



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

LUCRÉCIA NOGUEIRA DE SOUSA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM EM
ROCHA ARENÍTICA: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I

FORTALEZA

2013

LUCRÉCIA NOGUEIRA DE SOUSA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM EM ROCHA
ARENÍTICA: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Curso de Pós Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Phd. Antônio Nunes de
Miranda.

FORTALEZA

2013

LUCRÉCIA NOGUEIRA DE SOUSA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM EM ROCHA
ARENÍTICA: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Curso de Pós Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Recursos Hídricos

Aprovada em: 23/01 /2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o Ph.D Antônio Nunes de Miranda
Universidade Federal do Ceará
(Orientador)

Prof^a Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará
(Examinador Interno)

Prof^a Dra. Vanda Tereza Costa Malveira
Universidade Estadual do Vale do Acaraú
(Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai. Meu Tudo.

Nada se consegue sozinho, a família é a nossa base para tudo, obrigado Pai, Mãe (in memoriam) e irmãos.

À Secretaria dos Recursos Hídricos por conceder esta oportunidade proporcionado o patrocínio do mestrado e com isso me trouxe a oportunidade de buscar o título de mestre em recursos hídricos. Ao corpo docente do Mestrado por todo conhecimento repassado e amizade e a Teresinha Alves secretaria do curso por seu prestativo atendimento, apoio e atenção. Aos colegas de mestrado pelo companheirismo e pelas boas horas de convivência dentro e fora da sala de aula.

Meu agradecimento especial ao Professor Antônio Miranda, pela orientação e ensinamentos no desenvolvimento deste trabalho.

À COGERH, através do empenho do então Presidente Francisco José Coelho Teixeira para realização deste mestrado e pelo seu incitamento me encorajando a não perder esta oportunidade de fazer mestrado, muito obrigada. Ao Diretor de Operações Ricardo Adeodato que permitiu o tempo necessário para realização deste curso.

Aos meus colegas da GESIN, Alves Neto, Rodrigo, Arimatéia, Rodolfo, Adriano, Sosthènes, Auricélio, Grazille e Alex pela convivência, amizade e apoio nas soluções das atividades desenvolvidas, principalmente durante a minha ausência. Ao Eng^o Francisco Alberto pela amizade e contribuição no fechamento deste trabalho.

Ao Eng^o Francisco Pardaillan pela amizade, incentivos e revisão final deste trabalho.

RESUMO

A fundação da Barragem Jaburu I apresenta comportamento clássico em se tratando de fundações em rocha sedimentar tipo arenítico. O monitoramento contínuo deste empreendimento tem sido o principal indicador no estabelecimento do planejamento e execução das ações de tratamento das fundações e recuperação das estruturas comprometidas no decorrer de três décadas, onde se pode verificar a pouca eficácia do tratamento convencional de fundação em ambiente sedimentar. Desde o primeiro enchimento do reservatório foram identificadas anomalias no maciço de terra e na fundação, em forma de percolação, juntando-se a estas uma significativa vazão na ombreira esquerda que alcançou um pico de 47 l/s, em 1988. Desde esta ocasião, novos pontos de surgências foram identificados e monitorados por meio de medidores de vazão na região de jusante. Apresenta-se, assim, os acontecimentos registrados na barragem e os programas de tratamentos adotados para reduzir as percolações pela fundação, do corpo da barragem e ombreiras, assim como outras intervenções realizadas com o propósito de drenar o fluxo, estabilizar a barragem e obturar as cavidades provenientes da decomposição da rocha arenítica. Com o advento da Lei 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens, foi estabelecida uma cadeia completa de responsabilidades relacionadas à segurança das barragens construídas no Brasil, sendo que algumas das ações propostas já são adotadas pelo Governo do Ceará, desde 2002. Esta dissertação conclui recomendando ações de reabilitação da rocha de fundação da barragem, com novas tecnologias de impermeabilização, de forma a mitigar as anomalias.

Palavras-chave: Fundação; percolação; tratamentos.

ABSTRACT

The foundation of the Jaburu I dam is a classical performance case of foundations in sandstone sedimentary rock. The continuous monitoring of the dam has detected the non-regular seepages and adopted in establishing the planning and execution of the remediation campaigns in way to keep the foundation and dam's structures in safety conditions over three decades of operation, in despite of the ineffectiveness of conventional treatment foundation in sedimentary formation that had been used. Seepage anomalies indentified since the first filling of the reservoir in some regions of embankment and its foundation, detaching a significant flow in the left abutment which reached the maxima discharge of 47 l / s in 1988. Since then new points of resurgences have been identified and monitored by flow gages located in the downstream region. This monograph presents the events recorded in the flow gages and the remedial campaigns adopted to reduce the seepage in the foundation, embankment and abutments of the dam, as well as others specific interventions designed to recover the internal drain, stabilize the dam and to fill the cavities formed by the decomposition of the sandstone rock in the foundation. After the publication of the Law 12.334/2010, which established the National Policy of Dam Safety, it was established a complete list of responsibilities related to the safety of dams in Brazil, some of them already taken as routine by the Government of Ceará since 2002. This monograph recommends to the rock foundations of the dam, treatments with new sealing technologies that would mitigate the present anomalies.

Keywords: Foundation; Seepage; Treatments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Presença de erosão com exposição dos espelhos de falha.....	34
Figura 3.2 - Mapa de Localização da Barragem Jaburu I.....	35
Figura 3.3 - Seção Tipo da Barragem Jaburu I.....	35
Figura 3.4 – Arranjo Geral da Barragem Jaburu I.....	37
Figura 3.5 - Localização dos instrumentos na Barragem Jaburu I.....	38
Figura 3.6 - Seção 03.....	41
Figura 3.7 - Seção 11.....	41
Figura 3.8 - Seção 12.....	41
Figura 3.9 - Seção 13.....	42
Figura 3.10 - Seção 22.....	42
Figura 3.11 - Seção 23.....	42
Figura 3.12 - Seção 25.....	43
Figura 3.13 - Seção PE 01.....	43
Figura 3.14 – Seções PE 02 e 03.....	44
Figura 3.15 – Seções PE 06 e 07.....	44
Figura 3.16 - Cotas piezométricas e N.A do reservatório em função do tempo – Seção 25.....	45
Figura 3.17 - Cotas piezométricas e N.A do reservatório em função do tempo – Seção 03.....	46
Figura 3.18 - Vazão das percolações e Nível d’água do reservatório em função do tempo.....	47
Figura 3.19 - Vista do coroamento e talude de jusante da Barragem Jaburu I.....	48
Figura 3.20 - (a) Vista da caverna na ombreira esquerda da Barragem Jaburu I; (b) Vista interna da caverna.....	49

Figura 3.21 - Cava de erosão criada pela surgência na margem direita do canal da Tomada de Água	50
Figura 3.22 - Aspecto da rocha no canal da Tomada de Água.....	50
Figura 3.23 - Vista do talude de jusante saturado.....	51
Figura 3.24 - (a) Vista da deformação da estrutura no canal de aproximação do vertedouro. (b) Visão localizada da irregularidade.	52
Figura 3.25 - (a)Erosão regressiva no canal de restituição do vertedouro antes do inverno de 2009 e (b) após o inverno	53
Figura 3.26 - (a) Canal de drenagem do medidor V-7 e retirada de silte (b) retirada de asfalto	54
Figura 4.1 - Localização das campanhas de recuperação	55
Figura 4.2 - Berma de estabilização e drenagem.....	59
Figura 4.3 - Execução do aterro hidráulico	61
Figura 4.4 - Detalhe da surgência após a injeção de asfalto.....	62
Figura 4.5 – Limpeza da cavidade para colocação do concreto magro.....	63
Figura 4.6 - Localização dos novos medidores de vazão	65
Figura 4.7 - Execução da drenagem para o medidor de vazão V-05.....	65
Figura 4.8 - Detalhe do talude da margem esquerda (a) e da margem direita (b) da tomada de água antes da estabilização.	66
Figura 4.9 - – Vista da tomada de água após a estabilização	66
Figura 4.10 - Mapa do levantamento planialtimétrico no entorno da Barragem Jaburu I.....	67
Figura 4.11 – Mapeamento das zonas com risco de inundação potencial.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Situação dos medidores de vazão	38
Tabela 3.2 - Elementos básicos dos piezômetros das seções 03, 04, 11, 12, 13, 21 e 22.....	38
Tabela 3.3 - Elementos básicos dos piezômetros das seções 23, 25 e PE 01, 02, 03, 06 e 07.	40
Tabela 4.1 - Quantitativos realizados na 1ª campanha de recuperação.....	57
Tabela 4.2 - Quantitativos realizados na 2ª campanha de recuperação.....	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

AGIR – Agente de Guarda de Inspeção do Reservatório

ANA – Agência Nacional de Águas

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

GPS – Sistema Global de Posicionamento

ICOLD – International Commission on Large Dam

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NPB – Nível de Perigo da Barragem

NAR – Nível de Água do Reservatório

PISB – Painel de Inspeção e Segurança de Barragens

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

POM – Plano de Operação e Manutenção

PZ - Piezômetro

RASB – Relatório Anual de Segurança de Barragens

SOHIDRA – Superintendência de Obras Hidráulicas

SRH – Secretaria dos Recursos Hídricos

TR (1000) – Período de Retorno de 1000 anos

USACE – United States Army Corps of Engineers

USBR – United States Bureau of Reclamation

A:C:A – Relação Água / Cimento/Areia

°C – Grau Celsius

cm/s – Centímetro por Segundo

ha – Hectare

h:v – Relação Horizontal/Vertical

kg – quilograma

kg/cm² – kilograma / Centímetro Quadrado

km – quilômetro

l/s – litro por segundo

l/s/m – litro por segundo por metro

m – metro

m³ – metro cúbico

mm – milímetro

m³/s – metro cúbico por segundo

V-7 – Medidor de Vazão 7

% - Porcentagem

∅ - Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO bibliográfica	19
2.1	Fundações de Barragens	19
2.1.1	Trincheira de Vedação	22
2.1.2	Cortina de Injeção	23
2.1.3	Tapete Impermeável a Montante	25
2.1.4	Parede Diafragma.....	26
2.1.5	Controle por Sistemas de Drenagem.....	27
2.2	Instrumentação	28
2.2.1	Sistema de Instrumentação	29
2.3	Segurança de Barragens.....	31
3	HISTÓRICO DAS ANOMALIAS.....	34
3.1	Geologia do Sítio	34
3.2	Arranjo Geral.....	35
3.3	Ferramentas de Instrumentação da Barragem Jaburu I	37
3.4	Histórico de Ocorrências na Barragem.....	47
3.4.1	Primeira Ocorrência	48
3.4.2	Segunda Ocorrência	48
3.4.3	Terceira Ocorrência	49
3.4.4	Quarta Ocorrência.....	50

3.4.5	Quinta Ocorrência.....	51
3.4.6	Sexta Ocorrência.....	52
3.4.7	Sétima Ocorrência.....	52
3.4.8	Oitava Ocorrência	54
3.4.9	Nona Ocorrência	54
4	CAMPANHAS DE RECUPERAÇÃO E RESULTADOS	55
4.1	Primeira Campanha de Recuperação.....	55
4.2	Segunda Campanha de Recuperação.....	57
4.3	Terceira Campanha de Recuperação	58
4.4	Quarta Campanha de Recuperação.....	60
4.5	Quinta Campanha de Recuperação.....	61
4.5.1	Execução de aterro hidráulico a montante da barragem	61
4.5.2	Tratamento da fundação na ombreira esquerda	61
4.5.3	Tratamento da fundação na ombreira direita	62
4.5.4	Prospecção da fundação do canal do vertedouro	63
4.5.5	Execução de valas drenantes e medidores de vazão	64
4.5.6	Estabilização dos taludes do canal da tomada de água	65
4.5.7	Levantamentos topográficos	66
4.5.8	Levantamentos batimétricos	67
4.5.9	Estudos hidrológicos.....	68
4.5.10	Mapeamento preliminar das zonas de inundação pela ruptura da barragem	68

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	70
5.1	Considerações Finais	70
5.2	Conclusões.....	71
5.3	Recomendações	72
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO I – Registros das Leituras Médias Mensais dos Piezômetros.....	78
	ANEXO II – Vazões de Percolação	97

1 INTRODUÇÃO

A Serra da Ibiapaba, localizada na porção noroeste do Estado do Ceará, próxima à divisa com o Estado do Piauí, distante 350 km da capital, com altitude de 750 metros e clima ameno, apresenta um potencial natural para as atividades de turismo e irrigação. No entanto, restrições de recursos hídricos que impediam o pleno desenvolvimento destas atividades levaram o Governo do Estado do Ceará, no início da década de 80, a construir a Barragem Jaburu I com uma capacidade de acumulação de 138 milhões de metros cúbicos.

A construção desta barragem possibilitou a instalação do Sistema Jaburu I, que incluindo a barragem, estação de tratamento de água, estação elevatória e adutora, desempenha um papel fundamental no abastecimento de água de nove municípios e quinze localidades.

A barragem foi construída no período 1981-1983, tendo o seu reservatório atingido, já em 1983, sua capacidade máxima. Desde então, esta obra tem apresentado problemas que têm requerido sucessivas intervenções objetivando a melhoria de suas condições estruturais e garantia de sua segurança.

Atualmente, a Barragem Jaburu I esta situada entre as prioridades mais elevadas quanto à necessidade de reparos para garantia da segurança das estruturas, dentro do programa de monitoramento de barragens da SRH/COGERH. A situação atual combinada com seu histórico de problemas e sua grande importância para a região da Serra da Ibiapaba aponta impreterível priorização de ações para a sua recuperação.

Esta condição levou à escolha do comportamento da fundação da Barragem Jaburu I como objeto de análise deste trabalho. Como base desta análise serão usadas às informações registradas pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH) das intervenções que objetivaram solucionar problemas de fuga de água pela fundação da Barragem Jaburu I desde o início de sua operação.

A falta de uma solução efetiva, apesar das diversas tentativas, que resultasse na estabilização das percolações pela fundação, demonstra a complexidade do problema. Este vem se agravando, inclusive com a ocorrência de processos de erosão e formação de cavidades a jusante do vertedouro. A crescente preocupação com esta importante barragem está exigindo uma atenção especial que resulte em um melhor entendimento do processo em

curso e em uma solução que atenda aos requisitos de controle da segurança das obras hídricas adotados pelo Estado do Ceará.

A segurança de barragens pode ser obtida tendo por base o trinômio: segurança estrutural, monitoramento e manutenção. Antecipando-se à União, o Governo do Estado do Ceará, através da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, preocupado com o estado de conservação de suas barragens, instituiu, a partir de 2002, os procedimentos de inspeções visuais formais (check-lists) com o propósito de avaliar os aspectos de segurança e operação das barragens.

Este instrumento passou a ser o principal indicador nas ações de recuperação das barragens do Estado. Assim, a Barragem Jaburu representa um caso clássico de segurança de barragens, quando associado a um monitoramento contínuo e medidas de recuperação implementadas.

No caso da Barragem Jaburu I a tomada de decisões para as intervenções com campanhas de tratamento de fundação foi sempre orientada pelo monitoramento dos medidores de descargas instalados a jusante da barragem. Quando os medidores acusavam resultados considerados críticos, inspeções específicas foram realizadas para melhor detalhar o nível de perigo da anomalia e a recuperação do trecho afetado. A pouca eficácia destas ações são apontadas pelo monitoramento que orientou a tomada de sucessivas intervenções.

O primeiro plano de recuperação da barragem, com vistas a reduzir as percolações pela fundação na ombreira esquerda, ocorreu no período de outubro de 1989 a fevereiro 1990, iniciando com um programa de injeções com cimento, que logo se mostrou ineficiente. O programa de tratamento apresentou resultados positivos com o uso de injeções com asfalto a quente, quando a descarga de 47 litros/segundo reduziu para 2,5 litros/segundo. Uma segunda intervenção de recuperação da barragem ocorreu em fevereiro de 1993, tendo como objetivo principal eliminar a percolação pela fundação, mais especificamente, na região a jusante da tomada de água, na margem direita da barragem.

A terceira ação de recuperação no complexo Jaburu I foi executada de fevereiro de 2002 a janeiro de 2003, tendo sido efetuados os seguintes serviços: reforço do tratamento da fundação da barragem; estabilização e drenagem da barragem; alteamento da crista da barragem; impermeabilização e estabilização do canal do vertedouro; instalação de piezômetros, marcos de nivelamento, marco de referência e medidores de vazão.

O quarto plano de recuperação realizado constou da execução de uma laje-tampão com extensão de 46 metros, no canal de aproximação do vertedouro, a montante da estrutura vertente, com objetivo de obturar as cavidades oriundas da subsidência do substrato rochoso arenítico.

O quinto programa de recuperação da barragem, vertedouro e tomada de água foi realizado de fevereiro a dezembro de 2010. Constou do tratamento da fundação na ombreira esquerda com o propósito de redução das fugas de água que estavam estabilizadas desde 1990.

As demais ações constaram dos seguintes serviços: execução de aterro hidráulico a montante da barragem; drenagem das percolações ao longo do pé da barragem e execução de medidores de vazão; estabilização dos taludes da tomada de água; levantamentos topográficos da barragem e topobatimétrico do reservatório; estudos hidrológicos; estudo preliminar do plano de ação emergencial e anteprojeto de recuperação do vertedouro.

A opção pelo estudo de caso advém da necessidade de se identificar e discutir meios técnicos difundidos na engenharia, que permitam a impermeabilização e consolidação da rocha da fundação de uma barragem assente em rocha sedimentar arenítica, tendo em vista a sua complexidade. Para tanto, o trabalho desenvolvido, além desta Introdução, está dividido em cinco capítulos apresentado a seguir:

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Capítulo III – Histórico das Anomalias

Capítulo IV – Campanhas de Recuperação e Resultados

Capítulo V – Conclusões e Recomendações

No Capítulo II está apresentada a revisão bibliográfica com a fundamentação teórica sobre fundação de barragem de terra e os mais importantes métodos de controle de percolação sob a barragem. Também são ressaltados, neste capítulo, os principais métodos de instrumentação em barragem através dos quais é permitido avaliar a evolução das redes de percolação pelo maciço e fundação das barragens. A segurança de barragens enfatizando a promulgação da Lei 12.334 de 2010 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de

Barragem e ações seguidas pelo Estado do Ceará, no atendimento a responsabilidade legal em manter as condições de segurança de suas barragens, também faz parte deste Capítulo.

O Capítulo III trata, especificamente, dos condicionantes e aspectos gerais da Barragem Jaburu I, incluindo as características da geologia local, histórico com foco no arranjo geral, o monitoramento, desempenho e análise da instrumentação e a descrição dos eventos observados, pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, desde o início da operação do sistema até os dias atuais. Tomando-se por base os acontecimentos registrados no segmento anterior, o Capítulo IV compreende a apresentação das metodologias adotadas nas campanhas de recuperação e intervenções realizadas na barragem, vertedouro e tomada de água.

Finalmente, no Capítulo V, são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho e feitas algumas sugestões/recomendações para complementação de estudos e intervenções futuras envolvendo a abordagem dos mecanismos de tratamento de rocha arenítica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está estruturado em três tópicos principais que abordam assuntos sobre sistemas de vedação em fundação, instrumentação e segurança de barragens, temas pesquisados na literatura nacional e internacional e reunidos nesta dissertação. O primeiro tema aborda os sistemas empregados no controle da percolação através da fundação de barragens de terra. O assunto seguinte trata, especificamente, sobre a conceituação de instrumentação de barragem e o terceiro tópico relata sobre a política de segurança de barragens e a promulgação da Lei 12.334/2010 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens.

2.1 Fundações de Barragens

Fundação de acordo com a CBDB (2010) é parte do leito de um vale que está sob a estrutura de uma barragem e a sustenta. Assim, a “fundação de uma barragem” envolve todo o substrato, seja ele rochoso ou não, que fica abaixo da barragem. Desde modo, subentende-se que tanto o talvegue quanto as encostas do vale a ser barrado e que ficarão subjacentes ao maciço, integram a fundação da barragem.

No sítio onde será construída uma barragem importam tanto a capa terrosa de recobrimento, assim como a superfície e subsuperfície da rocha. Na fase inicial dos estudos de um projeto devem ser determinados claramente o tipo litológico da rocha, os eventos tectônicos que afetaram a região com consequência diversificada na qualidade estrutural da rocha, o estado de alteração, a possibilidade de permitir fuga considerável de água, a chance de decomposição da rocha sob a ação das águas represadas e as possibilidades de fugas crescentes de água pela formação local.

Não raramente, durante a fase de investigações para realização do projeto, alguns aspectos geológico-geotécnicos da rocha da fundação não são observados, e só são conhecidos no momento da implantação das estruturas. O que leva a necessidade de adequações do projeto e, possivelmente, a intensificação dos tratamentos inicialmente previstos.

Todas as barragens de terra e enrocamento estão sujeitas à percolação pelo maciço, fundação e ombreiras. Por isto, o controle da percolação é necessário para prevenir subpressões excessivas, instabilidade do talude de jusante, “piping” através do maciço e/ou

fundação ou erosão de material através da migração por juntas abertas nas fundações e ombreiras (USACE, 1986).

Cruz (1996) defende que o ofício de projetar barragens está associado à arte de controlar o fluxo de água através do corpo e da fundação do maciço, evitando, assim, que o solo seja carregado pela água. Para este autor, a avaliação da quantidade de água de percolação que pode ser admitida pelo conjunto maciço-fundação é feita com base na finalidade da barragem. Barragens para controle de cheias ou para hidrelétricas não devem ser superior a 0,08 l/s por metro de barragem, e barragens para abastecimento de água e irrigação não devem ter vazão superior a 0,1% da média das vazões naturais. Estes valores são confirmados por Silveira (2006) que defende que vazões acima de 0,08 l/s/m são bastante elevadas e exigem a realização de tratamentos para redução das infiltrações.

Porto (2002) apud Oliveira.A.G.S (2008) pontificou que a vazão é uma grandeza de engenharia mais importante na avaliação da segurança de estruturas hidráulicas, isto porque infiltrações repentinas em fundações geram perguntas sem respostas imediatas, como: qual a origem da água de infiltração? A vazão é compatível com as hipóteses de projeto? Quais providências devem ser adotadas?

As características geotécnicas ideais para a fundação de uma barragem são: baixa permeabilidade, elevada resistência e baixa deformabilidade. Para Cruz (1996), maciços com “permeabilidade média” inferior a 5×10^{-4} cm/s não necessitam de tratamentos para redução da permeabilidade.

Para Gaioto (1992), a percolação de água é uma das preocupações primordiais dos especialistas envolvidos com projeto, construção e operação de barragens de terra, pois dela resultam as subpressões, perdas de resistências do solo por aumento da saturação e processos de erosão à jusante da barragem. Porém, é pouco provável uma barragem ficar apoiada sobre um maciço perfeitamente estanque.

Para Bordeaux (1979) numa barragem existe sempre um fluxo de água subterrânea que se manifesta sob quatro aspectos principais:

- a) vazão;
- b) gradiente de saída que condiciona a pressão hidrodinâmica suscetível de provocar a erosão interna do subsolo;

- c) pressões;
- d) ações físico-químicas.

Para este autor, é necessário garantir que essas quatro manifestações do fluxo subterrâneo sejam em níveis aceitáveis. Já que a vazão determina a perda d'água que condiciona a rentabilidade do aproveitamento, o gradiente e as subpressões são diretamente associados à segurança. E por outro lado, as ações físico-químicas podem causar efeitos prejudiciais em longo prazo.

Segundo Creager et al. (1945), a preparação, em solo, da fundação de uma barragem precisa atingir cinco propósitos:

- a) prover ampla capacidade de suporte;
- b) precaver contra deslizamentos;
- c) prevenir contra o excesso de percolação sob a barragem;
- d) prevenir contra “piping”; e
- e) prevenir contra a erosão hidráulica.

Como já dito acima, os projetos de mecanismos para o controle da percolação através da fundação têm com metas principais a diminuição da quantidade de percolação, a redução ou controle dos gradientes de saída e a minimização das subpressões. Sherard et al. (1963) e Assis et al. (2003) classificam os sistemas para o controle da percolação através das fundações de uma barragem pelo próprio efeito que têm sobre a percolação:

- a) sistemas que eliminam ou reduzem a percolação a valores desprezíveis através da construção de “barreiras impermeáveis completas” até o horizonte impermeável (ex.: trincheira de vedação total, parede diafragma e cortina de injeção);

b) sistemas que reduzem a percolação mediante a construção de uma “barreira impermeável incompleta” que aumenta o comprimento das linhas de fluxo, proporcionando o aumento da perda de carga e a redução das subpressões, de gradiente hidráulico e da vazão (ex.: trincheira de vedação parcial e tapete impermeável à montante); e

c) sistemas que apenas controlam a percolação mediante a construção de drenos. Este método é praticamente imprescindível e pode ser associado aos dois anteriores (ex.: trincheiras ou poços de alívio).

Segundo Cedergren (1989), dois ou mais mecanismos para controle da percolação são empregados em grandes barragens, principalmente quando estas são construídas sobre formações aluvionares profundas ou sobre formações rochosas extremamente fraturadas.

Os mais importantes sistemas empregados no controle da percolação através da fundação de barragens de terra, que serão descritos nos itens a seguir, são:

- a) trincheira de vedação;
- b) cortina de injeção;
- c) tapete impermeável à montante;
- d) parede diafragma; e
- e) controle por sistemas de drenagem.

2.1.1 *Trincheira de Vedação*

Este processo consiste na escavação de uma vala através das camadas mais superficiais da fundação, quando permeáveis, e seu posterior preenchimento por solo impermeável compactado nas mesmas condições do núcleo da barragem. É o processo mais eficaz para o controle da percolação através das fundações permeáveis de uma barragem de terra. A trincheira de vedação é o único método de controle de percolação pela fundação que proporciona a visualização prévia e completa das condições “in situ” do terreno subjacente à barragem (USACE, 2004).

Este processo é empregado em fundações de areia, em aluviões areno-argilosos com granulometria variável, em colúvios com condutividade hidráulica mais elevada que o material vedante da barragem e, também, em situação de fundações que apresentam descontinuidades permeáveis em solos residuais e saprolitos.

A trincheira de vedação pode ser total ou parcial, ou seja, ela pode transpor toda a camada permeável ou atravessar apenas parte da mesma. De acordo com Cruz (1996), a trincheira de vedação total é a única solução que pode ser considerada completamente eficiente, pois corta integralmente a feição permeável onde se deseja interromper o fluxo.

A trincheira de vedação normalmente fica situada no eixo da barragem ou um pouco a montante do mesmo, sendo o eixo da trincheira posicionado paralelamente ao eixo da barragem.

A execução de trincheiras apresenta as seguintes vantagens:

- a) permite o exame visual das paredes de escavação, assim como do fundo da trincheira;
- b) permite uma boa execução superficial da base da trincheira;
- c) permite o uso dos equipamentos convencionais de escavação e de terraplenagem;
- d) torna possível o preenchimento da trincheira com materiais selecionados, compactados sob controle tecnológico.

As trincheiras compactadas, de acordo com Bordeaux (1979) constituem uma solução economicamente vantajosa até a uma profundidade da ordem de 20 metros, além da qual o custo das mesmas aumenta rapidamente com a profundidade. É interessante notar que em fundações de barragens de grande altura já foram construídas trincheiras compactadas de até 50 metros de profundidade.

2.1.2 Cortina de Injeção

O tratamento por injeções do maciço terroso ou rochoso de fundação de uma barragem consiste em fazer introduzir nos poros, fraturas e descontinuidades do maciço determinadas substâncias aglomerantes, suscetíveis de endurecimento com o tempo,

normalmente com a finalidade de impermeabilizar ou consolidar a zona injetada. Este produto injetado, usualmente chamado de calda de injeção, é geralmente constituído por uma mistura fluida de água e cimento, podendo ser adicionados bentonita, areia, pozolana, asfalto, cal e outros produtos.

Para Cruz (1996), a cortina de injeção pode ser utilizada em maciços rochosos através da implantação de uma ou mais linhas de furos executados por meio de equipamento rotativo ou roto-percussivo, preenchidos por injeção de calda, geralmente de cimento. Nesta operação, busca-se dotar o maciço injetado de coeficiente de permeabilidade médio inferior a 10^{-4} cm/s.

De acordo com Cedergren (1989), apud Oliveira.A.G.S (2008) as cortinas de injeção não são totalmente simples e seguras, pois a calda de cimento não pode ser injetada em poros menores do que 1,0 mm. Para superar esse obstáculo, tem sido usada a injeção química que possui uma fluidez aproximadamente igual a da água.

Sousa e Malveira (2011) expõe que a barragem Tim Ford com 60 metros de altura, implantada em formação sedimentar, com fundação em calcário, apresentou percolações nas proximidades da ombreira esquerda, chegando a uma descarga de 500 litros/segundo. Neste caso, a metodologia adotada para a sua recuperação consistiu no tratamento com injeções de cimento com asfalto e cálcio, com a finalidade de impermeabilizar a fundação. Na barragem Twin Buttes apresenta-se outro exemplo semelhante, na qual foi injetada uma cortina utilizando solo-cimento e o resultado foi à redução considerável da permeabilidade da fundação.

Conforme Casagrande (1961), a aplicação da cortina de injeção com apenas uma linha de furos, sem drenagem, pode consistir em uma solução bastante insegura. Em um processo de controle da percolação composto de uma cortina de injeção e de uma linha de poços de drenagem, é preciso identificar as funções destes dois mecanismos, ou seja, a cortina tem a responsabilidade de controlar a vazão e a drenagem de aliviar a subpressão. Todavia, Casagrande (1961) justifica que não há como separar completamente estes dois efeitos. Para este autor, a diminuição da vazão obtida com a intervenção da cortina de injeção também diminui a subpressão à jusante da barragem.

Deste modo, o objetivo da cortina de injeção não é fechar a passagem do fluxo de água, mas proporcionar uma redução considerável da permeabilidade na área injetada de

forma a reduzir o fluxo a valores estimados que sejam admissíveis para um determinado projeto (Marsal et al., 1971).

2.1.3 Tapete Impermeável a Montante

Este método é empregado quando a espessura do material permeável possui grande profundidade tornando antieconômico levar a fundação da barragem ou a da seção estanque até a rocha impermeável. O tapete impermeável consiste, basicamente, em aumentar o caminho de percolação em fundações permeáveis através de um aterro compactado de solo de baixa permeabilidade executado a montante da barragem, cuja ação deve ser complementada com um sistema de drenagem à jusante.

Segundo Sherard (1967), a espessura e comprimento do tapete impermeável dependem do coeficiente de permeabilidade do material do tapete, da estratificação e da espessura da camada permeável da fundação e da carga hidráulica. Para USBR (1987) e Carvalho (1996) o comprimento e a espessura do tapete devem ser governados pela redução desejada na quantidade de água percolada pela fundação. O aumento do caminho de percolação permite basicamente:

- a) aliviar as poropressões na região a jusante da barragem;
- b) diminuir os gradientes de saída;
- c) reduzir as vazões ou perdas d'água.

Metodologias diversas têm sido adotadas para a determinação da extensão e das dimensões de tapetes impermeáveis, desde a proposição básica desenvolvida por Bennett em 1945, exposta sobre a forma de ábacos para a avaliação das vazões de percolação através da fundação permeável de uma barragem (Cruz, 1996; Saré, 2003).

Silva Filho (1991) determinou a relação entre o comprimento efetivo de um tapete retangular (comprimento ótimo) e um tapete triangular e concluiu que um tapete triangular é mais eficiente. Este autor propôs um roteiro de tratamento de fundações permeáveis com a utilização de tapetes a montante, particularmente para os vales do Nordeste brasileiro.

Bordeaux (1979) afirma que tapete impermeável, apesar de ser de princípio muito simples, pode conduzir a problemas gravíssimos, alertando que o projeto e a construção de

um tapete a montante são muito mais delicados e complexos do que pode parecer. Basta lembrar que na barragem de Torbela, o tapete impermeável de montante com 3.000 metros de extensão sofreu numerosas subsidências sob a forma de dolinas que permitiram que o fluxo subterrâneo atingisse uma vazão total de quase 5 m³/s.

Para conseguir uma maior eficiência deste sistema, é necessário que o mesmo seja muito menos permeável que a fundação e se estenda suficientemente para montante para reduzir às pressões a jusante. Estas pressões são inversamente proporcionais ao comprimento do caminho de percolação. De acordo com Cruz (1996), a permeabilidade não deve ser superior a 10⁻⁵ cm/s.

2.1.4 Parede Diafragma

A parede diafragma consiste na escavação de uma vala com emprego de equipamentos e ferramentas de escavação apropriadas (“clamshell”), e posterior preenchimento da vala com calda de cimento e bentonita, misturas de solo e cimento ou solo, cimento e bentonita e até mesmo concreto. Segundo Cruz (1996) e Gaioto (2003), a parede diafragma pode ser rígida, plástica, em colunas injetadas ou em colunas secantes de concreto, e devem ser construídas sob a zona do núcleo das barragens.

A escavação e o preenchimento da vala são feitos por painéis verticais alternados. As paredes construídas com calda de cimento e bentonita ou misturas de solo e cimento são chamadas de diafragmas plásticos e aqueles preenchidos com concreto são denominados de diafragmas rígidos.

Os diafragmas plásticos apresentam a vantagem de serem mais deformáveis que os diafragmas rígidos, que, por recalques diferenciais, podem provocar fissuras ou trincas no contato aterra acima do topo da parede, comprometendo, assim, a estanqueidade desejada. A execução dos diafragmas só se torna eficaz se a rocha subjacente for impermeável ou se o tratamento penetrar 1 a 2 metros em uma camada de baixa permeabilidade, com coeficiente de permeabilidade pelo menos 10 a 100 vezes menor do que o coeficiente de permeabilidade da areia (Cruz, 1996).

Casagrande (1961) comenta que o sucesso das paredes diafragmas depende da obtenção de um alto grau de perfeição do elemento, de um bom engaste na base do diafragma com a camada impermeável e uma união firme e permanente com a zona impermeável no

topo do diafragma. Pequenas aberturas nestes elementos, na base ou no topo podem conduzir em um grande fluxo de água, reduzindo notadamente a sua eficiência.

Cruz (1996) relata que a execução de um diafragma plástico na barragem de Saracuruna mostrou-se efetivo no controle da percolação pela fundação. O autor também narra que diafragmas plásticos foram empregados como vedações preliminares nas barragens de Tucuruí e Ponte Nova, para permitir a escavação das trincheiras de vedação procedidas em solo compactado. No entanto, o diafragma plástico previsto para as fundações na camada aluvionar da barragem de Porto Primavera foi rejeitado porque foi analisado que o mesmo seria pouco eficiente no controle e diminuição das vazões, tendo em vista a elevada condutividade hidráulica dos arenitos e basaltos subjacentes ao aluvião.

2.1.5 Controle por Sistemas de Drenagem

Os sistemas de drenagem constituem o principal resguardo contra fluxos concentrados e preferenciais através de um maciço de solo. Estes sistemas têm por objetivo regularizar a saída do fluxo, tanto da fundação com da própria barragem, aliviando as pressões e disciplinando seu movimento para jusante da barragem. Cruz (1996) afirma que o sistema de drenagem das fundações é de fundamental importância no controle do fluxo e a vedação deve ser considerada como “uma segunda linha de defesa”, e em nenhum caso como a única linha de defesa.

De acordo com Bordeaux (1979), as características geológicas e geotécnicas da fundação comumente avaliadas através da análise interpretativa, mesmo que cuidadosa de intensivas investigações de campo e de ensaios de laboratório, sempre corre o risco de não se descobrir anomalias pelas quais poderiam ocorrer fluxos preferenciais indesejáveis. Essas incertezas relativas às condições de fundações, mesmo quando bem investigadas, se refletem através da preocupação da maioria dos projetistas, o que muitas vezes os leva a adicionarem ao projeto original sistemas de defesa adicionais tais como poços de alívio e (ou) bermas de reforço. O autor também reconhece que a vazão pelas fundações permeáveis de uma barragem de terra representa 99% do fluxo percolado, sendo que apenas 1% ocorreria pelo seu maciço.

Quando fundações permeáveis são sobrepostas por camadas menos permeáveis com espessuras expressivas que impedem a construção de trincheiras drenantes, geralmente é aconselhável a execução de poços de alívio, de modo a garantir o alívio das subpressões nas zonas permeáveis mais profundas da fundação. A água drenada pelos poços é conduzida para

um sistema coletor onde são realizadas as medições e o monitoramento das vazões percoladas.

A eficácia do método de poços de alívio é função principalmente do comprimento da zona drenante que penetra na camada permeável (USACE, 1986). Esta solução foi aplicada pioneiramente na Barragem de Arkabutá (Mississippi, EUA, 1940) e, desde então, tem sido adotada em centenas de projetos de barragens em todo o mundo, assente em camadas permeáveis superpostas por outras de menor condutividade hidráulica.

Quando esses sistemas são aplicados em barragens assentes em fundações rochosas, os drenos são executados de forma a interceptar as descontinuidades mais permeáveis do maciço da fundação. No caso de uma barragem rígida, a drenagem da água que flui pelas fraturas, alivia a pressão hidráulica que seria aplicada na sua base. Os poços de alívio também são aplicados com grande sucesso em fundações arenosas de barragens de terra.

As bermas drenantes podem ser usadas no controle eficiente da percolação através da fundação de uma barragem quando se tem a jusante da mesma, uma camada superior menos permeável que a fundação, relativamente delgada e uniforme ou mesmo quando não existe tal camada (USACE, 2004). Trata-se de um aterro de material granular, colocado na forma de filtro invertido, disposto junto ao pé do talude de jusante da barragem que tende a combater os fenômenos de liquefação e o levantamento do fundo.

O filtro invertido atua fundamentalmente como uma estrutura que agrega um aumento de peso sobre o solo de fundação e, por ser permeável, propicia a redução dos gradientes hidráulicos de saída. Esta solução pode ser também aplicada complementando sistemas com tapete de impermeabilização a montante e poços de alívio. Ou ainda quando se demonstrar necessária, após o primeiro enchimento do reservatório, para regularizar a saída de fluxos de água que venham a ocorrer.

2.2 Instrumentação

A segurança de uma barragem esta diretamente relacionada a um conjunto de ações que reúne projeto, construção, instrumentação/inspeção, operação e manutenção. O desenvolvimento do projeto de uma barragem e de suas estruturas anexas é, sem dúvida, uma

das fases mais importantes, uma vez que um projeto bem concebido é a base para certificar uma obra tecnicamente segura, sem dispensar, obviamente, de uma operação e manutenção cuidadosas.

De acordo com Cruz (1996), apesar de instrumentação não constituir a solução para todos os problemas, é inegável a sua utilidade quando convenientemente projetada, instalada e interpretada, não só para a avaliação das condições de segurança de um empreendimento, em todas as suas fases, mas também para verificação das hipóteses adotadas em projetos, com objetivo principal de tornar as obras mais econômicas, dentro das necessárias condições de segurança.

No período da vida útil da barragem, são indispensáveis obras periódicas de manutenção com o objetivo de manter o bom estado das suas estruturas, garantir superfícies hidráulicas satisfatórias e assegurar a operacionalidade dos equipamentos eletromecânicos e dos instrumentos de auscultação.

2.2.1 Sistema de Instrumentação

A implantação de um sistema de instrumentação e monitoramento em uma barragem de terra tem como objetivos principais: admitir a avaliação das condições de segurança da barragem, examinar o desempenho da obra na fase de operação, e a confirmação dos critérios, hipóteses e parâmetros adotados durante a elaboração do projeto executivo (Cruz, 1996).

Segundo ICOLD (1989), o tipo de monitoramento necessário, a frequência de medidas ou observações e a escolha dos instrumentos a serem instalados dependem do tamanho e características da barragem em estudo, do tempo de operação, da existência de anomalias, das hipóteses de projeto, da qualidade da construção, etc. De modo geral, a instrumentação deverá ser selecionada observando-se os seguintes cuidados, segundo Silveira (2006):

- a) Os instrumentos devem ser confiáveis, de longa duração, de fácil acesso e substituíveis;
- b) Os dispositivos de medição devem ter sensibilidade para detectar pequenas variações nas grandezas monitoradas, tornando possível antecipar o desenvolvimento de anomalias;

c) Os procedimentos de leitura devem ser simples, de modo a permitir que sejam diretamente realizadas por equipes de campo, dispensando a mobilização de técnicos especializados para manutenção do monitoramento.

Entretanto, segundo Cruz (1996), há algumas limitações associadas à prática de instrumentação de barragens, tais como:

- a) Obtenção de leituras inconsistentes em instrumentos, consequência de dificuldades no processo de instalação (particularmente na medição de tensões);
- b) Susceptibilidade dos instrumentos a danos irreparáveis, ocasionados por pequenos deslocamentos relativos ao longo de uma superfície de cisalhamento;
- c) Dificuldades de interpretação de leituras inesperadas (muitas vezes o instrumento erroneamente considerado defeituoso);
- d) Inexistência de parâmetros ou critérios de projeto que permitam a avaliação dos resultados obtidos em campo, etc.

Esse mesmo autor ainda destaca que, tendo em vista o fato de que nem mesmo os melhores instrumentos são capazes de identificar algumas anomalias importantes, tais como a ocorrência de surgências e trincas ou fissuras no maciço, o monitoramento de uma barragem deve ser complementado por inspeções visuais de rotina, que normalmente são realizadas por profissionais familiarizados com o histórico do empreendimento.

Portanto, informações e dados obtidos sobre percolação em inspeções visuais, normalmente, constituem uma das mais importantes indicações do desempenho de uma barragem de terra durante a fase de operação. Assim, por exemplo, as características e variações de fluxo que emerge a jusante de um barramento são possíveis de identificar problemas ainda em processo de desenvolvimento, particularmente em áreas propensas a erosões internas, como o corpo da barragem e as ombreiras.

As inspeções de rotina constituem uma ação fundamental na segurança da barragem, principalmente quando o fluxo está associado a aumentos repentinos de vazão, com forte coloração de água, com indícios de carreamento de partículas sólidas indicando ocorrência de erosão interna, exigindo adoção de medidas ou intervenções em caráter emergencial.

A verificação das características do fluxo a jusante de uma barragem é geralmente efetuada em concomitância com o registro de medidas de vazão e pode prover informações tão precisas quanto às obtidas por intermédio de instrumentação convencional. Tais medidas de vazão são geralmente realizadas através da execução de câmaras com vertedores localizadas a jusante da barragem, as quais são instaladas para captação e coleta de águas provenientes de pontos de surgências.

No caso de obras construídas sobre fundações permeáveis, torna-se muitas vezes impraticável, a realização de tais medidas, de forma confiável, e nesses casos, recorre-se ao uso de piezômetros instalados no aterro ou fundação, os quais podem proporcionar indicações importantes acerca de problemas de percolação em desenvolvimento (Fell et al., 1992).

De acordo com Dunnicliff (1988), os tipos de instrumentos mais usualmente executados em barragens de terra e enrocamento são:

- a) Marcos de superfície para medição de recalques e deslocamentos horizontais;
- b) Piezômetros e medidores de vazão;
- c) Instrumentos internos de medição de recalques na fundação e aterro da barragem;
- d) Instrumentos internos de medição de deslocamentos horizontais no maciço de terra compactada;
- e) Células de tensão total.

Apesar das restrições, o auxílio da instrumentação, quando aplicado e interpretado adequadamente, informa ao proprietário do empreendimento dados importantes a respeito dos deslocamentos e poropressões produzidos após o enchimento do reservatório, assim como, permite um exame comparativo entre valores medidos e quantificados e os previstos na fase de projeto durante os estudos de dimensionamento. Propicia ainda, o conhecimento de anomalias não previstas, que porventura possam aparecer ao longo da vida útil da barragem, gerando informações e conclusões de grande importância na adoção de medidas corretivas.

2.3 Segurança de Barragens

No circuito mundial, dentre os mais consideráveis organismos que dedicam atenção especial ao tema segurança de barragens encontra-se o Bureau of Reclamation do Departamento do Interior do Governo dos Estados Unidos da América. Defronte dos inúmeros incidentes narrados e o crescente número de novas barragens, a International Commission on Large Dams (ICOLD), órgão responsável pela política de desenvolvimento tecnológico sobre segurança de engenharia de barragens decidiu, no final da década de 70, investir em um programa de segurança de barragens, em nível mundial.

Esta ação do meio técnico cooperou, fortemente, para uma perspicaz revisão da legislação específica para segurança e inspeção de barragens em vários países. No Brasil, o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), é o órgão que reúne capacitação para tratar desta ação (Bureau Of Reclamation, Danver, CO, U.S.A.;1987).

Um informativo do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBDB), no ano de 1994, alertava aos interessados sobre a relação existente entre os acidentes verificados em barragens e os critérios de segurança exigidos. O anúncio prescrevia a necessidade de uma imediata regulamentação do assunto, através da criação de um Programa Nacional de Segurança de Barragens (CBDB, 1994, apud Menescal, 2009).

O esforço do meio técnico-científico para obtenção de solução definitiva para problemas que envolvem a fiscalização, a operação e a construção de barragens foi regulamentado no Brasil com a Lei nº 12.334/2010 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Objetivando garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, prescrevendo ao empreendedor a responsabilidade legal pela segurança da barragem, cabendo a este a elaboração de medidas corretivas, preventivas e mitigadoras.

Todavia, o Estado do Ceará, através da COGERH, órgão gestor do sistema de recursos hídricos, independente de legislação específica, adotou na sua cultura desde 2002 a realização de inspeções regulares nas barragens monitoradas, ações estas que constam nas exigências da Lei 12.334/2010.

As informações coletadas nestas inspeções, após tratamentos estatísticos adequados, passaram a compor o Relatório Anual de Segurança de Barragens – Riscos e Inspeções (RASB), editado a partir de 2006. Este instrumento passou a ser o principal

indicador nas ações de recuperações e correções nas barragens estaduais, com a finalidade de garantir os padrões mínimos de segurança necessários.

Segundo o Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções (COGERH 2012) 76 barragens foram analisadas através de inspeções formais com aplicação de check-list, nas quais as anomalias foram registradas, quantificadas e classificadas de acordo com o Nível de Perigo da Barragem – NPB (Fontenelle, 2007). Destas somente a barragem Jaburu I obteve classificação máxima quanto a prioridade de intervenção.

A Agência Nacional de Águas é o agente fiscalizador da barragem Jaburu, que tem como empreendedor a Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará. Baseado nas boas práticas de gestão de segurança adotadas internacionalmente, a Lei 12.334/2010 criou uma série de obrigações para os empreendedores, com vistas à implementação de um efetivo sistema de gestão de segurança de barragens, tais como:

- a) Elaborar o Plano de Segurança de Barragens e o Plano de Ação de Emergência (art. 8º);
- b) Realizar Inspeções de Segurança Regular e Especial (art. 9º); e
- c) Realizar a Revisão Periódica de Segurança de Barragem (art. 10º).

A promulgação da referida Lei veio fechar uma lacuna na definição de responsabilidades, seja de manter as condições de segurança das barragens, seja de fiscalizar a implementação das melhores práticas em segurança, que foram incorporadas aos instrumentos desta Lei.

3 HISTÓRICO DAS ANOMALIAS

Neste capítulo são apresentados os condicionantes e aspectos gerais da Barragem Jaburu I, incluindo as características da geologia local, histórico com foco no arranjo geral, os instrumentos instalados, bem como os resultados do monitoramento feito neste período e a descrição dos eventos observados pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, desde o início da operação da barragem até os dias atuais.

3.1 Geologia do Sítio

A barragem Jaburu I está localizada na vertente nordeste da serra da Ibiapaba, em região de topografia acidentada formada por morros com encostas relativamente íngremes, em área de ocorrência dos arenitos siluro-devonianos da Formação Serra Grande que compõe a Bacia Sedimentar do Parnaíba. Ela barra o rio Jaburu, que desde sua nascente corre em vale com constante mudança de direção, encaixado e profundo inserido em substrato rochoso predominantemente formado por arenito intensamente fraturado.

Na área onde a barragem está assentada, a litologia compreende, predominantemente, rocha arenítica de coloração clara, intercalada por níveis de siltitos e estratos caulíníticos sub-horizontais distribuídos em diversos níveis. O substrato rochoso arenítico apresenta-se extremamente diaclasado, com granulometria média a fina, em parte feldspáticos, coloração vermelho-amarelada e presença marcante de intenso fraturamento.

A ocorrência de fraturas horizontais e sub-horizontais que seguem o acamamento dos arenitos, provavelmente causadas por alívio de pressão ou dissolução de níveis siltíticos/caulínicos intercalados, certamente favoreceu o surgimento de caminhos preferenciais de percolação. Tais estruturas apresentam-se frequentemente abertas, planares, com oxidação nas paredes e vestígios de circulação de água.

O exame do canal de restituição do vertedouro reforça estas considerações, pois o intenso fraturamento nos arenitos que compõem a área, com forte indício de percolações nas fraturas abertas, associado ao acamamento da rocha, têm possibilitado erosões acentuadas e subsidência de blocos aproveitando os planos de fraqueza. Ocorre, ainda, a presença de planos de falha com belas exposições, Figura 3.1, pela erosão da percolação da água, de espelhos de falhas associados ao regime rúptil.

Figura 3.1 - Presença de erosão com exposição dos espelhos de falha

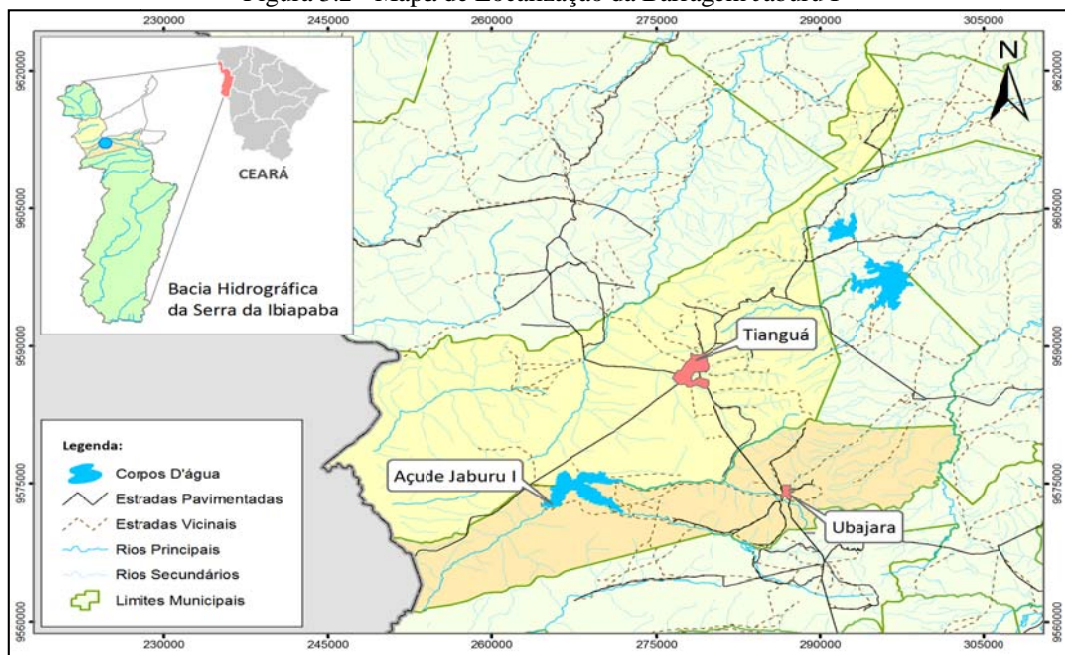


Fonte: Cogerh (2012) Fotos da Inspeção realizada em 22/07/2012

3.2 Arranjo Geral

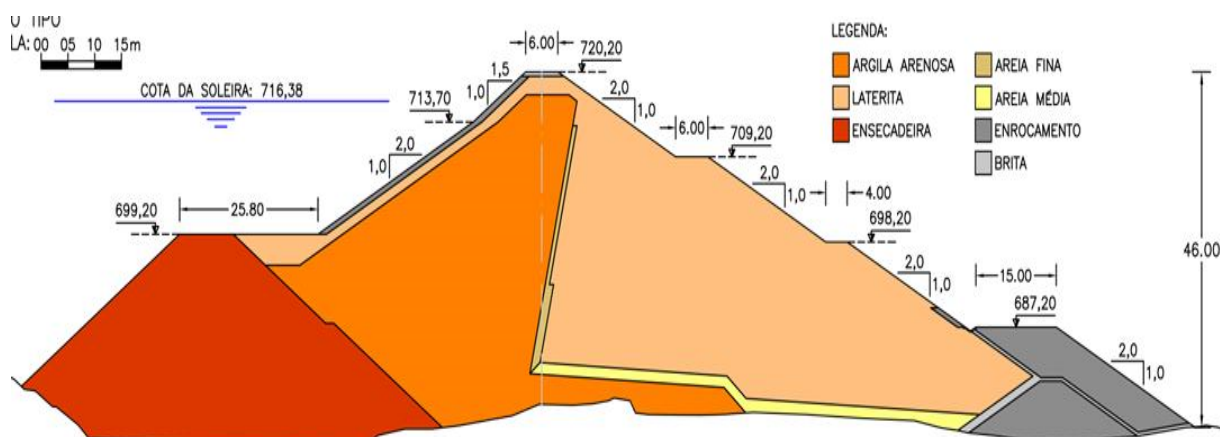
A barragem Jaburu I está localizada a cerca de 25 km a sudoeste da cidade de Tianguá e aproximadamente 350 km de Fortaleza-CE, como apresenta a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Mapa de Localização da Barragem Jaburu I



A barragem é de terra zoneada com núcleo em areia argilosa e espaldar de jusante em solo do tipo laterita, com crista na cota 720,20 m com 6 m de largura, extensão de 770 m e 46 m de altura. Como pode ser visto na Figura 3.3, o talude de montante possui inclinação 1,5:1,0 e 2:1, respectivamente acima e abaixo da cota (713,70), com uma berma de 25,80 m de largura na cota 699,20, correspondente a ensecadeira que foi incorporada ao maciço.

Figura 3.3 - Seção Tipo da Barragem Jaburu I



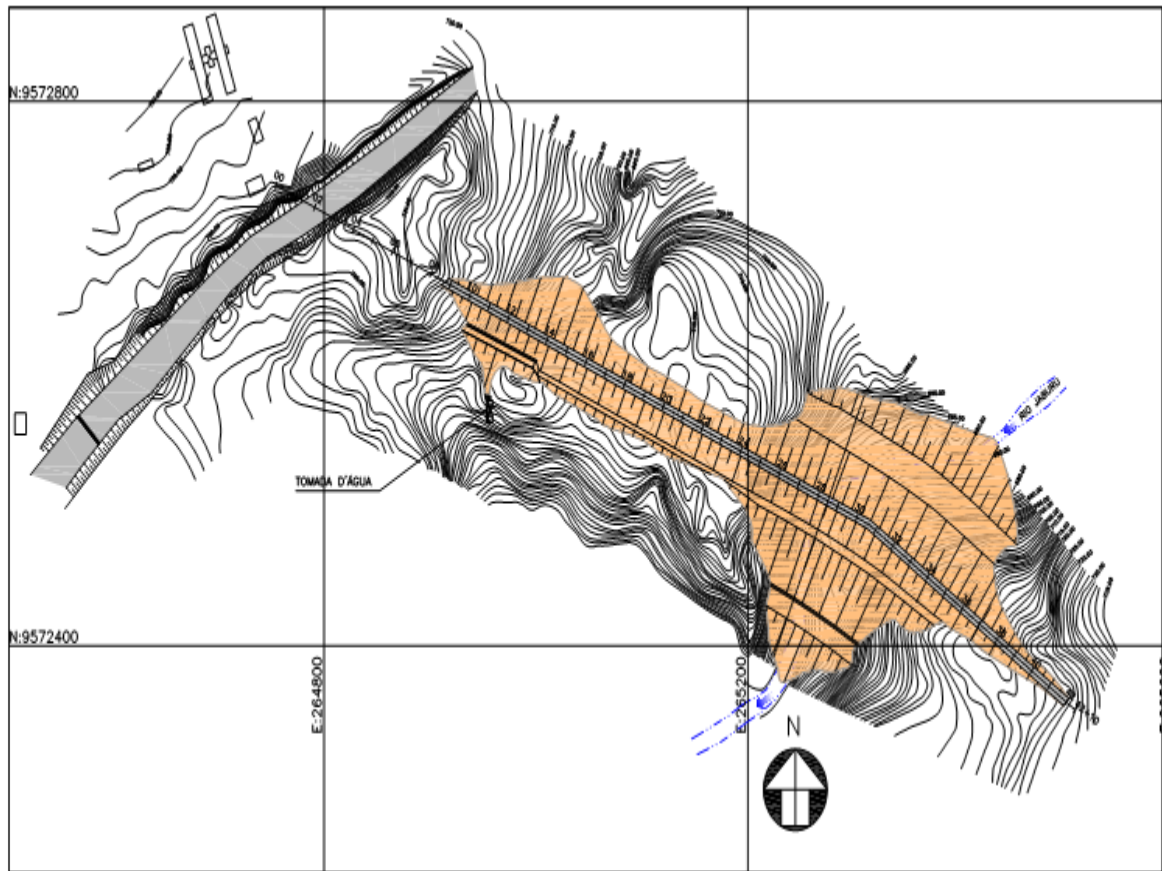
Fonte: Cogerh (2010) – Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – TOMO I

O talude de jusante tem inclinação de 2:1 com uma berma na cota 709,20 com 6,0 m de largura, outra na cota 698,20 com 4,0 m de largura e um enrocamento de pé (“rock-fill”) com 15,0 m de largura e 14,0 m de altura a partir da cota 687,20 até o terreno natural. O sistema de drenagem interna projetado consiste de drenos verticais e horizontais que descarregam no enrocamento de pé. Superficialmente, este talude é protegido por gramínea natural.

A barragem se estende por dois vales separados por um morro, ficando a esquerda o vale principal e a direita o secundário. Neste vale secundário, está a tomada de água, do tipo galeria, formada por uma tubulação de 600 mm, envelopada em concreto, com dois registros instalados a jusante, em série. O primeiro tem a função de bloqueio (registro de montante) para fins de manutenção e o outro de descarga/regulagem posicionado mais a jusante. A barragem não possui descarregador de fundo como pode ser observado na Figura 3.4, onde é apresentado o arranjo geral que permite a visualização das características básicas do projeto.

O vertedouro implantado na ombreira direita do vale secundário fica separado do corpo da barragem, portanto sem interferência com o aterro da barragem. É constituído por um canal de aproximação escavado em rocha arenítica com 450 m de extensão, uma seção de controle das vazões, com 25 m de largura, capaz de descarregar a vazão de 239,7 m³/s (TR=1000 anos) com uma lâmina de 2,72 m e um canal de restituição também escavado em rocha com 100 m de extensão.

Figura 3.4 – Arranjo Geral da Barragem Jaburu I

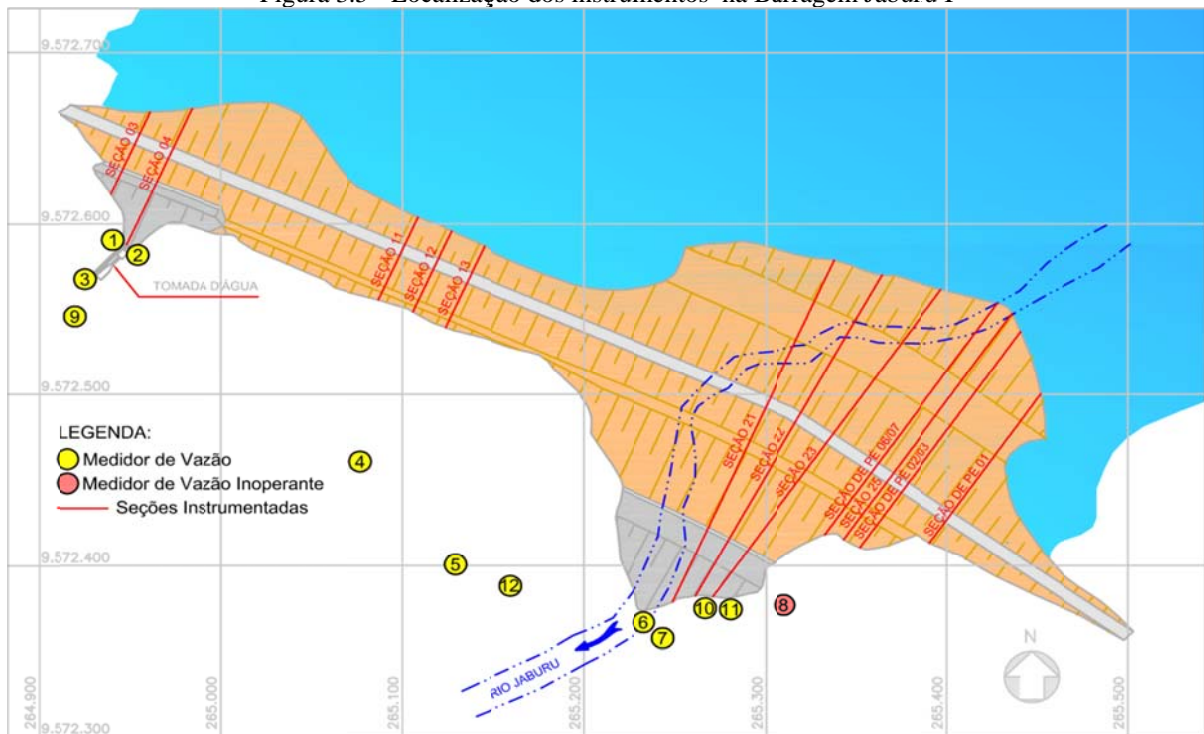


Fonte: Cogerh (2010) - Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – TOMO I

3.3 Ferramentas de Instrumentação da Barragem Jaburu I

A indicação da instalação de instrumentos na barragem Jaburu I ocorreu no momento do primeiro evento anômalo registrado, com a colocação de piezômetros para acompanhar as condições de poropressão e delineamento das camadas saturadas, assim como a instalação de medidores de vazão para medição do fluxo percolado pela fundação e maciço. A Figura 3.5 apresenta a localização dos instrumentos na barragem Jaburu I.

Figura 3.5 - Localização dos instrumentos na Barragem Jaburu I



Fonte: Adaptado do Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I (2010) TOMO I

A barragem Jaburu I dispõe para seu monitoramento (COGERH 2010) 11 medidores de vazão triangulares e mistos, implantados em quatro campanhas de recuperação e uma bateria de 65 piezômetros, do tipo tubo aberto, instalados no maciço compactado e em sua fundação rochosa distribuídos em 12 seções ao longo da barragem.

A Tabela 3.1 apresenta os elementos básicos dos medidores de vazão e as Tabelas 3.2 e 3.3 mostram os piezômetros instalados. Nas duas primeiras campanhas de recuperação foram implantados 27 unidades de piezômetros, sendo que destes, atualmente 3 se encontram inoperantes e 38 foram instalados na reabilitação realizada em 2003.

Tabela 3.1 - Situação dos medidores de vazão

Medidor de Vazão	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota do Topo da Caixa (m)
Medidor 01	264.962,57	9.572.570,18	695,00
Medidor 02	264.963,36	9.572.569,45	695,00
Medidor 03	264.947,29	9.572.553,38	695,00
Medidor 04	265.074,99	9.572.456,22	682,07
Medidor 05	265.124,93	9.572.400,86	674,00
Medidor 06	265.236,52	9.572.364,29	673,13
Medidor 07	265.236,95	9.572.363,54	673,13
Medidor 08		DESTRUÍDO	
Medidor 09	264.918,11	9.572.542,40	696,41
Medidor 10	265.267,76	9.572.365,67	677,43
Medidor 11	265.268,56	9.572.365,48	677,43
Medidor 12	265.158,72	9.572.388,51	674,27

Fonte: Cogeh (2010)

Tabela 3.2 - Elementos básicos dos piezômetros das seções 03, 04, 11, 12, 13, 21 e 22

Piezômetro	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota do Topo (m)	Cota da Base (m)	Profundidade (m)
SEÇÃO 03					
PZ.3.1.1	264.974,60	9.572.636,96	720,2	702,83	17,37
PZ.3.1.2	264.974,60	9.572.636,96	720,2	690,45	29,75
PZ.3.2.1	264.969,95	9.572.625,75	717,12	707,49	9,63
PZ.3.2.2	264.969,95	9.572.625,75	717,12	696,71	20,41
PZ.3.2.3	264.969,95	9.572.625,75	717,12	689,75	27,37
PZ.3.3.1	264.954,32	9.572.593,73	703,9	697,84	6,06
PZ.3.3.2	264.954,32	9.572.593,73	703,9	690,59	13,31
SEÇÃO 04					
PZ.4.2.1	264.983,44	9.572.608,85	712,59	699	13,59
PZ.4.2.2	264.983,44	9.572.608,85	712,59	691	21,59
SEÇÃO 11					
PZ.11.2.1	265.097,58	9.572.524,02	705,13	698,97	6,16
PZ.11.2.2	265.097,58	9.572.524,02	705,13	692,89	12,24
SEÇÃO 12					
PZ.12.1.1	265.132,69	9.572.549,71	716,89	708,07	8,82
PZ.12.1.2	265.132,69	9.572.549,71	716,89	700,54	16,35
PZ.12.1.3	265.132,69	9.572.549,71	716,89	693,49	23,4
PZ.12.2.1	265.117,91	9.572.520,87	705,7	699,7	6
PZ.12.2.2	265.117,91	9.572.520,87	705,7	694,62	11,08
SEÇÃO 13					
PZ.13.2.1	265.134,77	9.572.513,47	706,93	699,03	7,9
PZ.13.2.2	265.134,77	9.572.513,47	706,93	693,55	13,38
SEÇÃO 21					
PZ.21.1.1	265.287,79	9.572.459,07	709,2	Piezômetro obstruído	
PZ.21.1.2	265.287,79	9.572.459,07	709,2	Piezômetro obstruído	
PZ.21.1.3	265.287,79	9.572.459,07	709,2	Piezômetro obstruído	
PZ.21.2.1	265.275,90	9.572.432,96	698,2	Piezômetro obstruído	
PZ.21.2.2	265.275,90	9.572.432,96	698,2	689,16	9,04
PZ.21.2.3	265.275,90	9.572.432,96	698,2	668,2	30
PZ.21.3.1	265.268,84	9.572.417,31	690,6	679,28	11,32
PZ.21.3.2	265.268,84	9.572.417,31	690,6	674,41	16,19
PZ.21.3.3	265.268,84	9.572.417,31	690,6	666,83	23,77
SEÇÃO 22					
PZ.22.1.1	265.304,83	9.572.450,41	709,2	682,78	26,42
PZ.22.1.2	265.304,83	9.572.450,41	709,2	676,03	33,17
PZ.22.1.3	265.304,83	9.572.450,41	709,2	666,48	42,72
PZ.22.2.1	265.291,43	9.572.424,50	698,2	684,6	13,6
PZ.22.2.2	265.291,43	9.572.424,50	698,2	666	32,2
PZ.22.2.3	265.291,43	9.572.424,50	698,2	677,58	20,62
PZ.22.3.1	265.284,39	9.572.412,64	690,6	682	8,6
PZ.22.3.2	265.284,39	9.572.412,64	690,6	675,32	15,28
PZ.22.3.3	265.284,39	9.572.412,64	690,6	676,72	13,88

Fonte: Cogeh (2010).

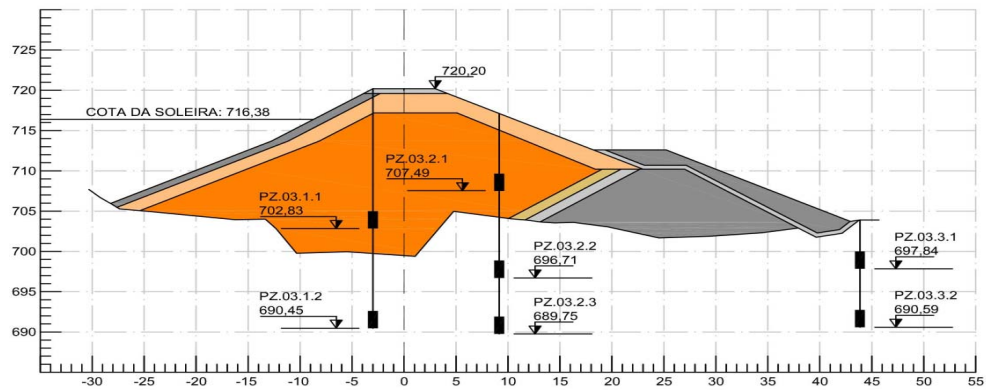
Tabela 3.3 - Elementos básicos dos piezômetros das seções 23, 25 e PE 01, 02, 03, 06 e 07

Piezômetro	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota do Topo (m)	Cota da Base (m)	Profundidade (m)
SEÇÃO 23					
PZ.23.1.1	265.320,80	9.572.439,38	709,20	687,63	21,57
PZ.23.1.2	265.320,80	9.572.439,38	709,20	678,36	30,84
PZ.23.1.3	265.320,80	9.572.439,38	709,20	669,20	40,00
PZ.23.2.1	265.308,12	9.572.414,56	698,20	686,04	12,16
PZ.23.2.2	265.308,12	9.572.414,56	698,20	680,54	17,66
PZ.23.2.3	265.308,12	9.572.414,56	698,20	671,16	27,04
PZ.23.3.1	265.299,50	9.572.399,67	690,60	682,14	8,46
PZ.23.3.2	265.299,50	9.572.399,67	690,60	678,50	12,10
PZ.23.3.3	265.299,50	9.572.399,67	690,6	670,42	20,18
SEÇÃO 25					
PZ.25.1.1	265.360,11	9.572.430,98	715,37	698,41	16,96
PZ.25.1.2	265.360,11	9.572.430,98	715,37	690,11	25,26
PZ.25.1.3	265.360,11	9.572.430,98	715,37	693,94	21,43
PZ.25.2.1	265.352,02	9.572.420,45	709,20	700,80	8,40
PZ.25.2.2	265.352,02	9.572.420,45	709,20	695,33	13,87
PZ.25.2.3	265.352,02	9.572.420,45	709,20	688,24	20,96
PZ.25.3.1	265.328,04	9.572.389,44	695,55	686,41	9,14
PZ.25.3.2	265.328,04	9.572.389,44	695,55	679,61	15,94
PZ.25.3.3	265.328,04	9.572.389,44	695,55	671,55	24,00
PE 01					
PE.1.1	265.379,94	9.572.404,71	710,03	700,97	9,06
PE.1.2	265.379,94	9.572.404,71	710,03	692,87	17,16
PE.1.3	265.379,94	9.572.404,71	710,03	683,92	26,11
PE 02					
PE.2.1	265.338,24	9.572.384,97	699,78	691,18	8,60
PE.2.2	265.338,24	9.572.384,97	699,78	679,03	20,75
PE 03					
PE.3.1	265.323,16	9.572.362,86	698,68	688,10	10,58
PE.3.2	265.323,16	9.572.362,86	698,68	677,63	21,05
PE 06					
PE.6.1	265.324,54	9.572.390,37	694,46	682,05	12,41
PE.6.2	265.324,54	9.572.390,37	694,46	677,11	17,35
PE 07					
PE.7.1	265.311,55	9.572.369,92	692,83	684,38	8,45
PE.7.2	265.311,55	9.572.369,92	692,83	673,51	19,32

Fonte: Cogerh (2010).

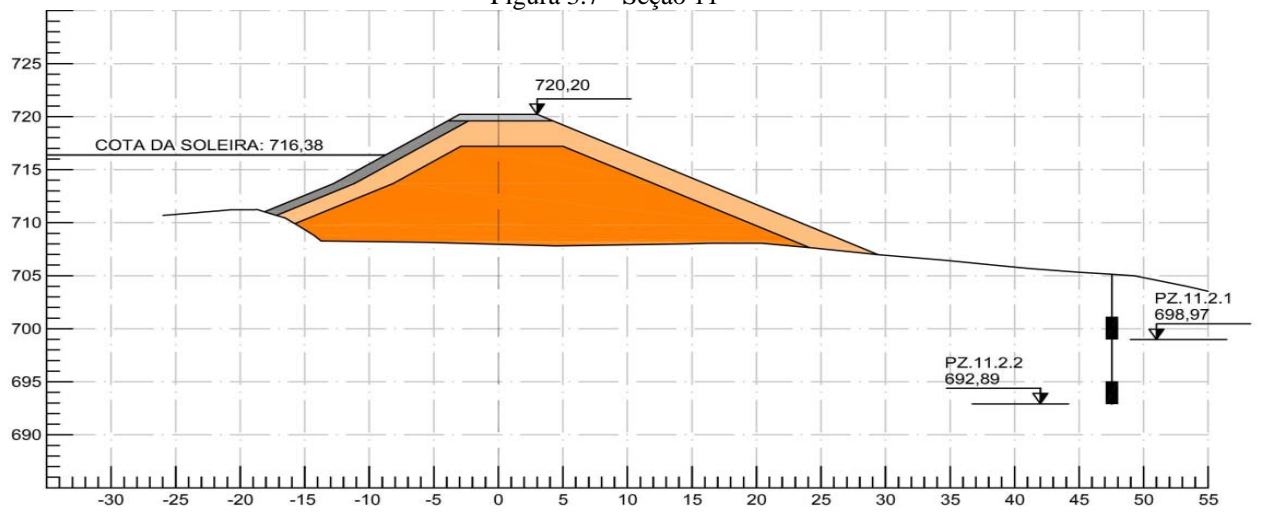
As Figuras 3.6 a 3.15 mostram as seções transversais do maciço de terra compactada e o posicionamento dos piezômetros.

Figura 3.6 - Seção 03



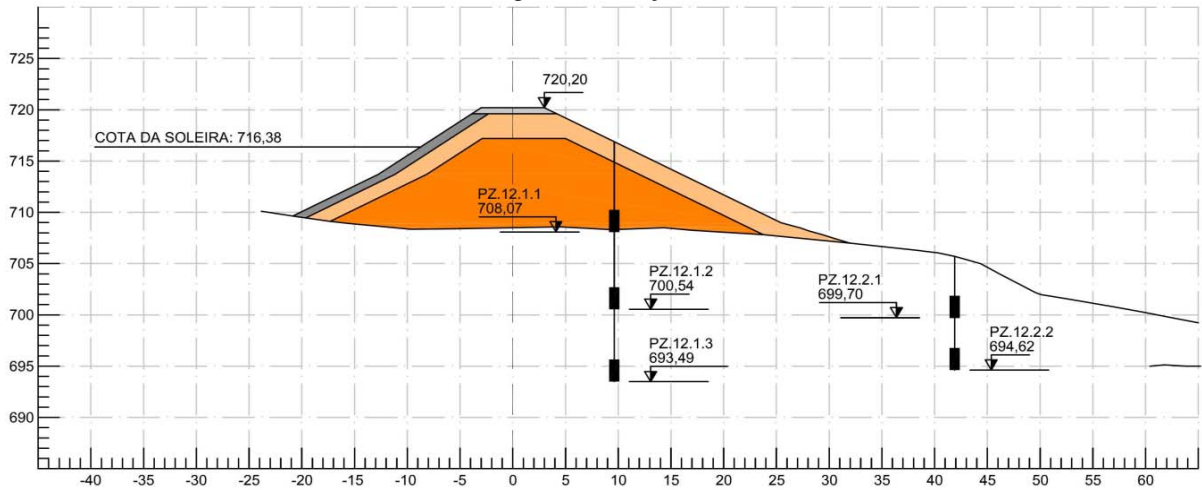
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.7 - Seção 11



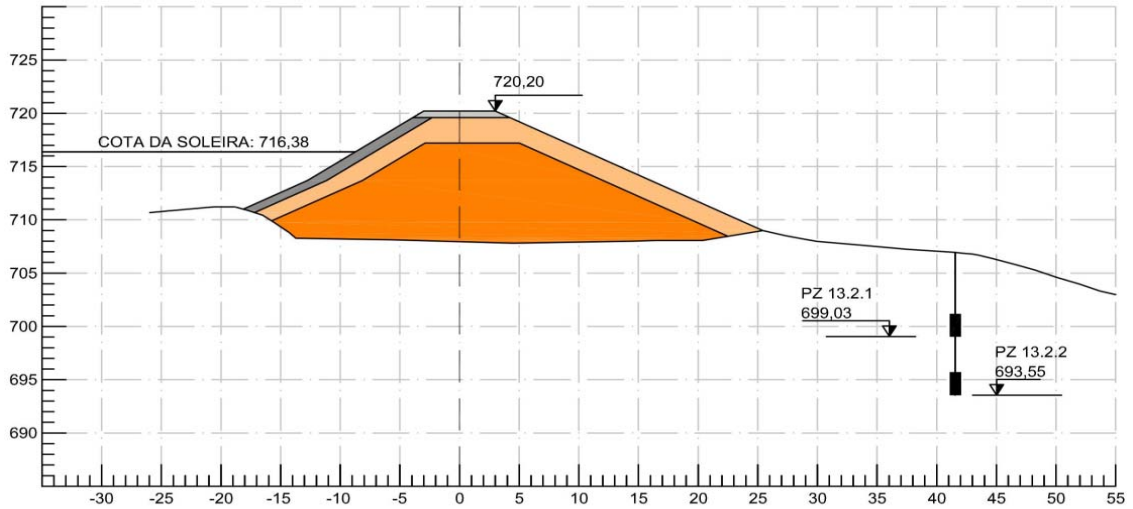
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.8 - Seção 12



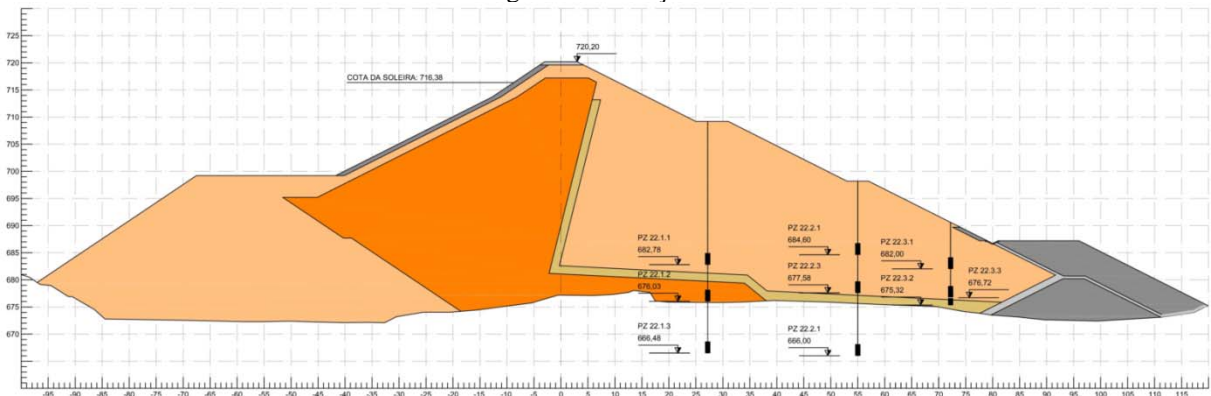
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.9 - Seção 13



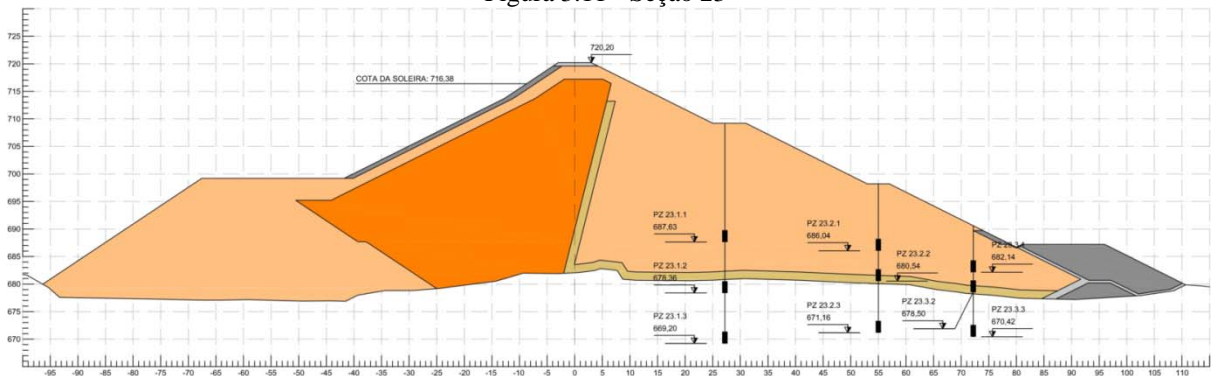
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.10 - Seção 22



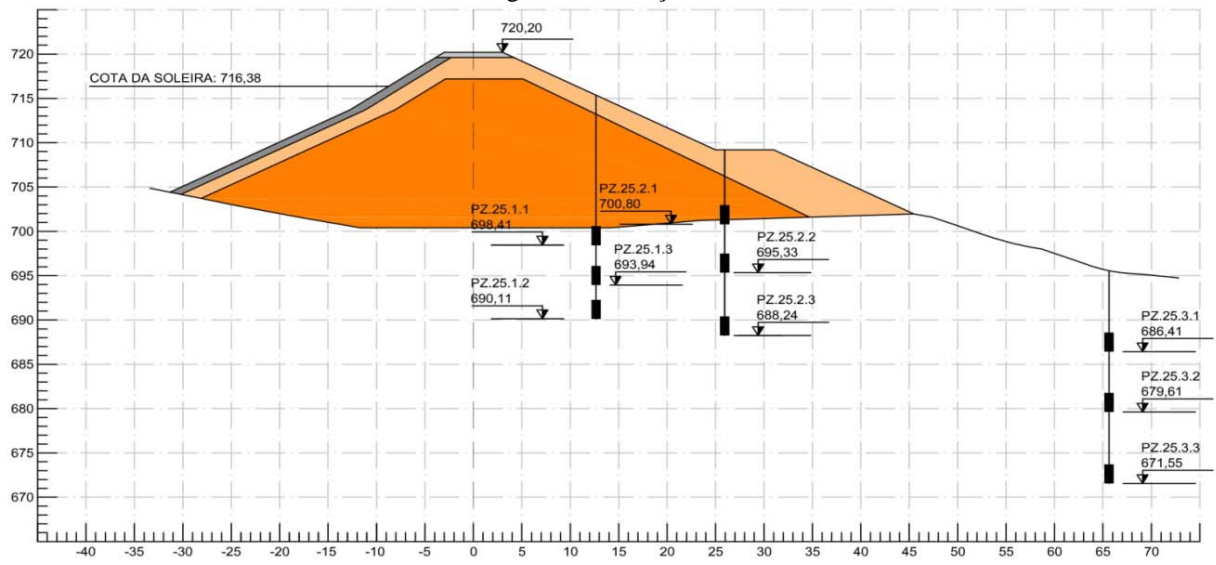
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.11 - Seção 23



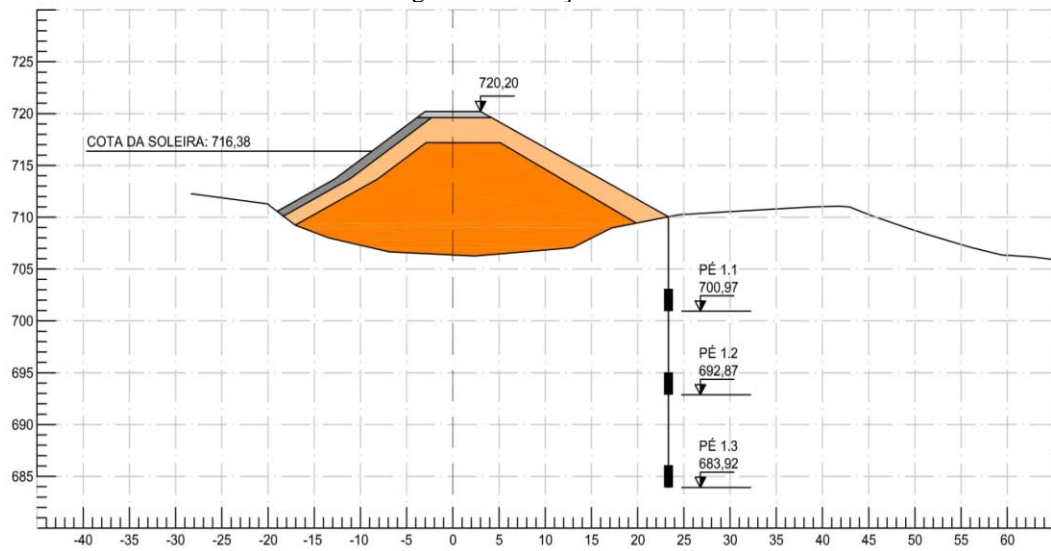
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.12 - Seção 25



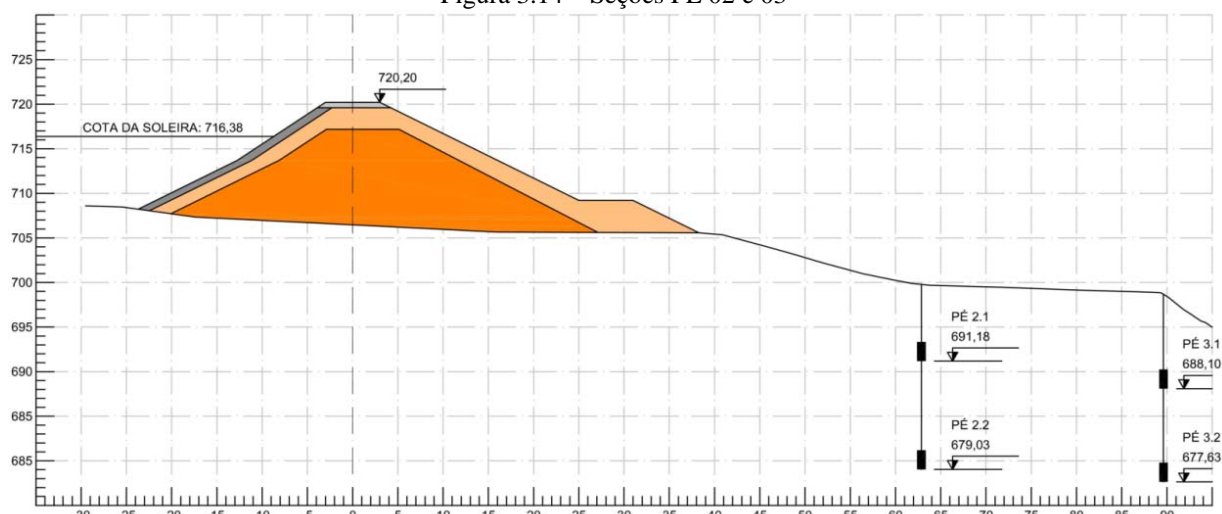
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.13 - Seção PE 01



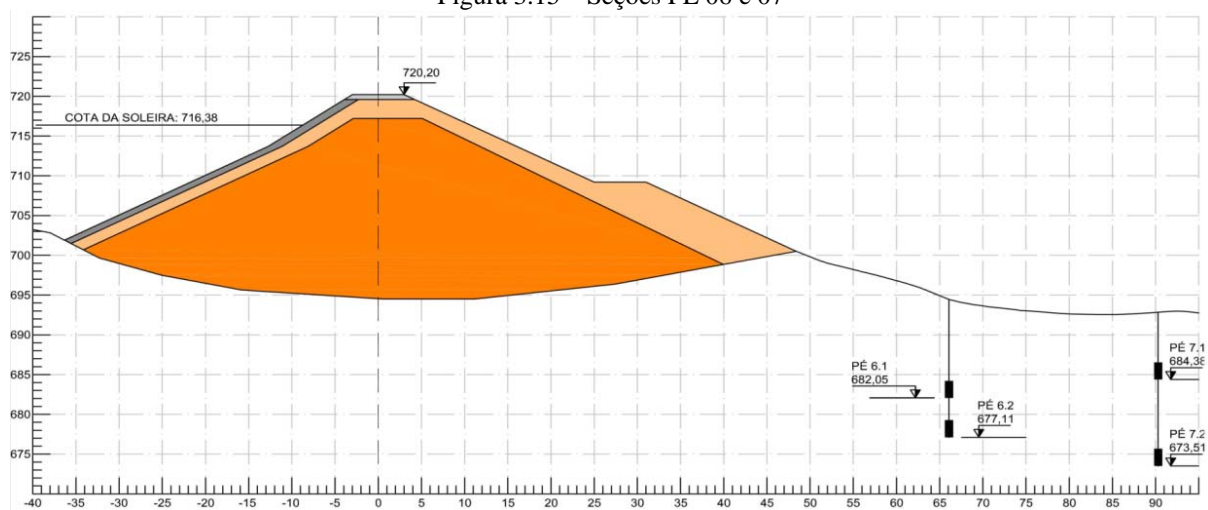
Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.14 – Seções PE 02 e 03



Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

Figura 3.15 – Seções PE 06 e 07



Fonte: Cogeh (2012). Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará

As leituras são realizadas pelos AGIR's Agentes de Guarda e Inspeção do Reservatório, treinados pela COGERH, residentes nas cercanias da barragem têm dentre as suas atribuições, a de zelar e inspecionar rotineiramente o açude. Essas leituras tem periodicidade quinzenal, semanal e até diária, dependendo do regime de recarga do reservatório. As leituras são registradas num formulário padrão, mensalmente, enviadas a gerência de segurança de infraestrutura hídrica para a realização de procedimentos de tratamento e análise do comportamento da barragem.

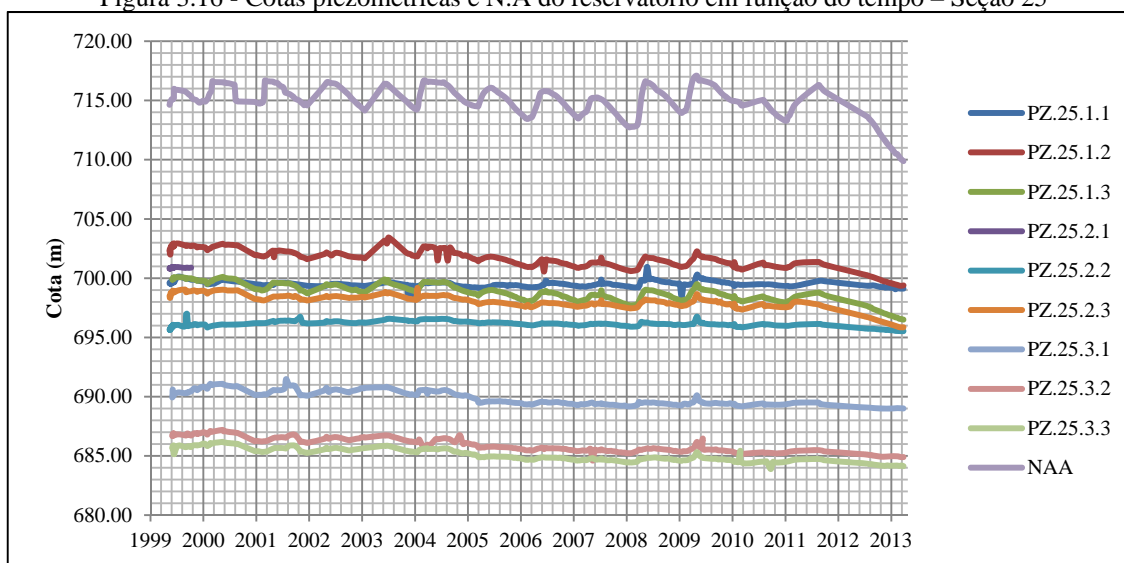
O ANEXO I apresenta o registro das leituras médias mensais dos piezômetros da barragem Jaburu I, distribuídos em dois módulos. Os denominados antigos que corresponde a

14 anos de observações, de 1999 a 2013, e os designados novos, com registros de leituras de 2004 a 2013.

Na análise das séries de dados dos piezômetros dispostos na sequência (do coroamento para o pé de jusante) revelaram-se consistentes, tanto em relação ao posicionamento dos piezômetros serem no maciço ou fundação. A Figura 3.16 apresenta os gráficos das cotas piezométricas e do nível d'água no reservatório em função do tempo, para a seção 25, localizada na ombreira esquerda da barragem.

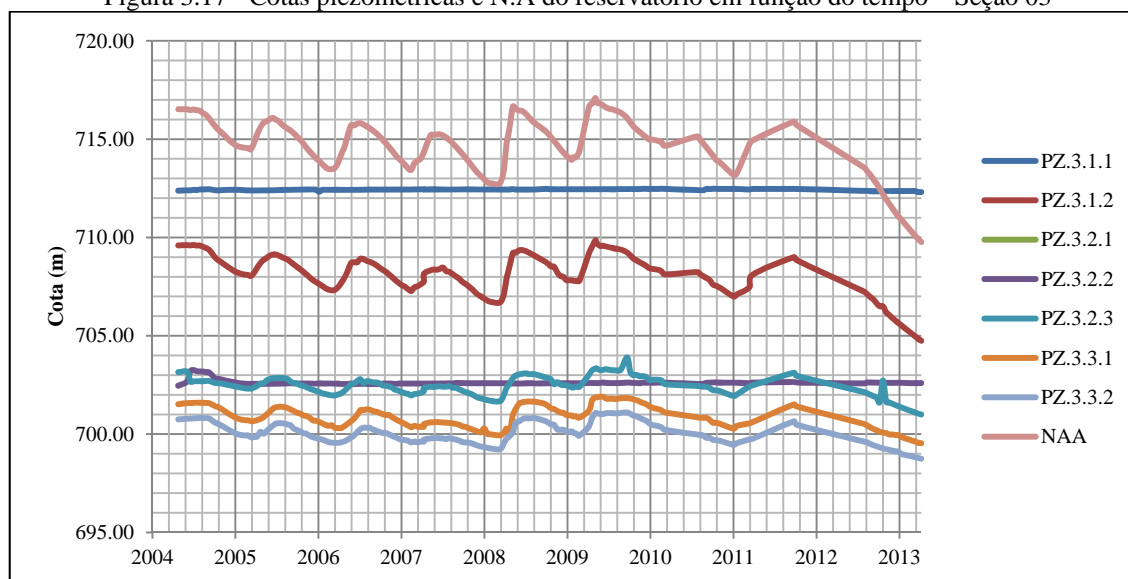
Um aspecto importante registrado é que as cotas piezométricas dos nove instrumentos desta seção acompanham a oscilação do nível de água do reservatório, muito embora sejam registradas nesta região, através dos medidores de vazão, grandes vazões de percolação.

Figura 3.16 - Cotas piezométricas e N.A do reservatório em função do tempo – Seção 25



Porém, efeitos diferenciados são evidenciados na seção 03, Figura 3.17, localizada na ombreira direita da barragem no vale secundário, onde as cotas piezométricas de 02 dos 07 instrumentos permanecem constantes com o rebaixamento do nível d'água do reservatório, o que se atribui a uma provável contribuição de fluxos d'água a partir da ombreira na direção das seções da barragem, nesta região.

Figura 3.17 - Cotas piezométricas e N.A do reservatório em função do tempo – Seção 03



O monitoramento dos medidores de vazão (ANEXO II – Barragem Jaburu I – Vazões de Percolação) sempre induziu a tomada de decisões para as campanhas corretivas, pois sempre que estes acusam resultados críticos, a SRH estabelece inspeções especiais, geralmente realizadas por consultores qualificados que determinam a recuperação dos trechos avariados.

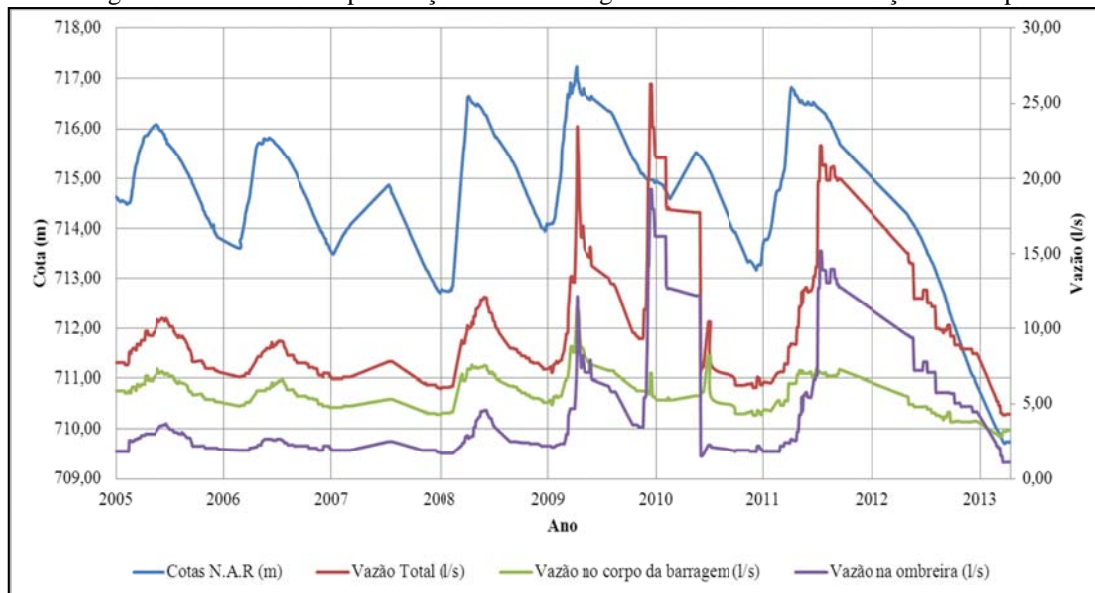
Um aspecto observado no gráfico de vazão dos medidores e nível d'água no reservatório com o tempo (Figura 3.18), é que nos ciclos, recarga versus esvaziamento as cotas de níveis iguais com datas diferentes geram praticamente as mesmas vazões, evidenciando que o cenário de oscilações dessas vazões é permanente, com exceção no início do ano de 2010, quando mesmo com a diminuição do nível do reservatório houve um aumento da vazão nos medidores que captam as percolações da ombreira esquerda. Outro componente também vinculado ao aumento da percolação nesta ombreira é quando o nível do reservatório chega próximo à cota 712,00, evento este que se intensificou a partir de 2009.

Observa-se também, na Figura 3.18, que a vazão percolada pela fundação no corpo da barragem, diferentemente das ombreiras, permanece praticamente constante com o tempo, e que no cômputo geral, da série histórica de 8 anos, a vazão percolada é maior que a totalidade percolada pelas ombreiras.

O volume de água que flui pela fundação da barragem Jaburu, registrados nos medidores de vazão de 2005 a 2013 chega a mais de 2,5 milhões de m³. Esta perda na

capacidade de reservação estaria numa condição de normalidade se não fosse os condicionantes litológicos da rocha da fundação.

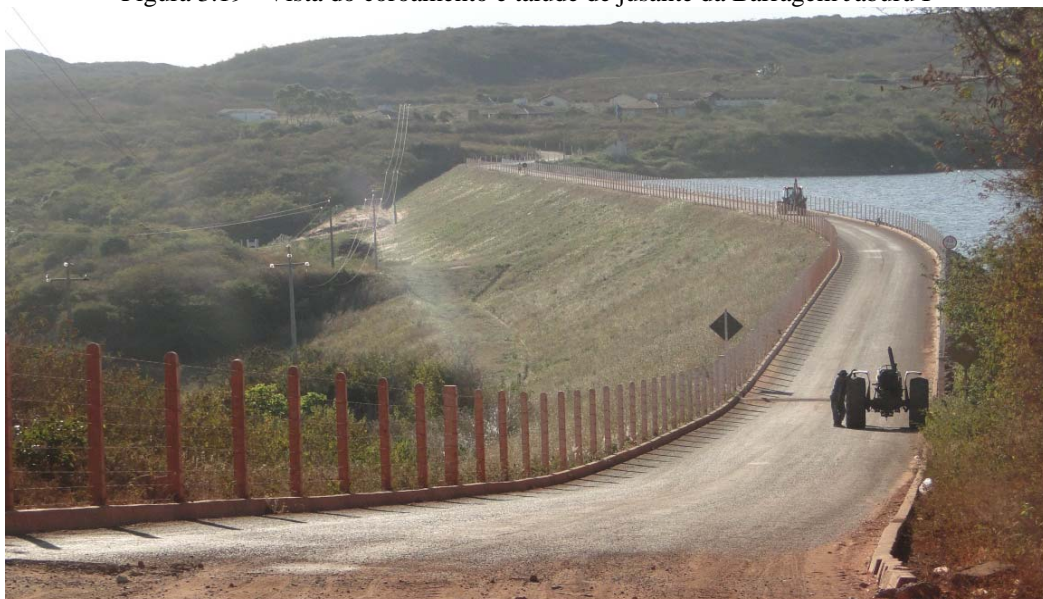
Figura 3.18 - Vazão das percolações e Nível d'água do reservatório em função do tempo



3.4 Histórico de Ocorrências na Barragem

Desde o primeiro ano de operação, 1983, a Barragem Jaburu I vem apresentando problemas que põem em risco a sua segurança. Conforme será relatado a seguir, ao longo de três décadas foram registradas anomalias na barragem, que levaram a uma série de intervenções no sentido de corrigir estes problemas e garantir a segurança e operacionalidade. Especificamente na barragem foram feitos vários reparos com o objetivo de reduzir e controlar fugas de água pela fundação, ombreiras e maciço. Além disto, a barragem tem recebido cuidados de manutenção geral, podendo-se na Figura 3.19 observar o seu bom estado de conservação.

Figura 3.19 - Vista do coroamento e talude de jusante da Barragem Jaburu I



Fonte: Cogeh (2011). Fotos da Inspeção realizada em 12/08/2011

3.4.1 Primeira Ocorrência

Após o primeiro enchimento apareceram fissuras no coroamento assim como um abatimento de aproximadamente 0,5 metros do coroamento na zona do vale principal.

3.4.2 Segunda Ocorrência

Cerca de cinco anos após o primeiro enchimento, em 1988, foi identificada uma fuga de água na ombreira esquerda, cerca de 30 m a jusante do pé da barragem (“off-set”), quando parte da formação arenítica da região no local da surgência sofreu erosão, formando uma pequena caverna, na altura da cota 700. Na ocasião, segundo (COBA 2000), as vazões registradas chegaram a 47 l/s. A Figura 3.20 registra a localização do evento (1989) e uma visão interna da caverna.

Figura 3.20 - (a) Vista da caverna na ombreira esquerda da Barragem Jaburu I; (b) Vista interna da caverna



Fonte: SRH (1990).

3.4.3 Terceira Ocorrência

Em 1992 (COBA dez/1998), foram detectadas mais quatro surgências a jusante da barragem com uma vazão de aproximadamente 26 l/s. Desta vez a área afetada foi à ombreira direita principalmente próxima à região da tomada d'água. Nesta ocasião o nível d'água no lago estava cerca de 5,0 metros abaixo do nível do vertedouro. Ainda assim, foram observadas surgências nos trechos correspondentes aos pontos mais elevados da fundação da barragem, situados nas ombreiras do morro central, que separa o vale principal do secundário, onde se localiza a tomada de água.

Estas fugas de água deram origem a uma cava de erosão na margem direita do canal escavado para implantação das estruturas de jusante da tomada d'água (ver Figura 3.21), porém em proporção menor que a identificada em 1988 na margem esquerda a jusante da barragem.

Os taludes do canal a jusante da tomada d'água, constituídos por alternância de níveis de arenitos de diferentes resistências à erosão e facilmente desagregável em estado saturado devido às intercalações de siltitos e argilito, ficaram praticamente na vertical, com pontos localizados negativos como o ilustrado na Figura 3.22. É importante citar também que, nesta ocasião, o "rock-fill" do canal da tomada d'água se encontrava parcialmente desmoronado.

Figura 3.21 - Cava de erosão criada pela surgência na margem direita do canal da Tomada de Água



Fonte: SRH (1999).- Estudos Básicos – Resultados dos Estudos Geológicos/Geotécnicos: Geodinâmica/COBA

Figura 3.22 - Aspecto da rocha no canal da Tomada de Água



Fonte: SRH (1999).- Estudos Básicos – Resultados dos Estudos Geológicos/Geotécnicos: Geodinâmica/COBA

3.4.4 Quarta Ocorrência

Em agosto de 1997, o PISB - Painel de Inspeção e Segurança de Barragem da Secretaria dos Recursos Hídricos em missão de inspeção, juntamente com técnicos da SRH, COGERH e SOHIDRA identificaram o talude de jusante bastante saturado em cota elevada, conforme mostra a Figura 3.23, cerca de 10 metros acima do enrocamento de pé de jusante. Uma ocorrência anormal e inaceitável em uma barragem de terra indicando clara deficiência do sistema interno de drenagem seja por mau dimensionamento ou por efeito de colmatção. Foram detectados também, nesta época, no canal de aproximação do vertedouro, antes da

estrutura vertente, alguns pontos de subsidência da rocha, formando sumidouros e também um processo de erosão regressiva no canal de restituição.

Figura 3.23 - Vista do talude de jusante saturado

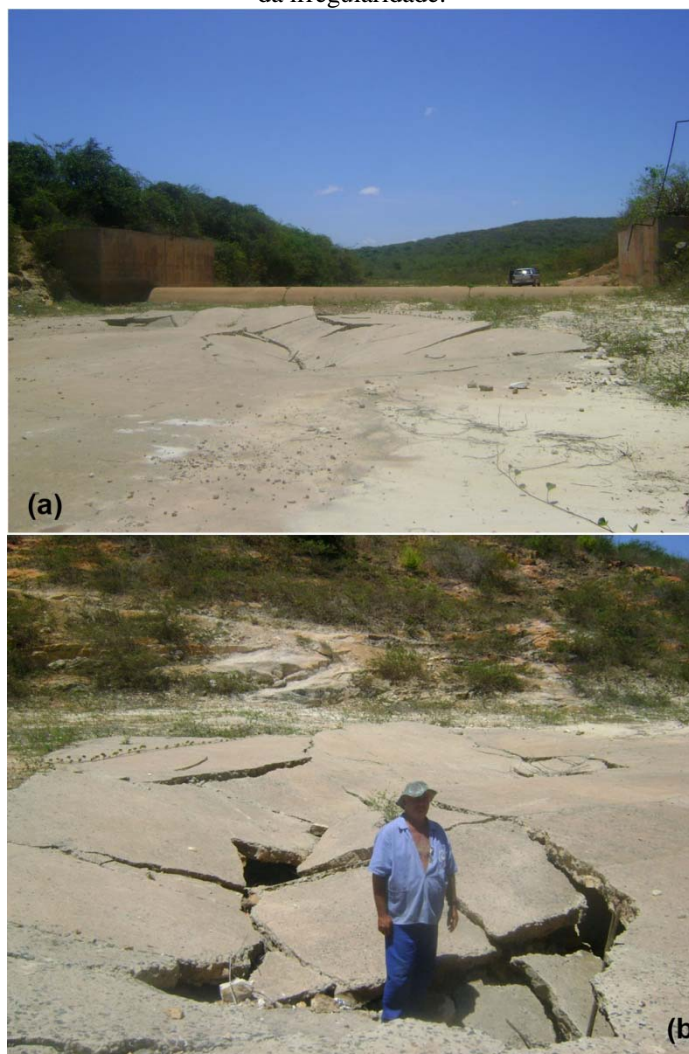


Fonte: SRH(1997). Registro da Inspeção do Paineiro de Inspeção e Segurança de Barragens.

3.4.5 Quinta Ocorrência

Em maio de 2005, a cava resultante da subsidência registrada em 1997 no canal de aproximação do vertedouro, localizada a poucas dezenas de metros a montante da soleira vertente, que havia sido preenchida com enrocamento e recebido um recobrimento de argamassa, voltou a fraturar e deformar, formando um sumidouro, como mostra a Figura 3.24.

Figura 3.24 - (a) Vista da deformação da estrutura no canal de aproximação do vertedouro. (b) Visão localizada da irregularidade.



Fonte: Cogerh (2008). Fotos da Inspeção realizada em 27/12/2008

3.4.6 Sexta Ocorrência

O medidor de vazão V-8, localizado na ombreira esquerda, (cota 680,00) que registrava a vazão percolada, foi destruído em janeiro de 2007, consequência do deslizamento de um bloco de rocha.

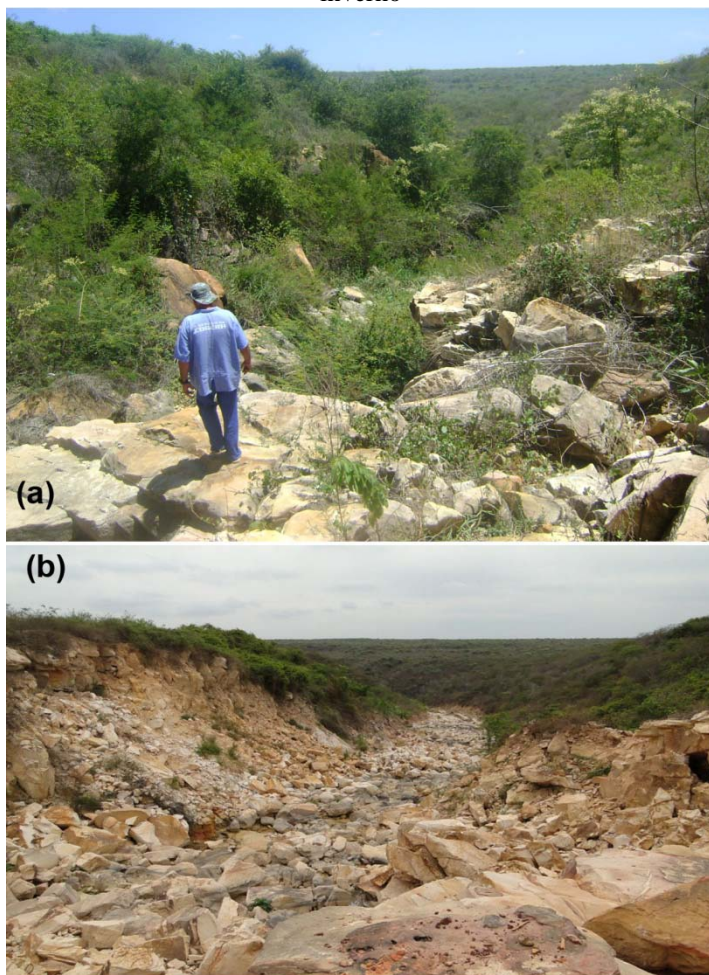
3.4.7 Sétima Ocorrência

No intenso período de chuvas de 2009, principalmente nos meses de abril e maio foi observado um aumento significativo na vazão das percolações pela fundação e ombreiras da barragem (COGERH,2010), principalmente na área próxima à ombreira esquerda da barragem (medidor de vazão V-7 que mede as vazões infiltradas por esta ombreira) com uma variação das mesmas de 3,33 l/s para 6,14 l/s. Após o período das chuvas, foi verificada uma

diminuição do volume percolado conforme a redução do nível do açude, estabilizando a vazão em torno de 3,42 l/s.

Contudo, em agosto/2009 foi registrada a ocorrência de fragmentos de asfalto na caixa de tranquilização do medidor de vazão V-7 provenientes das injeções executadas em 1989-1990. Indicando desta maneira que, com o passar do tempo, ocorreu um desgaste no arenito em torno do asfalto, que se desprendeu do arenito e foi carregado. O aumento das vazões no V-7, no período do inverno, pode também corroborar este fato. Na quadra invernal deste ano, também foi registrada uma acentuada evolução na erosão regressiva do canal de restituição do vertedouro, como pode ser visto na Figura 3.25.

Figura 3.25 - (a) Erosão regressiva no canal de restituição do vertedouro antes do inverno de 2009 e (b) após o inverno



Fonte: Cogerh (a) Inspeção realizada em 27/12/2008
(b) Inspeção realizada em 30/12/2009

3.4.8 Oitava Ocorrência

Em dezembro de 2009 foi detectado, pelo agente de guarda e inspeção do açude, que o medidor de vazão V-7, o mesmo que em agosto registrou a presença de fragmentos de asfalto, apresentou um considerável aumento de vazão com coloração turva, passando de 3,4 l/s para 5,4 l/s com carreamento de sedimentos e asfalto. Em meados de janeiro de 2010 a vazão atingiu um pico de 19 l/s, sem que fosse registrada neste período precipitações, nem tão pouco aumento do nível do volume do reservatório. A Figura 3.26 ilustra as ocorrências.

Figura 3.26 - (a) Canal de drenagem do medidor V-7 e retirada de silte (b) retirada de asfalto



Fonte: Cogeh - Fotos da Inspeção realizada em 30/12/2009.

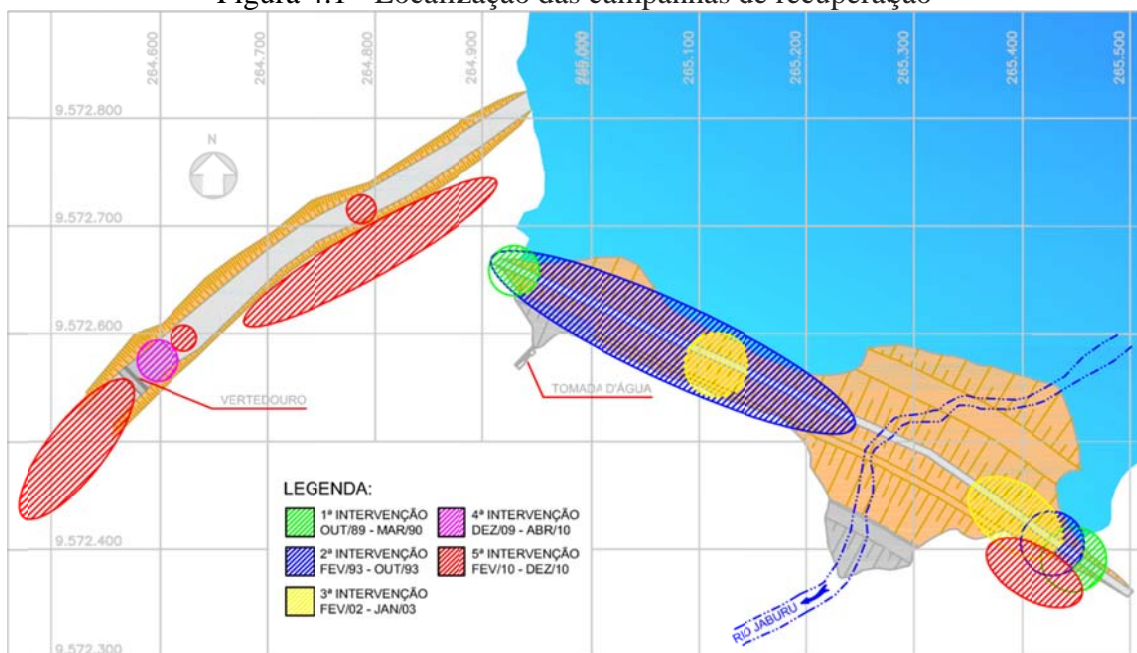
3.4.9 Nona Ocorrência

Em agosto de 2011, cerca de um ano após a intervenção realizada na fundação da ombreira esquerda, quando a vazão ficou em torno de 2,5 l/s, foi observado que os medidores de vazão V-10, V-11 e V-7, que captam a vazão da surgência pela ombreira, começaram a registrar um aumento significativo da vazão com carreamento de silte e asfalto. Neste período a vazão atingiu 19 l/s, porém, com a pouca recarga do reservatório, esta descarga foi se estabilizando e gradativamente decaindo, e em abril de 2013 era registrada uma vazão de 5,85 l/s.

4 CAMPANHAS DE RECUPERAÇÃO E RESULTADOS

A barragem Jaburu I foi submetida a intervenções corretivas, na tentativa de “impermeabilizar” e criar reforço estrutural de sua fundação rochosa, em cinco momentos distintos, nos anos de 1989, 1992, 2003, 2009 e 2010, em campanhas coordenadas e executadas pelo Governo do Estado do Ceará. As duas primeiras campanhas e a quinta foram realizadas em situação emergenciais – tendo em vista as elevadas vazões de percolação através das fundações da barragem - a terceira intervenção foi realizada em situação de segurança mais oportuna, após a elaboração detalhada de estudos geológicos e geotécnicos, com intuito de promover melhorias dos estados de operação e estabilidade da barragem a médio e longo prazo. A quarta campanha foi efetuada com o objetivo de restaurar as cavernas no canal de aproximação do vertedouro. A Figura 4.1 a seguir mostra os locais onde foram executas as cinco campanhas de recuperação.

Figura 4.1 - Localização das campanhas de recuperação



Fonte: Cogerh (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I - TOMO I

4.1 Primeira Campanha de Recuperação

Em 1988, cinco anos após o primeiro enchimento do reservatório, foi identificada uma surgência na ombreira esquerda, cerca de 30 metros a jusante do pé da barragem, na altura da cota 700 formando uma caverna (SRH 1990). Na ocasião, segundo COBA, em Plano de Observações, Março de 2000, as vazões registradas chegaram a 47 l/s.

Em outubro de 1989, foi dado início aos serviços de reabilitação através de uma campanha de injeção de impermeabilização da fundação. Neste momento, praticamente todos os esforços para remediar tal anormalidade foram direcionados na região da ombreira esquerda da barragem.

Inicialmente, de acordo com o Relatório da SRH (1990) Serviços de Injeção de Cimento e Asfalto na Barragem Jaburu em Tianguá, foram executados furos de sondagens, no coroamento distante 1,00 m do meio-fio de jusante denominada linha B, e uma segunda linha chamada de linha A distante 2,00 m do pé do talude de jusante. Nestas linhas os furos primários ficaram equidistantes de 3,00 m e nos trechos onde foram detectadas perdas de água elevadas foram feitos furos secundários entre os primários.

O objetivo destas duas linhas de investigações era tentar identificar o caminho do fluxo e injetar calda de cimento. Tal procedimento foi adotado, contudo, não foi obtida resposta positiva quanto à estagnação da vazão. Na ocasião foi admitida à ideia de injetar asfalto quente com a intenção de tamponar a saída da água e rematar a impermeabilização com injeção de calda de cimento. Logo no início desta sistemática de injeções simultâneas, de asfalto e cimento, em furos de uma mesma linha foi notado o bom êxito deste procedimento, pois a vazão foi gradativamente diminuindo, à medida que foram sendo acertados, através da prospecção os pontos certos da passagem da água. No final da intervenção, em fev/1990, a vazão observada no medidor de vazão era de 2,4 l/s. Foram executadas e injetadas três linhas complementares de furos a montante da área impermeabilizada com asfalto, com o desígnio de reforçar a zona tratada.

No procedimento do tratamento nas injeções de cimento foi inicialmente utilizada calda de 2:1 (água:cimento), em peso, e não havendo obturação, o traço era gradativamente modificado de 1:1 e de 0,5:1. Em caso de não obturação com cimento e água foi utilizada uma mistura de água, cimento e areia fina na proporção 1,5: 2:1, em peso. Para o asfalto foi utilizado um caminhão caldeira que injetava o asfalto a uma temperatura variando entre 170 e 200°C e pressão entre zero e 4kg/cm². Nesta campanha foram utilizados 55.900 kg de cimento e 74.700 kg de asfalto. Na Tabela 4.1, a seguir, são mostrados os quantitativos realizados nesta campanha.

Nesta campanha também foi injetado calda de cimento, em uma linha de furos, no início da ombreira direita da barragem, espaçada de 6,00 metros, posicionada a um metro do meio-fio de montante no coroamento.

Ainda, durante esta intervenção foram construídos cinco medidores de vazão: um na percolação principal e os demais nas quatro principais dispersões de fluxo que se esparramavam aleatoriamente no pé da barragem.

Tabela 4.1 - Quantitativos realizados na 1ª campanha de recuperação

Mes	Sond ø BX (m)	Sond ø NX (m)	Injeção de cimento (m)	Injeção de asfalto (nº de furos)
out/89	234	-	-	-
nov/89	165,09	84,01	175,1	3
dez/89	425,2	41,1	296,7	6
jan/90	441,2	101,2	279,2	8
fev/90	271	20,2	111	1
TOTAL	1.636,49	246,61	862	18

Fonte: SRH – 1990 (Serviços de Injeção de Cimento e Asfalto na Barragem Jaburu)

4.2 Segunda Campanha de Recuperação

Em 1992, (SRH 1993) foram percebidas que nas quatro surgências a jusante da barragem, entre a região da tomada de água localizada na ombreira direita e o vale principal, ocorria uma vazão de 26 l/s.

Entre fevereiro e outubro de 1993 foi realizada a 2ª campanha de recuperação com injeção de cimento nas áreas afetadas. Todas as sondagens foram realizadas no coroamento da barragem. Na ocasião foram perfurados cerca de 3.303 metros de sondagens e injetados 329.973,00 kg de cimento (6.600 sacos), conforme detalhado no Tabela 4.2, a seguir.

Tabela 4.2 - Quantitativos realizados na 2ª campanha de recuperação

Relatórios de andamento	Mês	Sondagem (BX) m	Injeção de cimento (kg)
1	fev/93	356	29.350
2	mar/93	231	45.750
3	abr/93	276,5	42.250
4	mai/93	575,5	79.580
5	jun/93	396,2	92.042,50
6	jul/93	579,2	24.250
8	set/93	441,2	279,2
Relatório final	out/93	271	111
Total		3.303	329.973,00

Fonte: SRH – 1993 (Relatórios de andamento da TECNOGEO)

No final da intervenção as vazões na área tratada haviam reduzido, chegando a 12,5 l/s. Compuseram também os serviços efetuados nesta campanha a instalação de sete piezômetros abertos, tipo Casagrande, no talude de jusante e a construção de mais um medidor de vazão, localizado no antigo leito do rio, com o propósito de medir as vazões reunidas dos medidores que captam as vazões da ombreira esquerda.

4.3 Terceira Campanha de Recuperação

De fevereiro de 2002 a janeiro de 2003, novas medidas de segurança foram efetuadas na barragem Jaburu I, visando aumentar o estado de segurança de suas estruturas e reduzir as ações das anomalias relacionadas ao fluxo percolado no interior do maciço de terra ou através da fundação. As ações de recuperação implementadas, segundo COBA 2004, compreenderam, basicamente:

- a) reforço do tratamento à matriz rochosa da fundação da barragem, com a realização de uma nova campanha de injeções de impermeabilização com calda de cimento e bentonita, com a meta de reduzir as vazões de percolação existentes na região a jusante da barragem;
- b) estabilização da barragem (Figura 4.1) abrangendo a execução de bermas de enrocamentos com blocos de arenito, a jusante da barragem, nos vales principal e secundários com objetivo de melhorar as condições de estabilidade dos taludes;

- c) Drenagem com a construção de filtros e transições com a intenção de garantir uma drenagem apropriada do fluxo que transpassa o maciço, assim como a execução de nove unidades de valas drenantes constando de tubos de concreto poroso com \varnothing 300 mm, protegidos com areia, complementado com brita, envolto com manta geotêxtil, que conduz e direciona as vazões captadas para os medidores de vazão;
- d) alteamento em 1,10 m da crista da barragem tendo em vista à obtenção de uma borda livre compatível com os critérios de segurança adotados pela SRH. Execução de pavimentação asfáltica, meio-fios e cerca de estaca de concreto com 8 fios de arame farpado em ambos os lados da pista de rolamento. Recomposição do enrocamento a montante e recuperação de canaletas;
- e) tratamento das cavernas formadas no leito do canal de aproximação do vertedouro a montante da estrutura vertente, com a obturação destas cavidades com blocos de arenito, compactados e selados com uma camada de concreto ciclópico. O talude esquerdo do canal de aproximação também foi revestido e regularizado com concreto projetado com o objetivo de corrigir os problemas de infiltração e instabilidade;
- f) instalação subaquática do stop-log, dispositivo de vedação emergencial no emboque da tomada de água, bem como realização de inspeção preventiva no interior da tubulação de aço carbono envolto de concreto armado;
- g) ampliação do sistema de instrumentação e monitoramento da barragem, com a instalação de uma bateria de piezômetros, referências de nível, marcos de superfície e dispositivos de captação e medição de vazões a jusante do off-set da barragem e ombreiras;

Nesta campanha de recuperação foram perfurados 2.399 metros de sondagens injetado 120.750,00 kg de cimento (2.415 sacos) e 7.857,90 kg de bentonita, instalados 54 piezômetros, 07 medidores de vazão e 12 marcos de nivelamento e de referência.



Fonte: Cogeh (2004) Relatório dos Serviços de Supervisão e Acompanhamento da Execução das obras de Recuperação da Barragem Jaburu

4.4 Quarta Campanha de Recuperação

No início de dezembro de 2009 (COGERH 2010) foram iniciados os serviços de reparo das pequenas cavernas ou sumidouros de água do canal de aproximação do vertedouro, localizadas a montante da estrutura vertente, tendo em vista que as obturações realizadas em 2003 haviam sofrido recalque e se rompido, em 2005.

Esta anormalidade fazia com que nos períodos de vertimentos, principalmente quando a lâmina se encontrava baixa, a água que adentrava no canal de aproximação chegando às cavernas, submergia pelo substrato arenítico e fluía a uma distância de aproximadamente 100 m e um desnível de 10 m abaixo da cota do canal.

Os procedimentos adotados neste tratamento consistiram na desobstrução e limpeza das cavernas, com remoção total dos entulhos da placa danificada, seguido da obturação destas cavidades com blocos de rocha granítica, até cerca de 2,0 m abaixo do piso do canal. Nos últimos 0,5 m abaixo do piso do canal foram colocados blocos de dimensões gradualmente decrescentes (de baixo para cima), obedecendo ao critério de filtro. Acima desta camada foi executada a laje-tampão, armada, com espessura de 0,15 m, comprimento de 45,0 m a partir do Creager e aproximadamente 1,80 m nos taludes laterais.

4.5 Quinta Campanha de Recuperação

Em fevereiro de 2010 (COGERH 2010) foi iniciado, em caráter imediato, com monitoramento da COGERH, mais uma operação, com a intenção de barrar o fluxo que voltou a ascender na área remediada em 1989. Associada a impermeabilização da ombreira esquerda foi executado um conjunto de ações reparadoras nas estruturas da barragem Jaburu I, conforme segue:

4.5.1 Execução de aterro hidráulico a montante da barragem

O objetivo desta operação (Figura 4.3) era, através de tentativa, mapear ou talvez obturar/colmatar o caminho de comunicação do lago com a surgência na ombreira esquerda, com carregamento de asfalto e silte mensurado no medidor de vazão V-7. Foi colocado um volume de aproximadamente 16.530 m³ de material argiloso tipo piçarra laterítica, porém, não foi obtida conquista positiva ou esclarecedora nesta prospecção. Na ocasião, a vazão registrada pela surgência era de 16 l/s e não ocorreu nenhuma variação.

Figura 4.3 - Execução do aterro hidráulico



Fonte: Cogerh (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I - TOMO I

4.5.2 Tratamento da fundação na ombreira esquerda

Concomitante a operação acima descrita, foi realizada uma bateria de sondagens na área injetada na primeira campanha (1989-1990). Durante a perfuração do primeiro conjunto de sondagens, em número de 20, dois furos se comunicaram com a surgência, fato comprovado através da água de perfuração e em três foi identificado presença de asfalto e

cimento, sinais da primeira intervenção. Foi realizada a primeira tentativa de injeção de cimento em 12 sondagens, com traço de 1: 1: 1 (água-cimento-areia) e destas, em cinco, a calda se comunicou com a percolação sem, contudo, haver nenhuma alteração na vazão.

Foi adotada a sistemática da primeira intervenção, ou seja, injetar primeiro asfalto quente com o objetivo de obstruir a saída do fluxo e continuar a impermeabilização com injeção de calda de cimento. Na ocasião foi injetado asfalto nos furos que se comunicaram com a surgência, sendo que esta ação, de imediato, praticamente estagnou o fluxo (Figura 4.4), então foi possível prosseguir a impermeabilização com calda de cimento nos demais furos.

Finalizando o tratamento na ombreira esquerda foi executada, a montante da área tratada, uma bateria de 14 sondagens com profundidade de 25 metros e injetado calda de cimento com o objetivo de reforçar a operação de impermeabilização da área.

Figura 4.4 - Detalhe da surgência após a injeção de asfalto



Fonte: Cogerh (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I - TOMO I

4.5.3 Tratamento da fundação na ombreira direita

O tratamento da fundação da área compreendida entre o final da barragem, na margem direita e o canal do veterdouro, teve como meta barrar o fluxo que percola, nos períodos de vertimentos, em direção a meia encosta a jusante da barragem. Este procedimento seguiu a metodologia adotada com injeção de calda de cimento, traço 1:1:1 (água : cimento : areia). No período do vertimento em 2011 foi constatado que o medidor de vazão V-9 que coleta a água que penetra na região injetada teve um período muito longo de

resposta em relação aos vertimentos dos anos anteriores, ou seja, desde o início do canal do vertedouro até a vazão chegar ao medidor V-09.

4.5.4 Prospecção da fundação do canal do vertedouro

Foi realizado mapeamento através de prospecção com sondagens nos canais de aproximação e restituição do vertedouro. O resultado das investigações mostrou a intensa desagregação e vulnerabilidade do substrato arenítico, com presença constante de cavernas e sumidores. Foi realizado o tratamento da área prospectada com injeção de calda de cimento. Alguns furos localizados a margem esquerda do canal de restituição, próxima a estrutura da passagem molhada, não obturaram com calda de cimento, traço 1:1:1 (água:cimento:areia) sendo necessário a vedação com concreto magro (Figura 4.5) e/ou asfalto.

Destaca-se que, durante todo o processo de injetamento, foi monitorada a possível comunicação da calda a jusante e nas laterais do canal e não foi registrado nenhum vestígio do material injetado, concluindo, desta maneira, que nesta região existe uma grande quantidade de cavidades subterrâneas por onde submergem vazões.

A Tabela 4.3 apresenta as quantidades de sondagens e materiais utilizados com tratamento das fundações nesta campanha.

Figura 4.5 – Limpeza da cavidade para colocação do concreto magro



Fonte: Cogerh (2010). Registros Fotográficos dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I - TOMO III

Tabela 4.3 - Quantitativos realizados na 5ª campanha de recuperação com tratamento das fundações

Local	Sondagem (m)	Cimento (kg)	Asfalto (kg)
Ombreira esquerda	1.525,90	83.650	30.200
Ombreira direita	1.055,00	111.400	-
Vertedouro	585,5	115.150	15.000
TOTAL	3.166,40	310.200	45.200

Fonte: COGERH – Relatório dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburú I (2010)

4.5.5 Execução de valas drenantes e medidores de vazão

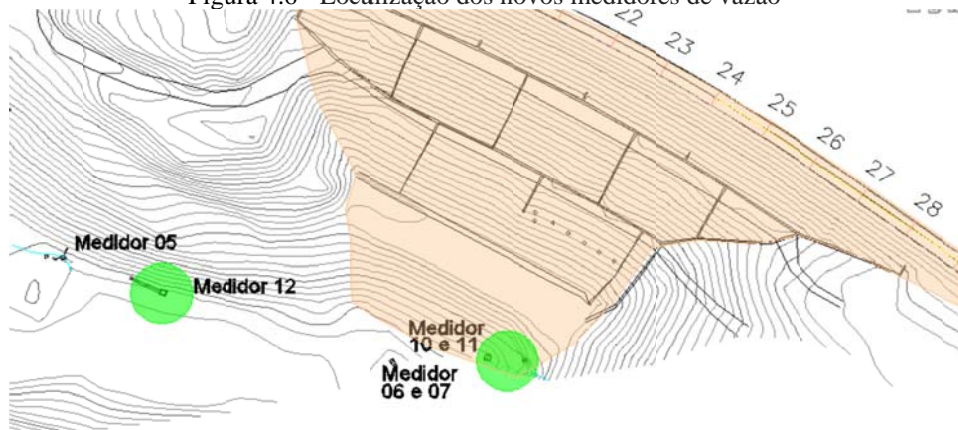
No período desta intervenção foram identificados vários pontos de surgências não monitoradas, ao longo do pé da barragem. Com o intuito de quantificar estes pontos difusos de percolações foram construídas valas drenantes e medidores de vazão.

Reforçando o conjunto de oitos medidores de vazão existentes que captam água da fundação foram construídos mais três, conforme mostra a localização na Figura 4.6. Os dois primeiros medidores de vazão V-10 e V-11, composto por uma caixa com duas células, captam as águas que eram drenadas para o medidor 08, que foi danificado pelo deslizamento de um bloco de rocha em janeiro de 2007. Estes novos medidores captam as águas provenientes da revência localizada na ombreira esquerda e canalizam para o medidor de vazão 07.

A segunda caixa (medidor V-12) foi construída na parte central da barragem, próximo ao medidor V-05, tendo em vista a existência de pontos difusos de surgências sem controle de medição.

Uma surgência existente no pé do morro, a jusante do medidor de vazão 04 foi drenada para o medidor de vazão 05, como exhibe a Figura 4.7. Antes desta intervenção a vazão seguia descontrolada pelo pé do morro.

Figura 4.6 - Localização dos novos medidores de vazão



Fonte: Cogeh (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I - TOMO I

Figura 4.7 - Execução da drenagem para o medidor de vazão V-05



Fonte: Cogeh (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I - TOMO I

4.5.6 Estabilização dos taludes do canal da tomada de água

Os taludes do canal da tomada de água, a jusante do aterro da barragem no vale secundário, se encontravam praticamente verticais, pouco estáveis, constituídos por alternância de níveis de arenitos e siltitos bastantes susceptíveis a erosão, como mostra a Figura 4.8.

Foi executada a estabilização dos taludes com inclinação aproximadamente de 1:1 (h:v), concluindo com a colocação de revestimento tipo grama, com objetivo de barrar possíveis pontos de erosões que surgem geralmente após as quadras invernosas. Também

foram construídas calhas ao longo dos taludes para captar a drenagem das águas pluviais (Figura 4.9).

Figura 4.8 - Detalhe do talude das margens da tomada de água antes da estabilização.



Fonte: Cogeh (2001). Foto de inspeção

Figura 4.9 - Vista da tomada de água após a estabilização



Fonte: Cogeh (2011). Foto da Inspeção realizada em 04/03/2011

4.5.7 Levantamentos topográficos

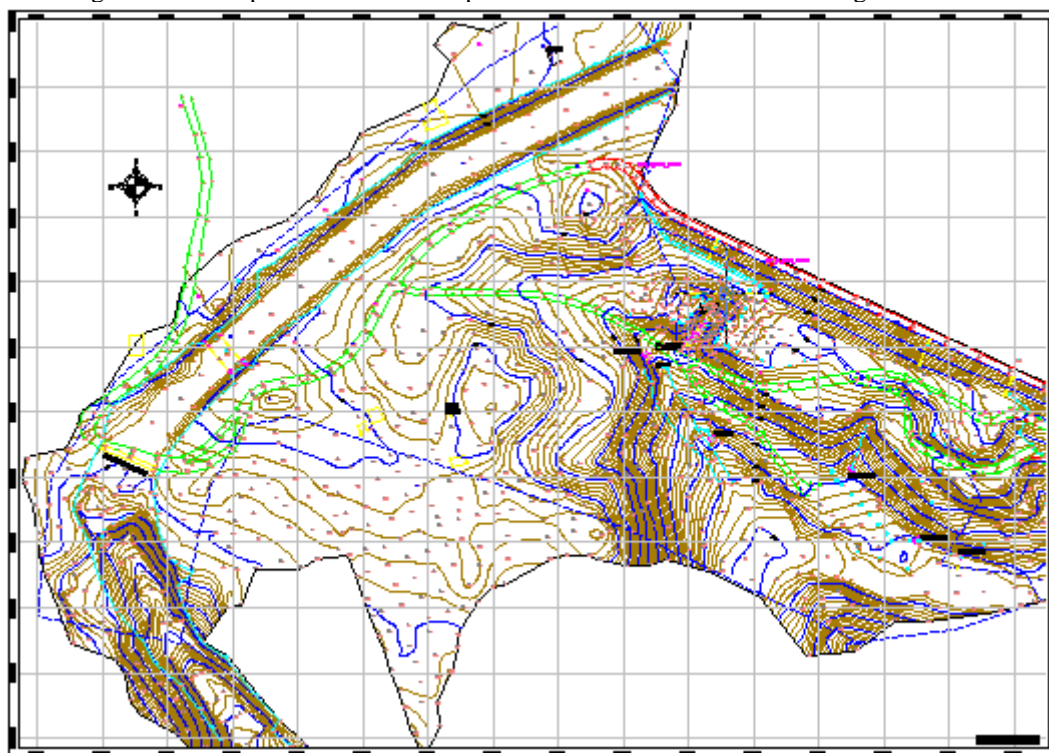
Na materialização topográfica das investigações e medidores de vazão executados nesta campanha de reabilitação foi constatada a deficiência e/ou inexistência de topografia em algumas áreas a jusante da barragem e no vertedouro. Na realização do levantamento topográfico complementar foi verificada divergências de cotas com os desenhos existentes do

projeto (1982), dos trabalhos realizados pela COBA (1999) e dos apresentados no POM - Plano de Operação e Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará (2008).

Devido à constatação destas divergências, foi estabelecido o levantamento planialtimétrico cadastral de 27 ha englobando barragem, vertedouro e a região a jusante destas estruturas (Figura 4.10). Inicialmente foi providenciado o transporte de coordenadas da Estação Planimétrica SAT 92394 (IBGE) e materializados na estrutura da barragem 02 marcos de apoio, com chapa de metal gravadas em baixo relevo, denominado GPS_M_0055 e GPS_M_0056.

Os resultados dos levantamentos realizados apontaram as divergências entre a barragem projetada e a construída, sobretudo no tocante a sua altura e outras características como a largura e cota da soleira do vertedouro e o posicionamento da tomada de água.

Figura 4.10 - Mapa do levantamento planialtimétrico no entorno da Barragem Jaburu I



Fonte: Cogerh (2010). Levantamentos Topográficos da Barragem Jaburu I e Topobatimétrico do Reservatório – TOMO IV

4.5.8 Levantamentos batimétricos

Haja vista as divergências deparadas durante o levantamento topográfico, em relação aos registros arquivados do açude Jaburu I, considerando principalmente à altura da

Barragem, foi efetuado o levantamento batimétrico tendo em vista aferir a capacidade de armazenamento do reservatório Jaburu I.

4.5.9 Estudos hidrológicos

Diante do novo cenário, com os dados obtidos com a realização dos levantamentos topográficos e batimétricos foi necessária a verificação do dimensionamento do vertedouro, considerando a alteração na capacidade de atenuação da cheia pelo reservatório, implicando na diferença entre a vazão calculada de projeto e a real vazão escoada pelo vertedouro.

Além da questão do vertedouro, foi necessário a verificação de cálculo da vazão regularizada com garantia de 90% de atendimento, uma vez que, assim como no cálculo do vertedouro, foi utilizado um diagrama cota x área x volume que não correspondia à real situação do reservatório Jaburu I.

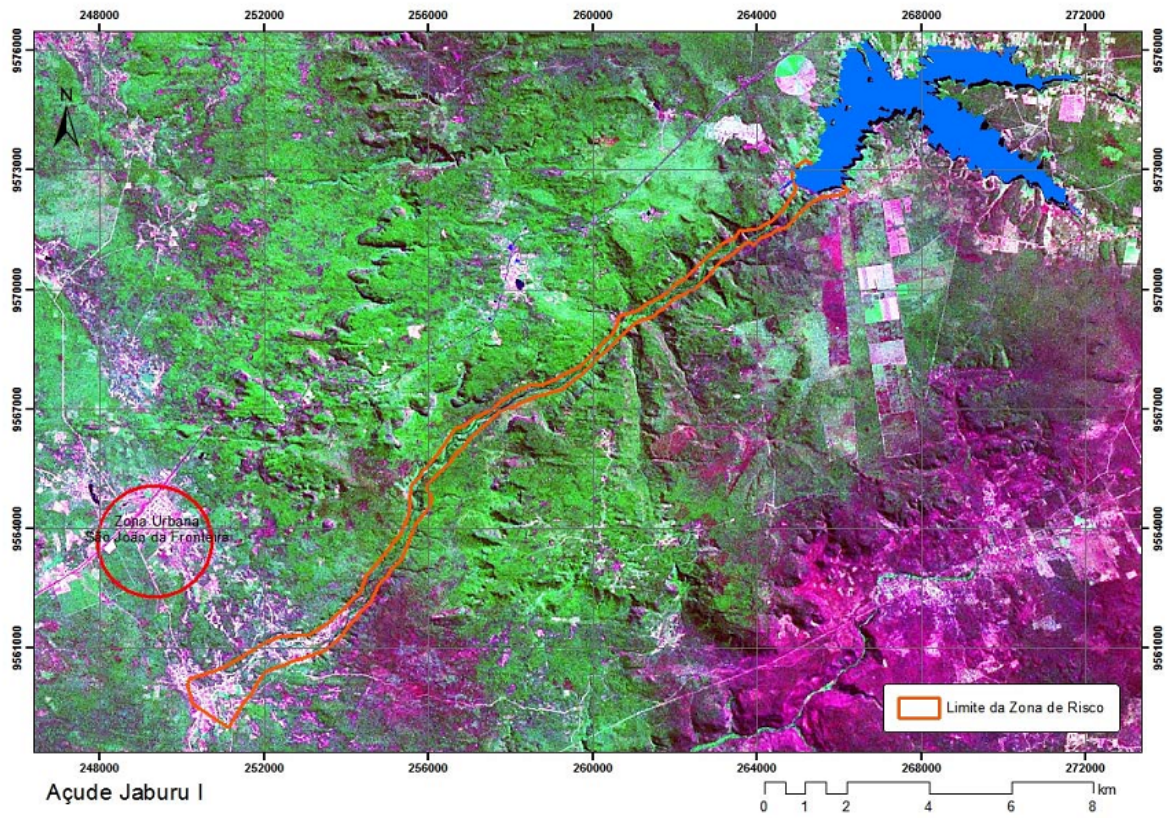
4.5.10 Mapeamento preliminar das zonas de inundação pela ruptura da barragem

O mapeamento preliminar das zonas de inundação pela ruptura da barragem Jaburu I foi realizado com o intuito de identificar os pontos críticos provocados pela onda de cheia nas comunidades ribeirinhas e marginais localizadas no vale a jusante da barragem Jaburu I, para o controle de inundação ao longo do trecho de 25 km pelo curso natural do rio a partir da Barragem Jaburu I.

A Figura 4.11 mostra a delimitação da zona de risco potencial para efeito de onda de cheia provocada por ruptura. Atualmente, com a disponibilização, pelo google earth, de imagens de satélite de alta resolução foram mapeadas aproximadamente 70 edificações entre unidades residenciais e construções rurais, classificando a barragem, de acordo com a Lei 12.334/2010 com dano potencial alto.

Os resultados preliminares das análises hidrodinâmicas efetuadas, torna-se possível avaliar as implicações que poderiam advir de uma eventual ruptura e, conseqüente formação de uma onda de cheia artificial que se propagaria rapidamente a jusante.

Figura 4.11 – Mapeamento das zonas com risco de inundação potencial



Fonte: Cogeh (2010). Mapeamento das Zonas de Inundação pela Ruptura da Barragem Jaburu I – TOMO VI

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação abordou a questão de barragens assente sobre substratos permeáveis, considerando, como estudo de caso, a barragem Jaburu I que esta situada em uma região caracterizada predominantemente pela presença de rochas sedimentares areníticas. Problemas com fugas de água através do arenito sobre a qual a barragem foi edificada têm requerido sucessivas intervenções objetivando a garantia de sua segurança. Um histórico desta obra com as recuperações realizadas e avaliação dos resultados obtidos foi apresentado nos capítulos anteriores que aqui são complementados com conclusões e recomendações

5.1 Considerações Finais

A construção de barragens no Nordeste esteve sempre intrinsecamente interligada ao fenômeno natural das secas, destinando-se principalmente para o abastecimento humano, contribuindo desta forma para o desenvolvimento de sua área de influência e garantindo a fixação do homem no interior. O DNOCS, cumprindo sua missão institucional, por cerca de cinco décadas foi a principal agência governamental federal executora de obras de engenharia no Nordeste, em sua maioria barragens de médio e grande portes.

Assim, como nos demais estados da região, no Ceará, até a criação da SRH em 1987, não havia nenhum órgão específico para o setor de recursos hídricos, que atuasse de acordo com um efetivo planejamento. Até então eram construídas somente pequenas barragens sem a utilização de técnicas que garantisse níveis adequados de qualidade. Fugindo a esta realidade, a barragem Jaburu I foi à primeira de porte média construída pelo Governo do Ceará, antes da criação da SRH.

Além desta condição de pioneirismo, a construção enfrentou condições particularmente difíceis no que diz respeito à fundação. Situada em uma região de rocha sedimentar, tipo arenito, cimentada por material friável, possibilitando erosões variáveis que podem progredir até a formação de cavernas, gerando alta condutividade, a barragem pode ser enquadrada no grupo de fundações não convencional. A complexidade das feições geológica da rocha da fundação, aliada ao pouco detalhamento através de investigações, na ocasião dos estudos do projeto e implantação das obras, levou a adoção de soluções que se mostraram inadequadas a segurança do barramento. Isto está demonstrado pelos diversos problemas que vem se repetindo ao longo dos anos e pelas recuperações realizadas, objetos desta dissertação.

Em paralelo, deve se fazer menção ao monitoramento contínuo e as inspeções regulares que a COGERH faz desde 2002, com cuidadoso registro das informações resultantes. E, ainda de igual ou maior importância, é preciso ressaltar a implantação da recente Lei 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens torna obrigatória a tomada de providências para a segurança dessas estruturas. O que levou o Estado a elaborar recentemente um termo de referência para estudos e proposição de uma solução tecnológica adequada à correção dos problemas registrados na barragem Jaburu I. A disponibilidade das informações registradas pela COGERH, juntamente com o resgate de dados anteriores, facilitou a elaboração do citado termo de referência assim como a realização deste trabalho.

5.2 Conclusões

Pretendeu-se neste trabalho, mostrar os registros e avaliar as remediações realizadas no tratamento de fundações em complexos fraturados e permeáveis, e a importância do monitoramento contínuo com inspeções de rotina que constituem parte do processo de recuperação. As três décadas de vida da barragem Jaburu I servem como exemplo detalhado destas providências. Esta barragem apresenta um histórico marcado por eventos preocupantes, combinados com medidas reparatórias imediatas e parciais, cujos resultados nem sempre se concretizaram de forma eficiente e definitiva.

Nas ações adotadas em todas as campanhas de recuperações, para controlar o fluxo subterrâneo, sempre foi empregada a mesma solução: injeção de calda de cimento, ou mesmo argamassa e, eventualmente, a aplicação de asfalto. Verifica-se através do contínuo monitoramento realizado pela COGERH, que as medidas adotadas demonstram relativa eficiência na fundação do corpo da barragem, no sentido de manter o fluxo subterrâneo em valores relativamente constantes, sujeitos apenas às variações do NA do reservatório e sem indicações de carreamento dos materiais menos consolidados presentes na rocha da fundação. No entanto, na ombreira esquerda da barragem, tais procedimentos adotados não apresentam eficácia, pelo menos a médio e longo prazos, pois o primeiro tratamento nesta área resistiu cerca de 20 anos e o último durou menos de um ano, sendo seguidos por aumento do fluxo e sinais de carreamento de material injetado e natural.

Neste trabalho, conclui-se, que a rocha da fundação, principalmente nas ombreiras constituída por arenitos fraturados, entremeados de feições constituídas por material siltoso

menos consolidado, contribui fortemente para geração de caminhos preferenciais do fluxo que segue carreando sedimentos, mesmo após a realização das intervenções, e emerge em pontos localizados a jusante da barragem. Esta situação de risco soma-se o significativo avanço no processo erosivo no canal de retorno do vertedouro, que se acentuou no inverno de 2009. Neste canal, as placas rochosas sofreram considerável ampliação, contribuindo para instabilidades de blocos nos bordos da frente da erosão.

No entanto, cabe ressaltar que apesar destas ocorrências no substrato rochoso, as condições de operação da barragem Jaburu I apresentam-se normais e sobre controle de um abrangente sistema de instrumentação geotécnica. Este sistema é composto basicamente por piezômetros Casagrande, instalados na fundação e no aterro e medidores de vazão disseminados a jusante da barragem.

Atualmente o controle e monitoramento do desempenho geotécnico da barragem estão centralizados nos registros dos medidores de vazão, principal indicador no planejamento e tomada de decisão das ações corretivas nas campanhas de recuperação. Enquanto nos piezômetros, o acompanhamento consiste em manter o banco de dados alimentado com os registros dos níveis d'água nos referidos instrumentos, que não apresentam sinais de anormalidade.

5.3 Recomendações

Como principal recomendação registra-se o desenvolvimento do Projeto Executivo de Reabilitação da Barragem Jaburu I, objeto do citado termo de referencia. Através deste projeto devem ser identificados e discutidos diversos processos tecnológicos aceitos e difundidos na engenharia, de modo a serem definidas soluções para impermeabilização, consolidação e estabilização da rocha da fundação da barragem e vertedouro. Entre as possíveis soluções segure-se que a execução de colunas de “jet grouting” e (ou) cortinas de estacas secantes sejam examinadas juntamente com outras técnicas de impermeabilização disponíveis.

Além disso, para o sucesso do Projeto Executivo de Reabilitação da Barragem Jaburu I, com efetiva garantia de segurança do empreendimento, devem ser alcançados os objetivos específicos listados a seguir:

- a) Realização de estudos geológicos e geotécnicos embasados em um programa de sondagens e ensaios geotécnicos;
- b) Mapeamento geológico (litoestrutural) do substrato rochoso da fundação;
- c) Projeto de impermeabilização e estabilização dos canais de aproximação e restituição do vertedouro e estrutura de vertimento/dissipação no final do canal de restituição;
- d) Projeto da estrutura de travessia sobre o canal do vertedouro;
- e) Equacionamento da solução de reabilitação/consolidação da rocha da fundação da barragem, e nas ombreiras, com destaque para a esquerda, onde ocorre uma considerável percolação;
- f) Consolidação final do projeto e planejamento da execução das etapas de implantação, estabelecendo a ordem de prioridade para as partes constituintes do mesmo.

Como se trata de uma barragem que pontua critérios favoráveis dentro da classificação quanto ao dano potencial associado, de acordo com a resolução nº 143/2012 em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334/2010, cabe recomendar ao empreendedor o desenvolvimento do Plano de Ação Emergencial – PAE.

REFERÊNCIAS

- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Ensaio de Permeabilidade em Solos – Orientação para sua execução**. São Paulo, SP - Boletim nº 4, 1ª Edição, 1976.
- ASSIS, A.P. et. al. **Apostila do Curso de Barragens**. UnB, Brasília, DF, 170p. 2003.
- BOURDEAUX, G.H.R.M. **Projeto e Construção de Barragens de Terra e Enrocamento**. Editora Internacional Engenharia S.A., Rio de Janeiro, RJ, 300 p. 1979.
- BENNETT, P.T. **The Effect of Blankets on Seepage Through Pervious Foundations** – Transactions of the American Society of Civil Engineers. Vol. 111, No. 1, January 1946, pp. 215-228.
- BRASIL – MI – Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragem**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 1ª Edição. 148p.
- BRASIL – MI – Ministério da Integração Nacional. **Manual de Preenchimento de Fichas de Inspeção de Barragem**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005. 1ª Edição. 117p.
- CASAGRANDE, A. **Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams**. Souce: Géotechnique, Volume 11, Issue 3, 01 September 1961, pp 161-182.
- CARVALHO, L.H. **Curso de Barragens de Terra com Vistas ao Nordeste Brasileiro**. Fortaleza, CE: DNOCS, 1996.
- CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. Núcleo Regional do Paraná. **Dicionário de barragens: linguístico** / Comitê Brasileiro de Barragens. Núcleo Regional do Paraná. – Porto Alegre: Nova Prova. 2010
- CEDERGREN, H. R. **Seepage Control in Earth Dams**, in Embankment Dam Engineering. eds R.C Hirschfeld and S.J. Poulos, Wiley, New York, p 21-45, 1977
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage and Flow Nets**. 3ª Edição, John Wiley and Sons, New York, Estados Unidos, 465 pp. 1989.
- COBA. **Projeto Executivo de Recuperação da Barragem Jaburu I**. Missão de Inspeção à Barragem, Identificação e Caracterização Preliminar da Situação. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 77p. Dezembro de 1998.
- COBA. **Empreitada de Recuperação da Barragem Jaburu I: Observação, Análise de Segurança e Assistência Técnica**. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 15p. Abril de 2000.
- COBA. **Relatório dos Serviços de Supervisão e Acompanhamento da Execução das obras de Recuperação da Barragem Jaburu I**. Relatório Final – Como Construído Volume I – Textos. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 354p. Janeiro de 2004.

COGERH - **Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM.** COGERH, Fortaleza, CE. 2008.

COGERH - **Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – Tomo I.** COGERH, Fortaleza, CE. 2010.

COGERH - **Boletins das Sondagens dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – Tomo II Volumes 1 e 2.** COGERH, Fortaleza, CE. 2010.

COGERH - **Registros Fotográficos dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – Tomo III.** COGERH, Fortaleza, CE. 2010.

COGERH - **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Riscos e Inspeções 2011.** COGERH, 365 pág. Fortaleza, CE. 2012.

COGERH - **Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará, Monitoradas pela COGERH.** Fortaleza, CE. 2012.

CREAGER, W.P. et al. **Engineering for Dams.** New York/USA: Volume I, John Wiley and Sons, 245 p. 1945.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto.** Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 648 p. 1996.

DUNNICLIFF. **Geotechnical Instrumentation for Field Performance.** John Wiley and Sons, Apr 1, 1988 – Technology & Engineering – 577 pages. Estados Unidos.

FELL et al. **Geotechnical Engineering of Embankment Dams.** A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, Holanda. 1992.

FELL. R; MACGREGOR. p; STAPLEDON. D; BELL.G. (2005). **Geotechnical Engineering of Dams.** London: Balkema

FONTENELLE.A.S. **Proposta Metodológica de Avaliação de Risco em Barragens do Nordeste Brasileiro – Estudo de Caso: Barragens do Estado do Ceará.** 2007. 213p. (Doutorado em Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

GAIOTO. N. **Sistemas de controle de Percolação de Água em Projetos de Barragens de Terra.** Concurso de Livre-Docência. EESC/USP, São Carlos/SP. 1992

GAIOTO. N. **Introdução ao projeto de Barragens de Terra e de Enrocamento.** São Carlos/SP: EESC-USP, 126 p. 2003.

ICOLD - **Monitoring of Dam and their Foundations.** International Comiision on Large Dams Bulletin 62, Washington, EU. 1989.

MARSAL. R.J et al. **Effectiveness of Cutoffs in Earth Foundations and Abutments of Dams.** In: fourth Panamerican conference on soil Mechanics and Foundation engineering, Volume I, San Juan / Puerto Rico – Proceedings – American Society of Civil Engineers. P 237 – 312. 1971.

MENESCAL,R.A. **Gestão da Segurança de Barragens no Brasil – Proposta de um Sistema Integrado, Descentralizado, Transparente e Participativo**. 2009. 769p (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PORTO, E.C. **Crítérios para Derterminação de Vazões pela Fundação de Barragens com Base nos Ensaio de Perda d'Água: O Caso da usina Hidreletrica de Itaipu**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Construção Civil) da Universidade Federal do Paraná. 104 pp. Curitiba/PR. 2002.

SARÉ. A.R. **Análise das Condições de Fluxo na Barragem de Curuá-Una, Pará**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ, 149 p. 2003.

SHERARD, J. L., WOODWARD, R. J., GIZIENKI, S. F, CLEVINGER, W.A. **Earth and Earth Rock Dams**. John Willey & Sons, New York, USA, 1 ed., 725 p. 1963

SHERARD, H.R. **Seepage, Drainage and Flow Nets**, New York/USA, John Wiley and Sons, 534 p. 1967.

OLIVEIRA. A.G.S. **Análise da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Drenagem Utilizando em Fundações Permeáveis de Barragem de Terra**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – SP. 188 pp. 2008.

SILVA FILHO, F.C. **Tapetes Impermeabilizantes a Montante da Barragem sobre Aluviões Permeáveis**. Dissertação (Programa de Engenharia Civil) COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, 109p, 1991.

SILVEIRA. J.F.A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. Oficina de Textos, São Paulo-SP, 413p. 2006

SOUSA.L.N., MALVEIRA.V.T. **Monitoramento/Recuperação da Fundação da Barragem Jaburu I**. In: XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro-RJ. 2011.

SOUZA.V.A. **Simulação do Regime de Fluxo no Maciço de Terra Compactada da Barragem Jaburu I**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SRH – Secretaria dos Recursos Hídricos. **Serviços de Injeção de Cimento e Asfalto na Barragem Jaburu em Tianguá, Ceará**. TECNOGEO 208 pp. 8 plantas. Fortaleza, CE. 1990.

SRH – Secretaria dos Recursos Hídricos. **Tratamento de Fundação da Barragem Jaburu em Tianguá, Ceará. Relatório n2**. TECNOGEO 147 pp. 3 plantas. Fortaleza, CE. 1993.

SRH – Secretaria dos Recursos Hídricos. **13ª Reunião do Painel de Inspeção e Segurança de Barragens**. Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. 1997.

SRH – Secretaria dos Recursos Hídricos. **Estudos Básicos – Resultados dos Estudos Geológicos/Geotécnicos**. Consórcio GEODINÂMICA/COBA. 59 pp. 24 plantas. Fortaleza, CE, Brasil. 1999.

USACE. **Seepage analysis and Control for Dam Engineer Manual 1110-2-1901**, Department of the Army, U.S. Army Corp of Engineers, Washington, USA, 390 p. 1986.

USACE. **Hydraulic Design Criteria, Volume 1**. Department of the Army, U.s. Army Corps of Engineers, USA. 1987.

USACE. **General Desing and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams**. Engenieer Manual 1110-2-2300, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, USA, 130p. 2004.

USBR. **Design of Small Dams**. United States Bureau of Reclamation, Department of Interior. United States Government Printing Office, USA, 3 ed, 860 p. 1987.

