem de Terra

- Margem Direita -



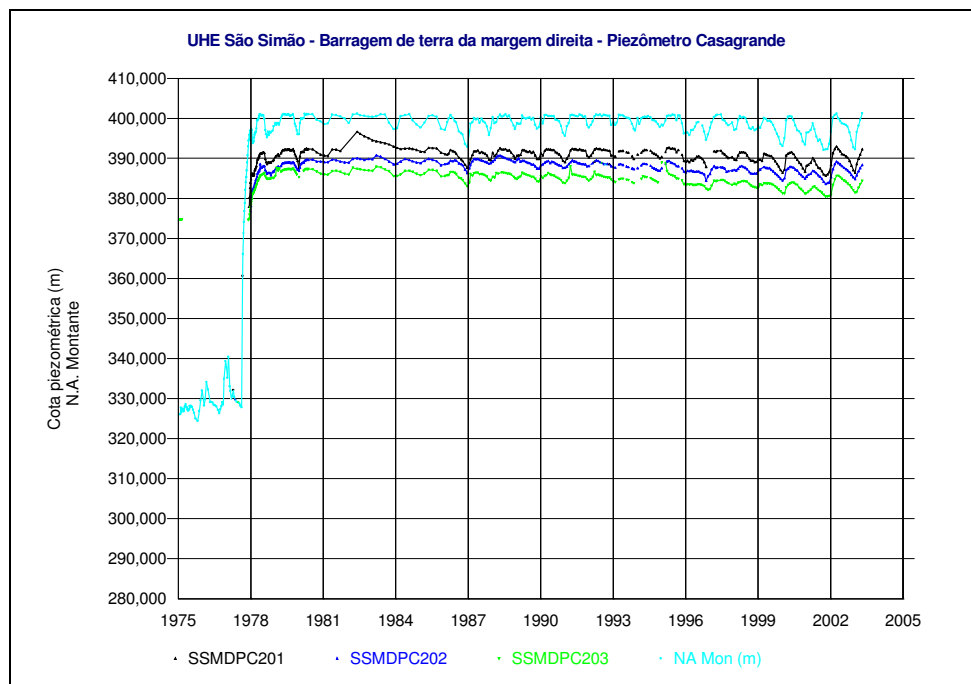
(a)



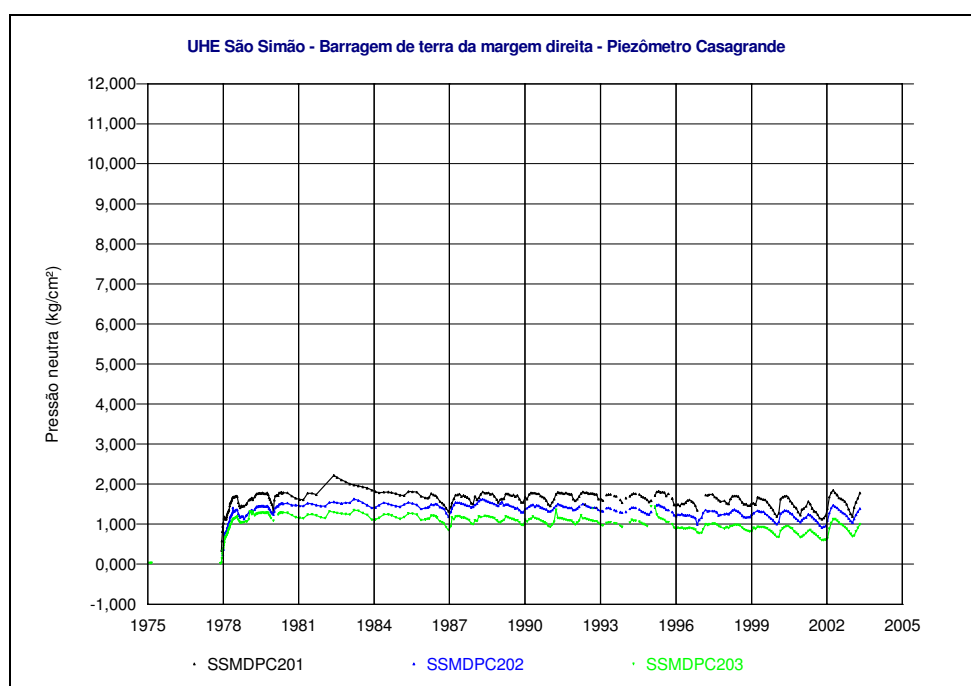
(b)

Figura X.1 – Piezômetros de Casagrande – Seção 1 – Estaca 0 + 460,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



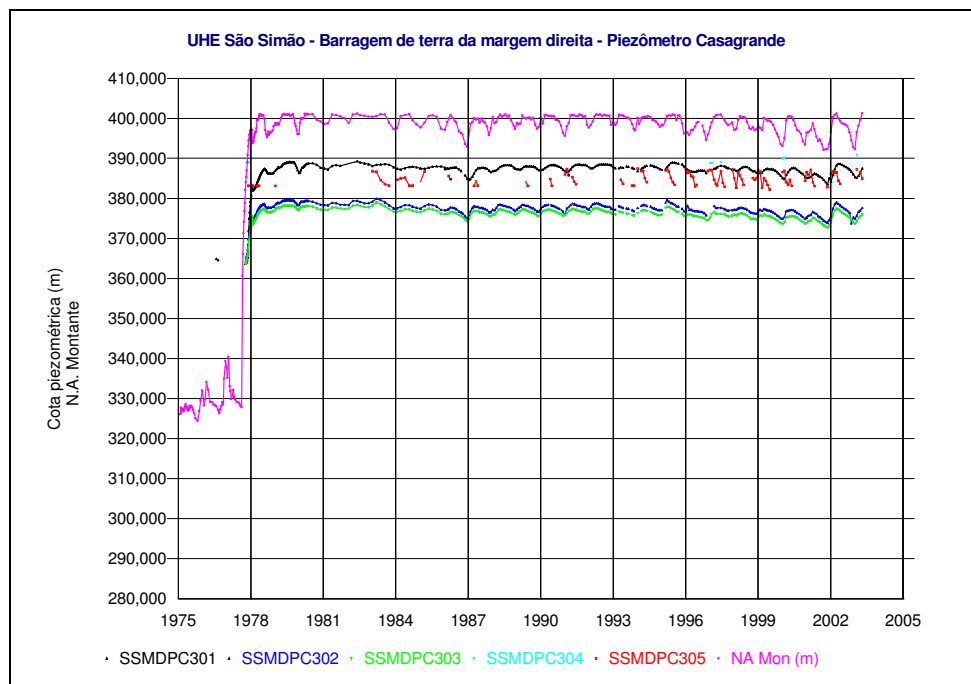
(a)



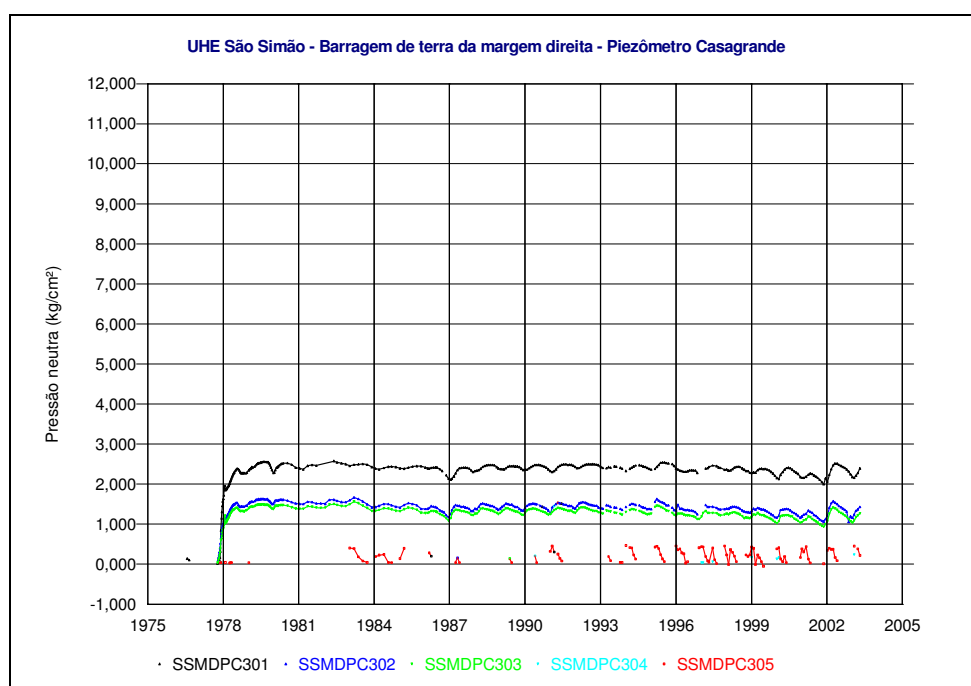
(b)

Figura X.2 – Piezômetros de Casagrande – Seção 2 – Estaca 0 + 670,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



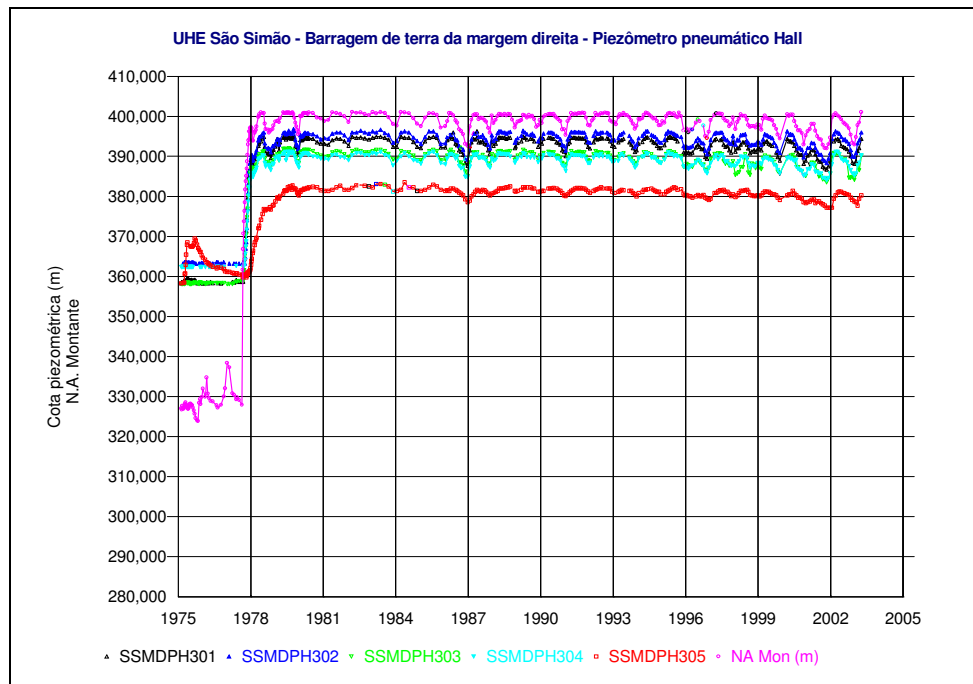
(a)



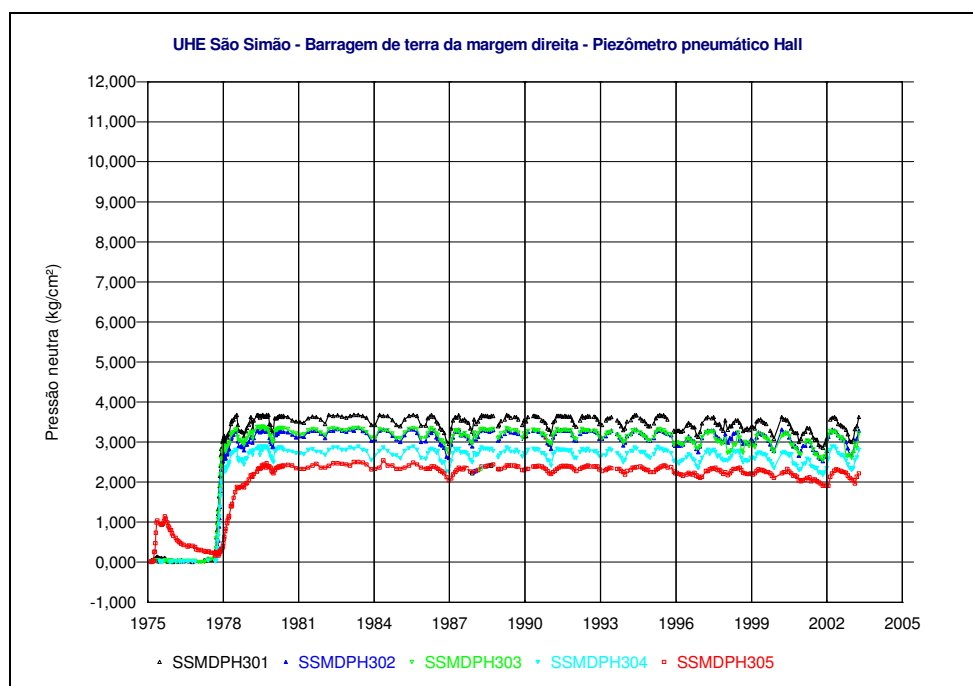
(b)

Figura X.3 – Piezômetros de Casagrande – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



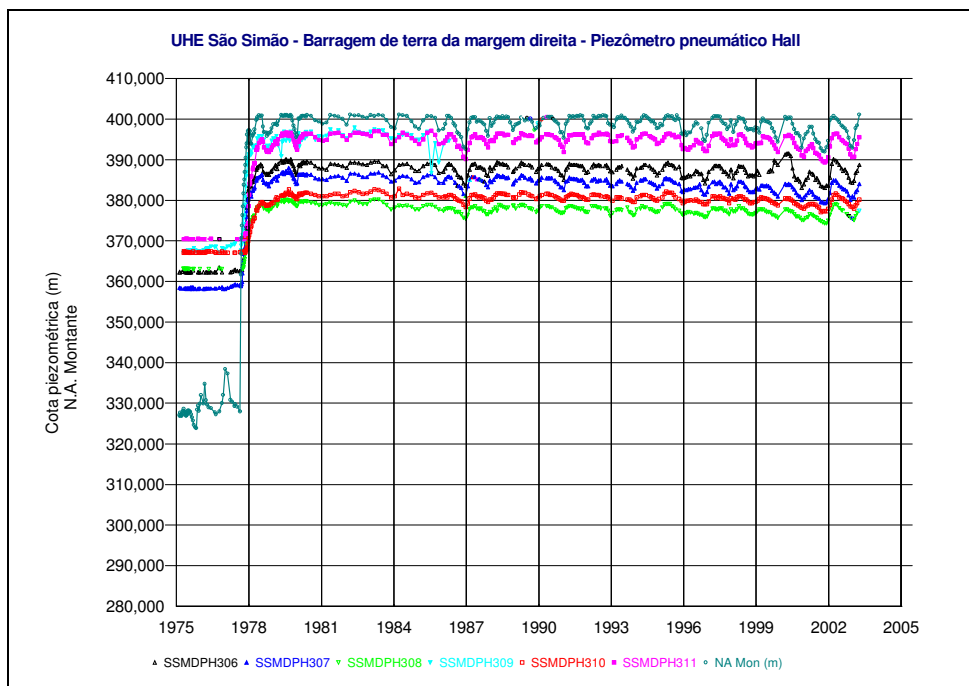
(a)



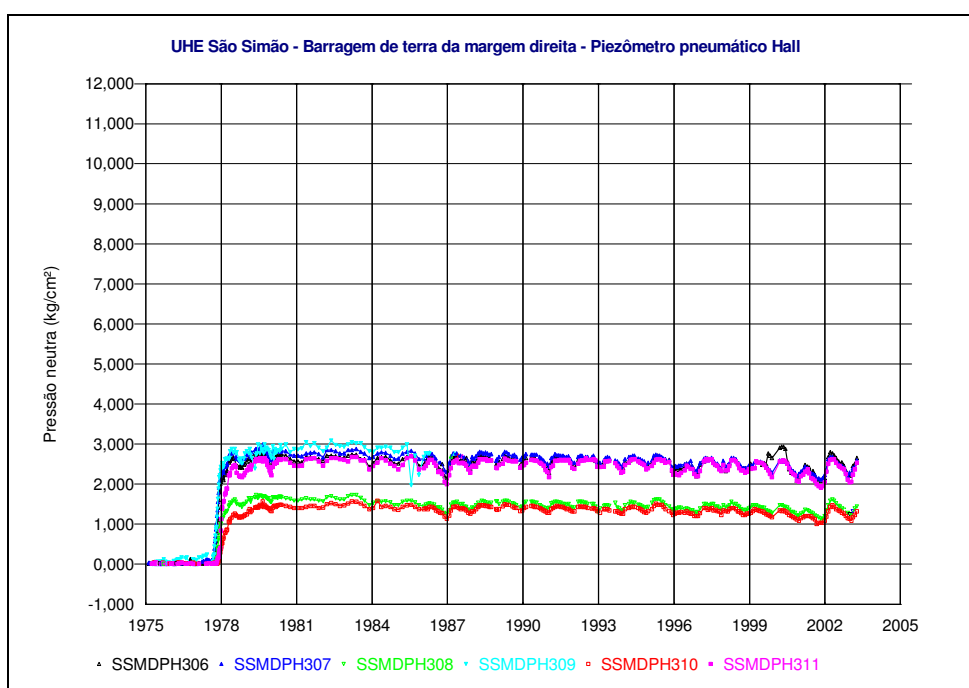
(b)

Figura X.4 – Piezômetros Pneumático (PH301-PH305) – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



(a)

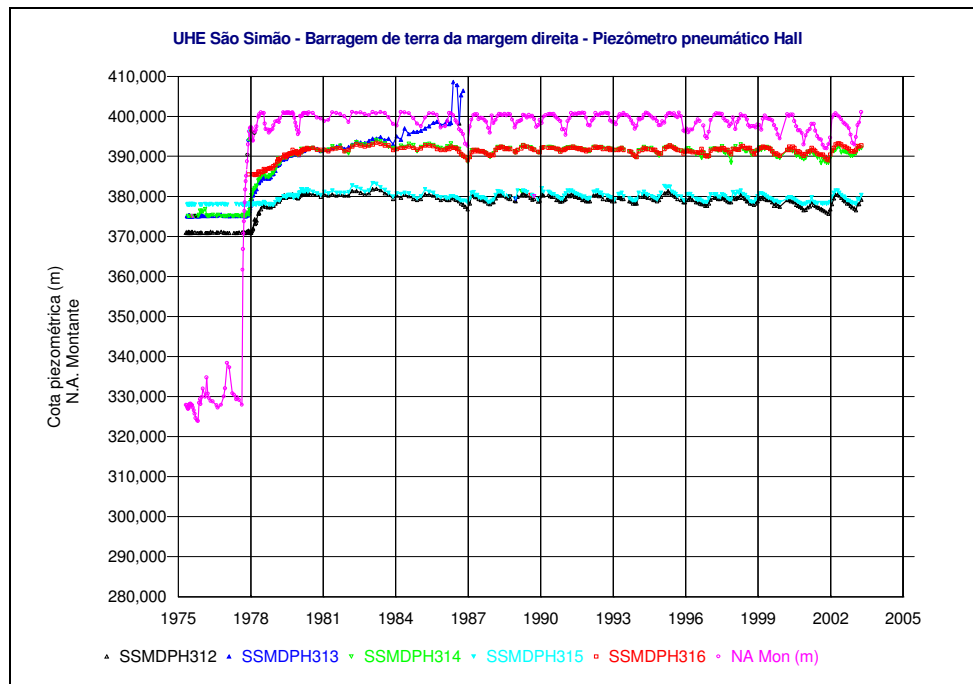


(b)

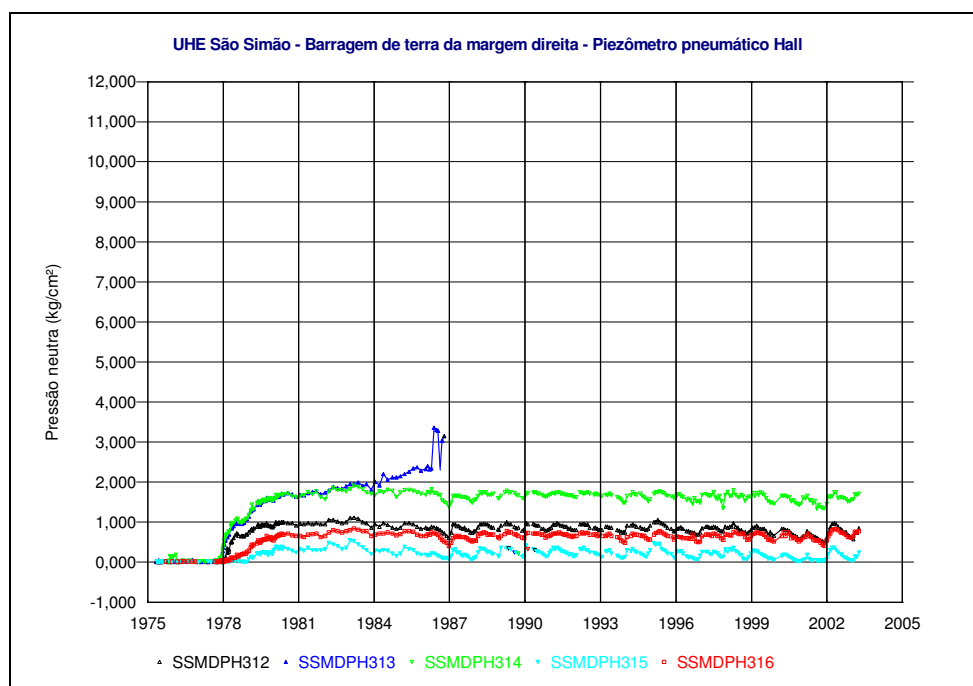
Figura X.5 – Piezômetros Pneumático (PH306-PH311) – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra





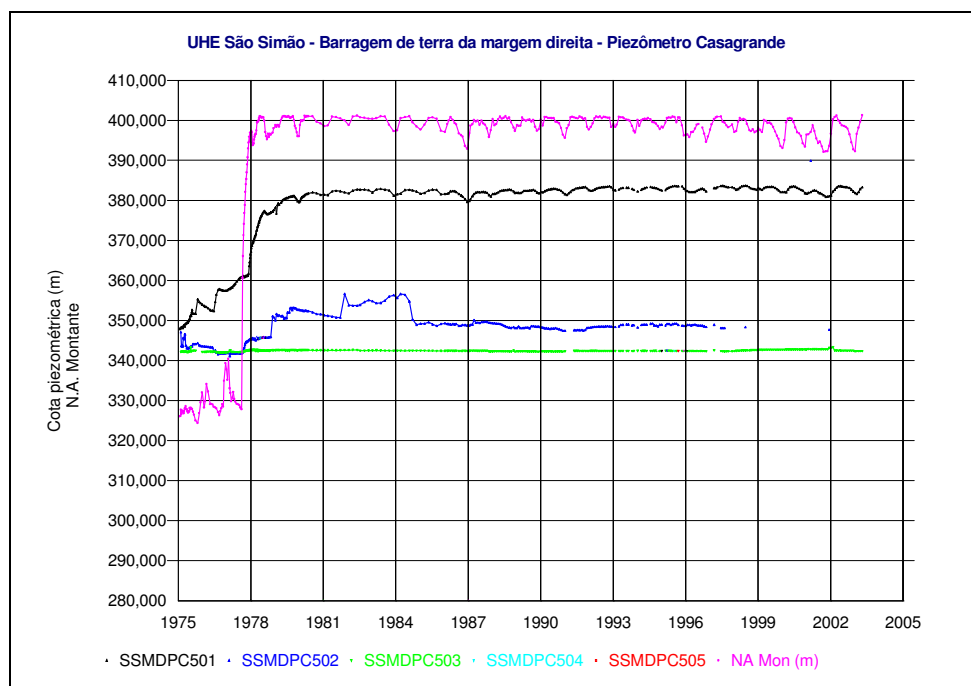
(a)



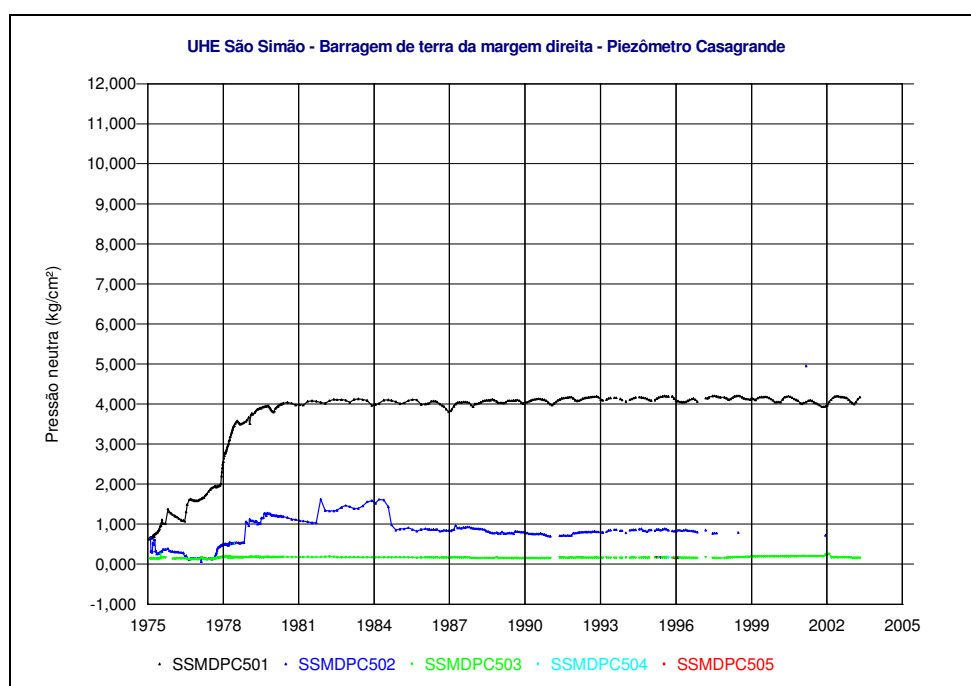
(b)

Figura X.6 – Piezômetros Pneumático (PH312-PH316) – Seção 3 – Estaca 0 + 810,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



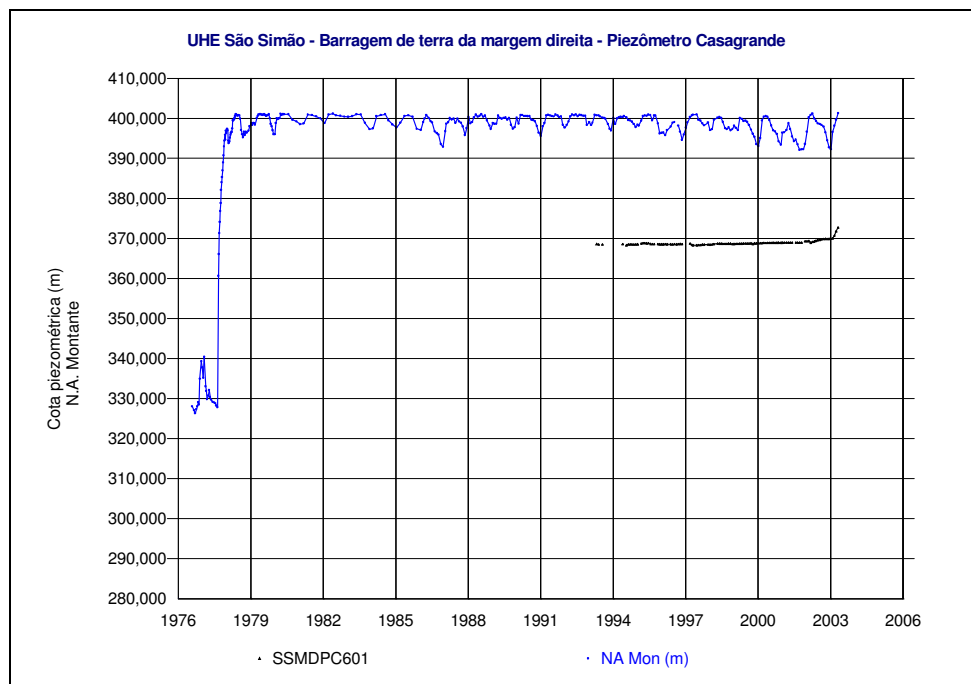
(a)



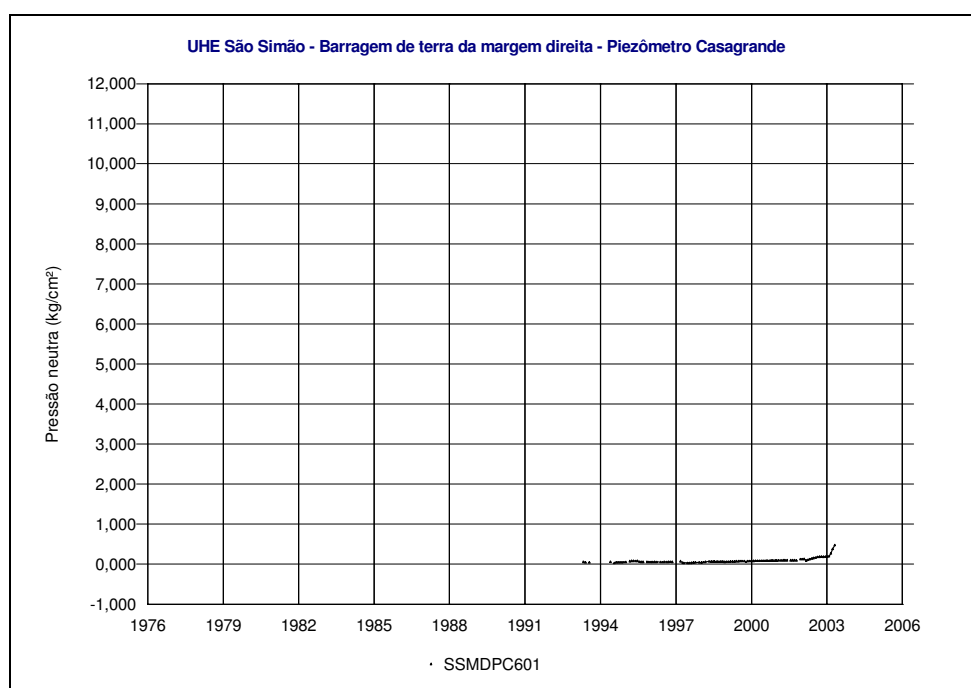
(b)

Figura X.7 – Piezômetros de Casagrande – Seção 5 – Estaca 1 + 240,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



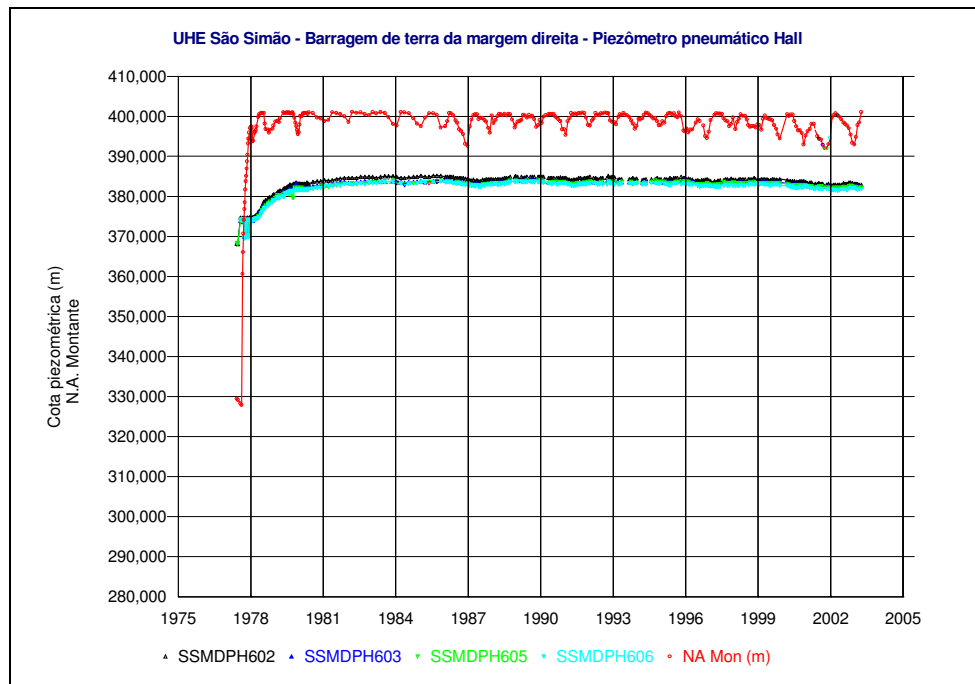
(a)



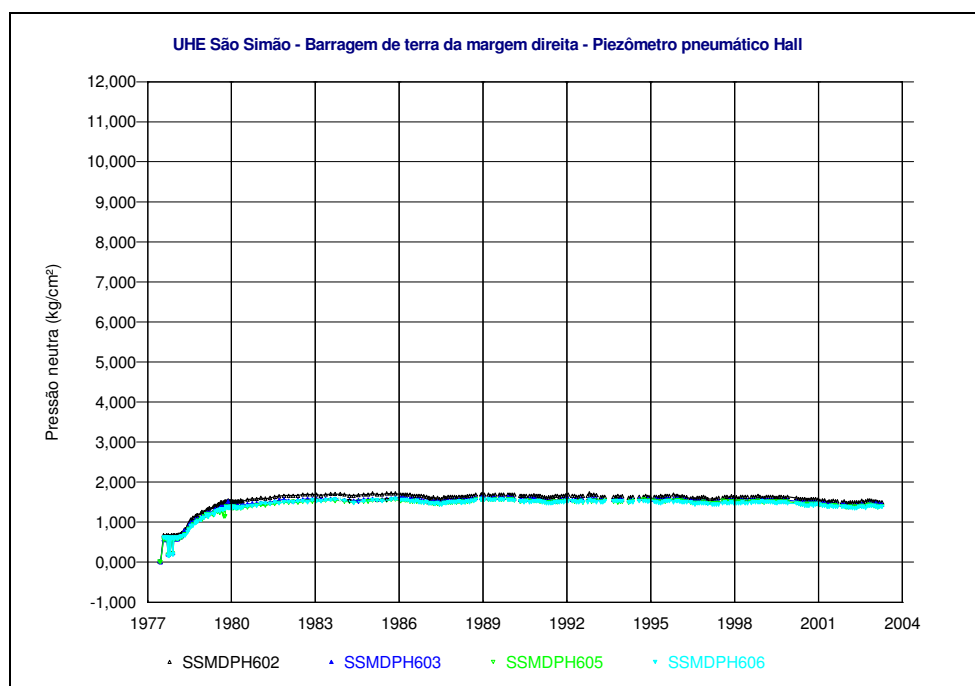
(b)

Figura X.8 – Piezômetro de Casagrande – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

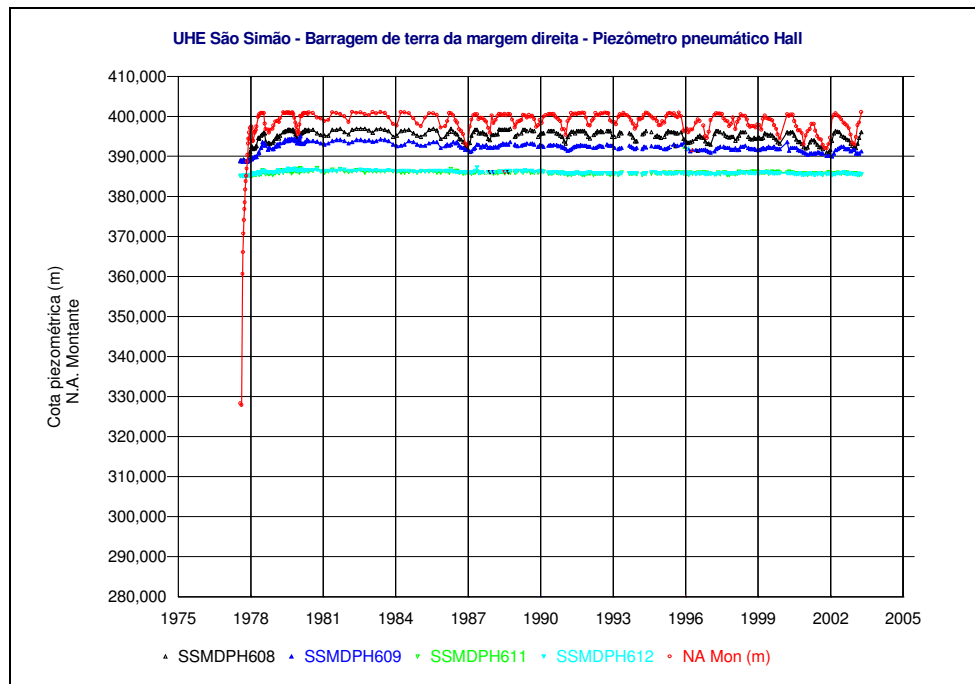


(a)

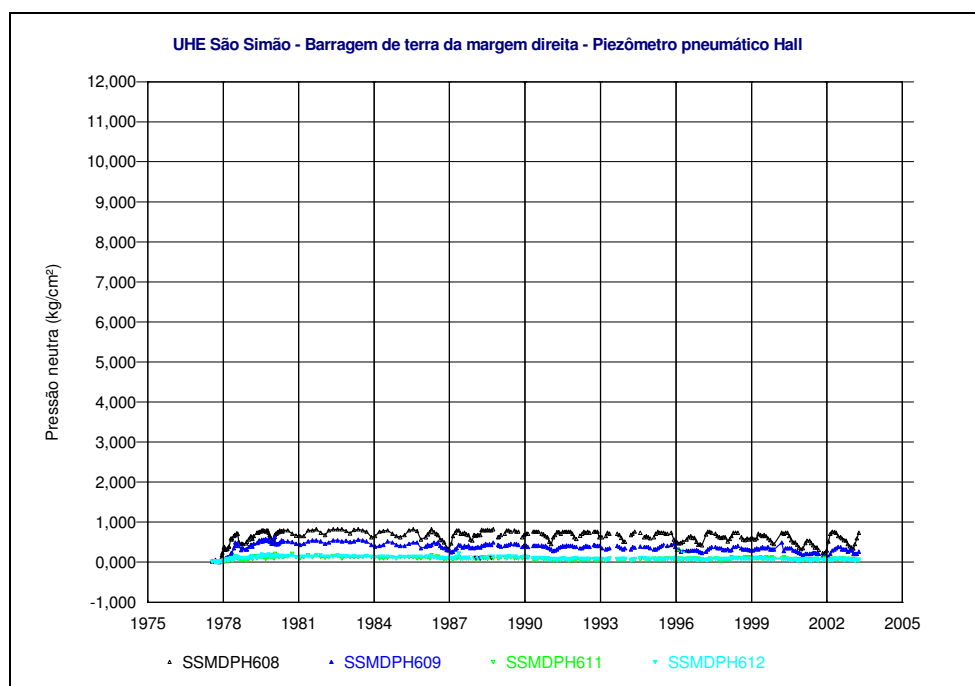


(b)

Figura X.9 – Piezômetros Pneumáticos (PH602-PH603, PH605-PH606) – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



(a)



(b)

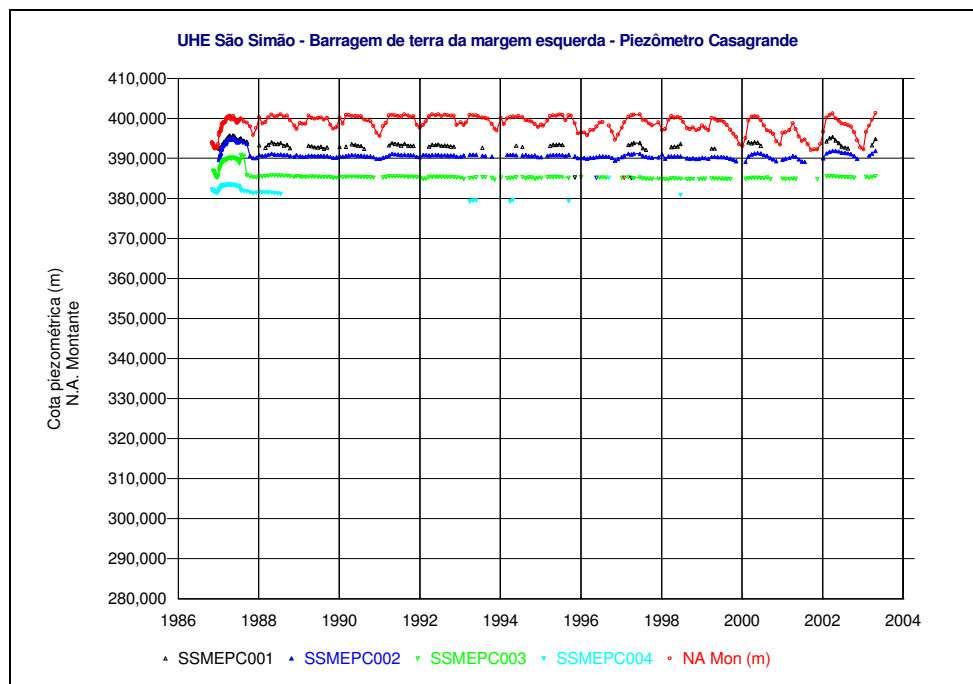
Figura X.10 – Piezômetros Pneumáticos (PH608-PH609, PH611-PH612) – Seção 6 – Estaca 1 + 440,0: (a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

# **ANEXO XI**

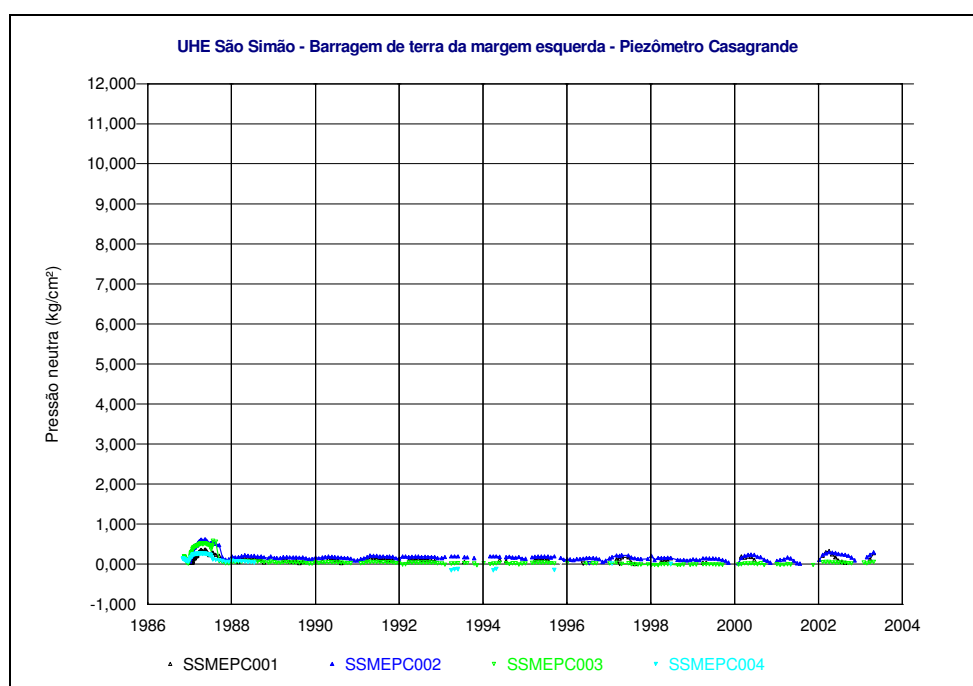
Piezômetros – Casagrande, Pneumático Tipo Hall e Elétrico Tipo Maihak

Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento

- Margem Esquerda -



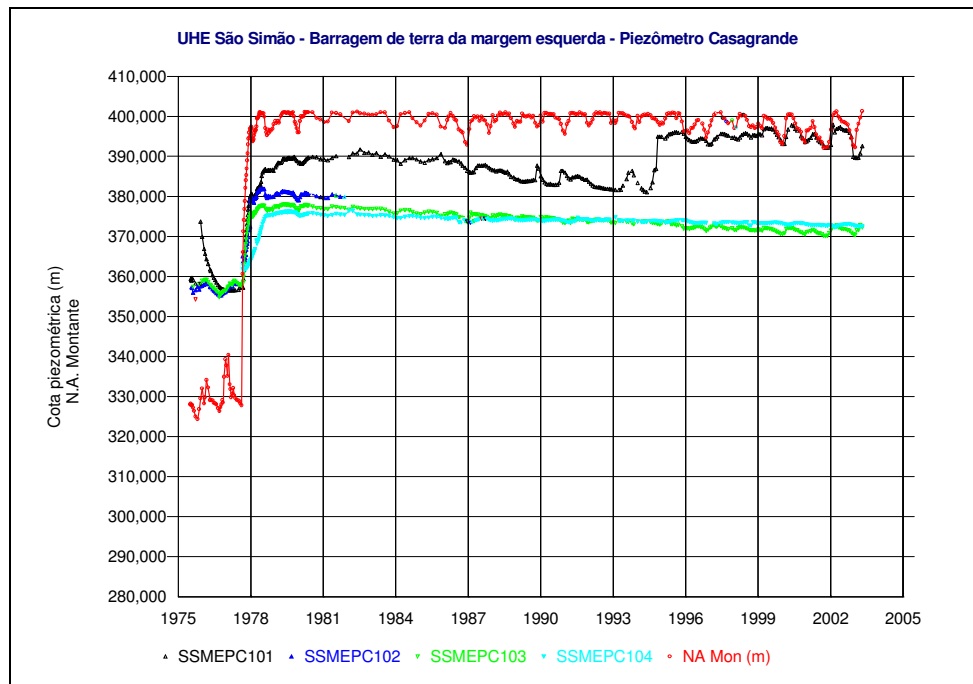
(a)



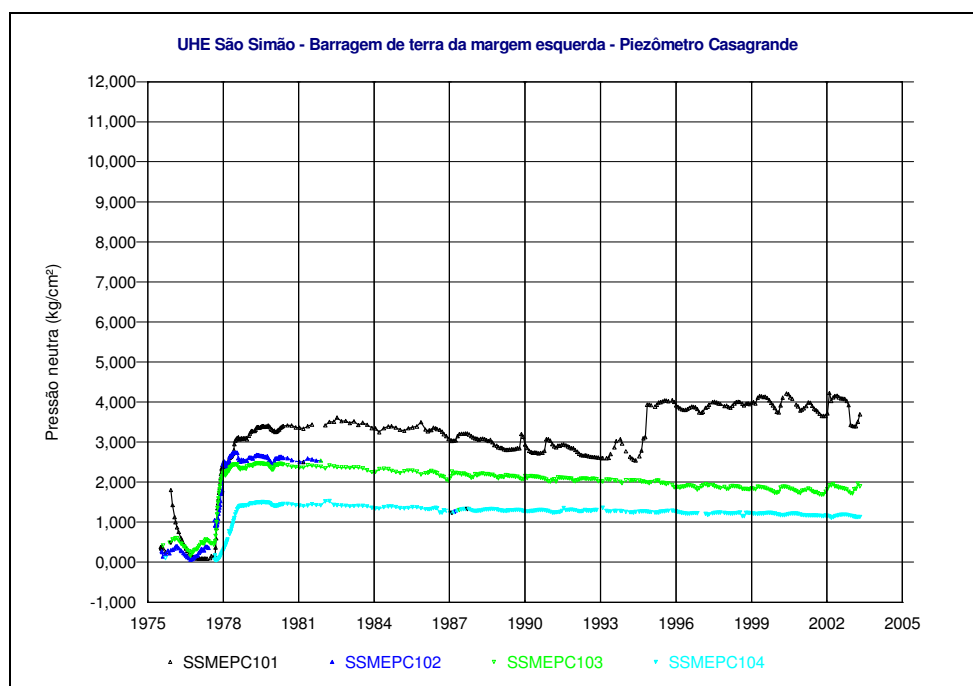
(b)

Figura XI.1 – Piezômetros de Casagrande – Seção 0 – Estaca 3 + 485,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



(a)

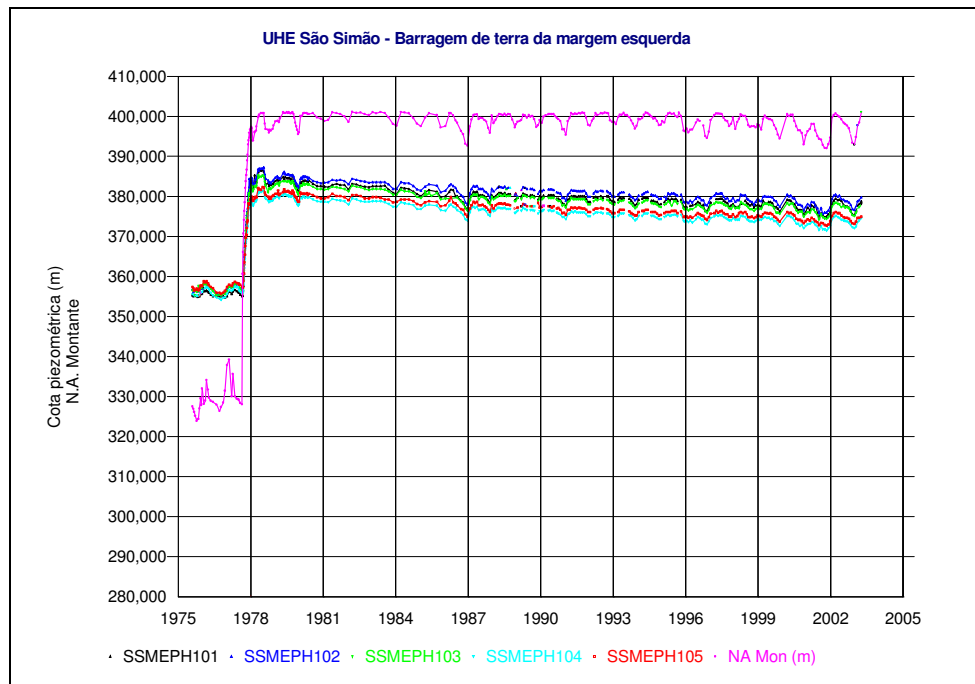


(b)

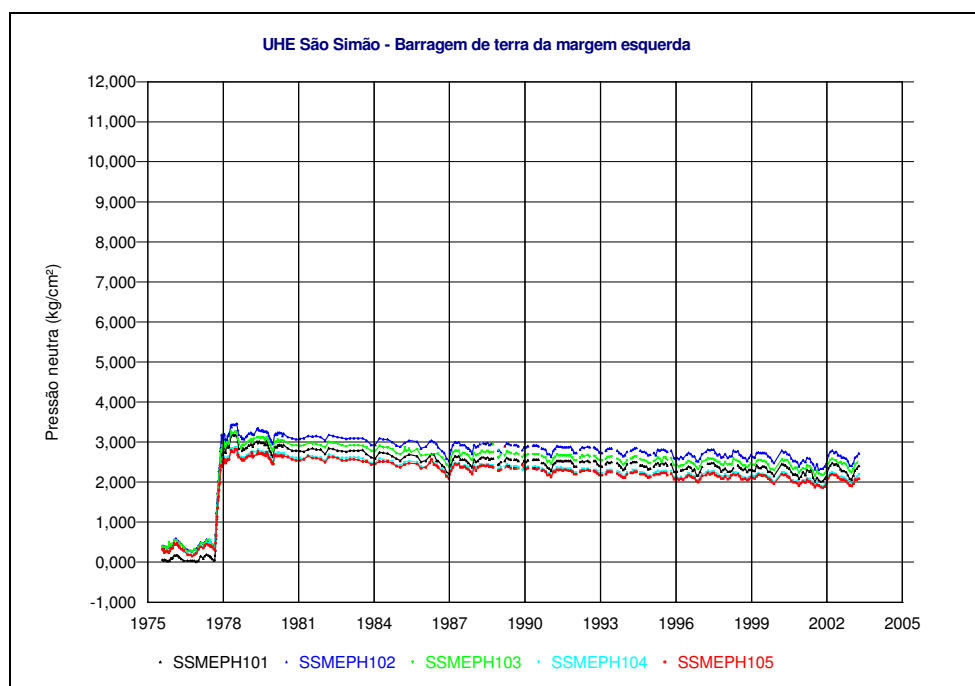
Figura XI.2 – Piezômetros de Casagrande – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra





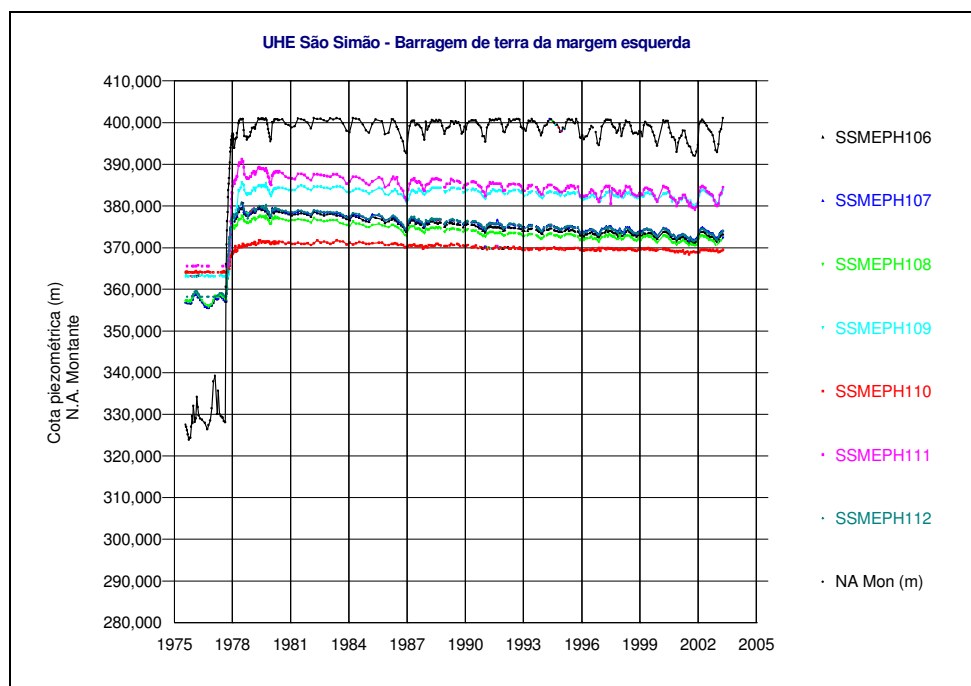
(a)



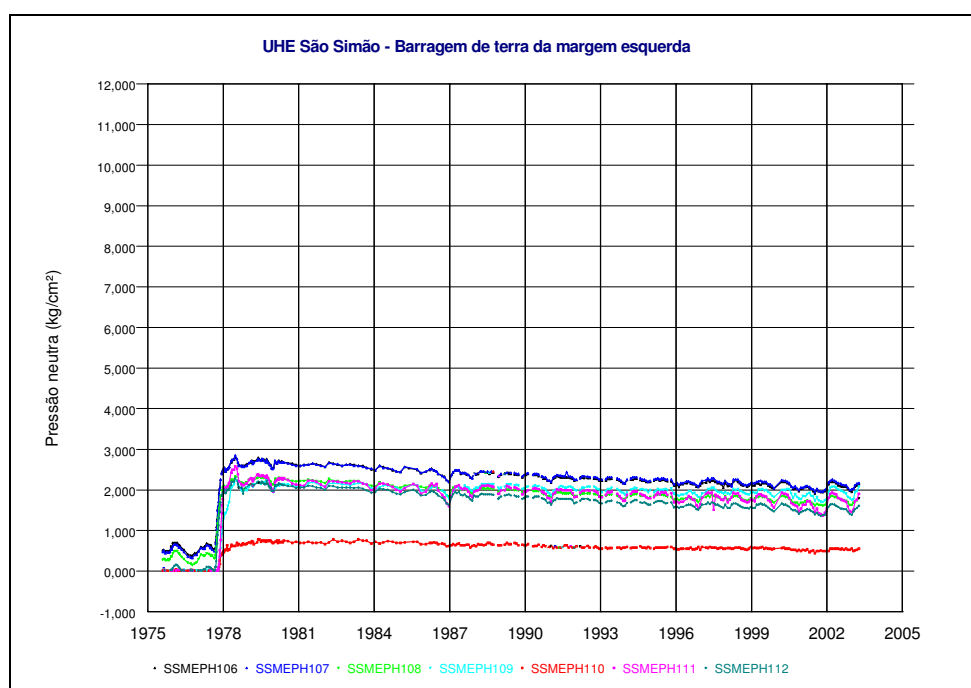
(b)

Figura XI.3 – Piezômetros Pneumáticos (PH101-PH105) – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



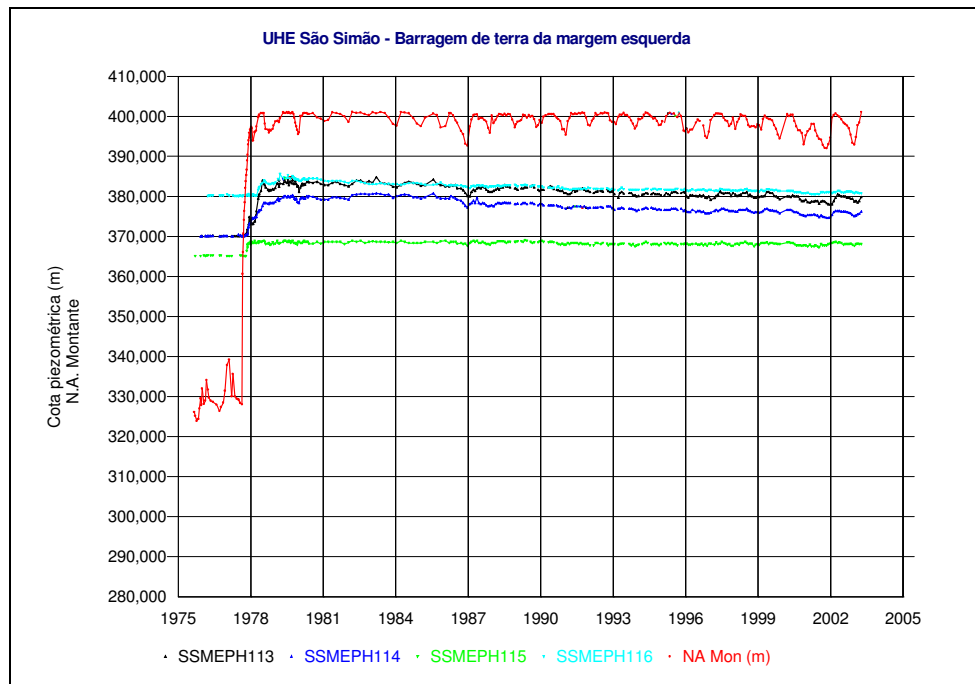
(a)



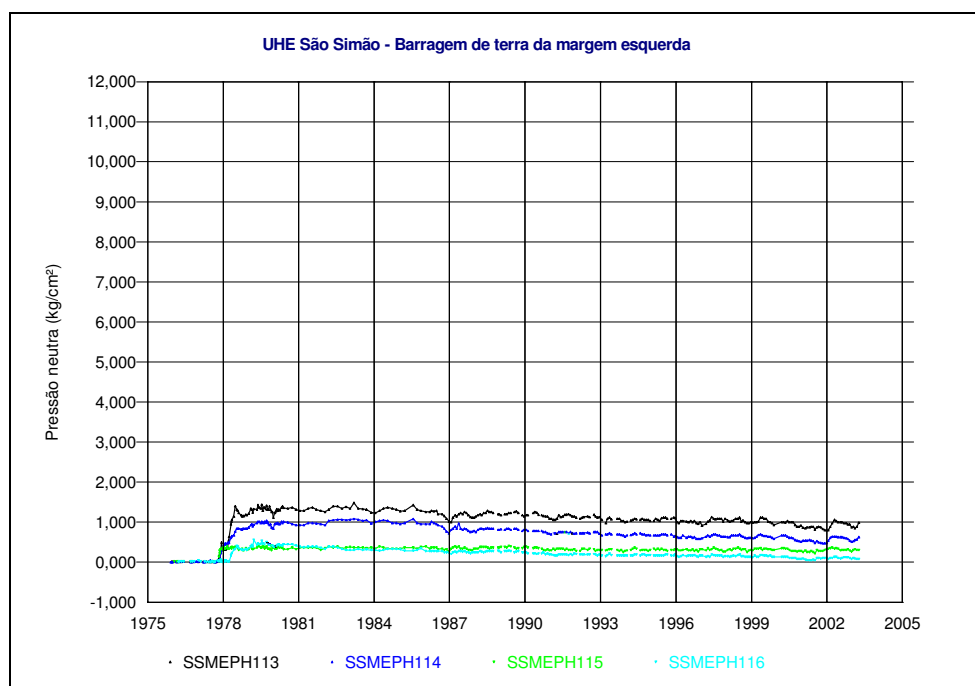
(b)

Figura XI.4 – Piezômetros Pneumáticos (PH106-PH112) – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



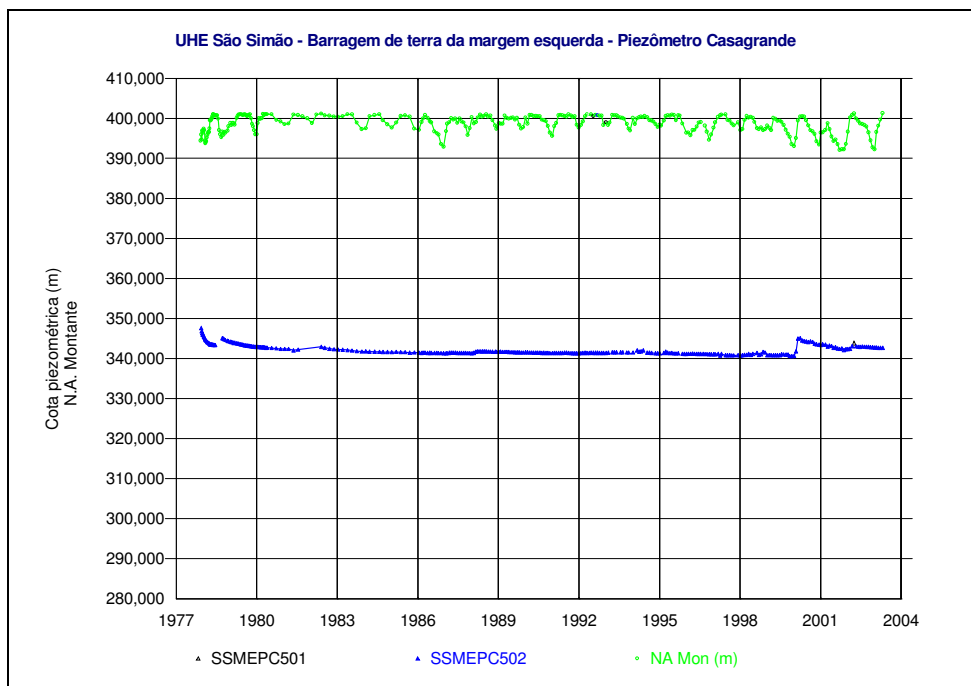
(a)



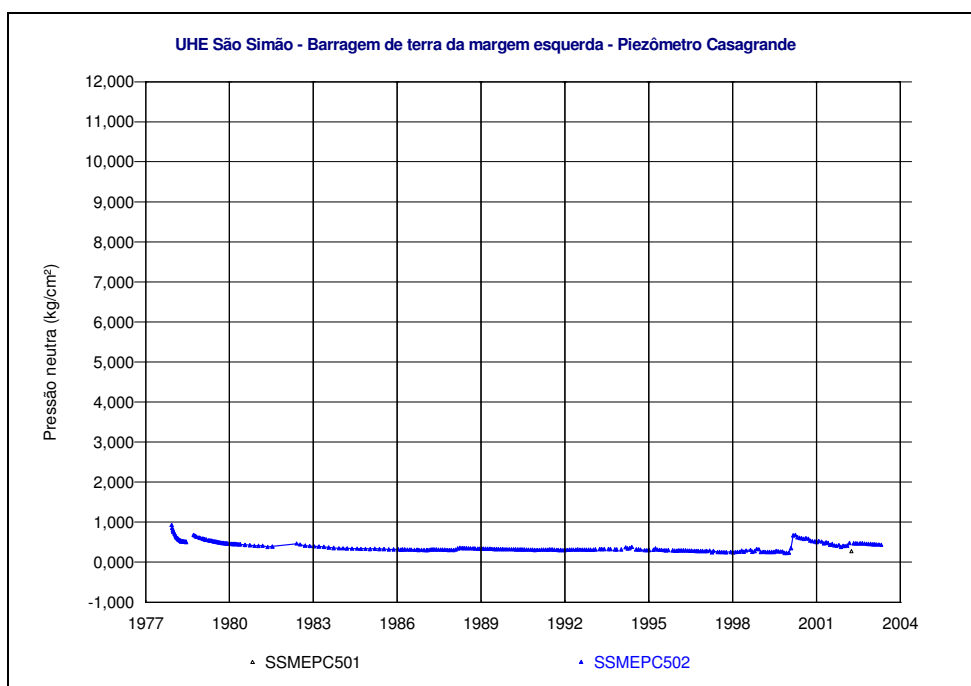
(b)

Figura XI.5 – Piezômetros Pneumáticos (PH113-PH116) – Seção 1 – Estaca 3 + 160,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



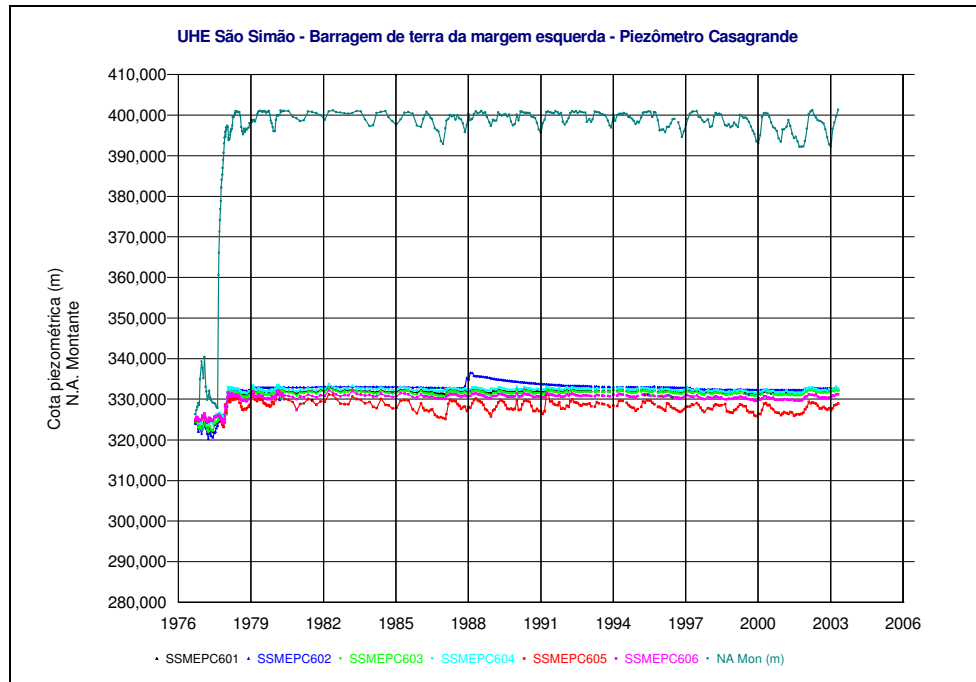
(a)



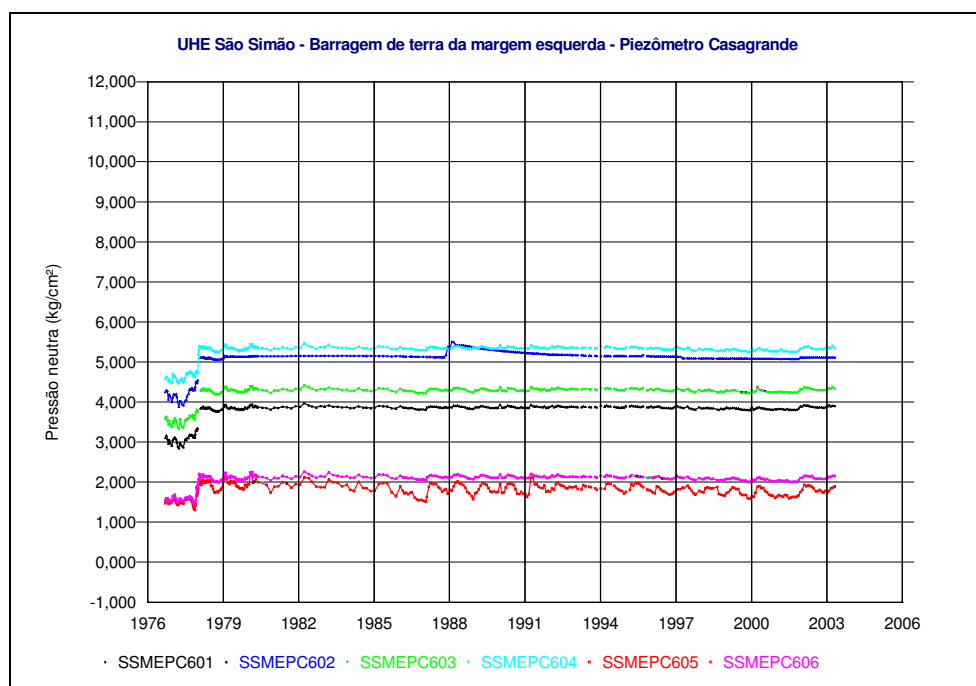
(b)

Figura XI.6 – Piezômetros de Casagrande – Seção 5 – Estaca 2 + 780,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



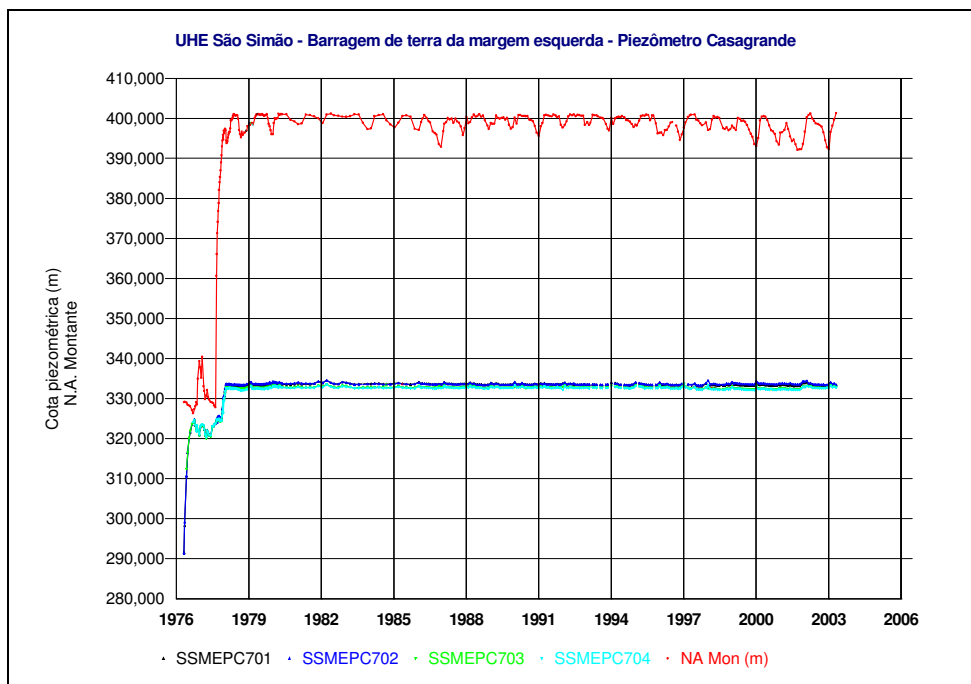
(a)



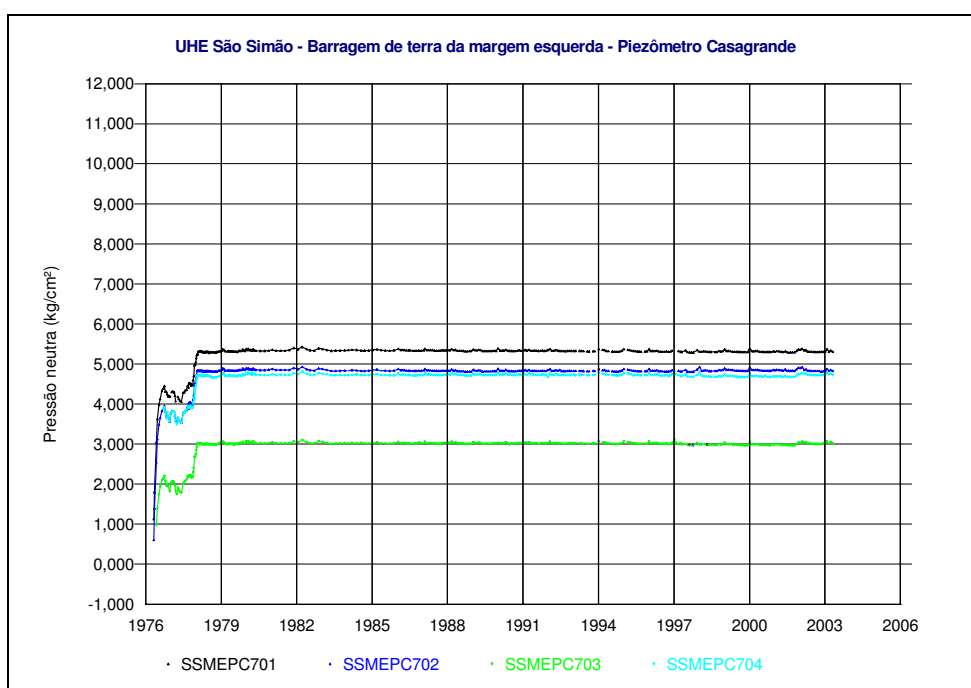
(b)

Figura XI.7 – Piezômetros de Casagrande – Seção 6 – Estaca 2 + 500,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



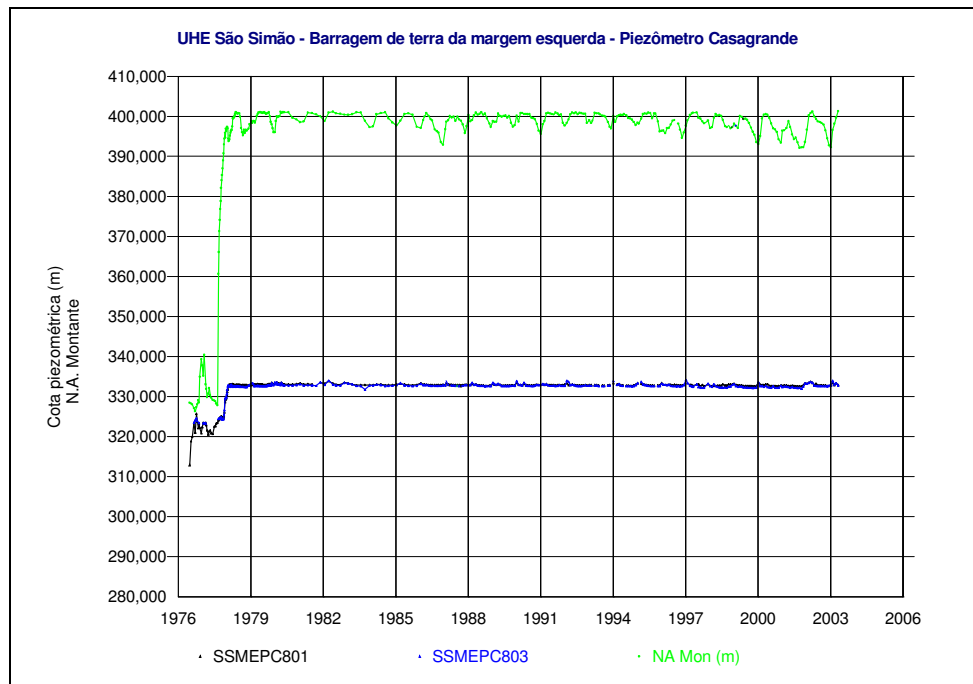
(a)



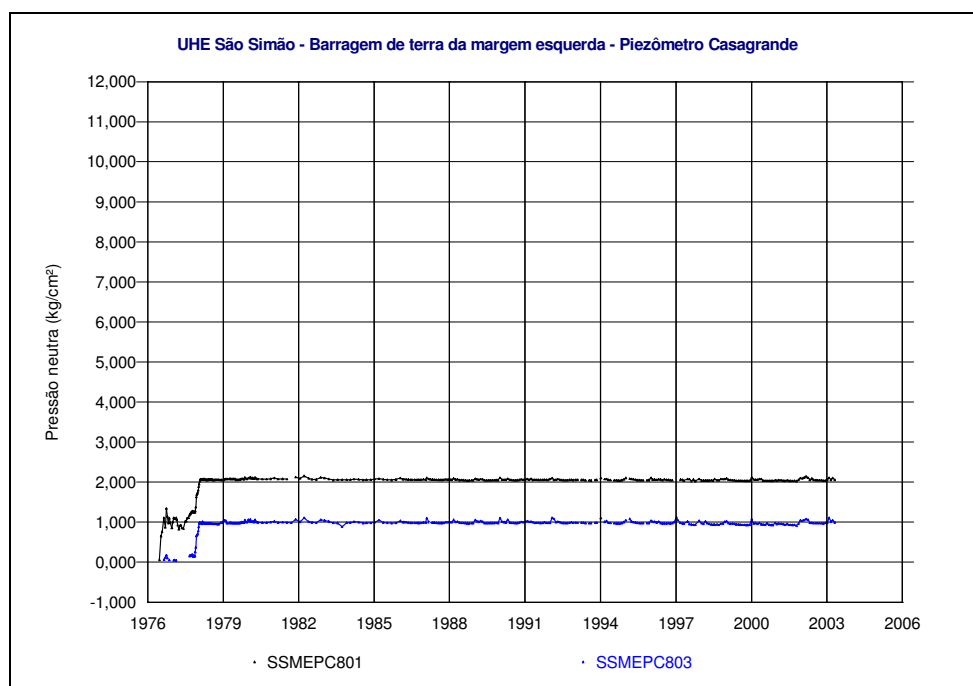
(b)

Figura XI.8 – Piezômetros de Casagrande – Seção 7 – Estaca 2 + 460,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



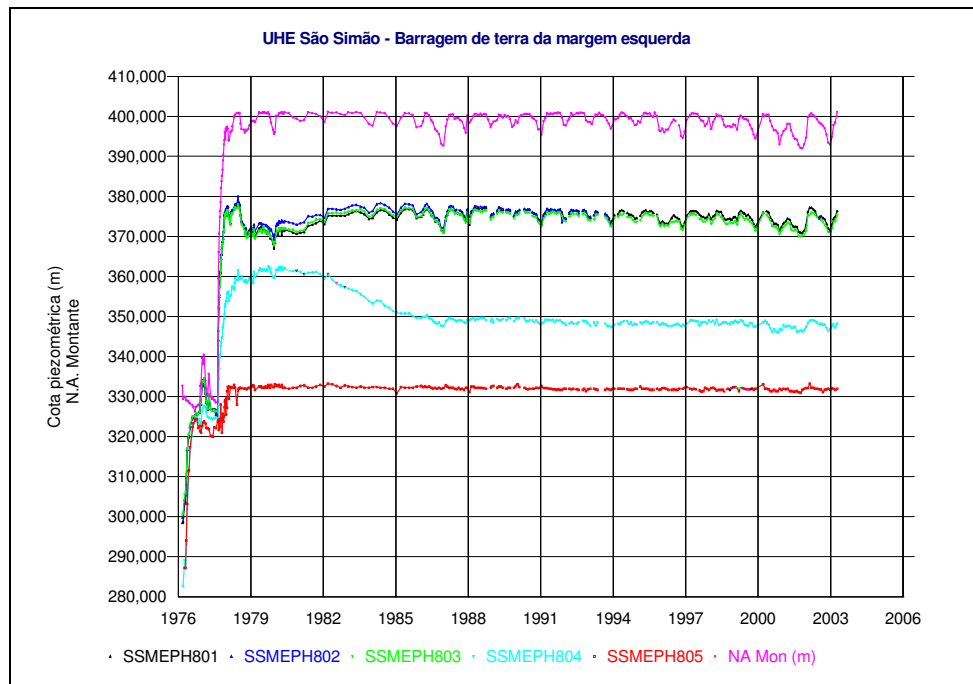
(a)



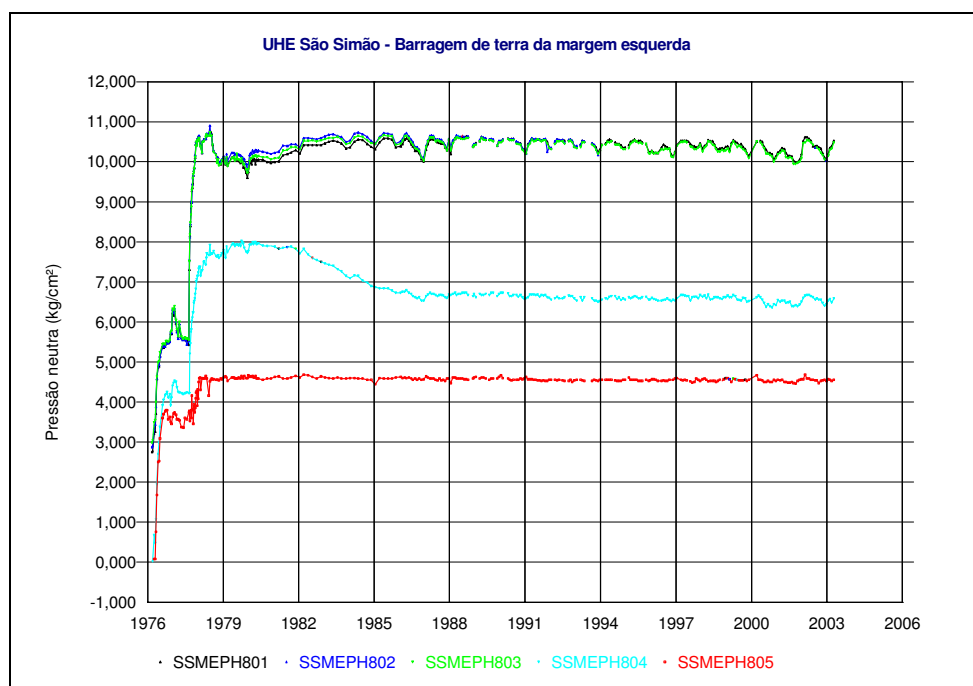
(b)

Figura XI.9 – Piezômetros de Casagrande – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



(a)

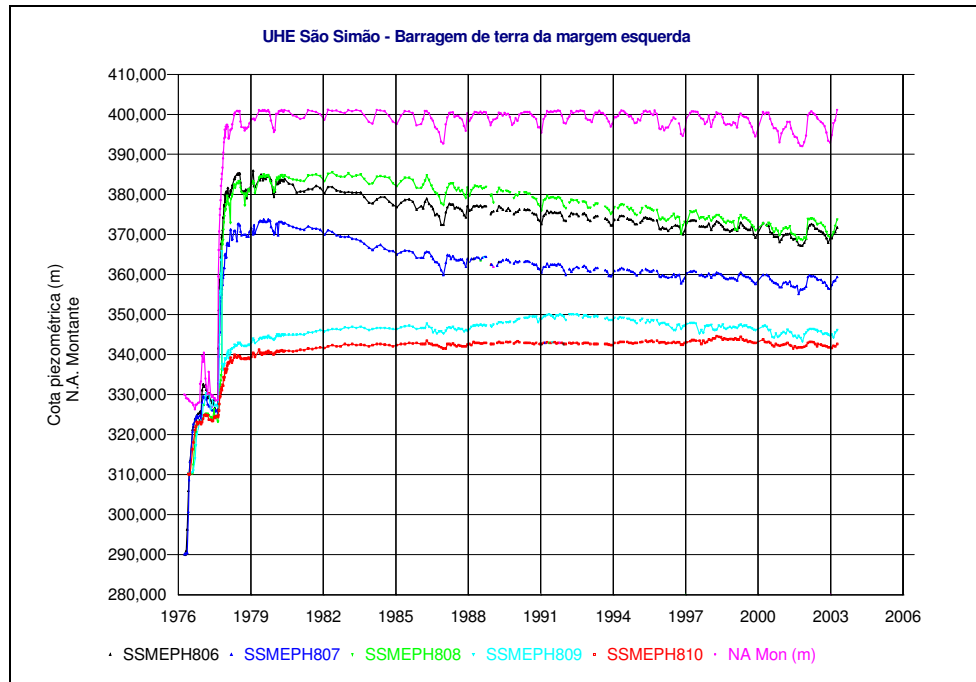


(b)

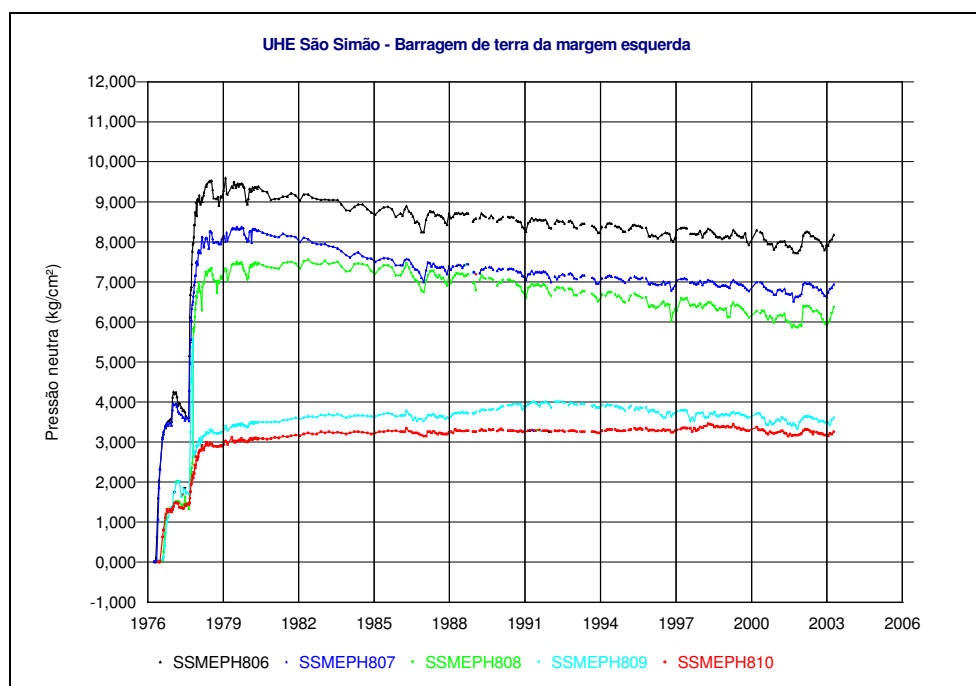
Figura XI.10 – Piezômetros Pneumáticos (PH801-PH805) – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra





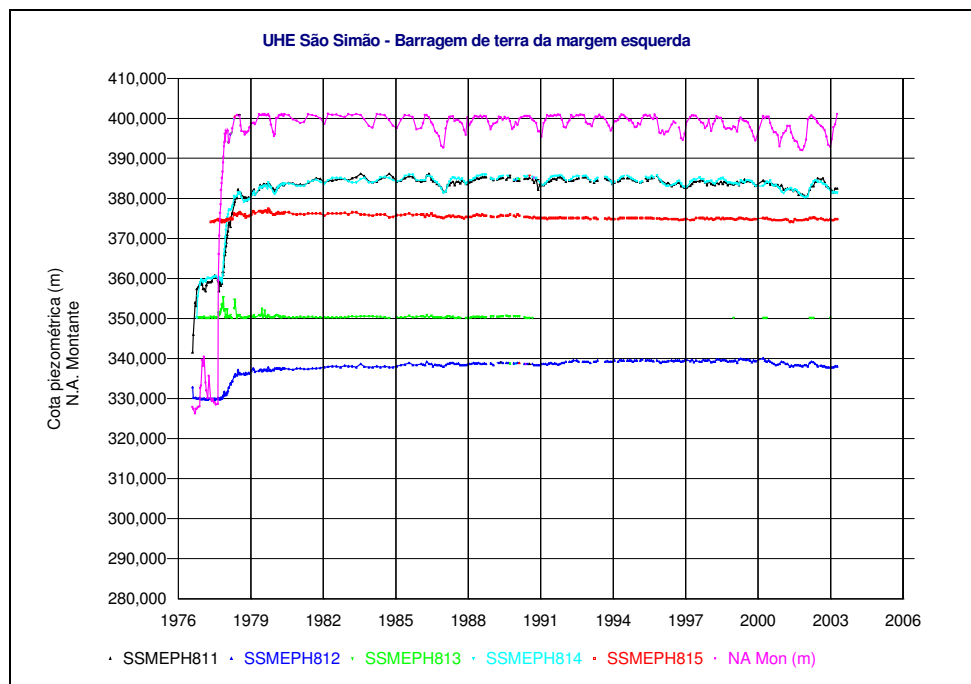
(a)



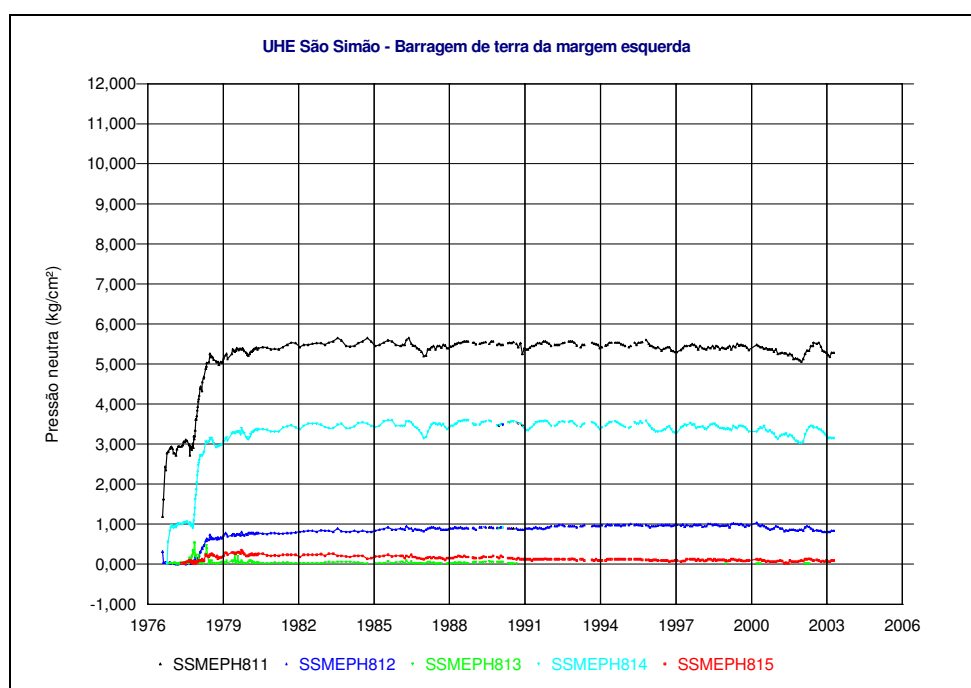
(b)

Figura XI.11 – Piezômetros Pneumáticos (PH806-PH810) – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



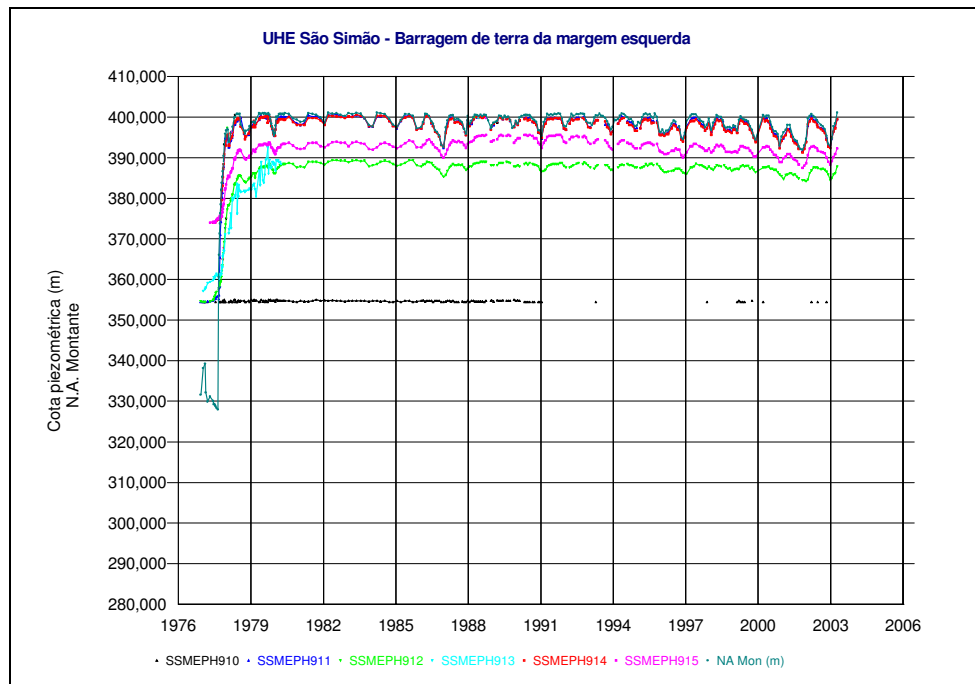
(a)



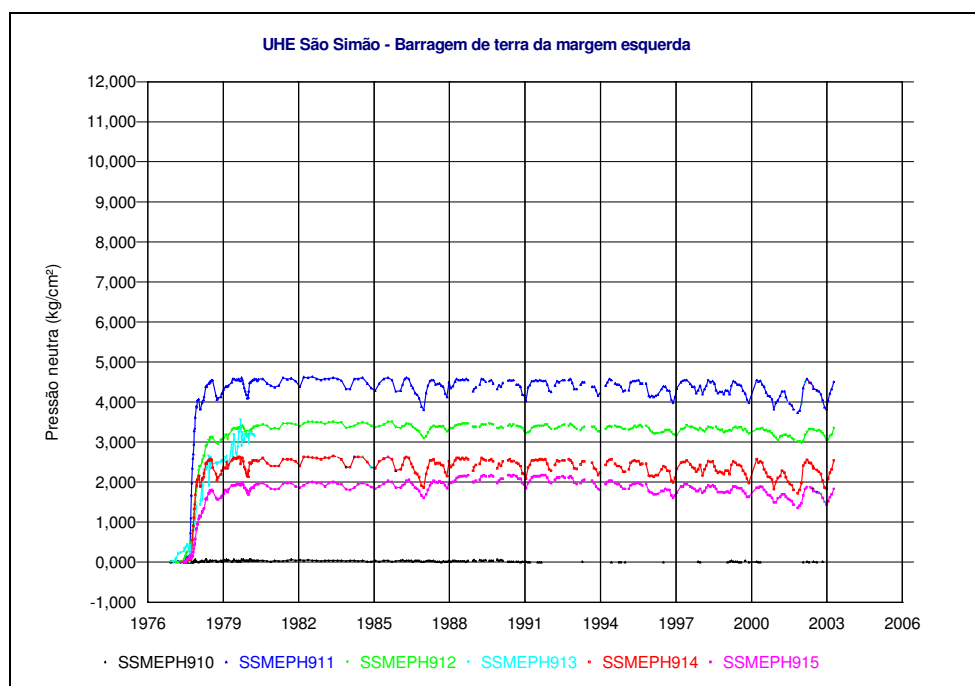
(b)

Figura XI.12 – Piezômetros Pneumáticos (PH811-PH815) – Seção 8 – Estaca 2 + 410,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



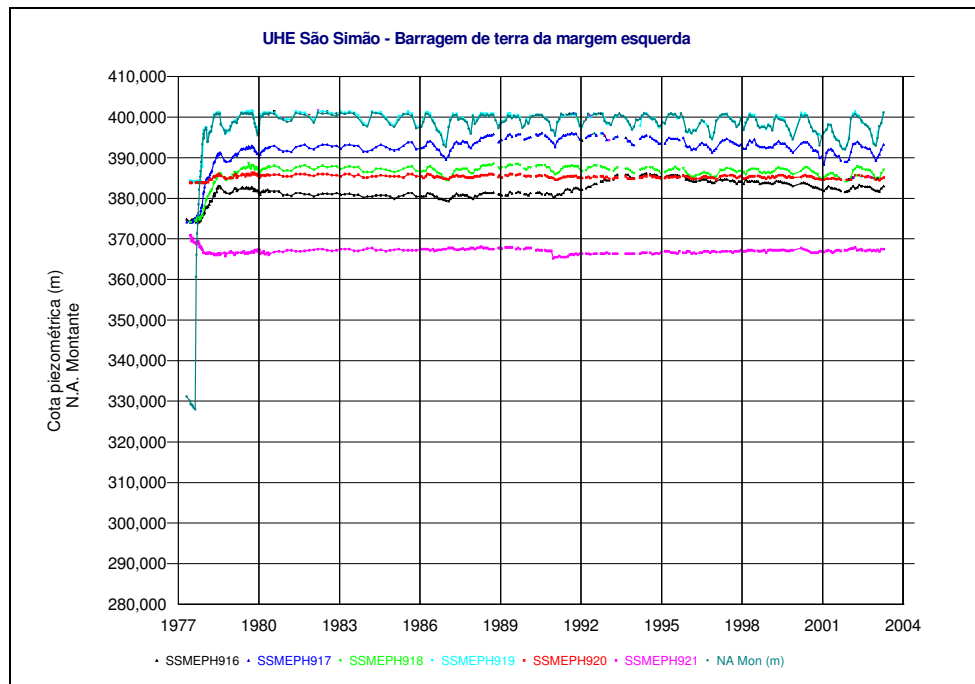
(a)



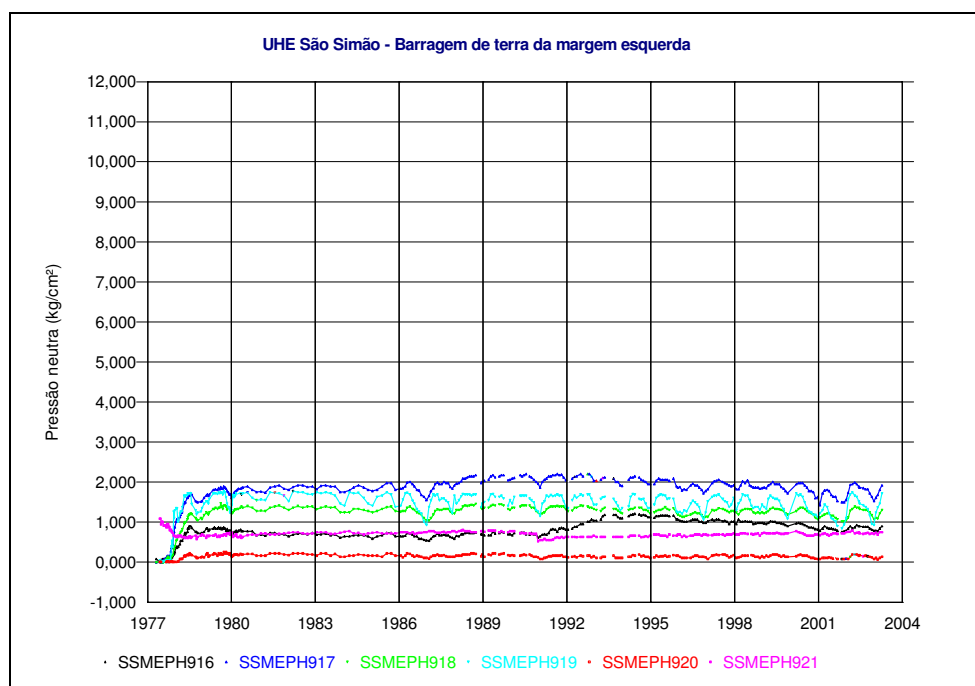
(b)

Figura XI.13 – Piezômetros Pneumáticos (PH910-PH915) – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



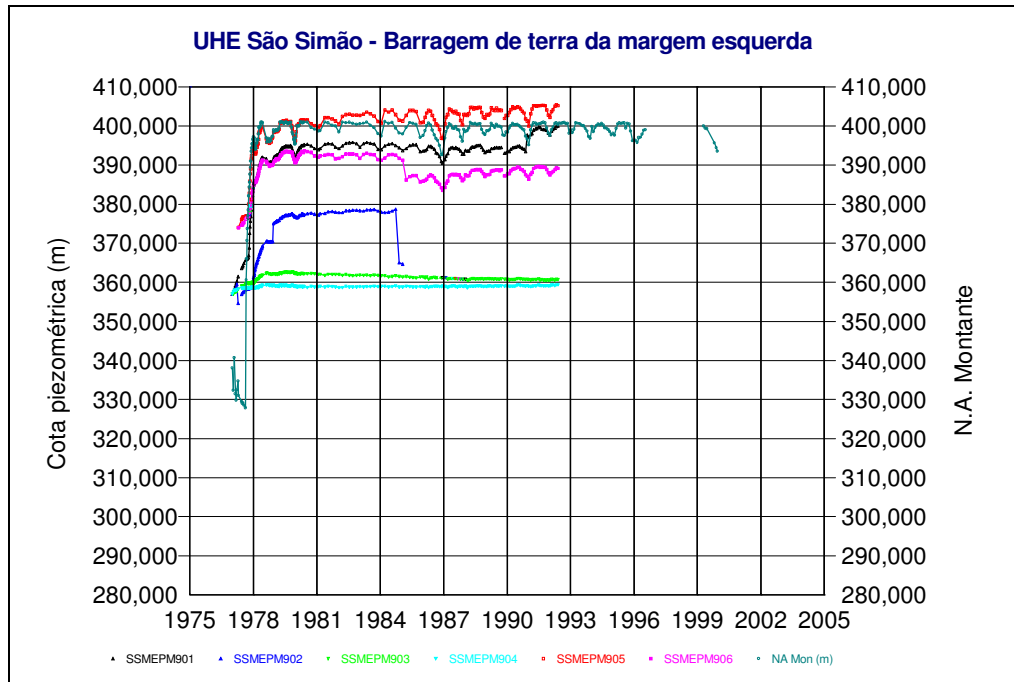
(a)



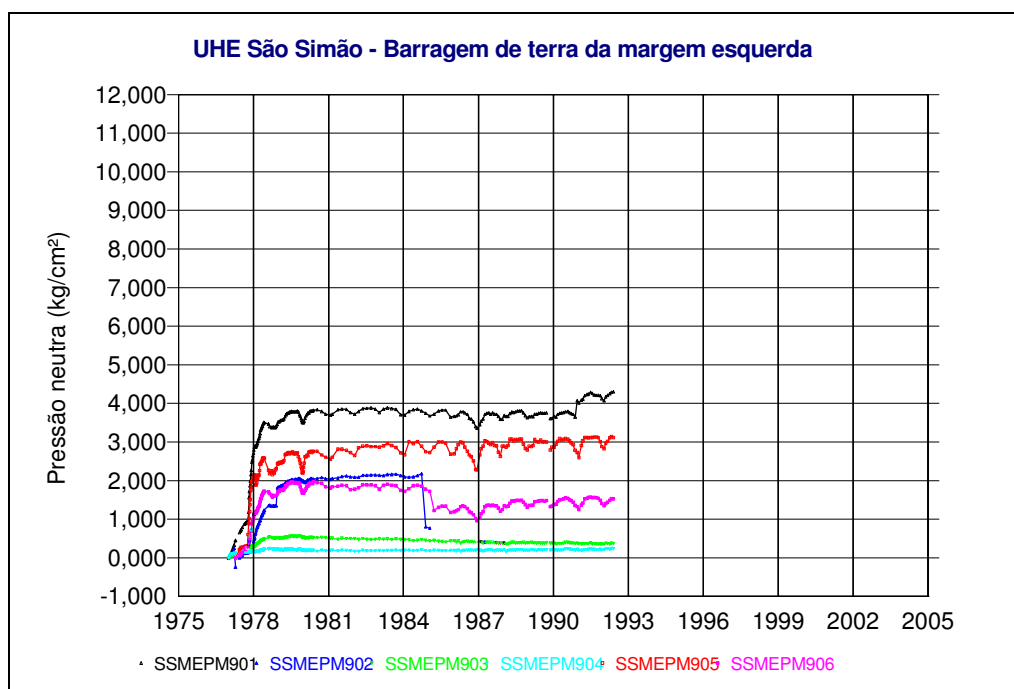
(b)

Figura XI.14 – Piezômetros Pneumáticos (PH916-PH921) – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra



(a)



(b)

Figura XI.15 – Piezômetros Maihak (PM901-PM906) – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0:

(a) Cota Piezométrica e (b) Pressão Neutra

# **ANEXO XII**

Células de Tensão Total

Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento

- Margem Esquerda -

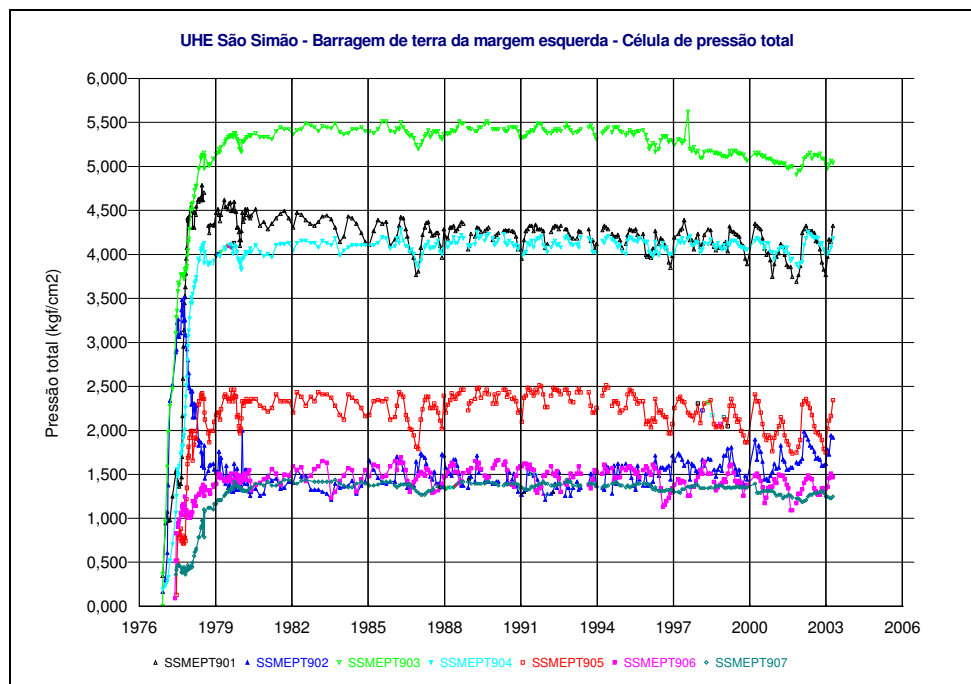


Figura XII.1 – Células de Tensão Total – Seção 9 – Estaca 2 + 016,0

# **ANEXO XIII**

Medidores de NA

Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento

- Margem Esquerda -



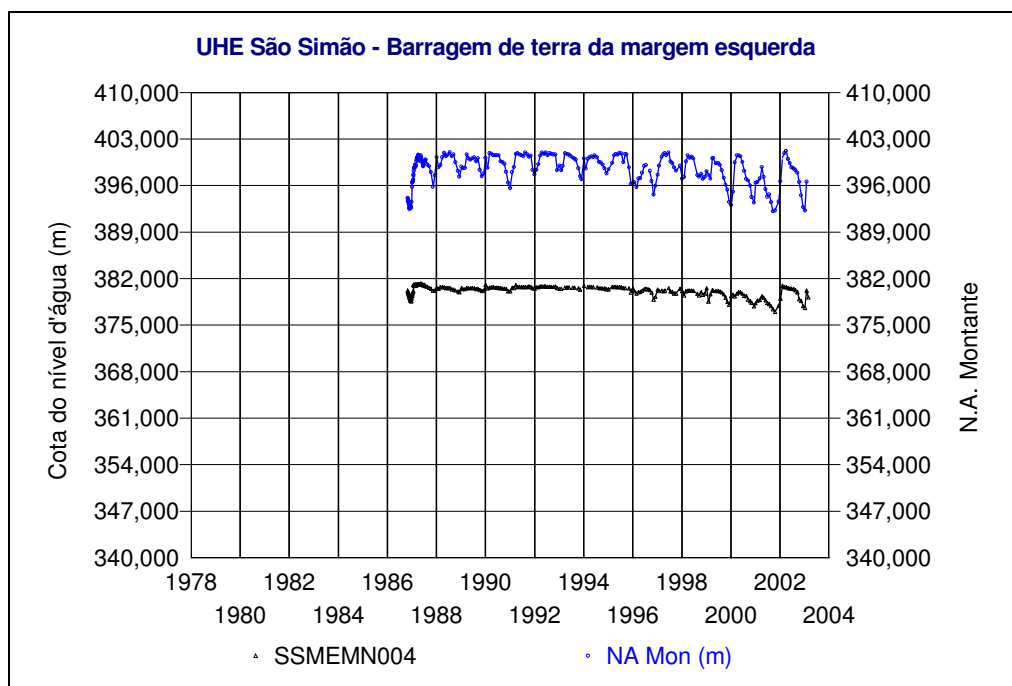


Figura XIII.1 – Medidor de NA – Seção 0 – Estaca 3 + 485,0

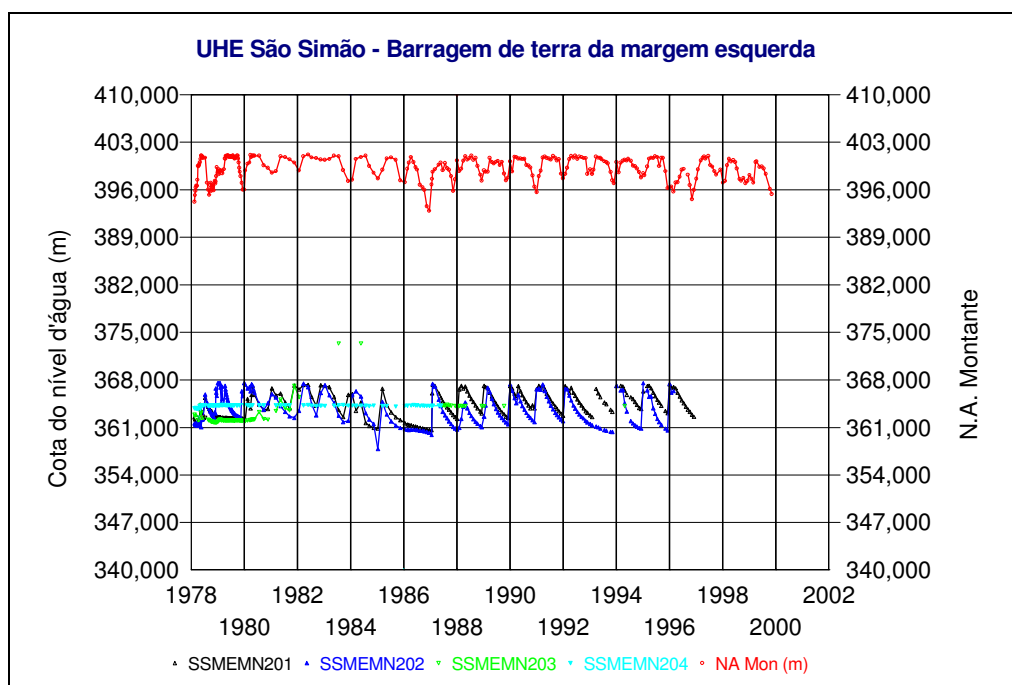


Figura XIII.2 – Medidores de NA – Seção 2 – Estaca 2 + 963,0

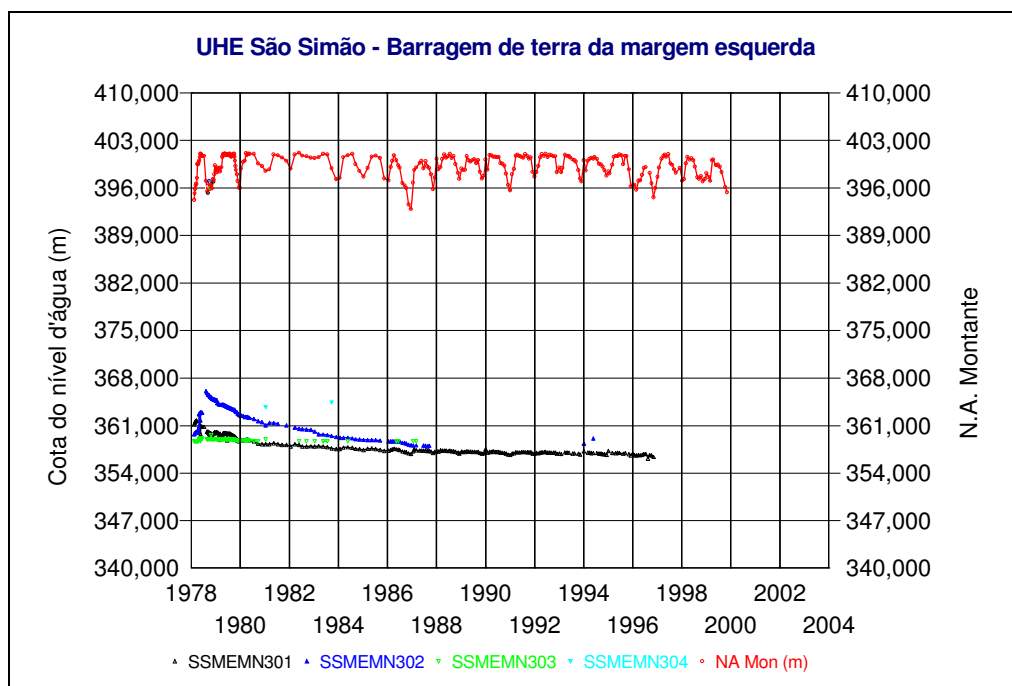


Figura XIII.3 – Medidores de NA – Seção 3 – Estaca 2 + 913,0

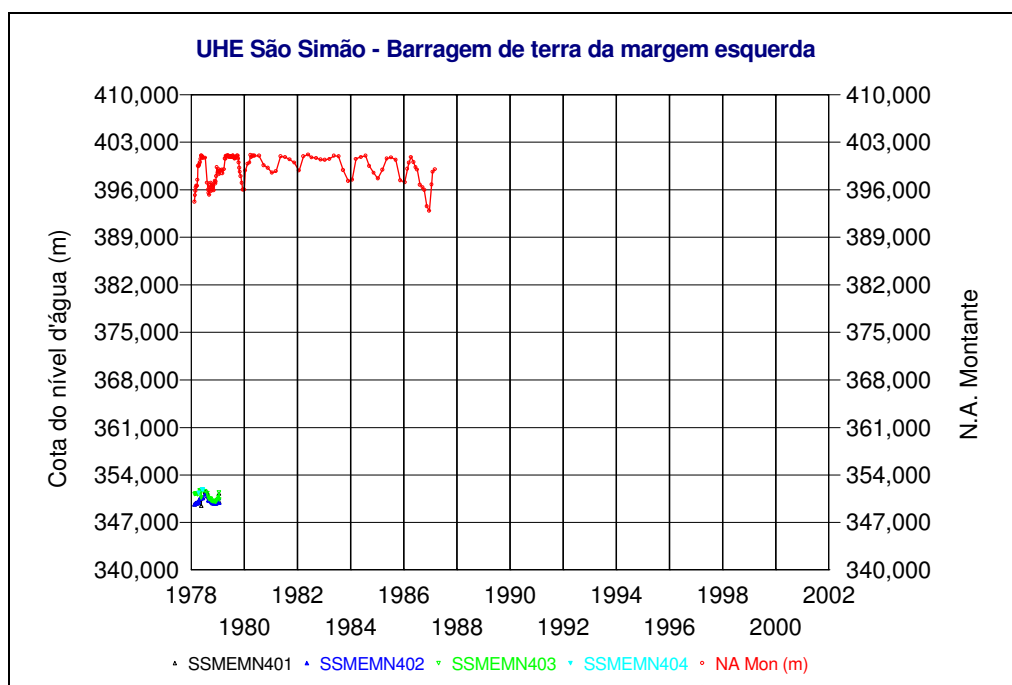


Figura XIII.4 – Medidores de NA – Seção 4 – Estaca 2 + 863,0

# **ANEXO XIV**

Medidores de Vazão

Barragem de Terra

- Margem Direita -

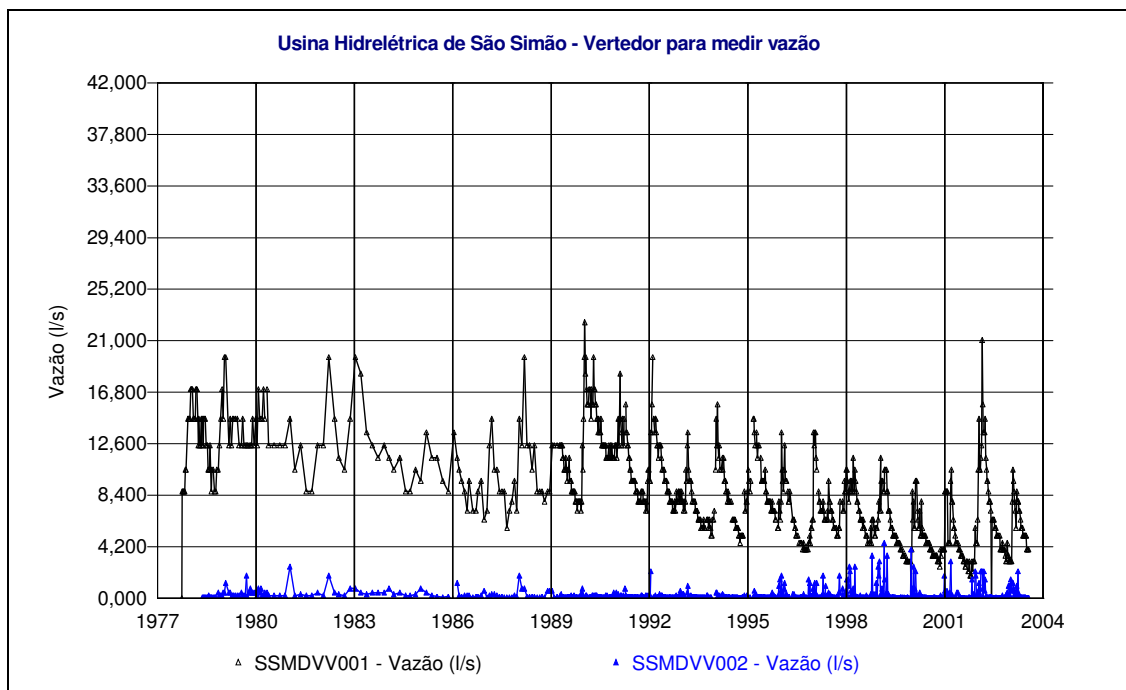


Figura XIV.1 – Medidores de Vazão - BTMD

# **ANEXO XV**

Medidores de Vazão

Barragem de Terra e de Terra e Enrocamento

- Margem Esquerda -

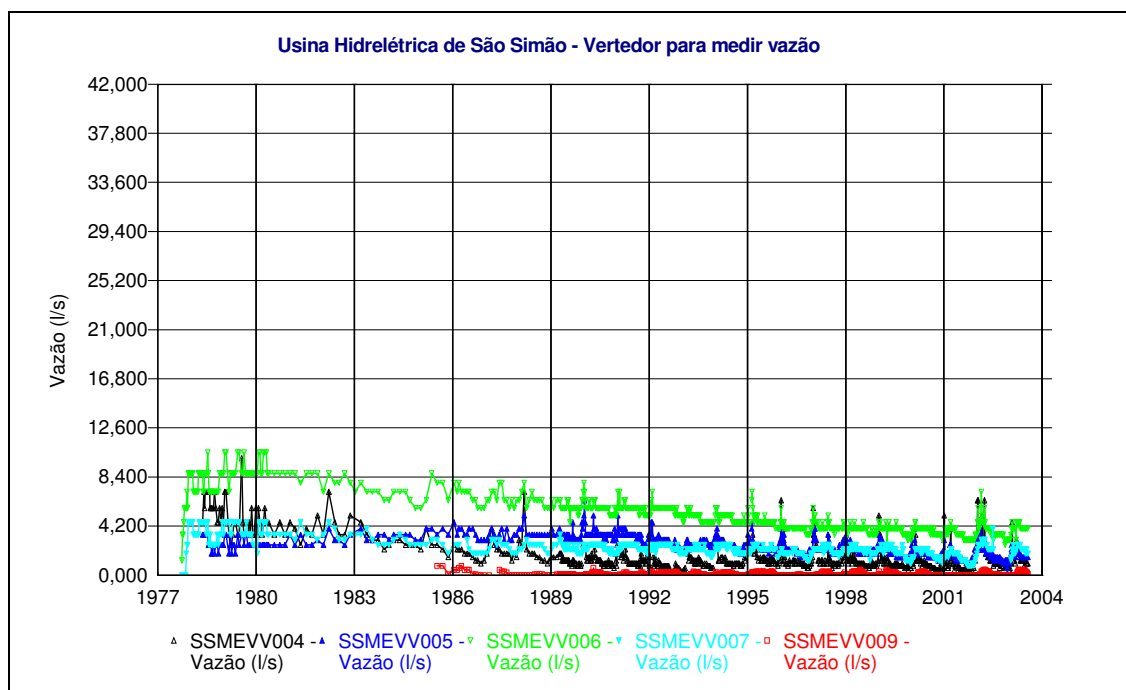


Figura XV.1 – Medidores Vazão (VV004-VV007 e VV009) – BTME

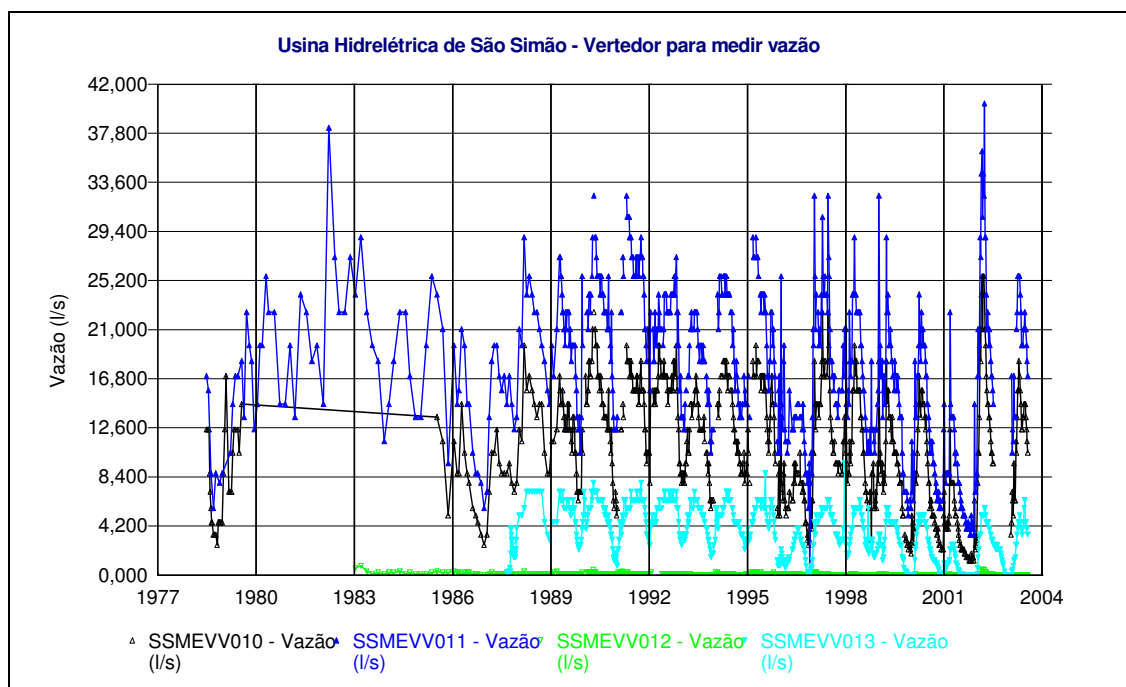


Figura XV.2 – Medidores Vazão (VV010-VV013) – BTME