

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARINA NAIM BROCK TREVIZOLLI

MAPEAMENTO DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO PELA  
ANÁLISE DE LEITURA DOS EXTENSÔMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE  
EQUAÇÕES MULTIQUÁDRICAS – ESTUDO DE CASO USINA DE ITAIPU  
BINACIONAL

CURITIBA

2015

MARINA NAIM BROCK TREVIZOLLI

MAPEAMENTO DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO PELA  
ANÁLISE DE LEITURA DOS EXTENSÔMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE  
EQUAÇÕES MULTIQUÁDRICAS – ESTUDO DE CASO USINA DE ITAIPU

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à disciplina Trabalho Final de Curso como  
requisito parcial à conclusão do Curso de  
Engenharia Civil, Setor de Tecnologia,  
Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.º Dr.º Eng. Roberta Bomfim  
Boszczowski

CURITIBA

2015

## TERMO DE APROVAÇÃO

MARINA NAIM BROCK TREVIZOLLI

MAPEAMENTO DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO PELA ANÁLISE DE LEITURA DOS EXTENSÔMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE EQUAÇÕES MULTIQUÁDRICAS – ESTUDO DE CASO USINA DE ITAIPU

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho Final de Curso como requisito parcial à conclusão do Curso de Engenharia Civil, pela seguinte banca examinadora:



Prof. ° Dr. ° Eng. Roberta Bomfim Boszczowski

Orientadora - Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, UFPR



Prof. ° Dr. ° Eng. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, UFPR



Prof. ° MSc. ° Eng. Elisângela do Prado Oliveira

Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, UFPR

Curitiba, 11 de Dezembro de 2015

*Dedico este trabalho à minha madrinha Marinês Toigo Gottlieb, sinônimo de  
força e superação*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por sempre iluminar meu caminho.

Agradeço à minha família, em especial meus pais, José Trevizolli e Marisanta Brock Trevizolli, por sempre me incentivarem nos meus sonhos e me ajudarem a superar cada desafio.

Agradeço à minha orientadora, Professora Dr. Roberta Bomfim Boszczowski, por todos os conhecimentos transmitidos e a dedicação de suas horas com este trabalho.

Agradeço à Itaipu Binacional por me dar a oportunidade de vivenciar a área da Engenharia que tanto gosto.

Agradeço especialmente ao Engenheiro Civil Dimilson Pinto Coelho por acreditar no meu potencial, por depositar sua confiança em mim e me fornecer a possibilidade de dar continuidade a este trabalho.

Agradeço meus amigos pelo apoio em todos os momentos dessa fase.

Agradeço finalmente à Universidade Federal do Paraná, por todas as experiências vivenciadas.

*“Water does not resist. Water flows. When you plunge your hand into it, all you feel is a caress. Water is not a solid wall, it will not stop you. But water always goes where it wants to go, and nothing in the end can stand against it. Water is patient. Dripping water wears away a stone. Remember that, my child. Remember you are half water. If you can't go through an obstacle, go around it. Water does.”*

*Margaret Atwood*

## RESUMO

Os cuidados com a segurança de uma barragem são de extrema importância para a garantia do sucesso da estrutura, o programa de auscultação vinculado a instrumentação torna possível medir seu comportamento e possibilitar importantes decisões para solucionar as possíveis causas de um problema.

O presente trabalho visa analisar o comportamento da fundação da Barragem de Concreto da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, por meio da leitura da instrumentação de extensômetros de hastes múltiplas e sua posição geográfica, através da verticalização dos instrumentos inclinados para interpretação dos deslocamentos verticais de distensão e recalque.

Através do método geoestatístico de equações multiquádricas, interpolou-se os dados pelo *software* ArcGIS e executou-se o mapeamento da fundação para análise do Basalto Denso visando um melhor entendimento das distribuições de tensões na fundação, além de analisar e graficar as seções críticas dos trechos da Barragem de Concreto estudadas.

Palavras-Chave: Barragem de Concreto, Fundação, Basalto, Instrumentação, Equações Multiquádricas.

## **ABSTRACT**

The care for the safety of a dam are extremely important for ensure the success of the structure, the auscultation program linked to instrumentation makes it possible to measure their behavior and to make important decisions to solve the possible causes of a problem.

This study aims to analyze the behavior of the Concrete Dam's foundation of The hydroelectric plant of Itaipu Binacional, by reading the instrumentation of multiple point borehole extensometer and its geographical position through vertical integration of instruments inclined to interpret the vertical displacements of distention and repression.

By the geostatistical method of multiquadric equations, interpolated the data by ArcGIS software and executed the foundation's mapping for analysis the Basalt Denso seeking a better understanding of the distribution of stresses in the foundation, and analyzing and graphing critical sections of The Concrete Dam stretches studied.

Keywords: Concrete dam, Foundation, Basalt, Instrumentation, Multiquadric Equations.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CONCEITOS RELACIONADOS A SEGURANÇA DE BARRAGENS E SUAS INTER-RELAÇÕES.....	18
FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS.....	19
FIGURA 3 - CORRELAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE INSTRUMENTOS E A DETERIORAÇÃO DE BARRAGENS DE CONCRETO.....	25
FIGURA 4 - ARRANJO TÍPICO DA INSTRUMENTAÇÃO DA CRISTA DO VERTEDOIRO.....	26
FIGURA 5 - EXTENSÔMETRO DE HASTES MÚLTIPLAS INSTALADO NO TRECHO U DA USINA DE ITAIPU.....	28
FIGURA 6 - PLANTA EXTENSÔMETRO MANUAL.....	28
FIGURA 7 - PERFIL DE INSTALAÇÃO EXTENSÔMETRO DE HASTES MÚLTIPLAS (EM-A-2).....	30
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DO ARCGIS GEOSTATISTICAL ANALYST	36
FIGURA 9 - VISTA GERAL DO EMPREENDIMENTO DE ITAIPU BINACIONAL.....	37
FIGURA 10 - ARRANJO GERAL DA USINA DE ITAIPU.....	39
FIGURA 11 - SEÇÃO GEOLÓGICA TÍPICA NO LOCAL DE ITAIPU.....	41
FIGURA 12 - SISTEMAS DE CHAVETAS NO TRECHO F E INSTRUMENTAÇÃO.....	44
FIGURA 13 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA BARRAGEM PRINCIPAL.....	45
FIGURA 14 - BLOCO-CHAVE INSTRUMENTADO.....	48
FIGURA 15- RECALQUE DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE GRAVIDADE ALIVIADA.....	50
FIGURA 16 - PLANTA DAS ESTRUTURAS MAPEADAS.....	52
FIGURA 17 - PERFIL DA ESCAVAÇÃO DO VERTEDOIRO.....	53
FIGURA 18 - VISÃO GERAL VERTEDOIRO.....	53
FIGURA 19 - BARRAGEM LATERAL DIREITA.....	54
FIGURA 20 - BARRAGEM DE LIGAÇÃO E BARRAGEM PRINCIPAL.....	55
FIGURA 21- FUNDAÇÃO E PERFIL DE ESCAVAÇÃO DA BARRAGEM PRINCIPAL.....	56

FIGURA 22 – VISÃO GERAL CASA DE FORÇA E ÁREA DE MONTAGEM ..	57
FIGURA 23 - GRÁFICO DE COMPORTAMENTO EM-D-20/1.....	59
FIGURA 24 - MODELO DE COMPORTAMENTO ELÁSTICO E PLÁSTICO ...	61
FIGURA 25 - INSTRUMENTAÇÃO EXTENSÔMETRO ENTRE OS BLOCOS D52 E D53.....	63
FIGURA 26 - GEORREFERENCIAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - TRECHO F.....	64
FIGURA 27 - PERFIL DE INSTALAÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO.....	66
FIGURA 28 - EXEMPLIFICAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO VERTICAL.....	67
FIGURA 29 - RESULTANTE DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETROS PARA MÁXIMOS HISTÓRICOS.....	69
FIGURA 30 - RESULTANTE DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETROS PARA INVERNO.....	70
FIGURA 31 - RESULTANTE DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETROS PARA VERÃO.....	70
FIGURA 32 - RESULTADO DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETRO PARA O ENCHIMENTO.....	71
FIGURA 33 - MODELO DE SHAPEFILE CRIADO.....	72
FIGURA 34 - CICLO PARA REALIZAÇÃO DO MAPEAMENTO EM ARCGIS.	73
FIGURA 35 -GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS VALORES MEDIDOS E PREVISTOS.....	75
FIGURA 36 - VALIDAÇÃO CRUZADA PARA OS DADOS DE ENCHIMENTO	77
FIGURA 37 - VALIDAÇÃO CRUZADA PARA O PERÍODO DE MÁXIMOS HISTÓRICOS.....	78
FIGURA 38 - VALIDAÇÃO CRUZADA PARA O PERÍODO DE VERÃO .....	78
FIGURA 39 - VALIDAÇÃO CRUZADA DO PERÍODO DE INVERNO.....	79
FIGURA 40 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE MÁXIMOS HISTÓRICOS.....	80
FIGURA 41 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE VERÃO.....	80
FIGURA 42 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE INVERNO .....	81
FIGURA 43 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE ENCHIMENTO .....	81
FIGURA 44 - ILUSTRAÇÃO DAS CONDIÇÕES BÁSICAS DE CARREGAMENTO E ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE CONCRETO À GRAVIDADE.....	83

FIGURA 45 - GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO EXTENSÔMETRO EM-F-22/1 - PERÍODO 1982 À 2014 .....	85
FIGURA 46 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DA SEÇÃO DO BLOCO F - PERÍODO DE ENCHIMENTO E MÁXIMOS HISTÓRICOS .....	87
FIGURA 47 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL NA SEÇÃO DO VERTEDOURO - PERÍODO DE MÁXIMOS HISTÓRICOS .....	89
FIGURA 48 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DA SEÇÃO DO VERTEDOURO - PERÍODO VERÃO E INVERNO .....	91
FIGURA 49 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DA SEÇÃO DO BLOCO F - PERÍODO DE VERÃO E INVERNO.....	92

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESPESSURA MÉDIA DOS DERRAMES DE BASALTO DA FUNDAÇÃO DE ITAIPU.....	42
TABELA 2- PROPRIEDADES FÍSICAS DA ROCHA DE FUNDAÇÃO .....	45
TABELA 3 - PROPRIEDADES DA FUNDAÇÃO ROCHOSA .....	46
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS TRECHO A .....	52
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS TRECHO D .....	54
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS TRECHO E E F .....	55
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO TRECHO H.....	56
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS TRECHO U .....	57
TABELA 9 - RELAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ANALISADOS .....	60
TABELA 10 - DADOS DE GEORREFENCIAMENTO - TRECHO D .....	65
TABELA 11 - EXEMPLIFICAÇÃO DA PLANILHA DE CÁLCULO DOS EXTENSÔMETROS VERTICALIZADOS .....	68

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 ATENDIMENTO A LEI DE SEGURANÇA DE BARRAGENS .....	20
2.2 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA VINCULADA À SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	22
2.3 AUSCULTAÇÃO .....	24
2.3.1 Instrumentos de Auscultação de Barragens .....	25
2.3.2 Extensômetros de hastes múltiplas .....	26
2.4 MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS .....	30
2.4.1 Equações Multiquádricas .....	32
2.5 MAPEAMENTO DE VARIÁVEIS GEOTÉCNICAS.....	33
2.5.1 Aspectos Gerais.....	33
2.6 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – <i>ARC.GIS</i> ( <i>ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI</i> ) .....	34
<b>3 USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU</b> .....	<b>37</b>
3.1 GENERALIDADES .....	37
3.2 ESTRUTURAS DO EMPREENDIMENTO HIDRELÉTRICO.....	38
3.3 CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO ROCHOSO .....	40
3.3.1 Investigações Geológicas e Geotécnicas .....	42
3.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DO MACIÇO DA FUNDAÇÃO .....	46
<b>4 MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	<b>51</b>
4.1 REGIÃO DE ESTUDO .....	51
4.1.1 Arranjos estudados e feições geológicas.....	52
4.2 LEITURA DA INSTRUMENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS .....	57
4.3 GEORREFERENCIAMENTO DOS INSTRUMENTOS NA BARRAGEM... ..	62
4.4 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE LEITURA PARA MAPEAMENTO .....	65
4.4.1 Decomposição Vertical dos Extensômetros inclinados.....	65

4.4.2 Roseta de Extensômetros.....	68
4.5 DESENVOLVIMENTO DO MAPEAMENTO .....	71
4.5.1 Validação Cruzada: Método de Validação dos Dados .....	73
4.5.2 Validação Cruzada dos Períodos de Leitura.....	76
<b>5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>82</b>
5.1 FORÇAS ATUANTES NA ESTRUTURA .....	82
5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO PERÍODO DE ENCHIMENTO (1982-1984).....	83
5.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO PERÍODO DE MÁXIMOS HISTÓRICOS (JAN/1982 – JAN/2014).....	88
5.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VERÃO (MARÇO/2015) -INVERNO (SETEMBRO/2014).....	89
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>93</b>
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	94
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem havido nos meios técnicos nacional e internacional uma valorização crescente dos sistemas de inspeção e observação de obras de Engenharia Civil, em especial de barragens, em face dos custos e riscos relativos aos grandes empreendimentos e à inexorável alteração dos fatores ambientais e degradação dos materiais, com conseqüente agravamento, em geral, das condições de segurança ao longo do tempo (CRUZ, 2003).

Com o compromisso de monitorar o comportamento do maciço rochoso da fundação de Itaipu, através dos dados de leitura dos extensômetros, desenvolveu-se mapeamentos da fundação sob as estruturas de concreto, com a ajuda de métodos interpoladores matemáticos e geoestatísticos.

Com o intuito de contribuir para melhorias na área de segurança e auscultação de barragens, a elaboração do mapeamento da fundação de Itaipu visa fornecer subsídios para compreensão do comportamento da estrutura, trazendo uma visão geral das possíveis áreas críticas, comprovar a validade de hipóteses de projeto, além de trazer uma forma diferenciada de interpretação dos dados de leitura da instrumentação da Usina, neste caso, os extensômetros de hastes múltiplas.

O trabalho limita-se a analisar o recalque e distensão, supondo deformações verticais, apenas da instrumentação de extensômetros de hastes múltiplas, da haste mais profunda (haste de número 01), instalados em Basalto Denso nos períodos selecionados para este estudo.

O Capítulo 02 deste trabalho levanta informações sobre segurança de barragens e instrumentação vinculada à auscultação de barragens, como forma de observação do comportamento da estrutura hidráulica. A Geoestatística e os modelos matemáticos estudados (equações multiquádricas) também entram em pauta, com o intuito de embasar e trazer melhor compreensão do mapeamento dos dados geológicos fornecidos pelos extensômetros de hastes múltiplas da estrutura analisada, a ser realizado pelo *software* ArcGIS.

O Capítulo 03 apresenta características da Usina estudada, dando suporte a revisão bibliográfica e a metodologia científica. Em especial, fornece

uma abordagem da composição geológica do maciço rochoso da região de estudo, assim como as investigações geológico-geotécnicas vinculadas à ela e a instrumentação responsável pelo monitoramento da estrutura de fundação.

O Capítulo 04 disserta a respeito da Usina de Itaipu, como estudo de caso para este trabalho, descrevendo os trechos analisados para a área de estudo, o processo de georrefenciamento dos instrumentos, levantamento e análise dos dados de leitura utilizados.

Foram instalados mais de 2.000 instrumentos, 90% dos quais são considerados permanentes, contando, na estrutura da fundação, com piezômetros e extensômetros de hastes múltiplos (ITAIPU BINACIONAL, 2009). Este trabalho contará apenas com um universo amostral de dados relacionados a leitura de 134 extensômetros de hastes múltiplas.

O modelo de mapeamento desenvolvido, dados analisados, assim como as técnicas estatísticas e matemáticas envolvidas, encontram-se descritas também no capítulo 04.

O Capítulo 05 apresenta o resultado e análise dos mapeamentos de recalque/distensão da fundação do maciço rochoso, para cada período analisado, além da elaboração dos gráficos das seções com maiores valores de recalque e distensão obtidos até então.

O Capítulo 06 discute sobre as considerações finais de interpretação do comportamento em função dos valores de leitura dos extensômetros, além de apresentar recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil milhões de pessoas dependem das barragens para obter água em condições adequadas, em termos de quantidade, qualidade, localização e tempo, o que torna os barramentos elementos de infra-estrutura importantes para o desenvolvimento sustentável. Dentre os principais usos desses elementos no Brasil, pode-se destacar os seguintes: hidroeletricidade, controle de cheias, abastecimento de água, acumulação de resíduos industriais líquidos, dentre outros (MENESCAL R., 2009).

Uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais (Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, 2002).

Nas últimas décadas, tem havido nos meios técnicos nacional e internacional uma valorização crescente dos sistemas de inspeção e observação de obras de Engenharia Civil, em especial de Barragens, em face dos custos e riscos relativos aos grandes empreendimentos e à inexorável alteração dos fatores ambientais e degradação dos materiais, com o consequente agravamento, em geral, das condições de segurança ao longo do tempo (CRUZ, 2004).

Conceituar segurança de barragens relaciona-se à um possível caso de ruptura da mesma, podendo ser causada por enchentes, descargas súbitas de água, deslizamentos, leituras de instrumentação anormais, dentre outros, tendo como os principais casos causados por sismos, galgamentos e erosões internas. Define-se galgamento (*overtopping*) como a passagem da água por cima da estrutura da barragem, de montante para jusante, por esta ultrapassar o nível máximo de dimensionamento. A erosão interna se dá graças a vazios no interior do solo ou rocha mole, de remoção de material por percolação. Também conhecido como *piping*, surge à jusante na forma de cavidade, descarregando água turva por carreamento de partículas. Já os sismos, decorrem de vibrações intensas, que aplicam ao solo acréscimos de tensões na condição não-drenada e podem vir à prejudicar a estrutura da barragem (CARDIA, 2004). Pode-se

então, avaliar a probabilidade de ocorrência e planejar ações preventivas, em função da situação emergencial.

Na Figura a seguir, pode-se notar as inter-relações dos conceitos relacionados a Segurança de Barragens. O quadro de análise de cenários trabalha com as hipóteses, fatos e medidas mitigadoras, estas são divididas em medidas preventivas e corretivas, a primeira relaciona-se a possíveis ameaças a estrutura e a segunda se deve a ocorrência de acidentes causados por anomalias.

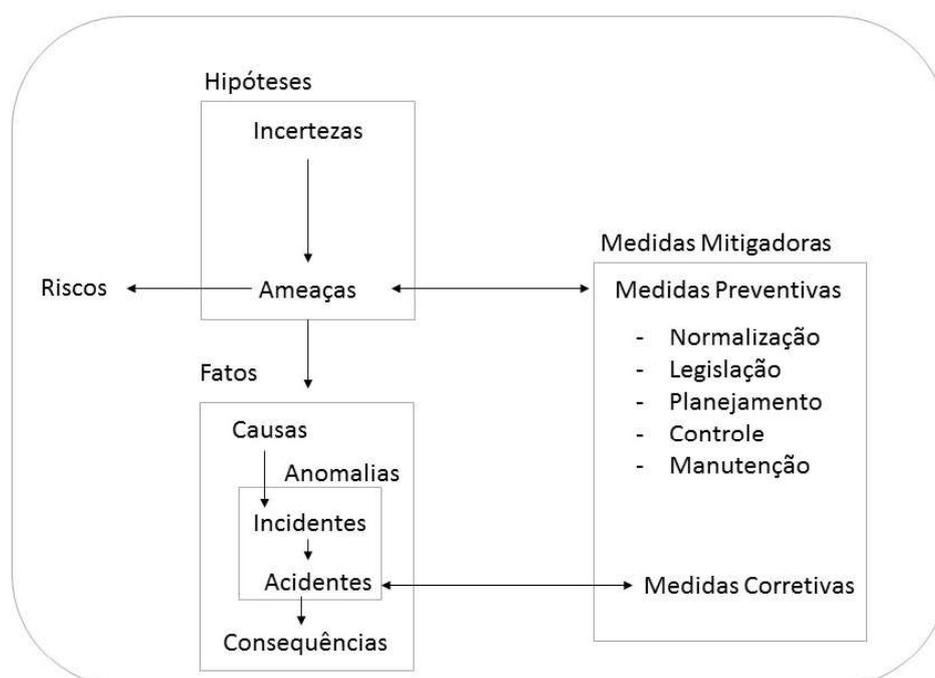


FIGURA 1 - CONCEITOS RELACIONADOS A SEGURANÇA DE BARRAGENS E SUAS INTER-RELAÇÕES

FONTE: MENESCAL, R.A.; OLIVEIRA, S.K.F.; FONTENELLE, A.S. & VIEIRA, V.P.P.B (2001). Modificado pela autora (2015).

Em 1928 foi fundada a ICOLD – *International Commission on Large Dams*, presente em mais de 90 países, envolvendo comitês com aproximadamente 10.000 membros. Trata-se de uma organização internacional não-governamental que proporciona um fórum permanente de troca de conhecimento e experiência na área de engenharia de barragens para profissionais do mundo todo. No Brasil, a ICOLD é representado pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB). Desde a década de 60, dentre os temas de maior ênfase que o ICOLD tem abordado encontram-se a segurança de barragens, o seu monitoramento, reanálise da estabilidade de obras antigas, estudos de efeitos

de envelhecimento e impactos ambientais gerados por barragens (ICOLD, 2015).

Durante o Congresso Internacional de Grandes Barragens , organizado e promovido pelo ICOLD (*International Commission on Large Dams*) em 1979, em Nova Delhi, decidiu-se investir maiores esforços no âmbito de segurança por três razões principais: diversos incidentes em barragens, com graves consequências ocorridos na época; aumento nas dimensões das novas barragens e envelhecimento de uma quantidade apreciável de outras; incremento na quantidade de barragens sendo construídas em países com pouca ou nenhuma experiência em engenharia de barragens.

Toda barragem deve ser classificada em termos de previsão quanto às consequências da ruptura. Cada estrutura de barramento, incluindo-se as passagens d'água, devem ser classificadas separadamente. A classificação constitui a base para a análise da segurança da barragem e para fixar níveis apropriados de atividades de inspeção, conforme apresentado na figura a seguir, este é o sistema de classificação mais comumente aceitável, baseado no potencial de perdas de vidas e nos danos econômicos associados à ruptura da Barragem.

## CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS

### POTENCIAL CONSEQUÊNCIA INCREMENTAL DA RUPTURA<sup>(a)</sup>

CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA	PERDA DE VIDAS	ECONÔMICO, SOCIAL E DANOS AMBIENTAIS
Muito alta	Significativa	Dano excessivo <sup>(a)</sup>
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito baixa	Nenhuma	Dano mínimo

(a) - os critérios de classificação de categorias de danos econômicos, sociais e ambientais devem ser baseados nas consequências das perdas em relação a região afetada.

FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS  
FONTE: CBGB (1999).

As “consequências incrementais” da ruptura de uma barragem devem ser avaliadas em termos de:

- Perda de vidas;
- Valor econômico de outras perdas e/ou danos a propriedades, instalações, outras barragens, bem como a perda na geração de energia e fornecimento de água. Onde apropriado, os custos devem ser classificados como de impacto social, cultural e ambiental;
- Outras consequências menos quantificáveis relacionadas a impactos sociais, culturais e ambientais, que não possam ser avaliadas economicamente, podem exigir condições baseadas no local específico da ocorrência (CBGB,1999).

Diversos critérios são usados para estimar se uma barragem é segura, dentre eles: caracterização geológica-geotécnica do local de implantação da obra; análise hidrológica da região; avaliação das consequências sócio-econômico-ambientais da construção e operação da barragem; acompanhamento dos dados de instrumentos de monitoração; cálculo da probabilidade da ocorrência de eventos extremos; e cálculo da probabilidade da ruptura da barragem, incluindo aí o modo de ruptura, a probabilidade de ocorrência e suas consequências. Desta forma, pode-se encontrar um valor estimado para o risco de ruptura da barragem, que deve ser comparado ao risco tolerável pela mesma (B.C.HYDRO, 1995).

## 2.1 ATENDIMENTO A LEI DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

Em 20 de Setembro de 2010 foi aprovada a lei número 12.334 que estabelece a política nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), sendo um de seus objetivos garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências. Dentre os fundamentos da PNSB, a segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação e de usos

futuros, ou seja, é essencial mantê-la segura durante toda a vida útil do empreendimento. A segurança de Barragens, é uma responsabilidade ética, Legal e Moral. Assim, a Proprietária de Barragem pode ser processada para responder por eventuais danos causados a Terceiros, por falha de construção, operação e/ou de manutenção da estrutura (CARDIA; BLACKETT, 2015)

Dentre as entidades competentes no âmbito da esfera federal, ao Ministério da Integração Nacional (MI) desde o ano de 2004, é designada a responsabilidade de efetivar o Cadastro Nacional de Barragens (CNB), que por meio da Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica, visa criar um grupo de trabalho para atuar na detecção de riscos e minimização de ocorrências de acidentes com barragens (MINISTÉRIO, 2015).

Alguns dos problemas encontrados em obras hídricas, apresentados ao Ministério da Integração Nacional, segundo Rogério Menescal (2007) são:

- Estudos Hidrológicos e Hidráulicos mal elaborados;
- Estruturas mal dimensionadas e sistemas de drenagem da água ineficientes;
- Falta de elaboração do “*as built*”, indicando todas as adequações e alterações realizadas no projeto executivo;
- Falta de elaboração do plano de primeiro enchimento do reservatório;
- Falta de apresentação do Plano de operação e manutenção das obras;
- Falta de inclusão de ações sociais e ambientais no projeto.

Vinculada ao Ministério da Integração Nacional, a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, é o órgão central desse Sistema, responsável por coordenar as ações de proteção e defesa civil em todo o território nacional. Dentre as competências dessa entidade, encontra-se (MINISTERIO, 2015):

- 1) Formular e conduzir a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC;
- 2) Coordenar o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC, em articulação com os Estados, o Distrito Federal e os Municípios;

- 3) Participar da formulação da Política Nacional de Desenvolvimento Regional - PNDR;
- 4) Promover o planejamento para a atuação de proteção e defesa civil, mediante planos diretores, preventivos, de contingência, de operação e plurianuais;
- 5) Estabelecer estratégias e diretrizes para orientar as ações de prevenção e redução de desastres;
- 6) Promover a capacitação e o treinamento de recursos humanos para ações de prevenção e redução de desastres.

## 2.2 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA VINCULADA À SEGURANÇA DE BARRAGENS

Barragens são edificações que possuem um conjunto de dados associados de extrema relevância para a realização de inspeções, monitoramento e procedimentos de eventuais manutenções. A instrumentação instalada na Barragem é um recurso fundamental para viabilizar o monitoramento da sua saúde estrutural (BRASIL, 2002).

A instrumentação deve ser monitorada, analisada e mantida, para garantir a operação segura da barragem (COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS, 1999).

O uso de instrumentação geotécnica não é meramente a seleção de instrumentos mas a compreensão passo-a-passo do processo de engenharia, começando com a definição do objetivo e terminando com a implementação dos dados. Cada passo é essencial para o sucesso ou falha do programa como um todo, e o processo de engenharia envolve a combinação da capacidade dos instrumentos e pessoas (DUNNICLIFF, 1993).

Um programa de instrumentação de maciços de terra ou fundação bem planejado serve para monitorar o desempenho e fornecer indicativos de situações de perigo. Os propósitos da instrumentação são:

- Fornecer dados para avaliar os critérios de projeto;
- Fornecer informações sobre o desempenho vigente da barragem e suas fundações;

- Observar o desempenho de áreas críticas.

Juntamente com todas as descrições dos instrumentos devem estar suas leituras iniciais, limites de projeto, dados e requisitos para sua calibração, faixas normais de operação e níveis de “alarme”, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária. Responsabilidades devem ser atribuídas para leituras rotineiras dos instrumentos, mudanças de leituras iniciais, calibração e interpretação dos resultados (CBGB, 1999).

O valor da instrumentação não está associado apenas as obras que apresentam comportamentos não previstos, indicando a necessidade de medidas reparadoras ou acerto das hipóteses de projetos, mas também à indicação da ocorrência de condições seguras, mesmo em face das solicitações extremas atuantes ou discordância das hipóteses de cálculo com a realidade (CRUZ, 2004).

Apresentado ao público no XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, em março de 1999, o Guia básico de Segurança de Barragens tem o objetivo de definir requisitos mínimos de segurança, uniformizar os critérios empregados na sua avaliação, permitir uma supervisão consistente da segurança da barragem, além de contribuir para a legislação e regulamentação, em âmbito nacional.

O guia argumenta que as barragens devem ser inspecionadas periodicamente, para detectar eventuais deteriorações, sendo essas inspeções:

- De Rotina;
- Periódicas;
- Formais.

Inspeções Rotineiras são executadas por equipes qualificadas em segurança de barragens, com frequência semanal ou mensal, não tem a necessidade de gerar relatórios específicos, mas apenas comunicações de eventuais anomalias detectadas. As inspeções periódicas submetem a barragem a uma reavaliação de suas condições de segurança, segundo a sua classificação quanto às conseqüentes rupturas, esta inspeção permite verificar uma série de falhas de projeto, de instalação e até mesmo de procedimentos de leituras (CARDIA; BLACKETT, 2015).

Toda a barragem deve ser instrumentada, de acordo com seu porte e riscos associados, além de que, todos os instrumentos devem ser dotados de

valores de controle ou limites, para que assim possa-se identificar as leituras anormais. Por fim, as inspeções formais são aquelas executadas por uma equipe multidisciplinar, envolvendo diversas áreas da engenharia, com frequência de 5 a 10 anos, dependendo da categoria de consequências de ruptura.

Com a aprovação da Lei número 12.334/2010 foi alterada a nomenclatura para: Inspeções de Segurança Regulares de Barragens e Inspeção de Segurança Especiais de Barragens (CARDIA; BLACKETT, 2015).

O que difere do estabelecido no Guia Básico de Segurança de Barragens, é que as inspeções regulares visam avaliar as condições físicas das partes integrantes da Barragem objetivando identificar (antecipadamente) e monitorar anomalias que afetem potencialmente a segurança da Barragem. Já a especial, ocorrerá sempre que acontecer algum evento negativo (o que permitirá identificar alguma anomalia considerável) (CARDIA; BLACKETT, 2015).

### 2.3 AUSCULTAÇÃO

A auscultação é o conjunto de formas de observação do comportamento da barragem e fundações, para controlar suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculos utilizados no projeto e verificar a necessidade de medidas corretivas (ITAIPU, 2015).

A auscultação das barragens deve ser contemplada em um plano completo de monitoração no qual devem ser previstas todas as fases da vida da barragem e todas as atividades a serem realizadas (PIASENTIN, 2003):

- Projeto da instrumentação a ser instalada que inclui desde a concepção do arranjo até os detalhes e as especificações da instalação e montagem;
- Definição dos valores de alerta e controle para todos os instrumentos instalados e para as diversas fases de sua vida;
- Plano de operação da instrumentação incluindo as frequências das leituras nas diversas fases de vida da obra e durante possíveis eventos excepcionais;
- Plano de observações visuais e inspeções *in situ*;

- Plano de análise e interpretação do comportamento da Obra com base nos resultados da instrumentação e das inspeções visuais.

O plano de auscultação deve contemplar um justo equilíbrio entre inspeções in situ com registro documentado das observações, instrumentação clássica ou tradicional, sistemas automatizados e métodos avançados de monitoramento e investigação.

### 2.3.1 Instrumentos de Auscultação de Barragens

Conforme é observado na figura a seguir, as inspeções visuais podem aferir a respeito da deterioração de diversos problemas decorrentes da fundação, da própria estrutura de concreto e a percepção de sismos. No entanto, junto a ela, deve estar presente uma instrumentação adequada que dê suporte na constatação, localização e solução das possíveis deteriorações advindas com o tempo.

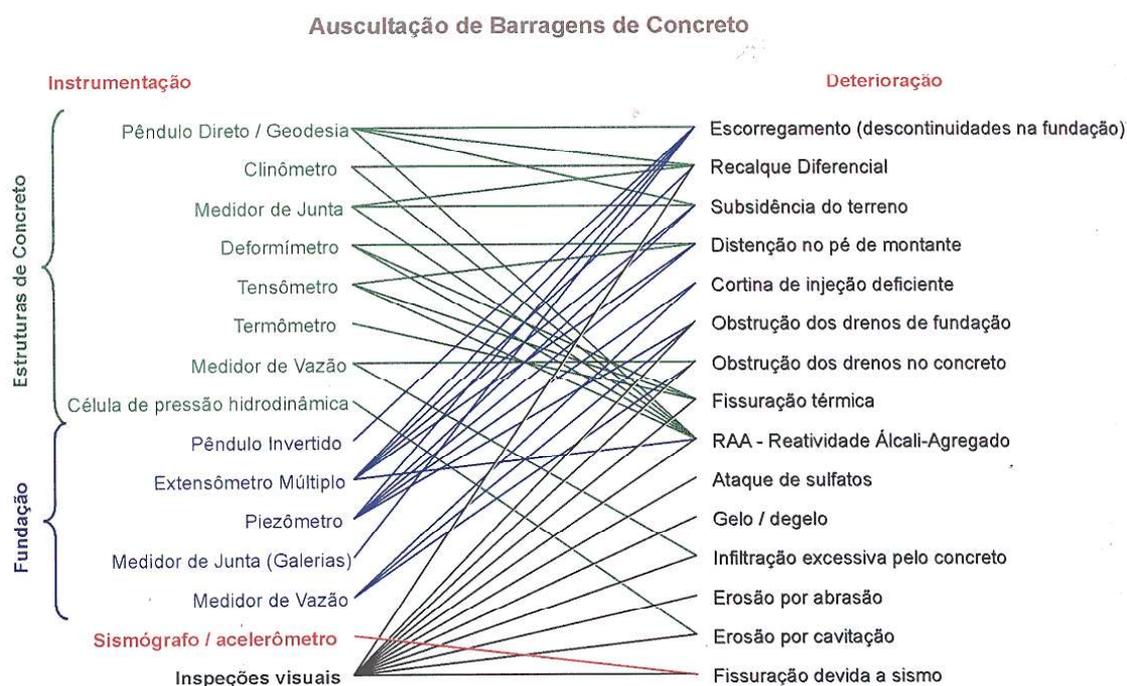


FIGURA 3 - CORRELAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE INSTRUMENTOS E A DETERIORAÇÃO DE BARRAGENS DE CONCRETO  
 FONTE: SILVEIRA (2003).

O instrumento ideal deve apresentar as seguintes características: confiabilidade; alta durabilidade; não provocar, durante ou após a instalação,

alterações no valor da grandeza que pretende medir; robustez; alta precisão; alta sensibilidade; não ser influenciável por outras grandezas, que não a de interesse; instalação simples; não causar interferência na praça de trabalho e baixo custo. No entanto, as mais importantes referem-se à confiabilidade e à durabilidade (CRUZ, 2005).

Na figura 4 é apresentado o arranjo típico da instrumentação da crista do vertedouro da Barragem de Itaipu Binacional. Pode-se notar a presença de diversos instrumentos com o intuito de monitorar a estrutura, como base de alongâmetro, pêndulo, piezômetros, extensômetros, dentre outros.

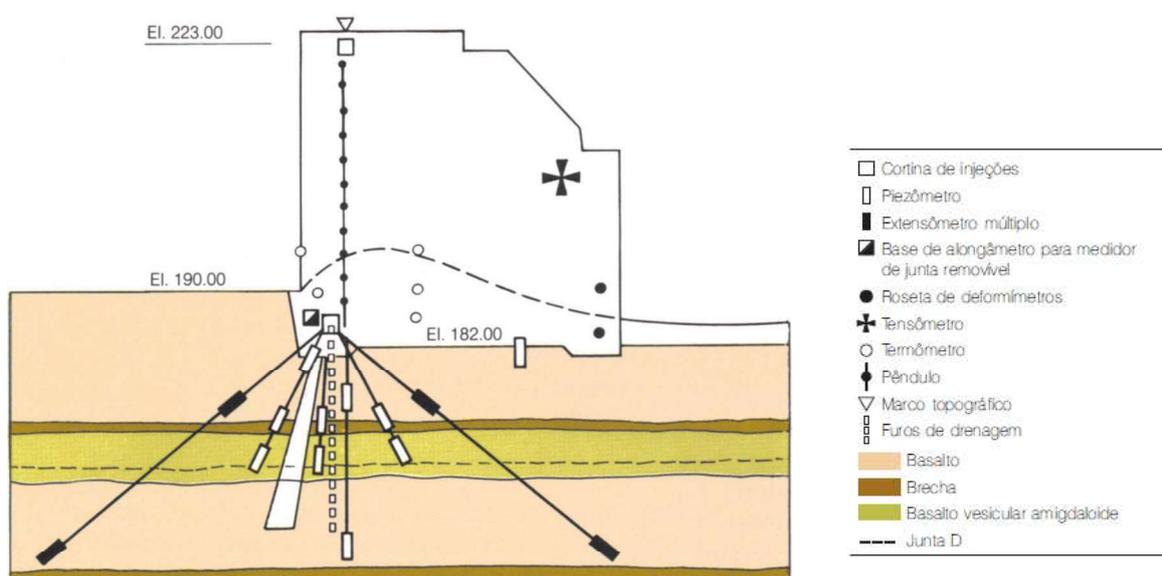


FIGURA 4 - ARRANJO TÍPICO DA INSTRUMENTAÇÃO DA CRISTA DO VERTEDEIRO  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

### 2.3.2 Extensômetros de hastes múltiplas

Os Extensômetros são instrumentos utilizados para medir os deslocamentos e deformações que ocorrem entre os pontos no maciço da fundação, devido aos carregamentos impostos pela construção da barragem; no enchimento do reservatório e posteriormente (durante o período operacional) pelas variações de nível d'água no reservatório (MESCOLIN *et al.*, 2003).

As medições de recalque são geralmente realizadas a partir de extensômetros múltiplos de hastes, instalados em furos de sondagem. Atualmente são empregados na auscultação das barragens de concreto, em

função de sua maior robustez, simplicidade de operação e maior precisão. As hastes são protegidas por uma tubulação ou mangueira flexível, ao longo da extensão entre o ponto de ancoragem e a cabeça do medidor (SILVEIRA, 2003).

As hastes são removíveis, possibilitando a verificação das condições das mesmas, ou para constatar se estas encontram-se presas devido a movimentos cisalhantes que poderão ocorrer ao longo das juntas geológicas normais ao eixo do extensômetro. Alguns extensômetros deverão ser dotados de hastes duplas, confeccionadas com diferentes materiais (alumínio, aço, por exemplo) e ancoradas na mesma profundidade, para possibilitar eventuais correções relativas as variações de temperatura (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

Com o emprego de várias hastes, pode-se proceder à medição dos deslocamentos e das deformações em vários trechos da fundação, podendo abranger as seguintes regiões (SILVEIRA, 2003):

- Contato concreto-rocha;
- Região superficial abalada pelos fogos de desmonte;
- Camadas na fundação com litologias diversas em termos de deformabilidade;
- Juntas-falhas e outras descontinuidades sub-horizontais na fundação;
- Região de distensão junto ao pé de montante da estrutura.

Nos blocos da barragem onde se dispuser de galerias de acesso transversais ao eixo, pode-se prever a instalação de extensômetros à montante e à jusante, para a medição dos deslocamentos angulares da barragem junto à fundação.

Na Usina de Itaipu, a instalação de extensômetros múltiplos, desde o início do período construtivo, possibilitou uma melhor avaliação dos reais parâmetros da fundação. Eventuais anomalias, que poderão surgir devido a problemas de recalques diferenciais da fundação, poderão ser equacionadas de modo mais racional e realista (SILVEIRA, 2003).

A Figura 5 ilustra um dos extensômetros instalado na região da Casa de Força e área de montagem (Trecho U) da Usina de Itaipu, o aparelho em questão pode ser lido de forma automatizada e manual. Pode-se observar na imagem a cabeça do extensômetro, onde é feita a leitura dos deslocamentos.



FIGURA 5 - EXTENSÔMETRO DE HASTES MÚLTIPLAS INSTALADO NO TRECHO U DA USINA DE ITAIPU  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014).

A figura 6 ilustra um extensômetro manual, em que as leituras são realizadas apenas por leituristas, demonstrando a diferença entre o instrumento automatizado e manual.

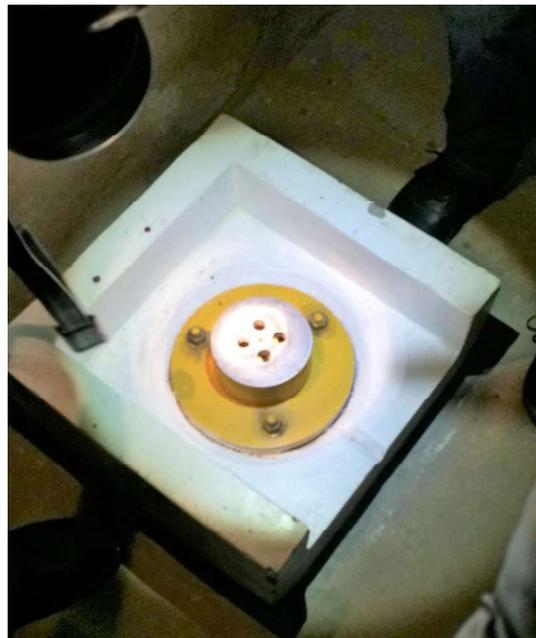


FIGURA 6 - PLANTA EXTENSÔMETRO MANUAL  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014).

O perfil de instalação dos extensômetros de hastes múltiplas pode ser observado na figura 7, nela podemos identificar a região de instalação, sendo o trecho do Vertedouro, mais especificamente no bloco A-1, a data de instalação do instrumento (30/07/80) e a cota de elevação da galeria em que ele se encontra instalado (EL.183,75).

É possível visualizar também que se trata de um extensômetro vertical, composto de duas hastes, sendo a mais superior instalada em basalto denso E, e a inferior instalada em basalto denso D. Também nota-se a especificação dos materiais que compõem as hastes e âncoras, tubo de PVC Soldável e tubo de ferro galvanizado, respectivamente, assim como onde é feita a calda de cimento para fixação e o preenchimento com cascalho da região envolta às hastes.

Entre as hastes de número 01 e 02, ou seja, Basalto Denso D e E, respectivamente, encontra-se uma camada de brecha e outra de Basalto Vesicular.

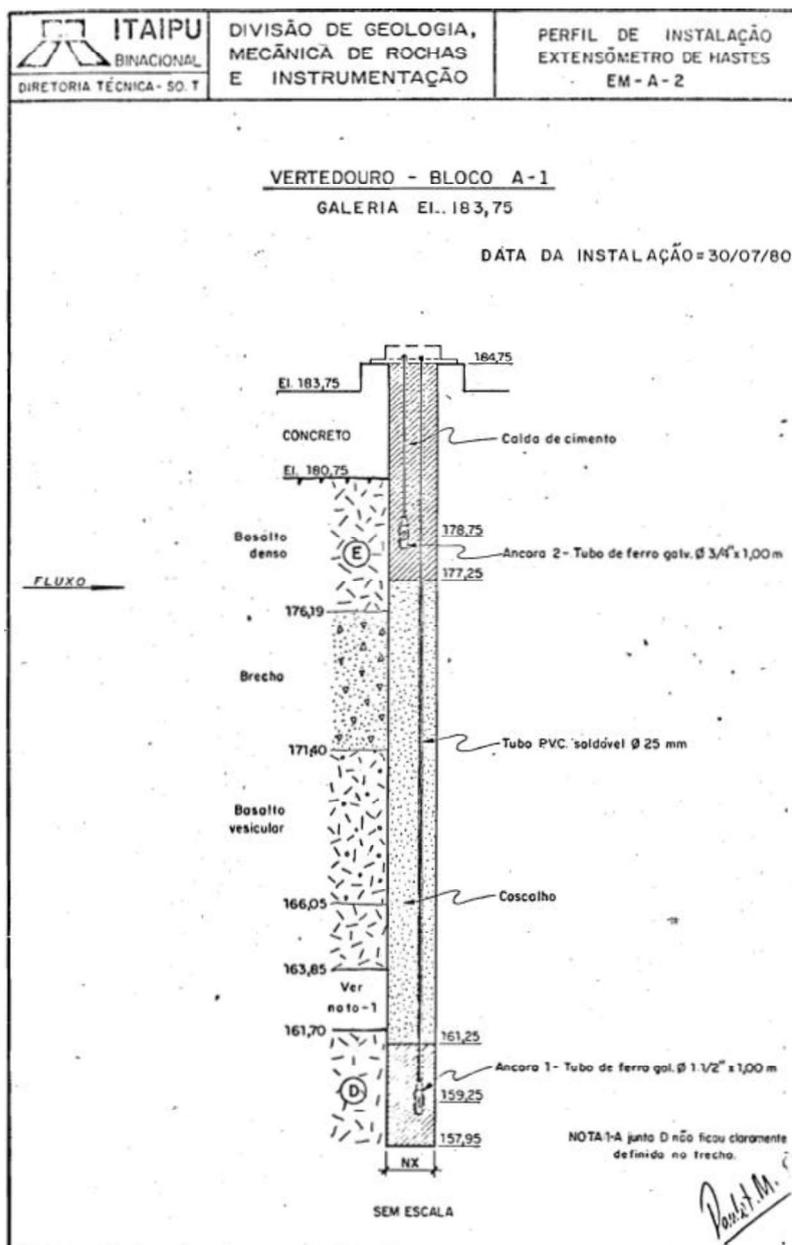


FIGURA 7 - PERFIL DE INSTALAÇÃO EXTENSÔMETRO DE HASTES MÚLTIPLAS (EM-A-2)  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (1980).

## 2.4 MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS

Métodos clássicos de análise estatística de dados geralmente supõem que as realizações das variáveis aleatórias são independentes entre si, ou seja, que observações vizinhas não exercem influência umas nas outras.

Fenômenos naturais apresentam-se frequentemente com uma certa estruturação nas variações entre vizinhos, desta forma pode-se dizer que as variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial.

A análise espacial de dados apresenta-se como uma alternativa e/ou como uma complementação da análise clássica de dados, sendo que esse tipo de análise considera as correlações entre as observações quando se faz estimativas (GUIMARÃES, 2004).

A geoestatística possibilita avaliar os erros cometidos nas estimativas, permitindo um determinado grau de segurança nas previsões e padrões de amostragem ótimos segundo um erro máximo (LANDIM, 2003a).

Os dados geológicos apresentam certas peculiaridades que os distinguem daqueles provenientes de outras ciências, diante disso, em um estudo geológico, a variabilidade associada aos dados é desconhecida, a primeira preocupação deve ser o entendimento da extensão dessa variabilidade. Os quatro principais tipos de variabilidade que normalmente associam-se às observações, são: a natural; a associada à amostragem; a em razão da preparação das amostras; e a analítica (LANDIM, 2003a).

O processo de reprodução das características do fenômeno espacial baseado em pontos amostrais é denominado interpolação ou estimativa. A interpolação ou estimativa de um ponto não amostrado é feita por meio do ajuste de funções matemáticas locais (pontos mais próximos ao ponto não amostrado) ou globais (todos os pontos amostrais). Vale ressaltar que a qualidade das inferências espaciais depende do tamanho da amostra e da distribuição espacial dos pontos amostrais (YAMAMOTO, 1994).

Para entender a variabilidade e as incertezas referentes aos dados vindos de investigações geológico-geotécnicas, dispõem-se de métodos de interpolação espacial de dados que refletem o comportamento espacial das variáveis. Esses métodos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos.

A diferença entre os métodos estatísticos baseia-se em como os valores a serem interpolados são escolhidos e os respectivos pesos a eles fornecido, durante o processo de estimativa. Os modelos determinísticos têm por base critérios puramente geométricos em que as distâncias são euclidianas e não oferecem medidas de incertezas, já no modelo estocástico, os valores coletados são interpretados como provenientes de processos aleatórios e são capazes de quantificar a incerteza associada ao estimador (YAMAMOTO, 1994).

### 2.4.1 Equações Multiquádricas

Na década de 1970, Hardy (YAMAMOTO *et al. apud* HARDY, 1971, p. 1.907-1.908) propôs o uso de equações multiquádricas para a representação analítica da superfície do terreno com base em pontos amostrais. A proposta original de Hardy estava baseada no conceito de interpolação global, em que todos os pontos de dados eram considerados simultaneamente. Mais tarde, esse método foi estendido para interpolações locais, usando apenas os pontos da vizinhança mais próximos ao ponto a ser interpolado. Há uma semelhança muito grande das funções de base radial com a krigagem ordinária, cuja função de base radial é a função variograma calculada e modelada com base nos pontos experimentais.

A equação geral para os dados 2D é (YAMAMOTO, 2002):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N C_i [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + C^2]^{1/2} \quad \text{Equação (2.1)}$$

Em que  $\{C_i, i = 1, N\}$  são os coeficientes da equação multiquádrica,  $C^2$  é uma constante positiva e  $N$  é o número total de pontos dos dados.

Os coeficientes  $\{C_i, i = 1, N\}$  são a solução de um sistema de equações lineares:

$$Z(x_i) = \sum_{i=1}^N C_i [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + C^2]^{1/2} \text{ para } i = 1, N \quad \text{Equação (2.2)}$$

Em termos de função de base radial, a equação (2.1) pode ser reescrita, como (YAMAMOTO, 2002):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n C_i \phi(x_i - x_0) \quad \text{Equação (2.3)}$$

Sendo  $(x_i - x_0)$  a distância entre o  $i$ -ésimo ponto amostral e o ponto a ser interpolado, e  $\phi$  é a função de base radial. Portanto, a equação multiquádrica pode ser usada como método local de interpolação, substituindo o  $N$  (conjunto de pontos de dados) por  $n$  ( $n$  pontos vizinhos mais próximos ao ponto a ser interpolado).

As equações multiquádricas são funções globais que consideram todos os pontos da área analisada, permitindo interpolar o valor da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais, sendo assim, a adição ou remoção de um valor terá consequências no domínio de definição da função (LANDIM, 1998). O método de equações multiquádricas apresenta características de continuidade e suavidade da superfície resultante e são escolhidos como método de estimativa. (YAMAMOTO *et al. apud* HARDY, 1971, p. 1.907-1.908).

Yamamoto conclui que as equações multiquádricas são uma alternativa confiável para a realização de uma estimativa, portanto, o uso dessa equação permite estimar parâmetros a partir de uma amostragem discreta (PATIAS, 2010).

## 2.5 MAPEAMENTO DE VARIÁVEIS GEOTÉCNICAS

### 2.5.1 Aspectos Gerais

É de suma importância para a avaliação da segurança de obras de engenharia civil que se conheça, do ponto de vista geotécnico, o subsolo do sítio em questão e seu comportamento ao longo da vida útil da obra, estudando suas propriedades físicas, tais como estratigrafia, nível de água subterrâneo, granulometria, resistência mecânica, permeabilidade e outras. Em geral, estas propriedades são obtidas através de investigações de campo e laboratório, bem como de instrumentação instalada no local, onde se avaliam os parâmetros do solo e/ou rocha em determinadas porções do maciço. Desta forma, obtêm-se informações em determinados pontos ou planos do sítio (avaliação discreta), que deverão ser espraiadas para o meio contínuo que compõe o subsolo. Para a obtenção destas informações de forma contínua, muitas vezes são utilizados métodos matemáticos de interpolação, sendo o linear o mais comumente utilizado (AIEVC, 2005).

As incertezas relacionadas ao programa de investigação realizada e do tipo de instrumentação instalada encontram-se diretamente ligadas à escolha da técnica de mapeamento, pois diferentes métodos de investigação implicam em

diferentes quantidades de dados e em qualidade diferenciada das informações obtidas (SANCHEZ, 2009).

Técnicas de interpolação baseadas em geoestatística são utilizadas para o mapeamento de subpressões, deslocamentos, dentre outros. Os mapas gerados mostram-se úteis como ferramenta para detectar as variações de leitura de um instrumento, bem como a identificações das regiões abrangidas por estas modificações, que poderiam, em alguns casos, indicar algum tipo de problema.

## 2.6 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – ARC.GIS (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI)

O Comitê Federal de Coordenação Interagências dos Estados Unidos define um SIG como um sistema de *hardware*, *software* e procedimentos, projetado para apoiar a captura, gerenciamento, manipulação, análise e apresentação de dados, referenciados espacialmente, para solução de problemas complexos de planejamento e gerenciamento (ANTENUCCI *et al.*, 1991).

O SIG não é simplesmente um software ou um pacote de funções que mostram um mapa digital, ele deve ser visto como um sistema de apoio à tomada de decisões e como um sistema de gerenciamento de informações (CELESTINO; DINIZ, 1998).

Através do SIG pode-se executar mapas locais, quantitativos, de densidades e de evolução temporal. Os mapas quantitativos, foco deste estudo, expressam uma ordem de grandeza, como quais os locais com maior e menor frequência de uma determinada característica ou que cumprem um conjunto de critérios, bem como aferir as relações entre diferentes lugares.

O Arc.GIS é um dos softwares de Sistemas de Informações Geográficas – SIG, amplamente utilizado por profissionais na área do geoprocessamento por possuir uma interface completa que permite a inserção, visualização e manipulação de dados geográficos relacionais (ESRI PORTUGAL, 2003).

O Arc.GIS permite o tratamento de dados em duas dimensões, contemplando 5 componentes fundamentais, dentre os quais está o ArcGIS Desktop, composto pelos aplicativos: ArcMap, ArcCatalog e ArcToolBox (ESRI PORTUGAL, 2003).

No ArcCatalog é possível realizar a gestão genérica das informações, além de realizar a ligação a base de dados externas.

O ArcMap é o aplicativo utilizado para manipulação/geração de mapas digitais, permitindo que os dados possam ser visualizados, explorados e analisados. O conjunto de dados é adicionado no programa em formato de camada (*layer*).

O ArcToolbox é o aplicativo que contém ferramentas GIS usadas para geoprocessamento de dados, permitindo a conversão entre formatos de dados, execução de operação de análise espacial, transformações de coordenadas que se encontram em diferentes sistemas de projeção e operações de construção de topologias.

Conforme estudos realizados no CEASB (Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens) na Usina Hidrelétrica de Itaipu, toma-se como base para esta análise o mapeamento através do programa computacional ArcGIS 10.1 utilizando-se o *Geostatistical Analyst*. Trata-se de uma extensão do ArcGIS com o intuito de modelar superfícies de nível avançado através de métodos geoestatísticos e determinísticos, permitindo explorar dados espaciais através de amostragens e assim, avaliar incertezas (ESRI PORTUGAL, 2003).

A Figura 8 ilustra como seria a plataforma do ArcGIS e um modelo de método de interpolação possível de se utilizar na extensão de análise geoestatística (Krigagem Ordinária).

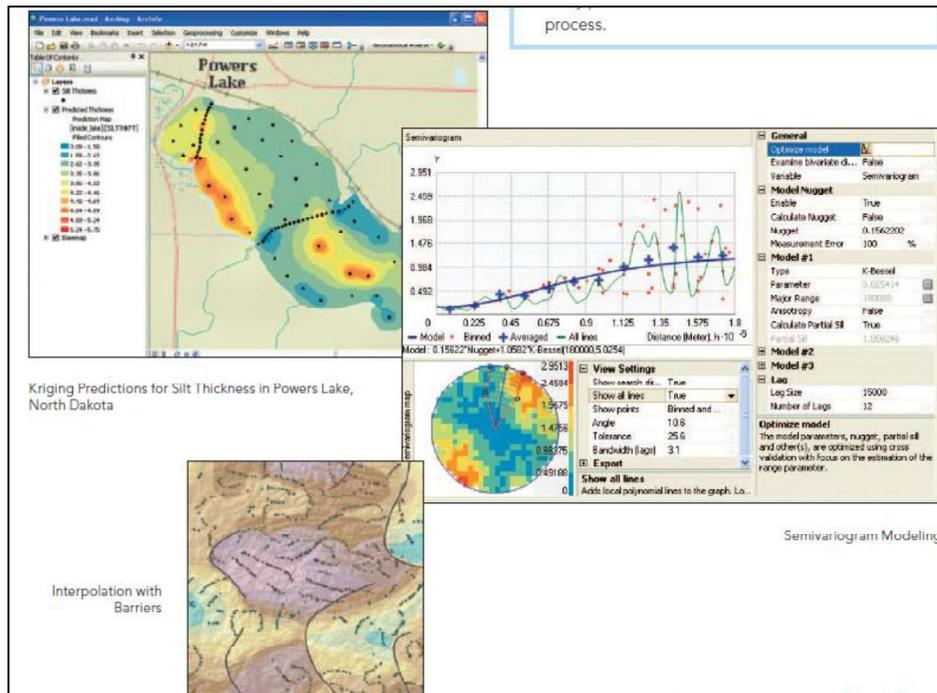


FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DO ARCGIS GEOSTATISTICAL ANALYST  
 FONTE: ESRI PORTUGAL (2003).

### 3 USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU

#### 3.1 GENERALIDADES

A Itaipu Binacional é um empreendimento hidrelétrico fundada em 17 de maio de 1974, resultante do esforço dos países vizinhos Brasil e Paraguai com o intuito de geração de energia em benefício próprio para a região do Paraguai e às regiões Sul e Sudeste do Brasil, tornando-se uma empresa binacional gerenciadas pelos dois governos.

Localizada no Rio Paraná, a montante 14 km da cidade de Foz do Iguaçu (Brasil) e 20 km da Ciudad de Leste (Paraguai), o aproveitamento conta com uma capacidade instalada de 18 unidades geradoras com 700 MW cada e um reservatório de 1.350 km<sup>2</sup> de área inundada com volume útil de 19x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> e extensão de 170 km (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

A Itaipu Binacional é líder mundial em produção de energia limpa e renovável, tendo produzido mais de 2,2 bilhões de MWh desde o início de sua operação (ITAIPU BINACIONAL, 2015). A Figura 9 ilustra a vista geral do empreendimento.



FIGURA 9 - VISTA GERAL DO EMPREENDIMENTO DE ITAIPU BINACIONAL  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

### 3.2 ESTRUTURAS DO EMPREENDIMENTO HIDRELÉTRICO

A Figura 10 ilustra o arranjo geral do empreendimento conforme numeração indicativa.

A Usina de Itaipu conta com diversas estruturas de barragens, compondo seu arranjo com:

- 1) Barragem de Terra na margem direita (Trecho Q);
- 2) Vertedouro (Trecho A);
- 3) Barragem Lateral Direita em concreto do tipo Contrafortes com cabeça maciça (Trecho D);
- 4) Barragem Principal em concreto do tipo Contrafortes e gravidade aliviada (Trecho E e F);
- 5) Estrutura de Desvio em concreto do tipo Gravidade maciça (Trecho H);
- 6) Barragem de Ligação Esquerda (Trecho I);
- 7) Barragem de Enrocamento do tipo Zoneada (Trecho K);
- 8) Barragem de Terra Esquerda do tipo Zoneada (Trecho L);
- 9) Casa de Força (incluindo área de montagem) do tipo Zoneada.

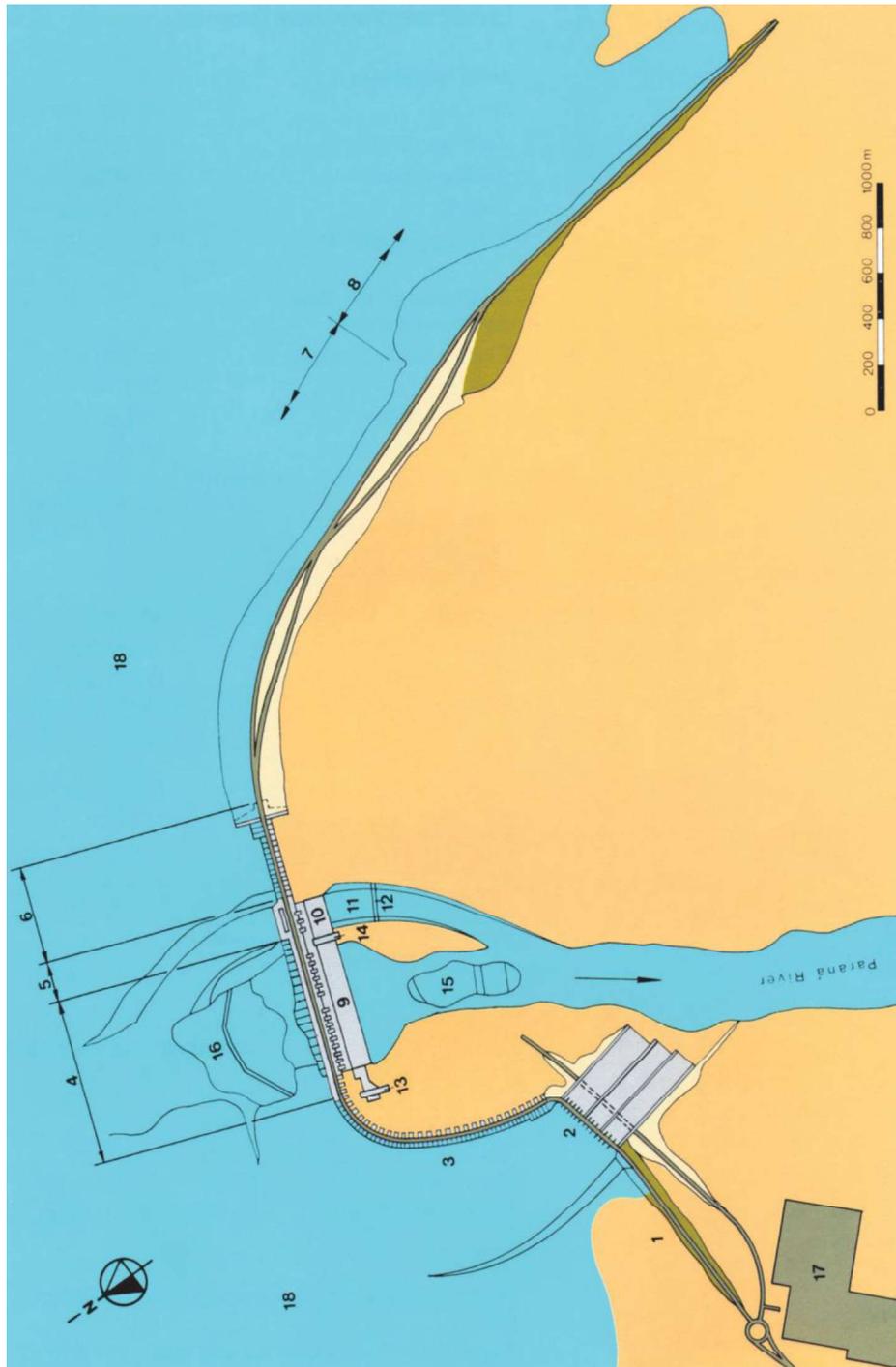


FIGURA 10 - ARRANJO GERAL DA USINA DE ITAIPU  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO ROCHOSO

Entende-se por estruturas dos maciços rochosos a disposição arquitetural ou arranjo espacial das rochas ou porções das rochas e suas relações mútuas. O maciço rochoso é definido como o conjunto formado pela matriz rochosa e por todas as descontinuidades nelas contidas (MAGALHÃES *et al.*, 1998).

A área de projeto e o reservatório de Itaipu estão sobre os grandes derrames basálticos da bacia superior do Paraná, que pertencem à formação Serra Geral da era jurássica inferior. Sendo as principais características dessa área (ITAIPU BINACIONAL, 2009):

- Derrames basálticos essencialmente horizontais, com espessura de 20 a 60 m;
- Camadas de brecha intercaladas entre os derrames de basalto, de 1 a 30 m de espessura, geralmente heterogênea, usualmente mais fraca e deformável que o basalto;
- Descontinuidades dispostas em planos paralelos aos derrames de basalto, geralmente localizadas nos contatos entre derrames, ou na base da zona de transição;
- Permeabilidade horizontal, várias vezes maior que a permeabilidade vertical.

A Figura 11 representa a seção geológica de Itaipu, pode-se observa a transição entre basalto denso, brecha e basalto vesículo-amigdaloidal.

São cinco os derrames basálticos diretamente relacionados com o projeto, denominados em ordem ascendente, A, B, C, D e E, com espessuras variadas. Em Itaipu, a denominação dos derrames é indicada por letras do alfabeto na ordem de baixo para cima, ou seja, o derrame “E” é o mais superficial.

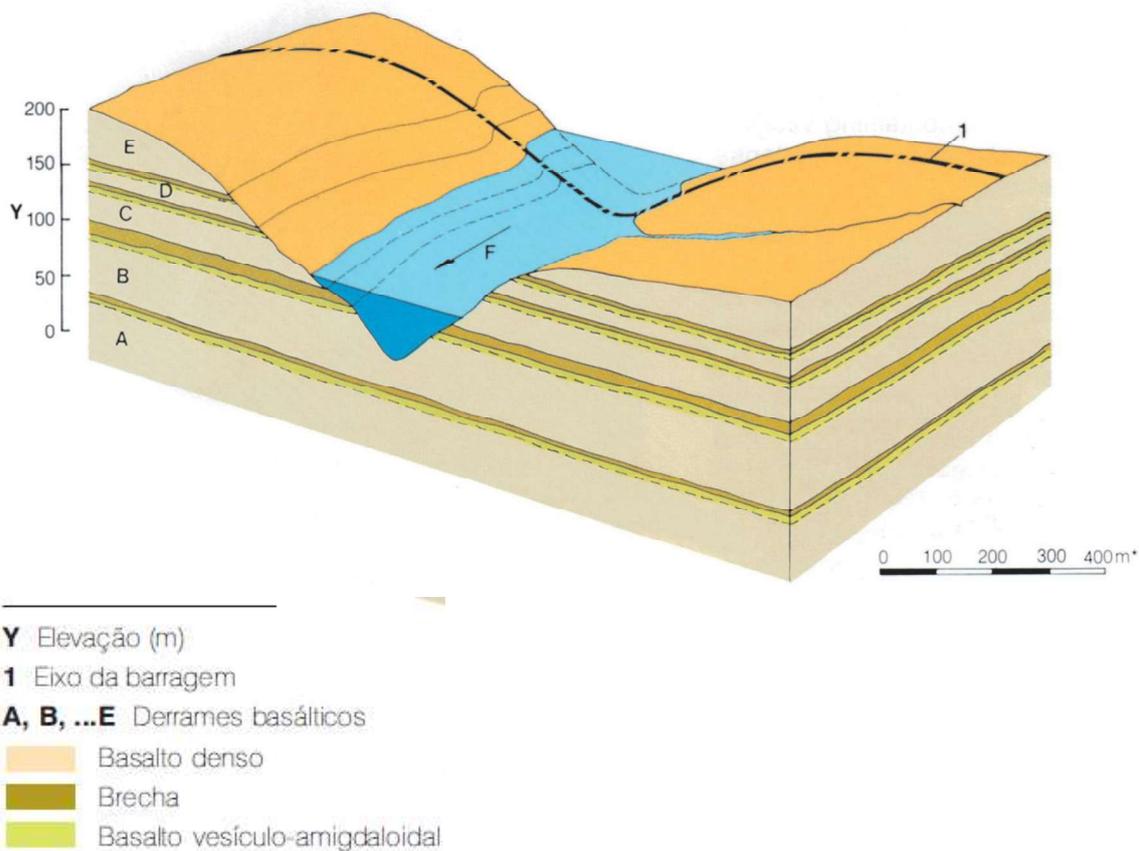


FIGURA 11 - SEÇÃO GEOLÓGICA TÍPICA NO LOCAL DE ITAIPU.  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

Cada derrame apresenta três tipos distintos de rocha basáltica, conforme apresentado a seguir (ITAIPU BINACIONAL, 2009):

- Basalto Denso, com alta densidade e alto módulo de deformabilidade. Devido a sua rigidez intrínseca, este basalto é altamente fraturado;
- Basalto Vesículo-amigdaloidal com textura similar à do basalto denso, porém é bem menos fraturado que ele;
- Brecha e Lava escoriácea, composta de lava altamente vesicular que engloba blocos angulosos de diferentes tipos de basalto, arenito e silte, e que possui cavidades irregulares parcialmente preenchidas com carbonato, zeólita e quartzo amorfo e cristalino.

Os derrames basálticos em Itaipu são relativamente uniformes, apresentando uma transição gradativa de cinza-escuro, com granulometria fina a média do basalto na parte central, para zonas de transição vesículo-amigdaloidais ou brechóide, próximas ao contato superior.

O basalto denso no leito do rio possui zonas de cisalhamento, tendo como direção geral a calha do rio e mergulhando para leste ou para oeste, entre as respectivas ombreiras da barragem (SILVEIRA, 2003).

As espessuras médias das camadas de basalto e zonas de transição compostas de basalto vesicular e brechas são indicadas na tabela a seguir:

TABELA 1 - ESPESSURA MÉDIA DOS DERRAMES DE BASALTO DA FUNDAÇÃO DE ITAIPU

DeRRAME	COTA MÉDIA CONTATO SUPERIOR	ESPESSURA MÉDIA (M)	
		CAMADA DE BASALTO DENSO	ZONA DE TRANSIÇÃO (BASALTO VESICULAR E BRECHA)
E	170	50	9-10
D	135	21-23	8-9
C	112	30-32	4-5
B	80	40	15-20
A	20	55	6-9

FONTE: PORTO APUD IECO/ELC (1974).

### 3.3.1 Investigações Geológicas e Geotécnicas

Durante a fase de início dos estudos de projeto, as investigações geológicas e geotécnicas contaram com investigações diretas e indiretas *in situ* e ensaios de campo e laboratório, afim de se obter um conhecimento geológico abrangente da área, definir as características dos derrames basálticos, a sua espessura, e o mais importante, a natureza das brechas, para que assim fosse possível viabilizar o empreendimento e definir o tipo de barragem e o arranjo geral da estrutura.

Devido às condições de acesso e espessa lâmina d'água do rio Paraná, as prospecções só puderam ser completadas e as descontinuidades melhor identificadas na região do leito do rio, após a fase de desvio do rio, quando os blocos de concreto nas ombreiras da barragem já se encontravam em fase construtiva. Os blocos de maior altura da barragem ficaram assentados em torno da EL. 40 m, estando a principal descontinuidade geológica na EL. 20 m, representada por um contato entre derrames, com algumas juntas secundárias de cisalhamento entre as EL. 20 e 30 m, aproximadamente (SILVEIRA, 2003).

Para a certificação da melhoria da estabilidade da estrutura, respeitando os coeficientes de segurança impostos pelo projeto, decidiu-se reduzir as subpressões atuantes na descontinuidade da EL. 20 m, com um tratamento

subterrâneo com chavetas preenchidas com concreto e injetadas nos contatos, além da introdução de um túnel perimetral de drenagem na cota da descontinuidade, com dimensões de 3,5 m de largura e 2,5 m de altura e cerca de 15 a 20 m abaixo da superfície. O sistema de chavetas foi desenvolvido com a intenção de propiciar um aumento da resistência ao cisalhamento-deslizamento e da rigidez normal nos níveis da descontinuidade, ao longo dos planos de fraqueza.

Alguns critérios básicos levantados para a execução deste tratamento:

- O comportamento da barragem e de suas fundações deveria ficar bem dentro do campo elástico;
- Deveria ser assegurada uma boa transmissão das forças através do plano das descontinuidades;
- As obras de construção da galeria de drenagem perimetral deveriam estar concluídas antes do enchimento do reservatório.

A Figura 12 ilustra a estruturação do sistema de chavetas instalado no trecho F, assim como a locação de alguns instrumentos de auscultação. Dentre eles, houve a instalação de 09 (nove) extensômetros múltiplos na rocha da fundação na área submetida a tratamento subterrâneo.

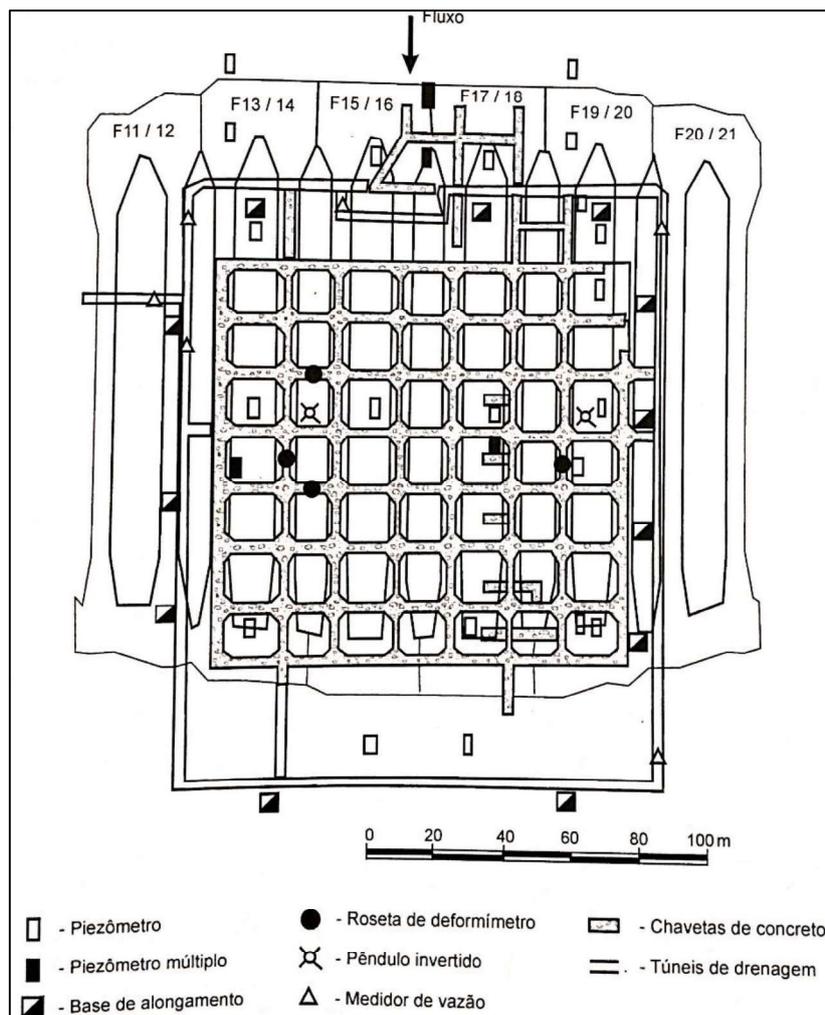


FIGURA 12 - SISTEMAS DE CHAVETAS NO TRECHO F E INSTRUMENTAÇÃO  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

Dentre essas investigações, foram feitas sondagens rotativas, túneis de prospecção e poços exploratórios, que posteriormente foram integrados ao sistema de drenagem da barragem. A partir dos poços que atravessavam a maioria das descontinuidades de importância para as fundações da barragem principal, escavou-se túneis na EL. 70, EL. 59 e EL. 12 (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

A Figura 13 ilustra a seção geológica longitudinal da barragem principal, assim como as investigações realizadas.

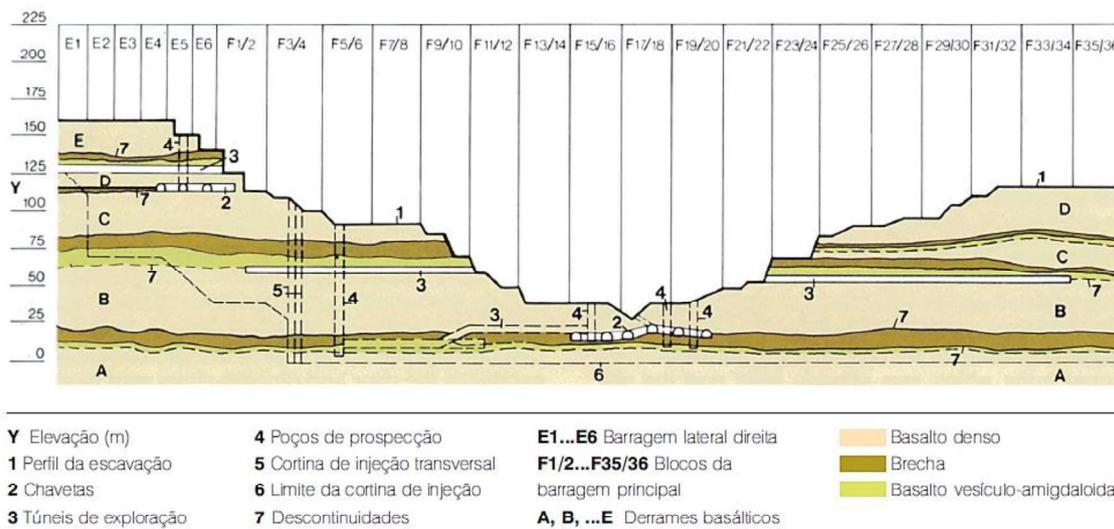


FIGURA 13 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA BARRAGEM PRINCIPAL  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

Com os resultados dos testes *in situ* e testes de laboratório foi possível analisar as características das principais propriedades da fundação de rochas conforme exposto na Tabela 2.

TABELA 2- PROPRIEDADES FÍSICAS DA ROCHA DE FUNDAÇÃO

Tipo de material	Derrame	Ensaio <i>in situ</i>					Ensaio de laboratório							
		Deformabilidade		Resistência			Deformabilidade		Resistência					
		$E_d \times 10^3$	$E_s \times 10^3$	$\nu$	$k_t$	$\phi$	$c$	$E_d \times 10^3$	$E_s \times 10^3$	$\nu$	$\phi$	$c$	$\sigma_c$	$\sigma_t$
<b>Rochas</b>														
Brecha basáltica														
Maciça/média	B	1,6-1,9	1,0 (1)	0,22		35	360	1,7	2,0	0,33				
Média	B	1,6-1,9	1,3 (1)	0,22		35	360	2,5	2,3	0,26				
Cavernosa	B	0,9-1,2	0,5 (1)	0,23				1,0	0,7	1,96				
Maciça	D										35	440		
Cavernosa	B		0,4 (3)											
Cavernosa	B		0,3 (3)											
Média	B		0,6 (3)											
Sã	(4)							2,4	2,1	0,14			2,8	
Levemente intemperizada	(4)							2,3	1,4	0,11			2,6	
Intemperizada	(4)							1,7	1,3	0,20			1,5	0,1
Basalto vesicular	B	2,5-4,0		0,30										
Cinza são	A		0,7 (3)											
Cinza	A		0,8 (3)											
São	(4)							4,9	4,4	0,12			5,2	1,0
Levemente intemperizado	(4)								2,2	0,31			3,0	
Intemperizado	(4)							2,5	1,8	0,20			3,3	0,5
Basalto denso	C		2,6 (2)						5,9	0,15				
Cinza são	B		1,7 (3)											
Cinza sobre junta	B		0,1 (3)											
São	(4)							5,1	6,4	0,19			9,3	2,0
<b>Juntas</b>														
Descontinuidade D El. 125											33-45	0-360		
Descontinuidade B El. 61						14	35	0			15-45	0-180		
Contato A/B El. 20						8	26	0			30	0		
Descontinuidade A El. 12											30	70-360		

Observações:  
 (1) Valores obtidos através de macaco plano  
 (2) Medições com dilatômetro  
 (3) Ensaio de carregamento de placa  
 (4) Esses são valores médios de diferentes medições efetuadas durante o projeto de viabilidade

$E_d$  (kN/cm<sup>2</sup>) - módulo de deformabilidade dinâmico  
 $E_s$  (kN/cm<sup>2</sup>) - módulo de deformabilidade estático  
 $\nu$  Coeficiente de Poisson  
 $k_t$  (kN/cm<sup>2</sup>) - rigidez tangencial ao cisalhamento  
 $\phi$  (Graus) - ângulo de atrito  
 $c$  (N/cm<sup>2</sup>) - coesão  
 $\sigma_c$  (kN/cm<sup>2</sup>) - resistência à compressão simples  
 $\sigma_t$  (kN/cm<sup>2</sup>) - resistência à tração

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

Os exames e testes *in situ* permitiram a definição das características geotécnicas das brechas que, em função do seu baixo módulo de deformação, foram consideradas camadas problemáticas. A Tabela 3 demonstra claramente esta diferença em relação aos outros tipos de rochas presentes na geologia local.

TABELA 3 - PROPRIEDADES DA FUNDAÇÃO ROCHOSA

TIPO DE ROCHA	Unidade de Peso KN/m <sup>3</sup>	COEFICIENTE DE POISSON	MÓDULO DE DEFORMABILIDADE Mpa	COESÃO Mpa	ÂNGULO DE FRICÇÃO
Brecha	21 a 24	0,1 a 0,3	7.000 a 10.000	1.0 a 1.5	40
Basalto Vesículo-Amigdaloidal	27	0,1 a 0,3	10.000 a 15.000	2.5	55
Basalto Denso	30	0.2	20.000	2.5	55

FONTE: MAIN BRAZILIAN DAMS (2000).

### 3.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DO MACIÇO DA FUNDAÇÃO

A Usina de Itaipu conta com um programa abrangente de instrumentação para monitorar o comportamento de todas as estruturas mais importantes de concreto e os maciços de aterro, assim como a fundação. Os instrumentos instalados para monitoramento da fundação, foco deste estudo, são:

- Piezômetros para medição da pressão dos poros no núcleo e no contato núcleo-fundação;
- Marcos e alvos topográficos para levantamento de alta precisão para medição dos deslocamentos horizontais e verticais em relação a marcos de referência permanentes situados nas margens em locais afastados e não afetados pelos recalques;
- Extensômetros múltiplos para medição das deformações totais e diferenciais, tanto na direção vertical como horizontal, das fundações em relação às estruturas.

Os instrumentos foram instalados em locais que apresentassem um dos critérios descritos a seguir (PATIAS, 2010):

- Trechos com elevado número de blocos;
- Blocos de grandes dimensões, especialmente altura;
- Regiões da fundação com condições geológico-geotécnicas desfavoráveis, mesmo naquelas com tratamento.

Durante a construção, as leituras ou medições da maioria dos instrumentos eram feitas a intervalos de uma a duas semanas. Durante o enchimento rápido do reservatório, concluído em apenas duas semanas, os instrumentos eram lidos com mais frequência, sendo que os extensômetros múltiplos, eram lidos em dias alterados.

O intervalo entre leituras foi aumentado de sete para 14 dias durante o primeiro ano de operação com o reservatório praticamente cheio.

Em condições normais de operação, todos os instrumentos são monitorados uma vez ao mês, exceto os piezômetros e medidores de vazão.

A Figura a seguir ilustra um bloco-chave que apresenta instrumentação completa:

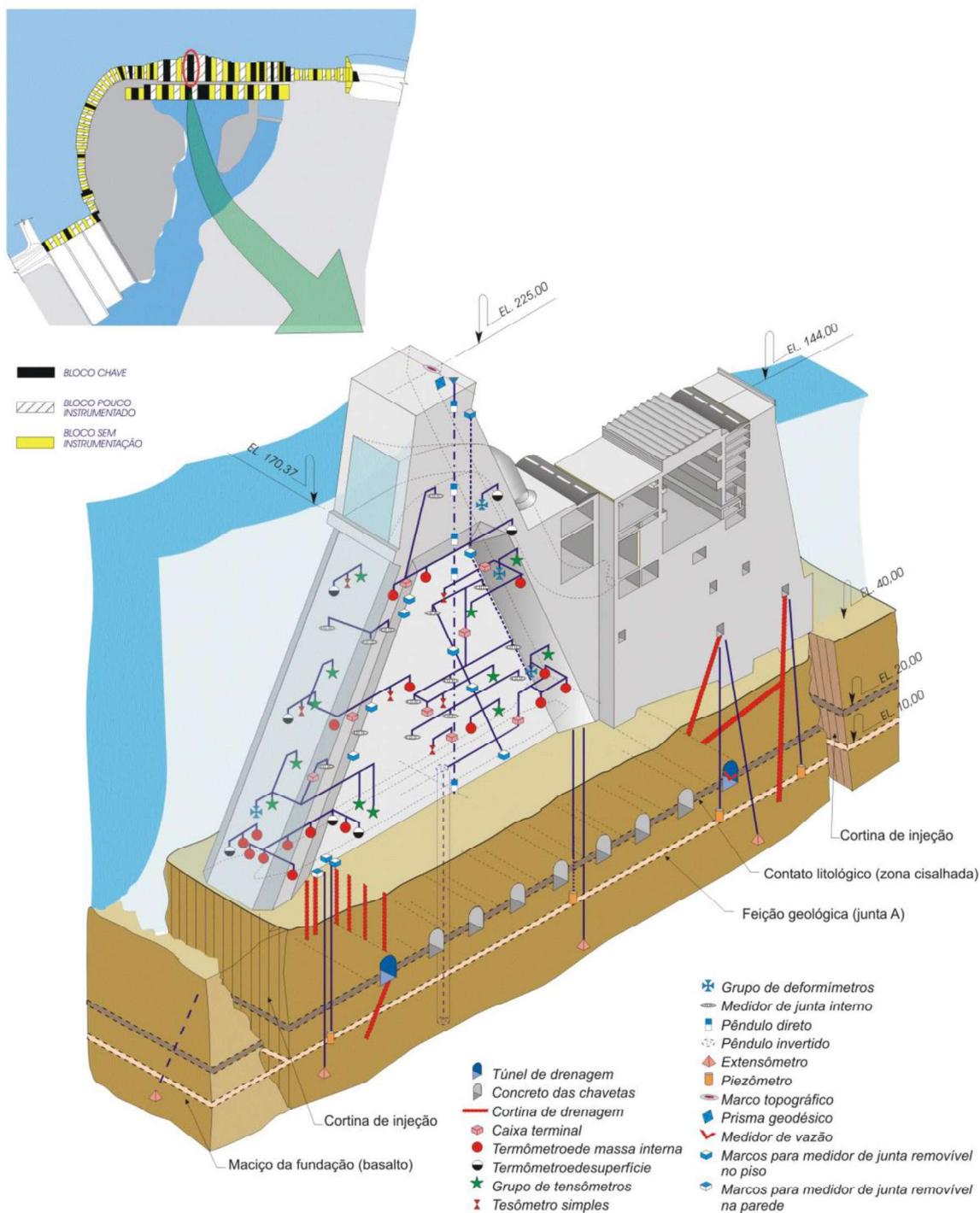


FIGURA 14 - BLOCO-CHAVE INSTRUMENTADO  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2008).

A instalação dos extensômetros múltiplos, assim como os medidores de junta, instalados ao longo de descontinuidades geológicas que afloravam nas paredes dos túneis de prospecção e drenagem da fundação, possibilitaram a determinação dos reais módulos de deformabilidade do maciço basáltico de fundação, por ocasião do período construtivo (SILVEIRA, 2003).

A medida que progrediu a obra de tratamento subterrâneo, exposta neste trabalho no item 3.3.1, foi possível, a partir das medições periódicas dos extensômetros, medir o recalque provocados pelos fogos, o progressivo aumento do peso da barragem, a concretagem dos túneis e as injeções sob pressão. Onde fossem encontradas elevadas taxas de deformação, as causas eram identificadas, e medidas adicionais de tratamento efetuadas para controlar os recalques. As leituras dos extensômetros, depois de completa a escavação dos túneis e antes do preenchimento com concreto, mostraram claramente que o processo de recalque aumentava toda a vez que a altura do túnel se aproximava da espessura da rocha sobreposta.

Os extensômetros verticais múltiplos forneceram dados a respeito do recalque e consolidação da fundação até a profundidade de 40 m. Os recalques relativos entre as diversas camadas, contatos e descontinuidades foram também medidos pelos mesmos instrumentos (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

Na Figura 15 apresenta a relação entre o valor de recalque medido no bloco F, um dos blocos mais altos de gravidade aliviada (F17/18), e o enchimento do reservatório do período de 1982 até 1986.

No período de pré-carregamento a fundação apresentava um recalque entre 4 e 7 mm, como pode ser visto no gráfico cronológico de recalque, pode-se visualizar, no entanto, que a resposta ao enchimento do reservatório foi rápida, ou seja, em meados de fim de Outubro de 1982, o recalque inicial apresentou um aumento de 1 a 1,5 mm. Após os anos seguintes observamos uma certa estabilização da taxa de aumento de recalque, este fato se deve à consolidação interna da fundação, particularmente na zona de descontinuidades, onde foram construídas as chavetas. Tal consolidação aumentou a resistência e estabilidade da fundação (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

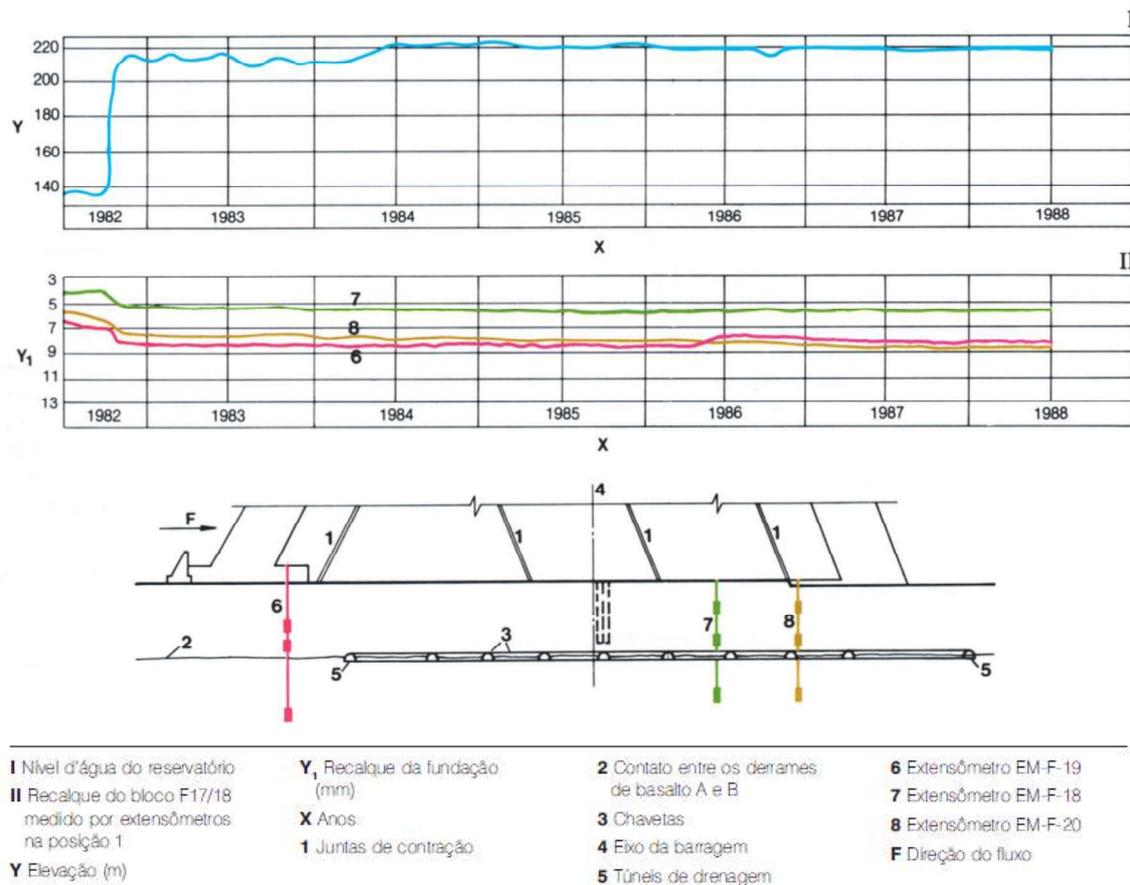


FIGURA 15- RECALQUE DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE GRAVIDADE ALIVIADA  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 REGIÃO DE ESTUDO

As estruturas mapeadas na análise de recalque e distensão são aquelas de arranjo em concreto, dentre as quais, selecionou-se as que apresentavam maior quantidade de extensômetros instalados, sendo elas:

- a) Trecho A – Vertedouro;
- b) Trecho D – Barragem Lateral Direita em concreto do tipo Contrafortes com cabeça maciça;
- c) Trecho E e F – Barragem Principal em concreto do tipo Contrafortes e gravidade aliviada;
- d) Trecho H – Estrutura de Desvio em concreto do tipo Gravidade maciça;
- e) Trecho I – Barragem de Ligação Esquerda;
- f) Trecho U – Casa de Força e Área de Montagem.

A interpolação de dados foi realizada nessas estruturas pois elas apresentam um maior número de extensômetros instalados nesses trechos, além de uma maior sobrecarga no maciço. Os trechos F, U e H consistem em estruturas de grande importância da barragem, pois estão submetidos às maiores pressões de água do reservatório, visto que ficam no trecho central do leito do rio (SANCHEZ, 2009).

O sistema geodésico de referência dos documentos geotécnicos de Itaipu é o Astro Datum Chuá, utilizado na época do projeto da Usina.

A Figura a seguir ilustra o mapa georreferenciado utilizado para a composição do estudo em ArcGIS.

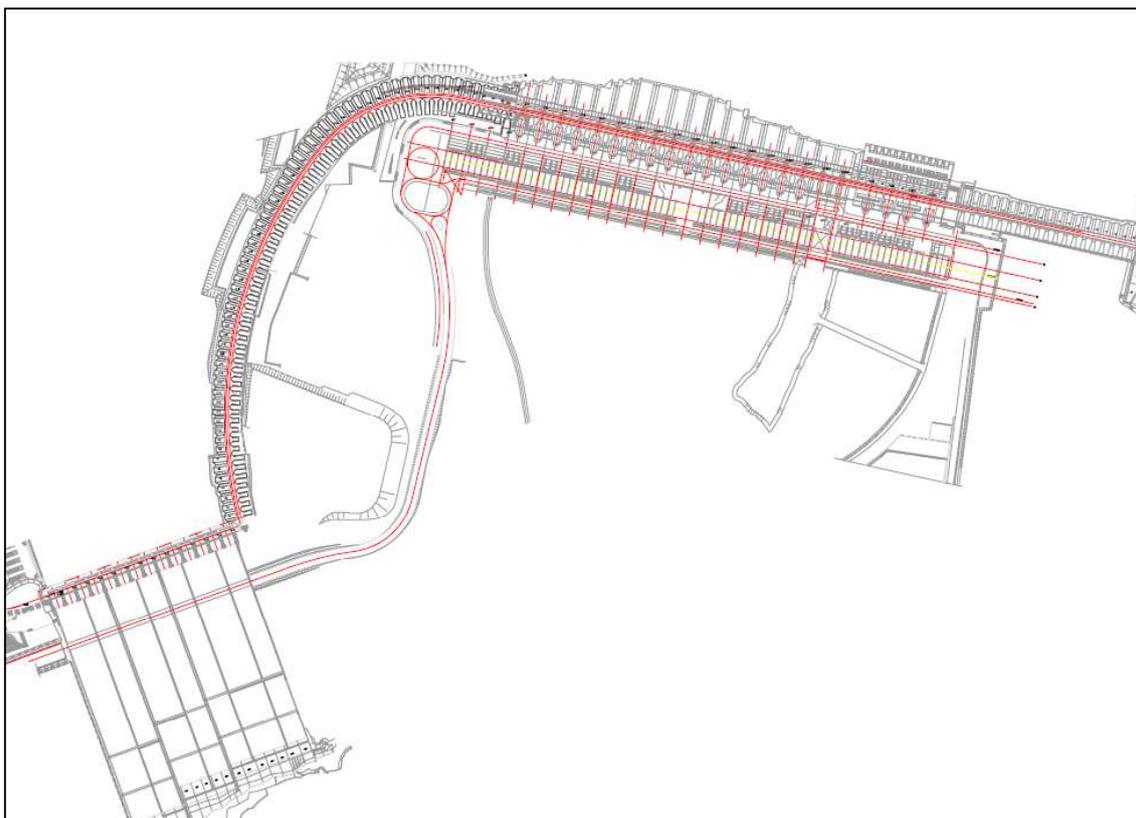


FIGURA 16 - PLANTA DAS ESTRUTURAS MAPEADAS  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014).

#### 4.1.1 Arranjos estudados e feições geológicas

No trecho A, a estrutura do Vertedouro está localizada sobre basalto denso, as calhas sobre os derrames C, D e E compostos de basalto vesicular e brecha, e a laje da fundação do trampolim na brecha do derrame B (ITAIPU BINACIONAL, 2009). A tabela a seguir fornece as características gerais do trecho A:

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS TRECHO A

<b>Trecho A – Vertedouro</b>	
Número de Blocos	15
Cota da soleira (m)	200
Altura máxima (m)	44
Largura Total (m)	380
Comprimento Total (calhas + estr.de controle) (m)	483

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

A Figura 17 e 18 fornecem as feições geológicas do trecho A e a visão geral deste arranjo, respectivamente.

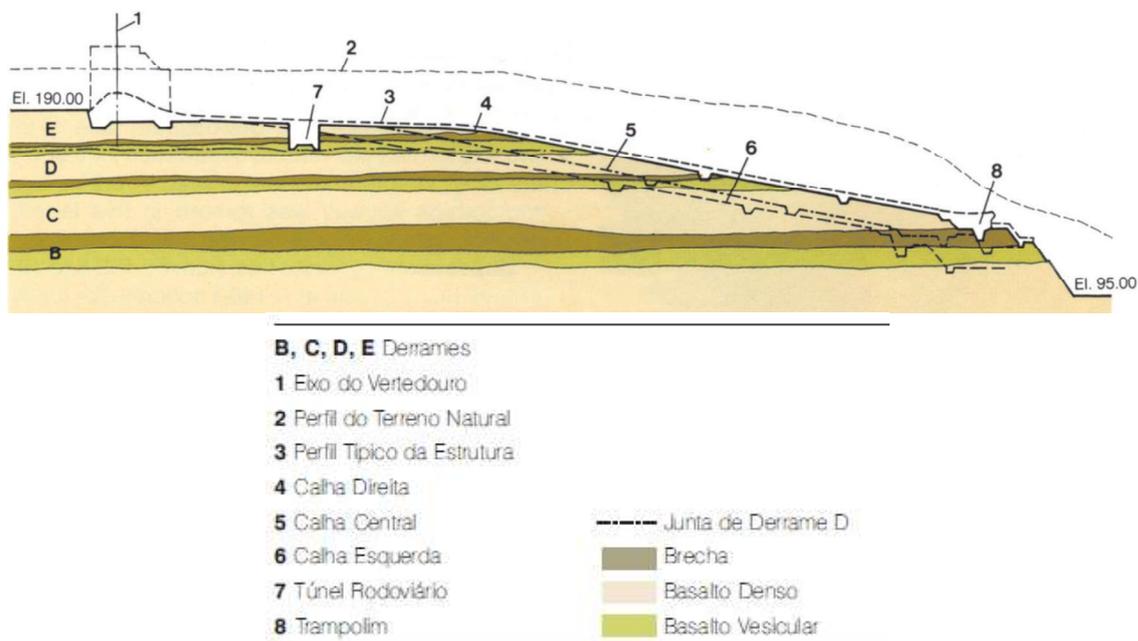


FIGURA 17 - PERFIL DA ESCAVAÇÃO DO VERTEDOURO  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).



FIGURA 18 - VISÃO GERAL VERTEDOURO  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

O trecho D, composto por 64 blocos de contrafortes, localiza-se na margem direita entre o vertedouro e a barragem principal, todos os blocos apresentam configurações estruturais idênticas com 17 m de largura do eixo. A Tabela 4 fornece as características gerais deste arranjo, e a Figura 19 ilustra a composição dos blocos na barragem lateral direita. A estrutura do trecho D

encontra-se apoiada sobre Basalto Denso (Derrame E) (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS TRECHO D

<b>Trecho D - Barragem Lateral Direita</b>	
Número de Blocos	58
Cota da crista (m)	225
Altura máxima (m)	64,5
Largura (m)	17
Comprimento na Crista (m)	986

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).



FIGURA 19 - BARRAGEM LATERAL DIREITA  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

O trecho E e F são compostos pelos blocos de contrafortes e a barragem principal, respectivamente. O Trecho E serve de barragem de ligação entre a barragem lateral direita e a Barragem de Gravidade Aliviada e é composto de 6 blocos de 17 metros, já o Trecho F apresenta 18 blocos (F1 ao F36) de 34 metros de largura cada.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS TRECHO E E F

<b>Trecho E e F - Barragem Principal</b>	
Contrafortes e Gravidade Aliviada	
Cota da crista (m)	225
Altura máxima (m)	196
Comprimento na Crista (m)	1064

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).



FIGURA 20 - BARRAGEM DE LIGAÇÃO E BARRAGEM PRINCIPAL  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

O perfil de escavação das fundações dos blocos da barragem principal foi escalonado em diferentes níveis entre a EL. 30 no canal do rio e a EL. 160 acima das margens do rio, de modo que a estrutura está fundada inteiramente em rocha fisicamente sã.

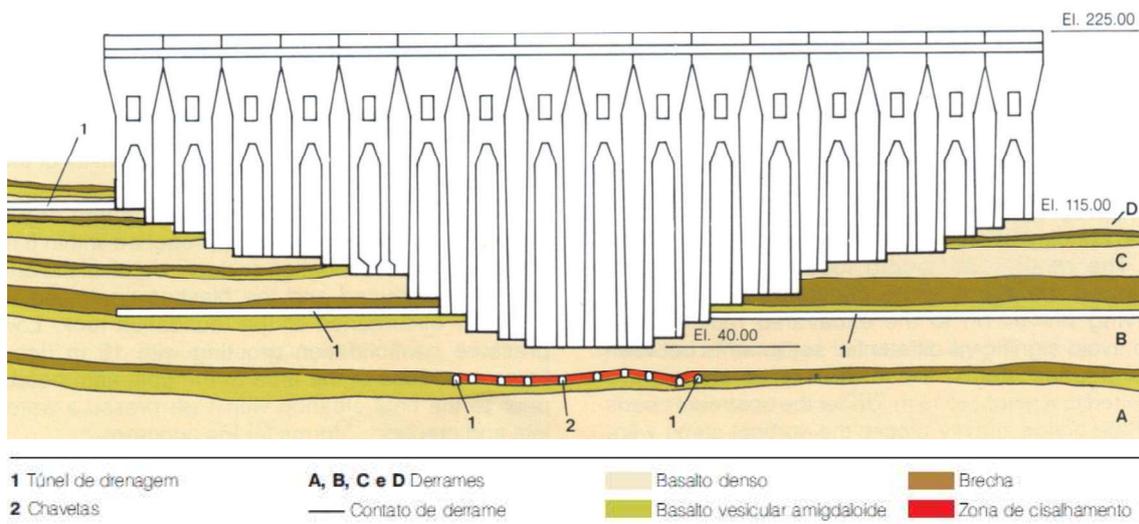


FIGURA 21- FUNDAÇÃO E PERFIL DE ESCAVAÇÃO DA BARRAGEM PRINCIPAL  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

O trecho H encontra-se a Estrutura de Desvio, a Tabela 7 fornece as características gerais deste arranjo.

TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO TRECHO H

<b>Trecho H - Estrutura de Desvio</b>	
Gravidade Maciça	
Cota da crista (m)	225
Altura máxima (m)	162
Comprimento na Crista (m)	170
Largura (m)	144

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

Os blocos centrais da estrutura do canal de desvio, cada um com altura de 162 m, tem como fundação basalto são na EL. 65.

O trecho U (Casa de Força e área de montagem), apresenta as características principais conforme a tabela a seguir.

TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS TRECHO U

<b>Trecho U – Casa de Força (Incluindo Área de Montagem)</b>	
Cota da crista (m)	225
Altura máxima (m)	100
Comprimento (m)	968
Largura (m)	99

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).



FIGURA 22 – VISÃO GERAL CASA DE FORÇA E ÁREA DE MONTAGEM  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009).

#### 4.2 LEITURA DA INSTRUMENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

A leitura dos instrumentos instalados na Usina de Itaipu é realizada por uma equipe de auscultação, ou seja, equipe técnica de profissionais capacitados para realizar a leitura e analisar esses dados, com o intuito de verificar as condições de segurança, e assim, verificar medidas de correção.

As leituras devem ser avaliadas preliminarmente no campo, através da comparação com as leituras anteriores e com as leituras esperadas em condições normais para a época.

Deve-se assegurar que os leituristas atuem como inspetores visuais, analisando a boa conservação do instrumento, percorrendo os diversos trechos e galerias de drenagem. As frequências de leitura da instrumentação devem ser adequadas aos desempenhos previstos no projeto para as fases de construção da barragem, primeiro enchimento do reservatório e operação e para possibilitar o acompanhamento das velocidades de variação das grandezas medidas, levando-se em consideração a precisão dos instrumentos e a importância dessas grandezas na avaliação do desempenho real da estrutura (FRAZÃO, 2002).

Os extensômetros de hastes múltiplas analisados neste trabalho apresentam geralmente leituras mensais. No período de enchimento do reservatório, essas leituras eram feitas com uma maior frequência, mas devido as características estáveis da barragem e fundação após o período de operação, passaram a ter um intervalo maior conforme o decorrer dos anos.

A escolha dos períodos de análise das leituras do extensômetros para mapeamento foram:

- Período de Enchimento: Janeiro/1982 à Dezembro/1984;
- Máximos Históricos: Janeiro/1982 à Janeiro/2014;
- Verão: Outubro/2014 à Março/2015;
- Inverno: Março/2014 à Setembro/2014.

O enchimento do reservatório de Itaipu foi realizado em três etapas distintas, atingindo o nível máximo operacional (EL. 220 m) no término da terceira fase (27/05/1984).

O enchimento parcial do reservatório de Itaipu, realizado no período entre 25/01/1982 e 18/04/1982, corresponde ao enchimento com água do espaço compreendido entre as ensecadeiras de montante e a Barragem Principal. O principal objetivo dessa operação foi submeter os blocos de maior altura da barragem e suas fundações a uma carga hidrostática correspondente a 100 m de altura, que corresponderia a 56% da altura máxima a ser atingida por ocasião do enchimento definitivo do reservatório (SILVEIRA, 2003).

A escolha do período de enchimento como parte das análises de mapeamento visa interpretar como a fundação se comportou, através dos valores de recalque dos extensômetros, com o progressivo aumento de sobrecarga de água na estrutura.

O período de máximos históricos refere-se aos maiores valores de recalque e distensão obtidos para cada instrumento desde o início do enchimento até julho de 2014, ou seja, esta análise servirá para ilustrar a amplitude máxima atingida em 32 anos.

Pode-se observar que o período de verão e inverno são de anos sequenciais, tanto a fundação quanto a estrutura nela apoiada sofrem interferências da sazonalidade, ou seja, as tensões *in situ* são influenciadas devido as alterações de temperatura no decorrer das estações do ano. A prova deste comportamento se deve a característica que as leituras de deslocamento apresentam.

A Figura 23 ilustra o gráfico do comportamento do extensômetro EM-D-20/1, instalado no trecho D (Barragem Lateral Direita) e valores da haste nº 01 (Basalto Denso). Os valores de leitura utilizado foram os mensais de cada ano, desde 1982 até 2014, sendo assim, pode-se observar uma tendência característica de como comporta-se os valores de recalque ao longo dos meses.

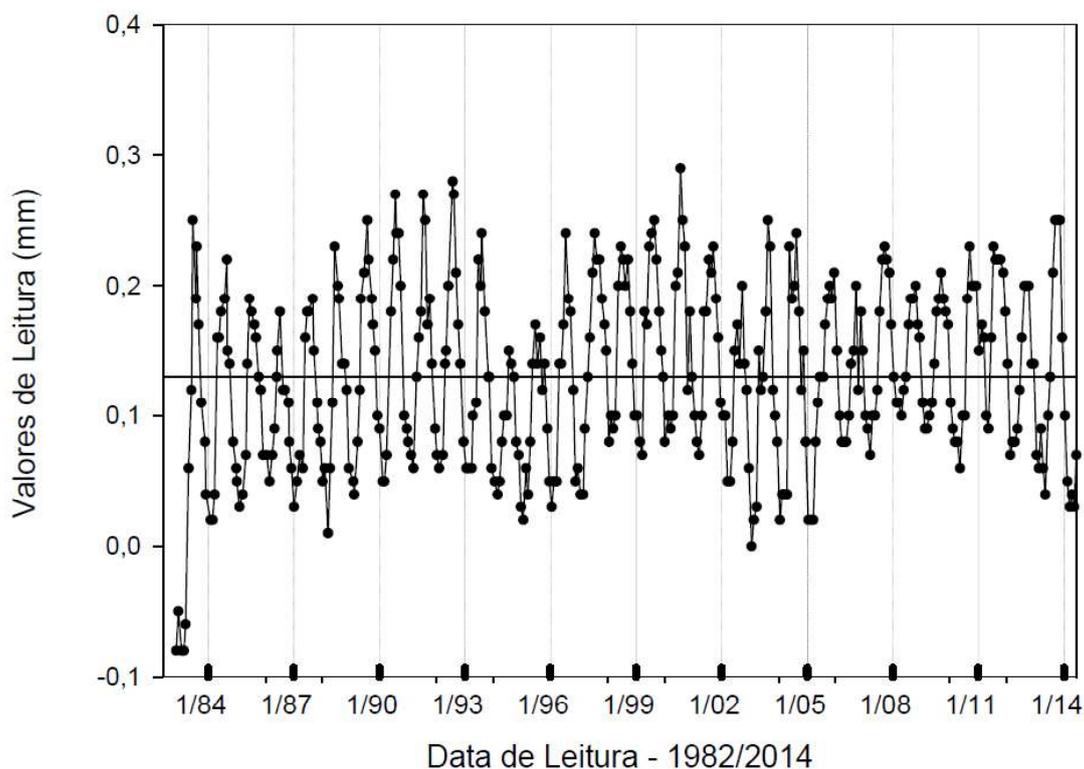


FIGURA 23 - GRÁFICO DE COMPORTAMENTO EM-D-20/1  
 FONTE: A AUTORA (2015).

A Tabela 9 fornece a relação da quantidade de extensômetros por trecho analisado, a nomenclatura desses instrumentos se refere ao tipo de instrumento,

trecho, numeração e haste, respectivamente. Por exemplo, o extensômetro EM-A-1/1 pertence ao trecho A, com numeração 01 e haste número 01.

TABELA 9 - RELAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ANALISADOS

Trecho de Instalação dos Extensômetros						
A	D	E	F	H	I	U
EM-A-1/1	EM-D-1/1	EM-E-2/1	EM-F-12/1	EM-H-30/1	EM-I-10/1	EM-U-1/1
EM-A-10/1	EM-D-10/1	EM-E-3/1	EM-F-14/1	EM-H-31/1	EM-I-11/1	EM-U-10/1
EM-A-11/1	EM-D-11/1	EM-E-4/1	EM-F-15/1	EM-H-32/1	EM-I-12/1	EM-U-11/1
EM-A-16/1	EM-D-12/1		EM-F-18/1	EM-H-33/1	EM-I-13/1	EM-U-12/1
EM-A-2/1	EM-D-13/1		EM-F-19/1	EM-H-34/1	EM-I-2/1	EM-U-13/1
EM-A-3/1	EM-D-14/1		EM-F-20/1	EM-H-35/1	EM-I-3/1	EM-U-14/1
EM-A-4/1	EM-D-15/1		EM-F-21/1	EM-H-36/1	EM-I-4/1	EM-U-15/1
EM-A-5/1	EM-D-16/1		EM-F-22/1	EM-H-37/1	EM-I-6/1	EM-U-16/1
EM-A-6/1	EM-D-17/1		EM-F-23/1	EM-H-38/1	EM-I-7/1	EM-U-17/1
EM-A-7/1	EM-D-18/1		EM-F-24/1	EM-H-39/1	EM-I-8/1	EM-U-18/1
EM-A-8/1	EM-D-2/1		EM-F-25/1	EM-H-40/1	EM-I-9/1	EM-U-19/1
EM-A-9/1	EM-D-20/1		EM-F-26/1			EM-U-2/1
	EM-D-21/1		EM-F-27/1			EM-U-20/1
	EM-D-22/1		EM-F-28/1			EM-U-21/1
	EM-D-23/1		EM-F-29/1			EM-U-22/1
	EM-D-24/1		EM-F-32/1			EM-U-23/1
	EM-D-25/1		EM-F-33/1			EM-U-24/1
	EM-D-26/1		EM-F-34/1			EM-U-3/1
	EM-D-28/1		EM-F-35/1			EM-U-4/1
	EM-D-3/1		EM-F-6/1			EM-U-5/1
	EM-D-30/1		EM-F-7/1			EM-U-6/1
	EM-D-31/1					EM-U-7/1
	EM-D-32/1					EM-U-8/1
	EM-D-33/1					EM-U-9/1
	EM-D-4/1					
	EM-D-5/1					
	EM-D-6/1					
	EM-D-7/1					
	EM-D-8/1					

FONTE: A AUTORA (2015).

Percebe-se, segundo a Tabela 9, que todos os extensômetros utilizados no mapeamento estão com os dados de leitura da haste de número 01, essa escolha deve-se ao fato de que para a realização das interpolações estatísticas, necessita-se das coordenadas geográficas e um único valor de leitura por instrumento, sendo assim, optou-se por analisar as hastes mais profundas que corresponderiam ao recalque total.

Vale salientar, conforme especificado na limitação do trabalho (capítulo 1) que todos os instrumentos de análise, da haste mais profunda, estão locados em basalto denso, pois como método comparativo de comportamento da fundação da estrutura, devemos levar em conta o módulo de deformabilidade e resistência de cada componente do perfil geológico.

A deformabilidade é reconhecida como um dos parâmetros mais importantes que governa o comportamento dos maciços rochosos. Sendo a propriedade que a rocha tem para alterar sua forma como resposta à ação das forças. Dependendo da intensidade das forças e características mecânicas das rochas, a deformação será permanente (plástica) ou elástica, este último caso o corpo recupera sua forma original quando deixam de agir as forças aplicadas.

A Figura 24 ilustra o modelo de comportamento elástico, com deformações recuperáveis uma vez que é retirada a carga, e o comportamento plástico, com deformações permanentes ao superar o limite de elasticidade da rocha.

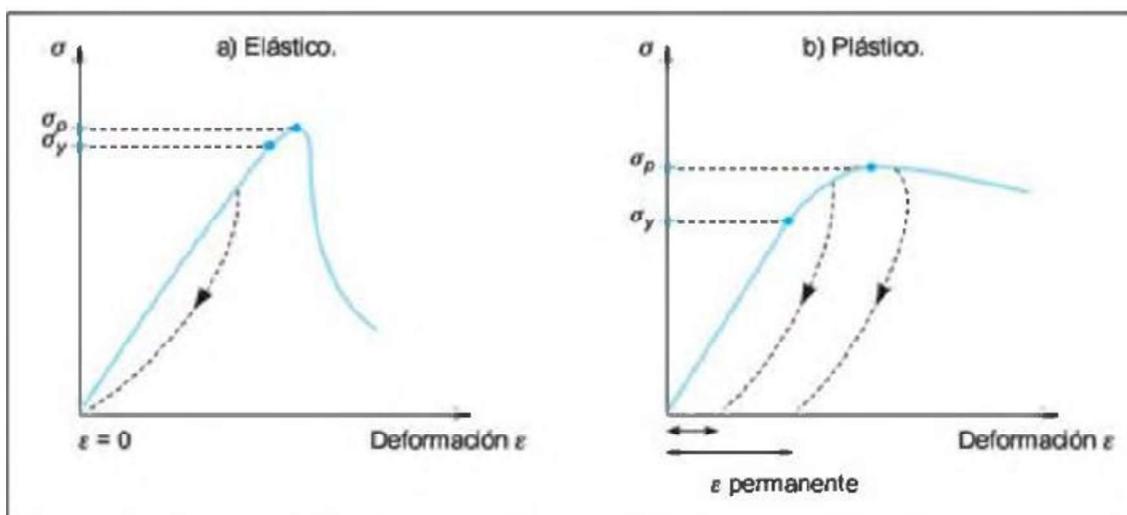


FIGURA 24 - MODELO DE COMPORTAMENTO ELÁSTICO E PLÁSTICO  
 FONTE: VALLEJO (2002).

A deformabilidade das rochas se expressa pelas suas constantes elásticas E e ν:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{máx}} \text{ (Unidades de esforço)} \quad \text{Equação (4.1)}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ax}} \text{ (Adimensional)} \quad \text{Equação (4.2)}$$

O módulo de Young,  $E$ , define a relação linear elástica entre o esforço aplicado e a deformação produzida na direção de aplicação do esforço, e o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , define a relação entre a deformação transversal e axial. Na realidade, as rochas não apresentam um comportamento elástico linear ideal, pois os valores de  $E$  e  $\nu$  sofrem variações.

Em condições naturais, a resistência depende das propriedades intrínsecas da rocha, coesão e ângulo de fricção, e outros fatores externos como a magnitude dos esforços que exercem sobre ela, os ciclos de carga e descarga e a presença de água. Por essa razão, a resistência não é um valor único intrínseco da rocha e sua determinação não é direta, devendo ser realizado por métodos empíricos (VALLEJO, 2002).

Como já apresentado na Tabela 03 (página 46), o módulo de deformabilidade (Mpa) resultante dos ensaios *in situ* e de laboratório demonstrou para o Basalto Denso um valor de 20.000 Mpa, em comparação, o Basalto Vesículo-Amigdaloidal Vesicular apresentou valores no intervalo de 10.000 – 15.000 Mpa (MAIN BRAZILIAN DAMS, 2000).

Portanto, a utilização de hastes presentes apenas em Basalto Denso seria uma forma de unificação e interpretação mais adequada deste mapeamento, tendo como parâmetro, um comportamento aproximado da estrutura rochosa.

#### 4.3 GEORREFERENCIAMENTO DOS INSTRUMENTOS NA BARRAGEM

O Georreferenciamento consiste em um conjunto de pontos implantados no terreno e conectados por meio de mensurações geodésicas, através de coordenadas geográficas conhecidas em um dado sistema de referência.

Para que fosse possível analisar o comportamento dos extensômetros por meio de mapas, necessitou-se georreferencia-los nas coordenadas geográficas (X,Y,Z) sobre a planta da Usina Hidrelétrica (Figura 16) devidamente referenciada no sistema de referência Astro Datum Chuá, sendo o sistema de projeção UTM, Fuso 21 Sul.

Os documentos utilizados como base para locação no sistema de referência foram retirados dos projetos de construção da Barragem no arquivo técnico de Itaipu, por meio do SAT – Sistema de arquivo técnico, possibilitando

o acesso rápido às plantas de instrumentação da Usina, onde tinha-se o georreferenciamento de todos os extensômetros em planta.

Com a planta georreferenciada da Usina Hidrelétrica em AutoCAD, pode-se instalar a localização dos extensômetros e assim, retirar suas coordenadas geográficas. A figura a seguir, apresenta um dos arquivos técnicos dos projetos de instrumentação.

Este georreferenciamento foi realizado no período de Julho de 2014, as coordenadas geográficas da haste número 01 como também de todas as hastes presentes nos extensômetros inclinados e verticais foram obtidas.

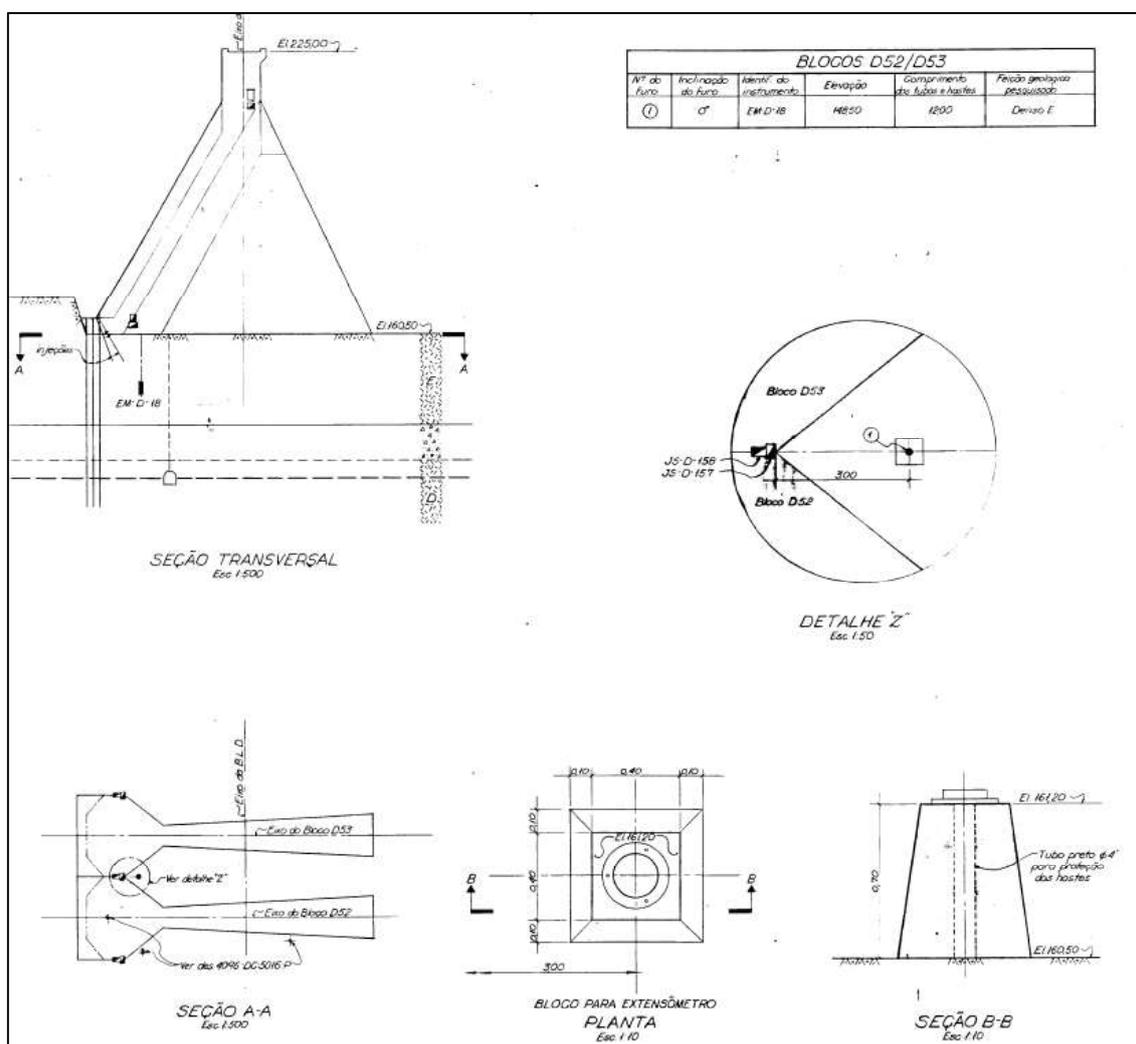


FIGURA 25 - INSTRUMENTAÇÃO EXTENSÔMETRO ENTRE OS BLOCOS D52 E D53  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (1981).

Observa-se que, na figura 25, uma barragem bem projetada e documentada, com arquivos técnicos organizados e de fácil acesso permitiu obter todas as informações referentes aos instrumentos, seja a elevação, tipo de basalto em que estava instalado, inclinação das hastes para montante ou

jusante, além de ser possível obter as coordenadas geográficas da boca do projeto e cota de instalação das hastes.

Na Figura 26, estão ilustrados alguns extensômetros locados no trecho F após a obtenção dos dados necessários para o georreferenciamento. Nota-se que pontuou-se a elevação de cada instrumentos, assim como o de suas hastes subsequentes.

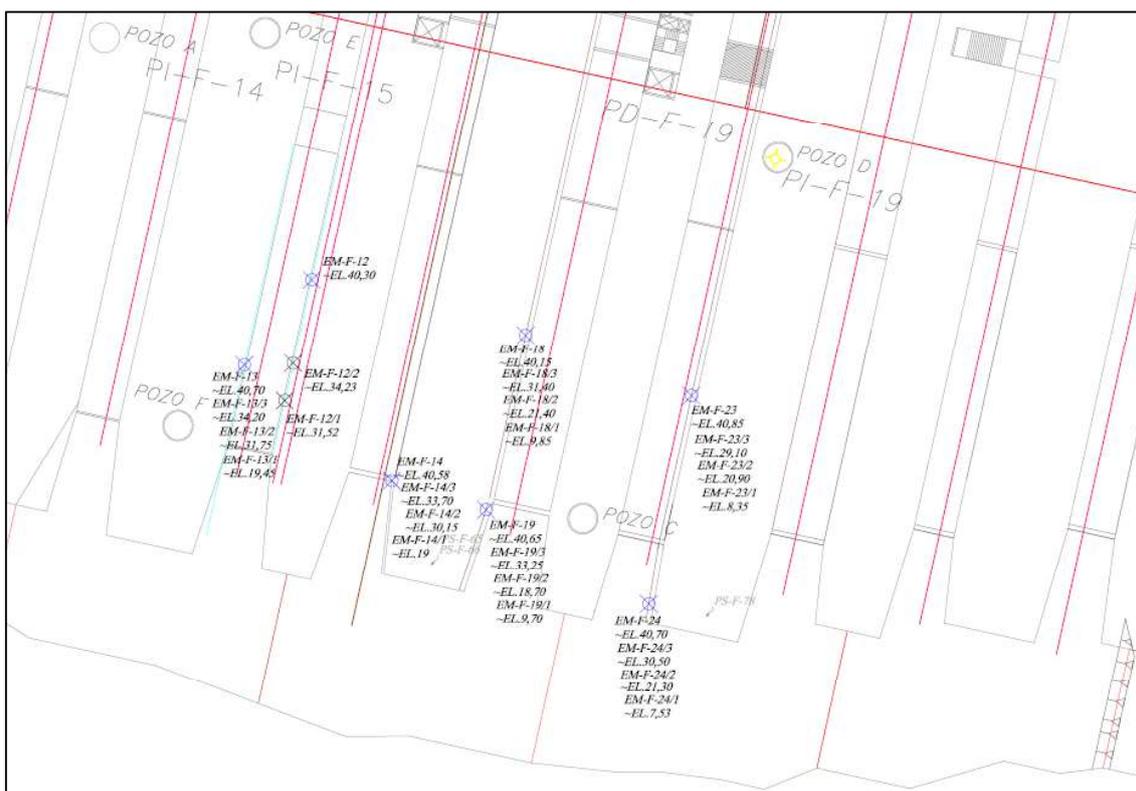


FIGURA 26 - GEORREFERENCIAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - TRECHO F  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014).

A Tabela 10 fornece uma parte das planilhas de georreferenciamento que foram realizadas, pode-se observar que se trata dos extensômetros do trecho D, os valores de coordenadas geográficas X e Y foram obtidas por meio do *software* AutoCAD, os valores de Z foram localizados nos arquivos técnicos das plantas de instrumentação e das fichas de instalação da Usina Hidrelétrica, juntamente com a determinação da feição geológica das hastes.

TABELA 10 - DADOS DE GEORREFENCIAMENTO - TRECHO D

Extensômetros	BOCA DO PROJETO				COTA DE INSTALAÇÃO			Feição
	X	Y	Z	Fundação do Bloco	X	Y	Z	
<i>EM-D-01/1</i>	741684,68	7187263,64	176,2	170,9	741645,28	7187259,56	142,99	BASALTO VESICULAR C
<i>EM-D-01/2</i>	741684,68	7187263,64	176,2	170,9	741666,68	7187261,78	161,05	BASALTO VESICULAR D
<i>EM-D-02/1</i>	741686,41	7187263,42	176,1	171,7	741686,41	7187263,42	141,60	BASALTO VESICULAR C
<i>EM-D-02/2</i>	741686,41	7187263,42	176,1	171,7	741686,41	7187263,42	160,70	BASALTO DENSO D
<i>EM-D-03/1</i>	741685,61	7187262,98	176,1	171,56	741685,61	7187262,98	141,30	BASALTO VESICULAR C
<i>EM-D-03/2</i>	741685,61	7187262,98	176,1	171,56	741685,61	7187262,98	160,70	BASALTO DENSO D
<i>EM-D-04/1</i>	741685,65	7187262,58	176	171,86	741671,02	7187261,07	141,90	BASALTO DENSO C
<i>EM-D-04/2</i>	741685,65	7187262,58	176	171,86	741645,29	7187258,39	161,24	JUNTA D
<i>EM-D-05/1</i>	741683,24	7187277,63	190,6	190	741637,20	7187273,90	151,80	BASALTO DENSO D
<i>EM-D-05/2</i>	741683,24	7187277,63	190,6	190	741657,66	7187275,56	169,03	BASALTO DENSO E
<i>EM-D-06/1</i>	741684,97	7187277,37	191,1	189,6	741684,97	7187277,37	150,40	BASALTO DENSO D
<i>EM-D-06/2</i>	741684,97	7187277,37	191,1	189,6	741684,97	7187277,37	168,70	BASALTO DENSO E
<i>EM-D-07/1</i>	741712,18	7187285,90	191	189,74	741735,68	7187287,81	150,16	BASALTO DENSO D
<i>EM-D-07/2</i>	741712,18	7187285,90	191	189,74	741725,71	7187287,00	167,48	BASALTO DENSO D
<i>EM-D-07/3</i>	741712,18	7187285,90	191	189,74	741717,78	7187286,35	181,25	BASALTO DENSO E

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014) Modificado pela autora (2015).

#### 4.4 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE LEITURA PARA MAPEAMENTO

Um dos fatores importantes na elaboração do mapeamento é a definição de como serão utilizados e trabalhados os dados de leitura, juntamente com o georreferenciamento dos extensômetros.

Em anexo se encontra as planilhas de cada período, com a identificação do nome do instrumento, dados de leitura, coordenadas geográficas (X,Y,Z) e feição geológica inserida. Os detalhes dessas definições podem ser vistos nos capítulos 4.4.1 e 4.4.2.

##### 4.4.1 Decomposição Vertical dos Extensômetros inclinados

Um dos intuitos deste trabalho é analisar o mapeamento das leituras com todos os valores decompostos na vertical, ou seja, os extensômetros que estiverem instalados inclinados a montante ou jusante terão a leitura obtida pelo leiturista decomposta em função do ângulo de inclinação do instrumento.

A Figura 27 ilustra o perfil de instalação de um extensômetro inclinado no trecho A do Vertedouro, pode-se observar que ele se encontra inclinado para montante com inclinação de  $50^\circ$ .

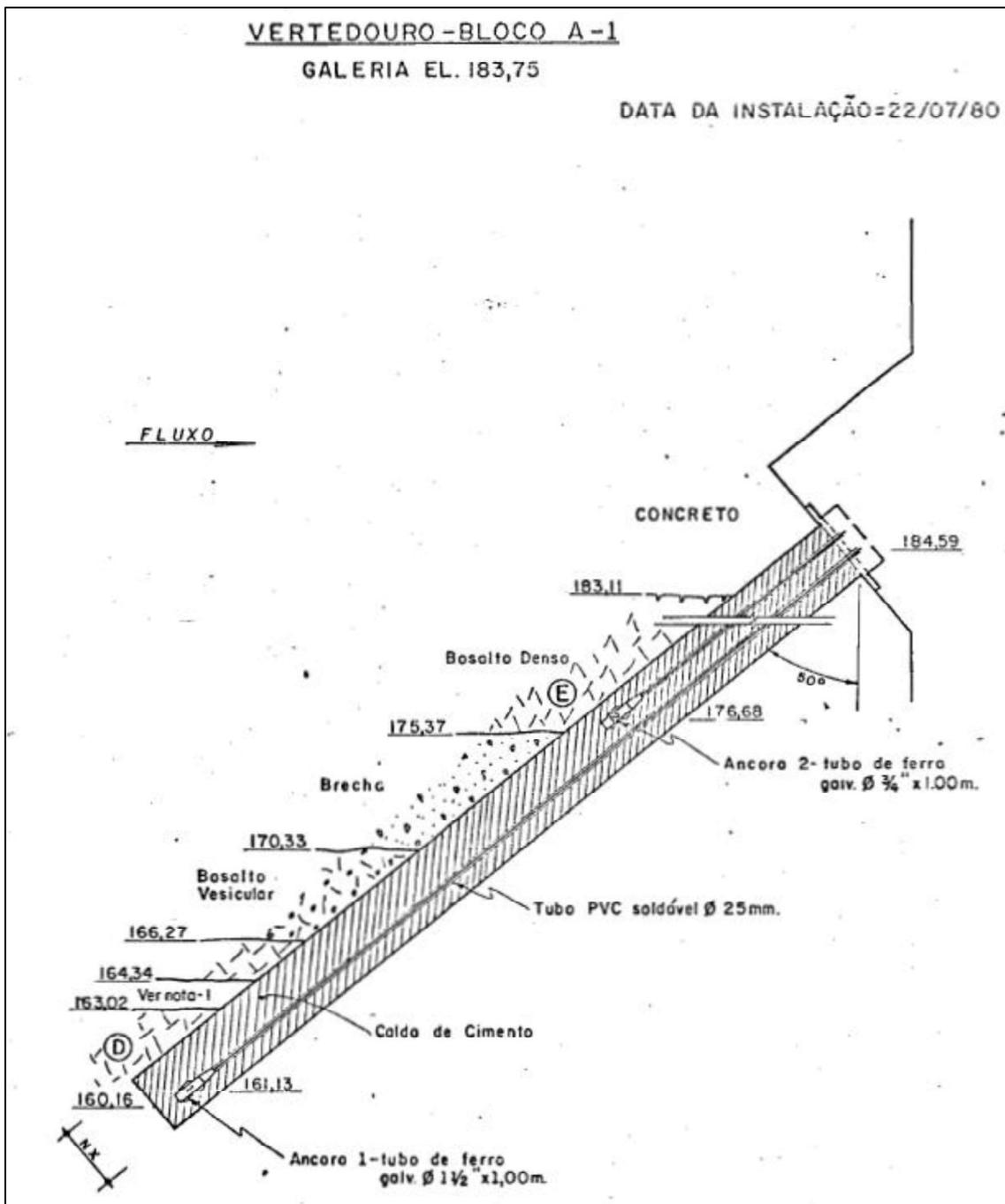


FIGURA 27 - PERFIL DE INSTALAÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO  
FONTE: ITAIPU BINACIONAL (1980).

Para todos os instrumentos inclinados, com exceção das rosetas de extensômetros, que receberão um tratamento diferente, obteve-se o valor de leitura de recalque/distensão na vertical, através do uso de trigonometria por triângulo retângulo, conforme equação demonstrada a seguir:

$$\text{Cateto adjacente a } x = \text{cosseno } (x) * \text{medida da hipotenusa} \quad \text{Equação (4.3)}$$

Sendo, portanto, o cateto adjacente a  $x$  como a leitura verticalizada, a medida da hipotenusa como sendo o valor inclinado e o ângulo correspondente ao cosseno como aquele obtido nas fichas técnicas dos equipamentos.

A Figura 28 ilustra como ficaria os valores encontrados para o extensômetro EM-A-1 (presente na Figura 27) quando ocorre a verticalização dos dados de verão, por exemplo.

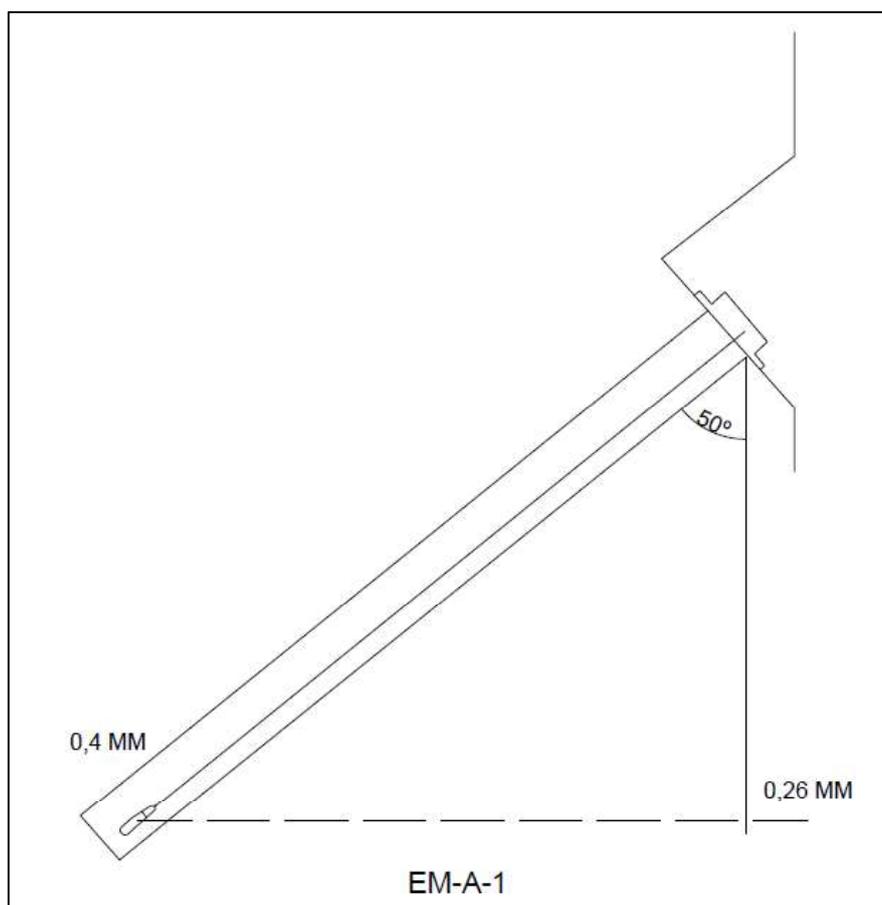


FIGURA 28 - EXEMPLIFICAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO VERTICAL  
FONTE: A AUTORA (2015).

Pode-se notar que a distensão inclinada no mês de análise de verão, a montante, foi de 0,4 mm, com a verticalização em razão do ângulo de instalação este valor, para utilização do mapeamento, será de 0,26 mm.

Com o intuito de listar todos os instrumentos que sofreram variações de leitura devido a sua inclinação, elaborou-se uma tabela, conforme mostrado a seguir, relativo a cada período analisado.

A Tabela 11 ilustra alguns dos instrumentos do trecho A e D e as leituras do período de verão em milímetros, com as alterações e sua devida relação com as coordenadas geográficas dos extensômetros e sua feição geológica de instalação.

TABELA 11 - EXEMPLO DE PLANILHA DE CÁLCULO DOS EXTENSÔMETROS VERTICALIZADOS

Código do Instrumento	Valor de Leitura	Ângulo de Inclinação	Leitura Verticalizada	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Feição Geológica
EM-A-1/1	0,4	50	0,26	741377,9056	7187038,4101	161,13	BASALTO DENSO D
EM-A-10/1	3,31	45	2,34	741624,0300	7186610,0900	109,53	BASALTO DENSO B
EM-A-11/1	0,04	45	0,03	741672,7200	7186648,4000	107,76	BASALTO DENSO B
EM-A-2/1	-0,4	50	-0,40	741379,0001	7187035,4031	159,25	BASALTO DENSO D
EM-A-3/1	0,39	50	0,25	741514,2625	7187088,0399	159,73	BASALTO DENSO D
EM-A-4/1	-0,28	0	-0,28	741516,7751	7187085,2298	158,80	BASALTO DENSO D
EM-A-5/1	-0,82	50	-0,53	741515,2885	7187085,2208	157,94	BASALTO DENSO D
EM-A-6/1	0,65	58	0,34	741695,6231	7187154,0498	160,60	BASALTO DENSO D
EM-A-7/1	-0,7	0	-0,70	741703,1331	7187153,5907	155,65	BASALTO DENSO D
EM-A-8/1	-0,61	50	-0,39	741696,4782	7187151,7006	161,39	BASALTO DENSO D
EM-A-9/1	3,24	45	2,29	741589,2905	7186595,3693	109,46	BASALTO DENSO B
EM-D-10/1	-0,09	50	-0,06	741696,7163	7187487,5284	144,91	BASALTO DENSO D
EM-D-11/1	-0,68	0	-0,68	741698,3131	7187486,8212	145,07	BASALTO DENSO D
EM-D-12/1	-0,77	0	-0,77	741724,7107	7187484,4562	147,02	BASALTO DENSO D
EM-D-13/1	-0,04	50	-0,03	741805,6369	7187777,2426	132,64	BASALTO DENSO D

FONTE: A AUTORA (2015).

#### 4.4.2 Roseta de Extensômetros

A roseta consiste na instalação de três extensômetros múltiplos, a partir da galeria de drenagem a montante, sendo o centro vertical e outros dois inclinados em 30° em relação à vertical, um para montante e outro para jusante, de modo que os três instrumentos estejam situados em um plano vertical normal ao eixo da barragem. A profundidade dos três extensômetros de uma roseta deve ser sempre a mesma e atingir cerca de 1/2 e 1/3 da altura da barragem e estarem abaixo das principais descontinuidades geológicas da fundação, para serem considerados um referencial praticamente fixo (SILVEIRA, 2003).

Pelo fato da coordenada geográfica de leitura (X,Y,Z) das rosetas serem a mesma para os três extensômetros instalados, ou seja, a boca de projeto, instalada na estrutura de concreto da Usina, deve-se obter uma resultante dos valores de recalque.

Como os pontos inferiores de ancoragem dos extensômetros múltiplos não constituem uma referência absoluta, ao se proceder à composição dos deslocamentos dos três extensômetros (haste mais profunda) obtém-se um triângulo e não um ponto, o qual será tão menor quanto maior a profundidade de fixação das ancoragens. Para o cálculo do deslocamento resultante da base da barragem, recomenda-se calcular o centro geométrico do triângulo, no cruzamento das três bissetrizes desse triângulo (SILVEIRA, 2003).

As Figuras a seguir ilustram o cálculo do deslocamento “resultante” da base da barragem a partir da roseta de extensômetros múltiplos, conforme exposto no parágrafo acima, para cada valor dos períodos de análise desse estudo.

É possível analisar, na Figura 29, a geometria para obtenção da resultante tanto para a roseta do trecho F composta pelos extensômetros de número 27,28 e 29, quanto para os de número 32, 33 e 34, a resultante é referente a seta de cor vermelha.

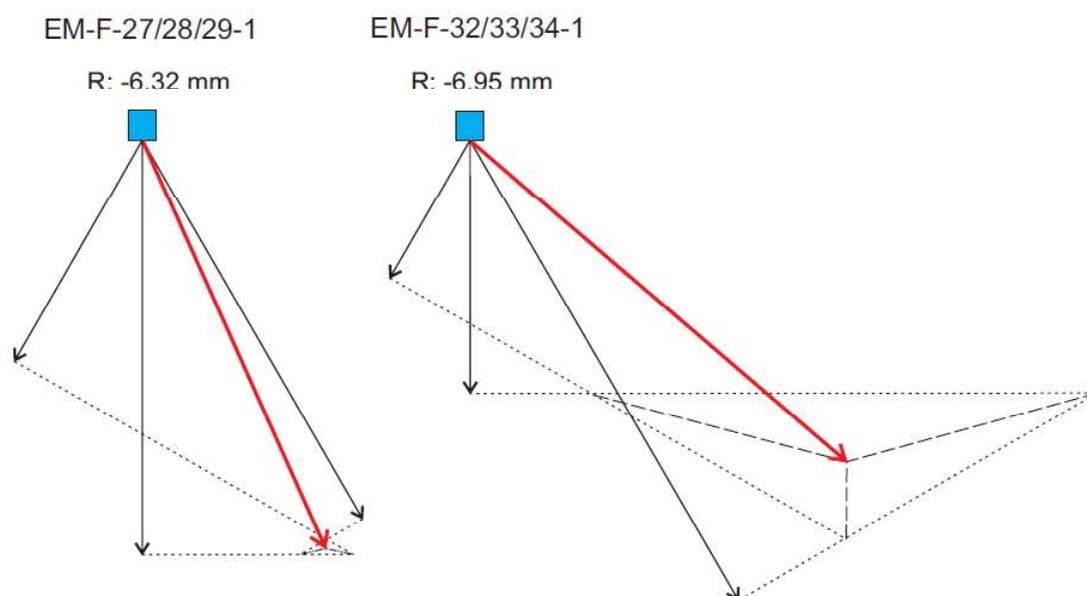


FIGURA 29 - RESULTANTE DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETROS PARA MÁXIMOS HISTÓRICOS  
 FONTE: A AUTORA (2015).

As Figuras 30, 31 e 32 ilustram os valores resultantes para as duas rosetas de extensômetros para o período de inverno de 2014, verão de 2015 e enchimento, respectivamente.

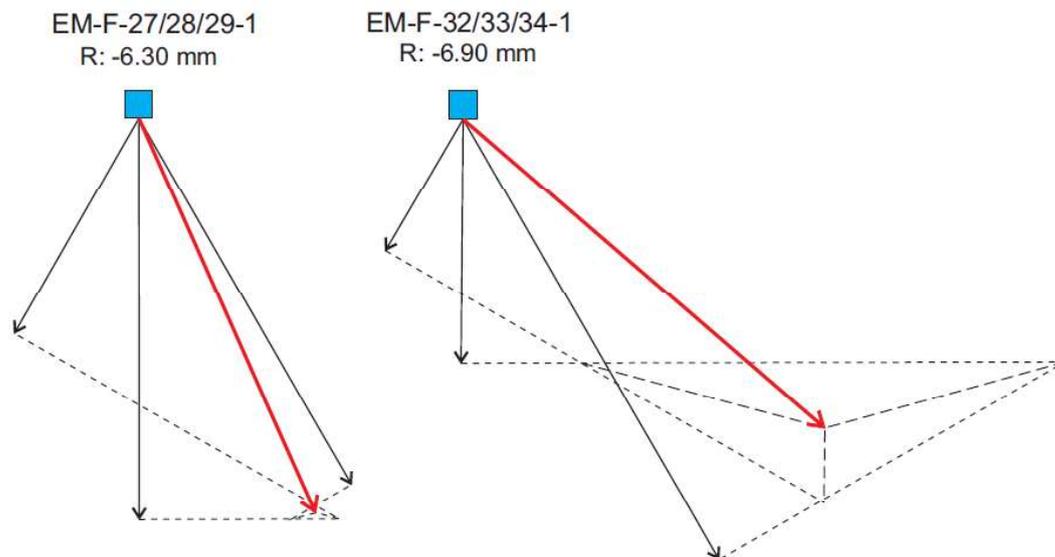


FIGURA 30 - RESULTANTE DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETROS PARA INVERNO  
FONTE: A AUTORA (2015).

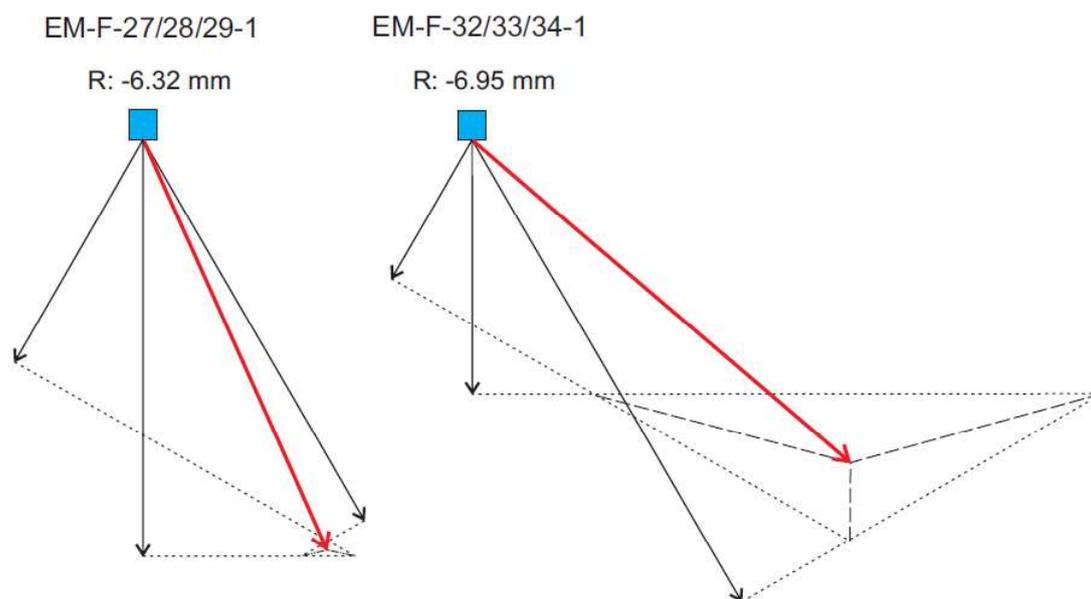


FIGURA 31 - RESULTANTE DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETROS PARA VERÃO  
FONTE: A AUTORA (2015).

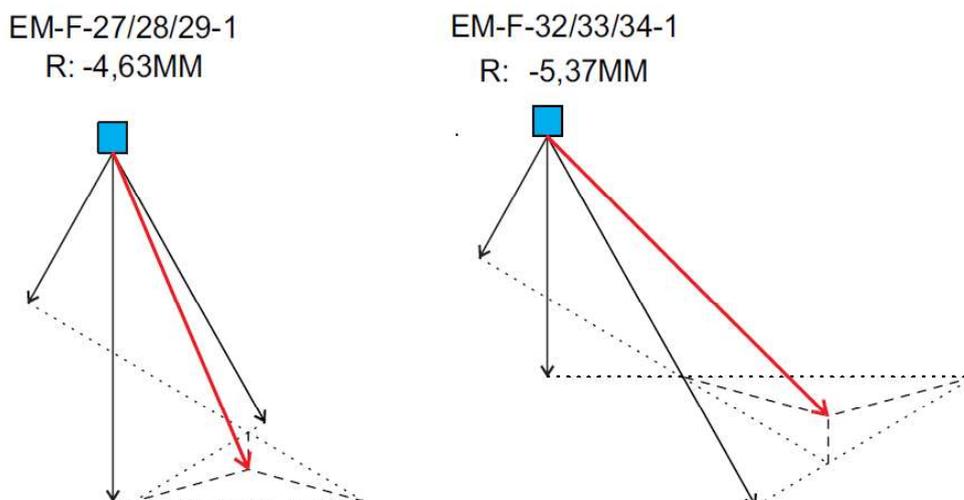


FIGURA 32 - RESULTADO DAS ROSETAS DE EXTENSÔMETRO PARA O ENCHIMENTO  
 FONTE: A AUTORA (2015).

Pode-se observar que em todas as resultantes obtidas pelo método de SILVEIRA (2003) forneceram geometria similar para obtenção das bissetrizes dos triângulos.

#### 4.5 DESENVOLVIMENTO DO MAPEAMENTO

Para que fosse possível elaborar os mapas, necessitou-se criar planilhas em formato *xlsx* (*Microsoft Excel WorkSheet*) com os dados de leituras utilizados, conforme critérios dos itens acima, para assim ser possível a realização das interpolações e locações geodésicas no programa ArcGIS.

As planilhas referentes ao período de Enchimento, Máximos Históricos, Verão e Inverno encontram-se presentes em anexo deste respectivo trabalho.

A Figura 33 apresenta de forma simplificada as etapas para elaboração do mapeamento em ArcGIS.

Deve-se inserir a imagem vetorial da Usina de Itaipu em formato *dwg*, em seguida configurar o sistema de coordenadas a ser utilizado, ou seja, Astro Datum Chuá, UTM Fuso 21.

Adiciona-se a planilha em *xlsx* e define-se nas propriedades os valores exportados das colunas que correspondem as coordenadas geográficas X, Y e Z. Após os pontos dos extensômetros e a imagem vetorial da Usina estiverem estabelecidos, cria-se um *Shapefile*, ou seja, formato de armazenagem de dados vetoriais da Esri para armazenar a posição, formato e atributos de feições

geográficas. É armazenado como um conjunto de arquivos relacionados e contém uma classe de feição.

Para o estudo em questão, o *Shapefile* espacial criado tem formato poligonal, contornando apenas os trechos da Usina analisados.

A Figura 32 ilustra o contorno do *Shapefile* na plataforma ArcGis.

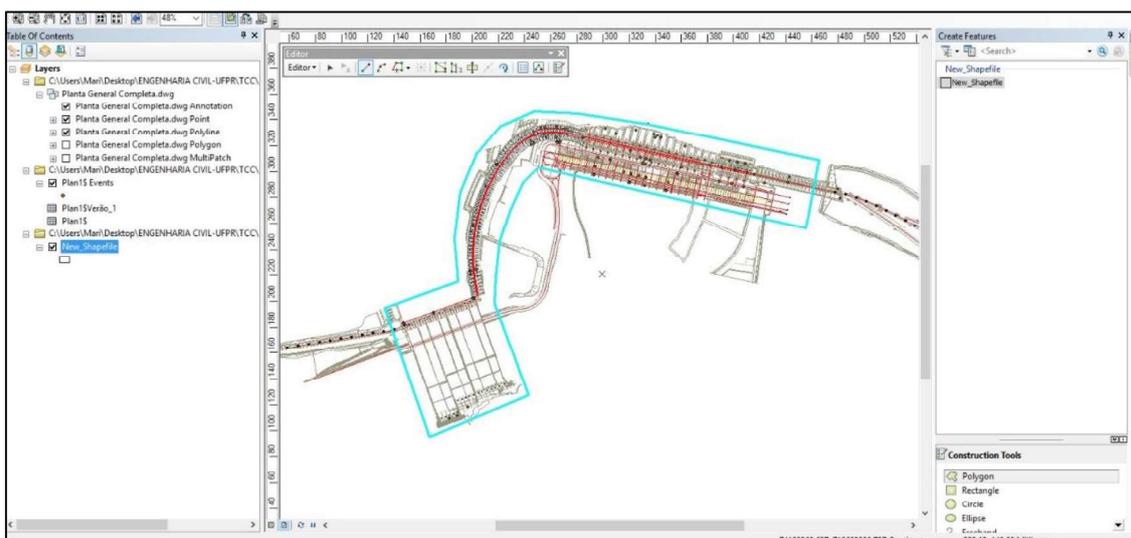


FIGURA 33 - MODELO DE SHAPEFILE CRIADO  
FONTE: A AUTORA (2015).

O método interpolador escolhido, que melhor se adapta à interpretação do mapeamento em questão, foi o de equações multiquádricas, estando incluso no método interpolador de funções de base radial.

Este método foi escolhido por conseguir agrupar baixos erros, boas equações de regressão linear e altos coeficientes de validação dos dados, o que indica uma forte correlação entre os dados medidos e os interpolados (VIEIRA, 2014).

Na etapa final, realiza-se testes estatísticos, neste caso a validação cruzada, para que se possa analisar a qualidade das estimativas.

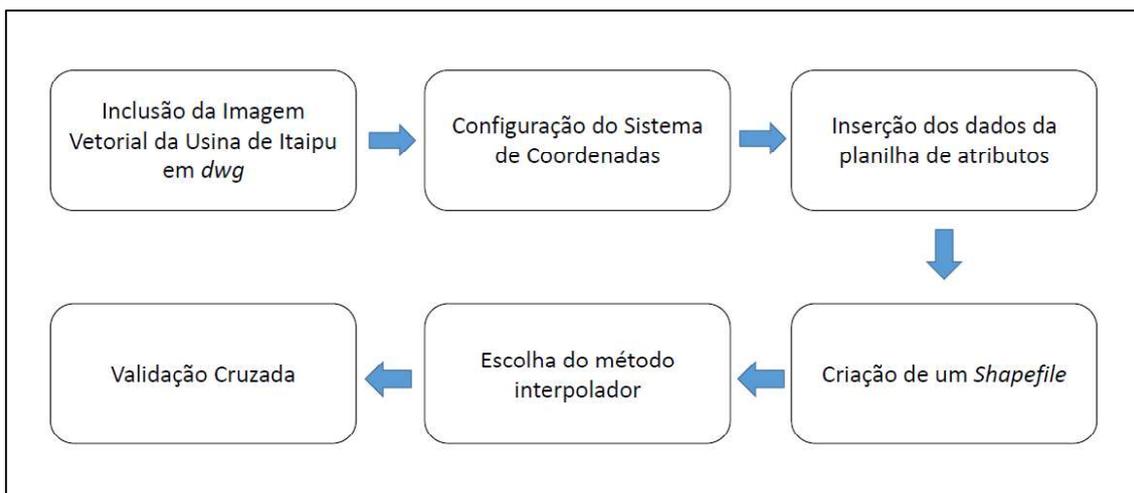


FIGURA 34 - CICLO PARA REALIZAÇÃO DO MAPEAMENTO EM ARCGIS  
 FONTE: A AUTORA (2015).

#### 4.5.1 Validação Cruzada: Método de Validação dos Dados

A validação cruzada é uma maneira de verificar se os parâmetros utilizados para a modelagem dos semivariogramas e dos métodos de interpolação não estão incorretos, pois a verdadeira verificação da validade da interpolação se dá com a comparação dos valores estimados e a realidade de campo

Após realizar as comparações com os valores obtidos e reais, a validação cruzada realiza a estimativa da tendência e auto-correlação do modelo e apresenta a predição e o erro. O processo é executado com todas as observações disponíveis, possibilitando conhecer estatisticamente o erro associado a cada ponto amostrado. (PATIAS *apud* LANDIM, 2003a; ANDRIOTTI, 2003).

A ferramenta de expansão do ArcGIS “*Geostatistical Analyst*” elabora gráficos dos valores preditos *versus* dados medidos.

A equação a seguir apresenta como pode ser avaliado individualmente os erros:

$$E(x_i) = [z(S_i) - Z(S_i)] \quad \text{Equação (4.4)}$$

Sendo:

$z(S_i)$  – Valor previsto de Z para a posição  $S_i$ ;

$Z(S_i)$  – Valor medido de Z para a posição  $S_i$ .

Os erros também podem ser avaliados conjuntamente, através da média dos erros, da raiz da média quadrada, da média dos erros padrão, do erro médio aferido e da raiz da média quadrada aferida.

A média dos erros (*Mean Prediction Errors – ME*) deve apresentar um valor próximo de zero e indica se a estimacão é ou não imparcial, ele é representado como a média da diferença entre o valor medido e previsto, conforme equacão a seguir:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (Z(S_i) - z(S_i))}{n} \quad \text{Equacão (4.5)}$$

A Raiz da Média Quadrada (RMQ) ou *root-mean-square* é a raiz quadrada da média das distâncias quadradas da estimacão à reta da regressão linear da validacão cruzada. Este valor dá uma indicacão da proximidade a que estão os valores estimados dos medidos. Quanto menor, melhor é o modelo empregado.

Já a Média dos Erros Padrão (MEP) ou *average standard error* deve estar igualmente o mais perto de zero possível. No entanto, dá também uma preciosa indicacão de como está sendo tratada a variabilidade na estimacão. Se a MEP estiver acima do RMQ a variabilidade das estimacões está sob estimada, caso contrário (MEP < RMQ) a variabilidade estará subestimada.

O Erro Médio Aferido (EMA) ou *mean standardized* é a média dos erros de estimacão aferidos. Deve estar perto de zero e indica a imparcialidade da estimacão sem depender da escala dos dados (erro aferido é o resultado da divisão do erro de estimacão pelo seu erro de estimacão padrão).

A Raiz da Média Quadrada Aferida (RMQA) ou *root mean square standardized* é outra forma de perceber como a variabilidade está sendo tratada. É obtida dividindo-se cada erro de estimacão pelo seu erro padrão estimado e o resultado destas divisões deve ser em média, semelhante e perto de um. Se este valor estiver acima de um a variabilidade está subestimada, caso contrário (RMQA < 1) está sobestimada (VIEIRA, 2014).

Para avaliar o grau de relacionamento entre duas variáveis utiliza-se também do coeficiente de correlacão linear de Pearson, pondendo variar entre -1 e 1. Valores negativos de r indicam uma correlacão inversa, isto é, quando x

aumenta, y em média diminui (e vice-versa), já os valores positivos, ocorrem quando a correlação é dita direta, isto é, x e y variam no mesmo sentido. Ou seja o coeficiente de Pearson (r) é interpretado como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis X e Y (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

A Figura a seguir ilustra um exemplo da correlação linear de dados realizada na plataforma ArcGIS, pode-se se observar que é dada a função de regressão em razão dos dados medidos e previstos.

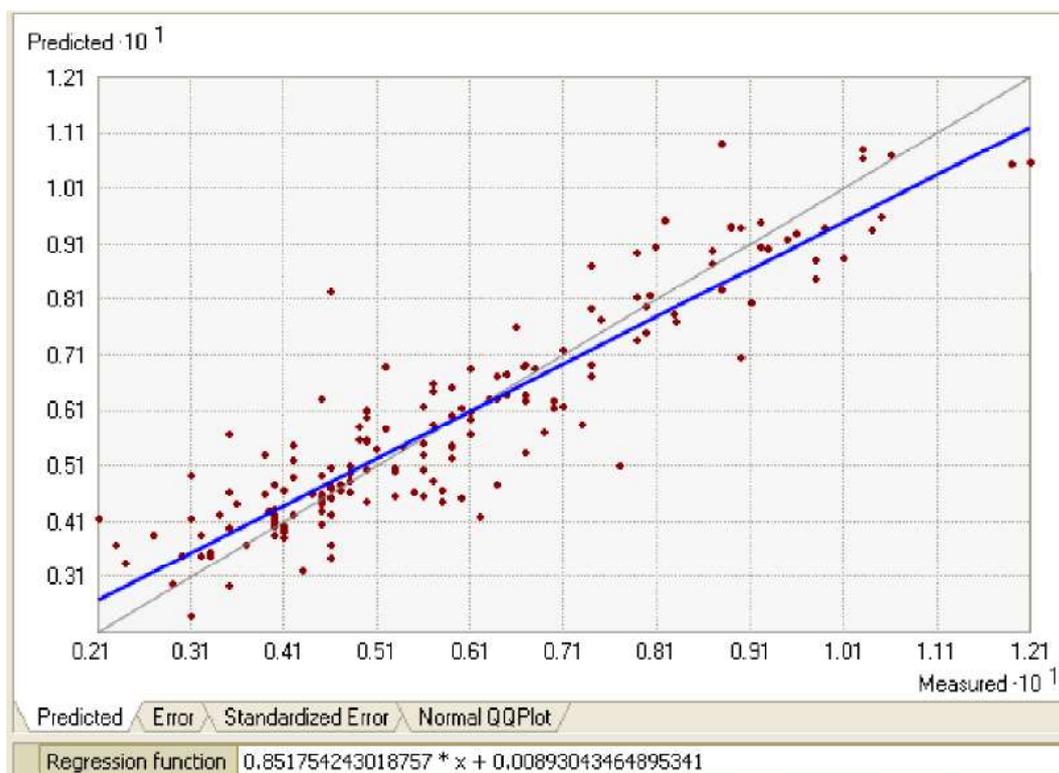


FIGURA 35 -GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS VALORES MEDIDOS E PREVISTOS  
 FONTE: ESRI (2015).

A fórmula para se obter o coeficiente de correlação de Pearson em uma amostra é:

$$r_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad \text{Equação (4.4)}$$

Sendo:

$\sigma_x$  – Desvio Padrão da variável X;

$\sigma_y$  – Desvio Padrão da variável Y;

$Cov(X,Y)$  – Covariância de X e Y.

Uma vez determinada a existência de correlação da população, pode-se avaliá-la qualitativamente quanto à intensidade, conforme os critérios a seguir: (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Se  $0,00 < r < 0,30$ , existe fraca correlação linear;

Se  $0,30 \leq r < 0,60$ , existe moderada correlação linear;

Se  $0,60 \leq r < 0,90$ , existe forte correlação linear;

Se  $0,90 \leq r < 1,00$ , existe correlação linear muito forte.

#### 4.5.2 Validação Cruzada dos Períodos de Leitura

Os valores de validação Cruzada dos dados de Enchimento, máximos históricos, verão e inverno são apresentados a seguir, conforme cada correlação de dados utilizou-se diferentes valores para melhor obtenção de uma correlação linear satisfatória.

Nas propriedades gerais, o parâmetro de Kernel controla o grau da escala de variação da superfície, permitindo controlar a influência dos pontos conhecidos nos valores interpolados. Quanto maior for este parâmetro, mais suave será a superfície. O ArcGIS tem a opção de otimização, escolhendo o valor de parâmetro com menor erro quadrático médio.

A ferramenta *Search Neighborhood* é utilizada para determinar a vizinhança de pesquisa, define quais pontos serão usados para controlar a saída. A seguir são apresentados alguns critérios de análise presentes neste setor:

- *Maximum neighbors* — O número máximo de vizinhos utilizados para estimar o valor no local desconhecido;
- *Minimum neighbors* — O número mínimo de vizinhos utilizados para estimar o valor no local desconhecido;
- *Sector type* — É a geometria da vizinhança de pesquisa. Ao se dividir o bairro em setores, serão aplicadas as restrições máximas e mínimas para cada sector;
- *Angle* — O ângulo de rotação do eixo (círculo) ou eixo semi-maior (elipse) da janela do movimento;

- *Major semiaxis* — É o valor do maior semi-eixo da vizinhança de pesquisa;
- *Minor semiaxis* — É o valor do menor semi-eixo da vizinhança de pesquisa.

Os dados utilizados para a geração da validação cruzada dos períodos analisados, encontra-se apresentado nas figuras 36, 37, 38 e 39.

Os valores referentes a cada critério de análise foram estipulados e obtidos em função de tentativas, com o intuito de se alcançar a maior correlação linear de dados possível em razão dos parâmetros interpolados.

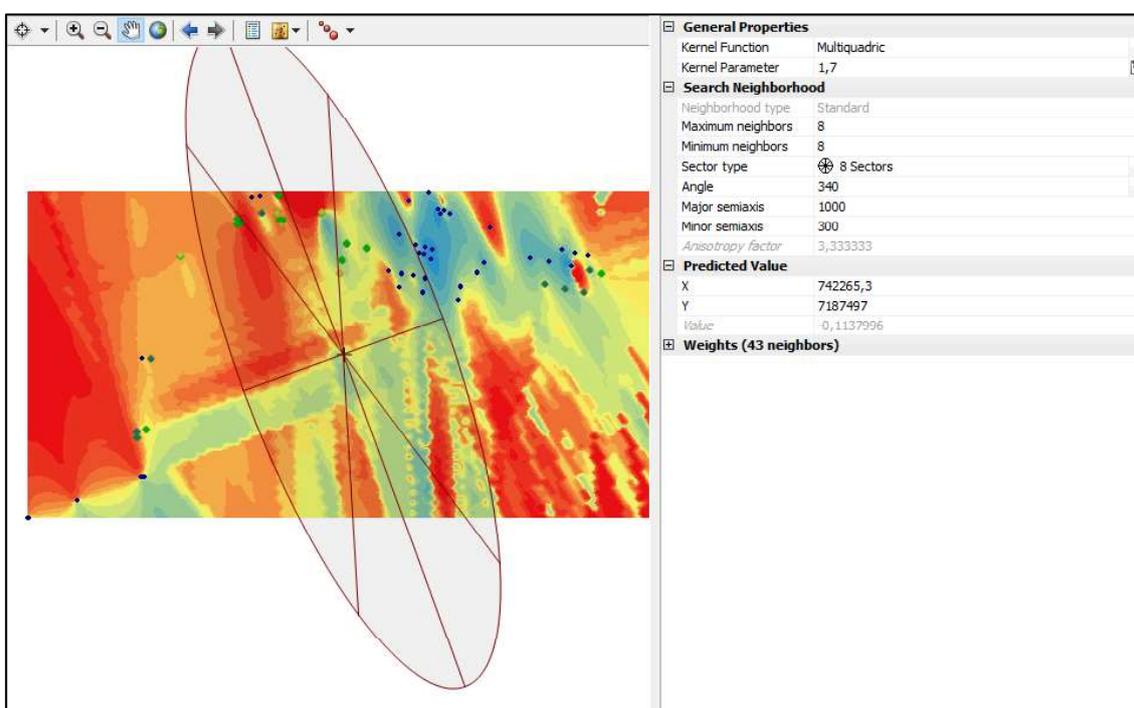


FIGURA 36 - VALIDAÇÃO CRUZADA PARA OS DADOS DE ENCHIMENTO

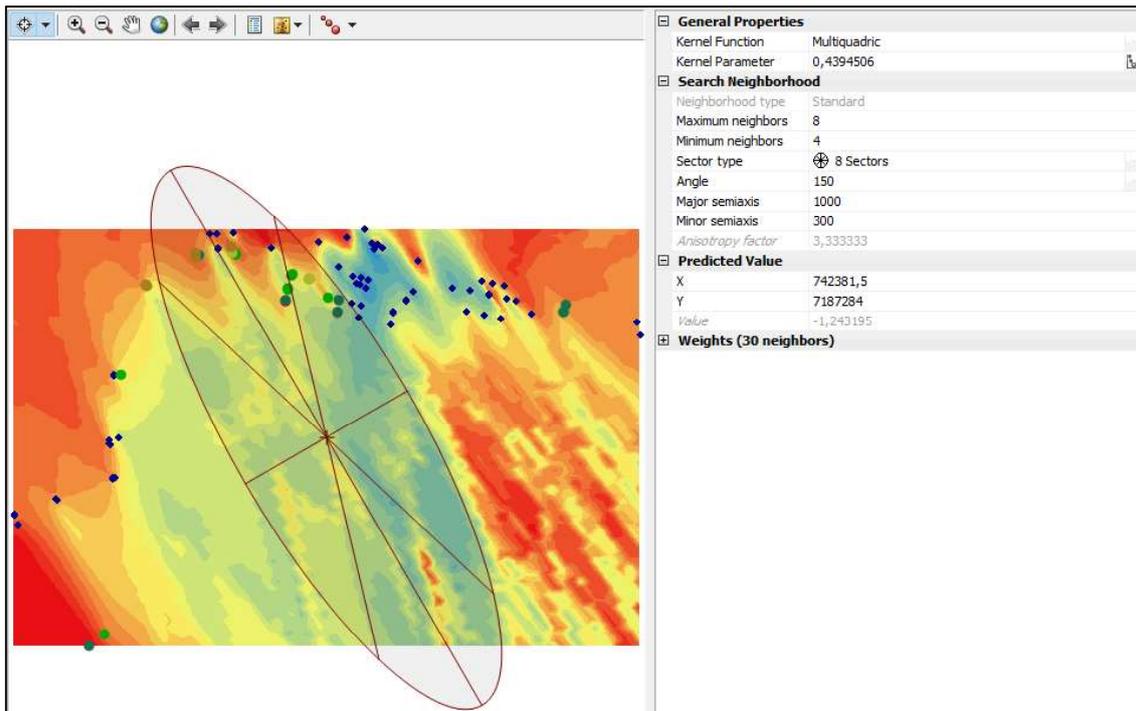


FIGURA 37 - VALIDAÇÃO CRUZADA PARA O PERÍODO DE MÁXIMOS HISTÓRICOS

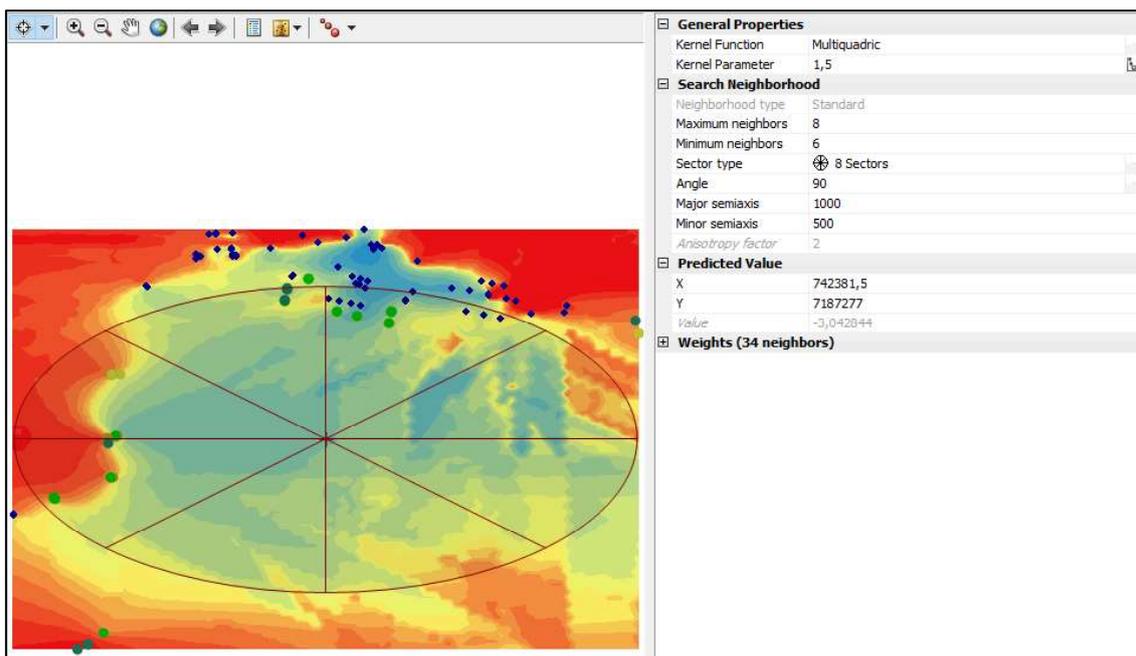


FIGURA 38 - VALIDAÇÃO CRUZADA PARA O PERÍODO DE VERÃO

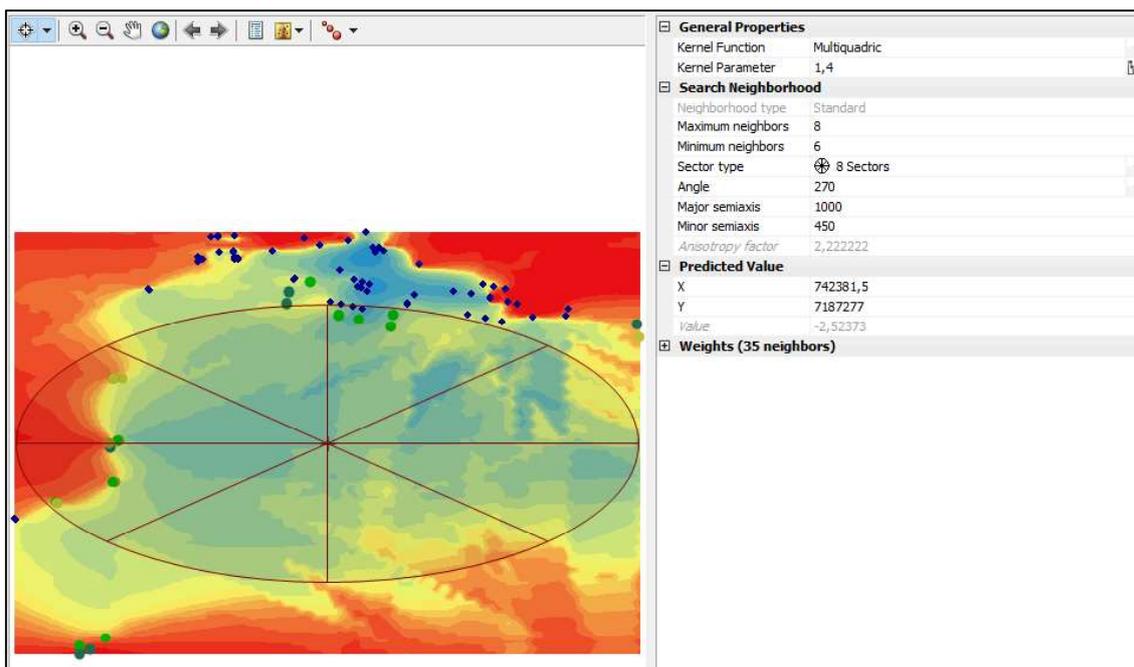


FIGURA 39 - VALIDAÇÃO CRUZADA DO PERÍODO DE INVERNO

As Figuras a seguir ilustram a correlação linear obtida para os dados de Máximos históricos, Verão (Março/2015), Inverno (Setembro/2014) e Período de Enchimento. A abscissa é referente ao valor medido e a ordenada ao valor previsto para as regiões de interpolação.

Pode-se observar que, conforme os critérios de validação cruzada, o coeficiente de correlação de Pearson está dentro do intervalo de  $0,60 \leq r < 0,90$ , ou seja, os mapeamentos apresentam forte correlação linear, além de uma quantidade relativamente baixa de erros.

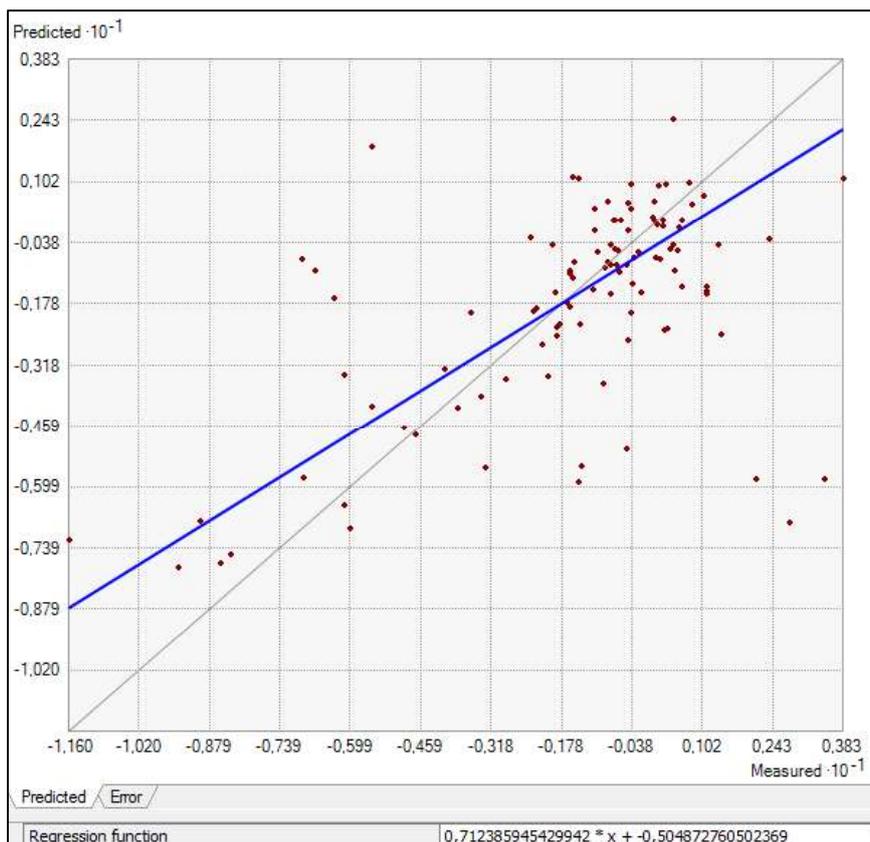


FIGURA 40 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE MÁXIMOS HISTÓRICOS

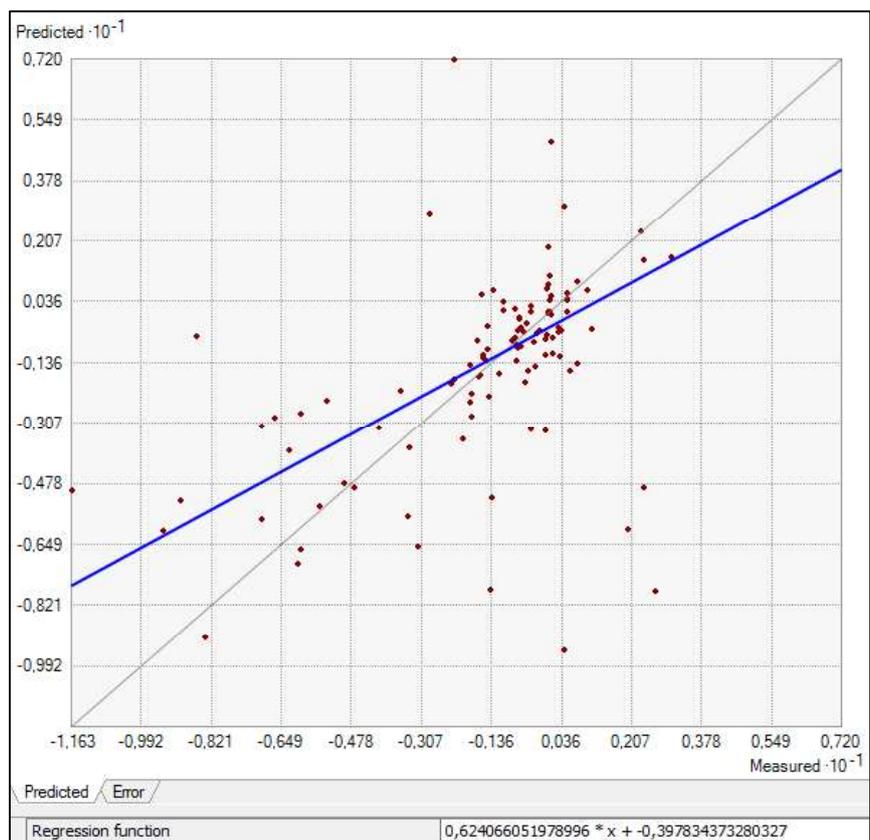


FIGURA 41 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE VERÃO

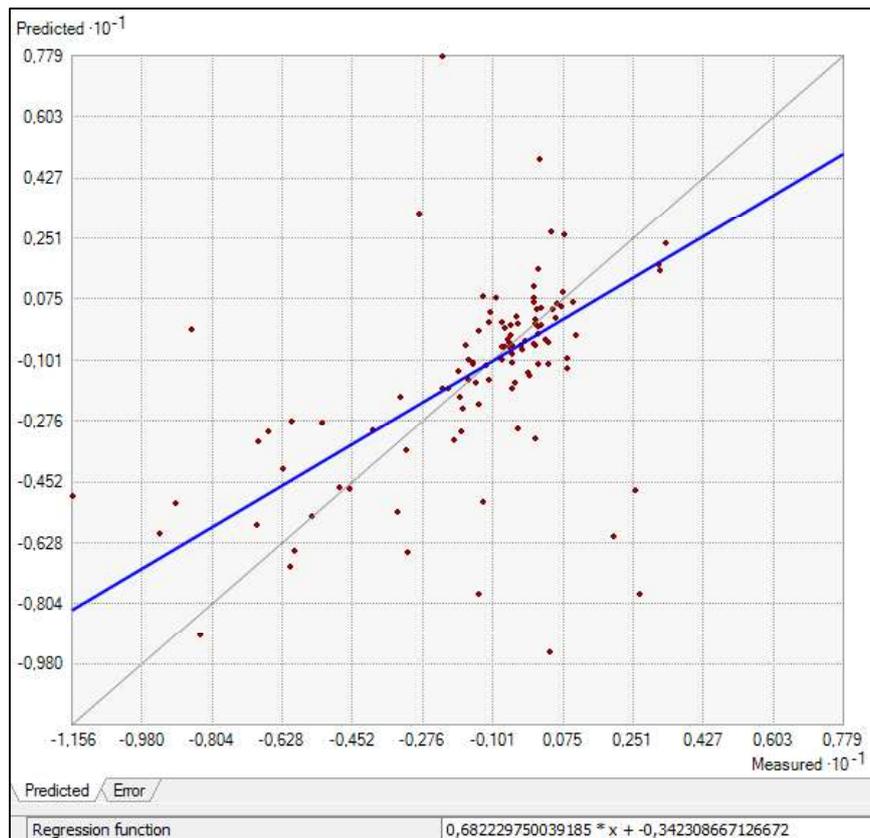


FIGURA 42 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE INVERNO

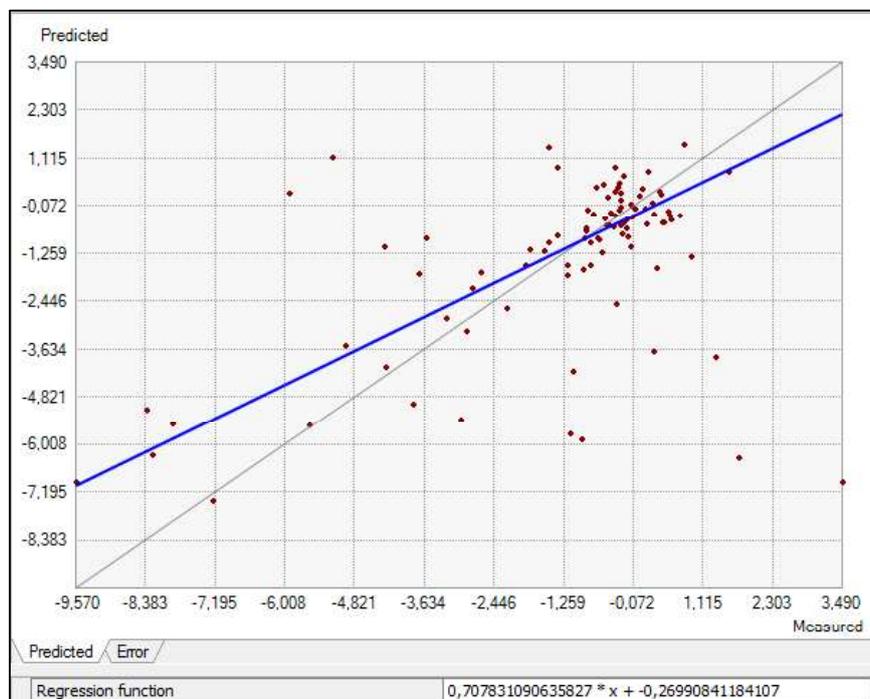


FIGURA 43 - CORRELAÇÃO LINEAR DOS DADOS DE ENCHIMENTO

## 5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 FORÇAS ATUANTES NA ESTRUTURA

É notório, durante o desenvolvimento da pesquisa, que a fundação da estrutura sofre variações ao longo do tempo, assim como a barragem também passa por movimentações.

A Figura 44 ilustra as forças atuantes básicas, assim como as possíveis variações de comportamento da estrutura decorrentes delas.

O gradiente hidráulico gerado pela diferença entre os níveis de água à montante e jusante faz com que a água do reservatório tente se deslocar para jusante, objetivando atingir o equilíbrio hidráulico. Sendo assim, a água percola através do maciço da fundação da barragem, o que é considerado um dos principais fatores de instabilidade em potencial.

Juntamente com o processo de percolação pelo maciço, a água infiltrada gera forças verticais agindo de baixo para cima, mais conhecidas como subpressões na fundação ( $F_{sub}$ ). A força horizontal hidrostática, proveniente da carga hidráulica do reservatório ( $F_{hidrostática}$ ), age contra a estrutura de barramento, juntamente com a ação da subpressão atuam como forças desestabilizadoras, podendo gerar o tombamento/deslizamento da estrutura. Enquanto que o peso próprio da barragem ( $P$ ) atua como força estabilizadora.

Os esforços que atuam sobre as rochas da fundação determinam a deformação e o comportamento mecânico do conjunto do maciço.

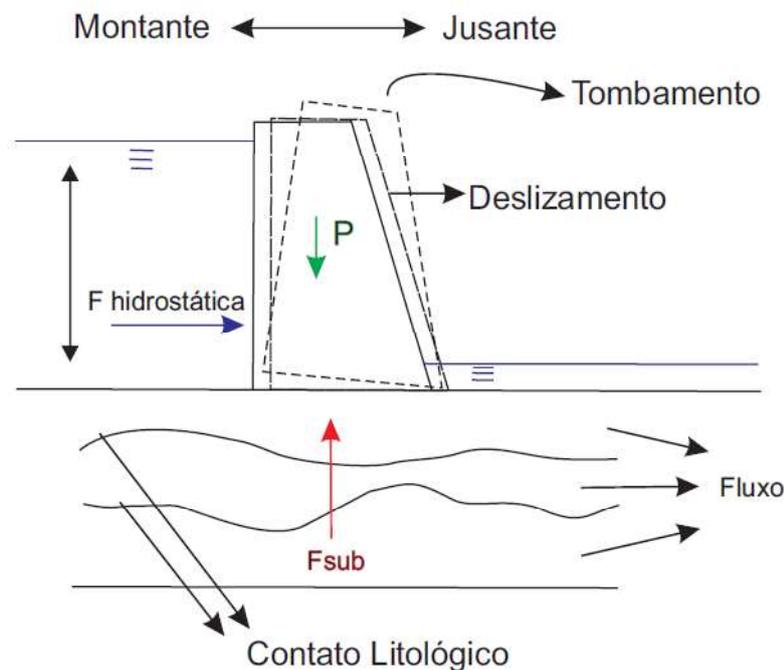


FIGURA 44 - ILUSTRAÇÃO DAS CONDIÇÕES BÁSICAS DE CARREGAMENTO E ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE CONCRETO À GRAVIDADE

Os mapas apresentam escala gráfica variando entre 8 mm e -12 mm, sendo que a mesma variação de cores foi utilizada nos quatro mapas com o intuito de uniformizar a análise final. Quanto maior for o recalque lido pelo extensômetro em determinada região, maior será a tendência de coloração verde, caso contrário, as distensões serão voltadas para cores mais avermelhadas.

## 5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO PERÍODO DE ENCHIMENTO (1982-1984)

No comportamento das obras em maciços rochosos, as deformações são influenciadas pelo fator tempo, em parte pelo fato de existir uma solicitação permanente decorrente do peso próprio da barragem e das solicitações hidrostáticas, que podem instalar algumas vezes estados de tensão significativos, além do fato que na presença de anomalias geológicas, a estrutura de fundação pode apresentar fluência apreciável. Portanto, é comum observarem-se deformações das fundações em função do tempo, em particular

de barragens de concreto, com altura superior a 50-100 metros (SILVEIRA, 2003).

A crista do vertedouro (Trecho A) apresentou deformações lentas de recalque nos extensômetros mais à jusante da crista, já os que se encontravam à montante (EM-A-1/1, EM-A-3/1 e EM-A-6/1) apresentaram leves distensões.

Vale salientar que os extensômetros no trampolim das calhas foram instalados após o período de enchimento analisado, portanto, a região das calhas neste mapeamento não reflete exatamente o comportamento esperado da estrutura, sendo assim, a estrutura das calhas do vertedouro não foram adicionadas ao *shapefile* do mapeamento.

Os extensômetros verticais no trecho D da Barragem Lateral Direita mostraram pequena distensão da fundação sob a cabeça dos blocos, comportamento este, consequência da aplicação do empuxo hidrostático.

Já no início do enchimento, a barragem de ligação (Trecho E) apresentavam sinais de distensão, sendo que o extensômetro EM-E-2/1 sofreu um deslocamento vertical de 0,71 mm.

Os maiores valores de recalque desse período se deram especialmente no bloco F, sendo que o extensômetro EM-F-22 apresentou o maior valor de recalque (-9,57 mm). A região da casa-de-força (Trecho U), como pode ser visto no mapeamento, também indicou deslocamentos verticais de recalque, porém relativamente menores que o Trecho F, à montante.

Os extensômetros verticais instalados na fundação dos blocos do trecho H medem os recalques da barragem ao longo de aproximadamente 65 metros de fundação, entre as elevações EL. 65 e EL. 0 m, abaixo da junta A. Em sua maioria apresentaram recalques da fundação, Segundo SILVEIRA (2003), as previsões teóricas indicavam distensões a montante e na parte central da estrutura, com a ocorrência de recalques somente a jusante, porém, a distribuição da carga hidrostática parece ter solicitado mais a região central (EM-H-33/1; EM-H-34/1; EM-H-37/1), destacando-se ainda a existência de juntas verticais entre monolitos, que talvez teriam tido contribuição. É possível visualizar no mapa que o trecho da estrutura de desvio (Trecho H) apresentou recalques na região de montante.

Depois do fechamento das comportas do desvio em outubro de 1982 e a aplicação da carga do reservatório quase total, ocorreu um aumento das

deformações verticais, como também das horizontais na fundação, e a sua distribuição foi alterada, refletindo a transferência das cargas normais não uniformes e de cisalhamento para a fundação horizontal e as ombreiras íngremes. As deformações medidas indicaram que conforme as microfissuras da fundação eram submetidas à pressão e a rocha sofria alguns ajustes devido à fluência, foi alcançada uma condição estável de equilíbrio elástico depois de um período de diversos meses. Depois disso, a estrutura e a fundação reagiram essencialmente como uma unidade elástica inteiriça. (ITAIPU, 2009).

A Figura 45 ilustra o comportamento gráfico do extensômetro EM-F-22/1 instalado no bloco F 19/20, sendo o maior valor de recalque obtido durante o período de enchimento (1982-1984). Pode-se observar que o instrumento tem uma tendência de aumento de recalque durante o passar dos anos, porém, nos últimos 10 anos os valores de recalque apresentaram uma estabilização no intervalo de -11,40 mm e -11,60 mm. Após o enchimento do reservatório a resposta da fundação causada pela força hidrostática aplicada pode apresentar um *delay*, ou seja, não corresponder a um comportamento imediato devido as forças atuantes, mas sim durante o decorrer do tempo.

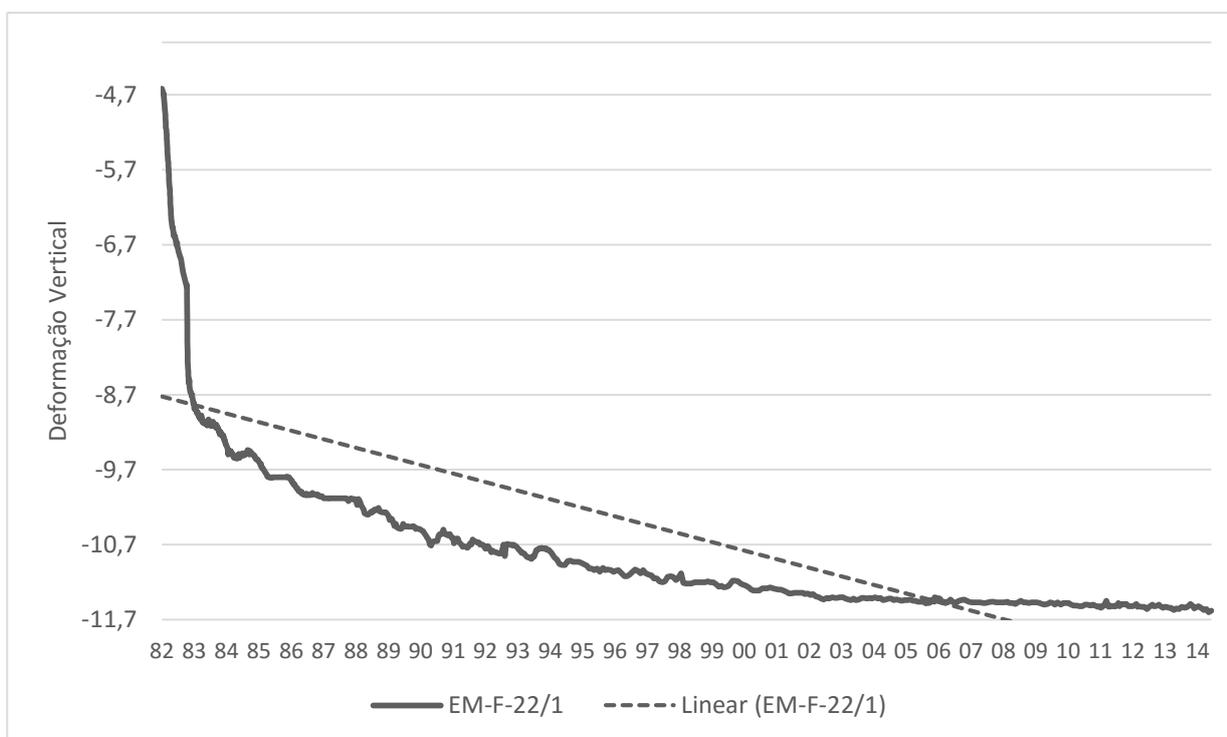


FIGURA 45 - GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO EXTENSÔMETRO EM-F-22/1 - PERÍODO 1982 À 2014  
FONTE: A AUTORA (2015).

A progressão da deformação do maciço pode ser vista também na Figura 47, indicando o gráfico de deformação entre o período de enchimento e o registro de máximos históricos (Jan/1982 – Jan/2014) no trecho F, região com maior solicitação de recalque.

Percebe-se que os gráficos de deslocamento apresentam comportamento parecidos, o extensômetro EM-F-21/1 à montante apresenta distensões, já os instrumentos à jusante ilustram recalques da estrutura. A variação do instrumento EM-F-22/1 de aproximadamente 2,00 mm de recalque entre o enchimento e os máximos valores históricos obtidos até Janeiro de 2014 demonstrou ter sido uma progressão de deformação da estrutura, como ilustrado na Figura 46.

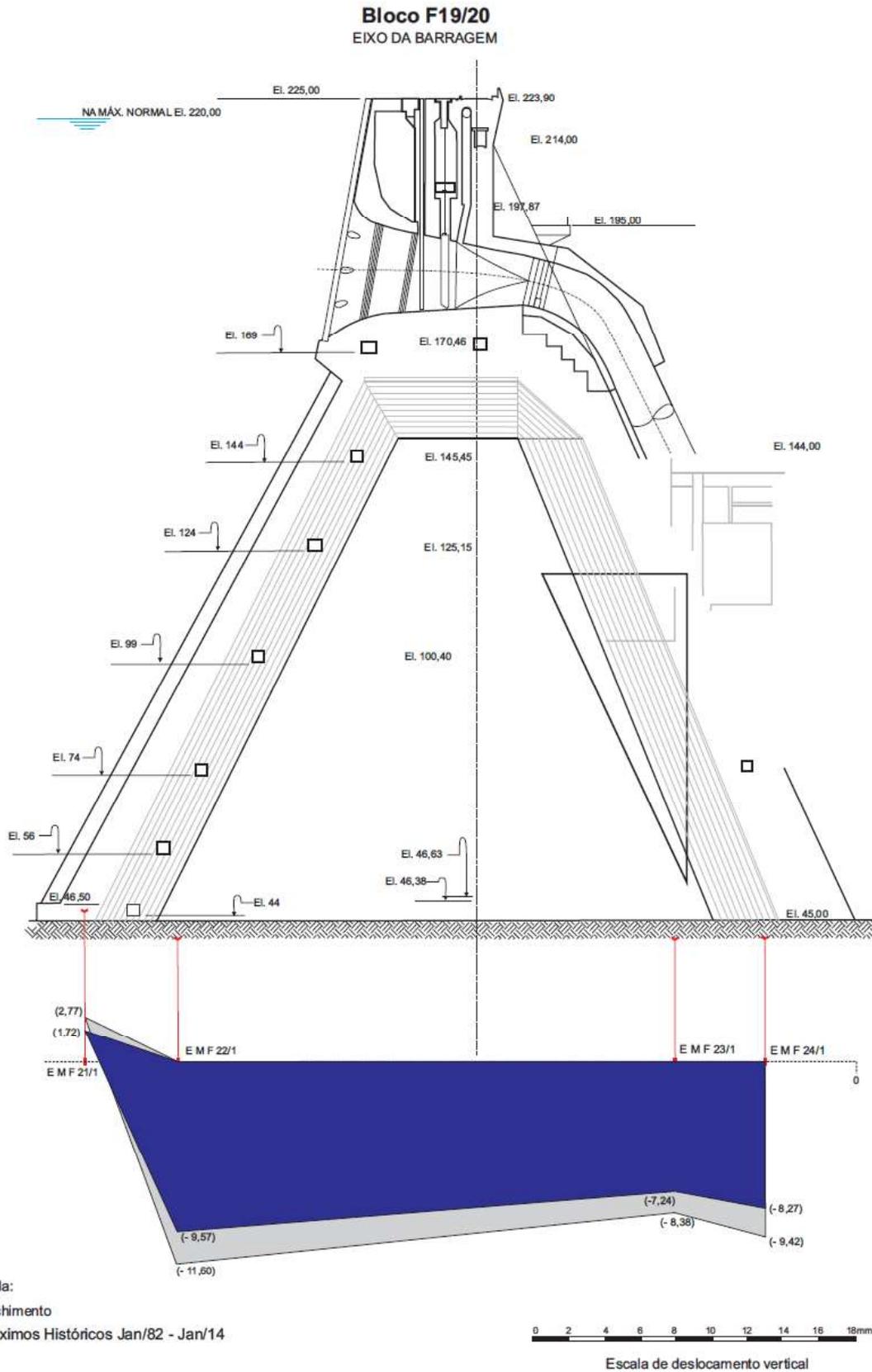


FIGURA 46 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DA SEÇÃO DO BLOCO F - PERÍODO DE ENCHIMENTO E MÁXIMOS HISTÓRICOS  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014). Modificado pela autora (2015).

### 5.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO PERÍODO DE MÁXIMOS HISTÓRICOS (JAN/1982 – JAN/2014)

Os valores de máximos históricos referem-se aos dados de máxima distensão/recalque obtidos entre o período de Janeiro de 1982 até Janeiro 2014.

O maior valor de distensão se deu no trecho A (Vertedouro), nota-se pelo mapeamento presente no anexo A.2, que a região do trampolim do vertedouro sofre uma progressão de distensão para recalque no sentido contrário ao Rio Paraná, a distensão de 3,83 mm no extensômetro EM-A-10/1 está instalado em basalto denso B no trecho 05 da calha lateral direita.

O gráfico a seguir (FIGURA 47) ilustra o deslocamento vertical sofrido pela seção do extensômetro EM-A-10/1, em relação aos instrumentos EM-A-9/1, EM-A-1/1 e EM-A-2/1. Este gráfico não pode ser comparado com o período de enchimento, como foi feito com a Figura 45, pois os extensômetros presentes no trampolim foram instalados alguns anos depois do enchimento do reservatório.

Percebe-se que na crista do vertedouro apresenta condições estáveis de distensão à montante e recalque à jusante, este comportamento pode ser explicado devido a força hidrostática causada pelo reservatório e a influência do peso da comporta na estrutura da crista. Pode-se notar que os valores de verão de 2015 e Inverno de 2014 já apresentam valores maiores que os máximos históricos (Janeiro/1982 – Janeiro/2014) em relação aos instrumentos instalados na crista do vertedouro.

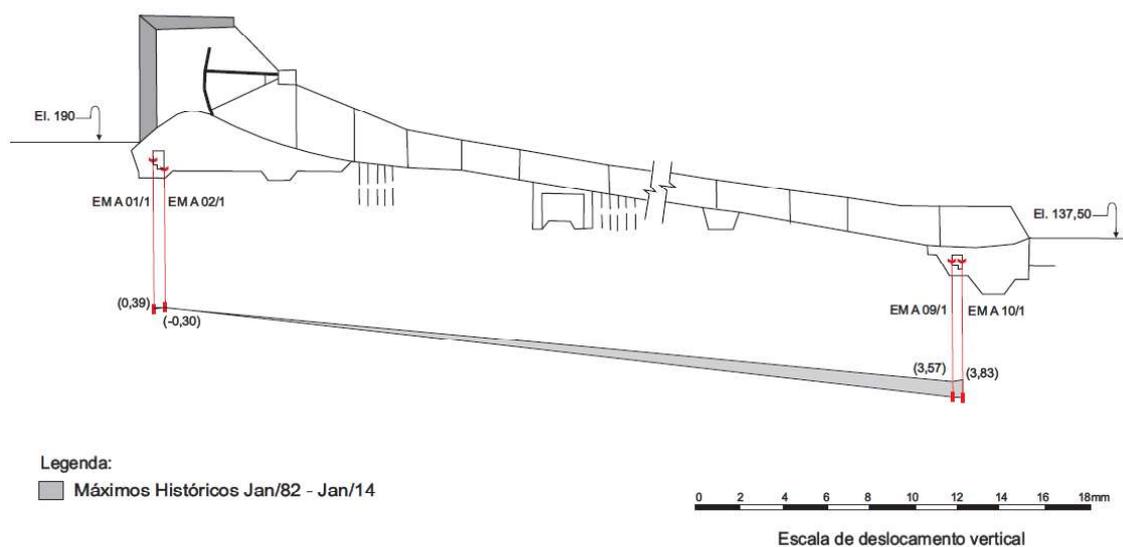


FIGURA 47 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL NA SEÇÃO DO VERTEDOURO - PERÍODO DE MÁXIMOS HISTÓRICOS  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009). Modificado pela autora (2015).

O trecho D (Barragem Lateral Direita) apresenta maiores valores de distensão à montante e recalque à jusante.

No trecho E (Bloco de Ligação) existe a presença de 04 extensômetros instalados, porém para essa região apenas 03 estão instalados em Basalto Denso, pode-se observar que desde o período de enchimento esta região já apresentava distensões à montante devido a geometria da estrutura de ligação.

Os máximos valores analisados na barragem principal indicam que o recalque mais significativo ocorre no bloco F19/20, extensômetro EM-F-22/1, instalado no basalto denso A, ilustrado no gráfico da Figura 46.

#### 5.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VERÃO (MARÇO/2015) - INVERNO (SETEMBRO/2014)

Os mapeamentos do período de Verão (Março/2015) e Inverno (Setembro/2014) estão ilustrados em anexo.

As condições de carregamento, assim como as propriedades dos materiais podem se alterar conforme o ciclo de vida da barragem, a instrumentação pode identificar algumas dessas mudanças.

O intuito da análise Verão/Inverno era representar as diferenças de comportamento em relação as condições climáticas que a Barragem e fundação

estão submetidas. No Verão, conforme é possível visualizar no mapa em anexo, ocorre uma expansão do concreto, fazendo com que o bloco se desloque no sentido de montante, sendo assim, este ocorrido faz com que a barragem comprima a fundação, vale salientar que essas movimentações são sutis e dentro dos limites especificados em projeto.

A expansão e a contração do concreto podem mudar a distribuição de carga na fundação e conseqüentemente alteram a abertura das juntas e a distribuição da subpressão. Análises teóricas mostraram que no inverno a tensão próxima ao paramento de montante é menos compressiva que no verão e o carregamento que originalmente ocorria no pé de montante é transferido para jusante (OSAKO, 2002).

A Barragem lateral direita (Trecho D), demonstra a movimentação da estrutura à montante, levando a um conseqüente aumento da compressão à jusante.

Devido as baixas temperaturas em que a estrutura de concreto é submetida, no inverno a barragem tem uma tendência de comportamento inversa, em que ela é comprimida fazendo com que o bloco retorne à posição inicial, aliviando as tensões da fundação causadas durante as altas temperaturas do verão.

Conforme discutido anteriormente, os valores de recalque/distensão tem comportamento senoidal, caracterizando uma atuação cíclica da estrutura, condicionada as variações ambientais que envolvem a estrutura.

No mapeamento de inverno, esse comportamento é sentido levemente, especialmente nos trechos D, E e F de movimentar-se no sentido de jusante.

O período de inverno apresentou maior valor de distensão no extensômetro EM-A-9/1, instalado na calha lateral direita do Trampolim do trecho A (Vertedouro), a Figura 48 ilustra o esquema gráfico de deslocamentos verticais na seção do trecho analisado, composto pelos extensômetros EM-A-1/1 e EM-A-2/1 instalados na crista do vertedouro, e EM-A-9/1 e EM-A-10/1 no trampolim à jusante.

Observa-se que a seção em análise tem demonstrado nos mapeamentos distensão à montante e recalque à jusante. Já a região do trampolim, onde consta o maior valor de distensão do período, a estrutura tem uma movimentação maior de deslocamento vertical no inverno.

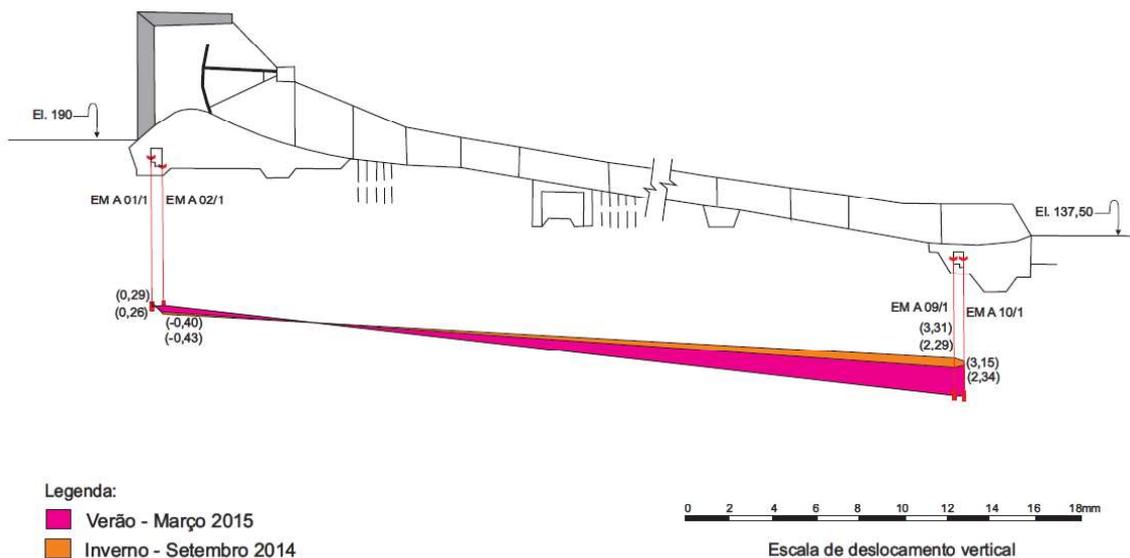


FIGURA 48 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DA SEÇÃO DO VERTEDOIRO - PERÍODO VERÃO E INVERNO

FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2009). Modificado pela autora (2015).

O esquema gráfico a seguir (FIGURA 49) apresenta a seção crítica com um dos maiores valores de recalque encontrados (Bloco F 19/20), tanto no mapeamento de verão quanto inverno é possível verificar que o trecho F, onde se encontra as chavetas de concreto e as maiores cargas devido a altura de 196 metros, sendo a região de maior recalque. Pode-se observar que o comportamento dos dois períodos é muito parecida e apresentam pequenas variações milimétricas de deformações por extensômetro, como é o caso do instrumento EM-F-22/1, instalado à montante, que no verão (Cor Rosa) recalcou -11,63 mm e no inverno (Cor Laranja) recalcou - 11,56 mm.

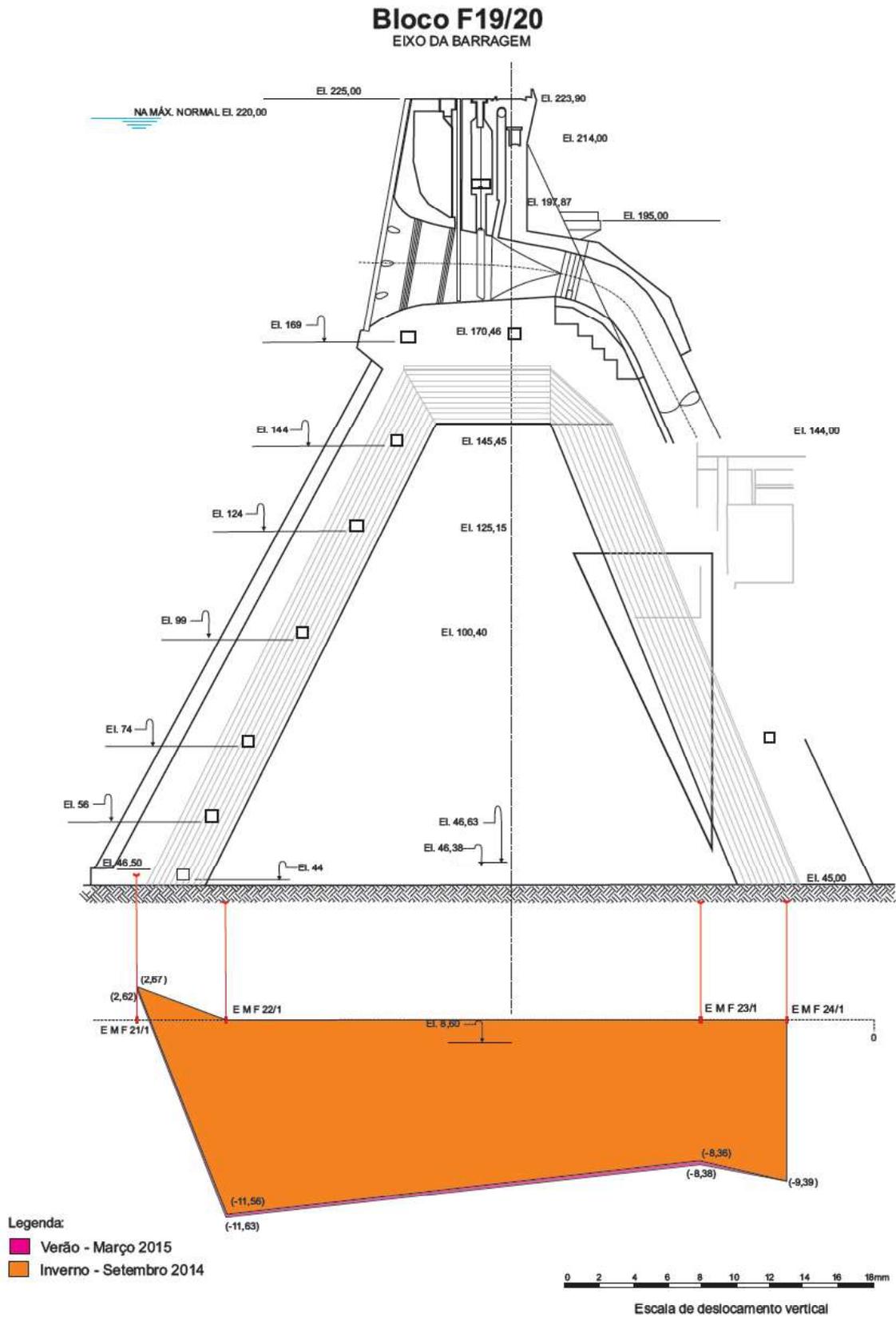


FIGURA 49 - GRÁFICO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DA SEÇÃO DO BLOCO F - PERÍODO DE VERÃO E INVERNO  
 FONTE: ITAIPU BINACIONAL (2014). Modificado pela autora (2015).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os períodos analisados demonstram que a estrutura da fundação se movimenta devido as forças atuantes na Barragem de Concreto assentada sobre o maciço basáltico, tanto para deslocamentos verticais de distensão quanto recalque. Contudo, os valores de leitura utilizados na geração do mapeamento e dos gráficos estão dentro do esperado em projeto, sofrendo pequenas variações de deslocamento, em escala milimétrica.

O comportamento senoidal de movimentação da estrutura entre o período de verão e inverno não se mostrou tão perceptível nos dados analisados, sendo que as variações causadas pela distensão e contração do concreto se mostraram bastante sutis ao longo do ano de 2014 e 2015.

O método geostatístico de equações multiquádricas através de sua aplicação no *software* ArcGIS forneceu boas correlações lineares dos dados exportados, conforme os critérios expostos no capítulo 4.5.1, além de ser uma ferramenta didática para interpretação do comportamento da fundação da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Apesar de apresentar uma faixa de erros entre os valores medidos e previstos para a geração do mapeamento, que já era esperado por ser um método simplificado de análise, a quantidade de extensômetros instalados por trecho da barragem é variável e em alguns casos a estrutura analisada apresentava grandes extensões, como é o caso da barragem lateral direita (Trecho D), o que pode ter acarretado em interpolações não tão exatas.

Vale salientar que o método de mapeamento é uma ferramenta que sempre deve ser vinculada a outras análises e interpretações do comportamento estrutural em questão, seja por comparativos com dados de projeto e leituras anteriores, como também graficando os valores analisados, visando alcançar com maior segurança a interpretação adequada das ações sofridas pela fundação e poder tomar as medidas cabíveis para cada caso.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para a continuação deste trabalho, sugere-se:

- Realizar o mapeamento para análise das outras feições geológicas do maciço da fundação;
- Análises de outros métodos geoestatísticos aplicáveis a este mapeamento, buscando otimizá-lo;
- Utilização de novas variáveis para interpretação do modelo geoestatístico, como por exemplo, leitura de outros instrumentos, influências do nível do reservatório, dentre outros.
- Realizar análise mais detalhada do comportamento de cada estrutura de concreto.
- Utilizar outros períodos para análise dos dados como comparativo.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003, 165p.

ANTENUCCI, J. C.; BROWN, K.; CROSSWELL, P. L.; KEVANY, M. J.. **Geographic information systems: a guide to technology**. New York: Chapman and Hall. 1991.

BRASIL (2002) – **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Disponível em: <[http://www.integracao.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=ca6c4574-2200-437f-973d-72abcefc7c10&groupId=47109](http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=ca6c4574-2200-437f-973d-72abcefc7c10&groupId=47109)>. Acesso em: 21 de maio. 2015. Brasília, DF.

BUZZI, Maiko Fernandes. **Avaliação das Correlações de Séries Temporais de Leituras de Instrumentos de Monitoração Geotécnico-Estrutural e Variáveis Ambientais em Barragens Estudo de Caso Itaipu**. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2007.

CARDIA, Ruben José Ramos et al. **Sobre a tomada de decisões e a avaliação de riscos**. Anais do Seminário Nacional de Segurança de Barragens, 2015.

PERES, Fabiana Frata Furlan et al. **Realidade aumentada para o acesso à instrumentação da Barragem de Itaipu**. Anais do Seminário Nacional de Segurança de Barragens, 2015.

CARDIA, Rubens. **Notas de Aula – Curso de Segurança de Barragens – CSEB**. Bauru, São Paulo, 2004.

CBGB. **Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação**. Rio de Janeiro, 1983.

CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, ABGE 1998, p. 227-241.

COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS-NÚCLEO REGIONAL DE SÃO PAULO. **Guia Básico de Segurança de Barragens**. São Paulo, 1999.

CRUZ, Paulo T. **100 Barragens Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

DUNNICLIFF, John. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Canada: Wiley, 1988.

HARDY, R. L. (1972). **Analytical topography and other irregular surfaces**. J. Geophys. Res., 76(8): 1905-1915.

ICOLD – **International Commission on Large Dams**. Acessado em: 03 de maio. 2015. Disponível em: <http://www.icold-ciqb.org>.

ITAIPU. **ITAIPU Binacional**. Acessado em: 10 de maio. 2015. Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br/>.

\_\_\_\_\_. **Usina Hidrelétrica de Itaipu – Aspectos Técnicos das Estruturas Civas**. Superintendência de Engenharia – Diretoria Técnica. Foz do Iguaçu, 2009, 790p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da Unesp, 1998.

BRASIL. Decreto-lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm). Acesso em: 21 de maio. 2015.

MATOS, Silvia Frazão. **Avaliação de Instrumentos para a Auscultação de Barragem de Concreto. Estudo de caso: Deformímetros e Tensômetros para concreto na Barragem de Itaipu**”. Dissertação de Mestrado, Curitiba, 2002.

MENESCAL, R. A. (2009). **Gestão da segurança de barragens no Brasil - Proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo**. 2009. 727p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

OLIVEIRA, Antonio M. S. et al. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Oficina de Textos, 1998.

PATIAS, Josiele. **Zoneamento geotécnico com base em krigagem ordinária e equações multiquádricas: barragem de Itaipu**. 2010. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PIASENTIN, Corrado. **Considerações sobre a importância das observações visuais na auscultação de barragens**. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Bahia, 2003.

SANCHEZ, Pablo Fernando. **Mapeamento Espaço-Temporal e Previsão de Pressões Piezométricas em Maciços Rochosos de Fundações de Grandes Barragens – Estudo de Caso de Itaipu**. Dissertação de Mestrado, Curitiba, 2009.

SILVEIRA, João F. A. **Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS 2. Anais: Auscultação e instrumentação de Barragens no Brasil, vol 1, Belo Horizonte, 1996. 123 p.

VIEIRA, L. **Mapas do comportamento da fundação da barragem de Itaipu com base em equações multiquádricas**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de São Paulo, 2014.

ESRI. **ArcGis Online**. Disponível em: <<http://www.doc.arcgis.com/pt-br/arcgis-online/>> Acessado em: 01 de Julho. 2015.

YAMAMOTO, J.K. **Curso de geoestatística aplicada**. Extensão universitária. São Paulo, apostila, 1994, 82p.

**ANEXOS**

Período de Verão - Março de 2015

Código do Instrumento	Valor de Leitura (mm)	Ângulo de Inclinação (°)	Leitura Verticalizada (mm)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Feição Geológica
EM-A-1/1	0,4	50	0,26	741377,9056	7187038,4101	161,13	BASALTO DENSO D
EM-A-10/1	3,31	45	2,34	741624,0300	7186610,0900	109,53	BASALTO DENSO B
EM-A-11/1	0,04	45	0,03	741672,7200	7186648,4000	107,76	BASALTO DENSO B
EM-A-2/1	-0,4	50	-0,40	741379,0001	7187035,4031	159,25	BASALTO DENSO D
EM-A-3/1	0,39	50	0,25	741514,2625	7187088,0399	159,73	BASALTO DENSO D
EM-A-4/1	-0,28	0	-0,28	741516,7751	7187085,2298	158,80	BASALTO DENSO D
EM-A-5/1	-0,82	50	-0,53	741515,2885	7187085,2208	157,94	BASALTO DENSO D
EM-A-6/1	0,65	58	0,34	741695,6231	7187154,0498	160,60	BASALTO DENSO D
EM-A-7/1	-0,7	0	-0,70	741703,1331	7187153,5907	155,65	BASALTO DENSO D
EM-A-8/1	-0,61	50	-0,39	741696,4782	7187151,7006	161,39	BASALTO DENSO D
EM-A-9/1	3,24	45	2,29	741589,2905	7186595,3693	109,46	BASALTO DENSO B
EM-D-10/1	-0,09	50	-0,06	741696,7163	7187487,5284	144,91	BASALTO DENSO D
EM-D-11/1	-0,68	0	-0,68	741698,3131	7187486,8212	145,07	BASALTO DENSO D
EM-D-12/1	-0,77	0	-0,77	741724,7107	7187484,4562	147,02	BASALTO DENSO D
EM-D-13/1	-0,04	50	-0,03	741805,6369	7187777,2426	132,64	BASALTO DENSO D
EM-D-14/1	-0,79	0	-0,79	741806,3608	7187776,1628	132,77	BASALTO DENSO D
EM-D-15/1	-2,47	50	-1,59	741807,8625	7187774,6273	132,28	BASALTO DENSO D
EM-D-16/1	5,52	80	0,96	741976,3680	7187872,6284	167,19	DERRAME E
EM-D-17/1	4,08	80	0,71	741977,4680	7187872,1489	164,45	DERRAME E
EM-D-18/1	0,49	0	0,49	742006,7411	7187944,7018	148,66	BASALTO DENSO E
EM-D-19/1	0,71	50	0,46	742027,4098	7187947,7751	122,10	BASALTO DENSO D
EM-D-20/1	0,04	0	0,04	742027,1701	7187946,0452	121,32	BASALTO DENSO D
EM-D-21/1	-1,48	0	-1,48	742033,9102	7187896,6882	123,68	BASALTO DENSO D
EM-D-22/1	-0,44	45	-0,31	742033,6458	7187897,3665	123,09	BASALTO DENSO D
EM-D-23/1	0,84	50	0,54	742083,2174	7187948,7754	119,70	BASALTO DENSO D
EM-D-24/1	-1,6	0	-1,60	742082,6798	7187947,1181	120,42	BASALTO DENSO D
EM-D-25/1	-1,34	0	-1,34	742079,2145	7187897,3551	122,60	BASALTO DENSO D
EM-D-26/1	1	45	0,71	742079,0948	7187898,073	155,67	BASALTO DENSO D
EM-D-28/1	6,16	80	1,07	742083,4991	7187878,959	142,08	DERRAME E
EM-D-29/1	0,92	80	0,08	742082,282	7187873,463	138,77	DERRAME E
EM-D-30/1	2,69	80	0,47	742094,2425	7187876,597	150,46	DERRAME E
EM-D-31/1	0,34	85	0,03	742093,0254	7187871,101	142,08	DERRAME E
EM-D-32/1	0,13	70	0,04	741965,2531	7187880,5024	162,50	DERRAME E
EM-D-33/1	1,95	76	0,47	741965,2200	7187865,8000	166,04	BASALTO DENSO E
EM-D-4/1	-1,01	50	-0,65	741685,6542	7187262,5829	141,90	BASALTO DENSO C
EM-D-5/1	0,48	50	0,31	741683,2401	7187277,6327	151,80	BASALTO DENSO D
EM-D-6/1	-1,08	0	-1,08	741684,9703	7187277,3717	150,40	BASALTO DENSO D
EM-D-7/1	-1,75	30	-1,52	741712,1755	7187285,8996	150,16	BASALTO DENSO D
EM-D-8/1	-0,76	0	-0,76	741711,8568	7187285,6731	149,94	BASALTO DENSO D
EM-D-9/1	0,05	45	0,04	741711,3236	7187285,4281	151,45	BASALTO DENSO D
EM-E-3/1	0,13	0	0,13	742202,8376	7187899,1400	107,55	BASALTO DENSO C

EM-E-4/1	-1,26	30	-1,09	742202,6722	7187898,6439	107,26	BASALTO DENSO C
EM-F-1/1	6,04	60	3,02	742304,7197	7187939,9239	57,40	BASALTO DENSO C
EM-F-12/1	-2,8	60	-1,40	742466,5854	7187809,1350	32,00	BASALTO DENSO B
EM-F-14/1	-5,56	0	-5,56	742476,3196	7187784,4694	19,00	BASALTO DENSO B
EM-F-15/1	-2,88	0	-2,88	742501,2770	7187958,7865	22,57	BASALTO DENSO B
EM-F-18/1	-8,99	0	-8,99	742492,5870	7187802,3944	9,85	BASALTO DENSO A
EM-F-19/1	-6,11	0	-6,11	742487,7699	7187780,9281	9,70	BASALTO DENSO A
EM-F-20/1	-8,59	0	-8,59	742527,1382	7187912,5447	4,30	BASALTO DENSO A
EM-F-21/1	5,24	60	2,62	742545,6159	7187908,9984	4,00	BASALTO DENSO B
EM-F-22/1	-11,63	0	-11,63	742533,9304	7187896,8263	5,50	BASALTO DENSO A
EM-F-23/1	-8,38	0	-8,38	742512,7656	7187794,8863	8,35	BASALTO DENSO A
EM-F-24/1	-9,39	0	-9,39	742507,5491	7187769,4123	7,53	BASALTO DENSO A
EM-F-25/1	-5,39	0	-5,39	742560,8259	7187898,7121	4,00	BASALTO DENSO A
EM-F-26/1	3,91	60	1,96	742673,5034	7187857,8397	52,08	BASALTO DENSO B
EM-F-27/1	-3,59	30	-3,59	742656,8492	7187759,1129	55,99	BASALTO DENSO B
EM-F-28/1	-5,85	0	-5,85	742656,8492	7187759,1129	54,43	BASALTO DENSO B
EM-F-29/1	-6,18	30	-6,18	742656,8492	7187759,1129	55,86	BASALTO DENSO B
EM-F-32/1	-2,2	30	-2,20	742785,2018	7187771,5827	53,06	BASALTO DENSO B
EM-F-33/1	-3,55	0	-3,55	742785,2018	7187771,5827	52,60	BASALTO DENSO B
EM-F-34/1	-7,46	30	7,56	742785,2018	7187771,5827	52,82	BASALTO DENSO B
EM-F-35/1	-0,12	90	0,00	742354,8197	7187918,8818	91,96	BASALTO DENSO A
EM-F-6/1	4,74	60	2,37	742446,5471	7187933,4118	11,00	BASALTO DENSO B
EM-F-7/1	-6,66	0	-6,66	742419,3723	7187838,9689	9,63	BASALTO DENSO A
EM-H-30/1	-0,56	0	-0,56	742876,8040	7187794,2518	4,31	BASALTO DENSO A
EM-H-31/1	-0,81	0	-0,81	742911,8666	7187786,5430	1,60	BASALTO DENSO A
EM-H-32/1	0,39	0	0,39	742948,8825	7187778,4048	4,00	BASALTO DENSO A
EM-H-33/1	-3,41	0	-3,41	742840,4794	7187761,2827	0,79	BASALTO DENSO A
EM-H-34/1	-6,05	0	-6,05	742901,8682	7187748,0419	0,89	BASALTO DENSO A
EM-H-35/1	-3,65	30	-3,16	742902,3029	7187747,6903	0,82	BASALTO DENSO A
EM-H-36/1	0,46	30	0,40	742902,8395	7187750,1320	-0,05	BASALTO DENSO A
EM-H-37/1	-2,29	0	-2,29	742956,5082	7187735,7729	4,86	BASALTO DENSO A
EM-H-38/1	-0,42	0	-0,42	742828,5806	7187695,5033	1,70	BASALTO DENSO A
EM-H-39/1	-1,7	0	-1,70	742884,6023	7187683,1854	1,49	BASALTO DENSO A
EM-H-40/1	-0,47	0	-0,47	742939,9270	7187670,9870	6,42	BASALTO DENSO A
EM-I-10/1	0,118	0	0,12	743385,0337	7187616,9172	103,00	BASALTO DENSO D
EM-I-11/1	-0,02	0	-0,02	743374,2052	7187659,8807	103,00	BASALTO DENSO D
EM-I-12/1	0,5	80	0,09	743037,4829	7187686,3421	152,87	BASALTO DENSO E
EM-I-13/1	0,06	80	0,01	743037,4615	7187686,2444	143,87	BASALTO DENSO E
EM-I-2/1	-0,053	30	-0,05	742989,8160	7187727,068	113,36	BASALTO DENSO D
EM-I-3/1	-1,48	0	-1,48	742989,5778	7187726,9152	115,02	BASALTO DENSO D
EM-I-4/1	-2,15	30	-1,86	742989,3395	7187726,7628	115,60	BASALTO DENSO D
EM-I-6/1	0,16	60	0,08	743152,7225	7187712,5481	155,02	BASALTO DENSO E
EM-I-7/1	-0,241	30	-0,21	743144,9135	7187691,9149	114,63	BASALTO DENSO D
EM-I-8/1	-0,58	0	-0,58	743144,7456	7187691,7470	116,26	BASALTO DENSO D
EM-I-9/1	-0,829	30	-0,72	743144,5777	7187691,5792	116,36	BASALTO DENSO D

EM-U-1/1	-2,15	30	-1,86	742260,232	7187765,2464	13,84	BASALTO DENSO A
EM-U-10/1	-3,9	30	-3,38	742424,4033	7187726,6947	11,86	BASALTO DENSO A
EM-U-11/1	-2,38	30	-2,06	742418,5199	7187690,6113	13,15	BASALTO DENSO A
EM-U-12/1	-3,67	10	-3,61	742417,9444	7187687,9938	13,78	BASALTO DENSO A
EM-U-13/1	-6,65	25	-6,03	742491,4066	7187714,7740	11,07	BASALTO DENSO A
EM-U-14/1	-8,06	30	-6,98	742490,8161	7187712,0882	11,59	BASALTO DENSO A
EM-U-15/1	-5,76	30	-4,99	742484,9306	7187675,9950	12,29	BASALTO DENSO A
EM-U-16/1	-4,88	15	-4,71	742484,3906	7187673,5387	13,03	BASALTO DENSO A
EM-U-17/1	-2,2	30	-1,91	742592,9794	7187692,4373	8,13	BASALTO DENSO A
EM-U-18/1	-2,7	30	-2,34	742592,4058	7187689,8276	10,56	BASALTO DENSO A
EM-U-19/1	-1,93	30	-1,67	742585,5441	7187653,9614	10,43	BASALTO DENSO A
EM-U-2/1	-2,63	30	-2,28	742260,3198	7187762,7587	15,59	BASALTO DENSO A
EM-U-20/1	-1,89	30	-1,64	742584,9548	7187651,2804	12,85	BASALTO DENSO A
EM-U-21/1	-0,05	0	-0,05	742390,1554	7187736,2465	48,50	BASALTO DENSO B
EM-U-22/1	-1,39	13	-1,35	742459,5583	7187721,2693	33,29	BASALTO DENSO B
EM-U-23/1	-1,68	30	-1,45	742637,2166	7187730,6612	54,76	BASALTO DENSO A
EM-U-24/1	-2,21	30	-1,91	742636,6155	7187727,9265	56,35	BASALTO DENSO A
EM-U-3/1	-1	30	-0,87	742253,4622	7187726,9011	14,76	BASALTO DENSO A
EM-U-4/1	-0,75	30	-0,65	742252,9522	7187724,5810	17,00	BASALTO DENSO A
EM-U-5/1	-0,84	30	-0,73	742273,4972	7187810,5051	61,97	BASALTO DENSO A
EM-U-6/1	-0,38	30	-0,33	742272,9175	7187807,8681	63,51	BASALTO DENSO A
EM-U-7/1	-1,37	30	-1,19	742329,5394	7187798,1869	58,96	BASALTO DENSO A
EM-U-8/1	-1,84	30	-1,59	742328,9812	7187795,6476	62,68	BASALTO DENSO A
EM-U-9/1	-4,57	25	-4,14	742424,9701	7187729,2731	22,14	BASALTO DENSO A

Período de Inverno - Setembro de 2014

Código do Instrumento	Valor de Leitura (mm)	Ângulo de Inclinação (°)	Leitura Verticalizada (mm)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Feição Geológica
EM-A-1/1	0,45	50	0,29	741377,9056	7187038,4101	161,13	BASALTO DENSO D
EM-A-10/1	4,46	45	3,15	741624,0300	7186610,0900	109,53	BASALTO DENSO B
EM-A-11/1	0,183	45	0,13	741672,7200	7186648,4000	107,76	BASALTO DENSO B
EM-A-13/1	1,81	65	0,76	741587,4656	7186621,2883	120,22	BASALTO DENSO D
EM-A-2/1	-0,43	50	-0,43	741379,0001	7187035,4031	159,25	BASALTO DENSO D
EM-A-3/1	0,57	50	0,37	741514,2625	7187088,0399	159,73	BASALTO DENSO D
EM-A-4/1	-0,32	0	-0,32	741516,7751	7187085,2298	158,80	BASALTO DENSO D
EM-A-5/1	-0,88	50	-0,57	741515,2885	7187085,2208	157,94	BASALTO DENSO D
EM-A-6/1	0,72	58	0,38	741695,6231	7187154,0498	160,60	BASALTO DENSO D
EM-A-7/1	-0,71	0	-0,71	741703,1331	7187153,5907	155,65	BASALTO DENSO D
EM-A-8/1	-0,61	50	-0,39	741696,4782	7187151,7006	161,39	BASALTO DENSO D
EM-A-9/1	4,683	45	3,31	741589,2905	7186595,3693	109,46	BASALTO DENSO B
EM-D-10/1	0,07	50	0,04	741696,7163	7187487,5284	144,91	BASALTO DENSO D
EM-D-11/1	-0,57	0	-0,57	741698,3131	7187486,8212	145,07	BASALTO DENSO D
EM-D-12/1	-0,54	0	-0,54	741724,7107	7187484,4562	147,02	BASALTO DENSO D
EM-D-13/1	0	50	0,00	741805,6369	7187777,2426	132,64	BASALTO DENSO D
EM-D-14/1	-0,72	0	-0,72	741806,3608	7187776,1628	132,77	BASALTO DENSO D
EM-D-15/1	-2,35	50	-1,51	741807,8625	7187774,6273	132,28	BASALTO DENSO D
EM-D-16/1	5,77	80	1,00	741976,3680	7187872,6284	167,19	DERRAME E
EM-D-17/1	4,12	80	0,72	741977,4680	7187872,1489	164,45	DERRAME E
EM-D-18/1	0,7	0	0,70	742006,7411	7187944,7018	148,66	BASALTO DENSO E
EM-D-19/1	0,87	50	0,56	742027,4098	7187947,7751	122,10	BASALTO DENSO D
EM-D-20/1	0,18	0	0,18	742027,1701	7187946,0452	121,32	BASALTO DENSO D
EM-D-21/1	-1,39	0	-1,39	742033,9102	7187896,6882	123,68	BASALTO DENSO D
EM-D-22/1	-0,19	45	-0,13	742033,6458	7187897,3665	123,09	BASALTO DENSO D
EM-D-23/1	1,29	50	0,83	742083,2174	7187948,7754	119,70	BASALTO DENSO D
EM-D-24/1	-1,27	0	-1,27	742082,6798	7187947,1181	120,42	BASALTO DENSO D
EM-D-25/1	-0,94	0	-0,94	742079,2145	7187897,3551	122,60	BASALTO DENSO D
EM-D-26/1	1,19	45	0,84	742079,0948	7187898,073	155,67	BASALTO DENSO D
EM-D-28/1	6,07	80	1,05	742083,4991	7187878,959	142,08	DERRAME E
EM-D-29/1	1,09	80	0,09	742082,282	7187873,463	138,77	DERRAME E
EM-D-30/1	2,68	80	0,47	742094,2425	7187876,597	150,46	DERRAME E
EM-D-31/1	0,47	85	0,04	742093,0254	7187871,101	142,08	DERRAME E
EM-D-32/1	-0,04	70	-0,01	741965,2531	7187880,5024	162,50	DERRAME E
EM-D-33/1	2,43	76	0,59	741965,2200	7187865,8000	166,04	BASALTO DENSO E
EM-D-4/1	-0,85	50	-0,55	741685,6542	7187262,5829	141,90	BASALTO DENSO C
EM-D-5/1	0,56	50	0,36	741683,2401	7187277,6327	151,80	BASALTO DENSO D
EM-D-6/1	-1,07	0	-1,07	741684,9703	7187277,3717	150,40	BASALTO DENSO D
EM-D-7/1	-1,39	30	-1,20	741712,1755	7187285,8996	150,16	BASALTO DENSO D
EM-D-8/1	-0,62	0	-0,62	741711,8568	7187285,6731	149,94	BASALTO DENSO D

EM-D-9/1	0,19	45	0,13	741711,3236	7187285,4281	151,45	BASALTO DENSO D
EM-E-3/1	0,13	0	0,13	742202,838	7187899,140	107,55	Basalto denso C
EM-E-4/1	-1,28	30	-1,11	742202,672	7187898,644	107,26	Basalto denso C
EM-F-1/1	6,32	60	3,16	742304,7197	7187939,9239	57,40	BASALTO DENSO C
EM-F-12/1	-2,76	60	-1,38	742466,5854	7187809,1350	32,00	BASALTO DENSO B
EM-F-14/1	-5,55	0	-5,55	742476,3196	7187784,4694	19,00	BASALTO DENSO B
EM-F-15/1	-2,86	0	-2,86	742501,2770	7187958,7865	22,57	BASALTO DENSO B
EM-F-18/1	-8,97	0	-8,97	742492,5870	7187802,3944	9,85	BASALTO DENSO A
EM-F-19/1	-6,11	0	-6,11	742487,7699	7187780,9281	9,70	BASALTO DENSO A
EM-F-20/1	-8,57	0	-8,57	742527,1382	7187912,5447	4,30	BASALTO DENSO A
EM-F-21/1	5,33	60	2,67	742545,6159	7187908,9984	4,00	BASALTO DENSO B
EM-F-22/1	-11,56	0	-11,56	742533,9304	7187896,8263	5,50	BASALTO DENSO A
EM-F-23/1	-8,36	0	-8,36	742512,7656	7187794,8863	8,35	BASALTO DENSO A
EM-F-24/1	-9,39	0	-9,39	742507,5491	7187769,4123	7,53	BASALTO DENSO A
EM-F-25/1	-5,32	0	-5,32	742560,8259	7187898,7121	4,00	BASALTO DENSO A
EM-F-26/1	3,97	60	1,99	742673,5034	7187857,8397	52,08	BASALTO DENSO B
EM-F-27/1	-3,61	30	-3,61	742656,8492	7187759,1129	55,99	BASALTO DENSO B
EM-F-28/1	-5,85	0	-5,85	742656,8492	7187759,1129	54,43	BASALTO DENSO B
EM-F-29/1	-6,17	30	-6,17	742656,8492	7187759,1129	55,86	BASALTO DENSO B
EM-F-32/1	-2,22	30	-2,22	742785,2018	7187771,5827	53,06	BASALTO DENSO B
EM-F-33/1	-3,55	0	-3,55	742785,2018	7187771,5827	52,60	BASALTO DENSO B
EM-F-34/1	-7,46	30	-7,46	742785,2018	7187771,5827	52,82	BASALTO DENSO B
EM-F-35/1	-0,1	90	0,00	742354,8197	7187918,8818	91,96	BASALTO DENSO A
EM-F-6/1	5,1	60	2,55	742446,5471	7187933,4118	11,00	BASALTO DENSO B
EM-F-7/1	-6,66	0	-6,66	742419,3723	7187838,9689	9,63	BASALTO DENSO A
EM-H-30/1	-0,55	0	-0,55	742876,8040	7187794,2518	4,31	BASALTO DENSO A
EM-H-31/1	-0,81	0	-0,81	742911,8666	7187786,5430	1,60	BASALTO DENSO A
EM-H-32/1	0,44	0	0,44	742948,8825	7187778,4048	4,00	BASALTO DENSO A
EM-H-33/1	-3,4	0	-3,40	742840,4794	7187761,2827	0,79	BASALTO DENSO A
EM-H-34/1	-6,08	0	-6,08	742901,8682	7187748,0419	0,89	BASALTO DENSO A
EM-H-35/1	-3,62	30	-3,14	742902,3029	7187747,6903	0,82	BASALTO DENSO A
EM-H-36/1	0,46	30	0,40	742902,8395	7187750,1320	-0,05	BASALTO DENSO A
EM-H-37/1	-2,27	0	-2,27	742956,5082	7187735,7729	4,86	BASALTO DENSO A
EM-H-38/1	-0,4	0	-0,40	742828,5806	7187695,5033	1,70	BASALTO DENSO A
EM-H-39/1	-1,69	0	-1,69	742884,6023	7187683,1854	1,49	BASALTO DENSO A
EM-H-40/1	-0,45	0	-0,45	742939,9270	7187670,9870	6,42	BASALTO DENSO A
EM-I-10/1	0,1	0	0,10	743385,0337	7187616,9172	103,00	BASALTO DENSO D
EM-I-11/1	0,01	0	0,01	743374,2052	7187659,8807	103,00	BASALTO DENSO D
EM-I-12/1	1,14	80	0,20	743037,4829	7187686,3421	152,87	BASALTO DENSO E
EM-I-13/1	0,15	80	0,03	743037,4615	7187686,2444	143,87	BASALTO DENSO E
EM-I-2/1	-0,1	30	-0,09	742989,8160	7187727,068	113,36	BASALTO DENSO D
EM-I-3/1	-1,62	0	-1,62	742989,5778	7187726,9152	115,02	BASALTO DENSO D

EM-I-4/1	-2,1	30	-1,82	742989,3395	7187726,7628	115,60	BASALTO DENSO D
EM-I-6/1	0,28	60	0,14	743152,7225	7187712,5481	155,02	BASALTO DENSO E
EM-I-7/1	-0,23	30	-0,20	743144,9135	7187691,9149	114,63	BASALTO DENSO D
EM-I-8/1	-0,6	0	-0,60	743144,7456	7187691,7470	116,26	BASALTO DENSO D
EM-I-9/1	-0,9	30	-0,78	743144,5777	7187691,5792	116,36	BASALTO DENSO D
EM-U-1/1	-2,14	30	-1,85	742260,232	7187765,2464	13,84	BASALTO DENSO A
EM-U-10/1	-3,71	30	-3,21	742424,4033	7187726,6947	11,86	BASALTO DENSO A
EM-U-11/1	-2,3	30	-1,99	742418,5199	7187690,6113	13,15	BASALTO DENSO A
EM-U-12/1	-3,4	10	-3,35	742417,9444	7187687,9938	13,78	BASALTO DENSO A
EM-U-13/1	-6,63	25	-6,01	742491,4066	7187714,7740	11,07	BASALTO DENSO A
EM-U-14/1	-8	30	-6,93	742490,8161	7187712,0882	11,59	BASALTO DENSO A
EM-U-15/1	-5,61	30	-4,86	742484,9306	7187675,9950	12,29	BASALTO DENSO A
EM-U-16/1	-4,78	15	-4,62	742484,3906	7187673,5387	13,03	BASALTO DENSO A
EM-U-17/1	-2,06	30	-1,78	742592,9794	7187692,4373	8,13	BASALTO DENSO A
EM-U-18/1	-2,66	30	-2,30	742592,4058	7187689,8276	10,56	BASALTO DENSO A
EM-U-19/1	-1,89	30	-1,64	742585,5441	7187653,9614	10,43	BASALTO DENSO A
EM-U-2/1	-2,46	30	-2,13	742260,3198	7187762,7587	15,59	BASALTO DENSO A
EM-U-20/1	-1,67	30	-1,45	742584,9548	7187651,2804	12,85	BASALTO DENSO A
EM-U-21/1	0,06	0	0,06	742390,1554	7187736,2465	48,50	BASALTO DENSO B
EM-U-22/1	-1,29	13	-1,26	742459,5583	7187721,2693	33,29	BASALTO DENSO B
EM-U-23/1	-1,568	30	-1,36	742637,2166	7187730,6612	54,76	BASALTO DENSO A
EM-U-24/1	-2,159	30	-1,87	742636,6155	7187727,9265	56,35	BASALTO DENSO A
EM-U-3/1	-0,94	30	-0,81	742253,4622	7187726,9011	14,76	BASALTO DENSO A
EM-U-4/1	-0,63	30	-0,55	742252,9522	7187724,5810	17,00	BASALTO DENSO A
EM-U-5/1	-0,763	30	-0,66	742273,4972	7187810,5051	61,97	BASALTO DENSO A
EM-U-6/1	-0,344	30	-0,30	742272,9175	7187807,8681	63,51	BASALTO DENSO A
EM-U-7/1	-1,292	30	-1,12	742329,5394	7187798,1869	58,96	BASALTO DENSO A
EM-U-8/1	-1,758	30	-1,52	742328,9812	7187795,6476	62,68	BASALTO DENSO A
EM-U-9/1	-4,45	25	-4,03	742424,9701	7187729,2731	22,14	BASALTO DENSO A

Período de Máximos Históricos (Jan/82 - Jan/14)

Código do Instrumento	Valor de Leitura (mm)	Ângulo de Inclinação (°)	Leitura Verticalizada (mm)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Feição Geológica
EM-A-1/1	0,6	50	0,39	741377,9056	7187038,4101	161,13	BASALTO DENSO D
EM-A-10/1	5,42	45	3,83	741624,0300	7186610,0900	109,53	BASALTO DENSO B
EM-A-11/1	0,63	45	0,45	741672,7200	7186648,4000	107,76	BASALTO DENSO B
EM-A-16/1	3,08	50	1,98	741389,5665	7187005,3487	114,55	BASALTO DENSO D
EM-A-2/1	-0,47	50	-0,30	741379,0001	7187035,4031	159,25	BASALTO DENSO D
EM-A-3/1	0,82	0	0,82	741514,2625	7187088,0399	159,73	BASALTO DENSO D
EM-A-4/1	-0,46	50	-0,30	741516,7751	7187085,2298	158,80	BASALTO DENSO D
EM-A-5/1	-0,93	58	-0,49	741515,2885	7187085,2208	157,94	BASALTO DENSO D
EM-A-6/1	0,85	0	0,85	741695,6231	7187154,0498	160,60	BASALTO DENSO D
EM-A-7/1	-0,71	50	-0,46	741703,1331	7187153,5907	155,65	BASALTO DENSO D
EM-A-8/1	-0,62	45	-0,44	741696,4782	7187151,7006	161,39	BASALTO DENSO B
EM-A-9/1	5,05	45	3,57	741589,2905	7186595,3693	133,21	BASALTO DENSO B
EM-D-1/1	-0,54	50	-0,35	741684,6776	7187263,6380	142,99	BASALTO DENSO D
EM-D-10/1	0,3	0	0,30	741696,7163	7187487,5284	144,91	BASALTO DENSO D
EM-D-11/1	-0,74	0	-0,74	741698,3131	7187486,8212	145,07	BASALTO DENSO D
EM-D-12/1	-0,92	50	-0,59	741724,7107	7187484,4562	147,02	BASALTO DENSO D
EM-D-13/1	0,14	0	0,14	741805,6369	7187777,2426	132,64	BASALTO DENSO D
EM-D-14/1	-0,81	50	-0,52	741806,3608	7187776,1628	132,77	BASALTO DENSO D
EM-D-15/1	-2,51	80	-0,44	741807,8625	7187774,6273	132,28	DERRAME E
EM-D-16/1	5,99	80	1,04	741976,3680	7187872,6284	167,19	DERRAME E
EM-D-17/1	4,3	80	0,75	741977,4680	7187872,1489	164,45	BASALTO DENSO E
EM-D-18/1	0,8	50	0,51	742006,7411	7187944,7018	148,66	BASALTO DENSO D
EM-D-2/1	-0,39	0	-0,39	741686,4143	7187263,4155	141,60	BASALTO DENSO D
EM-D-20/1	0,29	0	0,29	742027,1701	7187946,0452	121,32	BASALTO DENSO D
EM-D-21/1	-1,98	45	-1,40	742033,9102	7187896,6882	123,68	BASALTO DENSO D
EM-D-22/1	-0,58	50	-0,37	742033,6458	7187897,3665	123,09	BASALTO DENSO D
EM-D-23/1	1,69	0	1,69	742083,2174	7187948,7754	119,70	BASALTO DENSO D
EM-D-24/1	-1,57	0	-1,57	742082,6798	7187947,1181	120,42	BASALTO DENSO D
EM-D-25/1	-1,45	45	-1,03	742079,2145	7187897,3551	122,60	BASALTO DENSO D
EM-D-26/1	1,56	80	0,27	742079,0948	7187898,073	155,67	DERRAME E
EM-D-28/1	6,36	80	1,10	742083,4991	7187878,959	142,08	DERRAME E
EM-D-3/1	-1,08	80	-0,19	741685,6086	7187262,9803	141,30	DERRAME E
EM-D-30/1	3,14	85	0,27	742094,2425	7187876,597	150,46	DERRAME E
EM-D-31/1	0,52	70	0,18	742093,0254	7187871,101	142,08	DERRAME E
EM-D-32/1	0,45	76	0,11	741965,2531	7187880,5024	162,50	BASALTO DENSO E
EM-D-33/1	2,55	50	1,64	741965,2200	7187865,8000	166,04	BASALTO DENSO C
EM-D-4/1	-0,99	50	-0,64	741685,6542	7187262,5829	141,90	BASALTO DENSO D
EM-D-5/1	0,74	0	0,74	741683,2401	7187277,6327	151,80	BASALTO DENSO D

EM-D-6/1	-1,14	30	-0,99	741684,9703	7187277,3717	150,40	BASALTO DENSO D
EM-D-7/1	-1,79	0	-1,79	741712,1755	7187285,8996	150,16	BASALTO DENSO D
EM-D-8/1	-0,8	45	-0,57	741711,8568	7187285,6731	149,94	BASALTO DENSO D
EM-E-2/1	1,55	0	1,55	742202,564	7187899,548	104,23	BASALTO DENSO C
EM-E-3/1	-0,4	30	-0,35	742202,838	7187899,140	107,55	BASALTO DENSO C
EM-E-4/1	-1,31	60	-0,66	742202,672	7187898,644	107,26	BASALTO DENSO C
EM-F-12/1	-2,89	60	-1,45	742466,5854	7187809,1350	32,00	BASALTO DENSO B
EM-F-14/1	-5,57	0	-5,57	742476,3196	7187784,4694	19,00	BASALTO DENSO B
EM-F-15/1	-2,89	0	-2,89	742501,2770	7187958,7865	22,57	BASALTO DENSO B
EM-F-18/1	-9	0	-9,00	742492,5870	7187802,3944	9,85	BASALTO DENSO A
EM-F-19/1	-6,13	0	-6,13	742487,7699	7187780,9281	9,70	BASALTO DENSO A
EM-F-20/1	-8,59	0	-8,59	742527,1382	7187912,5447	4,30	BASALTO DENSO A
EM-F-21/1	5,53	60	2,77	742545,6159	7187908,9984	4,00	BASALTO DENSO B
EM-F-22/1	-11,6	0	-11,60	742533,9304	7187896,8263	5,50	BASALTO DENSO A
EM-F-23/1	-8,38	0	-8,38	742512,7656	7187794,8863	8,35	BASALTO DENSO A
EM-F-24/1	-9,42	0	-9,42	742507,5491	7187769,4123	7,53	BASALTO DENSO A
EM-F-25/1	-5,56	0	-5,56	742560,8259	7187898,7121	4,00	BASALTO DENSO A
EM-F-26/1	4,18	60	2,09	742673,5034	7187857,8397	52,08	BASALTO DENSO B
EM-F-27/1	-3,62	30	-3,14	742656,8492	7187759,1129	55,99	BASALTO DENSO B
EM-F-28/1	-5,87	0	-5,87	742656,8492	7187759,1129	54,43	BASALTO DENSO B
EM-F-29/1	-6,19	30	-5,36	742656,8492	7187759,1129	55,86	BASALTO DENSO B
EM-F-32/1	-2,26	30	-1,96	742785,2018	7187771,5827	53,06	BASALTO DENSO B
EM-F-33/1	-3,59	0	-3,59	742785,2018	7187771,5827	52,60	BASALTO DENSO B
EM-F-34/1	-7,52	30	-6,51	742785,2018	7187771,5827	52,82	BASALTO DENSO B
EM-F-35/1	0,27	90	0,00	742354,8197	7187918,8818	91,96	BASALTO DENSO A
EM-F-6/1	6,92	60	3,46	742446,5471	7187933,4118	11,00	BASALTO DENSO B
EM-F-7/1	-6,71	0	-6,71	742419,3723	7187838,9689	9,63	BASALTO DENSO A
EM-H-30/1	-0,95	0	-0,95	742876,8040	7187794,2518	4,31	BASALTO DENSO A
EM-H-31/1	-0,86	0	-0,86	742911,8666	7187786,5430	1,60	BASALTO DENSO A
EM-H-32/1	0,62	0	0,62	742948,8825	7187778,4048	4,00	BASALTO DENSO A
EM-H-33/1	-3,86	0	-3,86	742840,4794	7187761,2827	0,79	BASALTO DENSO A
EM-H-34/1	-6,11	0	-6,11	742901,8682	7187748,0419	0,89	BASALTO DENSO A
EM-H-35/1	-3,82	30	-3,31	742902,3029	7187747,6903	0,82	BASALTO DENSO A
EM-H-36/1	1,61	30	1,39	742902,8395	7187750,1320	-0,05	BASALTO DENSO A
EM-H-37/1	-2,4	0	-2,40	742956,5082	7187735,7729	4,86	BASALTO DENSO A
EM-H-38/1	-0,5	0	-0,50	742828,5806	7187695,5033	1,70	BASALTO DENSO A
EM-H-39/1	-2,16	0	-2,16	742884,6023	7187683,1854	1,49	BASALTO DENSO A
EM-H-40/1	-0,47	0	-0,47	742939,9270	7187670,9870	6,42	BASALTO DENSO A
EM-I-10/1	0,13	0	0,13	743385,0337	7187616,9172	103,00	BASALTO DENSO D
EM-I-11/1	0,07	0	0,07	743374,2052	7187659,8807	103,00	BASALTO DENSO D
EM-I-12/1	1,29	80	0,22	743037,4829	7187686,3421	152,87	BASALTO DENSO E

EM-I-13/1	0,16	80	0,03	743037,4615	7187686,2444	143,87	BASALTO DENSO E
EM-I-2/1	-0,22	30	-0,19	742989,8160	7187727,068	113,36	BASALTO DENSO D
EM-I-3/1	-1,62	0	-1,62	742989,5778	7187726,9152	115,02	BASALTO DENSO D
EM-I-4/1	-2,12	30	-1,84	742989,3395	7187726,7628	115,60	BASALTO DENSO D
EM-I-6/1	0,43	60	0,22	743152,7225	7187712,5481	155,02	BASALTO DENSO E
EM-I-7/1	-0,31	30	-0,27	743144,9135	7187691,9149	114,63	BASALTO DENSO D
EM-I-8/1	-0,66	0	-0,66	743144,7456	7187691,7470	116,26	BASALTO DENSO D
EM-I-9/1	-0,94	30	-0,81	743144,5777	7187691,5792	116,36	BASALTO DENSO D
EM-U-1/1	-2,18	30	-1,89	742260,232	7187765,2464	13,84	BASALTO DENSO A
EM-U-10/1	-3,9	30	-3,38	742424,4033	7187726,6947	11,86	BASALTO DENSO A
EM-U-11/1	-2,38	30	-2,06	742418,5199	7187690,6113	13,15	BASALTO DENSO A
EM-U-12/1	-3,66	10	-3,60	742417,9444	7187687,9938	13,78	BASALTO DENSO A
EM-U-13/1	-6,63	25	-6,01	742491,4066	7187714,7740	11,07	BASALTO DENSO A
EM-U-14/1	-8,01	30	-6,94	742490,8161	7187712,0882	11,59	BASALTO DENSO A
EM-U-15/1	-5,68	30	-4,92	742484,9306	7187675,9950	12,29	BASALTO DENSO A
EM-U-16/1	-4,86	15	-4,69	742484,3906	7187673,5387	13,03	BASALTO DENSO A
EM-U-17/1	-2,16	30	-1,87	742592,9794	7187692,4373	8,13	BASALTO DENSO A
EM-U-18/1	-2,73	30	-2,36	742592,4058	7187689,8276	10,56	BASALTO DENSO A
EM-U-19/1	-1,93	30	-1,67	742585,5441	7187653,9614	10,43	BASALTO DENSO A
EM-U-2/1	-2,66	30	-2,30	742260,3198	7187762,7587	15,59	BASALTO DENSO A
EM-U-20/1	-1,88	30	-1,63	742584,9548	7187651,2804	12,85	BASALTO DENSO A
EM-U-21/1	0,32	0	0,32	742390,1554	7187736,2465	48,50	BASALTO DENSO B
EM-U-22/1	-1,44	13	-1,40	742459,5583	7187721,2693	33,29	BASALTO DENSO B
EM-U-23/1	-1,65	30	-1,43	742637,2166	7187730,6612	54,76	BASALTO DENSO A
EM-U-24/1	-2,19	30	-1,90	742636,6155	7187727,9265	56,35	BASALTO DENSO A
EM-U-3/1	-0,99	30	-0,86	742253,4622	7187726,9011	14,76	BASALTO DENSO A
EM-U-4/1	-0,8	30	-0,69	742252,9522	7187724,5810	17,00	BASALTO DENSO A
EM-U-5/1	-0,83	30	-0,72	742273,4972	7187810,5051	61,97	BASALTO DENSO A
EM-U-6/1	-0,56	30	-0,48	742272,9175	7187807,8681	63,51	BASALTO DENSO A
EM-U-7/1	-1,34	30	-1,16	742329,5394	7187798,1869	58,96	BASALTO DENSO A
EM-U-8/1	-1,81	30	-1,57	742328,9812	7187795,6476	62,68	BASALTO DENSO A
EM-U-9/1	-4,53	25	-4,11	742424,9701	7187729,2731	22,14	BASALTO DENSO A

Período de Enchimento (1982-1984)

Código do Instrumento	Valor de Leitura (mm)	Ângulo de Inclinação (°)	Leitura Verticalizada (mm)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	Feição Geológica
EM-A-1/1	0,43	50	0,28	741377,9056	7187038,4101	161,13	BASALTO DENSO D
EM-A-2/1	-0,43	50	-0,28	741379,0001	7187035,4031	159,25	BASALTO DENSO D
EM-A-3/1	0,51	0	0,51	741514,2625	7187088,0399	159,73	BASALTO DENSO D
EM-A-4/1	-0,2	50	-0,13	741516,7751	7187085,2298	158,80	BASALTO DENSO D
EM-A-5/1	-0,57	58	-0,30	741515,2885	7187085,2208	157,94	BASALTO DENSO D
EM-A-6/1	0,54	0	0,54	741695,6231	7187154,0498	160,60	BASALTO DENSO D
EM-A-7/1	-0,59	50	-0,38	741703,1331	7187153,5907	155,65	BASALTO DENSO D
EM-A-8/1	-0,45	45	-0,32	741696,4782	7187151,7006	161,39	BASALTO DENSO B
EM-D-1/1	-0,15	50	-0,10	741684,6776	7187263,6380	142,99	BASALTO DENSO D
EM-D-10/1	-0,22	0	-0,22	741696,7163	7187487,5284	144,91	BASALTO DENSO D
EM-D-11/1	-0,46	0	-0,46	741698,3131	7187486,8212	145,07	BASALTO DENSO D
EM-D-12/1	-0,31	50	-0,20	741724,7107	7187484,4562	147,02	BASALTO DENSO D
EM-D-13/1	-0,09	0	-0,09	741805,6369	7187777,2426	132,64	BASALTO DENSO D
EM-D-14/1	-0,5	50	-0,32	741806,3608	7187776,1628	132,77	BASALTO DENSO D
EM-D-15/1	-1,42	80	-0,25	741807,8625	7187774,6273	132,28	DERRAME E
EM-D-16/1	4,49	80	0,78	741976,3680	7187872,6284	167,19	DERRAME E
EM-D-17/1	1,55	0	1,55	741977,4680	7187872,1489	164,45	BASALTO DENSO E
EM-D-18/1	-0,36	50	-0,23	742006,7411	7187944,7018	148,66	BASALTO DENSO D
EM-D-2/1	0,37	0	0,37	741686,4143	7187263,4155	141,60	BASALTO DENSO D
EM-D-20/1	0,25	0	0,25	742027,1701	7187946,0452	121,32	BASALTO DENSO D
EM-D-21/1	-1,2	45	-0,85	742033,9102	7187896,6882	123,68	BASALTO DENSO D
EM-D-22/1	-0,28	50	-0,18	742033,6458	7187897,3665	123,09	BASALTO DENSO D
EM-D-23/1	0,91	0	0,91	742083,2174	7187948,7754	119,70	BASALTO DENSO D
EM-D-24/1	-1,38	0	-1,38	742082,6798	7187947,1181	120,42	BASALTO DENSO D
EM-D-25/1	-0,72	45	-0,51	742079,2145	7187897,3551	122,60	BASALTO DENSO D
EM-D-26/1	0,8	80	0,14	742079,0948	7187898,073	155,67	DERRAME E
EM-D-28/1	3,35	80	0,58	742083,4991	7187878,959	142,08	DERRAME E
EM-D-3/1	-0,21	80	-0,04	741685,6086	7187262,9803	141,30	DERRAME E
EM-D-30/1	1,52	85	0,13	742094,2425	7187876,597	150,46	DERRAME E
EM-D-31/1	0,23	70	0,08	742093,0254	7187871,101	142,08	DERRAME E
EM-D-32/1	0,18	76	0,04	741965,2531	7187880,5024	162,50	BASALTO DENSO E
EM-D-33/1	0,61	50	0,39	741965,2200	7187865,8000	166,04	BASALTO DENSO C
EM-D-4/1	-0,43	50	-0,28	741685,6542	7187262,5829	141,90	BASALTO DENSO D
EM-D-5/1	0,45	0	0,45	741683,2401	7187277,6327	151,80	BASALTO DENSO D
EM-D-6/1	-0,67	30	-0,58	741684,9703	7187277,3717	150,40	BASALTO DENSO D
EM-D-7/1	-0,76	0	-0,76	741712,1755	7187285,8996	150,16	BASALTO DENSO D
EM-D-8/1	-0,38	45	-0,27	741711,8568	7187285,6731	149,94	BASALTO DENSO D
EM-E-2/1	0,71	0	0,71	742202,564	7187899,548	104,23	BASALTO DENSO C
EM-E-3/1	-0,4	30	-0,35	742202,838	7187899,140	107,55	BASALTO DENSO C
EM-E-4/1	-1,22	60	-0,61	742202,672	7187898,644	107,26	BASALTO DENSO C
EM-F-12/1	-2,31	60	-1,16	742466,5854	7187809,1350	32,00	BASALTO DENSO B
EM-F-14/1	-4,28	0	-4,28	742476,3196	7187784,4694	19,00	BASALTO DENSO B
EM-F-15/1	-2,67	0	-2,67	742501,2770	7187958,7865	22,57	BASALTO DENSO B

EM-F-18/1	-7.93	0	-7.93	742492,5870	7187802,3944	9.85	BASALTO DENSO A
EM-F-19/1	-5.59	0	-5.59	742487,7699	7187780,9281	9.70	BASALTO DENSO A
EM-F-20/1	-8.36	0	-8.36	742527,1382	7187912,5447	4.30	BASALTO DENSO A
EM-F-21/1	3.44	60	1.72	742545,6159	7187908,9984	4.00	BASALTO DENSO B
EM-F-22/1	-9.57	0	-9.57	742533,9304	7187896,8263	5.50	BASALTO DENSO A
EM-F-23/1	-7.24	0	-7.24	742512,7656	7187794,8863	8.35	BASALTO DENSO A
EM-F-24/1	-8.27	0	-8.27	742507,5491	7187769,4123	7.53	BASALTO DENSO A
EM-F-25/1	-5.2	0	-5.20	742560,8259	7187898,7121	4.00	BASALTO DENSO A
EM-F-26/1	2.65	60	1.33	742673,5034	7187857,8397	52.08	BASALTO DENSO B
EM-F-27/1	-2.68	30	-2.32	742656,8492	7187759,1129	55.99	BASALTO DENSO B
EM-F-28/1	-4.67	0	-4.67	742656,8492	7187759,1129	54.43	BASALTO DENSO B
EM-F-29/1	-4.83	30	-4.18	742656,8492	7187759,1129	55.86	BASALTO DENSO B
EM-F-32/1	-2.16	30	-1.87	742785,2018	7187771,5827	53.06	BASALTO DENSO B
EM-F-33/1	-3.22	0	-3.22	742785,2018	7187771,5827	52.60	BASALTO DENSO B
EM-F-34/1	-6.61	30	-5.72	742785,2018	7187771,5827	52.82	BASALTO DENSO B
EM-F-6/1	6.97	60	3.49	742446,5471	7187933,4118	11.00	BASALTO DENSO B
EM-F-7/1	-5.93	0	-5.93	742419,3723	7187838,9689	9.63	BASALTO DENSO A
EM-H-30/1	-0.95	0	-0.95	742876,8040	7187794,2518	4.31	BASALTO DENSO A
EM-H-31/1	-0.72	0	-0.72	742911,8686	7187786,5430	1.60	BASALTO DENSO A
EM-H-32/1	-0.13	0	-0.13	742948,8825	7187778,4048	4.00	BASALTO DENSO A
EM-H-33/1	-3.02	0	-3.02	742840,4794	7187761,2827	0.79	BASALTO DENSO A
EM-H-34/1	-4.31	0	-4.31	742901,8682	7187748,0419	0.89	BASALTO DENSO A
EM-H-35/1	-1.26	30	-1.09	742902,3029	7187747,6903	0.82	BASALTO DENSO A
EM-H-36/1	0.47	30	0.41	742902,8395	7187750,1320	-0.05	BASALTO DENSO A
EM-H-37/1	-1.51	0	-1.51	742956,5082	7187735,7729	4.86	BASALTO DENSO A
EM-H-38/1	-0.37	0	-0.37	742828,5806	7187695,5033	1.70	BASALTO DENSO A
EM-H-39/1	-1.91	0	-1.91	742884,6023	7187683,1854	1.49	BASALTO DENSO A
EM-H-40/1	-0.4	0	-0.40	742939,9270	7187670,9870	6.42	BASALTO DENSO A
EM-I-3/1	-0.69	0	-0.69	742989,5778	7187726,9152	115.02	BASALTO DENSO D
EM-I-4/1	-1.02	30	-0.88	742989,3395	7187726,7628	115.60	BASALTO DENSO D
EM-I-6/1	0.33	60	0.17	743152,7225	7187712,5481	155.02	BASALTO DENSO E
EM-I-7/1	-0.2	30	-0.17	743144,9135	7187691,9149	114.63	BASALTO DENSO D
EM-I-8/1	-0.4	0	-0.40	743144,7456	7187691,7470	116.26	BASALTO DENSO D
EM-I-9/1	-0.47	30	-0.41	743144,5777	7187691,5792	116.36	BASALTO DENSO D
EM-U-1/1	-1.4	30	-1.21	742260,232	7187765,2464	13.84	BASALTO DENSO A
EM-U-10/1	-3.25	30	-2.81	742424,4033	7187726,6947	11.86	BASALTO DENSO A
EM-U-11/1	-1.4	30	-1.21	742418,5199	7187690,6113	13.15	BASALTO DENSO A
EM-U-12/1	-1.87	10	-1.84	742417,9444	7187687,9938	13.78	BASALTO DENSO A
EM-U-13/1	-4.23	25	-3.83	742491,4066	7187714,7740	11.07	BASALTO DENSO A
EM-U-14/1	-5.75	30	-4.98	742490,8161	7187712,0882	11.59	BASALTO DENSO A
EM-U-15/1	-3.36	30	-2.91	742484,9306	7187675,9950	12.29	BASALTO DENSO A
EM-U-16/1	-3.37	15	-3.26	742484,3906	7187673,5387	13.03	BASALTO DENSO A
EM-U-17/1	-1.09	30	-0.94	742592,9794	7187692,4373	8.13	BASALTO DENSO A
EM-U-18/1	-1.76	30	-1.52	742592,4058	7187689,8276	10.56	BASALTO DENSO A
EM-U-19/1	-1.05	30	-0.91	742585,5441	7187653,9614	10.43	BASALTO DENSO A
EM-U-2/1	-1.82	30	-1.58	742260,3198	7187762,7587	15.59	BASALTO DENSO A
EM-U-20/1	-0.92	30	-0.80	742584,9548	7187651,2804	12.85	BASALTO DENSO A

EM-U-21/1	0,32	0	0,32	742390,1554	7187736,2465	48,50	BASALTO DENSO B
EM-U-22/1	0,28	13	0,27	742459,5583	7187721,2693	33,29	BASALTO DENSO B
EM-U-23/1	-0,92	30	-0,80	742637,2166	7187730,6612	54,76	BASALTO DENSO A
EM-U-24/1	-1,57	30	-1,36	742636,6155	7187727,9265	56,35	BASALTO DENSO A
EM-U-3/1	-0,65	30	-0,56	742253,4622	7187726,9011	14,76	BASALTO DENSO A
EM-U-4/1	-0,35	30	-0,30	742252,9522	7187724,5810	17,00	BASALTO DENSO A
EM-U-5/1	-0,61	30	-0,53	742273,4972	7187810,5051	61,97	BASALTO DENSO A
EM-U-6/1	-0,56	30	-0,48	742272,9175	7187807,8681	63,51	BASALTO DENSO A
EM-U-7/1	-0,77	30	-0,67	742329,5394	7187798,1869	58,96	BASALTO DENSO A
EM-U-8/1	-1,03	30	-0,89	742328,9812	7187795,6476	62,68	BASALTO DENSO A
EM-U-9/1	-2,47	25	-2,24	742424,9701	7187729,2731	22,14	BASALTO DENSO A

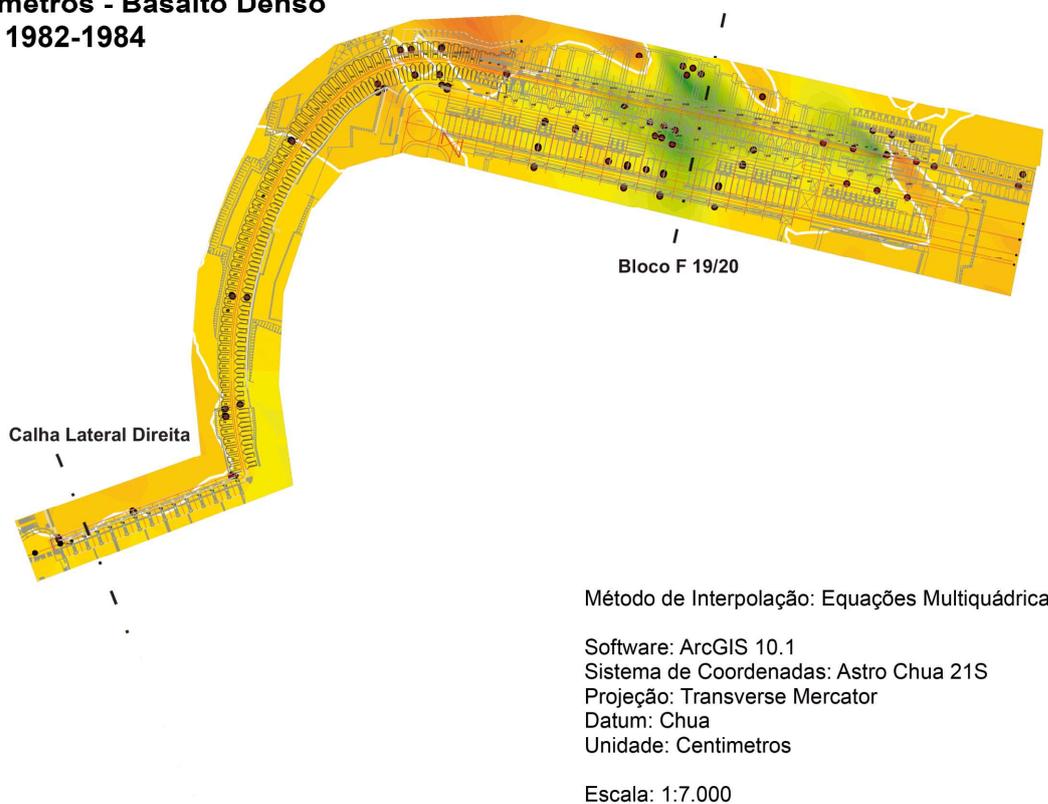
## Mapa de Comportamento da Fundação

Análise dos Extensômetros - Basalto Denso

Período: Enchimento 1982-1984

### Legenda (mm):

(+) Distensão	-2,5 - -2
(-) Recalque	-2 - -1,5
	-1,5 - -1
	-1 - -0,5
	-0,5 - 0
	0 - 0,5
	0,5 - 1
	1 - 1,5
	1,5 - 2
	2 - 2,5
	2,5 - 3
	3 - 3,5
	3,5 - 4
	4 - 4,5
	4,5 - 5
	5 - 5,5
	5,5 - 6
	6 - 6,5
	6,5 - 7
	7 - 7,5
	7,5 - 8



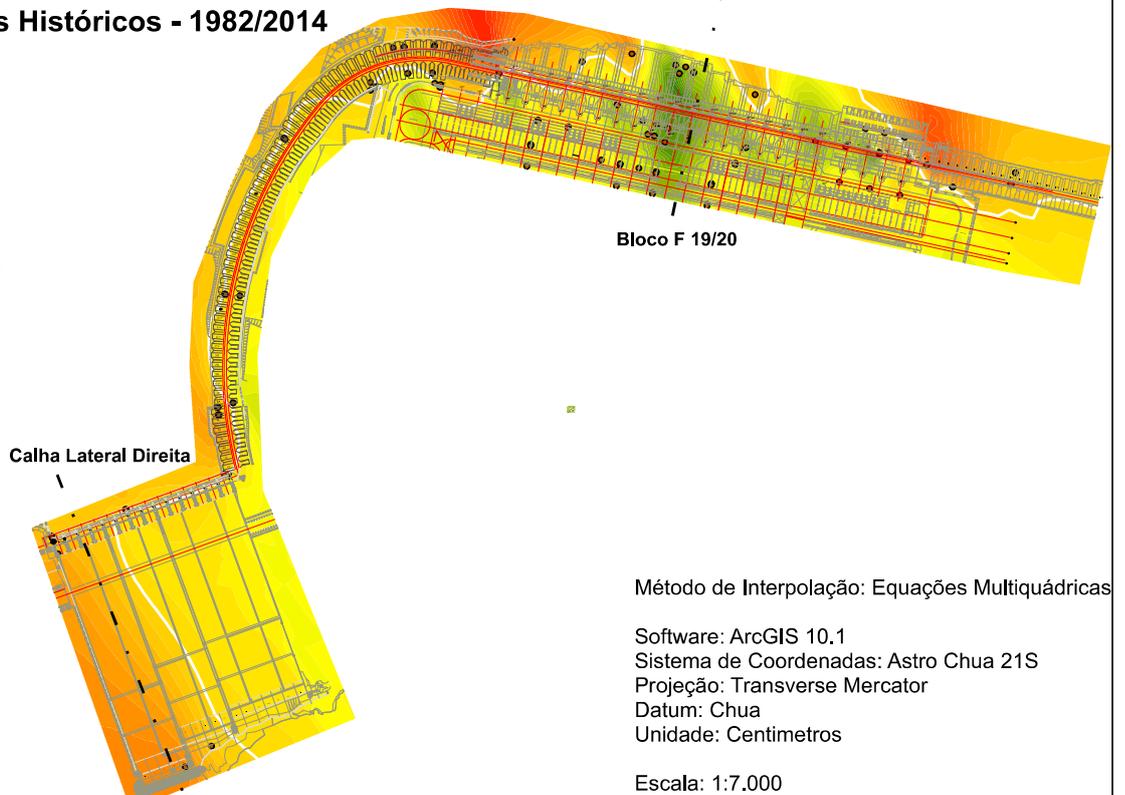
## Mapa de Comportamento da Fundação

Análise dos Extensômetros - Basalto Denso

Período: Máximos Históricos - 1982/2014

### Legenda (mm):

(+) Distensão	-2,5 - -2
(-) Recalque	-2 - -1,5
	-1,5 - -1
	-1 - -0,5
	-0,5 - 0
	0 - 0,5
	0,5 - 1
	1 - 1,5
	1,5 - 2
	2 - 2,5
	2,5 - 3
	3 - 3,5
	3,5 - 4
	4 - 4,5
	4,5 - 5
	5 - 5,5
	5,5 - 6
	6 - 6,5
	6,5 - 7
	7 - 7,5
	7,5 - 8



Método de Interpolação: Equações Multiquádricas

Software: ArcGIS 10.1

Sistema de Coordenadas: Astro Chua 21S

Projeção: Transverse Mercator

Datum: Chua

Unidade: Centímetros

Escala: 1:7.000

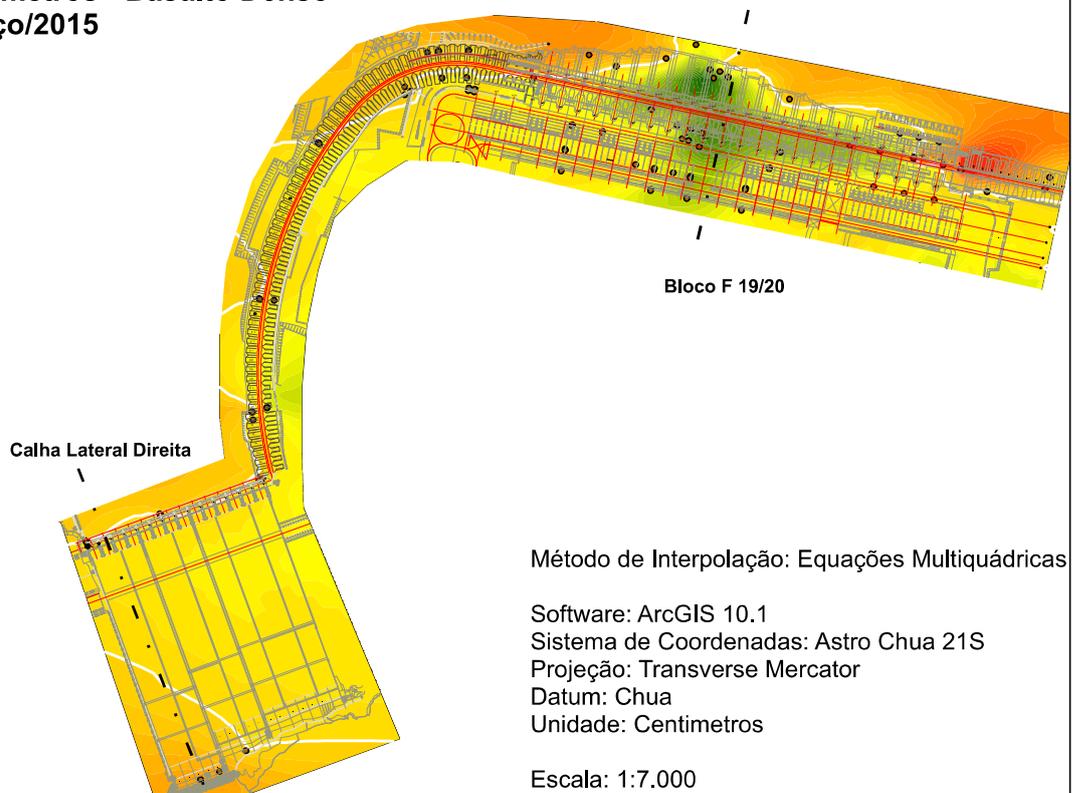
## Mapa de Comportamento da Fundação

Análise dos Extensômetros - Basalto Denso

Período: Verão - Março/2015

### Legenda (mm):

(+) Distensão	2,5 - 2
(-) Recalque	2 - 1,5
-12 - -11,5	1,5 - 1
-11,5 - -11	1 - 0,5
-11 - -10,5	0,5 - 0
-10,5 - -10	0 - 0,5
-10 - -9,5	0,5 - 1
-9,5 - -9	1 - 1,5
-9 - -8,5	1,5 - 2
-8,5 - -8	2 - 2,5
-8 - -7,5	2,5 - 3
-7,5 - -7	3 - 3,5
-7 - -6,5	3,5 - 4
-6,5 - -6	4 - 4,5
-6 - -5,5	4,5 - 5
-5,5 - -5	5 - 5,5
-5 - -4,5	5,5 - 6
-4,5 - -4	6 - 6,5
-4 - -3,5	6,5 - 7
-3,5 - -3	7 - 7,5
-3 - -2,5	7,5 - 8



Método de Interpolação: Equações Multiquádricas

Software: ArcGIS 10.1

Sistema de Coordenadas: Astro Chua 21S

Projeção: Transverse Mercator

Datum: Chua

Unidade: Centímetros

Escala: 1:7.000

## Mapa de Comportamento da Fundação

Análise dos Extensômetros - Basalto Denso

Período: Inverno - Setembro/2014

### Legenda (mm):

(+) Distensão	2,5 - 2
(-) Recalque	-2 - -1,5
-12 - -11,5	-1,5 - -1
-11,5 - -11	-1 - -0,5
-11 - -10,5	-0,5 - 0
-10,5 - -10	0 - 0,5
-10 - -9,5	0,5 - 1
-9,5 - -9	1 - 1,5
-9 - -8,5	1,5 - 2
-8,5 - -8	2 - 2,5
-8 - -7,5	2,5 - 3
-7,5 - -7	3 - 3,5
-7 - -6,5	3,5 - 4
-6,5 - -6	4 - 4,5
-6 - -5,5	4,5 - 5
-5,5 - -5	5 - 5,5
-5 - -4,5	5,5 - 6
-4,5 - -4	6 - 6,5
-4 - -3,5	6,5 - 7
-3,5 - -3	7 - 7,5
-3 - -2,5	7,5 - 8

