



**Laryssa Petry Ligocki**

**Comportamento geotécnico  
da barragem de Curuá-Una, Pará**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de geotecnia.

Orientador: Prof. Alberto S. F. J. Sayão  
Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Denise M. S. Gerscovich

Rio de Janeiro  
Março de 2003

**Laryssa Petry Ligocki**

**Comportamento geotécnico  
da barragem de Curuá-Una, Pará**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Alberto S. F. Jardim Sayão**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Profa. Denise Maria S. Gerscovich**

Co-Orientador

UERJ

**Prof. Paulo César de Almeida Maia**

UENF

**Prof. Sérgio Augusto B. da Fontoura**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Willy Alvarenga Lacerda**

COPPE

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Março de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## **Laryssa Petry Ligocki**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Paraná, em 2001. Durante a graduação, atuou nas áreas de saneamento e geotecnia. Foi monitora da disciplina de Mecânica dos Solos e Fundamentos de Geologia. Desenvolveu trabalhos de iniciação científica entre 1998 até sua graduação. As linhas de pesquisa estudadas foram Geotecnia Experimental e Engenharia de Fundações. Ganhou prêmio em evento de iniciação científica com o trabalho “Fundações na região metropolitana de Curitiba”. Fez estágio na Universidade de Karlsruhe, Alemanha, na área de construção civil. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) no ano de 2001, atuando na área de Geotecnia Experimental. Desenvolveu pesquisa sobre o comportamento geotécnico de barragens.

### Ficha Catalográfica

Ligocki, Laryssa Petry

Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una / Laryssa Petry Ligocki; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientadora: Denise Maria Soares Gerscovich. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[21], 174 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Barragens de terra. 3. Estabilidade de taludes. 4. Modelagem numérica. 5. Comportamento tensão-deformação. I. Sayão, Alberto S. F. J. (Alberto de Ferraz Jardim). II. Gerscovich, Denise Maria Soares. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

*A todos aqueles que  
acreditam na prática  
consciente da Engenharia.*

## Agradecimentos

Aos meus pais, João e Marlowa, e as minhas irmãs, Alessandra e Natascha, que são os meus principais orientadores na vida e cujo incentivo e carinho tornaram possível a realização deste trabalho. A toda minha família, avós, tios, primos e cunhado, que sempre me estimularam na busca pela minha realização profissional.

Ao Prof. e amigo Alberto Sayão, cuja competência demonstrada contribuiu para que meu respeito e admiração fossem sempre crescentes. Mostrou-se um orientador com capacidade técnica inquestionável, tornando o período de desenvolvimento da dissertação muito interessante.

À Prof. Denise que demonstrou muita eficiência em tudo que participa. Pela atenção e amizade.

Ao Prof. Celso Romanel que sempre mostrou-se disposto a ajudar. Deu contribuições importantes no desenvolvimento da etapa numérica deste trabalho.

Ao Prof. Franklin, uma das pessoas mais sábias que tive a felicidade de conhecer. Sua paciência, calma e bom humor são exemplos que sempre vou admirar.

Aos demais professores do Departamento da PUC que contribuíram de alguma forma para a minha formação profissional.

Ao Luis e a Maris, meus irmãos por opção, que ajudaram a tornar nossa casa em lar, onde as portas sempre estiveram abertas aos amigos. Foram meus principais anjos da guarda ao longo desta jornada nunca deixaram que faltasse, carinho compreensão e afeto. Deram uma contribuição valiosa na fase final deste trabalho.

Ao Saré, pelo coleguismo ao longo dos dois anos de divisão de tarefas. Sempre disposto a ajudar e a ensinar os outros, um incentivador nas horas mais difíceis. Ele também faz parte da família.

À Ana Cristina e à Ana Júlia, grandes amigas e conselheiras que conseguiram passar calma e tranquilidade nos momentos de maior ansiedade.

A estes 5 amigos especiais que somada à presença de, Ataliba, Cassiane, Fred, Paty e Lucas, muito enriqueceram a minha experiência de vida durante os dois últimos anos. Este grupo tão heterogêneo e ao mesmo tempo tão unido provou ser possível a amizade entre pessoas com características diferentes. Na escola da vida eles foram meus melhores professores.

Ao José Luis pela amizade, paciência e ajuda com o programa Plaxis.

Aos demais colegas de pós graduação, André, Heber, Flávia, Janaina, Leonardo, Maltilde, Olga, Ramidan, Vivi e Antônio.

À toda “comunidade internacional”, pela rica troca cultural.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC, em especial à Ana Roxo, Marcel, Cristiano, Lenilson, e Fátima pela amizade e eficiência na prestação de serviços.

Aos colegas do laboratório de Geotecnia, pela paciência do Seu José, pela ajuda do William em momentos difíceis e principalmente pelo exemplo de pessoa que o Amaury demonstrou ser.

A todos os professores da UFPR, em especial aos professores Alessander, Andréa, Chamecki, Dell’Avanzi, Jocely, Ney e Roberta, que foram os meus primeiros orientadores na Geotecnia e na vida acadêmica.

Aos inúmeros amigos da UFPR e do LAME que mesmo de longe acompanharam momentos de alegria e de dificuldade enfrentados ao longo destes dois anos. Dentre eles gostaria de citar Marilyn, Regina e Alexandre, Jú, Thata, Naomi, Caro, Carlos, Carina, Laila, Mônica, Alex, Carol, Fernando, Fornari, e tantos outros que tornaram a minha mudança para o Rio de Janeiro difícil pela saudade deixada, mas que souberam me incentivar nesta fase de mudanças.

Às Centrais Elétricas do Pará, pelo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho. Principalmente à Eng. Giorgiana Pinheiro.

À FURNAS e CBDB pelo apoio fornecido na revisão bibliográfica.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

## Resumo

Ligocki, Laryssa Petry; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Gerscovich, Denise Maria Soares. **Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará**. Rio de Janeiro, 2003. 174p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará, foi estudado devido à importância que a barragem representa para a Região Norte do Brasil. A usina hidrelétrica de Curuá-Una, inaugurada em 1977, está localizada na Amazônia, próxima à cidade de Santarém. O estudo englobou a avaliação das condições atuais de operação e a previsão de desempenho após uma possível elevação de 1,5m do nível do reservatório, com e sem alteamento simultâneo da crista da barragem. A elevação do nível do reservatório possibilitaria o aumento da potência útil da usina, beneficiando toda a região. Uma ampla campanha de ensaios geotécnicos foi realizada em amostras indeformadas dos materiais constituintes da barragem. As amostras de bloco foram extraídas dos taludes de jusante e montante, acima do nível freático. O programa experimental incluiu ensaios de caracterização, permeabilidade, adensamento, cisalhamento direto, e triaxiais, com diferentes condições de umidade. A pesquisa envolveu também a análise dos resultados da instrumentação de campo, composta por piezômetros instalados no corpo da barragem e na fundação de material arenoso. Uma surgência da linha freática foi identificada no talude de jusante, sugerindo um funcionamento inadequado do filtro vertical. As análises englobaram simulações numéricas da elevação do nível do reservatório e da cota da crista da barragem, com o objetivo de avaliar a deformabilidade do maciço. Foram também definidos os níveis de alerta referentes à segurança da barragem, com base em estudos de estabilidade realizados para diferentes condições de geometria e carregamento.

## Palavras-chave

Engenharia civil; Barragens de terra; Estabilidade de taludes; Comportamento tensão-deformação; Modelagem numérica.

## Abstract

Ligoeki, Laryssa Petry; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Gerscovich, Denise Maria Soares. **Geotechnical behavior of Curuá-Una dam, Pará**. Rio de Janeiro, 2003. 174p. MSc. Dissertation – Departament of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The geotechnical behavior of Curuá-Una dam, Pará, was studied due its importance to the North Region of Brazil. The power plant, in operation since 1977, is located in the Amazon forest, next to the city of Santarém. The study was comprised of the evaluation of current operation conditions of the dam and prediction of its performance after a possible rise of 1,5m of the level of the reservoir with and without simultaneous rise of the dam's crest. The rise of the reservoir would increase the power capacity of Curuá-Una plant, benefiting the entire region. A comprehensive program of geotechnical tests was carried out on undisturbed samples of the dam materials. Block samples were extracted from the upstream and downstream slopes of the dam. The experimental program included characterization tests, permeability, consolidation, direct shear and triaxial tests, with different saturation conditions. The research also included the analysis of field instrumentation results. The instrumentation included several piezometers, installed in the body of the dam and in the sandy foundation. A surgency of the freatic line was identified at the downstream slope, suggesting a malfunctioning of the vertical filter. The analyses included numerical simulations of different reservoir and crest levels, with objective to evaluate the deformability of the earth embankment. In addition, stability studies for different geometries and loading conditions were also carried out. Alert levels regarding the dam's stability were established.

## Keywords

Civil Engineering, Earth dams; Slope stability; Stress-strain behavior; Numerical modeling.



# Sumário

1 Introdução	22
2 Revisão bibliográfica	24
2.1. Comportamento de solos compactados	24
2.2. Avaliação de segurança, reabilitação e alteamento de barragens de terra	33
2.2.1. Processos instabilizadores	37
2.2.2. Acompanhamento, recuperação e adequação de barragens	39
2.2.3. Métodos de alteamento	47
2.3. Instrumentação de barragens	55
2.3.1. Medidor de NA	56
2.3.2. Piezômetros	57
2.3.3. Célula de tensão total	65
2.3.4. Medidores de deslocamentos	66
2.3.5. Medidores de Vazão	73
2.3.6. Monitoramento sismológico	74
2.3.7. Recomendações	74
2.4. Análise do comportamento de barragens	76
2.4.1. Modelos constitutivos	82
2.4.2. Programas computacionais	86
3 Caso da U.H.E de Curuá-Una	93
3.1. Histórico	95
3.2. Projeto executivo	96
3.2.1. Aspectos geológicos-geotécnicos	99
3.2.2. Materiais de Construção	103
3.2.3. Barragem de Terra e Dique Direito	105
3.2.4. Tapetes Impermeável e Drenante	106
3.2.5. Estruturas de Concreto	107
3.2.6. Ensecadeiras	108
3.3. Instrumentação	109
3.4. Reavaliações e intervenções realizadas	110
3.5. Estudos Atuais	115

3.6. Resumo	118
4 . Programa experimental	119
4.1. Ensaaios de caracterização	121
4.2. Ensaaios de adensamento	126
4.3. Ensaaios de cisalhamento direto	131
4.4. Ensaaios triaxiais	135
4.5. Ensaaios de permeabilidade	144
5 Análise do comportamento da barragem	147
5.1. Definição da linha freática	147
5.2. Estudo de estabilidade	154
5.3. Níveis de Alerta	162
5.4. Sugestões de projeto de recuperação	167
5.5. Discussão dos Resultados	171
5.6. Análise de deslocamentos	173
5.7. Considerações finais	184
6 Conclusão	186
7 Referências bibliográficas	188

## Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura do solo (Lambe, 1958)	25
Figura 2 - Efeito da compactação na permeabilidade dos solos argilosos (Lambe, 1958)	26
Figura 3 - Ensaio edométrico em solos compactados (Lambe, 1958)	27
Figura 4 - Influência da umidade no comportamento de solos compactados (Lambe e Whitman, 1979)	28
Figura 5 - Curvas de igual resistência ao cisalhamento em ensaios triaxial UU (Bertolucci, 1975)	29
Figura 6 - Curvas de igual resistência ao cisalhamento na ruptura em ensaios triaxiais tipo CU e CD (Pinto, 1983)	30
Figura 7 - Seção da barragem de Plane Nine, EUA (Hamel e outros, 1993)	43
Figura 8 - Reforço da barragem de Santa Branca (Dell'Avanzi, 1995)	47
Figura 9 - Alçamento da barragem de Al-Wehdah (Antonopoulos e outros, 1994)	50
Figura 10 - Etapas do alçamento da barragem de Iwiny (Chacinski e outros, 1994)	50
Figura 11 - Barragem de King Talal (Antonopoulos, 1994)	51
Figura 12 - Seção transversal da barragem de Guri (DE Fries, 1982)	52
Figura 13 - Alçamento de barragens utilizando solo reforçado	53
Figura 14 - Barragem inflável ( <a href="http://www.satujo.com">http://www.satujo.com</a> )	53
Figura 15 - Sistema de operação ( <a href="http://www.satujo.com">http://www.satujo.com</a> )	54
Figura 16 - Medidor de NA (Cruz, 1996)	57
Figura 17 - Esquema de piezômetro de tubo aberto (Cruz, 1996)	58
Figura 18 - Esquema de piezômetro pneumático (Dunnicliff, 1988 – adaptado)	61
Figura 19 - Esquema de instalação de piezômetro hidráulico de tubo duplo (Dunnicliff, 1988 – adaptado)	62
Figura 20 - Esquema de piezômetro de corda vibrante (Dunnicliff, 1988 – adaptado)	64
Figura 21 - Esquema de piezômetro elétrico (Dunnicliff, 1988 – adaptado)	65
Figura 22 - Esquema de célula de tensão total elétrica (Dunnicliff, 1988)	66
Figura 23 - Esquema de célula de tensão total tipo hidráulico (Dunnicliff, 1988)	66
Figura 24 - Medidor de recalques de tubos telescópicos (Cruz, 1996)	68

Figura 25 - Esquema da tubulação e torpedo do USBR (Dunnicliff, 1988)	69
Figura 26 - Medidor de recalques tipo KM (Cruz, 1996)	70
Figura 27 - Medidor magnético de recalques (Cruz, 1996)	71
Figura 28 - Esquema da caixa sueca (Dunnicliff, 1988)	72
Figura 29 - Esquema de inclinômetro	73
Figura 30 - Modelagem numérica da barragem de Iwiny (Chacinski, 1994)	79
Figura 31 - Classificação de leis constitutivas	82
Figura 32 - Modelo de Mohr-Coulomb	88
Figura 33 - Definição de $E_0$ e $E_{50}$ em ensaio convencional triaxial CD	88
Figura 34 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb	89
Figura 35 - Superfícies de escoamento do Modelo HS	90
Figura 36 - Definição de $E_{eod}$	90
Figura 37 - Definição de $q_a$ e $q_f$ em ensaio triaxial CD	91
Figura 38 - Bacias hidrográficas brasileiras	93
Figura 39 - Localização da barragem	94
Figura 40 - Planta esquemática da UHE de Curuá-Una (Pierre e outros, 1982)	97
Figura 41 - Vista aérea do projeto em fase de execução (Pierre e outros, 1982)	98
Figura 42 - Bacia hidrográfica do Amazonas	100
Figura 43 - Curvas granulométricas do material das áreas de empréstimo (Ferrari, 1973)	104
Figura 44 - Carta de plasticidade de Casagrande das áreas de empréstimo (Ferrari, 1973)	104
Figura 45 - Seção típica do projeto original (Pierre e outros., 1982).	105
Figura 46 - Seção esquemática da casa de força.	108
Figura 47 - Seção transversal da estaca 35 após o reforço do sistema de drenagem (Ferrari, 2000 – adaptado)	109
Figura 48 - Seção transversal da estaca 38 após o reforço do sistema de drenagem (Ferrari, 2000 – adaptado)	109
Figura 49 - Posicionamento dos piezômetros no reforço (Eletroprojetos, 1979)	110
Figura 50 - Pé do talude de jusante antes e após a execução do reforço.	112
Figura 51 - Vista do talude de jusante e localização dos piezômetros	116
Figura 52 - Vista parcial do talude de montante e reservatório	116
Figura 53 - Vista do vertedouro	117
Figura 54 - Posição de retirada dos blocos de solo indeformado	120
Figura 55 - Bloco indeformado M33	120

Figura 56 - Bloco indeformado M39	120
Figura 57 - Carta de Casagrande	122
Figura 58 - Curvas granulométricas dos materiais da barragem	123
Figura 59 - Condições geométricas da lei de Bragg (Mitchell, 1976)	123
Figura 60 - Difrátogramas da amostra M33 natural	125
Figura 61 - Difrátogramas da amostra M33 glicolada	125
Figura 62 - Prensa de CRS	128
Figura 63 - Curvas tensão efetiva x índice de vazios	129
Figura 64 - Curvas tensão efetiva x módulo de compressão volumétrica	130
Figura 65 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto (material submerso)	132
Figura 66 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto (material na umidade natural)	133
Figura 67 - Faixa de valores de variação de $c'$ e $\phi'$	134
Figura 68 - Equipamento de compressão triaxial	135
Figura 69 - Resultados dos ensaios triaxiais CID com a amostra M33	138
Figura 70 - Resultados dos ensaios triaxiais CID com a amostra J39	139
Figura 71 - Resultados dos ensaios triaxiais CIU	140
Figura 72 - Envoltória de resistência no diagrama de Lambe	141
Figura 73 - Influência da tensão confinante no módulo secante	143
Figura 74 - Influência da tensão confinante no $v$	143
Figura 75 - Variação do coeficiente de permeabilidade em função da tensão efetiva	145
Figura 76 - Corpos de provas dos ensaio CRS e triaxial	146
Figura 77 - Posicionamento em planta dos piezômetros	148
Figura 78 - Seção transversal da estaca 38 e posicionamento dos piezômetros "antigos"	149
Figura 79 - Seção transversal estaca 35 e posicionamento dos piezômetros "novos"	149
Figura 80 - Cota piezométrica no ano de 2001	150
Figura 81 - Comparação entre linhas freáticas definidas por piezômetros novos e antigos com o reservatório na cota 67,0m	152
Figura 82 - Comparação entre as cargas piezométricas medidas e previstas	153
Figura 83 - Comparação entre as linhas piezométricas medidas e previstas	153
Figura 84 - Linhas freáticas para diferentes cotas do reservatório	154
Figura 85 - Seção transversal típica da barragem de terra de Curuá-Una	155

Figura 86 - Influência da variação do nível do reservatório no fator de segurança	157
Figura 87- Estabilidade do talude de jusante com reservatório na cota 68,0m (Caso1)	157
Figura 88 - Estabilidade da barragem com funcionamento adequado do filtro (Caso 1)	158
Figura 89 - Alçamento da barragem (1V:2,5H)	158
Figura 90 - Comparação do alçamento da barragem para os níveis do reservatório nas cotas 68,0m e 69,5m (caso1)	159
Figura 91 - Seção transversal da barragem (caso 2)	160
Figura 92 - Influência do nível do reservatório no FS (caso 2)	161
Figura 93 - Estabilidade do talude de jusante com nível do reservatório na cota 68,0m (Caso 2)	162
Figura 94 - Variação do fator de segurança com o nível do reservatório	164
Figura 95 - Condições de operação da barragem durante o ano de 2001 (PZ03)	164
Figura 96 - Condições de operação da barragem durante o ano de 2001 (PZ18)	165
Figura 97 - Condição de operação da barragem durante agosto de 2002	166
Figura 98 - Esquema de reforço sugerido	168
Figura 99 - Estudo de reforço no talude de jusante	169
Figura 100 - Estudo de reforço no talude de jusante (Caso 2)	171
Figura 101 - Comparação entre fatores de segurança do Caso 1 (PZ antigos) e Caso 2 (PZ novos)	172
Figura 102 - Malha da análise tensão-deformação	175
Figura 103 - Reconstituição da curva tensão-deformação de $\sigma_3 = 100\text{kPa}$	175
Figura 104 - Reconstituição da curva tensão-deformação $\sigma_3 = 200\text{kPa}$	176
Figura 105 - Reconstituição da curva tensão- deformação de $\sigma_3 = 450\text{kPa}$	176
Figura 106 - Estado de tensão para nível do reservatório na cota 68,0m	177
Figura 107 - Superfície de ruptura na condição atual da barragem	178
Figura 108 - Estado de tensão total para nível do reservatório na cota 69,5m	179
Figura 109 - Deslocamentos totais com reservatório na cota 69,5m	180
Figura 110 - Deslocamentos totais com nível do reservatório na cota 69,5m	181
Figura 111 - Superfície de ruptura para elevação do nível do reservatório para cota 69,5m	181
Figura 112 - Estado de tensão total após elevação do nível do reservatório para	

a cota 69,5m e alteamento da barragem	182
Figura 113 - Deslocamentos totais com alteamento e elevação do reservatório para 69,5m	183
Figura 114 - Deslocamentos totais com reservatório na cota 69,5m e alteamento da barragem	183
Figura 115 - Superfície de ruptura para alteamento e elevação do nível do reservatório	184

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Valores de $E_{50}$ (kPa) do material da barragem de Itumbiara (Amaral, 1975) .....	32
Tabela 2 - Temas abordados em congressos internacionais da ICOLD.....	34
Tabela 3 - Temas de seminários brasileiro sobre segurança, deterioração e reabilitação de barragens.....	35
Tabela 4 - Tipos de deterioração mais freqüentes em barragens de terra. (ICOLD, 1994). .....	38
Tabela 5 - Medição e instrumentos para monitoração de barragens em operação (Dunnicliff, 1988 – adaptada) .....	75
Tabela 6 - Tempo e equipes de leitura de instrumentação (Cruz, 1996) .....	76
Tabela 7 - Parâmetros da modelagem numérica da barragem de Iwiny (Chacinski, 1994) .....	79
Tabela 8 - FS e probabilidade de ruptura do talude de jusante da barragem de Santa Branca (dell'Avanzi, 1998 - adaptado). .....	82
Tabela 9 - Propriedades geotécnicas da fundação da casa de força e vertedouro .....	102
Tabela 10 - Valores dos coeficientes de permeabilidade dos materiais envolvidos (Amorim, 1976) .....	102
Tabela 11 - Propriedades geotécnicas dos materiais das áreas de empréstimo (Pierre e outros, 1982) .....	103
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização .....	121
Tabela 13 - Distâncias interplanares típicas para argilominerais (fonte: Santos, 1975) .....	124
Tabela 14 - Resultados do ensaio de adensamento. ....	128
Tabela 15 - Características dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.....	131
Tabela 16 - Resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto .....	134
Tabela 17 - Características dos ensaios triaxiais. ....	136
Tabela 18 - Valores de $p'$ e $q$ na ruptura obtidos nos ensaios triaxiais.....	141
Tabela 19 - Módulos de deformabilidade obtidos nos ensaios CID.....	142
Tabela 20 - Valores de coeficientes de permeabilidade.....	144
Tabela 21 - Cotas dos piezômetros verificadas no ano de 2002.....	149
Tabela 22 - Leituras dos piezômetros novos em agosto de 2002 .....	151



Tabela 23 - Valores de permeabilidade .....	152
Tabela 24 - Cotas piezométricas de campo e previstas numericamente.....	153
Tabela 25 - Parâmetros geotécnicos da barragem de Curuá-Una (caso1) .....	155
Tabela 26 - Fatores de segurança na barragem de Curuá-Una (Caso 1) .....	156
Tabela 27 - Alçamento da barragem para jusante (Caso 1).....	159
Tabela 28 - Parâmetros geotécnicos da barragem de Curuá-Una (caso2).....	160
Tabela 29 - FS para alçamento da barragem para jusante (caso 2) .....	161
Tabela 30 - Cota piezométrica da estaca 38.....	163
Tabela 31 - Nível de segurança para os piezômetros novos – estaca 35 .....	166
Tabela 32 - Fatores de segurança para diferentes alturas de reforço (Caso1) 168	
Tabela 33 - Fatores de segurança para diferentes alturas de reforço (Caso 2) 170	
Tabela 34 -Parâmetros utilizados no estudo tensão-deformação .....	173
Tabela 35 -Parâmetros utilizados no estudo tensão-deformação .....	174
Tabela 36. Comparação entre estados de tensão teórico e previsto pelo programa .....	177
Tabela 37 - FS e deslocamentos da barragem .....	184

## Lista de Símbolos e Siglas

A, B	Parâmetros de poropressão de Skempton
B	Módulo de deformabilidade volumétrica (“Bulk modulus”)
CD	Consolidado Drenado
CID	Consolidado Isotropicamente Drenado
CIU	Consolidado Isotropicamente Não-Drenado
CRS	“Constant Rate of Strain”
CU	Consolidado Não-Drenado
D	Módulo de compressão volumétrica
$D_{10}$	Diâmetro efetivo dos grãos
E	Módulo de deformabilidade (Módulo de Young)
$E_{50}$	Módulo de deformabilidade secante à 50% da carga máxima
$E_{50}^{ref}$	Módulo de deformabilidade tangente de referência (Plaxis)
$E_{eod}^{ref}$	Módulo de deformabilidade referência devido à compressão primária (Plaxis)
$E_H$	Módulo de deformabilidade horizontal
$E_i$	Módulo de deformabilidade tangente inicial
$E_S$	Módulo de deformabilidade secante
$E_{ur}^{ref}$	Módulo de deformabilidade carregamento/descarregamento (Plaxis)
$E_v$	Módulo de deformabilidade vertical
FS	Fator de segurança
G	Densidade real dos grãos
G	Módulo de deformabilidade cisalhante (“shear modulus”)
HS	“Hardening Soil”
IP	Índice de Plasticidade
$IP_{médio}$	Índice de Plasticidade médio
J33	Bloco de solo indeformado do talude de jusante, alinhado na estaca 33
J39	Bloco de solo indeformado do talude de jusante, alinhado na estaca 39
K	Módulo de deformabilidade cisalhante (“shear modulus”)
LC	Limite de contração
LF	Linha Freática
Lin	Intensidade de refração
LL	Limite de liquidez
$LL_{médio}$	Limite de liquidez médio

LP	Limite de plasticidade
M33	Bloco de solo indeformado do talude de montante, alinhado na estaca 33
M39	Bloco de solo indeformado do talude de montante, alinhado na estaca 39
MC	Mohr-Coulomb
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
PN	Pressão Neutra
Pr	Probabilidade de ruptura
S	Grau de saturação
$S_f$	Grau de saturação final
$S_i$	Grau de saturação inicial
SS	“Soft Soil”
SSC	“Soft Soil Creep”
UU	Não-consolidado Não-Drenado
$a'$	Parâmetro de resistência de Lambe: coeficiente linear
$c'$	Coesão efetiva
$c'_{ult}$	Coesão efetiva última
$c_c$	Coeficiente de compressão virgem
$C_p$	Corpo de prova
$c_r$	Coeficiente de recompressão
$c_s$	Coeficiente de expansão
$c_v$	Coeficiente de adensamento
D	Distância interplanar basal
E	Índice de vazios
$e_o$	Índice de vazios inicial
I	Gradiente hidráulico
K	Coeficiente de permeabilidade
$k_h$	Coeficiente de permeabilidade horizontal
$k_{HAZEN}$	Coeficiente de permeabilidade definido por Hazen
$k_v$	Coeficiente de permeabilidade vertical
M	Parâmetro que quantifica a relação:rigidez do solo/tensão confinante (Plaxis)
$m_v$	Coeficiente de variação volumétrica
N	Ordem de reflexão
P	Parâmetro de resistência total de Lambe
P	Pressão confinante de referência (Plaxis)

$p'$	Parâmetro de resistência efetiva de Lambe
$Q$	Parâmetro de resistência efetiva de Lambe
$Q$	Tensão desviadora (Plaxis)
$q_a$	Valor teórico de tensão desviadora assintótico (Plaxis)
$q_{rup}$	Parâmetro de resistência efetiva de Lambe na ruptura
$q_{ult}$	Parâmetro de resistência efetiva última de Lambe
$r_u$	Coeficiente de poropressão
$U$	Poropressão
$u_b$	Poropressão na base
$u_{max}$	Poropressão máxima
$V$	Velocidade
$W$	Umidade
$w_{nat}$	Umidade natural
$w_{ot}$	Umidade ótima
$\alpha'$	Parâmetro de resistência de Lambe: coeficiente angular
$\beta$	Índice de confiabilidade
$\varepsilon_1$	Deformação na direção 1 (direção da tensão principal maior)
$\varepsilon_3$	Deformação na direção 3 (direção da tensão principal menor)
$\varepsilon_a$	Deformação axial
$\varepsilon_v$	Deformação volumétrica
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\phi'_{ult}$	Ângulo de atrito efetivo último
$\gamma_d$	Peso específico seco do solo
$\gamma_{d\text{ máx}}$	Peso específico seco máximo do solo
$\gamma_{nat}$	Peso específico natural do solo
$\gamma_{sat}$	Peso específico saturado do solo
$\gamma_{sub}$	Peso específico submerso do solo
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\lambda$	Comprimento de onda dos raios-X
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\nu_{ur}$	Coeficiente de Poisson carregamento/descarregamento (Plaxis)
$\theta$	Ângulo de refração
$\sigma'_1$	Tensão efetiva principal maior
$\sigma'_3$	Tensão efetiva principal menor

$\sigma'_v$	Tensão efetiva vertical
$\sigma_1$	Tensão total principal maior
$\sigma_3$	Tensão total principal menor
$\sigma_c$	Tensão total confinante
$\sigma'_c$	Tensão efetiva confinante
$\sigma_d$	Tensão desviadora
$\sigma'_d$	Tensão desviadora efetiva
$\sigma_d^{rup}$	Tensão desviadora na ruptura
$\sigma_v$	Tensão total vertical
$\tau$	Tensão cisalhante
$\tau$	Resistência ao cisalhamento
$\psi$	Ângulo de dilatância (Plaxis)
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCE	“American Society of Civil Engineering”
CBGB	Comitê Brasileiro de Grandes Barragens
Celpa	Centrais Elétricas do Pará
Coppe	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
FMECA	“Failure Mode, Effect and Criticaly Analysis”
ICOLD	“International Congress on Large Dams”
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
NBR	Norma Brasileira
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SPT	“Standard Penetration Test”
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UHE	Usina Hidrelétrica
USBR	“United States Bureau of Reclamation”
USP	Universidade de São Paulo
WCD	“World Commission on Dams”