



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS:  
ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

**RODRIGO DE LIMA RODRIGUES**

**ANÁLISE DE FLUXO EM UMA SEÇÃO DA BARRAGEM DE  
ENROCAMENTO DE ITAIPU**

Salvador  
2018

**RODRIGO DE LIMA RODRIGUES**

**ANÁLISE DE FLUXO EM UMA SEÇÃO DA BARRAGEM DE  
ENROCAMENTO DE ITAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Orientador: Dsc. Josiele Patias  
Professora de Metodologia: Msc. Alzira Ribeiro Mota

Salvador  
2018

**RODRIGO DE LIMA RODRIGUES**

**ANÁLISE DE FLUXO EM UMA SEÇÃO DA BARRAGEM DE  
ENROCAMENTO DE ITAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia.

**Aprovado em 30 de janeiro de 2019.**

Banca Examinadora

Josiele Patias – Orientadora

*JPatias*

\_\_\_\_\_  
Dsc. em Geotecnia, pela Universidade de São Paulo – USP  
Itaipu Binacional

Carlos Henrique de Almeida Couto Medeiros

*CHM*

\_\_\_\_\_  
Dsc. em Geotecnia, pela University of Newcastle Upon Tyne - UK  
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Yvonilde Dantas Pinto Medeiros

*Yvonilde*

\_\_\_\_\_  
Dsc. em Hidrologia, pela University of Newcastle Upon Tyne – UK  
Universidade Federal da Bahia – UFBA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois seus caminhos são perfeitos, nos levam à felicidade sem percebermos que para lá estamos indo.

Ao meu pai, minha mãe, minha irmã e minha vó, que sempre me apoiam e dão a motivação necessária para enfrentar as adversidades do dia a dia.

À minha orientadora Josiele Patias, que está sempre disposta a me acompanhar nos desafios acadêmicos e profissionais. Sua ajuda é imprescindível.

À equipe do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens: Alexandra, Débora, Christian, Christiano, Edivaldo, Edson, Sucapuca e Zubeldia. É um prazer trabalhar ao lado dessa equipe *sui generis*.

À equipe da Divisão de Engenharia Civil e Arquitetura (ENCC.DT) de Itaipu que sempre apoia o desenvolvimento de pesquisas. Em especial à Karimi Mussi e Erik Souto pelo apoio dispensado ao longo das atividades deste curso.

À Fundação Parque Tecnológico Itaipu pelo apoio financeiro e infraestrutura disponibilizada que foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

À Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA pela oportunidade de cursar a especialização em uma das mais renomadas instituições do país.

## RESUMO

Itaipu Binacional é uma usina hidrelétrica localizada no Rio Paraná, entre o Brasil e Paraguai. A barragem é composta por estruturas de concreto, enrocamento e terra, sendo que, as estruturas de aterro compõem 65% da extensão da barragem. A lei brasileira estabelece que seja realizada uma Revisão Periódica de Segurança de Barragens considerando estado da arte dos critérios de projeto e atualizando as condições de montante e jusante da barragem. Por esse motivo, foi realizada modelagem 2D de uma seção típica da barragem de enrocamento e posteriormente realizada análise de fluxo a fim de verificar seu comportamento durante o período histórico da barragem. A análise de instrumentação proporcionou uma sensibilidade da variação dos instrumentos desde antes do enchimento até o período de operação, foi possível compreender o comportamento individual e coletivo dos instrumentos, correlacionando-os entre si e com o nível do reservatório. A análise numérica apresentou resultado razoável para o fluxo através do núcleo de argila. Para fundação, não se chegou a um modelo representativo do maciço rochoso, sugere-se um novo modelo contendo mais detalhes da geologia e simulações em *softwares* voltados para análises em meios fraturados.

**Palavras-chave:** Itaipu Binacional, Barragem de Enrocamento, Geotecnia.

## **ABSTRACT**

The Itaipu Binacional is a hydroelectric plant located on the Paraná River between Brazil and Paraguay. The dam is composed of concrete, rock and earth structures, and the landfill structures make up 65% of the dam extension. Brazilian law establishes a Periodic Safety Review of Dams be performed considering the state of the project criteria and updating the upstream and downstream conditions of the dam. For this reason, the flow analysis of a typical section of the rock dam was performed to verify the flow conditions during the operation period of the dam. The instrumentation analysis evidenced the variation sensitivity of the instruments during the operation period. It was possible to understand the individual and collective behavior of the instruments, correlating them with each other and with reservoir level. The numerical analysis presented good results for the flow through the clay core. However, there was not obtained a representative model of the rock mass in the simulation of the foundation. The development of a new model with more geological data of the materials and the use of a program that considers fractured domain are suggested.

**Keywords:** Itaipu Binacional, rockfill dam, geotechnic

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Disposição completa da barragem de Itaipu (adaptado de Itaipu Binacional, 2009)	15
Figura 1-2 - Vista geral da barragem (Adaptado de Itaipu Binacional, 2009)	16
Figura 2-1 - Medidor de placa triangular (Thá, 2007)	23
Figura 2-2 - Medidor de nível d'água (Cruz, 1996)	24
Figura 2-3 - Piezômetro <i>standpipe</i> (Cruz, 1996)	25
Figura 3-1 - Vista geral da barragem de enrocamento (Fonte: Arquivo fotográfico – Itaipu).	27
Figura 3-2 - Diques Bela Vista e Pomba-Quê durante construção da barragem (Fonte: Arquivo fotográfico – Itaipu).	28
Figura 3-3 - Seção típica da barragem de enrocamento (Itaipu Binacional, 2009)	29
Figura 3-4 - Perfil geológico da região de Itaipu (Itaipu Binacional, 2009)	32
Figura 4-1 - Planta da barragem de enrocamento e localização da seção estudada (Fonte: Arquivo fotográfico – Itaipu).	35
Figura 4-2 - Seção da Est. 118+00 instrumentada	36
Figura 4-3 - Perfil de instalação do PG-K-27 (Itaipu Binacional, 1978)	38
Figura 4-4 – Gráfico PG-K-27	38
Figura 4-5 - Perfil de instalação do PG-K-13 (Itaipu Binacional, 1977)	40
Figura 4-6 - Gráfico PG-K-13	40
Figura 4-7 - Perfil de instalação do PG-K-14 (Itaipu Binacional, 1977)	42
Figura 4-8 - Gráfico PG-K-14	43
Figura 4-9 - Gráfico PS-K-7	45
Figura 4-10 - Gráfico de instrumentos na Est. 118+00	46
Figura 4-11 - Geometria e malha da Est. 118+00	47
Figura 4-12 - Fluxo através do núcleo	49



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**BE** – Barragem de Enrocamento

**BTMD** – Barragem de Terra da Margem Direita

**BTME** – Barragem de Terra da Margem Esquerda

**CNRH** – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

**MCA** – Metros de Coluna D'água

**MEF** – Método dos Elementos Finitos

**MSNM** – Metros sobre o nível do mar

**NAR** – Nível de água no reservatório

**PNSB** – Plano Nacional de Segurança de Barragens

**PG** – Piezômetro de corda vibrante

**PS** – Piezômetro *Standpipe*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVO GERAL	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ANÁLISE DE FLUXO	18
2.1.1	Fluxo em solos	18
2.1.2	Fluxo em maciço rochoso	20
2.2	INSTRUMENTAÇÃO EM BARRAGENS DE ATERRO	21
2.2.1	Marcos de referência	21
2.2.2	Medidores de vazão	22
2.2.3	Medidores de Nível d'água	22
2.2.4	Piezômetros <i>standpipe</i>	23
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
3.	BARRAGEM DE ENROCAMENTO DE ITAIPU	26
3.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	27
3.2	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	28
3.2.1	Núcleo de argila	28
3.2.2	Enrocamento e transições	30
3.2.3	Condicionantes geológico-geotécnicos	31
3.3	INSTRUMENTAÇÃO	33
4.	MODELAGEM E ANÁLISE DE FLUXO	34

4.1	MODELAGEM DA SEÇÃO	35
4.2	ANÁLISE DE FLUXO	36
4.2.1	Análise da instrumentação	36
4.2.2	Simulação Numérica	46
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
6.	REFERÊNCIAS	52
	ANEXOS	54

## 1. INTRODUÇÃO

A usina hidrelétrica de Itaipu está localizada no Rio Paraná, entre o Brasil e Paraguai. O empreendimento foi construído e é mantido pelos governos de ambos os países. A usina possui 20 turbinas de 700 MW cada, totalizando 14.000 MW de potência instalada, a produção é dividida igualmente entre os dois países.

A mobilização do canteiro de obras para construção da barragem iniciou-se em 1974 e a primeira unidade geradora entrou em funcionamento em 1984. A barragem é do tipo mista, com estruturas de concreto, enrocamento e terra.

A barragem possui 7.744 m de extensão, a disposição das estruturas é mostrada na Figura 1-1.

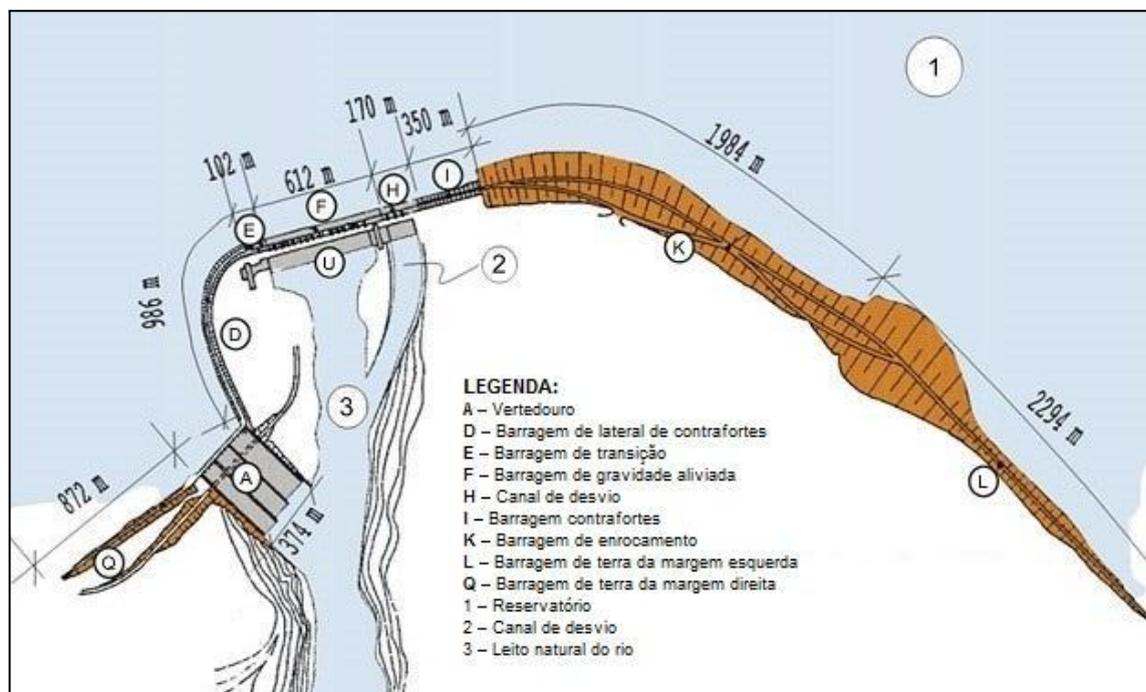


Figura 1-1 – Disposição completa da barragem de Itaipu (adaptado de Itaipu Binacional, 2009)

As barragens de aterro compõem cerca de 65% da extensão de toda a barragem, elas estão localizadas nas ombreiras e fazem o fechamento entre as estruturas de concreto e o terreno natural. A barragem de terra da margem direita (BTMD) faz o barramento entre o vertedouro e o terreno natural, a barragem de enrocamento (BE) faz a ligação entre a barragem de contrafortes (trecho I) e a barragem de terra da margem esquerda (BTME), que faz o fechamento com o terreno natural na ombreira esquerda (Itaipu Binacional, 2009). A barragem completa é mostrada na Figura 1-2.



Figura 1-2 - Vista geral da barragem (Adaptado de Itaipu Binacional, 2009)

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A lei brasileira nº 12.334 de 2010 estabelece que seja realizada uma Revisão Periódica de Segurança de Barragem considerando o estado da arte dos critérios de projeto, atualização dos dados hidrológicos e possíveis alterações das condições a montante e jusante da barragem. Por ser binacional, Itaipu não está sujeita à legislação brasileira, entretanto, sempre procura observar às normas e leis nacionais e internacionais.

Atualmente o poder computacional permite análises numéricas que eram inviáveis há algumas décadas atrás. Um exemplo é a aplicação do método dos elementos finitos para solução de fluxo utilizando a equação de Laplace.

As pressões neutras no aterro de uma barragem ou a subpressão na fundação podem induzir uma instabilidade e resultar em rupturas. Por isso, é importante o engenheiro geotécnico ter conhecimento de como elas se comportam no interior do maciço e monitorá-las ao longo do tempo por meio da instrumentação e inspeções visuais.

Este trabalho justifica-se na revisão das condições de fluxo levando em consideração as condições de montante e jusante observadas durante período de operação. Como

complemento aos trabalhos da análise da instrumentação e inspeções visuais, espera-se que o modelo em elementos finitos apresente boa concordância com a instrumentação e represente a real situação das poropressões e linha freática.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é realizar uma revisão das condições de fluxo em uma seção típica da barragem de enrocamento de Itaipu, considerando o período histórico desde antes do enchimento do reservatório até hoje.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Revisar a documentação e modelar uma seção da Barragem de Enrocamento de Itaipu;
- Analisar a instrumentação da seção;
- Realizar simulação numérica para obter condições de fluxo na seção;
- Validar a simulação por meio da análise conjunta à instrumentação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordada a revisão bibliográfica que foi separada nos seguintes assuntos: regulamentação e legislação, análise de fluxo, instrumentação em barragens de aterro e método dos elementos finitos.

### 2.1 LEGISLAÇÃO

A lei 12.334 de 2010 foi um marco na regulamentação de segurança de barragens no Brasil, nela foi estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A Política Nacional de Segurança de Barragens possui diversos fundamentos, entre eles a determinação que a segurança de uma barragem deve ser pensada em todas suas fases. Cita ainda que a população deve ser informada e estimulada a participar das ações preventivas e emergenciais. A PNSB delega a responsabilidade pela segurança da barragem ao empreendedor, sendo ele responsável por ações para garanti-la (Brasil, 2010).

A lei visa garantir a observância de padrões de segurança de barragens evitando acidentes e incidentes que impliquem em impactos técnicos, sociais ou ambientais. A lei determina que a classificação da barragem deve acontecer pelos agentes fiscalizadores com base nos critérios estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e cita diversos instrumentos usados para viabilizar as boas práticas e garantir a segurança de barragens, entre eles o Plano de Segurança de Barragens, o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, o Relatório de Segurança de Barragens, entre outros.

Em 2016, o Projeto de Lei do Senado nº 224, propôs algumas alterações na lei 12.334-2010. O PLS, basicamente, aprimora e define melhor algumas questões da lei vigente e impõe algumas sanções às infrações administrativas.

### 2.2 ANÁLISE DE FLUXO

Quando um material sólido é percolado por um fluido, este é considerado permeável. O solo é um exemplo de material poroso permeável, em geral, é permeado por água ou ar, pois a estrutura das partículas permite a formação de vazios que permitem a passagem dos fluidos.

Uma rocha intacta possui condutividade hidráulica muito baixa, visto que em geral, não existem espaços interconectados entre si. Porém, quando se trata de um maciço rochoso, existem juntas e fraturas que permitem a passagem de água.

O fluxo que ocorre no solo ou no maciço rochoso está associado à sua condutividade hidráulica, que em cada um dos materiais possui característica diferente. A permeabilidade é uma propriedade geotécnica dos materiais que possui uma grande faixa de variação, por esse motivo arbitrar um coeficiente de permeabilidade representativo para um material é um grande desafio.

A percolação descontrolada em uma barragem pode causar problemas carreando materiais para fora do macio ou provocando excesso de pressões neutras. Esses fenômenos podem ocorrer no maciço compactado ou fundação, por isso a necessidade de se instalar drenos e materiais filtrantes em diversos locais da barragem, para permitir a dissipação das pressões neutras, onde não deverá ocorrer carreamento de materiais, especialmente os finos (Cedergren, 1977).

### 2.2.1 Fluxo em solos

De acordo com Das (2007), em materiais porosos, pode-se interpretar o comportamento dos fluidos utilizando a equação de Bernoulli desconsiderando a velocidade, visto que a velocidade de percolação é insignificante. Sendo assim, a carga total em um ponto pode ser obtida por meio da Equação 2.1.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z \qquad h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

(2.1)

Onde: h: carga total;  
 u: pressão;  
 $\gamma_w$ : peso específico da água.

Quando existe uma diferença de carga entre dois pontos, tende a ocorrer um fluxo do ponto de maior carga em direção ao ponto de menor carga. Essa diferença de carga pode ser expressa de forma adimensional pelo gradiente hidráulico, conforme Equação 2.2.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \qquad (2.2)$$

Sendo: i: gradiente hidráulico;

$\Delta h$ : diferença de carga total entre dois pontos;

L: distância entre os dois pontos.

Em 1856 Darcy definiu uma equação empírica que possibilita determinar a velocidade da água em solos saturados (Equação 2.3).

$$v = k \cdot i \quad (2.3)$$

Sendo: v: velocidade;

k: permeabilidade do solo;

i: gradiente hidráulico.

Definida a velocidade do fluxo no solo, é possível determinar a vazão que passa por uma seção por meio da Equação 2.4.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.4)$$

Sendo: Q: vazão;

k: permeabilidade do solo;

i: gradiente hidráulico;

A: área da seção que ocorre o fluxo.

Casagrande (1937) definiu que na existência de um fluxo em um solo saturado, sem variação do volume de vazios, há uma equivalência entre a quantidade de água que entra em uma face de um elemento de solo e a que sai por outra face num determinado espaço de tempo. Essa condição é expressa na Equação 2.5.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

Onde u, v, e w são componentes de velocidade. Considerando que no caso de barragens a análise é feita em duas dimensões e aplicando a lei de Darcy, tem-se a Equação 2.6:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.6)$$

### 2.2.2 Fluxo em maciço rochoso

A condutividade hidráulica em um maciço rochoso é definida pela permeabilidade da

matriz rochosa e pela condutividade hidráulica das descontinuidades. Em geral, a permeabilidade da matriz rochosa é desprezível em relação ao valor da condutividade hidráulica das descontinuidades. Assim, o fluxo é controlado efetivamente pelas descontinuidades que, mesmo com aberturas muito pequenas, são consideravelmente mais permeáveis que a matriz rochosa.

Em maciços de rocha ígnea os tipos mais comuns de descontinuidade são juntas e fraturas, somam-se à essas características, fatores decorrentes do clima e relevo que podem resultar nas brechas, por exemplo.

Para determinação dos parâmetros hidráulicos dos maciços rochosos são utilizados dois métodos, amostragem de fraturas e ensaios hidráulicos de campo. O primeiro consiste em buscar informações sobre o sistema de fraturas do maciço e definir um tensor de permeabilidade. O segundo método é baseado em resultados de ensaios de bombeamento ou injeção d'água (Azevedo e Albuquerque Filho, 1998).

O ensaio de perda d'água sob pressão é realizado em furos remanescentes de sondagens rotativas, isolando-se um trecho do furo com obturadores, onde é injeta-se água em 5 estágios de pressão. Após a estabilização, em cada estágio, é medida a vazão de injeção e a pressão correspondente a cada minuto, durante 10 minutos no mínimo ou até estabilizar. O cálculo da permeabilidade é feito considerando o comprimento do intervalo ensaiado, diâmetro do furo, vazão estabilizada, carga hidráulica, pressão manométrica da bomba d'água e perda de carga na tubulação de ensaio.

Oliveira (1975), no Boletim nº 2 da ABGE intitulado “Ensaio de perda d'água sob pressão”, mostra que a permeabilidade em maciços naturais *in situ* podem ser obtidos a partir da Perda d'água Específica (Eq. 2.7) e coeficiente de forma (Eq. 2.8). A Equação 2.9 permite obter o coeficiente de permeabilidade.

$$PE = \frac{Q_e}{C_e} \quad (2.7)$$

$$Cf = Ln \frac{0,66 L}{d/2} \quad (2.8)$$

$$K = PE \times \frac{1,66}{2\pi} \times 10^{-4} \times Cf \quad (2.9)$$

Sendo:

PE – Perda d'água específica, em l/min/m/kg/cm<sup>2</sup>;

$Q_e$  – Vazão específica, em l/min/m;

$C_e$  – Carga específica, em kg/cm<sup>2</sup>;

$C_f$  – Coeficiente de forma, adimensional;

$L$  – Comprimento do trecho;

$d$  – Diâmetro do furo, em m;

$K$  – Coeficiente de permeabilidade, em cm/s

### 2.3 INSTRUMENTAÇÃO EM BARRAGENS DE ATERRO

A instrumentação de uma barragem visa verificar as hipóteses de projeto viabilizando uma avaliação se os critérios iniciais foram adequados. Desta forma, a instrumentação incrementa o conhecimento otimizando obras futuras e aponta anormalidades na estrutura existente que necessitem intervenção.

Em barragens de aterro, os principais alvos de monitoramento são a movimentação da barragem e o fluxo de água que infiltra através do corpo da barragem, fundação e ombreiras. Esses itens devem ser monitorados durante o período construtivo e de operação da barragem.

A movimentação da barragem é monitorada, usualmente, por levantamentos geodésicos com marcos de referência na crista e no talude de jusante, permitindo verificar deslocamentos horizontais e recalques. O monitoramento do fluxo de água e pressões neutras ocorre por meio dos medidores de vazão, medidores de nível d'água e piezômetros (Kutzner, 1997).

#### 2.3.1 Marcos de referência

Os marcos de referência são uma das técnicas mais simples e antigas para observação de deslocamentos verticais e horizontais da barragem. São peças fixas instaladas usualmente na crista e em locais de interesse para o monitoramento de movimentação. Para o levantamento altimétrico e planimétrico, utiliza-se uma estação topográfica próxima, com um referencial fixo, para determinação dos deslocamentos verticais por meio de nivelamentos de precisão e deslocamentos horizontais por meio de triangulações ou colimações geodésicas (Silveira, 2006).

#### 2.3.2 Medidores de vazão

Podem ser instalados em canaletas, para determinar a vazão de água que sai do sistema

de drenagem interno por exemplo, ou em drenos, para determinar a vazão percolada pela fundação (Cruz, 1996).

O tipo de medidor de vazão mais comum em canaletas é o de placa triangular (Figura 2-1), que consiste em uma placa metálica com uma passagem em forma de V instalada no final de uma canaleta. Por meio da altura da lâmina d'água na passagem em V é possível, com equações pré-definidas, determinar a vazão.

Em drenos, é mais comum realizar a leitura utilizando um recipiente graduado e um cronômetro. A vazão é determinada a partir do volume coletado no intervalo de tempo (Silveira, 2006).

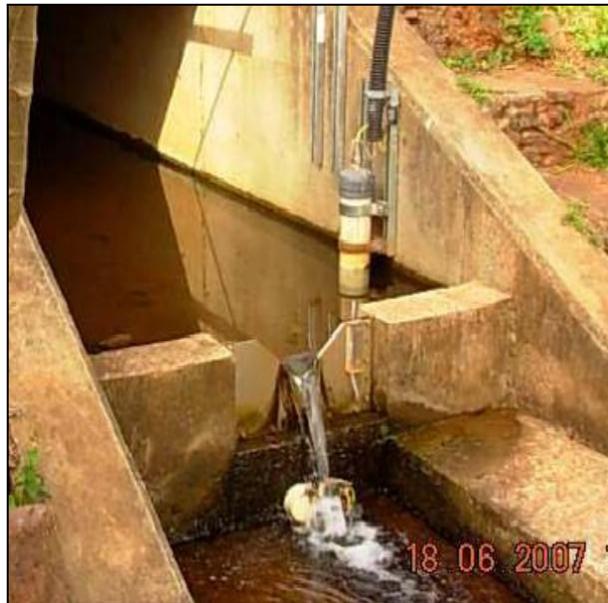


Figura 2-1 - Medidor de placa triangular (Thá, 2007)

### 2.3.3 Medidores de Nível d'água

O nível d'água em um maciço de solo, seja no corpo da barragem ou fundação, pode ser obtido com a instalação de um tubo de PVC na posição vertical atingindo cotas abaixo do nível freático. O tubo deve ser todo perfurado envolto por material filtrante e drenante, a fim de não obstruir o furo. Para determinação da altura do nível d'água, deve ser inserido um pio elétrico graduado com sensores nas duas pontas. Quando o cabo toca a água o circuito elétrico é fechado e é acusado pelo sensor. Neste ponto deve ser feita a leitura na extremidade superior do tubo, e o nível d'água definido subtraindo o valor da leitura da elevação da boca do furo (Cruz, 1996). A Figura 2-2 apresenta o esquema de um medidor de nível d'água.

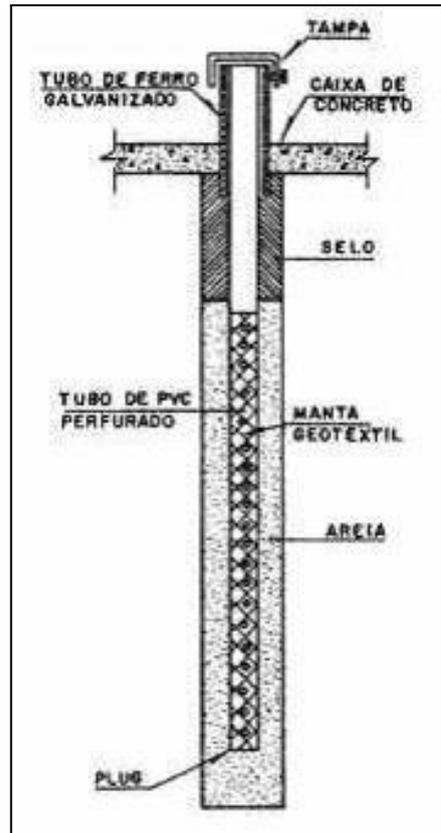


Figura 2-2 - Medidor de nível d'água (Cruz, 1996)

#### 2.3.4 Piezômetros *standpipe*

Semelhante ao medidor de nível d'água, o piezômetro *standpipe* diferencia-se apenas no comprimento do trecho drenante. No piezômetro, o PVC é perfurado e revestido de material drenante apenas no local a ser monitorado, o restante é impermeabilizado. A leitura é feita de maneira semelhante (Cruz, 1996). A Figura 2-3 ilustra um piezômetro do tipo *standpipe*.

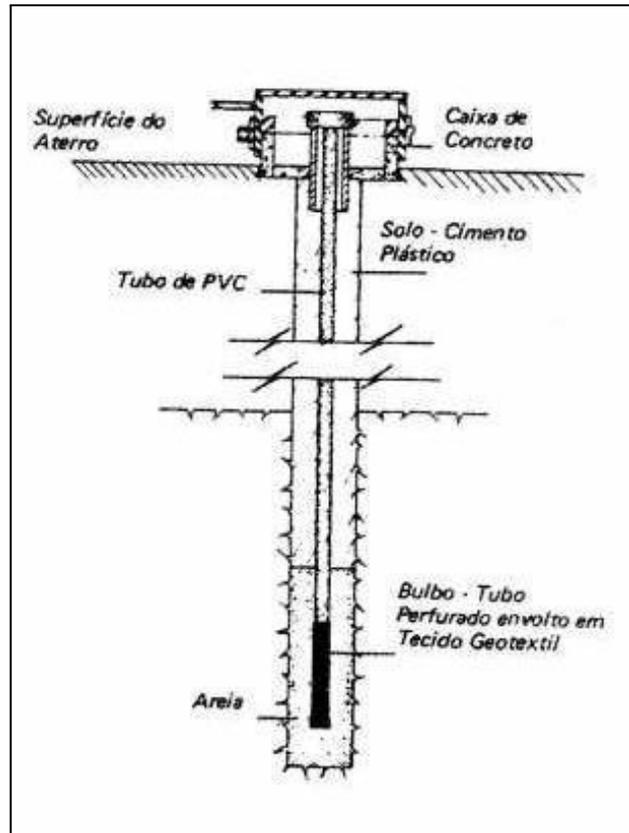


Figura 2-3 - Piezômetro *standpipe* (Cruz, 1996)

## 2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) começou a ser aplicado em análise de tensões, hoje é utilizado para análise de transferências de calor, fluxo de fluidos, campos elétricos, entre outros.

O método consiste em discretizar uma estrutura em pequenos elementos com geometria simples, usualmente triangular ou quadrangular, a fim de facilitar a análise. Após a análise local esses elementos são reconectados para representar o comportamento da estrutura global (Cook *et al.*, 1989).

Em análises de fluxo, o MEF pode ser aplicado utilizando a equação diferencial de Laplace baseada na lei de Darcy. Desta forma, a equação que governa infiltração bidimensional em cada elemento é expressa por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.7)$$

Sendo:

H – Carga total;

$k_x$  – Permeabilidade na direção x;

$k_y$  – Permeabilidade na direção y;

Q – Condição de fluxo pré-estabelecida;

$\theta$  – teor de umidade volumétrico;

t – tempo.

Quando o fluxo é permanente e não há variação do teor de umidade em função do tempo, o lado esquerdo da equação é igualado a zero. Quando o solo está parcialmente saturado, a permeabilidade deixa de ser constante e passa a variar em função do teor de umidade (GEO-SLOPE International, 2012).

### 3. BARRAGEM DE ENROCAMENTO DE ITAIPU

A barragem de enrocamento de Itaipu, localizada à margem esquerda do Rio Paraná, possui aproximadamente 2 km de extensão e altura variável entre 45 e 80 metros, ligando a barragem de concreto, na extremidade a direita, à barragem de terra da margem esquerda, na extremidade esquerda. A Figura 3-1 mostra uma vista da barragem de enrocamento a partir da margem esquerda.



Figura 3-1 - Vista geral da barragem de enrocamento (Fonte: Arquivo fotográfico – Itaipu).

A barragem possui volume total de  $12,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sendo  $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3$  de argila do núcleo e  $10,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  de enrocamento, transições e filtro. A argila do núcleo e as areias das transições foram obtidas de áreas de empréstimo próximas à barragem, a brita e enrocamento foram obtidos por meio do desmonte das escavações do Canal de Desvio. O desmonte em rocha no Canal de Desvio foi realizado entre fevereiro de 1976 e outubro de 1978, a escavação da barragem de enrocamento teve início em janeiro de 1976 e a colocação do núcleo em janeiro de 1978.

Existiam dois córregos que atravessavam o eixo da barragem de enrocamento nas proximidades da Est. 107+00 e 117+00, eram denominados Bela Vista e Pomba-Quê, respectivamente. Ambos foram barrados por diques, mostrados na Figura 3-2, construídos

com material de escavação da fundação para construção da BE, e desviados por canais até o leito do Rio Paraná (IECO e ELC, 1995).



Figura 3-2 - Diques Bela Vista e Pomba-Quê durante construção da barragem (Fonte: Arquivo fotográfico – Itaipu).

### 3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

O corpo da barragem de enrocamento de Itaipu é composto por um núcleo de argila, transições e espaldares de enrocamento. A face de montante do núcleo é inclinada com uma zona de transição fina de 2,5 m de espessura. A jusante do núcleo existe um filtro de areia de 2 m de espessura, seguido de uma camada de 2,3 m de transição fina e uma camada de 3,2 m de transição graúda (Itaipu Binacional, 2009). A Figura 3-3 mostra uma seção típica simplificada da BE.

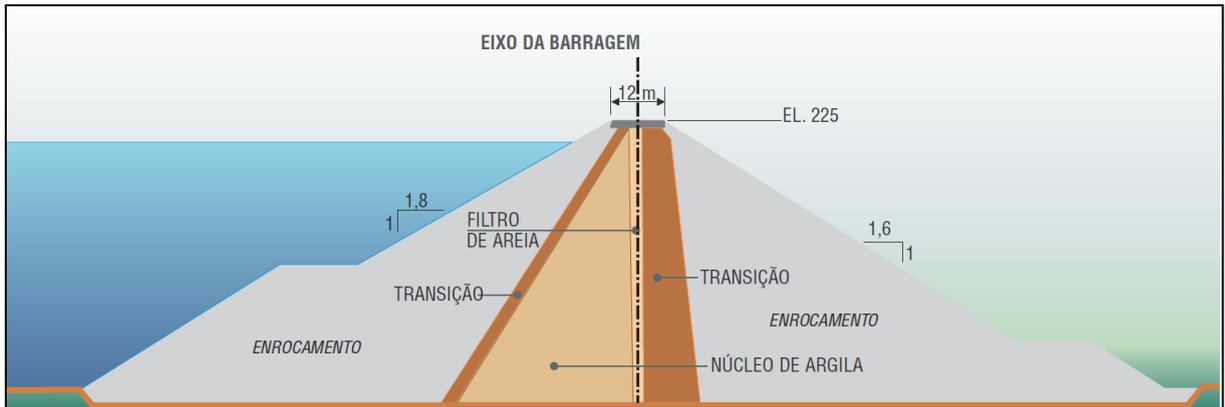


Figura 3-3 - Seção típica da barragem de enrocamento (Itaipu Binacional, 2009)

Os espaldares de jusante e montante do enrocamento possuem inclinação de 1V:1,6H e 1V:1,8H, respectivamente. Em ambos espaldares do enrocamento se desenvolvem rampas de acesso permanente pertencentes ao sistema viário.

A face de jusante do núcleo é vertical, a montante possui uma inclinação de 1V:0,6H. A camada de transição graúda, localizada a jusante do núcleo, possui inclinação de 1V:0,1H em seu espaldar de jusante (Itaipu Binacional, 2009).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

A seguir serão apresentadas as principais características do núcleo de argila, transições, enrocamento e fundação.

#### 3.2.1 Núcleo de argila

O núcleo de argila da barragem de enrocamento é composto por dois materiais distintos. O projeto indicava o uso de uma argila, caracterizada como arenosa, proveniente de determinadas áreas de empréstimo localizadas na área da usina. No entanto, durante a construção foi determinada a substituição desse material por argila das áreas de empréstimo Canal 1 e Pomba-Quê, classificada como argila plástica. A substituição foi por questões econômicas, devido à proximidade da área de empréstimo, apoiadas por estudos geotécnicos que apontaram características adequadas de permeabilidade, deformabilidade e resistência da argila plástica. Devido a essa alteração, o núcleo ficou dividido em dois materiais, até determinada altura é composto por argila arenosa e a parte superior, de argila plástica. As seções longitudinal e transversal mostrando ambos materiais é mostrada no Anexo I.

### **Argila arenosa**

O solo era lançado até uma espessura solta de 15 cm e compactado, em geral, com 6 passadas de rolo TC-15B, o ensaio de compactação era realizado pelo método Hilf. Durante a construção do maciço compactado, foram coletados 155 blocos indeformados com 30 cm de aresta, estes eram levados ao laboratório para análise visual e realização de ensaios. Com o bloco indeformado eram moldados corpos de prova para ensaios de permeabilidade, resistência e adensamento. O material obtido da talhagem do bloco era utilizado para ensaios de caracterização e de compactação Proctor Normal. Os resultados dos ensaios de compactação e caracterização são apresentados no Anexo II.

Os ensaios de adensamento oedométricos foram realizados com corpos de prova cilíndrico de 11,26 cm de diâmetro e 3,81 cm de altura e em alguns corpos de prova, 6,34 cm de diâmetro e 2,54 de altura. As amostras foram inundadas desde o início, os estágios de carregamento eram a cada 24 horas e o descarregamento 2 horas. Sempre que possível, neste ensaio eram determinados os coeficientes de permeabilidade vertical no final de cada estágio de carregamento. Os resultados desses ensaios são mostrados no Anexo III.

Os ensaios de permeabilidade, propriamente ditos, eram executados em permeômetros de carga variável com corpos de prova cilíndricos medindo cerca de 10,2 cm de diâmetro e de altura. O coeficiente de permeabilidade era obtido nas direções vertical e horizontal. O resultado é mostrado no Anexo IV (IECO-ELC, 1981).

### **Argila plástica**

O controle rotineiro do lançamento e compactação do solo seguiram os mesmos padrões que eram seguidos para argila arenosa. Durante a construção foram coletados 14 blocos indeformados de argila plástica com 30 cm de aresta. Semelhantemente ao processo estabelecido para argila arenosa, a partir dos blocos indeformados eram moldados os corpos de prova para ensaios especiais e o material da talhagem do bloco era utilizado para ensaios de caracterização e compactação Proctor Normal. Os resultados dos ensaios de compactação e caracterização da argila plástica são apresentados no Anexo V.

Os ensaios de adensamento e permeômetro de carga variável foram executados usando os mesmos procedimentos realizados nos ensaios da argila arenosa. Além destes dois ensaios, para definição do coeficiente de permeabilidade também foi realizado ensaios em câmaras de compressão triaxial, com corpos de prova cilíndricos de 10,2 cm de diâmetro e 5,0 cm de

altura.

Neste ensaio, a amostra era saturada por contrapressão e adensada isotropicamente a diferentes pressões. No fim de cada estágio era determinado o coeficiente de permeabilidade. O ensaio foi executado com carga constante.

Uma tabela com os valores de permeabilidade obtida pelo permeâmetro de carga variável é mostrada no Anexo VI e outra com os valores obtidos do ensaio de compressão triaxial no Anexo VII (IECO-ELC, 1983).

### **3.2.2 Enrocamento e transições**

Não foram realizadas campanhas de investigação em áreas de empréstimo para obtenção de material para barragem de enrocamento, os blocos de rocha que a compõem foram obtidos das escavações do Canal de Desvio. Tratam-se dos blocos provenientes dos derrames basálticos E, C e B, que por suas características, se mostram apropriados para o enrocamento.

Com o transcorrer das investigações de campo, foi observado que existiam alguns tipos de basaltos muito alteráveis, então foi realizada uma campanha de ensaios com objetivo de obter um conhecimento fundamentado das características de alterabilidade dos basaltos. Durante a campanha foram realizados ensaios em grande escala de ciclagem natural de amostras representativas de diferentes litotipos rochosos de rocha e ensaios de ciclagem acelerada com etileno glicol em amostras representativas pequenas. Além dos ensaios com materiais locais, foram analisados dados disponíveis de outras obras similares no Brasil, na barragem de Jupia, foi escavado um poço de observação no talude de enrocamento da barragem para analisar as condições do material.

Por meio das campanhas de caracterização tátil-visual e ensaios de laboratório, se detectou que o material com maior alterabilidade é o basalto do derrame D, então, foi realizado um enrocamento experimental com esse material para estudar o seu comportamento quanto a condição de desagregação em função da profundidade ou distância do talude e tempo de exposição aos agentes atmosféricos.

Após a campanha e a análise dos resultados, se determinou que o basalto do derrame D seria utilizado somente na parte interna da barragem e bastaria uma capa externa de aproximadamente 2 m de basalto são que esse material estaria protegido do intemperismo (IECO-ELC, 1978).

O lançamento ocorria com caminhões *off-road*, em seguida o material era espalhado com tratores e compactado com 4 passadas de rolos lisos vibratórios de 15 toneladas de peso estático total. As camadas soltas tinham 60 cm de espessura, sendo que os blocos de maior dimensão eram absorvidos nas zonas para grandes blocos previstas no projeto.

As camadas de transição fina são lançadas com 25 cm e as de transição grossa com 50 cm de espessura. A compactação de ambas zonas é realizada com 4 passadas de rolos lisos vibratórios de 15 toneladas a uma velocidade de 4,5 km/h.

### 3.2.3 Condicionantes geológico-geotécnicos

Itaipu está localizada no contexto geológico da Bacia do Paraná, caracterizada por rochas extrusivas basálticas da formação Serra Geral. Os derrames basálticos possuem espessura entre 20 e 60 metros e são separados por brechas bem definidas. As brechas possuem, entre alguns derrames, de 9 a 15 metros de espessura. A estratigrafia não apresenta grandes falhas, distúrbios tectônicos ou falhas propriamente ditas. O perfil geológico da região de Itaipu é mostrado na Figura 3-4.

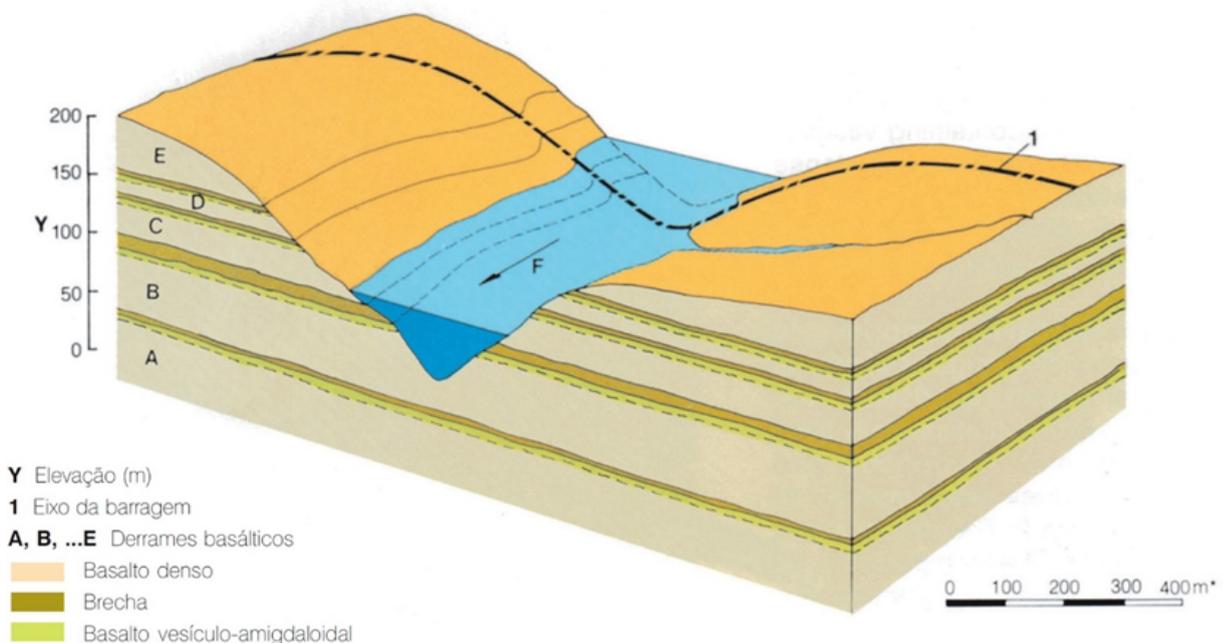


Figura 3-4 - Perfil geológico da região de Itaipu (Itaipu Binacional, 2009)

Para conhecer a geologia local foram realizadas campanhas de investigações de campo que começaram em meados de 1972 e terminaram em fevereiro de 1976. No total, na fundação da barragem de enrocamento, foram realizados:

- 20 sondagens rotativas, totalizando 1137 m;
- 5 sondagens a percussão, totalizando 78 m;
- 28 sondagens a ar comprimido, totalizando 370 m;
- 5 sondagens com penetrômetro cônico holandês, totalizando 61 m;
- 5 poços manuais, totalizando 54 m;
- 3 trincheiras.

A superfície da fundação da barragem de enrocamento é composta pelo derrame E, onde o basalto apresenta-se pouco alterado, duro e fraturado. Os parâmetros geomecânicos evidenciam a qualidade da fundação, o índice de qualidade da rocha (RQD) é elevado em todos os casos, na maior parte das sondagens fica acima de 85%. O grau de faturamento é baixo, fica entre 1 e 2 e em raros casos, chega a 3.

A área onde situa-se a barragem de enrocamento apresenta superfície suavemente ondulada, porém, em dois locais está cortada pelos canais dos rios Bela Vista e Pomba-Quê, que drenam a área em direção normal ao eixo da barragem. Nesta área, a drenagem superficial e subterrânea é governada por estes canais.

Em geral, a rocha não possui permeabilidades muito baixa, desta forma, o fluxo subterrâneo é governado pelas brechas e descontinuidades. Destaca-se, na fundação da barragem de enrocamento, a existência da descontinuidade D e das brechas C e D que apresentam absorções maiores que a rocha não. Ainda assim, não se julgou necessária análise de rede de fluxo pela fundação, pois, a rocha não possuía permeabilidade muito baixa e o fluxo aconteceria apenas pelo contato entre núcleo e fundação, onde então foi realizado tratamento com injeções (IECO-ELC, 1978a).

Os tratamentos da fundação foram específicos para cada local, diferenciando o núcleo de argila, transições e espaldares de enrocamento. A superfície da fundação foi escavada com espessura de poucos metros, próximo aos córregos Bela Vista e Pomba-Quê, até cerca de 30 m na depressão do topo rochoso próximo a Est. 101+40 (IECO-ELC, 1978b).

Os primeiros metros de fundação apresentavam gretas, fissuras e juntas horizontais abertas e interconectadas, causadas pelo alívio de tensões. Para impermeabilizar essa área, foi realizada injeção por meio de furos superficiais (IECO-ELC, 1978a).

As permeabilidades dos materiais no maciço rochoso foram medidas por meio de

ensaios de perda d'água sob pressão. Próximo ao eixo da barragem, na Est. 118+00, foi realizada uma sondagem rotativa com o ensaio que mostra perda d'água apenas nas brechas entre os derrames E e D, D e C e junta D (descontinuidade na interface entre basalto vesico-amigdalóide do derrame D). No interior dos derrames basálticos a perda d'água foi nula. O boletim da sondagem pode ser visto no Anexo VIII.

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação da barragem de enrocamento tem como finalidade obter dados para analisar o comportamento durante a construção e operação normal. Como a construção ocorreu em um ritmo lento, devido a disponibilidade de material estar atrelada as escavações do Canal de Desvio, não se considerou necessário instrumentar o núcleo argiloso da barragem. Somente na crista, após a construção, foram instalados os marcos superficiais para monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais da crista.

A partir das campanhas de investigação da fundação foram definidas três áreas que merecem atenção, os 6 primeiros metros a partir da superfície, a superfície da fundação no contato com o núcleo e a junta D. Os 6 primeiros metros e o contato do núcleo receberam injeções e tratamento de regularização, respectivamente. Foram ainda, instalados 17 piezômetros elétricos nessas áreas. Na junta D foram instalados 14 piezômetros elétricos e mais alguns de tubo aberto. No total, foram 10 seções instrumentadas.

#### 4. MODELAGEM E ANÁLISE DE FLUXO

Para realizar as análises de fluxo propostas neste trabalho, foi escolhida uma seção típica da barragem de enrocamento. O primeiro critério para seleção foi a existência de instrumentos que permitiriam analisar o fluxo pelo núcleo e fundação. Porém, como a maioria dos instrumentos são elétricos e foram instalados há mais de 30 anos, diversos deles estão desativados e não apresentam dados consistentes a vários anos. Buscava-se ainda, uma seção com geometria representativa para o restante da barragem.

Levando em consideração esses critérios, foi escolhida a seção da Est. 118+00 para as análises. A seção tem aproximadamente 50 metros de altura e fica próxima à transição da barragem de enrocamento com a barragem de terra da marguem esquerda (Figura 4-1), cabe ressaltar que próximo a este local passava, antes do enchimento do reservatório, o rio Pomba-Quê.



Figura 4-1 - Planta da barragem de enrocamento e localização da seção estudada (Fonte: Arquivo fotográfico – Itaipu).

A seção é instrumentada com 3 piezômetros elétricos (PG-K) e 1 de tubo aberto (PS-K). O PG-K-27, instalado no contato do núcleo com a fundação, funcionou de janeiro/1980 a outubro/2012. Desde então, foi lido mais quatro vezes, porém com valores aleatórios. O PG-K-13, que monitora a junta D abaixo do corpo da barragem, funcionou de janeiro/1980 a julho/1991. O PG-K-14 e o PS-K-7, que monitoram a junta D a jusante do corpo da barragem, também começaram a funcionar em janeiro/1980 e permanecem em funcionamento atualmente. Para interpretar o fluxo através da seção serão utilizados todos os dados disponíveis desde antes do enchimento até atualmente, com a usina em operação.

Neste capítulo será mostrada a metodologia utilizada para modelagem da seção e a análise de fluxo, que é dividida em duas partes: a primeira da instrumentação existente e, em seguida, com as simulações numéricas.

#### 4.1 MODELAGEM DA SEÇÃO

A seção da Est. 118+00, escolhida para análise da instrumentação, não possui a geometria detalhada nos desenhos. A solução adotada foi modelar a seção mais próxima com a geometria detalhada, que fica a aproximadamente 70 m, e validar locando os instrumentos de acordo com seus perfis de instalação. Como pode ser visto na Figura 4-2, os instrumentos ficaram bem próximos das feições que monitoram a seção da Est. 118+00.

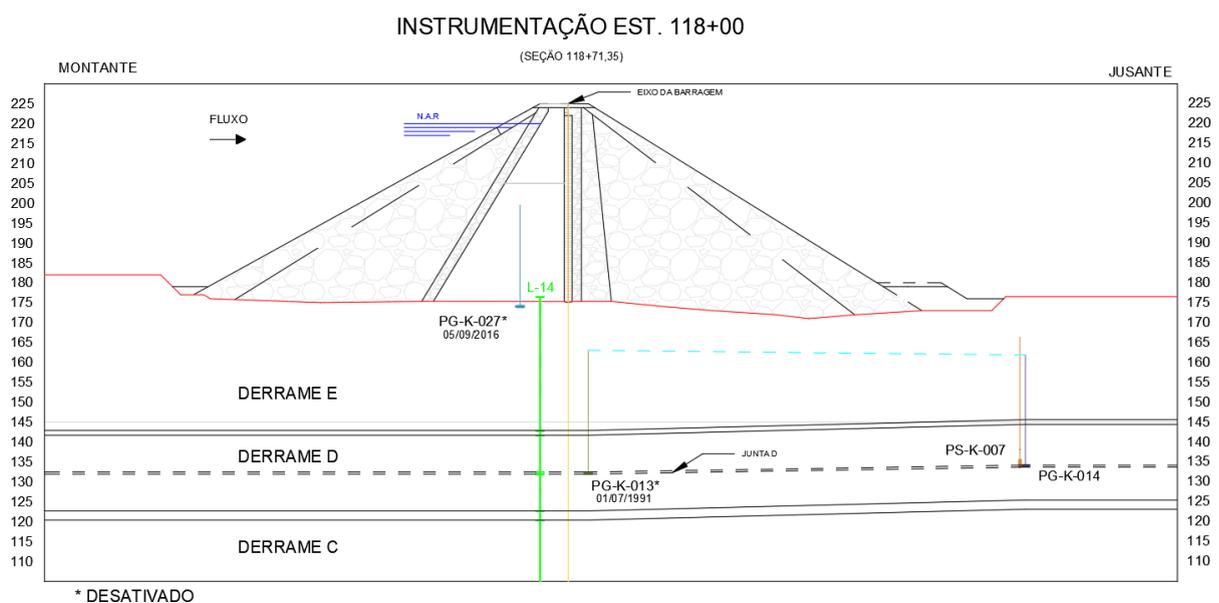


Figura 4-2 - Seção da Est. 118+00 instrumentada

Para a modelagem do corpo da barragem utilizou-se o desenho da seção transversal que mostra as dimensões do corpo da barragem, inclinações e definição dos materiais utilizados.

Foram analisadas também algumas disposições de campo que alteraram a geometria ou materiais durante o período construtivo. Para desenho da superfície do terreno natural foi utilizado o desenho “*as-built*” da escavação.

Existe apenas uma sondagem próxima a esta seção, trata-se de uma sondagem rotativa próxima ao eixo da barragem. Para modelagem da fundação foi utilizada esta sondagem juntamente com os perfis de instalação dos piezômetros de fundação. A montante, onde não se tem informações sobre as descontinuidades e brechas, elas foram consideradas horizontais.

## 4.2 ANÁLISE DE FLUXO

Primeiramente serão analisados os dados da instrumentação, mostrando correlações e informações que permitam entender o comportamento do fluxo na seção. Em seguida, será apresentada a análise numérica realizada com auxílio do programa SEEP/W, que simula o fluxo de água subterrâneo em materiais porosos, pelo método dos elementos finitos utilizando a equação diferencial de Laplace.

### 4.2.1 Análise da instrumentação

Os quatro instrumentos da seção foram instalados antes do enchimento do reservatório, isso possibilita analisar como eles se comportavam durante a construção, enchimento e pós enchimento do reservatório.

Dos quatro instrumentos instalados na seção, apenas dois continuam em funcionamento. Os piezômetros elétricos, usualmente, têm vida útil menor quando comparada a piezômetros de tubo aberto. Neste caso, a principal função dos instrumentos elétricos era monitorar o comportamento das pressões neutras durante o enchimento do reservatório.

A seguir será feita uma breve análise sobre cada um dos instrumentos e em seguida uma análise global considerando o conjunto.

### **PG-K-27**

Uma das áreas que merecem atenção no monitoramento da barragem de enrocamento, é o contato entre o núcleo da barragem e a fundação. Na seção da Est. 118+00 o PG-K-27 monitora as pressões neutras neste local. A Figura 4-3 mostra o perfil de instalação do instrumento.

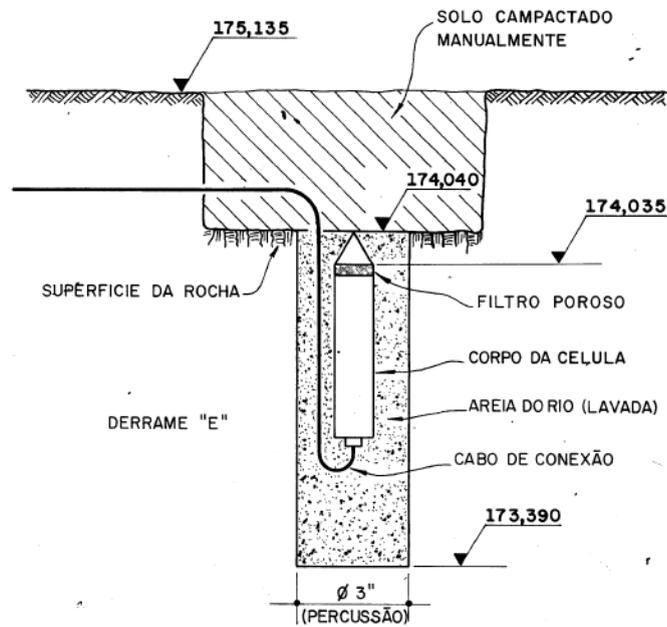


Figura 4-3 - Perfil de instalação do PG-K-27 (Itaipu Binacional, 1978)

O piezômetro foi instalado logo abaixo da superfície do terreno com afastamento de 12 m a montante do eixo da barragem. As leituras começaram em 02/01/1980 e última leitura foi em 05/09/2016, porém, as últimas quatro leituras do instrumento apresentaram valores aleatórios sem significado do ponto de vista geotécnico. A Figura 4-4 mostra o gráfico histórico do PG-K-27 e o NAR.

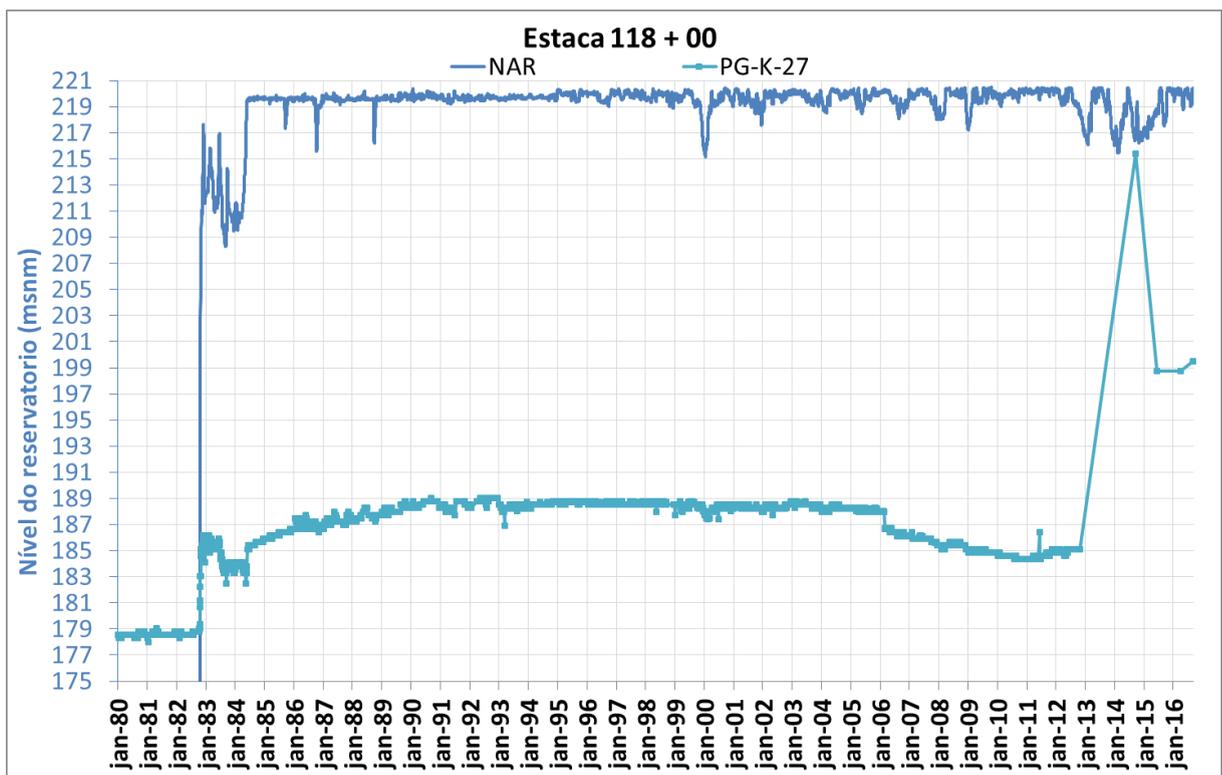


Figura STYLEREF 1 \s 4 SEQ Figura \\* ARABIC \s 1 4 – Gráfico PG-K-27

As subpressões apresentam correlação direta com o NAR. Nota-se que em 1982 quando ocorreu o primeiro enchimento do reservatório, as subpressões subiram, imediatamente, oito metros, atingindo a el. 186 m e, em seguida, variaram de acordo com a variação do NAR.

Com a estabilização do NAR próximo à elevação 220 m o piezômetro teve uma tendência de aumento até a el. 188 m. As leituras permaneceram com pouca variação até 2006, quando de uma leitura para outra houve uma redução brusca de 1,26 m na leitura. A partir disto, o instrumento apresentou uma tendência de redução da subpressão até que, em outubro de 2012, deixou de ser lido, possivelmente por defeito do instrumento ou do equipamento de leitura. Consta ainda, no registro das leituras, mais quatro leituras com valores aleatórios.

O instrumento apresenta comportamento conforme esperado, os valores incoerentes do ponto de vista geotécnico, como a redução brusca de 1,26 m, são atribuídos a problemas que podem resultar de defeitos ou falta de calibração do equipamento elétrico utilizado para leitura do instrumento.

O PG-K-27 tem forte correlação com o NAR, visto que o instrumento fica em solo abaixo do núcleo a poucos metros do reservatório. A Tabela 4-1 mostra os coeficientes de correlação considerando as variações no mesmo dia e com alguns dias de defasagem.

Tabela 4-1 - Correlação NAR x PG-K-27

<b>NAR x PG-K-27</b>	<b>Correlação Pearson</b>	<b>Tipo de Correlação</b>
Mesmo dia	0,76	Forte
Defasagem de 1 dia	0,73	Forte
Defasagem de 2 dias	0,72	Forte
Defasagem de 3 dias	0,72	Forte
Defasagem de 4 dias	0,71	Forte

### **PG-K-13**

O piezômetro Geonor PG-K-13 monitora a fundação abaixo do núcleo. Está instalado na el. 132,17 com afastamento de 5 metros a jusante do eixo da barragem, conforme Figura 4-2. A célula do piezômetro, que possui material permeável para infiltração de água, possui

aproximadamente 14 metros de altura, interceptando a junta D e a brecha E/D. O perfil de instalação é mostrado na Figura 4-5.

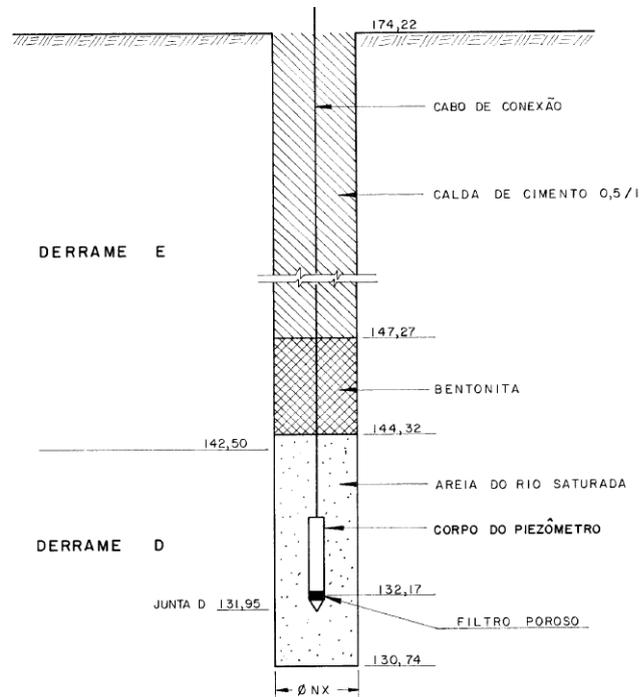


Figura 4-5 - Perfil de instalação do PG-K-13 (Itaipu Binacional, 1977)

O PG-K-13 é o instrumento que teve a menor vida útil entre eles os piezômetros da seção. Assim como os demais, a primeira leitura ocorreu em 02/01/1980, porém a última leitura ocorreu em 01/07/1991, após aproximadamente 11 anos de funcionamento. As leituras do instrumento juntamente com o nível do reservatório são mostradas na Figura 4-6.

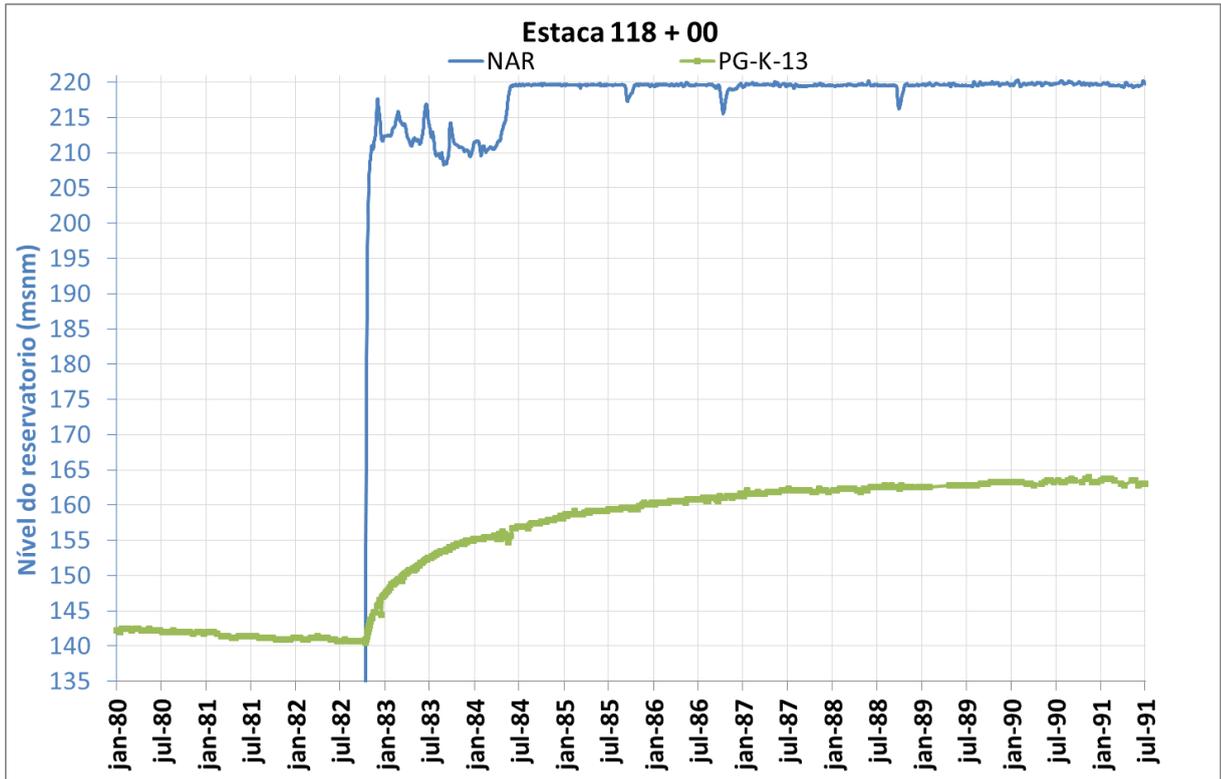


Figura STYLEREF 1 \s 4 SEQ Figura \\* ARABIC \s 1 6 - Gráfico PG-K-13

Antes do enchimento do reservatório, o instrumento apontava uma sensível queda na subpressão. Tal fenômeno pode ser atribuído a dissipação do excesso de pressões neutras gerado pelo carregamento da construção, neste período o corpo da barragem já estava em etapa final de construção.

O enchimento do reservatório, em meados de 1982, pode ser considerado um evento instantâneo pois, em poucos dias, o reservatório atingiu a el. 215 m e, em seguida, variou por dois anos entre as elevações 207 e 217.

Nota-se que o PG-K-13 apresentou elevação das subpressões, porém numa taxa mais lenta que o enchimento do reservatório. As leituras do instrumento saíram de um patamar próximo à el. 141 m e, após 8 anos, em 1990, estabilizaram próximo à el. 163 m, evidenciando um aumento de 22 metros na subpressão da feição monitorada.

Mediante o comportamento do instrumento ao longo da sua vida útil, fica claro que houve influência do nível do reservatório em seu comportamento, porém, nota-se que o instrumento não possui sensibilidade imediata ao comportamento do reservatório, pois, por exemplo, no período entre out/1982 e jul/1984, quando o reservatório teve grandes variações, as mesmas foram pouco percebidas no instrumento. As variações rápidas começaram a ocorrer quando o instrumento se mostrou estabilizado, próximo ao fim de sua vida útil.

Mediante esse comportamento foram realizadas correlações de Pearson, a fim de verificar a relação entre o comportamento do reservatório e o instrumento durante toda sua vida útil. Foram realizadas correlações comparando as leituras num mesmo dia e com alguns dias de defasagem. O resultado é mostrado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Correlação NAR x PG-K-13

<b>NAR x PG-K-13</b>	<b>Correlação Pearson</b>	<b>Tipo de Correlação</b>
Mesmo dia	0,68	Moderado
Defasagem de 1 dia	0,65	Moderado
Defasagem de 2 dias	0,63	Moderado
Defasagem de 3 dias	0,63	Moderado
Defasagem de 4 dias	0,63	Moderado

Rodrigues (2017) mostra que os piezômetros instalados no solo da fundação da BTME apresentam correlação de 95% com nível do reservatório. O resultado da correlação do PG-K-13 com o NAR mostra que o nível do reservatório tem bastante influência no comportamento do instrumento, porém, diferente do que acontece no solo, na fundação em rocha o fluxo leva mais tempo para ser estabelecido e, portanto, não varia com a mesma taxa.

#### **PG-K-14**

O PG-K-14 está instalado na el. 134,06 com afastamento de 114 m a jusante do eixo da barragem. O piezômetro elétrico foi instalado em 01/07/77 juntamente com o PS-K-7, ambos estão na mesma célula, que possui aproximadamente 14 m de extensão e monitora a junta D e brecha E/D. O perfil de instalação do PG-K-14, juntamente com o PS-K-7, é mostrado na Figura 4-7.

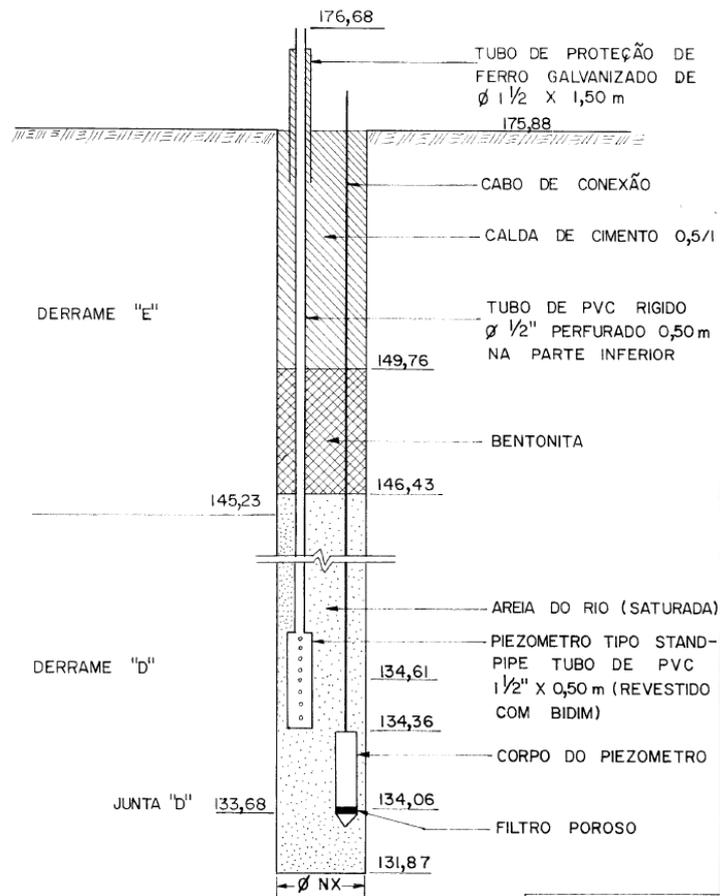


Figura 4-7 - Perfil de instalação do PG-K-14 (Itaipu Binacional, 1977)

O PG-K-14 teve as leituras iniciadas em janeiro de 1980 e apresenta valores coerentes até hoje. A Figura 4-8 mostra as leituras do instrumento juntamente com o nível do reservatório.

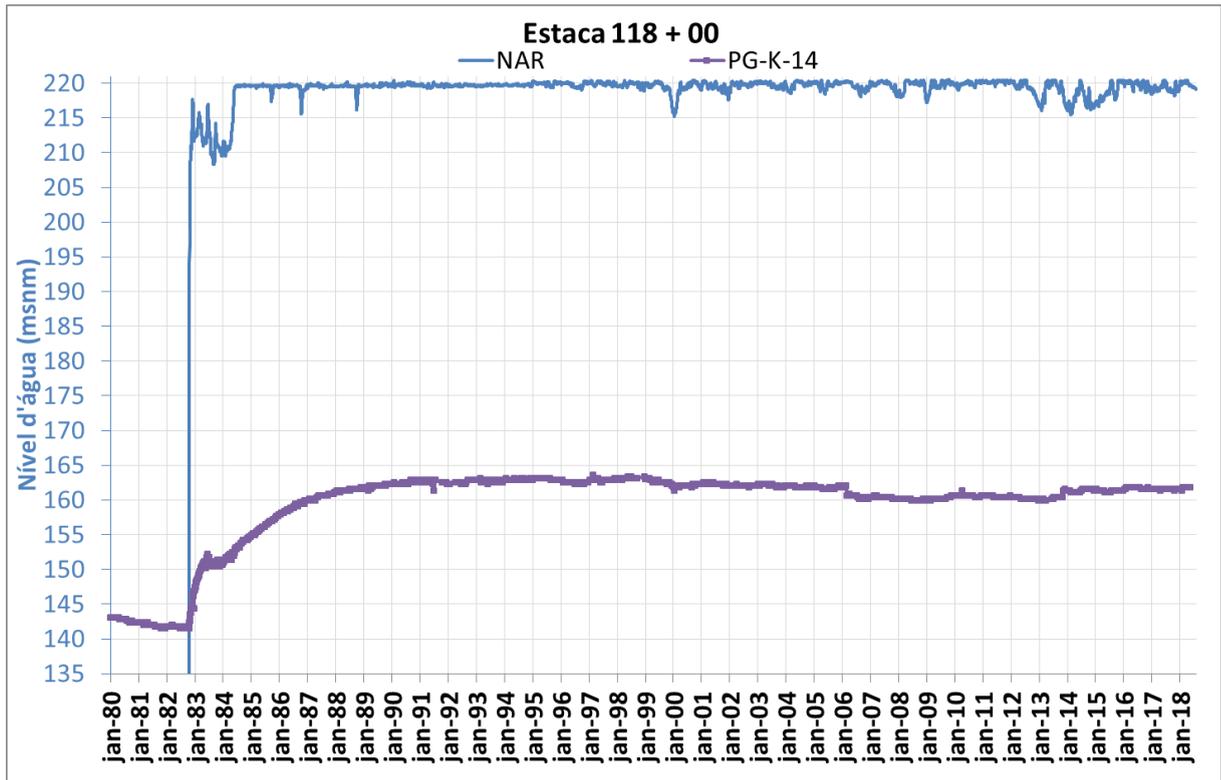


Figura STYLEREF 1 \s 4 SEQ Figura \* ARABIC \s 1 8 - Gráfico PG-K-14

Semelhantemente ao PG-K-13, nos dois anos antes do enchimento o PG-K-14 apresentou uma sensível redução das pressões neutras antes do enchimento do reservatório. Após o enchimento, considerado instantâneo, apresentou aumento das subpressões na mesma taxa que o PG-K-14. Entretanto, se mostrou mais sensível as variações do NAR quando, em 1983, o nível do reservatório foi reduzido e o instrumento apresentou uma redução das subpressões. Como os instrumentos monitoram a mesma feição e o PG-K-13, que possui menor sensibilidade ao NAR, está a montante, se atribui esse comportamento ao efeito tridimensional. Como citado anteriormente, a Est. 118+00 está próxima ao antigo leito do Rio Pomba-Quê, conseqüentemente recebe contribuição das áreas circunvizinhas.

A carga no piezômetro estabilizou em 1990 com 22 metros de variação desde o enchimento. A partir de então ficou variando dentro de uma faixa de 2 metros até que, em 2006, entre uma leitura e outra apresentou uma redução de 1,44 m da subpressão, fato semelhante ao apresentado no PG-K-27 instalado abaixo do núcleo na mesma seção. Nas leituras seguintes o instrumento continuou variando normalmente dentro de uma faixa de 1,5 m, porém sem variações bruscas. Em 2013 o instrumento apontou novamente uma mudança de carga repentina, desta vez um incremento de carga de 1 metro entre duas leituras. Novamente o instrumento se estabilizou e continuou variando dentro da faixa de 1 m. As

mudanças repentinas de carga são, assim como no PG-K-27, atribuídas à erros de leitura.

Apesar de estar mais a jusante que o PG-K-13 e, teoricamente, ter mais influência do nível do terreno a jusante e menos influência do reservatório, o PG-K-14 apresenta alta correlação com o NAR. A Tabela 4-3 apresenta os valores de correlação para o mesmo dia e considerando defasagens.

Tabela 4-3 – Correlações NAR x PG-K-14

<b>NAR x PG-K-14</b>	<b>Correlação Pearson</b>	<b>Tipo de Correlação</b>
Mesmo dia	0,68	Moderado
Defasagem de 1 dia	0,64	Moderado
Defasagem de 2 dias	0,62	Moderado
Defasagem de 3 dias	0,61	Moderado
Defasagem de 4 dias	0,60	Moderado

O comportamento do instrumento, com relação à correlação com o reservatório, é semelhante ao PG-K-13.

#### **PS-K-7**

O piezômetro de tubo aberto PS-K-7 está instalado na Est. 118+00 a 114 m a jusante do eixo da barragem juntamente com o PG-K-14. O instrumento está instalado na El. 134,61, logo acima do piezômetro Geonor, entretanto, ambos estão na mesma célula e, portanto, monitoram as mesmas feições. O perfil é mostrado juntamente com o perfil do PG-K-14 na Figura 4-8.

As leituras do PS-K-7 iniciaram em 1980 e continuam até hoje, apresentando coerência com o esperado e com os demais instrumentos. A Figura 4-9 mostra a evolução histórica das leituras junto com o nível do reservatório.

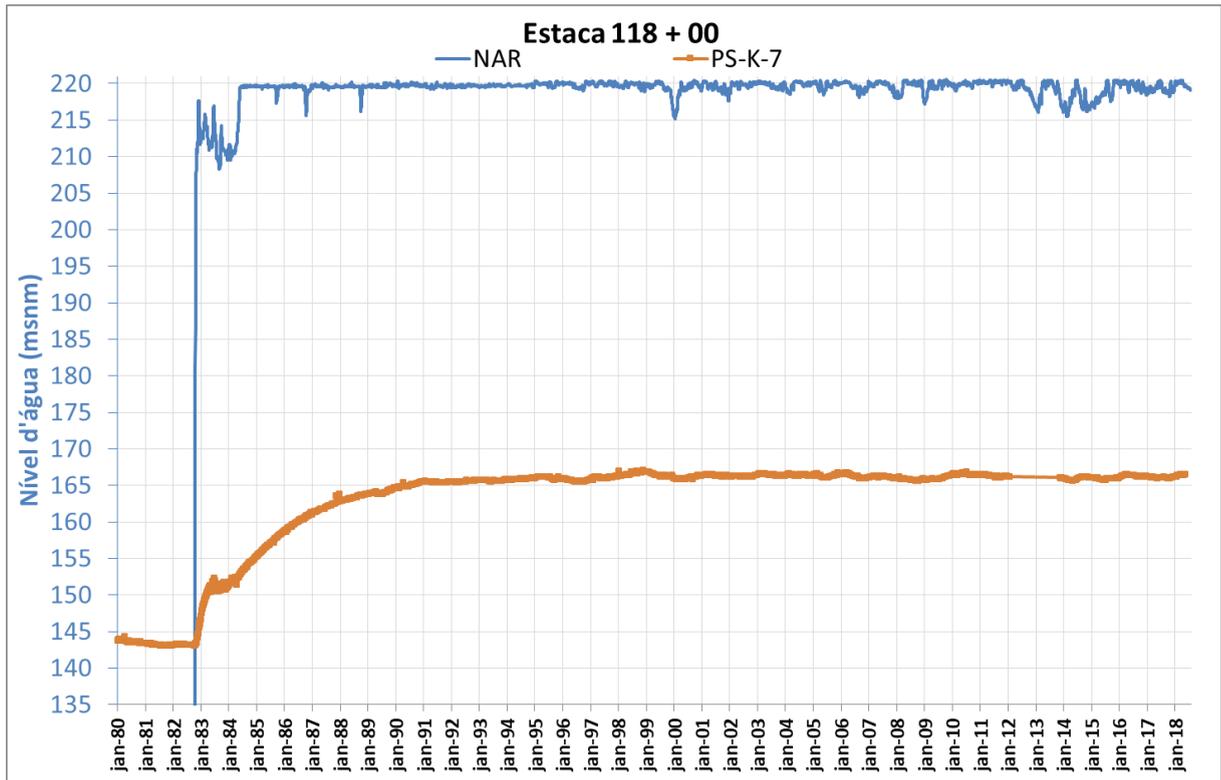


Figura STYLEREF 1 \s 4 SEQ Figura \\* ARABIC \s 1 9 - Gráfico PS-K-7

Quando observado o comportamento do PS-K-7 analisando antes do enchimento, durante e após, o instrumento apresenta comportamento semelhante ao PG-K-14, instalado na mesma célula, porém, as leituras do PS-K-7 são, em geral, mais altas que o PG-K-14. Essa diferença pode ser atribuída ao tipo de instrumento, o piezômetro elétrico é mais sensível e não depende da variação de volume de água, ao contrário do piezômetro de tubo aberto. As leituras entre 2006 e 2014 do piezômetro de tubo aberto são estáveis, corroborando com a hipótese que a variações bruscas lidas no piezômetro elétrico são erros de leitura.

As correlações entre o piezômetro de tubo aberto e o nível do reservatório são sensivelmente menores que o PG-K-14. O resultado é mostrado na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Correlações NAR x PS-K-7

NAR x PS-K-7	Correlação	
	Pearson	Tipo de Correlação
Mesmo dia	0,62	Moderado
Defasagem de 1 dia	0,58	Moderado
Defasagem de 2 dias	0,56	Moderado
Defasagem de 3 dias	0,55	Moderado

Defasagem de 4 dias

0,54

Moderado

A correlação menor, quando comparada ao PG-K-14, pode ser atribuída ao maior tempo de resposta do piezômetro de tubo aberto. Por ser necessário o equilíbrio entre as pressões neutras no maciço com a coluna d'água dentro do tubo, o valor lido no instrumento não é tão preciso como o piezômetro elétrico.

### Análise do conjunto

A Figura 4-10 mostra o gráfico histórico dos quatro instrumentos na seção da Est. 118+00 juntamente com o nível do reservatório.

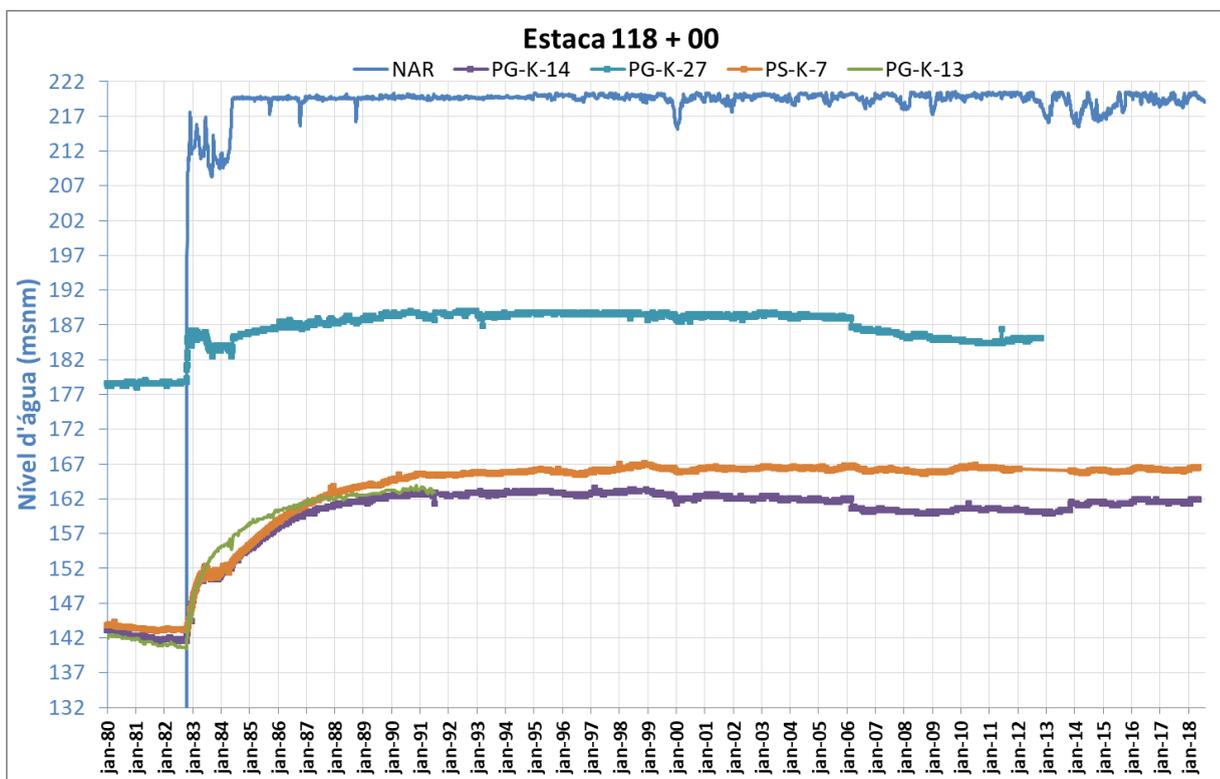


Figura STYLEREF 1 \s 4 SEQ Figura \\* ARABIC \s 1 10 - Gráfico de instrumentos na Est. 118+00

Mediante as leituras históricas, nota-se que o PG-K-27 é o instrumento com maior carga, isso porque está instalado a poucos metros do reservatório. Mesmo assim, a perda de carga pelo núcleo da barragem desde a face de montante até o instrumento é de aproximadamente 30 m.

O PG-K-13 pode ser analisado juntamente com o PG-K-14 pois ambos são do mesmo modelo e monitoram a mesma feição. Antes do enchimento nota-se que ambos apresentavam praticamente a mesma carga, com uma pequena diferença mostrando perda de carga no

sentido jusante-montante. Após o enchimento o PG-K-13 apresentou cargas maiores, possivelmente por estar mais próximo ao reservatório, no entanto, ambos tendiam a estabilizar com a mesma carga até que, em 1991 as leituras do PG-K-13 foram interrompidas.

Apesar de apresentarem uma variação nos comportamentos, a correlação entre os dois instrumentos ao longo da vida útil do PG-K-13, foi de 0,98, o que era esperado visto que monitoram a mesma feição em afastamentos diferentes do eixo.

O PS-K-7 apresenta variação semelhante ao PG-K-14, porém as cargas são coincidentes apenas no momento do enchimento do reservatório. Em geral, antes e após o enchimento, o piezômetro de tubo aberto apresenta valores de subpressão maiores que o piezômetro elétrico.

O piezômetro de tubo aberto tem como uma de suas vantagens a durabilidade, enquanto o piezômetro elétrico, a precisão. Analisando historicamente, nota-se que após o efeito do enchimento do reservatório, o PS-K-7 estabilizou-se enquanto o PG-K-14 mostrou uma tendência de diminuição. Assim, essa discrepância entre eles ao longo do tempo pode ser atribuída a defeitos no piezômetro elétrico devido ao tempo de vida.

#### **4.2.2 Simulação Numérica**

Com a geometria definida em AutoCAD, as regiões foram importadas para o SEEP/W (Figura 4-11). Foram então analisados os resultados de ensaios e relatórios da época de construção para definição das permeabilidades a serem adotadas para cada material. Os dois tipos de argila do núcleo foram profundamente ensaiados, com, inclusive, mais de um tipo de ensaio. Nas simulações a argila foi considerada parcialmente saturada.

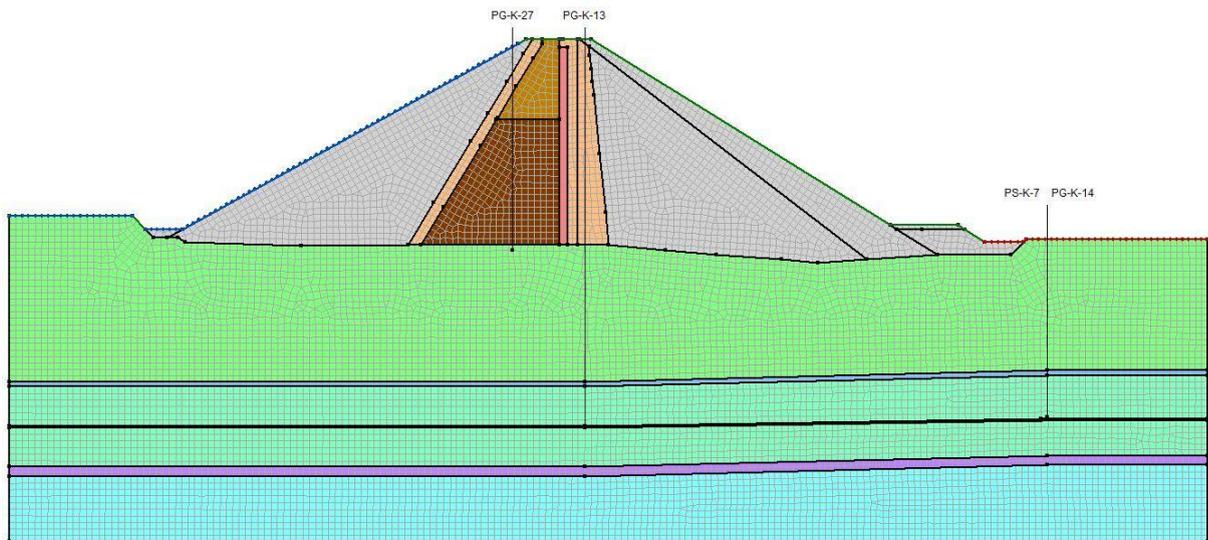


Figura 4-11 - Geometria e malha da Est. 118+00

Na fundação, foi utilizada a permeabilidade obtida por meio dos ensaios de perda d'água sob pressão realizados na sondagem rotativa próxima ao núcleo (Anexo VIII) e nos furos de instalação dos instrumentos que monitoram a fundação (Anexo IX).

Nos ensaios realizados nos furos de instalação dos instrumentos a perda d'água foi consideravelmente menor que na sondagem. Isso acontece, pois, a sondagem foi realizada antes das injeções de cimento a montante, enquanto os furos para instalação dos instrumentos foram realizados posteriormente.

A Tabela 4-5 mostra as permeabilidades adotadas para cada tipo de material.

Tabela 4-5 - Permeabilidades dos materiais

<b>Material</b>	<b>Permeabilidade (cm/s)</b>
Argila arenosa (parte inferior)	$K_h = 1,3 \times 10^{-6}$
	$K_v = 1,5 \times 10^{-7}$
Argila plástica (parte superior)	$K_h = 4,8 \times 10^{-7}$
	$K_v = 1,9 \times 10^{-7}$
Filtro	$8 \times 10^{-1}$
Transição	$5 \times 10^{-1}$
Basalto denso	$1,16 \times 10^{-10}$
Brechas	$8 \times 10^{-5}$
Junta D	$4 \times 10^{-4}$

As condições de contorno adotadas foram o nível do reservatório a montante e saída

livre próximo a base do talude de jusante. Para calibração, foi utilizado os valores médios de um ano do nível do reservatório, assim como dos valores medidos nos instrumentos. Para possibilitar a calibração de todos os instrumentos foi analisado o ano de 1990, que foi o último ano que todos instrumentos funcionaram em conjunto. Neste período, os instrumentos já apresentavam estabilização após o enchimento do reservatório.

O fluxo pelo núcleo apresentou coerência, a diferença entre o valor obtido da simulação e da instrumentação do PG-K-27 foi de aproximadamente 4 m, sendo a carga obtida pela simulação aproximadamente 192 m enquanto na instrumentação a carga média é de 188,59 m. A Figura 4-12 mostra o resultado desta simulação de fluxo através do núcleo de argila.

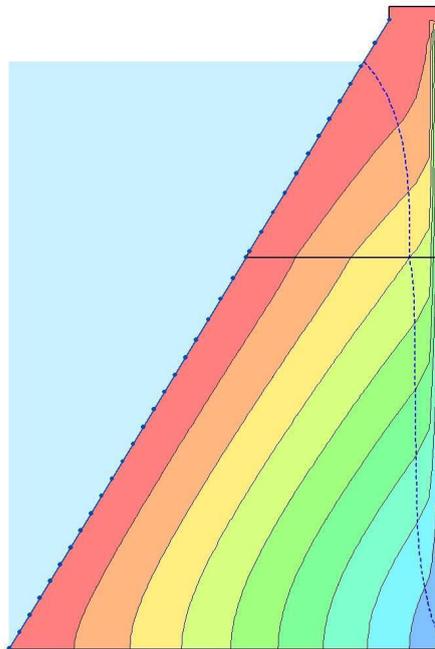


Figura 4-12 - Fluxo através do núcleo

Destaca-se que na mesma seção, mais a jusante, existem dois piezômetros instalados numa mesma célula que monitoram as mesmas feições. Ambos se diferem pelo modelo, um deles é elétrico, como o PG-K em questão, e outro de tubo aberto. Apesar de monitorarem a mesma feição, o piezômetro de tubo aberto apresenta cargas maiores que o piezômetro elétrico na ordem de 2 a 3 metros. Se aplicado o mesmo *offset*, considerando, hipoteticamente, a instalação de um piezômetro de tubo aberto junto ao PG-K-27, os valores da instrumentação e simulação ficariam bastante próximos.

Os piezômetros da fundação apresentam valores muito abaixo do resultado da simulação para o local, a simulação mostra cargas com, aproximadamente, 30 m acima da carga medida pelo piezômetro.

O coeficiente de permeabilidade adotado para os derrames basálticos são valores representativos, visto que a matriz rochosa apresenta permeabilidade muito baixa e o fluxo através do basalto fraturado ocorre pelas descontinuidades, que não são representadas neste modelo. Os ensaios de perda d'água, utilizados para determinação do coeficiente de permeabilidade do material da fundação, não apresentaram perda d'água no interior dos derrames, apenas nas brechas e junta D, pois, provavelmente, no local do furo não ocorrem as descontinuidades.

Foram realizadas diversas tentativas de calibrar o modelo com um coeficiente de permeabilidade representativo para o derrame basáltico, porém, sem sucesso. A solução é a geração de um modelo representando as descontinuidades, fraturas e demais estruturas do maciço rochoso. A simulação deve ser feita em *software* que considere essas estruturas geológicas, que não é o caso do SEEP/W utilizado neste trabalho.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Usualmente as informações sobre a barragem estão contidas em documentos distintos, por exemplo, detalhes da escavação, geologia da fundação, locação dos instrumentos e a geometria do maciço da barragem. A modelagem e concentração de informações em um único documento possibilita uma visão melhor sobre a seção a ser estudada.

A revisão das condições de fluxo de uma barragem utilizando técnicas modernas e analisando todo o histórico da instrumentação com, inclusive, dados atuais da instrumentação, permite avaliar o comportamento da estrutura mediante as condições reais de operação do empreendimento. É importante analisar o comportamento de um conjunto de instrumentos a fim de avaliar seu comportamento mediante diferentes condições a quais são submetidos e identificar possíveis comportamentos não previstos em projeto.

Mediante a análise histórica da instrumentação, foi possível compreender o comportamento de cada um dos instrumentos individualmente e o comportamento do conjunto. Chegou-se à conclusão que existe influência de outros fatores, que podem ser por exemplo, chuva ou nível d'água no terreno a jusante, mas o principal fator que influencia os instrumentos da seção é o nível do reservatório.

O PG-K-27, instalado abaixo do núcleo, apontou um aumento de oito metros da subpressão no enchimento do reservatório, mas, em seguida estabilizou com pequenas variações até fim de sua vida útil em 2013. Foi o instrumento que apresentou maior correlação com o NAR, isso devido sua localização, no contato do solo com a fundação, próximo ao reservatório.

O PG-K-13 e PG-K-14, por monitorarem as mesmas feições da fundação, possuem comportamento semelhante. O efeito do enchimento do reservatório nesses instrumentos durou aproximadamente oito anos, isso porque a matriz rochosa da fundação possui permeabilidade muito baixa, então o fluxo acontece predominantemente pelas discontinuidades que, em geral, são horizontais e também possuem permeabilidade relativamente baixa. Assim, o fluxo permanente leva mais tempo para ser estabelecido nessas feições. Apesar de desativado, as últimas leituras do PG-K-13 apontavam uma tendência de estabilização com o PG-K-14, da mesma forma que ocorria antes do enchimento do reservatório.

Pode-se dizer que o PS-K-7 e o PG-K-14 trabalham em redundância, por estarem

instalados numa mesma célula do furo. Os instrumentos são de modelos diferentes e possuem peculiaridades que os tornam útil em conjunto. O piezômetro elétrico, apresenta maior precisão e menor tempo de resposta, além da possibilidade de ser instalado em locais mais distantes da superfície. Já o piezômetro de tubo aberto possui um mecanismo mais simples e confiável, que o proporciona uma maior vida útil. Desta maneira o PG-K-14 é importante para comparar as leituras com o PG-K-13, instalado na fundação abaixo do núcleo, o PS-K-7 permite, de certa forma, validar esses valores ao longo do tempo. Com isso, foi possível, em 2006, atribuir a alteração das subpressões nos piezômetros elétricos a falhas na leitura, já que o piezômetro de tubo aberto continuou apontando as subpressões como estáveis.

As simulações numéricas apresentaram resultados razoáveis para análise do fluxo pelo núcleo de argila, a diferença existente entre as leituras dos instrumentos e os valores obtidos pela simulação pode ser justificada pelo tipo de instrumento utilizado. Para a fundação o modelo não se mostrou adequado. Os valores lidos pelos piezômetros são consideravelmente menores que os valores obtidos pela simulação. Isso ocorre, pois, os derrames basálticos possuem permeabilidade muito baixa, nos ensaios realizados *in situ* não houve perda d'água para se calcular o coeficiente de permeabilidade, desta forma, optou-se por utilizar uma permeabilidade representativa, porém sem sucesso. Sabe-se que o fluxo nessa camada ocorre pelas discontinuidades e fraturas. Para essa análise então, é necessária modelagem geológica do maciço e simulação em *software* voltado para fluxo subterrâneo em meio fraturados.

## 6. REFERÊNCIAS

AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Águas Subterrâneas. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE): São Paulo (1998).

CEDERGREN, H. R. **Seepage, drainage, and flow nets**. John Wiley & Sons (1997).

COOK, R. D. *et al.* **Concepts and applications of finite element analysis** (3ª Ed.). John Wiley & Sons (1989).

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, (1996).

DAS, B. M. **Fundamentals of Geotechnical Engineering, Third Edition**. Madrid, Spain (2007).

GEO-SLOPE INTERNATIONAL, LTD. **Seepage Modeling with SEEP/W**. Geostudio Helpfile (2012).

INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IECO) & ENERCONSULT ENGENHARIA LTDA (ELC). **Relatório do histórico do desempenho das estruturas e suas fundações**. Documento interno de Itaipu, SAT 4006.50.0024.P, 1995.

INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IECO) & ENERCONSULT ENGENHARIA LTDA (ELC). **Barragem de Enrocamento e de Terra ME – Núcleo de Argila Arenosa – Relatório Final – Volume I**. Documento interno de Itaipu, SAT 2063.50.1762.P, 1981.

INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IECO) & ENERCONSULT ENGENHARIA LTDA (ELC). **Barragem de Enrocamento ME – Maciço de Argila Plástica – Relatório Final**. Documento interno de Itaipu, SAT 2060.54.15634.P, 1983.

INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IECO) & ENERCONSULT ENGENHARIA LTDA (ELC). **Resumo da Geologia das Fundações em Rocha da Barragem de Enrocamento e da Transição com a Barragem de Terra**. Documento interno de Itaipu, SAT 2084.50.1501.P, 1978b.

INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IECO) & ENERCONSULT ENGENHARIA LTDA (ELC). **Presa de Enrocado – Informe Final de Projeto**. Documento interno de Itaipu, SAT 4270.50.1003.E, 1978a.

ITAIPU BINACIONAL. **Perfil de instalação do piezômetro Geonor M-600 nº PG-K-13, série 75.098**. Documento interno de Itaipu, SAT 4272.60.15511.P, 1977.

ITAIPU BINACIONAL. **Perfil de instalação dos piezômetros nºs PS-K-7 e PG-K-14**. Documento interno de Itaipu, SAT 4272.60.15512.P, 1977.

ITAIPU BINACIONAL. **Perfil de instalação do piezômetro Geonor M-600 nº PG-K-27, série 75.017**. Documento interno de Itaipu, SAT 4272.60.15525.P, 1978.

ITAIPU BINACIONAL. **Usina Hidrelétrica de Itaipu: Aspectos de Engenharia**. Foz do Iguaçu, 2009.

KUTZNER, C. **Earth and Rockfill Dams: Principles for Design and Construction**. CRC Press, (1997).

OLIVEIRA, A. M. S. **Ensaio de Perda d'Água Sob Pressão**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental: Boletim nº 2, 16p, São Paulo, 1975.

RODRIGUES, R.L. **Comportamento da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu Durante Período de Operação**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. Oficina de Textos: São Paulo (2006).

## **ANEXOS**

Anexo I – Seção longitudinal e seção transversal típica;

Anexo II – Ensaio de compactação e caracterização da argila arenosa;

Anexo III – Permeabilidades da argila arenosa obtida por ensaio de adensamento;

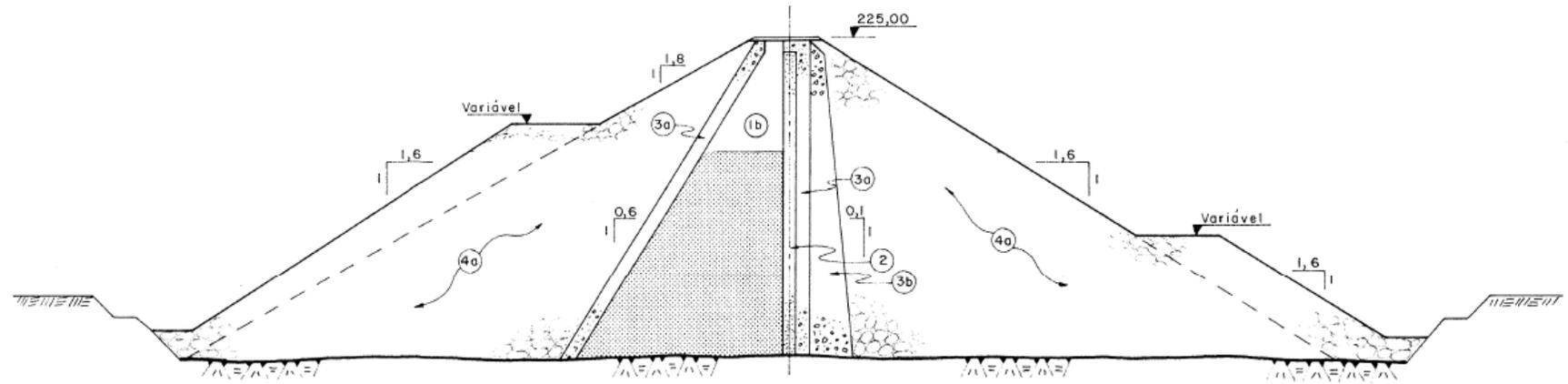
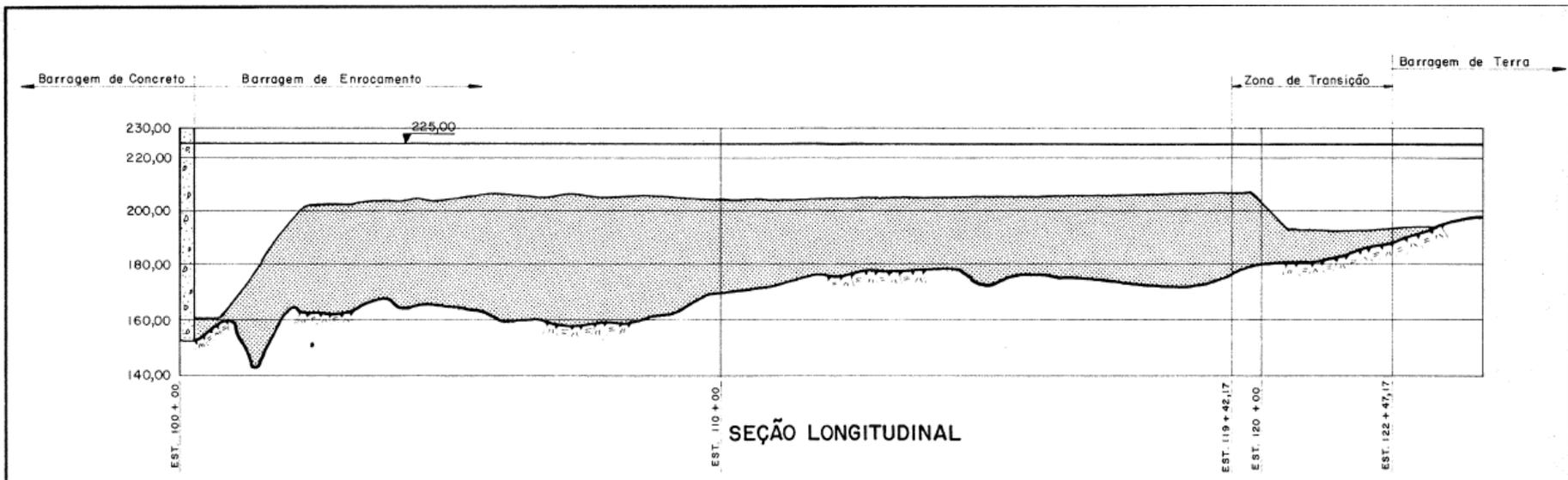
Anexo IV – Ensaio de permeabilidade da argila arenosa com permeâmetro de carga variável;

Anexo V – Ensaio de caracterização e compactação da argila plástica;

Anexo VI – Ensaio de permeabilidade da argila plástica com permeâmetro de carga variável;

Anexo VII – Ensaio de permeabilidade da argila plástica em câmara triaxial;

## 6.1 ANEXO I – SEÇÃO LONGITUDINAL E SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA;

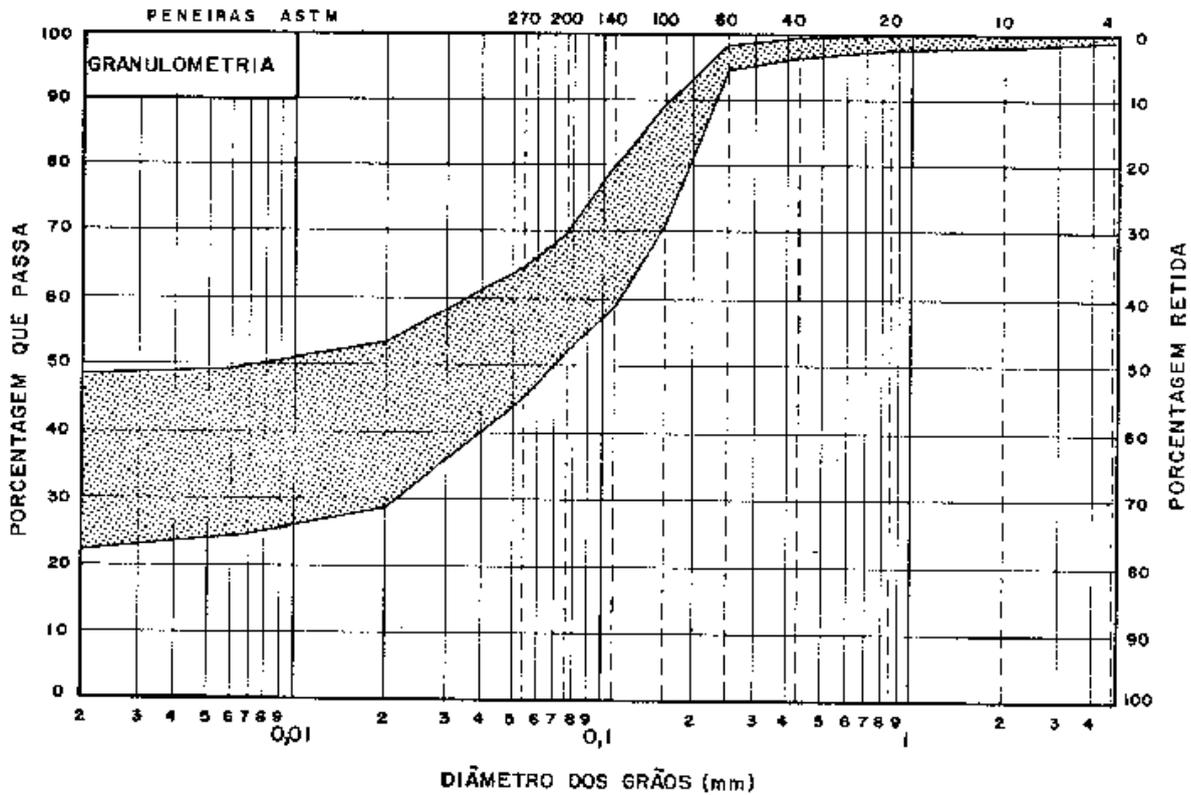


- CONVENÇÕES:
- (1b) - Argila plástica
  - (2) - Filtro
  - (3a) - Transição fina
  - (3b) - Transição grossa
  - (4a) - Enrocamento

- LEGENDA:
- Argila plástica
  - Filtro
  - Enrocamento

<b>ITAIPU BINACIONAL</b>	
BARRAGEM DE ENROCAMENTO E DE TERRA - M.E. NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA SEÇÕES	
DIRETORIA TÉCNICA - S.O.T	ESCALA:
DES. <i>[Handwritten]</i> PROJ. <i>[Handwritten]</i>	RELATÓRIO S.02/81
CONF. <i>[Handwritten]</i> VISTO <i>[Handwritten]</i>	ANEXO 02
ORIGINAL APROVADO APROV. <i>[Handwritten]</i>	PARA <i>[Handwritten]</i>

6.2 ANEXO II – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA  
ARGILA ARENOSA;



ABNT	ARGILA	SILTE	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	AREIA GROSSA	PEDREG.
MIT		SILTE	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	AREIA GROSSA	PEDREGULHO

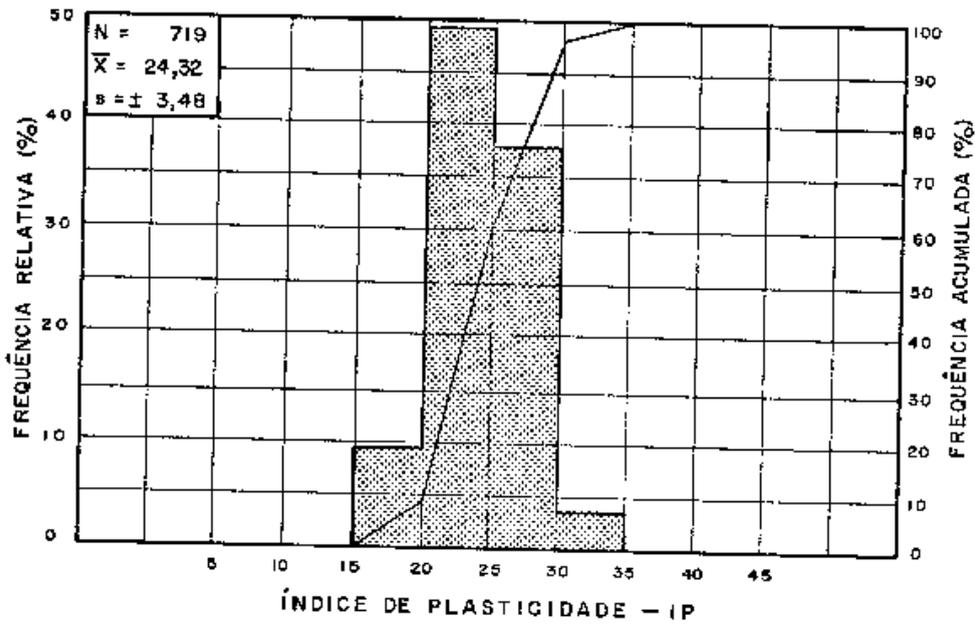
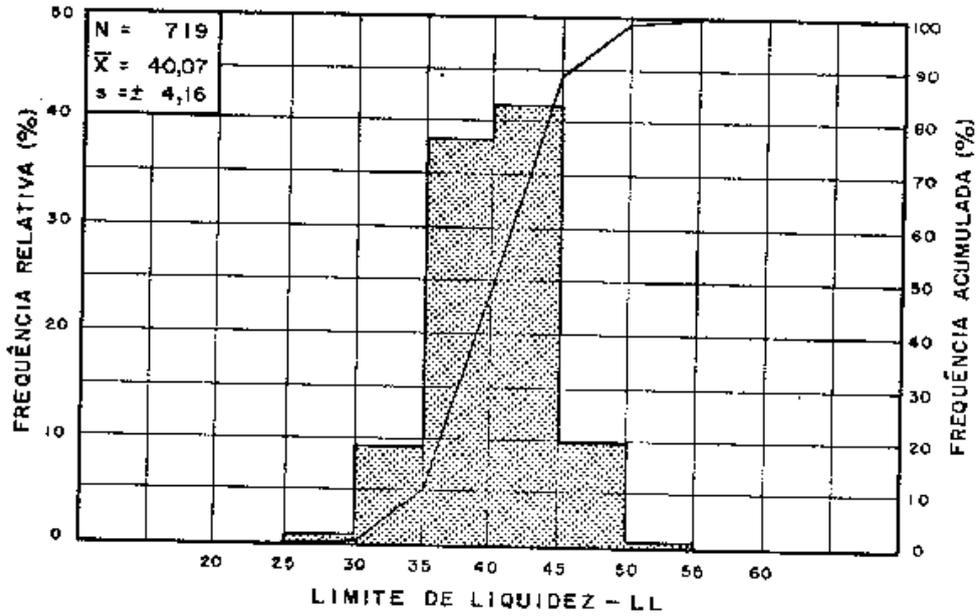
**NOTA**

- 1 - A densidade dos grãos média obtida em 713 ensaios foi de 2,74 g/cm<sup>3</sup>, com um valor mínimo de 2,66 g/cm<sup>3</sup> e um máximo de 2,83 g/cm<sup>3</sup>.

**LEGENDA**

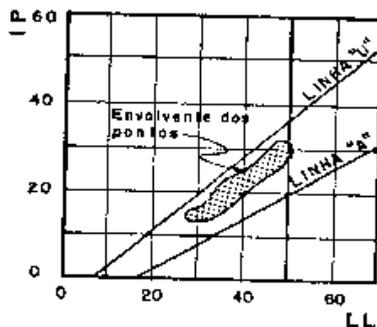
- Faixa de ocorrência das curvas granulométricas, com 95% de confiança, obtida a partir de 713 ensaios.

<b>ITAIPU BINACIONAL</b>	
BARRAGEM DE ENROCAMENTO E DE TERRA - M.E. NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA GRANULOMETRIA	
DIRETORIA TÉCNICA - SO.T	ESCALA:
DES. PROJ. <i>[assinatura]</i>	RELATÓRIO 502/81
CONF. VISTO <i>[assinatura]</i>	ANEXO 03
ORIGINAL APROVADO APROV. PARA	

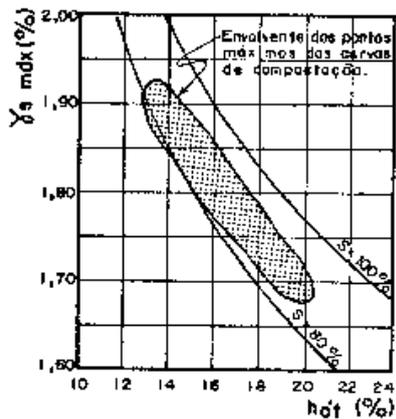
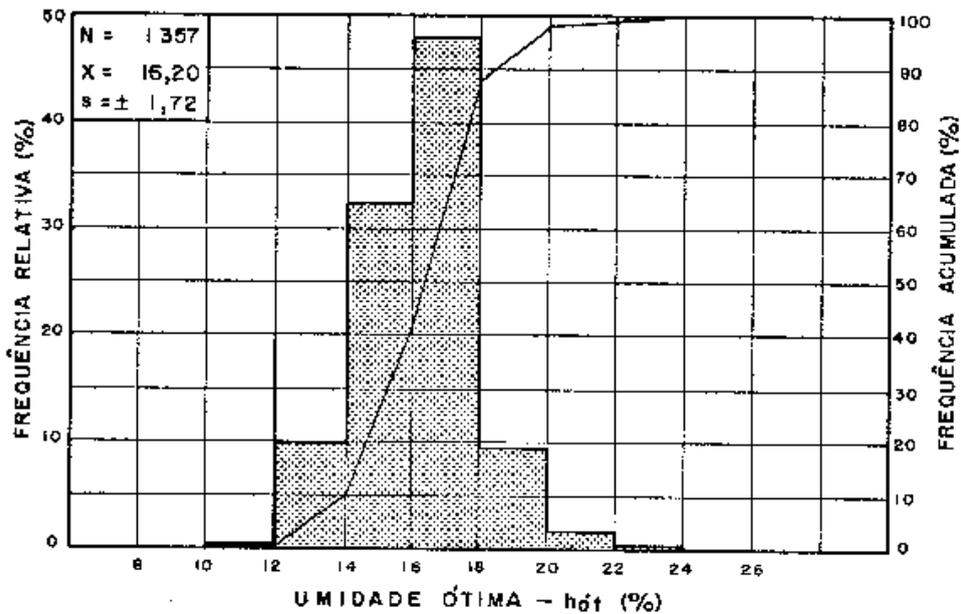
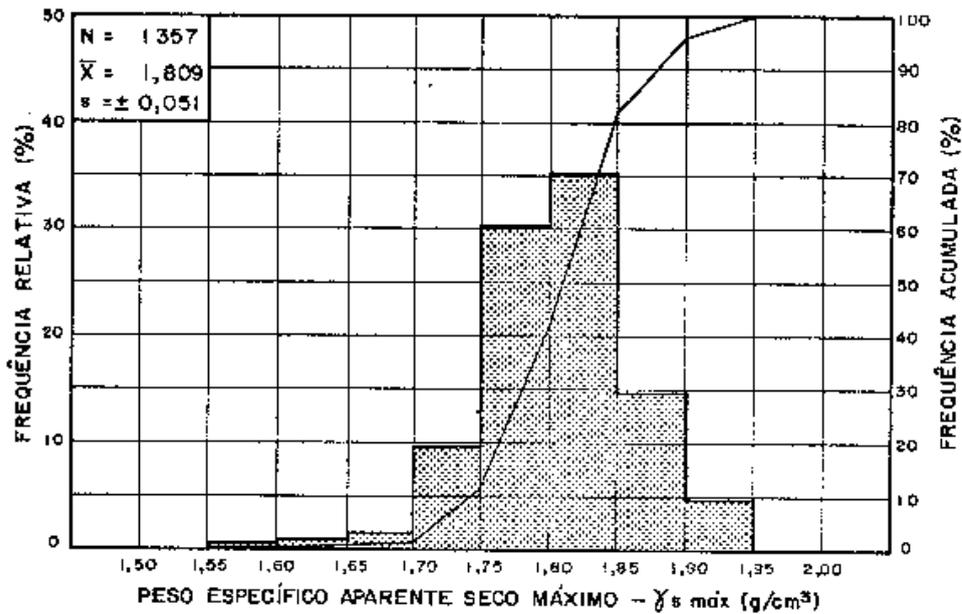


**CONVENÇÕES:**

- N = Número de ensaios
- $\bar{X}$  = Média
- s = Desvio padrão



 <b>ITAIPU BINACIONAL</b>	
BARRAGEM DE ENROCAMENTO E DE TERRA - M.E. NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA LIMITES DE CONSISTÊNCIA	
DIRETORIA TÉCNICA - SO.T	ESCALA.
DES. PROJ. / VISTO / ORIGINAL APROVADO PARA	RELATÓRIO S02/81 ANEXO 04



**NOTAS:**

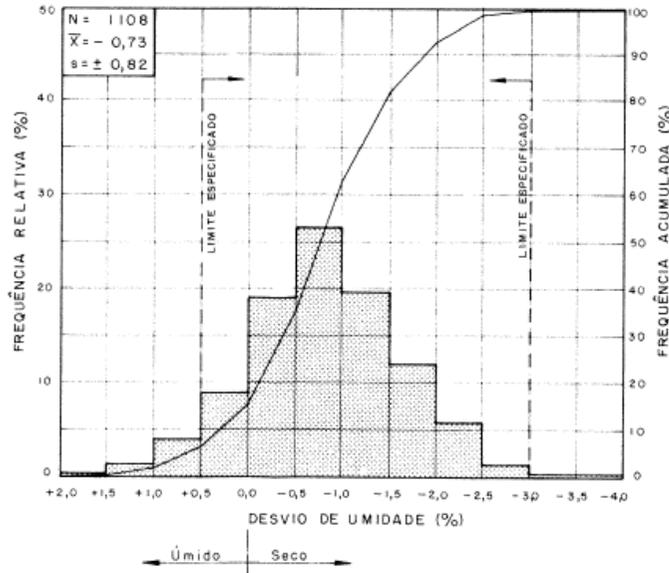
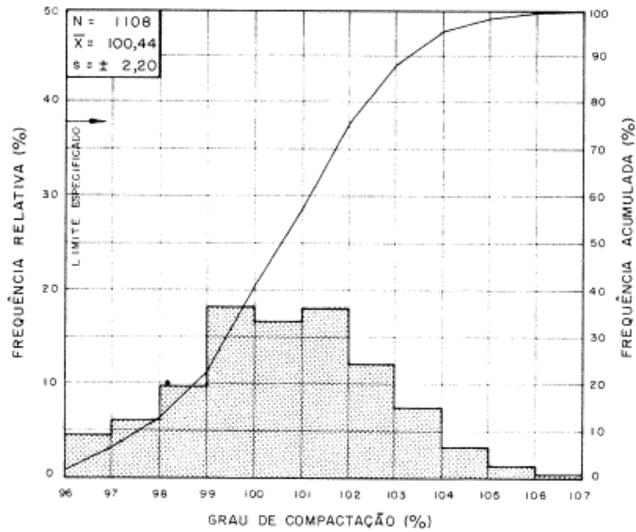
- 1 - Ensaios de compactação sem reuso e sem secamento.
- 2 - Curvas de igual grau de saturação com a densidade dos grãos igual a 2,74 g/cm³.

**CONVENÇÕES:**

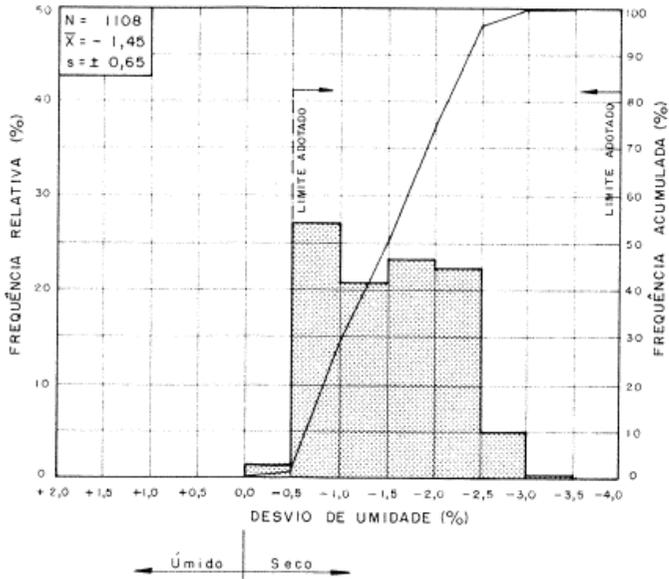
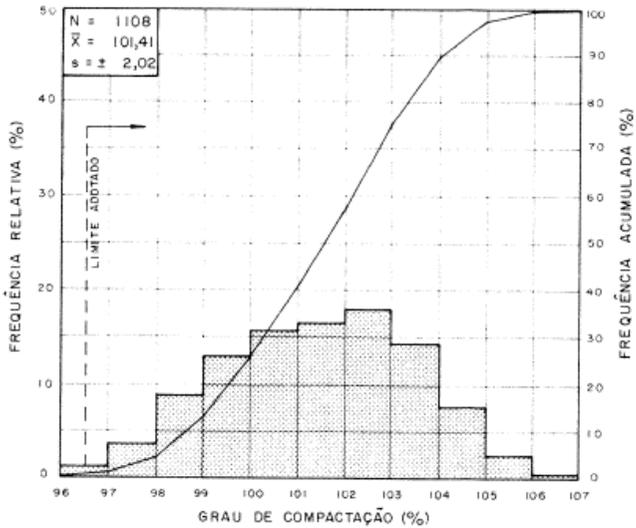
- N = Números de ensaios
- $\bar{X}$  = Média
- s = Desvio padrão

 <b>ITAIPU BINACIONAL</b>	
BARRAGEM DE ENROCAMENTO E DE TERRA - M.E. NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL	
DIRETORIA TÉCNICA - SO.T	ESCALA:
DES. / PROJ. / CONF. / VISTO / ORIGINAL APROVADO	RELATÓRIO 5 02/81 ANEXO - 05

ENSAIOS DE PROCTOR



ENSAIOS DE HILF



NOTAS :

- 1 - Os gráficos apresentados neste desenho se referem apenas aos ensaios que liberaram camadas.
- 2 - Os ensaios de Proctor Normal foram realizados no Laboratório Central, sem secamento e sem reutilização do material. Os ensaios de Hilf foram executados no Laboratório de Campo.

CONVENÇÕES :

- N - Número de ensaios
- $\bar{X}$  - Média
- s - Desvio padrão



ITAIPU BINACIONAL

BARRAGEM DE TERRA E DE ENROCAMENTO  
NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA  
COMPARAÇÃO HILF - PROCTOR

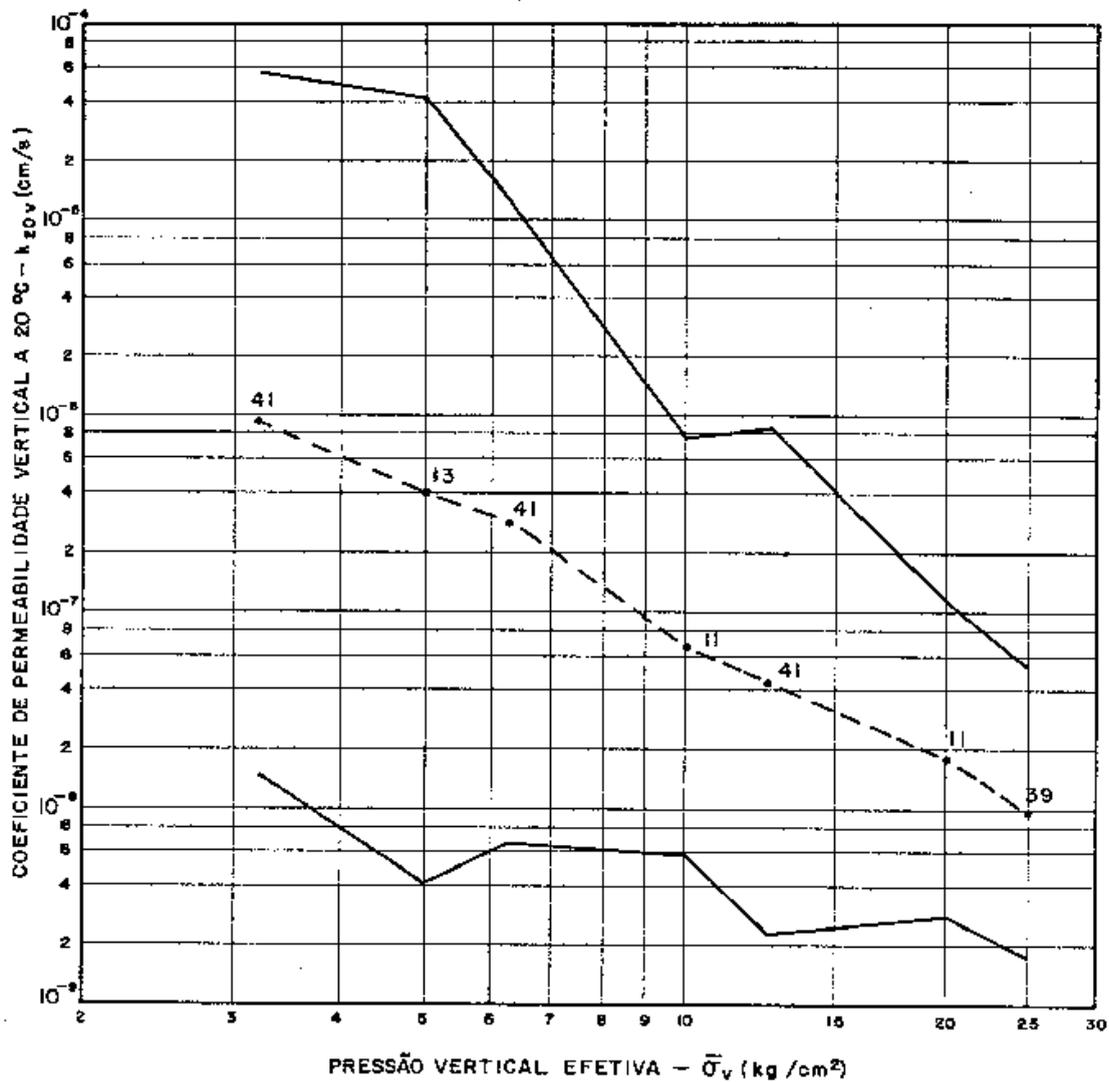
DIRETORIA TÉCNICA - SO. T

ESCALA

DES: PROJ. VISTO  
CONF: 04/56  
ORIGINAL APROVADO APROV. PARA

RELATÓRIO S 02/81  
ANEXO 08

6.3 ANEXO III – PERMEABILIDADES DA ARGILA ARENOSA OBTIDAS POR  
ENSAIOS DE ADENSAMENTO;



**NOTAS:**

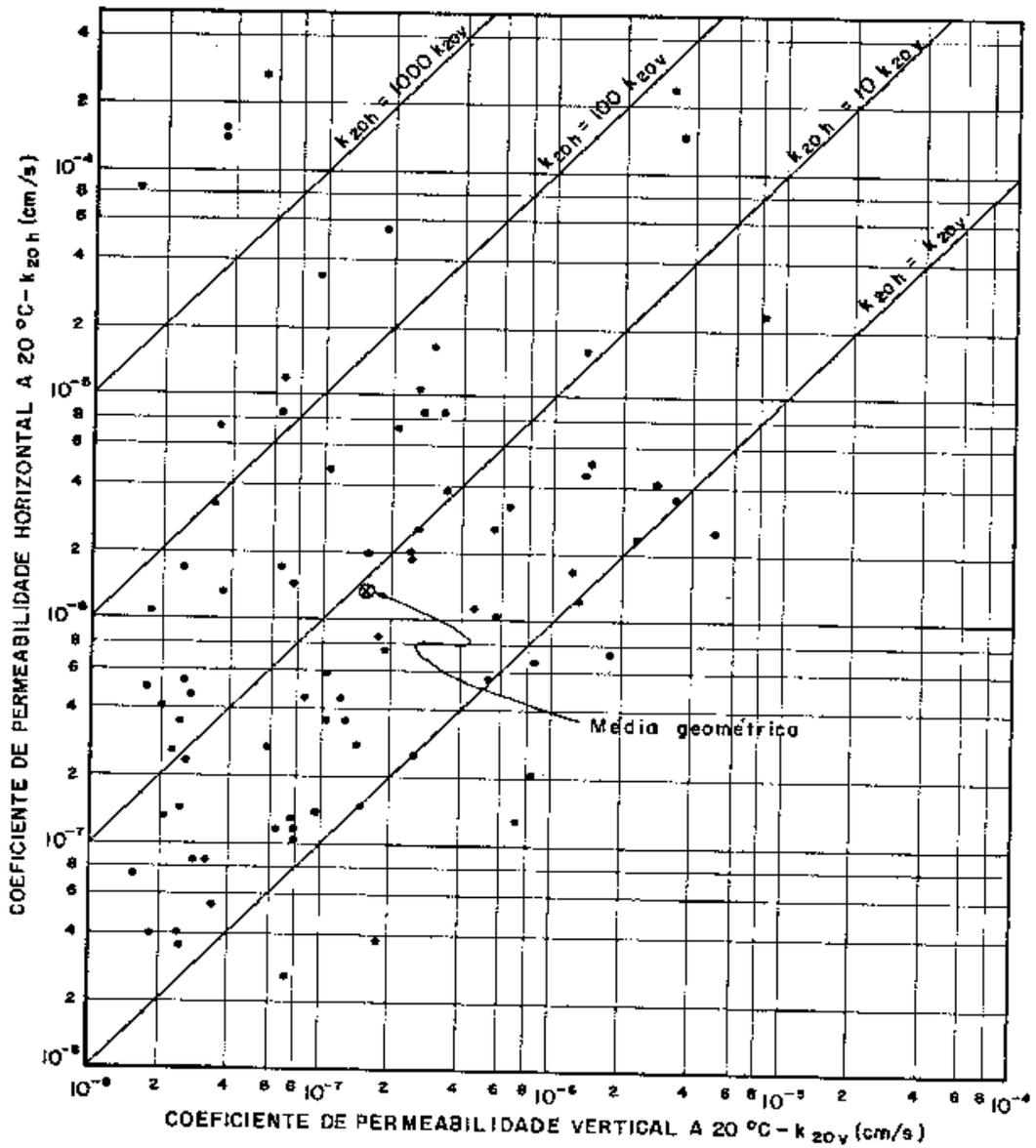
- 1 - Os valores do coeficiente de permeabilidade foram obtidos nos ensaios de adensamento.
- 2 - Foram considerados os ensaios nos blocos de poços superficiais e de inspeção.

**LEGENDA:**

- N - N ensaios na respectiva pressão.
- Curva das médias aritméticas do log  $k_{20v}$ .
- Faixa de ocorrência dos valores individuais do log  $k_{20v}$  com 95% de confiança.

<b>ITAIPU BINACIONAL</b>	
BARRAGEM DE ENROCAMENTO E DE TERRA - M.E. NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA	
<b>ENSAIO DE PERMEABILIDADE NO ADENSAMENTO</b>	
DIRETORIA TÉCNICA - S.O.T.	ESCALA:
DES. <i>[assinatura]</i> PROJ. <i>[assinatura]</i>	RELATÓRIO 5.02/81
CONF. <i>[assinatura]</i> VISTO <i>[assinatura]</i>	ANEXO 13
ORIGINAL APROVADO PARA <i>[assinatura]</i>	

## 6.4 ANEXO IV – ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DA ARGILA ARENOSA COM PERMEÂMETRO DE CARGA VARIÁVEL



ENSAIOS	PERMEABILIDADE	
	Horizontal (cm/s)	Vertical (cm/s)
Valor máximo	$2,8 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{-6}$
Valor mínimo	$2,6 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$
Média geométrica	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-7}$

**NOTAS:**

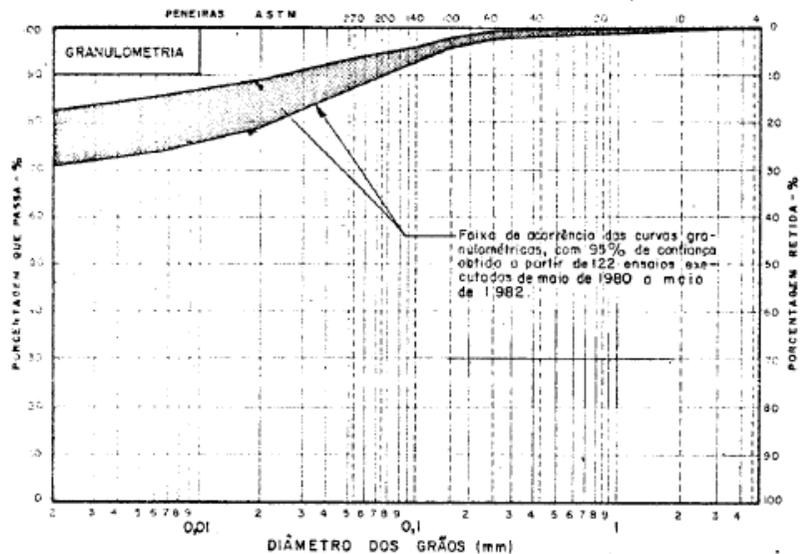
- Os valores do coeficiente de permeabilidade foram determinados no permeômetro de carga variável.
- Foram lançados somente os valores dos ensaios nos blocos das paços superficiais (N = 84 ensaios).


**ITAIPU BINACIONAL**

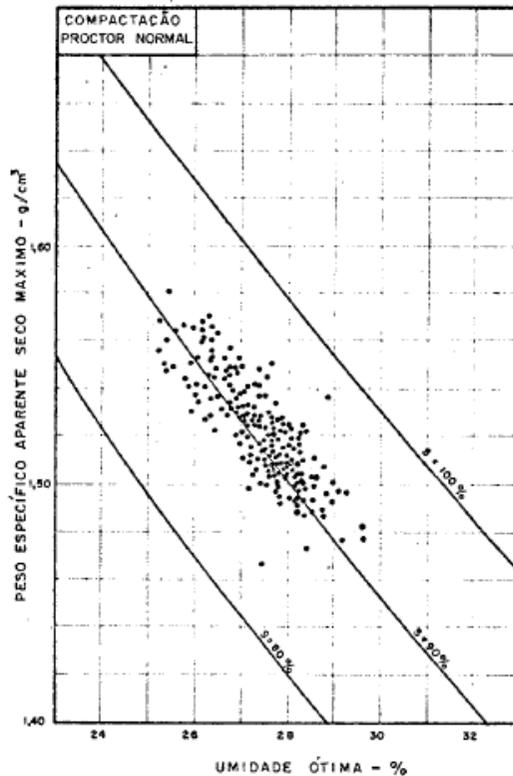
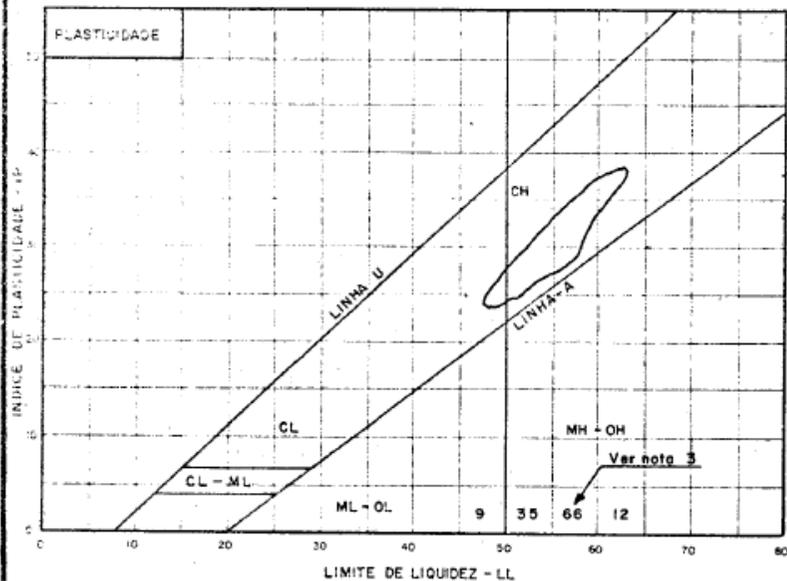
BARRAGEM DE ENROCAMENTO E DE TERRA - M.E.  
NÚCLEO DE ARGILA ARENOSA  
ENSAIO DE PERMEABILIDADE

DIRETORIA TÉCNICA - S.O.T	ESCALA:
DES. / PROJ. / CONF. / ORIGINAL APROVADO PARA	RELATÓRIO S02/81 ANEXO 14

6.5 ANEXO V – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA  
ARGILA PLÁSTICA



ABNT	ARGILA	SILT	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	AREIA GROSSA	PEDREGULHO
U.T.	SILT	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	AREIA GROSSA		



**NOTAS GERAIS**

- 1- As curvas de igual valor de grau de saturação foram obtidas considerando-se o valor médio de 2,64 (mín=2,79 e máx=2,89) para a densidade dos grãos.
- 2- A linha U ("Ultimate Line") representa o limite, no gráfico da plasticidade, para todos os tipos de solos já ensaiados.
- 3- Os números indicados representam a ocorrência dos ensaios de LL em cada classe de 5% (50% a 55% etc.).

**LEGENDA**

- Pontos máximos das curvas dos ensaios de Proctor Normal, executados de maio de 1980 a maio de 1982 (214 ensaios).
- Envolvente de 122 ensaios de plasticidade executados de maio de 1950 a maio de 1952.



**ITAIPU BINACIONAL**

BARRAGEM DE ENROCAMENTO - ME  
NÚCLEO DE ARGILA PLÁSTICA  
ÁREA DE EMPRÉSTIMO CANAL 1

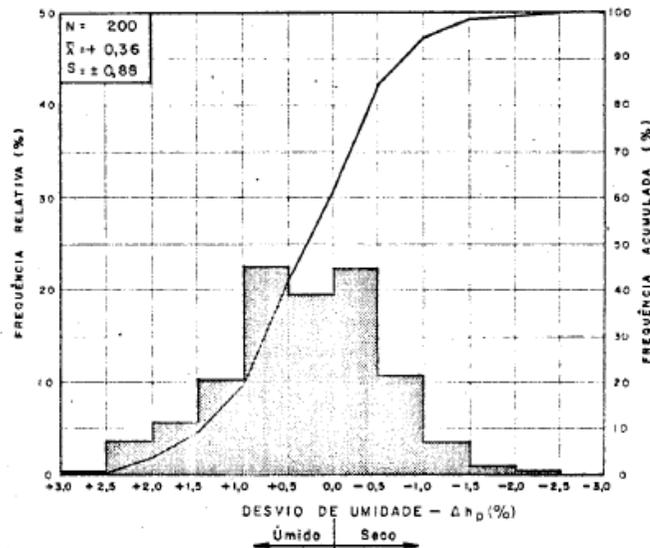
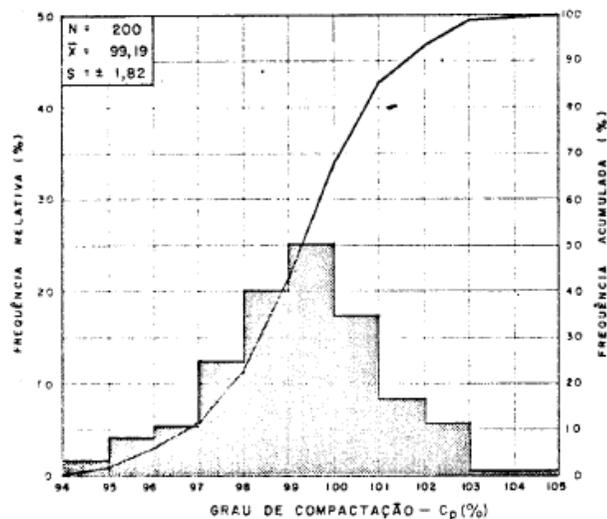
DIRETORIA TÉCNICA - DOT

EL-114

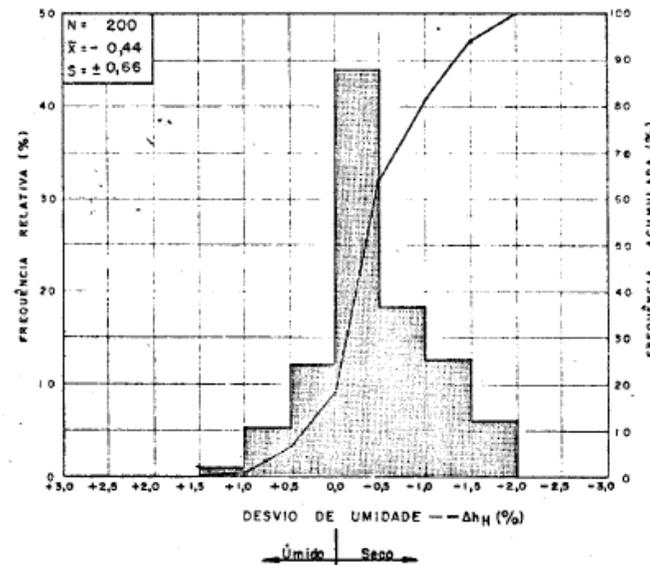
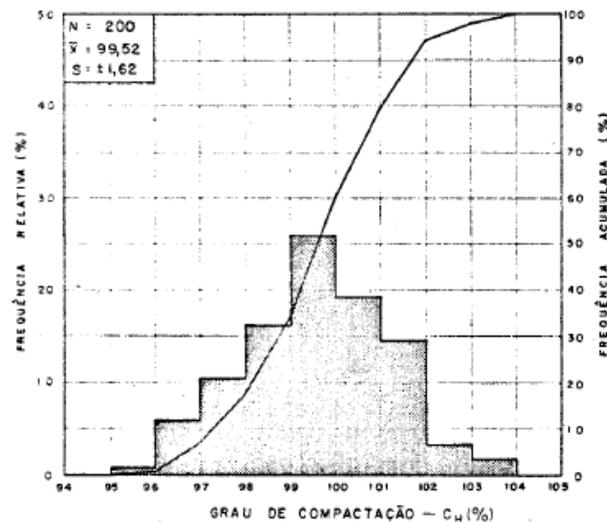
DATA: 12/12/82  
Escala: 1:1000  
PROJETO: 12/12/82

RELATÓRIO  
ANEXO

ENSAIOS DE PROCTOR



ENSAIOS DE HILF



NOTAS GERAIS

- Os gráficos apresentados neste desenho se referem às camadas liberadas com o primeiro ensaio. Não foram considerados portanto os ensaios que liberaram a camada recompactada ou retrabalhada.
- Os ensaios de Proctor Normal foram realizados no Laboratório Central, sem secamento e sem reutilização do material. Os ensaios de Hilf foram executados no Laboratório de Campo.
- O peso específico aparente da atenuação foi determinado através da cravação de 2 cilindros cortantes, distantes entre si de cerca de 30 a 40 cm.
- De acordo com a Ata de Reunião nº 2005-40/1044, os requisitos para liberação das camadas em relação ao ensaio de Proctor Normal (P) são os seguintes:
  - Grau de Compactação  $C_p \geq 95\%$
  - Desvio de Umidade  $+2,0\% \geq \Delta h_p \geq -2,0\%$
- De acordo com a mesma Ata, os requisitos em relação ao ensaio de Hilf (H) são:
  - Grau de Compactação  $C_H \geq 97\%$
  - Desvio de Umidade  $+1,0\% \geq -\Delta h_H \geq -3,0\%$

São aceitos ainda 15% de valores de grau de compactação entre 90% e 97% e de desvio de umidade entre 1,0% e 2,0% no lado úmido.

LEGENDAS

— Curva de frequência acumulada referente a 200 pares de ensaios executados de maio de 1980 a maio de 1982.

CONVENÇÕES

- N - Número de ensaios
- $\bar{X}$  - Média
- S - Desvio padrão



ITAIPU BINACIONAL

BARRAGEM DE ENROCAMENTO - ME  
 ARGILA PLÁSTICA - EMPRÉSTIMO CANAL 1  
 COMPARAÇÃO HILF - PROCTOR

DIRETORIA TÉCNICA - SOT

ESCALA

DES. BARRAGEM / SOT  
 CONF. 11/12/82 SOT  
 ORIGINAL APROVADO APROV.  
 PAREC.

RELATÓRIO

ANEXO 5

6.6 ANEXO VI – ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DA ARGILA PLÁSTICA EM  
PERMEÂMETRO DE CARGA VARIÁVEL



## 6.7 ANEXO VII – ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DA ARGILA PLÁSTICA EM CÂMARA TRIAXIAL

**ENSAIOS DE PERMEABILIDADE EM CÂMARA TRIAXIAL**

POÇO/AM.	DIREÇÃO DO FLUXO	CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA ANTES DO ENSAIO				COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE A 20°C (cm/s) NA PRESSÃO EFETIVA DE ADENSAMENTO (Kg/cm <sup>2</sup> ) DE					
		UMIDADE (%)	PESO ESPEC. APAR. SECO (g/cm <sup>3</sup> )	ÍNDICE DE VAZIOS	GRAU DE SATURAÇÃO (%)	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
PS 1/1	VERT.	25,8	1,526	0,868	85	$1,15 \times 10^{-6}$	$9,64 \times 10^{-7}$	$8,78 \times 10^{-7}$	$7,79 \times 10^{-7}$	$7,87 \times 10^{-7}$	$6,48 \times 10^{-7}$
	HORIZ.	25,9	1,496	0,905	82	$1,28 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-5}$	$1,02 \times 10^{-5}$	$7,66 \times 10^{-6}$	$4,46 \times 10^{-6}$	$2,53 \times 10^{-6}$
PS 2/1	VERT.	26,3	1,599	0,795	95	$4,24 \times 10^{-8}$	$1,67 \times 10^{-8}$	$5,64 \times 10^{-9}$	$3,68 \times 10^{-9}$	$2,23 \times 10^{-9}$	$3,57 \times 10^{-9}$
	HORIZ.	26,7	1,584	0,812	94	$8,54 \times 10^{-8}$	$4,24 \times 10^{-8}$	$1,48 \times 10^{-8}$	$8,16 \times 10^{-9}$	$5,72 \times 10^{-9}$	$4,50 \times 10^{-9}$
PS 4/1	VERT.	25,8	1,611	0,757	96	$1,36 \times 10^{-8}$	$9,52 \times 10^{-9}$	$5,80 \times 10^{-9}$	$4,98 \times 10^{-9}$	$3,59 \times 10^{-9}$	$3,15 \times 10^{-9}$
	HORIZ.	25,8	1,573	0,799	91	$3,98 \times 10^{-6}$	$8,77 \times 10^{-7}$	$5,02 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	$1,27 \times 10^{-7}$	$8,83 \times 10^{-8}$
PS 5/1	VERT.	27,9	1,565	0,827	96	$3,74 \times 10^{-7}$	$2,21 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-7}$	$1,64 \times 10^{-7}$	$1,51 \times 10^{-7}$	$1,28 \times 10^{-7}$
	HORIZ.	28,1	1,568	0,824	98	$3,86 \times 10^{-7}$	$2,95 \times 10^{-7}$	$2,22 \times 10^{-7}$	$1,86 \times 10^{-7}$	$1,52 \times 10^{-7}$	$1,24 \times 10^{-7}$
PS 8/1	VERT.	28,1	1,550	0,852	95	$1,34 \times 10^{-6}$	$9,24 \times 10^{-8}$	$2,04 \times 10^{-8}$	$1,34 \times 10^{-8}$	$1,29 \times 10^{-8}$	$9,71 \times 10^{-9}$
	HORIZ.	29,1	1,566	0,833	100	$1,05 \times 10^{-7}$	$5,16 \times 10^{-8}$	$2,55 \times 10^{-8}$	$1,71 \times 10^{-8}$	$1,53 \times 10^{-8}$	$1,01 \times 10^{-8}$
PS 9/1	VERT.	28,6	1,546	0,837	97	$5,10 \times 10^{-6}$	$3,92 \times 10^{-7}$	$1,16 \times 10^{-8}$	$1,01 \times 10^{-8}$	$7,74 \times 10^{-9}$	$6,50 \times 10^{-9}$
	HORIZ.	27,4	1,568	0,811	96	$8,92 \times 10^{-8}$	$2,68 \times 10^{-8}$	$1,80 \times 10^{-8}$	$1,36 \times 10^{-8}$	$7,30 \times 10^{-9}$	$1,02 \times 10^{-8}$
PI 28/1	VERT.	27,8	1,534	0,864	92	$2,92 \times 10^{-6}$	$6,47 \times 10^{-7}$	$3,73 \times 10^{-7}$	$2,41 \times 10^{-7}$	$1,89 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$
	HORIZ.	27,8	1,498	0,909	87	$4,25 \times 10^{-6}$	$2,00 \times 10^{-6}$	$9,78 \times 10^{-7}$	$6,97 \times 10^{-7}$	$5,32 \times 10^{-7}$	$4,52 \times 10^{-7}$
PI 28/2	VERT.	28,5	1,496	0,912	89	$2,97 \times 10^{-7}$	$2,31 \times 10^{-7}$	$1,38 \times 10^{-7}$	$9,53 \times 10^{-8}$	$8,86 \times 10^{-8}$	$7,12 \times 10^{-8}$
	HORIZ.	28,0	1,542	0,854	94	$3,64 \times 10^{-8}$	$1,74 \times 10^{-8}$	$1,08 \times 10^{-8}$	$1,18 \times 10^{-8}$	$8,85 \times 10^{-9}$	$7,50 \times 10^{-9}$

## 6.8 ANEXO VIII – SONDAGEM L-14 – EIXO DA BARRAGEM – EST. 118+00

COMISION MIXTA TECNICA PARAGUAYO BRASILEÑA  
ANDE ESTUDIO DEL RIO PARANA ELETROBRAS

2042-PS-00262-P-R0

IECO - elc  
INTERNATIONAL ENGINEERING  
COMPANY, INC.  
P.O. BOX 200000, SUITE 1200  
HOUSTON, TEXAS 77280-0000

SITIO ITAIPU COTA INICIAL M. 176.30  
INCLINACION CON LA VERTICAL 0°  
INICIADO 26.08.74 TERMINADO 06.09.74

COORDENADAS N 7.386.397.70  
E 744.589.45  
DIRECCION  
EJECUTADO POR BOSIO-CHASE

SONDEO ROTATIVO

L 14

PROFUNDIDAD (M)	COTAS ABSOLUTAS	PERFIL DEL CUELLO	CLASIFICACION Y DESCRIPCION LITOLOGICA	MANOBRAS	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Kg/cm²)	RESISTENCIA A LA TRACCION (Kg/cm²)	PRUEBA DE PERDIDA DE AGUA						
							TRAMO DE M A M	CAUDALES (l/s)	GRAFICOS DE LAS ABSORCIONES DE LAS U/I				
25	50	75						0.5	1	5	10	30	
174.65	1.85		SUELO	1.95	-	-							
40				3.40	2	1	3						
60				6.90	1	1	2						
75				9.10	1	1	2						
75				11.55	1	1	2						
90				14.60	1	1	2						
40			BASALTO GRIS OSCURO, DENSO, SAÑO, MUY DURO, DE GRANOS MEDIANOS, FRACTURAS VARIADAMENTE ORIENTADAS, BIEN ADHERIDAS	17.00	1	1	3						
80			(de 16 a 17 m fracturas subverticales con calcita e indicios de brecha, bien adheridas, espesor 0,5-2 cm)	20.00	1	1	2						
95				22.78	1	1	2						
98				25.20	1	1	1						
95				28.85	1	1	1						
60	147.50		BASALTO ROSADO, DENSO, SAÑO, FRACTURAS INCLINADAS CON CALCITA	30.00	1	1	2						
85				33.05	1	1	2						
142.90	33.60		BRECHA ROSADA VESICULAR CON POCAS ARENISCAS, DE MEDIANA CONSISTENCIA	36.10	2	2	2	33.10	0.5	5			
141.79	34.80			39.10	2	1	2	36.10	0.2	0.0	3		
95			BASALTO ROSADO DENSO, CON VESICULAS VERDES Y BLANCAS, CONSISTENTE, POCO FRACTURADO	39.10	2	1	2	36.10	0.3	5			
95				39.10	2	1	2	39.10	0.1	0.0	3		
98	134.60	41.90	BASALTO ROSADO DENSO, CON MUCHISIMAS MANCHITAS VERDOSAS, EN PARTE ALTERADO, DE MEDIANA CONSISTENCIA, FRACTURAS SUBHORIZONTALES	39.10	2	2	2	39.10	0.0	6			
75				42.15	2	2	2	42.15	0.0	0.0	3		
85	130.50	46	BASALTO ROSADO DENSO, SAÑO, DURO, FRACTURAS INCLINADAS Y SUBHORIZONTALES REPTIDAS HACIA EL CONTACTO	42.15	2	2	3	42.15	3.5	6			
95				45.20	2	2	3	45.20	1.9	2.0	3		
0				47.65	1	1	2	45.20	0.0	6			
50	122.70	53.80	BRECHA ROSADA DENSA Y VESICULAR, BIEN CEMENTADA CON MUCHA ARENISCA	50.65	1	1	2	50.65	0.0	0.0	5		
90	120.40	56.10		53.90	1	1	4	50.90	0.2	6			
95			BASALTO ROSADO CON GRANDES VESICULAS VERDOSAS, CONSISTENTE, PASANDO A ANIGDALOIDE, POCO FRACTURADO O COMPACTO	53.90	1	1	4	53.90	0.1	1.3			
95	113.50	63		56.95	2	2	2	53.90	0.5	0.6	3		
85			BASALTO DE ROSADO A GRIS OSCURO, DENSO, SAÑO, MUY DURO, POCO FRACTURADO O COMPACTO	56.95	2	2	2	56.95	0.1	0.2	5		
95				60.00	1	1	2	56.95	0.0	7			
93	104.30	72.20		63.05	1	1	2	63.05	0.0	0.0	2		
80				66.10	1	1	2	66.10	0.0	0.0	5		
90				69.45	1	1	1	69.45	0.0	0.0	2		
100				72.20	1	1	2	72.20	0.0	0.0	2		

OBSERVACIONES :

GRADO DE ALTERACION DE LA ROCA	GRADO DE CONSISTENCIA DE LA ROCA	GRADO DE FRACTURACION DE LA ROCA
D-1 ROCA SANA	C-1 MUY CONSISTENTE (ESFUERZO MEDIANO, QUIEBRA CON DIFICULTAD CON EL MARTILLO)	F-1 < 1 FRACT/M POCO FRACTURADO
D-2 ROCA POCO ALTERADA (APRECIALE OXIDACION DE LAS JUNTAS)	C-2 CONSISTENTE (ESFUERZO MEDIANO, QUIEBRA CON FACILIDAD CON EL MARTILLO)	F-2 1-6 FRACT/M FRACTURADO
D-3 ROCA MEDIANAMENTE ALTERADA (MAYOR POCO ALTERADA)	C-3 POCO CONSISTENTE (SE PUEDE CONTAR CON MANOJA)	F-3 8-10 FRACT/M MUY FRACTURADO
D-4 ROCA MUY ALTERADA (MAYOR PROFUNDAMENTE ALTERADA)	C-4 SIN CONSISTENCIA (SE DESMAGA ENTRE LAS MANOS)	F-4 10-20 FRACT/M EXTREMAMENTE FRACTURADO
D-5 ROCA DESMAGA (SOLO CON VESTIGIOS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL)		F-5 > 20 FRACT/M INTENSAMENTE FRACTURADO

## 6.9 ANEXO IX – SONDAGEM DE INSTALAÇÃO DO PG-K-13 E PG-K-14

4272-60-15515-P-RD } PG-K-13 } BARRAGEM DE ENROSCAMENTO  
 4272-DC-1104-E-R4 } M-600 } TRECHO "K"

ARQUIVO  
 DGI:RI  
 Data: / /

ITAIPI PARAGUAY BRASIL

IECO - e (CORPORACION)

SONDEO ROTATIVO

PG-K-13

UBICACION: TRECHO K

COTA INICIAL 174.22 m COTA FINAL 130.72 m PROFUNDIDAD 43.50 m

COORDENADAS N 7.186.413,16 E 744.568,75 INCLINACION (con lo vertical) 0° DIRECCION

INICIADO 05.05.77 TERMINADO 12.05.77 EJECUTADO POR BOSIO-CHASE

MAPA FREATICA	PERDIDA DE AGUA DE CADA 10 CM DE PROFUNDIDAD	RECUPERACION %	R O D. %	COTAS ABSOLUTAS (m)	MANOBRAS Y PROFUNDIDAD (m)	PERFIL GEOLOGICO	DESCRIPCION LITOLOGICA	ALTERACION (A)	DUREZA (D)	FRACTURACION (F)	PRUEBA DE PERDIDA DE AGUA Ø TUBO 1"				
											TRAMO de 0 a	CAUDALES (l/min)	PRESSIONES CONSERVADAS (kg/cm <sup>2</sup> )	PERDIDA ESPECIFICA l/min/m/Kg/cm <sup>2</sup>	
		100	94			A, I (Ox)		1	1	2					
		100	98			I		1	1	2					
		100	95			A, L									
		100	100			A, I	BASALTO DENSO, GRIS, SANO, DE TEXTURA GRUESA EN LA PARTE SUPERIOR, PASANDO A MEDIANA, POCO FRACTURADO								
-0.41		100	98			E		1	1	2					
		100	98			L		1	1	2					
		100	98			A, L		1	1	2					
		100	98			I		1	1	2					
		100	100			L		1	1	2					
-0.46		100	100			I		1	1	2					
		100	100			L		1	1	2					
		100	95	149.22	25.00	A, I (Ox)	BASALTO DENSO, ROSADO, SANO, DE TEXTURA FINA, FRACTURADO								
-0.35		100	87			A, L		1	1	3					
		100	98	142.62	31.60	E									
		100	98			L (St)		1	1	2					
-8.70		100	100			D	BASALTO VESICULO AMIGDALOIDE, POCO FRACTURADO, MAS ALTERADO EN LA PARTE INFERIOR. CONTACTO SUPERIOR GRADUAL, CON DOS FINAS (0.5 cm) FAJAS DE SILTITO, SIN ESTRUCTURA DE BRECHA	1	1	1	31.5	0.0	10.0		
		100	98			I, (Ox)		1	1	1	34.5	0.0	0.070		
		100	98			A, I		1	1	2	34.5	0.0	0.830		
-2.76		100	98			D		1	1	2	34.5	0.0	0.062	9.4	
		100	98			I, (Ox)		2	2	2	37.5	0.0	0.024	0.0	
		100	98	134.92	39.30	A, I		2	2	2	37.5	0.0	0.066	0.0	9.6
12.20		100	88			A, I	BASALTO "VERDE TEXTURAL", POCO ALTERADO Y FRACTURADO (excepto en el trecho de la junta)	1	1	1	40.5	0.0	0.026	0.0	2.6
26.50	50	100	88	130.72	43.50	A, I		1	1	2	40.5	100.8	10.9	71.3	81.4
						A, I		1	1	3	43.5	52.4	56.1	5.0	3.8

OBSERVACIONES

- Los Datos de pérdida de agua específica y presión efectiva fueron suministrados por ITAIPI RACIONAL Dpto. de Geología y Mecánica de Rocas.
- En este sondeo no se evidencia la "Brecha D". Hay un paso gradual del basalto denso rosado (E) para el basalto vesicúlo amigdalóide (D).

Prueba del caudal de la bomba

Presión kg/cm <sup>2</sup>	0	10
Caudal l/min.	115	100

LEYENDA

- ARENA
- ARCILLA
- BLOQUES SUELTOS DE BASALTO
- BRECHA (SEDIMENTARIA O AGLOMERADO BASALTICO)
- BASALTO AMIGDALOIDE
- BASALTO VESICULAR
- BASALTO VESICULAR-AMIGDALOIDE
- BASALTO DENSO

TIPO Y DIAMETRO DEL HOYO

PROFUNDIDAD

RDX de 0.00 m a 43.40 m

REVESTIMIENTO

PROFUNDIDAD

CLASIFICADO FRM FECHA 11.06.77 EXAMINADO [Firma] FECHA 05.07.77

GRADO DE ALTERACION DE LA ROCA	GRADO DE DUREZA DE LA ROCA	GRADO DE FRACTURACION DE LA ROCA
A-1 ROCA SANA	D-1 MUY DURA (SONIDO METALICO, QUIEBRA CON DIFICULTAD CON EL MARTILLO)	F-1 < 1 FRACT/m POCO FRACTURADA
A-2 ROCA POCO ALTERADA (APRECIABLE OXIDACION DE LAS JUNTAS)	D-2 DURA (SONIDO MUERTO, QUIEBRA CON FACILIDAD CON EL MARTILLO)	F-2 1-5 FRACT/m FRACTURADA
A-3 ROCA MEDIANAMENTE ALTERADA (MATRIZ POCO ALTERADA)	D-3 MEDIANAMENTE DURA (LOS BORDES SE QUIEBRAN DIFICILMENTE CON LOS DEDOS)	F-3 6-10 FRACT/m MUY FRACTURADA
A-4 ROCA MUY ALTERADA (MATRIZ PROFUNDAMENTE ALTERADA)	D-4 POCO DURA (SE DESHACE CON EL MARTILLO)	F-4 11-20 FRACT/m EXTREMADAMENTE FRACTURADA
A-5 ROCA TOTALMENTE ALTERADA (SOLO CON VESTIGIOS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL)	D-5 FRIABLE (SE DESHACE ENTRE LOS DEDOS)	F-5 > 20 FRACT/m FRAGMENTADA

4272-60-15512-P-RO } PG-K-14  
 4272-DC-1504-E-24 }

ARQUIVO  
 D.G.I.R.I.  
 Fecha: / /

IECO-ele  
 COORDINACIÓN



SONDEO ROTATIVO  
**PG-K-14**

COTA INICIAL: 175.00 m COTA FINAL: 131.07 m PROFUNDIDAD: 44.01 m  
 COORDENADAS: N: 7.186.356,48 E: 744.174,74 INCLINACIÓN: 0° DIRECCION:  
 INICIADO: 18.06.77 TERMINADO: 30.06.77 EJECUTADO: POR GEOTECNICA S.A.

UBICACION  
 TRENCHO: K

NAPA FREÁTICA	PERDIDA DE AGUA DE CARGA (L/seg)	RECUPERACION %	R. Q. D. %	COTAS ABSOLUTAS (m)	MANOBRAS Y PROFUNDIDAD (m)	PERFIL GEOLOGICO	CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES	DESCRIPCION LITOLÓGICA	ALTERACION (A)	DUREZA (D)	FRAGMENTACION (F)	PRUEBA DE PERDIDA DE AGUA Ø TUBO: 1 1/2"							
												TRAMO de m	CAUDALES (l/min)	PRESIONES CORREGIDAS (kg/cm²)	PERDIDA ESPECIFICA (l/m²/m/Kg/cm²)				
1.45	10	85	100	174.89 173.08	1.00 2.00		Arcilla Plástica, Gris Claro												
		100	100				SUELO ARCILLO-SILTOSO, AMARILLENTO, ALGO PLÁSTICO												
0.15		100	100				BASALTO DENSO, GRIS, DE TEXTURA MEDIANA, SANO, ALGO FRACTURADO (contacto inferior rosado)												
		100	100				BASALTO VESICULAR, GRIS ROSADO, POCO ALTERADO Y FRACTURADO												
1.20		100	100				BASALTO DENSO, GRIS-ROSDO, ALGO AMIGDALOIDE, POCO ALTERADO, ALGO FRACTURADO (contactos brechados)												
7.62		100	100				BRECHA VESICULAR Y DENSA, ROSADA, POCO ALTERADA Y FRACTURADA												
		100	100	145.32 144.18 143.73	30.56 31.70 32.15		BASALTO VESICULAR, POCO ALTERADO Y FRACTURADO, GRIS ROSADO												
19.30		100	100				BASALTO DENSO, GRIS, DE TEXTURA FINA, ALGO ALTERADO, MUY FRACTURADO												
21.80		100	100				BASALTO AMIGDALOIDE ALGO ALTERADO, GRIS ROSADO												
25.00		100	100				BASALTO "VERDE TEXTURAL", ALGO ALTERADO Y FRACTURADO												
28.37		100	100				BASALTO DENSO, DE TEXTURA GRUESA, POCO ALTERADO, MUY FRACTURADO, GRIS ROSADO												
29.24		100	100																

**OBSERVACIONES:** Prueba del caudal de la bomba

Presión kg/cm²	10
Caudal l/min	100

o - Trecho fragmentado.  
 oo - Trecho fragmentado con arcilla.

**LEYENDA**

L - CONTACTO ROCA - ROCA LISO  
 R - CONTACTO ROCA - ROCA RUGOSO  
 I - CONTACTO ROCA - ROCA IRREGULAR  
 E - CONTACTO ROCA - ROCA ESTRIADO

**TIPO Y DIAMETRO DEL HOYO**

PROFUNDIDAD  
 RHNX de 0.00m a 2.40 m  
 RDNX de 2.40m a 44.01 m

**REVESTIMIENTO**

PROFUNDIDAD  
 NX de 0.00m a 3.91 m

**ITAIPU BINACIONAL**  
 RECIBIDO: 13 SET 1977  
 Sec. Asist. de Ingenieros

- Los datos de pérdidas específicas de agua y presión efectiva fueron suministrados por ITAIPU BINACIONAL - Dpto. de Geología y Mecánica de Rocas.  
 - En este sondeo fueron instalados un piezómetro GEONOR Mod N-600 y otro de tipo "Standpipe".

CLASIFICADO: FRH: FECHA 01.08.77 EXAMINADO: FECHA 23.08.77

GRADO DE ALTERACION DE LA ROCA		GRADO DE DUREZA DE LA ROCA		GRADO DE FRACTURACION DE LA ROCA	
A-1	ROCA SANA	D-1	MUY DURA (SONIDO METALICO, QUIEBRA CON DIFICULTAD CON EL MARTILLO)	F-1	< 1 FRACT/m POCO FRACTURADA
A-2	ROCA POCO ALTERADA (APRECIABLE OXIDACION DE LAS JUNTAS)	D-2	DURA (SONIDO MUERTO, QUIEBRA CON FACILIDAD CON EL MARTILLO)	F-2	1-5 FRACT/m FRACTURADA
A-3	ROCA MEDIANAMENTE ALTERADA (MATRIZ POCO ALTERADA)	D-3	MEDIANAMENTE DURA (LOS BORDES SE QUIEBRAN DIFICILMENTE CON LOS DEODOS)	F-3	6-10 FRACT/m MUY FRACTURADA
A-4	ROCA MUY ALTERADA (MATRIZ PROFUNDAMENTE ALTERADA)	D-4	POCO DURA (SE DESHACE CON EL MARTILLO)	F-4	11-20 FRACT/m EXTREMADAMENTE FRACTURADA
A-5	ROCA TOTALMENTE ALTERADA (SOLO CON VESTIGIOS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL)	D-5	FRIABLE (SE DESHACE ENTRE LOS DEODOS)	F-5	> 20 FRACT/m FRAGMENTADA