

## 4 Programa de Investigação Geotécnica

### 4.1. Ensaio de Laboratório

Para determinar parâmetros geotécnicos do material da barragem de terra da U.H.E. Curuá-Una, foi definido o seguinte programa de ensaios:

1. Ensaio de caracterização;
2. Ensaio de adensamento;
3. Ensaio de cisalhamento direto;
4. Ensaio triaxiais;
5. Ensaio de permeabilidade;
6. Ensaio de difratometria por raios-X;

Todos os ensaios foram realizados a partir de 4 blocos indeformados, provenientes do corpo da barragem, sendo 2 blocos extraídos do talude de montante e os demais do talude de jusante. Os locais de retirada das amostras correspondem às seções das estacas 33 e 39.

Após a amostragem, cada bloco foi embalado e remetido pela equipe da REDE Celpa para o laboratório da PUC-Rio, onde foi armazenado em câmara úmida, de modo a preservar o teor de umidade e a integridade do arranjo estrutural dos grãos do solo. Os blocos indeformados foram identificados da seguinte forma:

M33 – a montante da barragem, alinhado com a estaca 33;

J33 – a jusante da barragem, alinhado com a estaca 33;

M39 – a montante da barragem, alinhado com a estaca 39;

J39 – a jusante da barragem, alinhado com a estaca 39;

Os blocos chegaram ao laboratório com características adequadas de qualidade, com exceção do bloco J33, o qual apresentava algumas fissuras.

Os ensaios de caracterização e de difratometria por raios-X foram efetuados a partir de amostras deformadas dos mesmos materiais referentes aos blocos acima mencionados. Os demais ensaios utilizaram as amostras indeformadas. A Figura 34 mostra o bloco M33, durante a moldagem de corpos de prova e a Figura 35 mostra o bloco M39 devidamente parafinado após a moldagem de corpos de prova.



Figura 34 - Bloco indeformado M33



Figura 35 - Bloco indeformado M39

Dentro do escopo desta dissertação, o ensaio de maior interesse refere-se a determinação do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) dos materiais. Adicionalmente, foram também realizados ensaios de caracterização dos materiais e de difratometria por raios-X. Neste trabalho também serão apresentados, de forma resumida, os resultados mais relevantes relativos aos ensaios de resistência e deformabilidade. Informações detalhadas sobre estes ensaios foram reportadas por Sayão et al. (2002) e Ligocki (2003).

#### 4.1.1. Ensaio de Caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados seguindo os procedimentos sugeridos pelas seguintes normas brasileiras: NBR 6457 (Preparação de amostras: compactação e caracterização); NBR 7181 (Análise granulométrica); NBR 6508 (Densidade real dos grãos); NBR 6459 (Limite de liquidez); NBR 7180 (Limite de plasticidade).

As amostras foram previamente secas ao ar, destorroadas e homogeneizadas. Para a realização dos ensaios de caracterização, utilizou-se uma estufa com temperatura controlada em 105° C e uma balança eletrônica com precisão de 0,01g. Nos ensaios de sedimentação, utilizou-se como defloculante uma solução com hexametáfosfato de sódio. A classificação do solo com base na análise granulométrica utilizou as definições preconizadas pela ABNT. O solo foi classificado como uma areia silto-argilosa. A Tabela 22 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização. As curvas granulométricas estão apresentadas na Figura 36.

A Figura 37 apresenta a carta de plasticidade de Casagrande. Segundo o critério de Casagrande, o material ensaiado pode ser classificado com uma argila de baixa plasticidade, estando de acordo com os resultados obtidos por Amorim (1976).

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de caracterização

	M33	J33	M39	J39
Caracterização	Areia silto-argilosa	Areia silto-argilosa	Areia silto-argilosa	Areia silto-argilosa
LL (%)	38,7	33,6	37,4	34,4
LP (%)	18,6	16,4	18,1	19,3
IP (%)	20,1	17,2	19,3	15,1
w (%)	12,6	13,2	12,8	13,6
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,47	26,45	26,42	26,54

**Nota:** LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade;  
w = teor de umidade natural;  $\gamma_s$  = peso específico real dos grãos

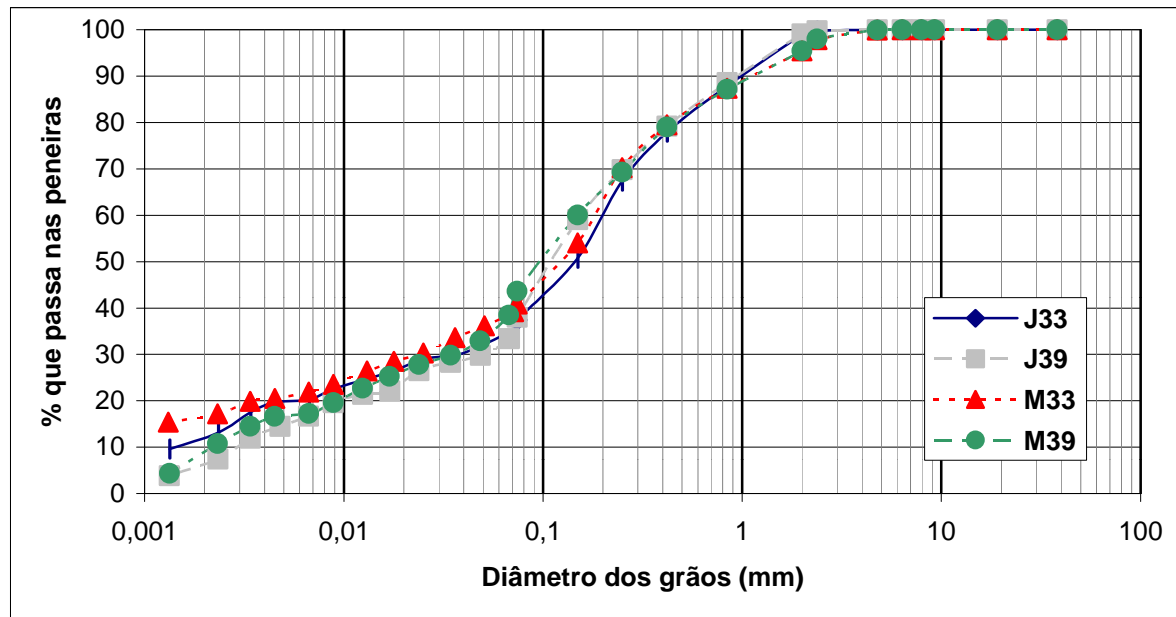


Figura 36 - Curvas granulométricas referentes aos blocos

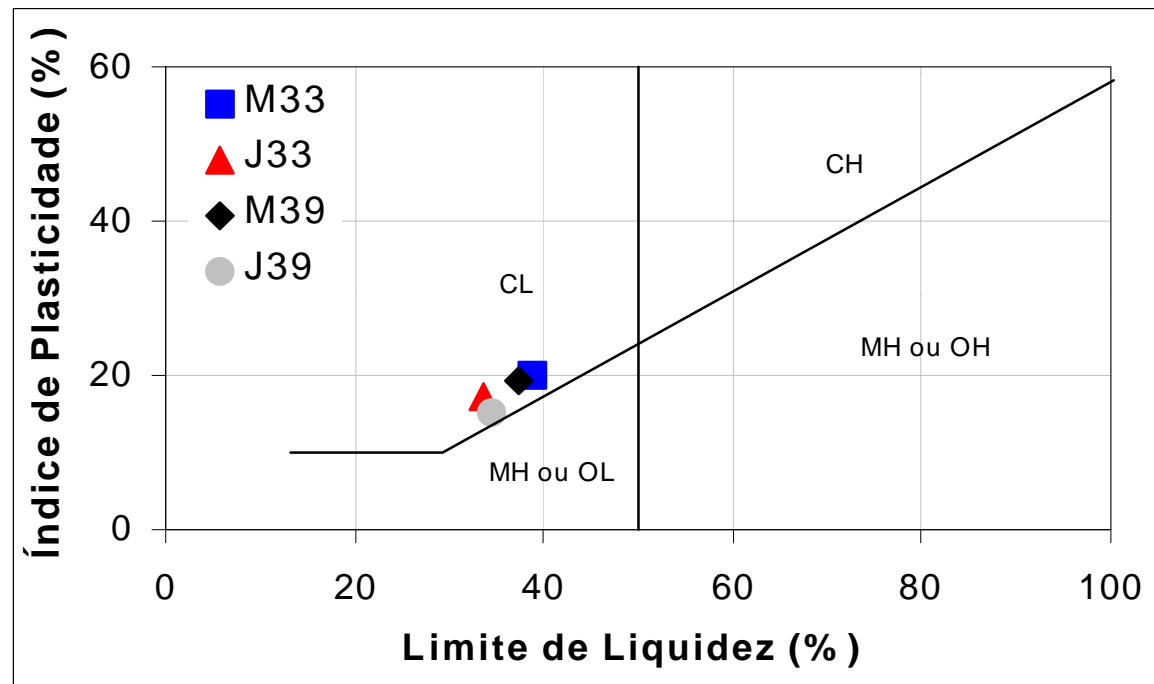


Figura 37 - Carta de plasticidade do material ensaiado

#### 4.1.2.

#### Ensaio de Adensamento

Foram realizados 4 ensaios de adensamento contínuo (compressão confinada) do tipo C.R.S. (“*Constant Rate of Strain*”), de acordo com os procedimentos recomendados por Wissa et al. (1971).

Na Tabela 23 estão apresentados os valores dos índices de compressão dos materiais do corpo da barragem. Sayão et al. (2002) e Ligocki (2003)

apresentam mais detalhes quanto à realização e obtenção dos resultados dos ensaios.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de adensamento

Índice	M33	J33	M39	J39
$c_r$	0,05	0,02	0,04	0,08
$c_c$	0,10	0,11	0,16	0,29
$c_s$	0,02	0,01	0,01	0,01

**Nota:**  $c_r$  = índice de recompressão;  
 $c_c$  = índice de compressão virgem;  
 $c_s$  = índice de expansão.

### 4.1.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

Foram realizados ensaios nas amostras J33 e M33 em corpos de prova inicialmente submersos em água destilada e posteriormente submetidos a tensões normais de 100, 200 e 400 kPa. A fase de adensamento durou aproximadamente 24h e serviu para a determinação da velocidade a ser considerada na fase de cisalhamento. A velocidade adotada foi de 0,0244 mm/min, garantindo uma condição totalmente drenada para o cisalhamento (Gibson e Henkel, 1954).

Ensaio de cisalhamento direto foram também realizados na amostra M39, com corpos de prova na umidade natural (não submersos). Nestes ensaios, os corpos de prova foram moldados com o plano de ruptura perpendicular às camadas de compactação do material da barragem.

A Tabela 24 resume os resultados obtidos na campanha de ensaios de cisalhamento direto. A elevada coesão efetiva observada na amostra M39 pode ser atribuída ao baixo grau de saturação do corpo de prova e, em menor grau, a orientação do corpo de prova com relação às camadas de compactação

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Dados	M33	J33	M39
$\phi'$	27°	26°	34°
$c'$ (kPa)	23,6	39,0	104,0
$w_o$ média (%)	13,13	12,30	5,09
$w_f$ média (%)	18,60	16,76	4,67
$e$ médio	0,58	0,45	0,57
Orientação do CP	Paralelo	Paralelo	Perpendicular
Submerso	Sim	Sim	Não
$S$ médio (%)	70,00	71,09	27,00

**Nota:** CP: corpo de prova,  $c'$ : coesão efetiva,  $\phi'$ : ângulo de atrito efetivo,  $w$ : teor de umidade,  $e$ : índice de vazios,  $S_{médio}$ : grau de saturação médio

#### 4.1.4. Ensaio Triaxiais

Foram realizados 10 ensaios de compressão triaxial, em amostras previamente saturadas, sendo 6 do tipo C.I.D. (Consolidado Isotropicamente Drenado) e 4 do tipo C.I.U. (Consolidado Isotropicamente Não Drenado). Os corpos de prova foram moldados das amostras M33, M39, J33 e J39.

A Figura 38 apresenta os valores dos parâmetros de resistência na ruptura, obtidos nos ensaios triaxiais. Verifica-se que, no gráfico  $p'$  vs  $q$ , os pontos se ajustam relativamente bem em uma única reta, definindo como parâmetros de resistência:  $a' = 0$  kPa e  $\alpha' = 26^\circ$ . Estes valores correspondem a uma envoltória de resistência no diagrama de Mohr-Coulomb com intercepto de coesão ( $c'$ ) nulo e ângulo de atrito ( $\phi'$ ) de aproximadamente  $30^\circ$  (Ligocki, 2003).

Os parâmetros de deformabilidade obtidos nos ensaios triaxiais do tipo C.I.D. estão apresentados na Tabela 25. Os resultados referentes às amostras de jusante, para as tensões de 200 e 450 kPa, mostraram-se pouco coerentes, uma vez que um aumento da tensão efetiva de confinamento deveria resultar em um aumento da rigidez do solo.

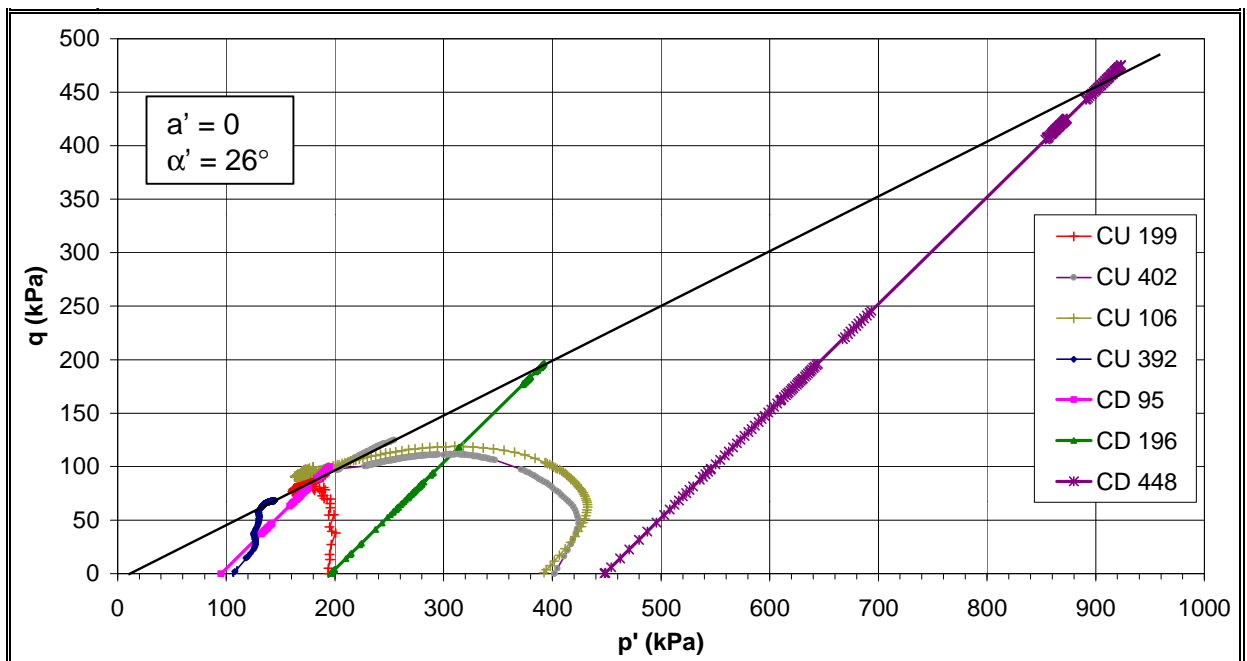


Figura 38 - Envoltória de resistência no diagrama de Lambe

Tabela 25 - Parâmetros de Deformabilidade

$\sigma'_c$ (kPa)	Montante		Jusante	
	$E_{50}$ (MPa)	$\nu$	$E_{50}$ (MPa)	$\nu$
100	16,0	0,33	16,3	0,30
200	23,2	0,28	9,0	0,29
450	44,7	0,25	14,0	0,17

#### 4.1.5. Ensaio de Permeabilidade

Ensaio de permeabilidade foram realizados para diferentes níveis de tensão efetiva, antes da fase de cisalhamento dos ensaios triaxiais. Após a fase de adensamento, um gradiente hidráulico igual a 10 era aplicado, gerando uma condição de fluxo ascendente, e as vazões monitoradas ao longo do tempo.

A Tabela 26 apresenta o resumo dos valores obtidos em função da tensão efetiva aplicada no corpo de prova. Além disso, a tabela inclui os valores dos diâmetros efetivos ( $D_{10}$ ) dos grãos (Sayão et al., 2002) e os valores previstos pela equação empírica de Hazen (Lambe e Whitman, 1969):

$$K_{\text{Hazen}} = 100(D_{10})^2 \quad \text{Equação 20}$$

sendo  $D_{10}$  fornecido em cm e  $k_{\text{Hazen}}$  estimado em cm/s.

Tabela 26 - Valores do coeficiente de permeabilidade saturada

Amostra	$D_{10}$ (cm)	$\sigma'$ (kPa)	$k$ (cm/s)	$k_{\text{Hazen}}$ (cm/s)
M33	$9,0 \times 10^{-5}$	100	$1,1 \times 10^{-6}$	$8,1 \times 10^{-7}$
		200	$4,5 \times 10^{-5}$	
		400	$1,1 \times 10^{-5}$	
M39	$2,9 \times 10^{-4}$	100	$3,0 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$
		200	$9,4 \times 10^{-7}$	
		450	$1,4 \times 10^{-6}$	
J33	$1,5 \times 10^{-4}$	100	$3,8 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$
		200	$4,1 \times 10^{-6}$	
		450	$9,0 \times 10^{-7}$	
J39	$2,9 \times 10^{-4}$	100	$1,5 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$
		200	$2,1 \times 10^{-5}$	
		450	$4,2 \times 10^{-6}$	

A Figura 39 apresenta os valores de permeabilidade obtidos experimentalmente em função da tensão confinante efetiva.

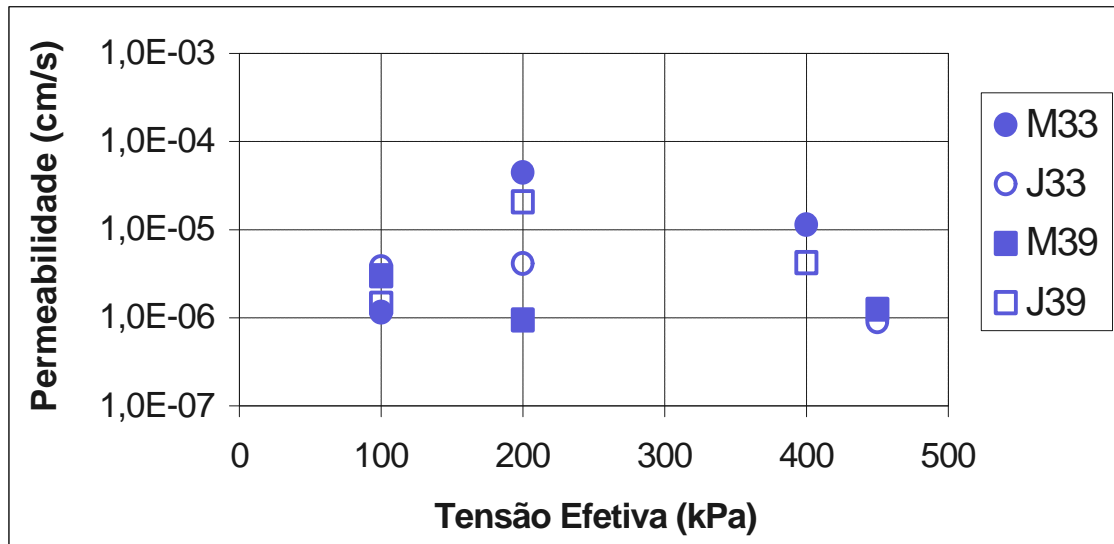


Figura 39- Variação do coeficiente de permeabilidade em função da tensão confinante.

Os ensaios com tensão efetiva de 400 kPa, nas amostras M33 e J39, apresentaram uma dispersão excessiva nos valores de variação de volume registrados pelo equipamento de aquisição de dados. Este problema só foi observado nestes ensaios e ocorreu possivelmente devido a uma oscilação da corrente que alimenta o equipamento.

O medidor de variação de volume, utilizado nos ensaios com as amostras M33 e J39, para uma tensão efetiva de 200 kPa, também apresentou medições incoerentes, com variações significativas de vazão, em intervalos reduzidos de tempo. Nestes ensaios, os erros foram atribuídos a problemas na calibração do medidor de variação de volume. O equipamento foi, então, desmontado e recalibrado e tal problema não foi mais verificado.

A Figura 40 mostra os resultados da campanha de ensaios de permeabilidade, desconsideradas as medições duvidosas. Observa-se que não há diferença significativa entre os solos de montante e jusante e que a redução da permeabilidade em função do aumento de tensão efetiva é relativamente pequena. Adicionalmente, verifica-se que a proposição empírica de Hazen fornece valores de permeabilidade razoavelmente compatíveis com os obtidos nos ensaios. Ressalta-se, no entanto, que a fórmula de Hazen é recomendada para solos arenosos uniformes e o material aqui ensaiado é uma areia silto-arenosa.



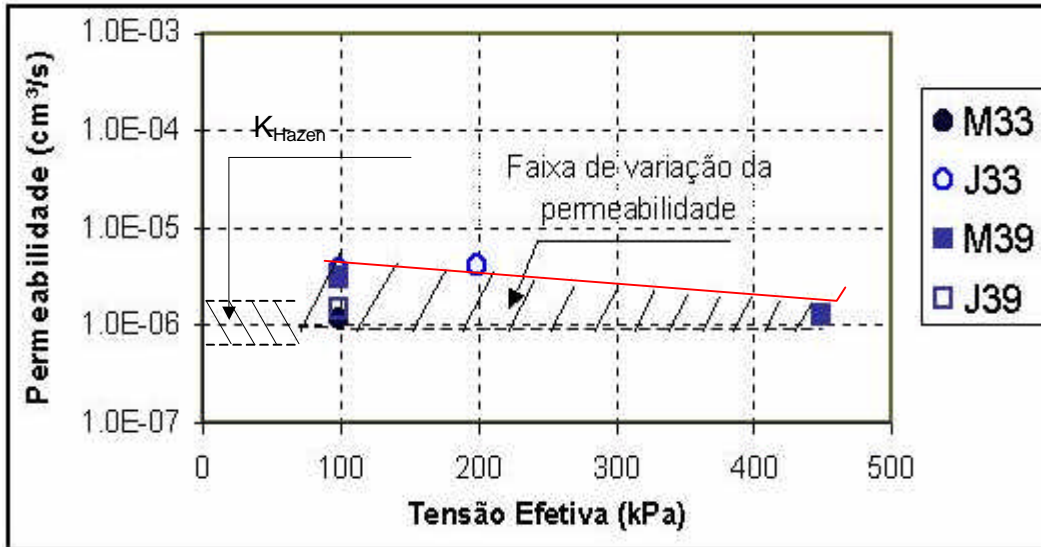


Figura 40- Permeabilidade x Tensão Efetiva

#### 4.1.6. Ensaio de Difratometria de Raios-X

O ensaio de Difratometria por Raios-X tem por finalidade identificar os argilominerais presentes na fração argila do material analisado. A classificação dos argilominerais nos principais grupos exige o conhecimento da distância interplanar basal.

Segundo Santos (1975), em uma partícula de solo com estrutura cristalina, um certo conjunto de átomos é repetido em intervalos equidistantes, formando um reticulado cristalino. A célula unitária é um conjunto de redes cristalinas, podendo ser entendida como a menor parte formadora do argilomineral. Quando o solo é exposto a um feixe monocromático de raios-X, cada célula unitária é capaz de difratar os raios-X.

A frente de onda é completamente anulada, exceto nas direções em que os efeitos das células unitárias vizinhas provocam uma interferência construtiva completa. Somente nestas direções é que aparece um feixe difratado de raios-X.

Os argilominerais podem ser divididos em cinco grupos, segundo a distância interplanar basal ( $d$ ), apresentada no ensaio de difração por raios-X com lâmina natural (não glicolada). A distância interplanar basal é a distância entre as os planos da célula unitária. A Tabela 27 apresenta os valores de " $d$ " que caracterizam estes grupos e os seus possíveis argilominerais. A utilização de lâminas do tipo glicolada possibilita a identificação de argilominerais expansivos.

Tabela 27 - Distâncias interplanares típicas para argilominerais (Santos, 1975)

d (Å)	Possíveis argilominerais
3,6	Caulinita (refração secundária)
7,1	Caulinita (refração primária) e Halosita anidra
10	Esmectita anidra, Vermiculita anidra, Illita e Halosita hidratada
14	Esmectita hidratada, Vermiculita hidratada e Clorita
17	Esmectita glicolada

O cálculo da distância  $d$  é baseado na lei de Bragg (Santos, 1975):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Equação 21}$$

sendo:  $n$  = número positivo que representa a ordem de reflexão ( $n=1$ );  $\lambda$  = comprimento de onda dos raios-X ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ );  $d$  = distância interplanar basal;  $\theta$  = ângulo de refração.

Observa-se que, quanto maior o número de argilominerais presentes na amostra, maior deve ser a dificuldade de classificação, uma vez que um mesmo pico pode representar mais de um argilomineral.

O ensaio de difratometria de raios-X foi realizado utilizando-se o material da amostra M33. A Figura 41 mostra o ângulo  $2\theta$  de refração do raios-X, em função da intensidade da refração, para a amostra normal (não glicolada). As setas indicam os picos correspondentes a distâncias interplanares de argilominerais.

A Figura 41 apresenta também três picos bem nítidos indicativos de caulinita, para  $d = 3,57 \text{ \AA}$ ,  $d = 4,44 \text{ \AA}$  e  $d = 7,18 \text{ \AA}$ . Um quarto pico presente no gráfico é indicativo de quartzo. Os demais picos têm menor importância e não revelam uma presença significativa de outros argilominerais.

Para o mesmo material, M33, foi preparado um outro ensaio do tipo glicolado, visando verificar a ocorrência de argilominerais expansivos. Este ensaio está apresentado na Figura 42.

O gráfico de difratometria com a lâmina glicolada apresentou um resultado similar ao ensaio realizado para o ensaio do tipo normal. Pode-se concluir, portanto, que a fração argila deste material não apresenta argilominerais expansivos.

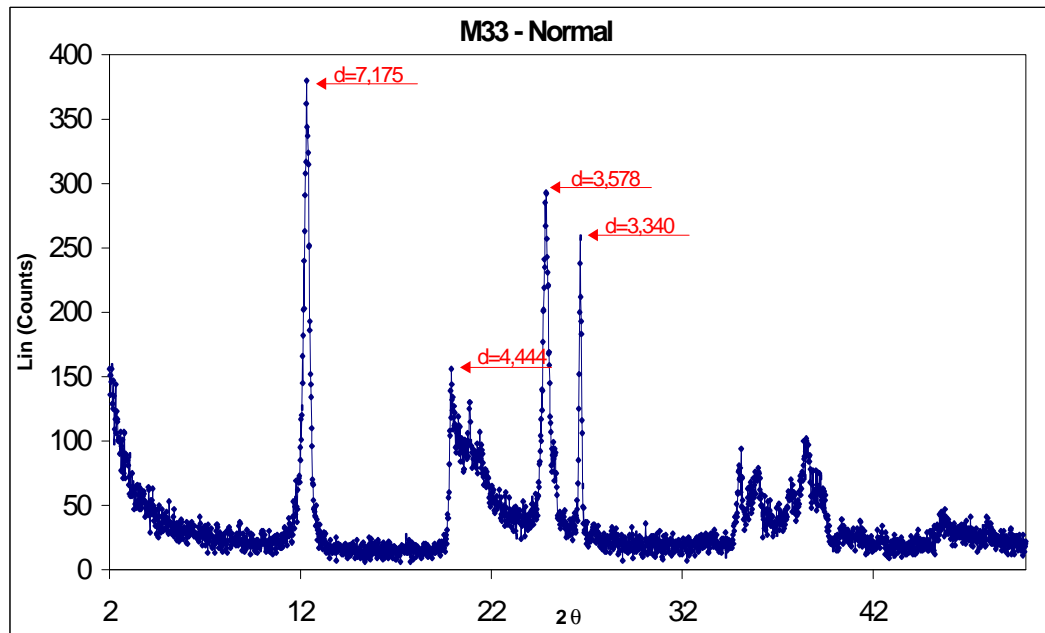


Figura 41 - Difratogramas da amostra M33 natural

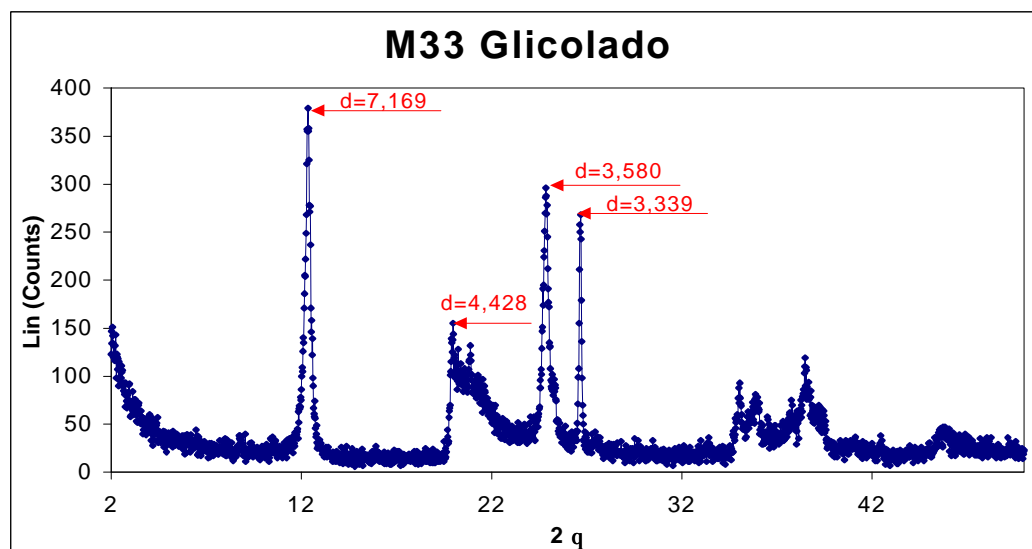


Figura 42 - Difratograma da amostra M33 glicolada

## 4.2. Instrumentação de Campo

Até o ano de 2002, o monitoramento dos níveis piezométricos nas fundações e corpo da barragem da U.H.E. de Curuá-Una era realizado por 60 piezômetros tipo Casagrande instalados na barragem de terra, vertedouro (Figura 43), casa de força e áreas adjacentes (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002). Dentre estes instrumentos, alguns não dispunham de informações confiáveis relativas à profundidade de instalação.

Mais recentemente, em 2002, como parte do projeto de “Automação da Instrumentação Civil e Estudo de Estabilidade da Barragem da U.H.E. de Curuá-Una”, foi implantado um sistema de auscultação automático. Neste projeto, alguns piezômetros “antigos”, instalados na barragem de terra e áreas adjacentes a casa de força, foram substituídos por piezômetros elétricos (sensores). Este “novo” sistema é composto por 15 piezômetros elétricos, sendo que 11 estão localizados na barragem (corpo da barragem e fundação) e 4 na casa de força (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002).

A Figura 44 apresenta a planta baixa da barragem da U.H.E. de Curuá-Una, onde são mostradas as seções instrumentadas das estacas 35 e 38. Os piezômetros antigos e novos, instalados nestas seções, totalizam 22 instrumentos: 10 instalados no corpo da barragem e 12 na fundação. A Figura 45 mostra um detalhe em planta das seções instrumentadas com a disposição dos piezômetros na barragem de terra. Os piezômetros estão numerados em ordem crescente de montante para jusante.



Figura 43 - Piezômetro instalado no vertedor (PZV-06)

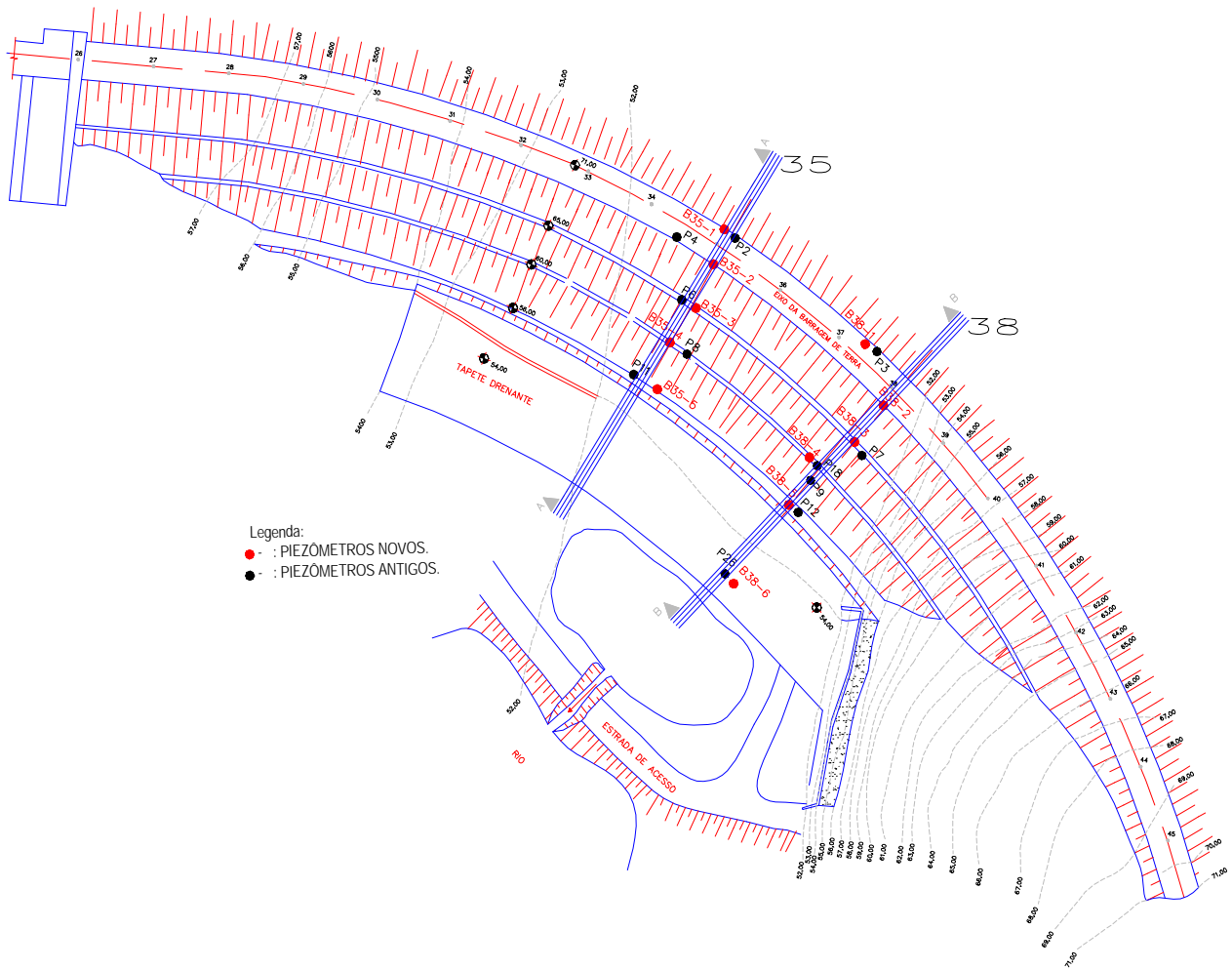


Figura 44 - Planta baixa da barragem de terra com as seções instrumentadas

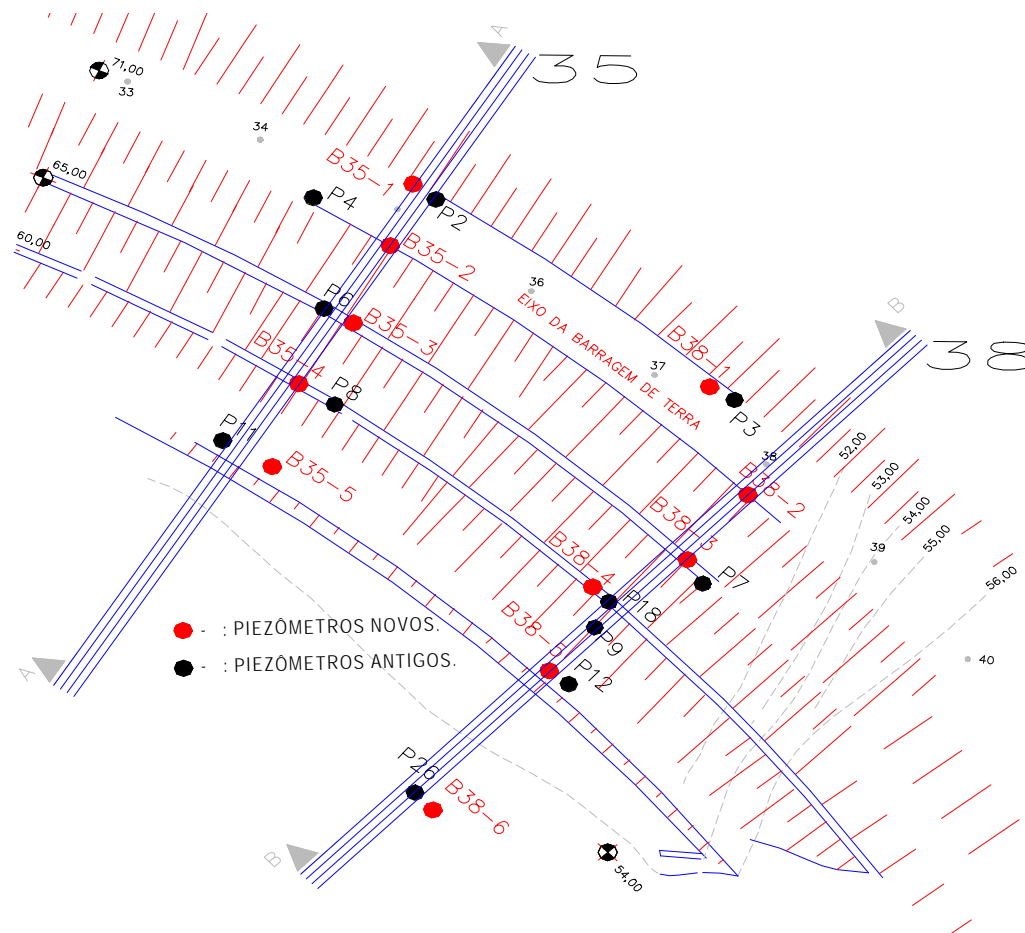


Figura 45 - Detalhamento das seções instrumentadas da barragem

#### 4.2.1. Piezômetros Casagrande (“Antigos”)

A Tabela 28 apresenta os dados relativos aos piezômetros tipo Casagrande, utilizados no presente trabalho. As Figura 46 e Figura 47 mostram o posicionamento dos piezômetros nas estacas 35 e 38, respectivamente.

A leitura dos piezômetros tipo Casagrande é realizada manualmente por um operador da usina. Os dados obtidos são registrados em planilhas, para posterior traçado dos gráficos e análise dos níveis piezométricos (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002).

Tabela 28 - Piezômetros tipo Casagrande ("antigos").

	Estaca	Localização	Posição (m)*	Cota da Boca (m)	Cota da Instalação (m)	Profundidade de Instalação (m)	
	P2	35	Barragem	0,00	71,13	58,45	12,68
	P4	35	Barragem	8,00	70,95	59,32	11,63
	P6	35	Barragem	21,50	65,89	57,56	8,33
	P8	35	Fundação	32,50	59,00	48,23	10,77
	P11	35	Fundação	45,00	56,00	48,70	7,30
	P3	38	Fundação	0,00	71,14	50,85	20,29
	P7	38	Fundação	24,00	65,89	49,04	16,85
	P18	38	Barragem	33,00	59,74	53,91	5,83
	P9	38	Fundação	37,00	60,77	50,31	10,46
	P12	38	Fundação	46,00	54,22	45,70	8,52
	P26	38	Fundação	70,00	54,59	47,68	6,91

\*: Posição tomada em relação à extremidade montante da crista da barragem

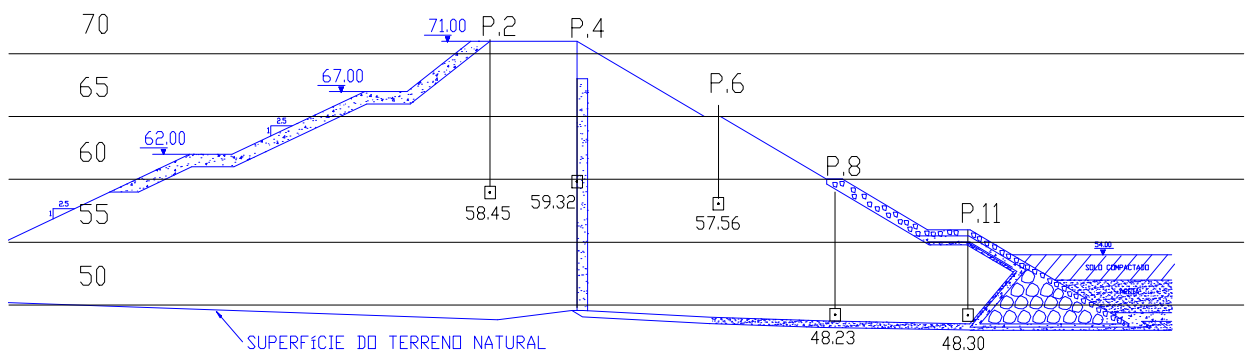


Figura 46 - Piezômetros na seção da estaca 35

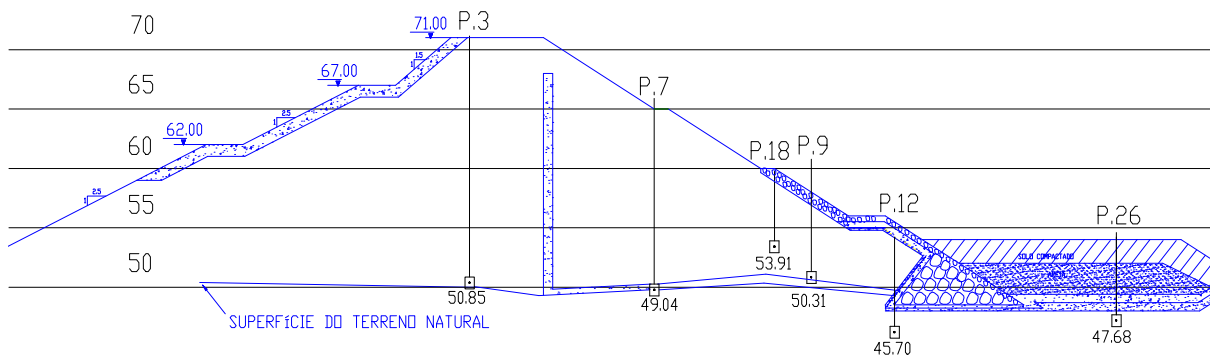


Figura 47 - Piezômetros na seção da estaca 38

A medição dos níveis piezométricos é efetuada através de um cabo elétrico, graduado, com dois condutores cuja extremidade inferior possui uns sensores constituídos por dois eletrodos dispostos concentricamente e isolados eletricamente entre si. O sensor é introduzido no tubo e ao atingir a superfície da água, o circuito elétrico é fechado, devido a passagem de corrente pela água. Na outra extremidade do cabo encontra-se um conjunto bateria/galvanômetro e uma luz que, quando acessa, indica o fechamento do circuito. Uma vez que a lâmpada esteja acessa, o ponto indica o nível d'água, que é medido através do cabo graduado. Desta forma, a cota piezométrica é obtida pela diferença entre a cota da boca do instrumento e a profundidade medida no cabo graduado.

A Figura 48 mostra registros dos piezômetros instalados na seção da estaca 35 ao longo do ano de 2001. Já a Figura 49 mostra o comportamento dos piezômetros instalados na seção da estaca 38, para o mesmo período.

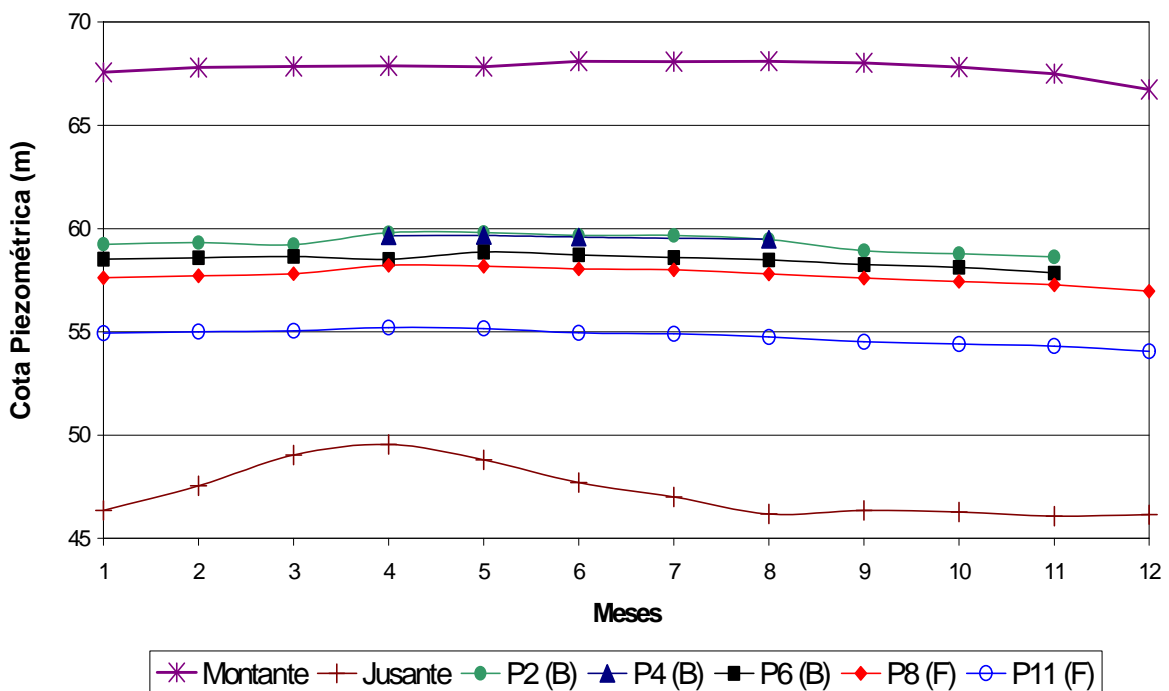


Figura 48 - Piezometria na estaca 35 em 2001 (B=barragem; F=fundação).



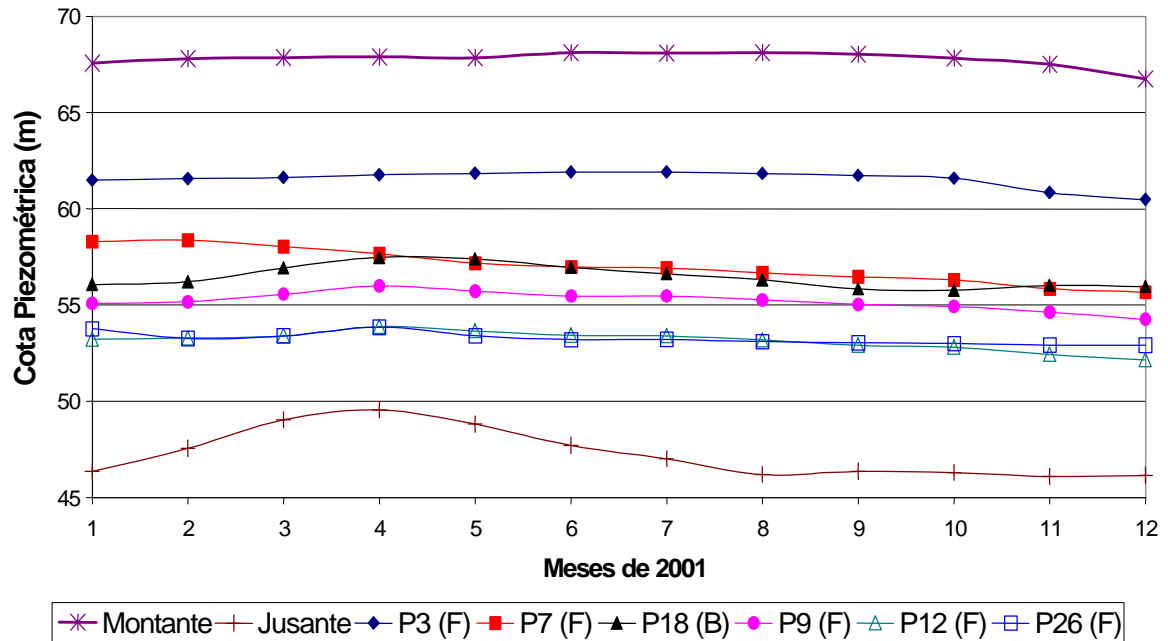


Figura 49 - Piezometria na estaca 38 em 2001 (B=barragem; F=fundação)

Os registros indicam uma estabilidade nas leituras, sem variações muito significativas, com exceção do medidor de jusante. Os pequenos desvios nas cotas piezométricas refletem alterações do nível do reservatório.

A Figura 50 apresenta os valores obtidos pelos instrumentos instalados no corpo da barragem na seção da estaca 35, ao longo do ano de 2001. O instrumento P4 só possui registro de leituras nos meses de fevereiro, maio, junho e agosto.

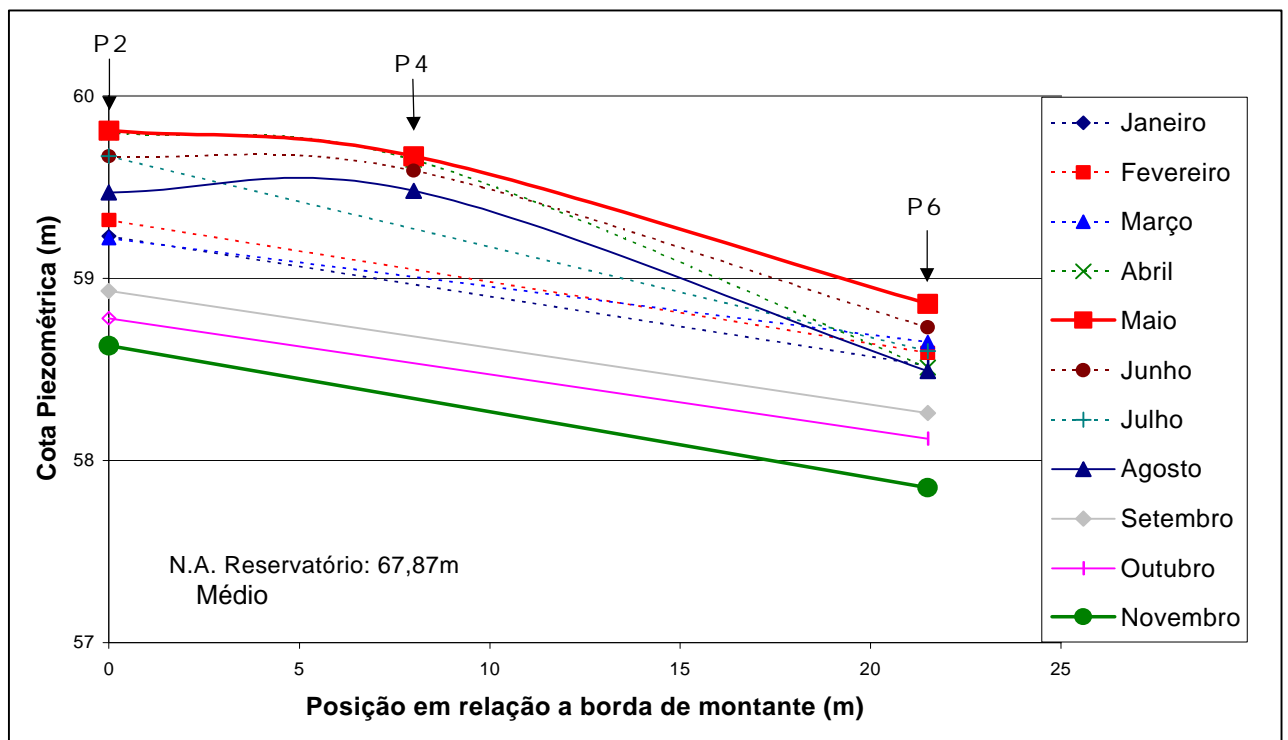


Figura 50 - Cotas Piezométricas no corpo da barragem em 2001 (estaca 35)

A Figura 51 e a Figura 52 apresentam os valores obtidos pelos instrumentos instalados na fundação da barragem nas seções das estacas 35 e 38, ao longo do ano de 2001.

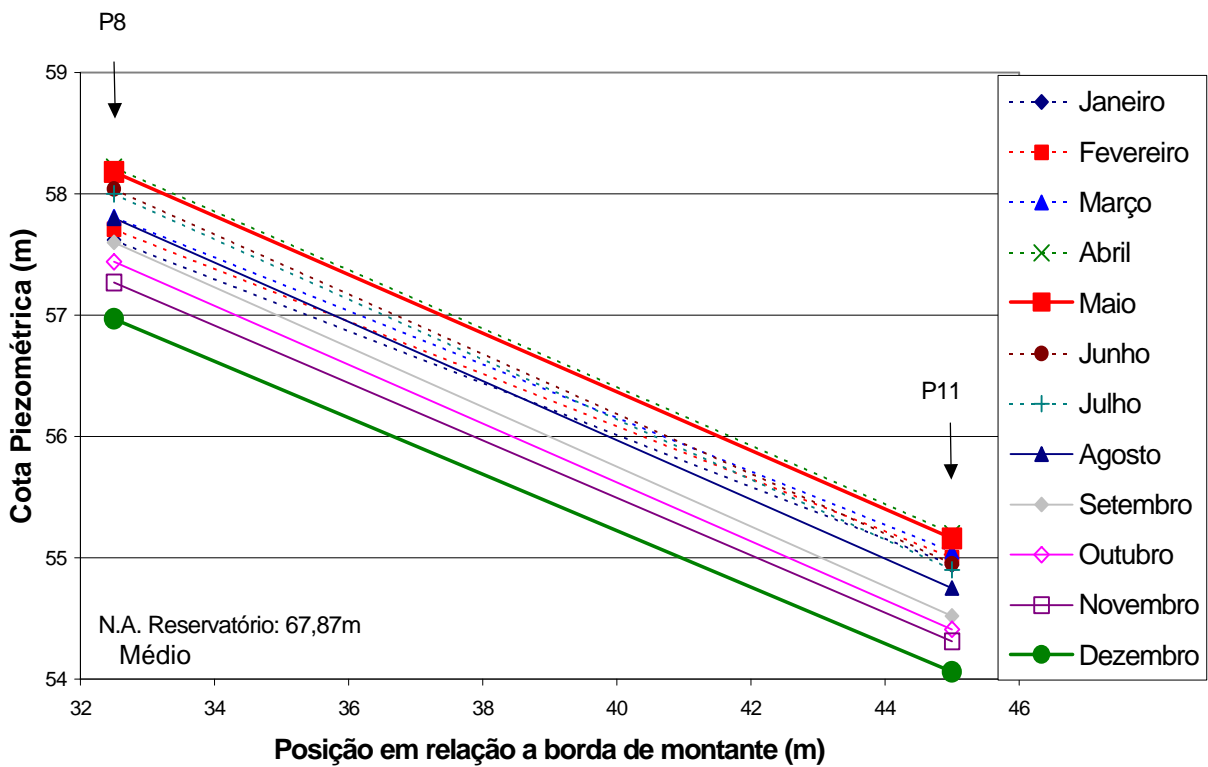


Figura 51 - Cotas Piezométricas na fundação da barragem em 2001 (estaca 35)

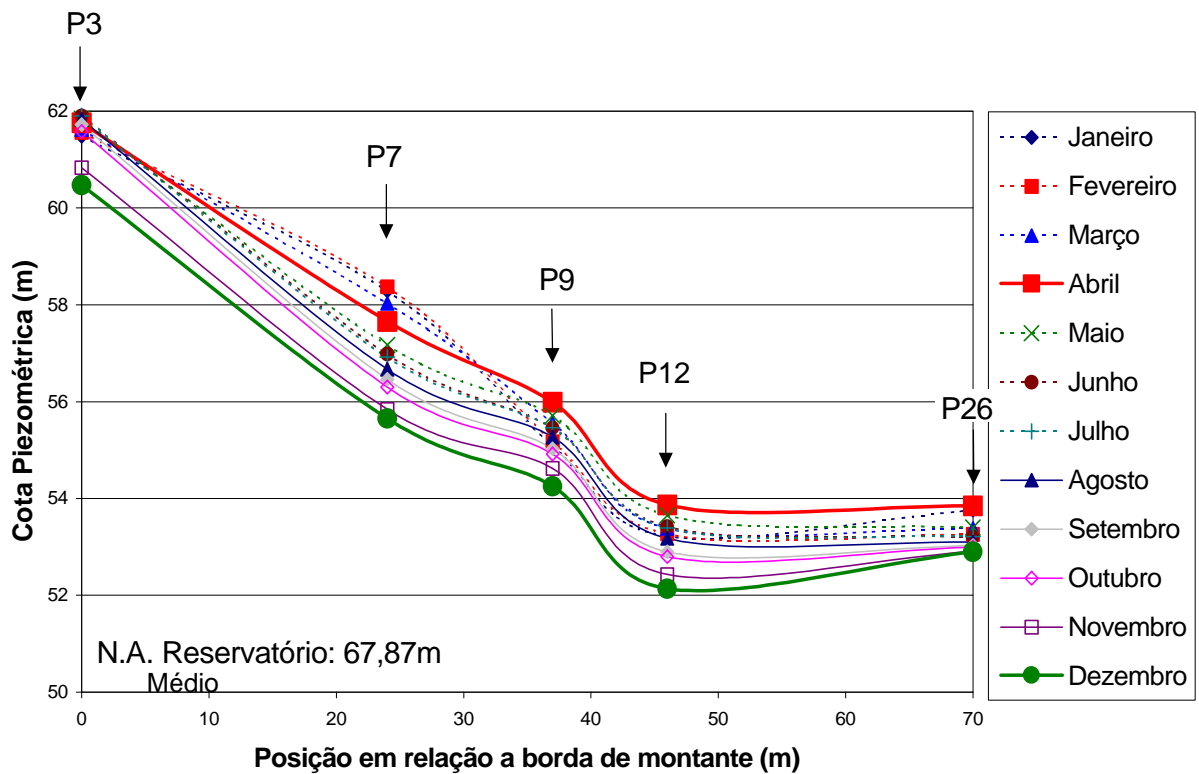


Figura 52 - Cotas piezométricas na fundação da barragem em 2001 (estaca 38)

Os dados da piezometria mostram que os meses de maio e abril são os períodos críticos, isto é, períodos do ano onde as cotas piezométricas estão mais elevadas. Estes resultados são coerentes, pois coincidem com o período de cheia da bacia amazônica (março até maio). Por sua vez, os meses de dezembro e novembro são aqueles que apresentaram os menores valores para as cotas piezométricas, correspondendo ao período seco da região.

A Tabela 29 apresenta a média aritmética dos valores da piezometria obtidos ao longo dos meses do ano de 2001. Neste ano os níveis d'água médios de montante e jusante corresponderam as cotas 67,87 e 46,35m, respectivamente. A Figura 53 mostra as linhas piezométricas médias, para a estaca 35, no corpo da barragem e na fundação para o ano de 2001.

Tabela 29 - Cotas piezométricas médias (2001) -  $NA_{Mont}$ : 67.87m e  $NA_{Jus}$ : 46.35m

Média de 2001		
	Medição (m)	Cota Piezométrica (m)
P2	11.81	59.32
P4	11.35	59.60
P6	7.42	58.47
P8	2.70	57.72
P11	1.23	54.77
P3	9.60	61.54
P7	8.86	57.03
P18	3.29	56.45
P9	5.56	55.21
P12	1.08	53.14
P26	1.34	53.25

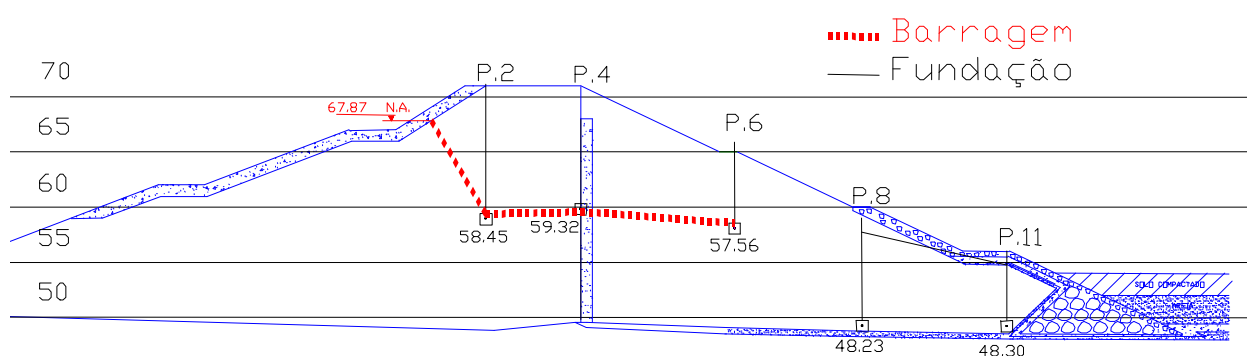


Figura 53 - Linhas Piezométricas no ano de 2001 - Estaca 35

A Figura 54 mostra as linhas piezométricas médias, para a estaca 38, no corpo da barragem e na fundação para o ano de 2001.

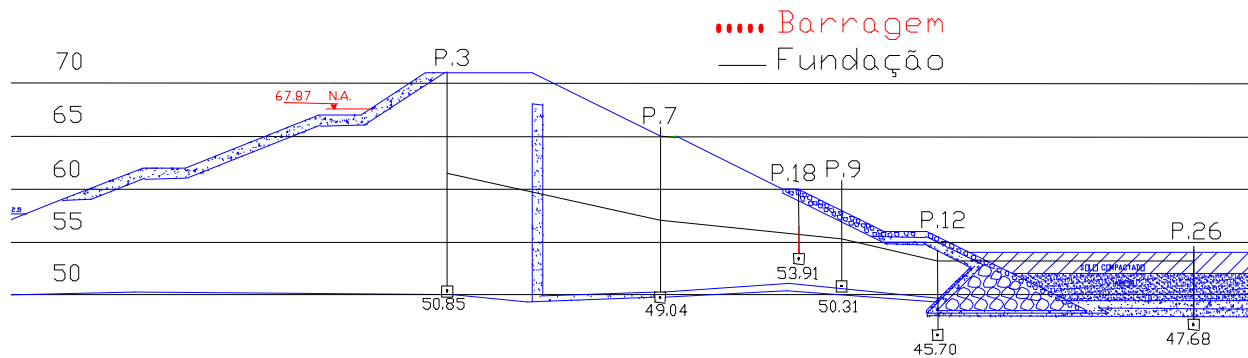


Figura 54 - Linhas Piezométricas no ano de 2001 - Estaca 38

#### 4.2.2. Piezômetros Elétricos (“Novos”)

O projeto de pesquisa “Automação da Instrumentação Civil da U.H.E. de Curuá-Una” (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002) teve como principal objetivo a implantação de um sistema de monitoramento automatizado que fosse capaz de fornecer dados de maneira mais rápida e confiável. Estes dados seriam utilizados para subsidiar os estudos de aumento do nível do reservatório, para uma possível ampliação da capacidade de geração de energia da usina.

Este sistema foi, então, dimensionado com onze sensores, instalados em duas seções da barragem de terra, e quatro sensores, instalados em uma seção na lateral da casa de força.

Segundo Fraiha Neto e Pacheco Neto (2002), a idéia inicial seria a instalação dos sensores no interior dos piezômetros de tubo aberto existentes, porém as dúvidas quanto às condições operacionais (possível colmatagem do filtro do piezômetro e existência de detritos no interior das tubulações) fizeram com que se optasse pela instalação de novos poços, com filtro de areia no ponto de leitura e revestimento com tubo de PVC.

O transdutor escolhido foi o SONDA-1 da ZÜRICH (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002). Este transdutor possui um sensor de pressão elétrico que trabalha submerso e pode ser utilizado para medir nível d’água em situações com espaço restrito. Este equipamento proporciona uma grande vantagem nas instalações em orifícios de pequeno diâmetro para monitorar níveis em piezômetros de tubo aberto ou poços.

No corpo da barragem foram instalados 11 sensores, locados nas estacas 35 e 38. A escolha destas seções deveu-se ao fato destas possuírem um histórico de estudos e leituras piezométricas, inclusive com a fixação de níveis críticos de controle piezométrico. Na estaca 35, os sensores (piezômetros) foram posicionados no corpo da barragem. Na estaca 38, estes foram instalados na

fundação e drenos, conforme indica a Tabela 30 (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002).

Tabela 30 –Piezômetros elétricos (“novos”).

	Estaca	Localização	Posição (m)*	Cota da Boca (m)	Cota da Instalação (m)	Profundidade de Instalação (m)	
	B35-01	35	Barragem	0,00	71,36	59,12	12,24
	B35-02	35	Barragem	7,20	71,33	57,18	14,15
	B35-03	35	Barragem	21,50	65,33	55,98	9,35
	B35-04	35	Barragem	32,50	60,41	54,30	6,11
	B35-05	35	Barragem	46,00	57,00	53,25	3,75
	B38-01	38	Fundação	0,00	71,45	48,38	23,07
	B38-02	38	Fundação	8,00	70,76	50,52	20,24
	B38-03	38	Barragem	21,50	65,40	54,80	10,60
	B38-04	38	Fundação	32,50	60,15	50,00	10,15
	B38-05	38	Fundação	46,00	57,07	50,71	6,36
	B38-06	38	Fundação	72,00	55,02	49,42	5,60

\*: Posição tomada em relação a extremidade montante da crista da barragem

A Figura 55 mostra o posicionamento dos piezômetros na estaca 35, enquanto que os piezômetros da estaca 38 estão apresentados na Figura 56.

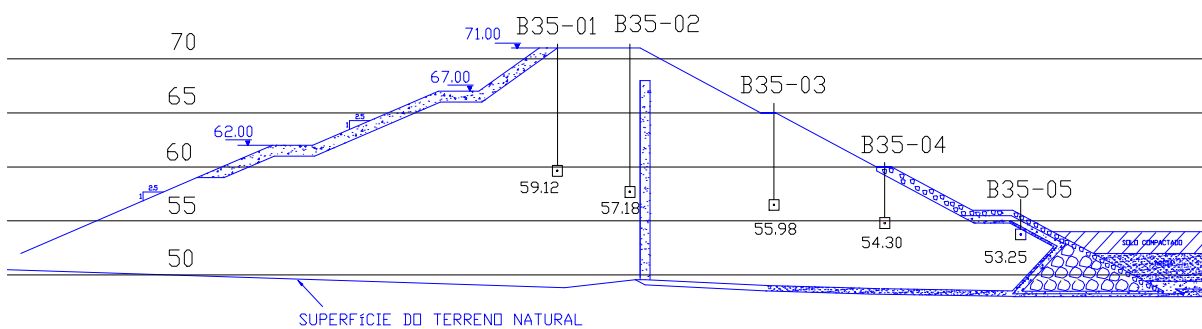


Figura 55 – Piezômetros elétricos na seção da estaca 35

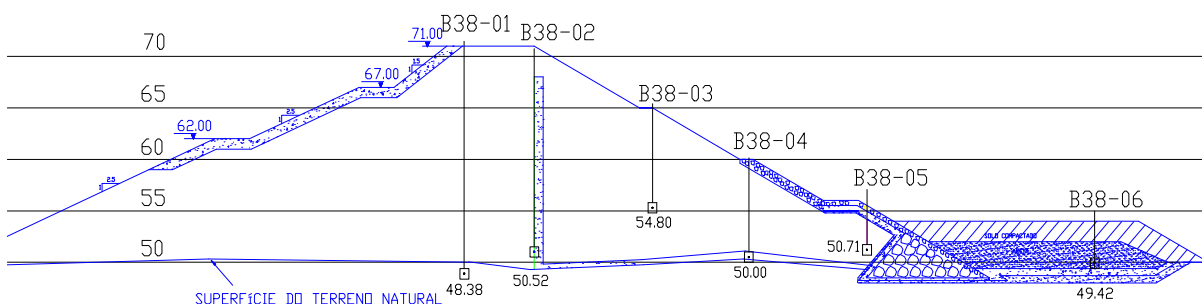


Figura 56 - Piezômetros elétricos na seção da estaca 38

Após a instalação dos piezômetros elétricos, foi feita uma comparação entre os registros elétricos e os obtidos por técnica medição empregada para os piezômetros "antigos" (cabo graduado). Os resultados, apresentados na Tabela 31, mostram uma boa concordância entre ambos procedimentos de monitoramento.

Tabela 31 - Leituras comparativas dos sensores (Fraíha Neto e Pacheco Neto, 2002)

Cota Piezométrica (m)		
	Sensor	Cabo Graduado
B35-01	Sem Leitura	Sem Leitura
B35-02	59,39	59,51
B35-03	57,73	58,38
B35-04	57,01	57,26
B35-05	54,77	54,73
B38-01	Sem leitura	Sem Leitura
B38-02	57,28	57,69
B38-03	56,66	56,61
B38-04	56,17	55,98
B38-05	56,35	56,41
B38-06	53,31	53,21

Níveis: Montante 67,90 e Jusante 46,60.

Em face de atrasos na implementação do sistema automatizado, as cotas piezométricas para os novos equipamentos foram disponibilizadas a partir do mês de agosto de 2002. Os resultados, apresentados na Figura 57 e Figura 58, correspondem aos registros da estacas 35 e 38, respectivamente

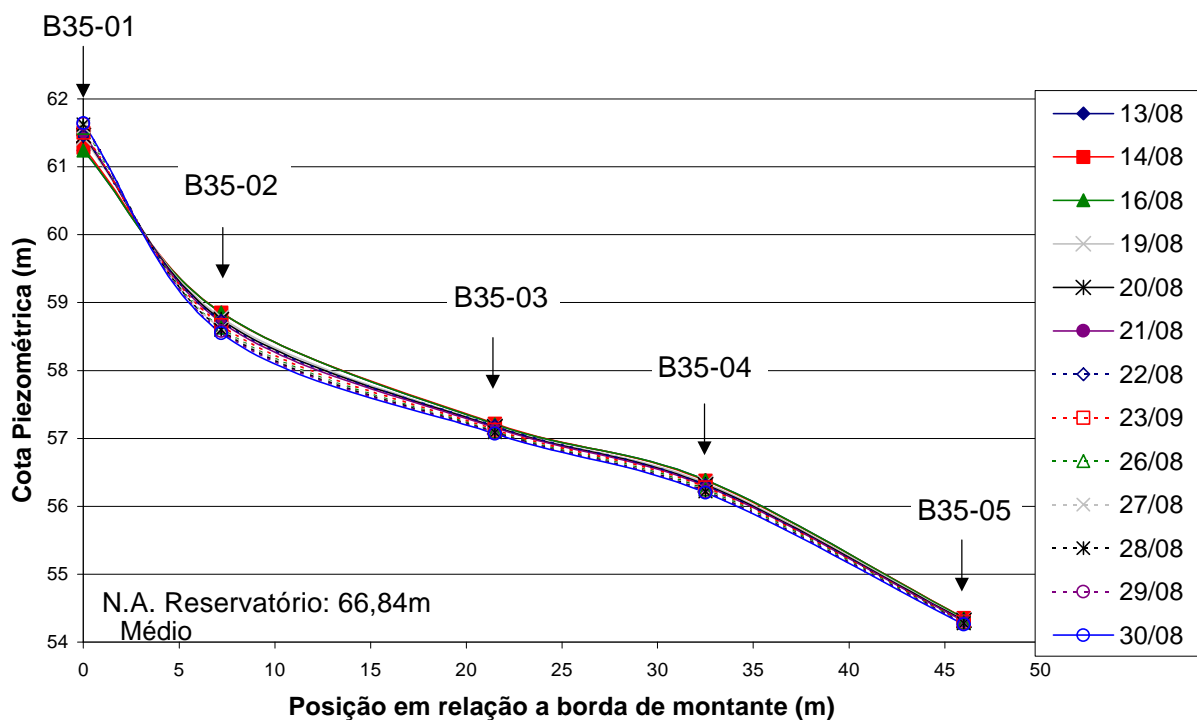


Figura 57 – Cotas piezométricas na estaca 35 em agosto de 2002 (corpo da barragem)

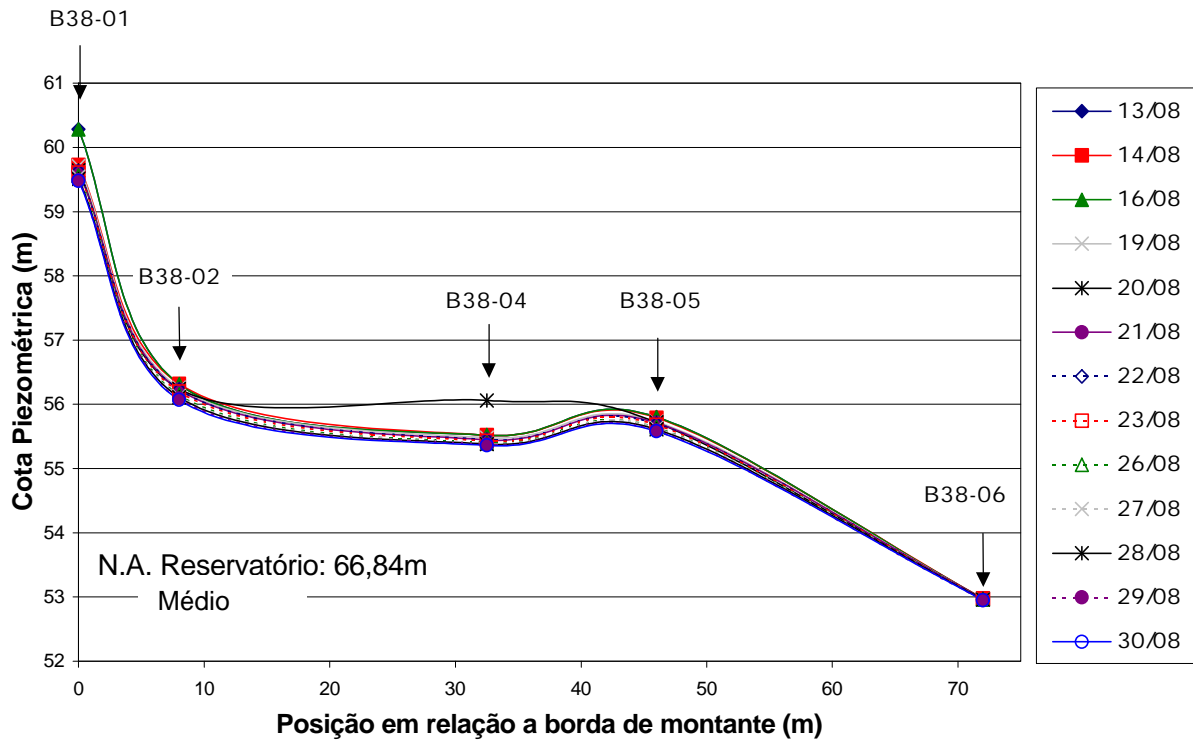


Figura 58 – Cotas piezométricas na estaca 38 em agosto de 2002 (fundação)

A Tabela 32 apresenta a média aritmética dos valores da piezometria obtidos ao longo do mês de agosto de 2002 para os novos piezômetros. Os níveis médios de montante e jusante eram respectivamente 66,84m e 46,40m.

Tabela 32 - Cotas piezométricas médias em agosto de 2002

Agosto de 2002	
	Cota Piezométrica (m)
B35-01	61,47
B35-02	58,71
B35-03	57,15
B35-04	56,29
B35-05	54,31
B38-01	59,70
B38-02	56,20
B38-03	54,80
B38-04	55,49
B38-05	55,69
B38-06	52,97

A Figura 59 mostra a linha piezométrica média para o corpo da barragem na estaca 35 em agosto de 2002. A Figura 60 mostra a linha piezométrica média para o corpo da barragem e para a fundação na estaca 38 em agosto de 2002.

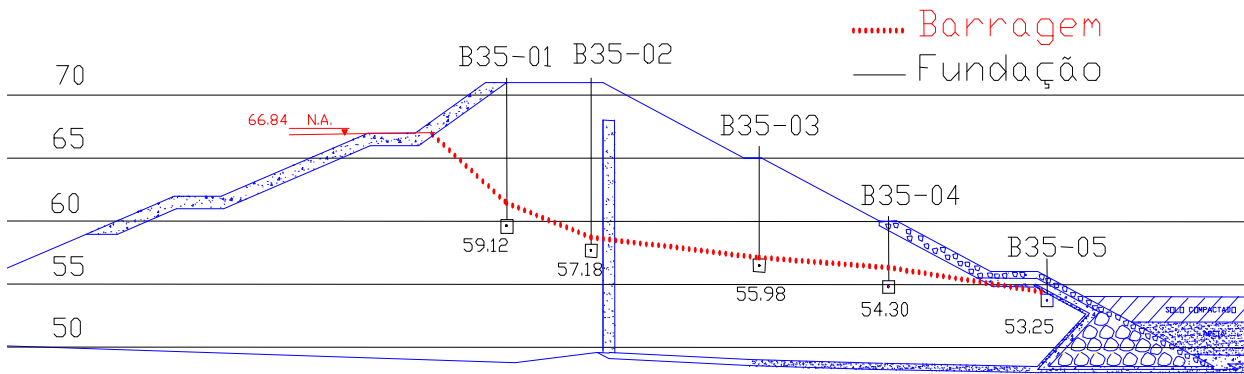


Figura 59 - Linhas Piezométricas em agosto de 2002 - Estaca 35

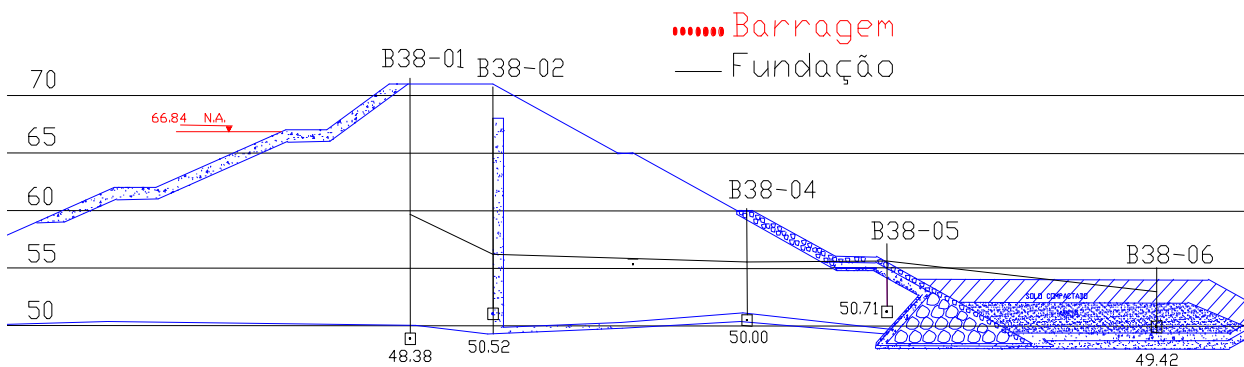


Figura 60 - Linhas Piezométricas em agosto de 2002 - Estaca 38

### 4.2.3. Comparação entre os Piezômetros Novos e Antigos

Como já foi mencionado, os dados piezométricos referem-se a duas seções da barragem e a dois conjuntos distintos de piezômetros, “antigos” e “novos”, instalados no corpo da barragem ou na fundação. No entanto, os períodos de medição são diferentes e por conseqüência os níveis de água também são diferentes.

Dessa forma, as comparações têm como objetivo verificar o funcionamento dos piezômetros e opinar quanto à confiabilidade das características geométricas e das medições disponíveis. As comparações são realizadas considerando as duas seções instrumentadas: estaca 35 e estaca 38.

#### 4.2.3.1. Estaca 35

A seção da estaca 35 apresenta 10 (piezômetros), sendo 08 instalados no corpo da barragem e 02 na fundação. Inicialmente, comparam-se as linhas



piezométricas para a seção da estaca 35, considerando apenas os piezômetros instalados no corpo da barragem (Figura 61).

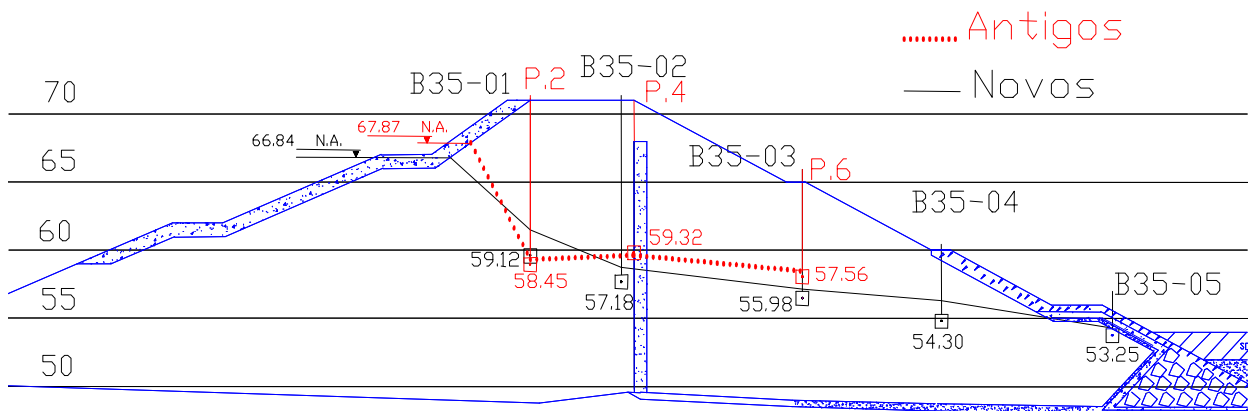


Figura 61 - Comparação dos piezômetros na barragem - Estaca 35

O piezômetro P2 (barragem) apresentou leituras inconsistentes, visto que suas leituras foram inferiores aos níveis piezométricos obtidos pelo outro instrumento na mesma posição. Além disso, não há perda de carga entre os piezômetros P2 e P4, fato inesperado para piezômetros instalados na região do núcleo.

Desta forma, pode-se supor que a cota de instalação do P2 esteja incorreta, havendo possibilidade deste estar posicionado na fundação, informação já citada por Amorim (1976). Face a esta dúvida, a análise do fluxo desconsiderou os dados fornecidos por este instrumento. Os outros instrumentos apresentam dados consistentes, percebendo-se uma relação direta entre o nível do reservatório e as cotas piezométricas.

A Figura 62 apresenta as linhas piezométricas, ainda para a estaca 35, considerando os instrumentos instalados na fundação. Os piezômetros apresentam leituras coerentes, existindo uma perda de carga entre eles, o que praticamente afasta a possibilidade dos mesmos estarem instalados no tapete drenante.

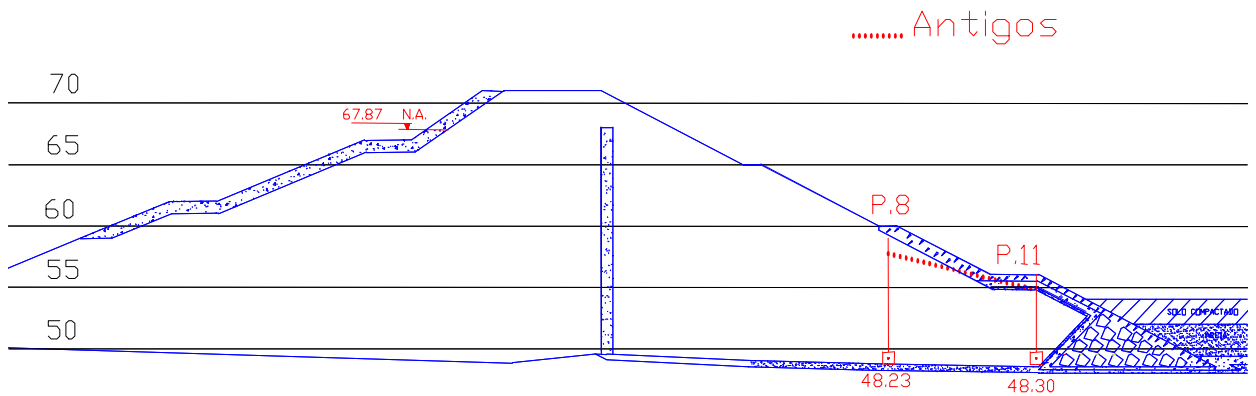


Figura 62 – Comparação dos piezômetros na fundação - Estaca 35

#### 4.2.3.2. Estaca 38

Por sua vez, a seção da estaca 38 apresenta 12 piezômetros, sendo 02 instalados no corpo da barragem e 10 na fundação. A Figura 63 compara as linhas piezométricas para a seção da estaca 38, considerando apenas os piezômetros instalados no corpo da barragem. A Figura 64 apresenta as linhas piezométricas, ainda para a estaca 38, considerando os instrumentos instalados na fundação.

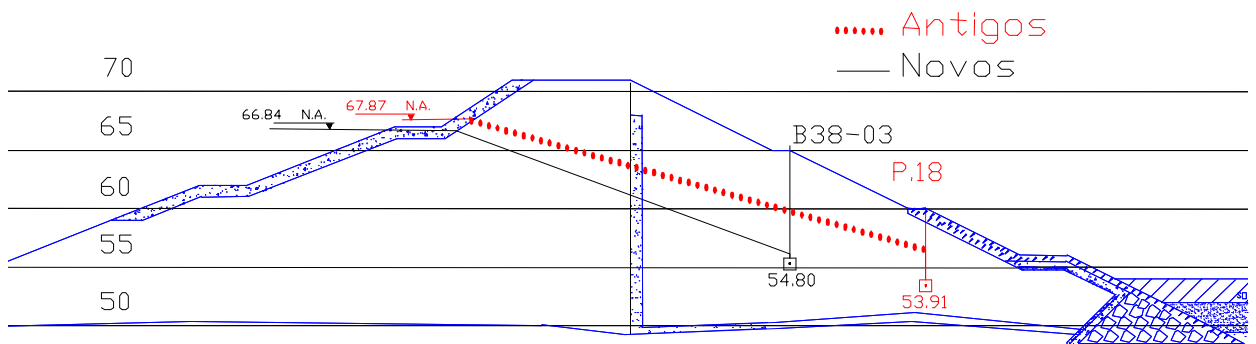


Figura 63 – Comparação dos piezômetros na barragem - Estaca 38

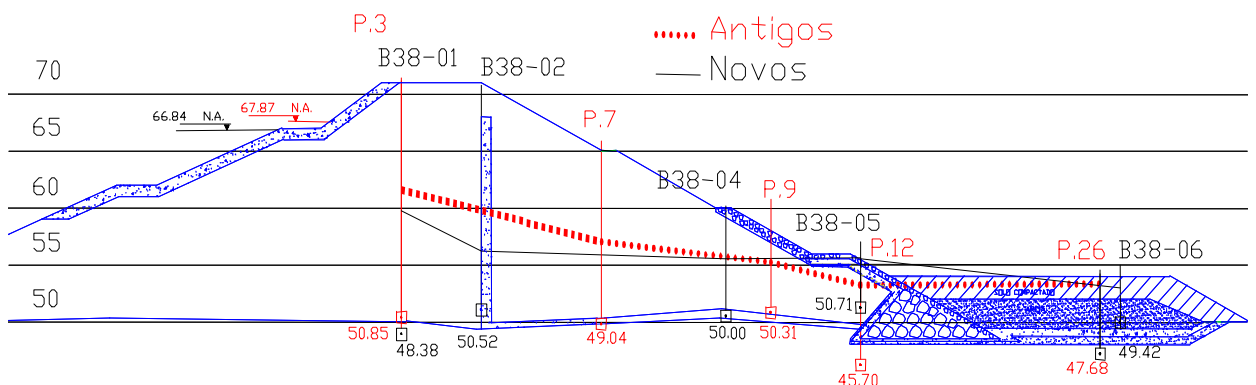


Figura 64 - Comparação dos piezômetros na fundação - Estaca 38

As leituras de B38-02, B38-04 e B38-05 mostram cargas piezométricas semelhantes para piezômetros com cotas de instalação praticamente iguais. Isto

indica que não é observada perda de carga entre estes pontos. É provável, portanto, que estes piezômetros estejam posicionados no tapete drenante e não na fundação, como fora especificado.

Por sua vez, os piezômetros antigos apresentam leituras que indicam uma perda de carga ao longo da fundação. Comparando-se as leituras dos piezômetros P3 e B38-01 pode-se concluir que a linha piezométrica na fundação é função direta do nível do reservatório. No entanto, quando se compara os níveis dos piezômetros P12 e B38-05, observa-se o contrário. Este fato reforça a hipótese de que o piezômetro B38-05 não está instalado na barragem e sim no tapete drenante.

#### 4.2.4. Seção Típica

As seções 35 e 38 apresentam praticamente a mesma geometria, diferindo somente na cota de fundação. Como esta diferença não é significativa foi adotada uma seção típica. Esta seção permite comparar as cotas piezométricas para as duas seções estudadas, tanto para o corpo da barragem como para a fundação.

A Figura 65 traz a seção típica com todos piezômetros que estão instalados no corpo da barragem e não foram desconsiderados na análise.

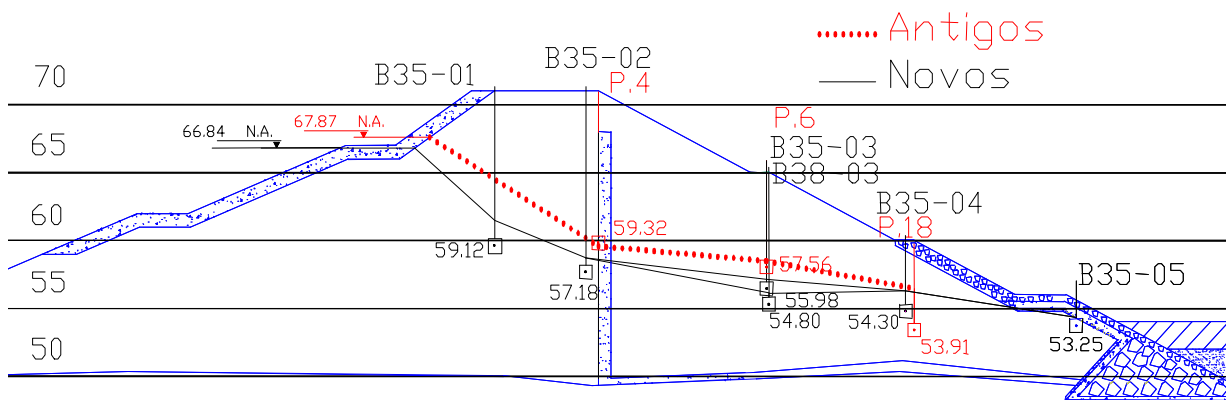


Figura 65 - Seção típica com os piezômetros do corpo da barragem

A figura anterior mostra mais uma vez que existe uma relação direta entre o nível do reservatório e as cargas piezométricas, como era esperado. Principalmente entre os piezômetros à montante do dreno (B35-01, B35-02 e P4) verifica-se uma equivalência na taxa da perda de carga entre os instrumentos. Este comportamento também ocorre à jusante do dreno. No entanto, deve-se destacar que os piezômetros B35-03 e B38-03, apesar de estarem na mesma

posição e com o mesmo nível do reservatório, apresentaram uma diferença em suas cotas piezométricas na ordem de um (01) metro.

A comparação entre B35-04 e P18 também mostra que quanto mais à jusante, menor será a influência do nível do reservatório na leitura do instrumento.

A Figura 66 analisa a piezometria na fundação da barragem utilizando a seção típica proposta anteriormente e os piezômetros não desconsiderados em análises anteriores.

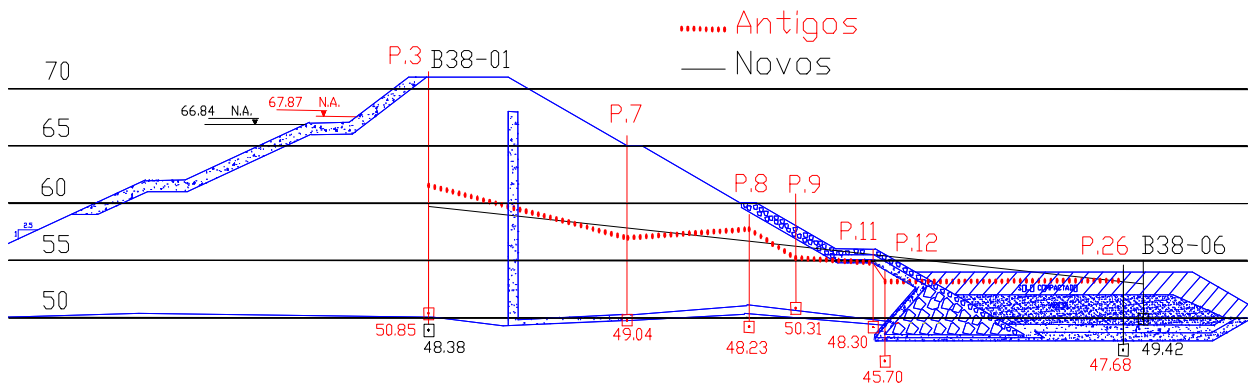


Figura 66 - Seção típica com os piezômetros da fundação

Pode-se observar um comportamento incomum, pois ocorre um aumento do nível piezométrico entre os piezômetros P8 e P7. Por esse motivo, os piezômetros mencionados foram desconsiderados na simulação de fluxo.

Além disso, os piezômetros P9 e P11 apresentam níveis piezométricos equivalentes, apesar das posições serem diferentes. Este comportamento pode indicar que os mesmos estejam instalados no tapete drenante, como já foi observado para outros casos. Outro aspecto que sustenta esta hipótese é a perda de carga elevada existente entre os piezômetros P11 e P12. Por estas razões, o piezômetro P11 também não foi considerado para a simulação de fluxo apresentada a seguir.