

AVALIAÇÃO DE CHEIAS, AS *BUILT* E SISTEMA DE AUSCULTAÇÃO PARA O CASO NORMAL E EXCEPCIONAL DA PCH CASCA III EM ATENDIMENTO À RN696/2015 ANEEL

*EVALUATION OF FLOOD, AS BUILT AND SYSTEM OF AUSCULTATION FOR THE
NORMAL AND EXCEPTIONAL CASE OF PCH CASCA III IN RESPECT TO RN696 /
2015 ANEEL*

Rafael Gustavo Roselli (1); Juliana Martins Pereira (2);

(1) Engenharia Hídrica & MSc Civil Hidráulica, Universidade Federal de Itajubá & Universidade de São Paulo / Enel Green Power

(2) Engenharia Civil & MSc Geotecnia, Universidade Estadual Paulista & Universidade Estadual de Campinas

Professor Doutor Jose Marques Filho

Resumo

A verificação das condições atuais de segurança da barragem da PCH Casca III, considerando a avaliação do evento excepcional ocorrido em 29 de janeiro de 2016, estabelece a relação entre os procedimentos de segurança da barragem para o caso normal e excepcional do empreendimento, assim como as medidas emergenciais executadas, monitoramentos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos com as lições aprendidas, avaliação de cheias, conhecimento de projeto, *as built* e sistema de auscultação face às exigências levantadas pela Lei de Segurança de Barragens nº12.334/2010 e Resolução Normativa nº 696 de 2015 da ANEEL.

Palavra-Chave: Segurança de Barragem, Cheias, Sistema de Auscultação, evento excepcional, procedimentos operacionais

Abstract

The verification of the current conditions of dam safety of the Casca III, considering the evaluation of the exceptional event that occurred on January 29, 2016, establishes the relationship between the dam safety procedures for the normal and exceptional case of the enterprise, as well as the hydrological, hydraulic and geotechnical monitoring with the lessons learned, flood assessment, project knowledge, built-in and auscultation system in the face of the demands raised by the Law of Safety of Dams nº 12.334 / 2010 and Normative Resolution nº 696 of 2015 of ANEEL.

Keywords: Dam Safety, Floods, Auscultation, exceptional event, operational procedures

1 Introdução

O presente trabalho apresenta o estudo relacionando a avaliação de cheias, *as built* e sistema de auscultação para o caso normal e excepcional da PCH Casca III face às exigências levantadas pela Lei de Segurança de Barragens nº12.334/2010 e Resolução Normativa nº 696 de 2015 da ANEEL.

De acordo com o art. 8º da lei nº 12.334/2010, os dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, *as built*, bem como aqueles necessários para operação e manutenção da barragem, regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem, e revisões periódicas, incluindo as revisões de cheias de projeto do sistema extravasor, são itens fundamentais e que devem ser atendidos no plano de segurança de barragens.

Outro item importante são as inspeções regulares, que devem considerar a avaliação da instrumentação disponível na barragem, indicando necessidade de manutenção, reparo ou aquisição de equipamentos.

Conforme RN696/15 a inspeção especial deve ser realizada após ocorrência de evento excepcional (abalo sísmico, galgamento, cheia ou operação hidráulica do reservatório em condições excepcionais), visando a manutenção ou restabelecimento do nível de segurança da barragem à categoria normal e deverá ser realizada mediante constituição de equipe multidisciplinar de especialistas.

Segundo a matriz de classificação quanto à categoria de risco apresentada pela RN 696/15 (Anexo I e II), a posse de um Plano de Segurança, que inclui o sistema de auscultação da barragem, pode reestabelecer o nível de segurança da barragem à categoria normal, o que implicará ao empreendedor em maiores prazos com relação às periodicidades das avaliações e, portanto, menores custos.

Contudo, sabe-se que a existência de um sistema de auscultação com instrumentação nem sempre resulta em dados que permitam conhecimento suficiente a fim de se tomar medidas preventivas ou corretivas ou mesmo comprovar teorias de projeto.

2 Problema Analisado

Foi constatada no dia 30/01/2016, a presença de trincas longitudinais, ao longo da pista na crista da barragem de terra/enrocamento devido a sobre-elevação acima do nível máximo *maximorum* do reservatório. As intervenções de engenharia na inspeção especial foram necessárias devido a este evento excepcional.

As verificações das condições de segurança da barragem da PCH Casca III, assim como as medidas emergenciais executadas, monitoramentos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos com as lições aprendidas, serão apresentadas nos itens a seguir, relacionadas com as exigências da lei 12.334/10 de segurança de barragens e critérios do órgão fiscalizador conforme estabelece a Resolução Normativa nº696/15 ANEEL.

3 Objetivos

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o evento excepcional ocorrido e estabelecer a relação entre os procedimentos de segurança da barragem, matriz de risco em função da avaliação de cheias, *as built*, sistema de auscultação e plano de segurança de barragem para o caso normal e excepcional da PCH Casca III.

3.2 Objetivos Específicos

- Verificar as condições de cheias;
- Criação do sistema de alerta de cheias;
- Informações de projeto existentes, *as built* e instrumentação disponível para a PCH Casca III para posteriores análises e recomendações do sistema de auscultação.

4 Avaliação Hidrometeorológica e Sedimentológica

A capacidade de projeto necessária de um extravasor (vazão máxima através do extravasor) depende da cheia de projeto (hidrograma do afluxo do reservatório). Para a determinação da cheia de projeto de um extravasor deve-se relacionar o grau de proteção que se deva proporcionar à barragem, que por sua vez depende do tipo da barragem (terra, concreto) e das consequências de uma eventual ruptura com os procedimentos do Plano de Ação Emergencial previstos na RN696/15 ANEEL.

A PCH Casca III possui um sistema extravasor capaz de descarregar a vazão de projeto milenar, verificada através da atualização dos estudos de cheias e verificação da capacidade de descarga total, conforme determina a Revisão Periódica de Segurança de Barragens – RPS da RN696/15 ANEEL. A próxima atualização deverá ser realizada até 2025, de acordo com a classe C da barragem, autodeclarada no Formulário de Segurança de Barragem da referida resolução.

Os registros das precipitações intensas, vazões afluentes e níveis do reservatório, além da verificação das características fisiográficas, acompanhamento dos processos erosivos da bacia hidrográfica do rio Casca, assoreamento do reservatório e operações hidráulicas das comportas do vertedouro da PCH Casca III, compõem importantes fatores de alertas de situações excepcionais de segurança da barragem. Os itens a seguir, apresentam as principais formas de identificação, avaliação e análises destes fatores.

4.1 Características fisiográficas da bacia hidrográfica

De acordo Tucci (2009), a variação do nível o rio ou de vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica.

Para a interpretação dos resultados nos estudos hidrológicos do trecho do rio Casca e avaliação das correlações empregadas na etapa de avaliação de cheias são importantes as análises de aspectos fisiográficos da bacia. Estas características incluem área, perímetro, forma, densidade de drenagem, declividade do rio e tempo de concentração

O formato circular da área contribuinte da bacia hidrográfica do rio Casca até a barragem da PCH Casca III, indica alta potencialidade de picos elevados de cheias (Figura 1).

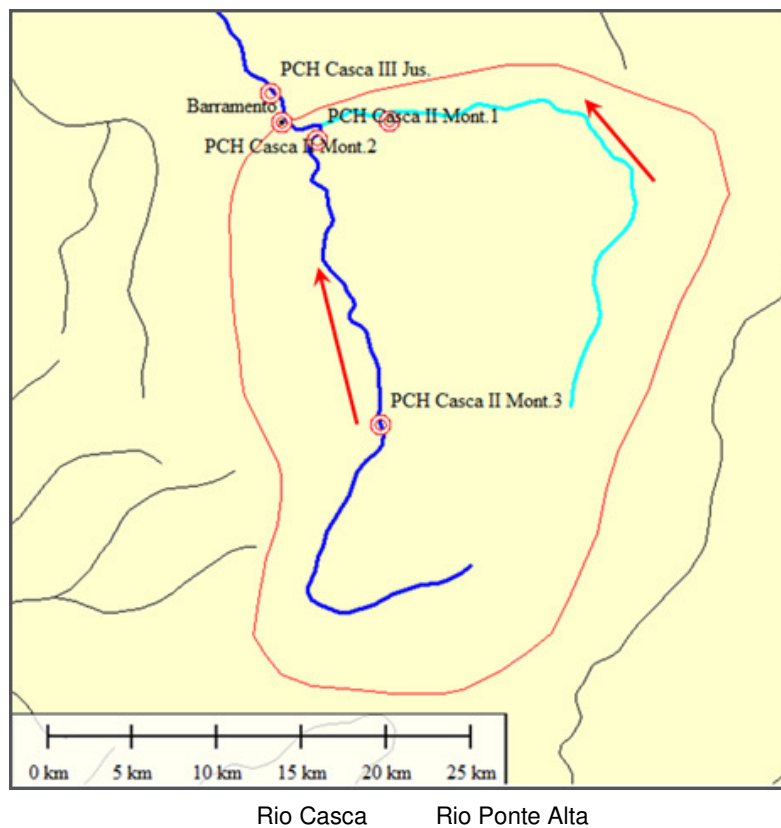


Figura 1 - Área contribuinte da PCH Casca III e localização das estações telemétricas
Apresentação Enel Green Power / SEMA-MT 18/05/2016

O tempo de concentração é definido pelo tempo necessário para que, dada uma mesma precipitação, toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial na seção de controle do rio.

Adotou-se inicialmente a fórmula do *Soil Conservation Service*, segundo as diretrizes para projetos de PCH da Eletrobrás.

$$t_c = 0,95 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

Onde:

- t_c é o tempo de concentração, em horas;
- ΔH é diferença entre cotas do ponto mais afastado e o considerado, igual a 400 m;
- L é o comprimento axial da bacia, igual a 35 km.

Substituindo-se os dados anteriores, temos $t_c = 5,75$ h.

4.2 Uso e ocupação do solo a montante e assoreamento do reservatório

Tucci (2009) apresenta as medidas estruturais necessárias para reduzir o risco de enchentes, e cita a importância do controle da cobertura vegetal no processo de

precipitação-vazão, que reduz as vazões máximas, devido ao amortecimento do escoamento, enquanto que o aumento da erosão do solo implica na redução da área de escoamento dos rios e consequente aumento de níveis.

No ano de 2013, a Enel Green Power realizou um sobrevoo na área contribuinte da PCH Casca III e identificou diversas influências do uso e ocupação do solo que podem impactar de forma significativa nas cheias e operações hidráulicas com o assoreamento do reservatório da PCH Casca III.

O rio Casca escoa em um vale bem encaixado e montanhoso com mata ciliar com algumas erosões pontuais e ausência de mata ciliar (Figura 2-a), supressão vegetal para implantação de pastagens (Figura 2-a) e captações de irrigações destinadas ao agronegócio para diversas plantações (Figura 2-c e d).

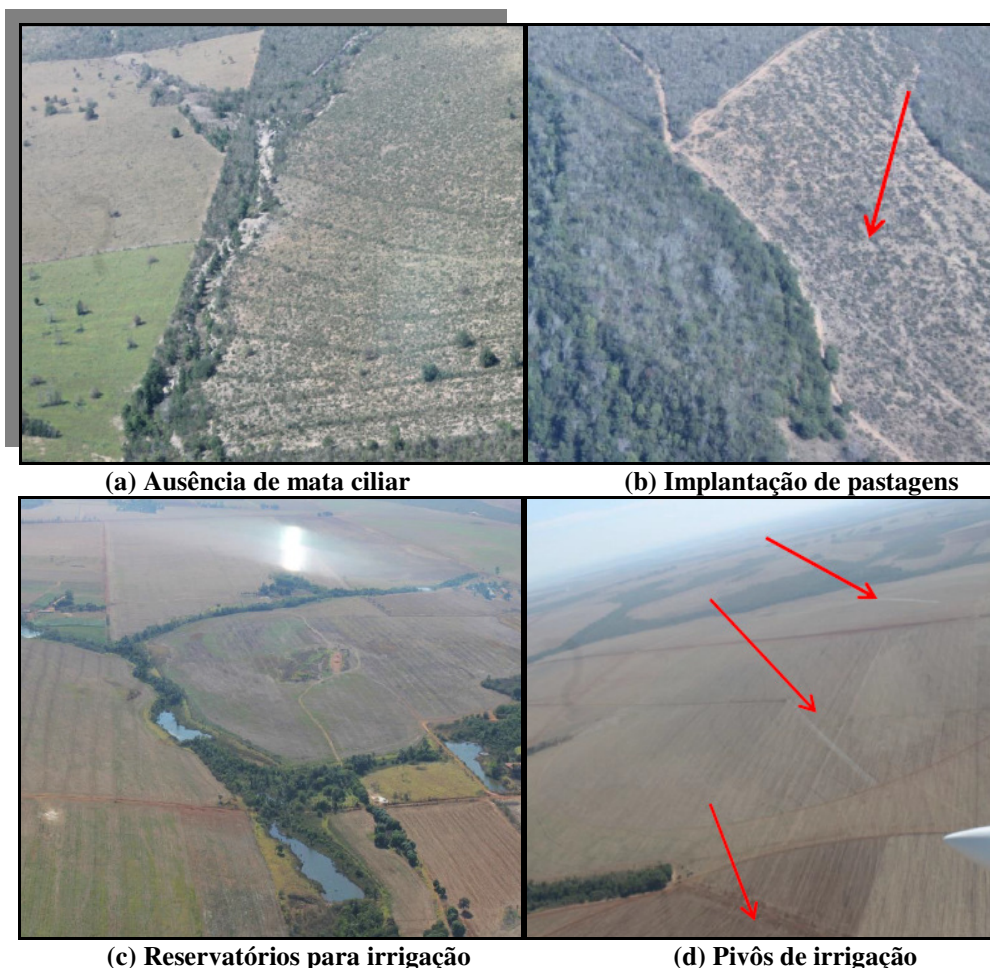


Figura 2 –Sobrevoo realizado em 20/09/2013
Área contribuinte da PCH Casca III

A PCH Casca III apresenta processo de assoreamento crítico, com impactos negativos na geração e retiradas de sedimentos com dragagens dispendiosas para o setor de Operação e Manutenção. O processo de dragagem é frequente e o material retirado não possui valor comercial na região, sendo cada vez mais difíceis novas áreas de bota fora

licenciadas. A retirada de sedimentos depositados por meios materiais é raramente viável. As comportas do vertedor possibilitam descarga de uma parte do material depositado, porém seu efeito não alcança uma distância muito a montante da barragem (Linsley & Franzini, 1978).

Assim como a soleira da tomada d'água, os sedimentos no reservatório atingiram toda a soleira do vertedouro da PCH Casca III. Deste modo, é necessário verificar as curvas de descarga das 3 comportas do vertedor, devido a redução da capacidade pela redução do coeficiente de descarga.

O volume morto, com capacidade reservada ao assoreamento de projeto considerando a vida útil do reservatório, é uma maneira negativa de abordar o problema, pois de modo algum reduz a acumulação de sedimentos e apenas adia a data em que o problema se tornará sério (Linsley & Franzini, 1978), como é o caso da PCH Casca III, onde a vida útil já se esgotou e medidas corretivas são adotadas atualmente, com verificações de atualizações de CxAv e viabilidades técnica-econômicas de manutenções até o término da sua concessão no ano de 2027.

Conforme determina o artº 14 da RN696/15 ANEEL, a atualização de informações hidrológicas na respectiva bacia hidrográfica, critérios de projeto (estabilidade das estruturas) e de condições de uso e ocupação do solo a montante são fundamentais para a RPS, prevista para a PCH Casca III em 2025, segundo a classe C da barragem.

4.3 Avaliações de Cheias das Estações telemétricas na Bacia Hidrográfica do Rio Casca

Em atendimento à Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº03/2010, a Enel Green Power transmite dados de níveis, precipitação e vazões a cada hora, pelo sistema hidroweb/ANA das estações indicadas na Figura 1, e listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Listagem de estações hidrométricas associadas à usina hidrelétrica

Estação	Código Flu	Código Plu	Tipo	Início da Operação
PCH Casca III Barramento	66170500	-	Lmnimétrica	12/10/2013
PCH Casca III Jusante	66170600	01555015	Plu-Fluviométrica	12/10/2013
PCH Casca II Montante 3	66164600	01555017	Plu-Fluviométrica	12/10/2013
PCH Casca II Montante 1	66165000	01555013	Plu-Fluviométrica	11/10/2013
PCH Casca II Montante 2	66170100	01555016	Plu-Fluviométrica	11/10/2013

4.3.1 Registros de precipitações intensas e recorrências na Bacia do Rio Casca

Nos dias 29 e 30/01/2016 ocorreram vários eventos de precipitações intensas consecutivos, registrados nas diferentes estações telemétricas da bacia hidrográfica do rio Casca. Esses eventos danificaram os acessos principais à usina, com erosões nas pistas

e desmoronamento de pontes, sendo o acesso ao sítio realizado através de caminhos alternativos. As tabelas 2 e 3 indicam as precipitações notáveis registradas.

Tabela 2 – Precipitações acumuladas (mm)

Intervalo	24 horas			
Estação Telemétrica	01555013	01555016	01555017	01555015
29/01/2016 00:00 as 23:00	91,8	109,6	98,6	85,8
30/01/2016 00:00 as 23:00	94,2	100,4	38,6	115,0
Intervalo	12 horas			
29/01/2016 03:00 as 14:00	90,4	108,8	97,6	85,0
30/01/2016 00:00 as 11:00	70,2	76,8	26,4	93,8
Intervalo	6 horas			
29/01/2016 08:00 as 13:00	56,4	87,4	84,8	54,0
30/01/2016 01:00 as 06:00	53,2	56,2	18,2	72,0
Intervalo	1 hora			
29/01/2016 as 11:00	17,0	19,6	25,0	18,8
30/01/2016 as 04:00	19,4	23,4	3,0	21,4

Tabela 3 – Intensidades das precipitações (mm/h)

Intensidade	24hs			
Estação Telemétrica	01555013	01555016	01555017	01555015
29/01/2016 00:00 as 23:00	3,8	4,6	4,1	3,6
30/01/2016 00:00 as 23:00	3,9	4,2	1,6	4,8
Intensidade	12hs			
29/01/2016 03:00 as 14:00	7,5	9,1	8,1	7,1
30/01/2016 00:00 as 11:00	5,9	6,4	2,2	7,8
Intensidade	6hs			
29/01/2016 08:00 as 13:00	9,4	14,6	14,1	9,0
30/01/2016 01:00 as 06:00	8,9	9,4	3,0	12,0

A tabela a seguir apresenta a precipitação máxima (mm/h) na estação Ponte Alta (01555000) em Chapada dos Guimarães-MT, à montante da estação PCH Casca II Montante 2 (01555016) na bacia hidrográfica do rio Casca, de acordo com Embrapa (2011).

Tabela 4 – Precipitação máxima (mm/h) em Chapada dos Guimarães, MT, Estação Ponte Alta (01555000) – Fonte: Embrapa (2011)

Duração	Período de retorno (anos)							
	2	3	4	5	10	15	20	50
5 min	120,7	134,9	144,0	150,7	170,6	181,8	189,6	214,3
10 min	95,8	107,1	114,3	119,7	135,4	144,3	150,6	170,2
15 min	82,8	92,6	98,8	103,4	117,1	124,7	130,1	147,1
20 min	71,9	80,3	85,7	89,7	101,6	108,3	112,9	127,6
25 min	64,6	72,2	77,1	80,7	91,3	97,3	101,5	114,7
30 min	59,2	66,1	70,6	73,9	83,6	89,1	93,0	105,0
1 h	40,0	44,7	47,7	49,9	56,5	60,2	62,8	71,0
6 h	11,4	12,8	13,6	14,3	16,1	17,2	17,9	20,3
8 h	9,3	10,4	11,1	11,6	13,1	14,0	14,6	16,5
10 h	7,8	8,7	9,3	9,7	11,0	11,8	12,3	13,9
12 h	6,7	7,5	8,0	8,4	9,5	10,2	10,6	12,0
24 h	4,0	4,4	4,7	5,0	5,6	6,0	6,2	7,0

Através dos resultados apresentados na Tabela 3, encontram-se as seguintes recorrências para a estação tele-pluviométrica PCH Casca II Montante 2 (01555016) na Tabela 4:

- 24 horas = TR~4 anos
- 12 horas = TR~7 anos
- 6 horas = TR~6 anos

4.3.2 Registros de níveis do reservatório

Em decorrência das chuvas intensas na área da bacia, a montante do barramento, uma onda de cheia se aproximou rapidamente do reservatório de Casca III, provocando uma subida rápida do nível d'água, que ultrapassou o nível máximo *maximorum* previsto e atingiu as proximidades da crista da barragem de terra.

Através do registro da estação telemétrica de Barramento (66170500), identificou-se a evolução do nível do reservatório da PCH Casca III entre os dias 28/01/2016 e 02/02/2016 (Figura 3).

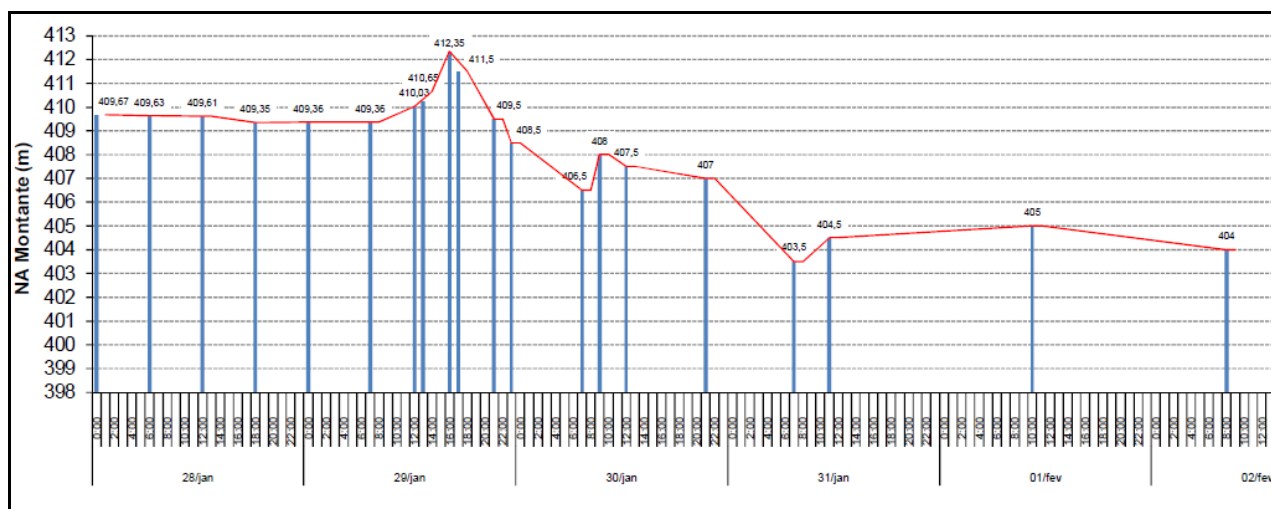


Figura 3 – Evolução do nível do reservatório – Enel Green Power

4.3.3 Vazões afluentes e recorrências

As vazões afluentes observadas nas estações telemétricas estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Vazões máximas afluentes (m³/s)

Estação Telemétrica	29/01/2016		30/01/2016	
	Vazão	Hora	Vazão	Hora
Jusante	136,89	15:00	52,52	12:00
Montante 1	57,95	16:00	17,40	8:00

O período de retorno correspondente de cada estação, pode ser associado ao local de barramento do complexo Casca da Tabela 6.

Tabela 6 – Vazões Máximas Diárias
Eixos das Barragens do Sistema (m³/s) – Enel Green Power 2010

T (anos)	Casca III (AD=765 km ²)	Ponte Alta (AD=273 km ²)
Estação Telemétrica	Jusante	Montante 1
2	84,3	38,2
5	101,6	45,2
10	113,0	49,8
25	127,5	55,7
50	138,3	60,0
100	148,9	64,3
200	159,6	68,6
500	173,6	74,2
1.000	184,2	78,5
2.000	194,8	82,8
5.000	208,8	88,4
10.000	219,4	92,7

Logo, o período de retorno aproximado, correspondente a cada estação está representado a seguir:

- Jusante: 45 anos
- Montante 1: 30 anos

5 Sistema de Alarme de Cheias

Os setores de Segurança de Barragens da Enel Green Power e a área de automação da empresa, criaram um sistema para alarme de cheias baseado no banco de dados das estações telemétricas da bacia hidrográfica do rio Casca, que atendem a Resolução Conjunta nº03 ANA/ANEEL - 2010.

A forma de obtenção de dados ao sistema de alarme é realizada em tempo real em conjunto com a transmissão horária do sistema da ANA.

A atualização dos procedimentos operacionais das comportas e fases de alarme estão em desenvolvimento para atualização no sistema. Porém, as informações de vazões, níveis do reservatório e fases de alerta já estão implantadas para a estação montante 1 conforme Figura 4 a seguir.

O&M BRASIL Hidro - Alarmes de cheia -> Parâmetros
✕



Alarmes de cheia - Parâmetros

Nome da usina: PCH Casca II

Replicar parâmetros para todas as estações desta usina?
☒ Não ☐ Sim

Nome da estação: Montante 1

Classificação por grau de criticidade:

Fases de alarme	NA do reservatório [m]		Vazão [m3/s]		Procedimento	
	De	Até	De	Até	Modificado em	Editar
Situação normal de operação	410,00	410,00	5,0	30,0	21/01/2018 22:09:45	Editar
Fase de atenção	410,00	410,50	30,0	38,2	21/01/2018 22:09:47	Editar
Fase de alarme	410,50	411,00	38,2	45,2	21/01/2018 22:09:50	Editar
Fase potencialmente crítica	411,50	412,35	45,2	56,0	21/01/2018 22:09:52	Editar

Lista de destinatários:

	E-mail (nome.sobrenome)	☐ ☐ ☐ ☐
01.	rafael.gustavo	☒ ☒ ☒ ☒
02.	juliana.pimenta	☒ ☒ ☒ ☒
03.	raphael.rocha	☒ ☒ ☒ ☒
04.	sergio.portelinha	☐ ☒ ☒ ☒
05.	silvano.junior	☐ ☐ ☒ ☒
06.	matteo.francucci	☐ ☐ ☒ ☒
07.	luigi.parisi	☐ ☐ ☒ ☒
08.	adriano.duarte	☒ ☒ ☒ ☒
09.	ciro.karia	☒ ☒ ☒ ☒
10.	cog.brasil	☐ ☒ ☒ ☒
11.	pch.mt	☒ ☒ ☒ ☒

Conteúdo do email:

	Itens	☐ ☐ ☐ ☐
12.	Figura (legenda + detalhes da ocorrência)	☒ ☒ ☒ ☒
13.	Intensidade de chuva	☒ ☒ ☒ ☒
14.	Nível do reservatório	☒ ☒ ☒ ☒
15.	Vazão afluente	☒ ☒ ☒ ☒
16.	Vazão defluente	☐ ☐ ☐ ☐
17.	Procedimento	☒ ☒ ☒ ☒

Limpar Tudo
Salvar

Sair

Figura 4 – Sistema de Alarme de Cheias – Enel Green Power

Os responsáveis de cada área do setor de O&M, assim como os responsáveis das áreas representadas no fluxograma de comunicação do item 8 – Sistema de Comunicação do Plano de Segurança de Barragem da PCH Casca III serão alertados de acordo com a autoridade de cada setor e as inter-relações das diversas funções envolvidas no organograma da estrutura organizacional da empresa, conforme determina o artigo 6º da RN696/15 ANEEL e artigo 8º, parágrafo III da Lei 12.334/10, com a estrutura e prazos para o plano de segurança de barragem.

6 Caracterização Geológico – Geotécnica da Barragem

Conforme disposto no art. 8º da lei nº 12.334/2010, os dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, assim como o *as built* são itens fundamentais e devem ser atendidos no plano de segurança de barragens. Fato este evidenciado diante da necessidade da compreensão do funcionamento da barragem Casca III face ao evento excepcional ocorrido.

Para a barragem em questão estavam disponíveis apenas dados bibliográficos apresentados por Cruz (1996) e Queiroz et. al. (1967) referentes à seção típica da barragem e sua fundação, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6.

Segundo as descrições encontradas, a fundação da barragem é formada por uma laje de arenito silicificado, situada sobre uma sequência de intercalações de arenitos e folhelhos, pertencentes à Formação Furnas. No leito do rio foi detectada a presença de um depósito aluvionar, de areia fina com matacões, de até 17m de profundidade, o qual foi densificado por explosivos.

A barragem é do tipo zoneada com núcleo inclinado de argila compactada e taludes de enrocamento compactado de arenito.

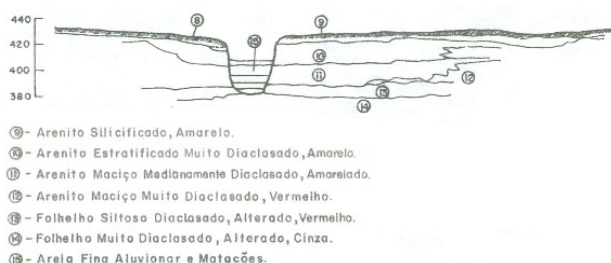


Figura 5 – Seção Geológica Longitudinal da barragem Casca III, Queiroz et. al. (1967)

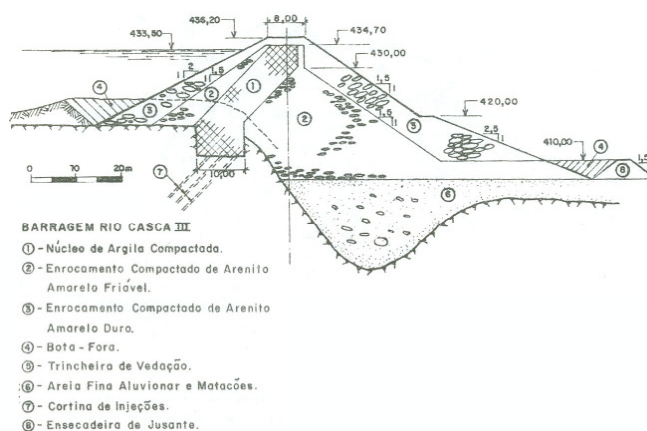


Figura 6 - Seção da barragem sobre o canal do rio, Queiroz et. al. (1967)

Face à escassez de dados com relação à barragem, foi realizado um programa de investigações, consistindo na execução de seis sondagens mistas verticais, uma sondagem a percussão, dois poços de investigação, além dos métodos de levantamentos indiretos de levantamento geofísico, utilizando as técnicas de tomografia elétrica e MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

As investigações realizadas foram importantes para a confirmação do modelo geológico geotécnico disponível da barragem, resultando no *“as built”* das seções geológico geotécnicas da barragem, as quais foram utilizadas para as verificações geotécnicas de segurança da barragem, conforme apresentado no item 7 do presente documento. Destaca-se apenas que os resultados das campanhas de sondagens forneceram valores

baixos a muito baixos de SPT no núcleo, incompatíveis com os requisitos de um núcleo de barragem.

Os métodos geofísicos forneceram informações mais qualitativas do que quantitativa. Sendo que a tomografia elétrica, utilizada para a identificação do fluxo de água, não revelou anomalias significativas nos trechos onde foram observadas trincas na superfície, portanto não foi relevante a elaboração do presente artigo. Já a técnica MASW conseguiu identificar o trecho corresponde ao antigo leito do rio, cujas paredes laterais abruptas configuravam um “*canyon*”, confirmando a seção geológica longitudinal apresentada na Figura 5.

7 Sistema de Auscultação da Barragem

Conforme consta da matriz de classificação quanto à categoria de risco apresentada pela RN 696/15 (Anexo I e II), a presença de um sistema de auscultação na barragem, pode reestabelecer o nível de segurança da barragem à categoria normal. Contudo, é sabido que nem sempre a existência de um sistema de auscultação com instrumentação resulta em dados que permitam conhecimento suficiente a fim de se tomar medidas preventivas ou corretivas em situações específicas ou mesmo comprovar teorias de projeto.

Desta maneira, se faz de fundamental importância a realização de inspeções regulares, que devem considerar a avaliação da instrumentação disponível na barragem, indicando necessidade de manutenção, reparo ou aquisição de equipamentos, além de uma equipe treinada para a obtenção e interpretação dos dados.

7.1 Análise da Instrumentação Existente

Para a barragem em voga, estão instalados 18 piezômetros de tubo aberto, com localização conforme apresentada na Figura 7 e na Tabela 7. Destaca-se que dos instrumentos instalados, apenas 10 estão em funcionamento.



Figura 7 – Planta de Localização da Instrumentação - Enel Green Power

Tabela 7 – Dados de Instalação dos Piezômetros

Instrumento	Cota de instalação [m]	Provável material de fundação
PZ 02	430	contato arenito silicificado e o arenito estratificado
PZ 03	425	contato entre os folhelhos
PZ 04	430	contato entre o arenito maciço e o folhelho
PZ 05	inoperante	
PZ 07		
PZ 08		
PZ 09		
PZ 10	420	contato entre o arenito maciço e o folhelho
PZ 11	420	contato entre os folhelhos
PZ 12	inoperante	
PZ 13	420	contato maciço da barragem e fundação
PZ 14	420	contato da rocha de fundação com o aluvião
PZ 15	inoperante	
PZ 16	410	contato entre os folhelhos
PZ 17	inoperante	
PZ 18	420	contato entre os folhelhos
PZ 19	inoperante	
PZ 20	428	contato entre os folhelhos

Analisando a série histórica de dados de leitura da instrumentação disponível, é possível concluir a seguinte segmentação com relação ao funcionamento da barragem.

1. Na região da ombreira esquerda, conforme apresentado na Figura 8, verifica-se que o PZ-02, instalado no contato superficial entre o arenito silicificado e o arenito estratificado (~cota 420m) apresenta-se seco, indicando o fluxo por camadas mais profundas da rocha. O que é confirmado pelos piezômetros PZ-03, PZ-04 e PZ-11, instalados nos contatos dos folhelhos em camadas mais profundas. A alta pressão indicada pelo PZ-11 justifica a elevada vazão de água que sai pelas feições da rocha da estrutura de saída do túnel de desvio, independentemente do evento excepcional

ocorrido, visto que, durante a rápida elevação do NA do reservatório, estes instrumentos não foram fortemente impactados.

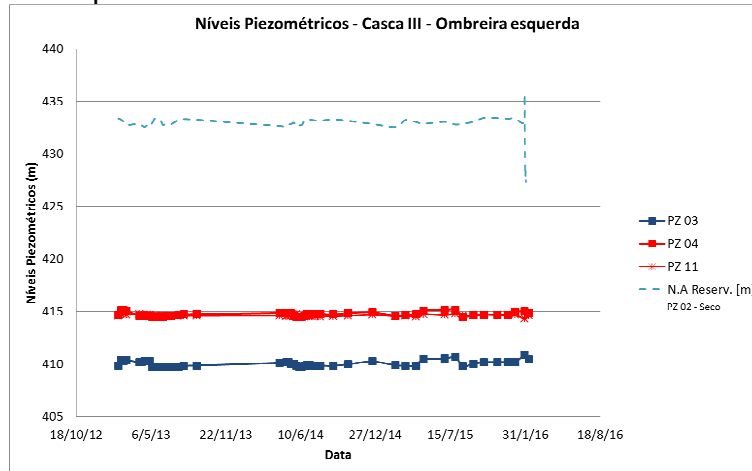


Figura 8 – Níveis Piezométricos da Ombreira Esquerda

2. Na ombreira direita, está em operação apenas o instrumento PZ-20, conforme Figura 9, cuja instalação indica ser no contato entre os folhelhos presentes em profundidade. Este instrumento tem comportamento semelhante ao PZ-03 da margem esquerda, também instalado neste contato, contudo o PZ-20 se mostrou muito mais sensível às variações do reservatório durante a ocorrência do evento extremo, provavelmente devido à sua localização mais próxima ao reservatório, porém ainda com gradientes baixos, não indicando uma perda de segurança da barragem.

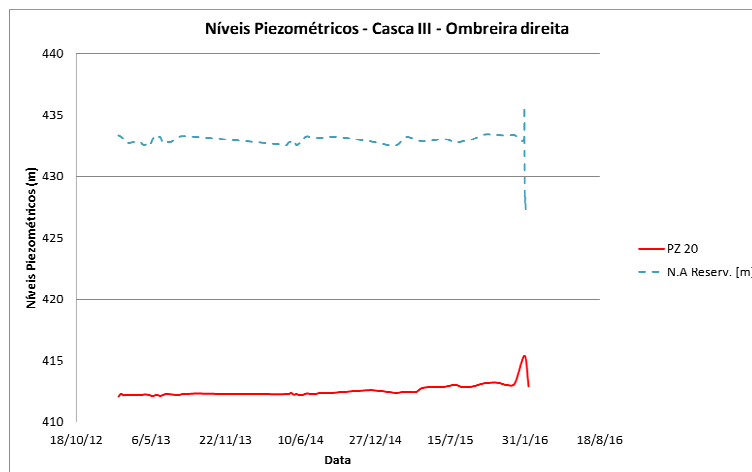


Figura 9 – Níveis Piezométricos da Ombreira Direita

3. Da região da barragem entre o vertedouro e o túnel de desvio, Figura 10, é possível verificar que o PZ-10, instalado no mesmo horizonte que o PZ-04, ou seja, no contato entre o arenito maciço e o folhelho, apresenta comportamento análogo a esse, também sem resposta ao evento excepcional.

O PZ-16 está instalado no contato entre os folhelhos, apresentando comportamento semelhante ao PZ-03, pouco sensível à variação do reservatório. Já o PZ-18, também

instalado neste mesmo horizonte, apresenta comportamento semelhante ao PZ-20, com sensibilidade à alteração do NA do reservatório, contudo sem alcançar elevados gradientes que indiquem perda de segurança da barragem.

Mais especificamente à região correspondente ao antigo leito do rio, verifica-se que o piezômetro PZ-13 está instalado no contato entre a fundação e o maciço compactado da barragem e encontra-se seco, mesmo sob evento excepcional. Em contrapartida o PZ-14 instalado na mesma região, porém no contato da rocha de fundação com o aluvião com matacões apresenta elevada pressão, o que indica que o material permeável do fundo do canal é o condicionante de fluxo para esta região, sendo este instrumento o que teve maior resposta à subida do reservatório, o que está ligado diretamente à segurança do empreendimento, visto o não controle de drenagem a jusante deste aluvião, assim como a ausência de um estudo sobre o potencial de liquefação desta areia, conforme alertado por Cruz (1996).

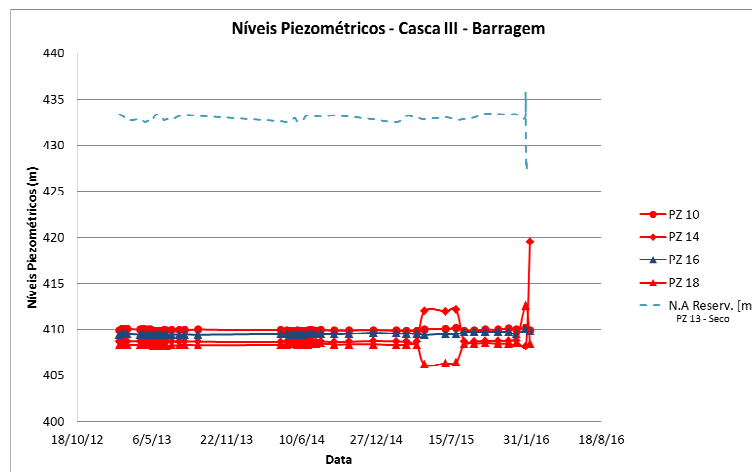


Figura 10 - Níveis Piezométricos Barragem

7 Análises Geotécnicas de Segurança da Barragem

A fim de avaliar a trinca ocorrida na barragem após a subida do NA do reservatório e conseqüentemente a segurança como um todo deste maciço, se fez necessário realizar a análise de estabilidade da barragem, assim como um estudo de tensão deformação para a mesma.

Como input para as verificações geotécnicas, foram utilizados dados obtidos da campanha de investigação realizada com o intuito de proporcionar um “as built” da barragem, assim como dados disponíveis de bibliografia, além das informações obtidas através da instrumentação instalada.

Os dimensionamentos apresentados a seguir foram realizados pela empresa GEOPROJETOS por ocasião da Inspeção Especial referente a este evento excepcional, utilizando os programas GeoStudio (GeoSlope e Sigma/W).

7.1 Análises de Estabilidade

Nas análises de estabilidade, realizadas na seção de maior altura, foram avaliadas as duas condições de solicitação a que a barragem foi submetida no evento excepcional do dia 29 de fevereiro, ou seja, quando o N.A Max. Normal do reservatório se encontrava na El.410,35m (El. 433,70 m) e atingiu a elevação aproximada de 412,85m (El. 436,20m).

Nas análises de estabilidade foram considerados os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de resistência dos materiais

Material	Peso específico (γ) [kN/m³]	Coesão (c') [kPa]	Ângulo de atrito (ϕ') [°]
Núcleo de argila compactada	18	0	30
Areia Fina Siltosa, pouco argilosa	18	0	30
Enrocamento compactado de arenito	22	0	30
Areia fina pouco siltosa, fofa a compacta, com pedregulhos	22	0	30
Rocha	Impenetrável		
Areia fina aluvionar	18	0	30
Bota fora	18	0	30
Ensecadeira	30	0	0

Para a primeira condição analisada, na situação normal com o reservatório no $NA_{Max\ Normal} = 410,35m$ (433,70m) e a linha freática correspondente à observada nas leituras dos piezômetros existentes e condição de regime de fluxo permanente, o Fator de Segurança obtido foi de 1,56, conforme apresentado na Figura 11, o que atende aos Critérios de Projeto da Eletrobrás (2003), que indica o valor de 1,50 como o mínimo.

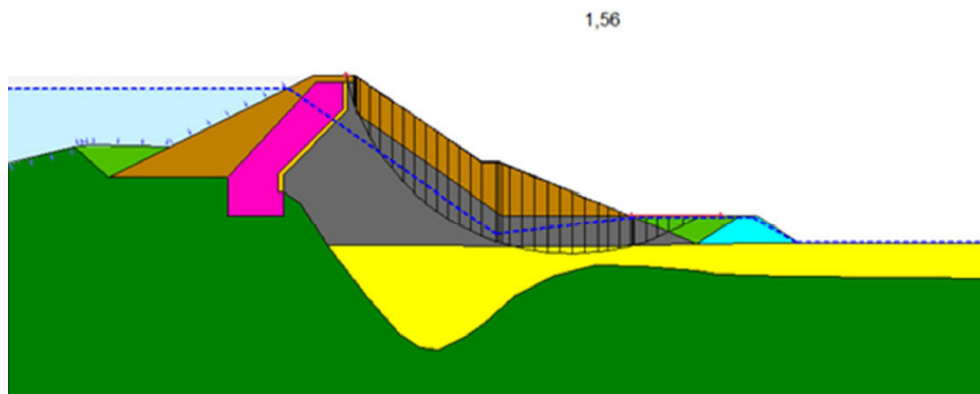


Figura 11 – Análise de Estabilidade – Condição Normal

A segunda análise foi efetuada considerando a elevação do reservatório correspondente ao evento excepcional ocorrido no dia 29 de fevereiro, com o nível do reservatório atingindo a cota da crista da barragem, e linha freática correspondente à observada nas leituras dos piezômetros existentes e condição de regime de fluxo permanente.

Conforme apresentado na Figura 12, o Fator de Segurança obtido foi de 1,31, o que estaria adequado para uma condição excepcional segundo os Critérios de Projeto da Eletrobrás (2003), porém não justifica o aparecimento das trincas a jusante, já que as

tensões atuantes a jusante do maciço da barragem, devido a esses esforços, ainda estariam distantes das tensões de plastificação dos materiais envolvidos.

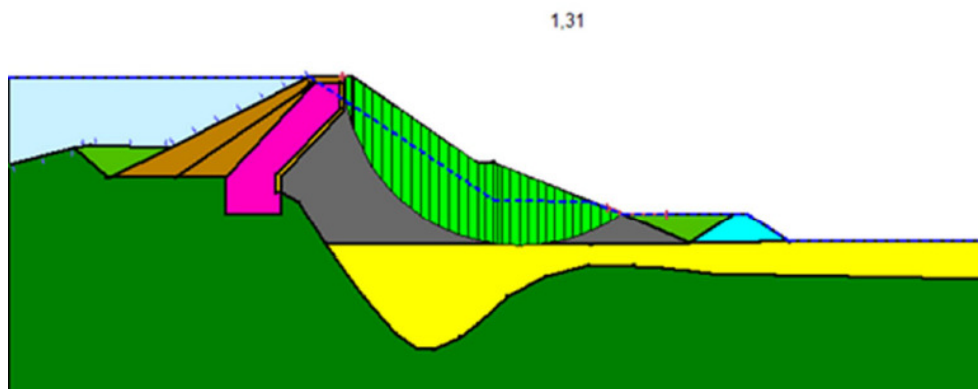


Figura 12 – Análise de Estabilidade – Condição Excepcional

Desta maneira, descartou-se após a realização da Inspeção Especial a possibilidade da ruptura global do talude de jusante.

7.2 Análise de tensão vs deformação

A análise de tensão vs deformação tem como finalidade avaliar, através de um modelo de elementos finitos, a influência sob as deformações no corpo da barragem devido ao carregamento instantâneo ocorrido durante o evento excepcional.

Nas análises de tensão vs deformação foram considerados os parâmetros apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros adotados nas análises de tensão vs deformação

Material	Peso específico (γ) [kN/m ³]	Coesão (c') [kPa]	Módulo de elasticidade (E') [kPa]	Coefficiente de Poisson (ν)
Núcleo de argila compactada	18	15	5.000	0,49
Areia Fina Siltsosa, pouco argilosa	18	-	13.800	0,334
Enrocamento compactado de arenito	22	-	15.000	0,2
Areia fina pouco siltsosa, fofa a compacta, com pedregulhos	22	-	15.000	0,2
Rocha	22	-	200.000	0,334
Areia fina aluvionar	18	-	7.000	0,2
Bota fora	18	-	2.000	0,334
Ensecadeira	20	-	2.000	0,334

Para tanto, foram analisadas três seções transversais, sendo a primeira (Seção B) representante da situação referente ao antigo canal do rio da Casca, onde ocorre uma espessa camada de solo aluvionar arenoso na fundação. A segunda seção analisada (Seção D) encontra-se mais próxima à margem esquerda do canal do Rio da Casca, onde o aluvião da fundação é encontrado em camada de menor destaque. A última seção analisada (Seção F) representa a situação onde a base da fundação da barragem está assente em sua totalidade em rocha e onde o núcleo da barragem tem a sua maior espessura.

Para cada seção de análise foram obtidas as deformações ao longo do maciço e fundação para as condições de carregamento: (i) Funcionamento normal $\rightarrow NA_{montante} =$

410,35m (433,70m); (ii) Evento excepcional $\rightarrow$ $NA_{montante} = 412,85m$ (436,20m); (iii) Rebaixamento do reservatório - $NA_{montante} = 398,65m$ (422,00m).

A Figura 13 apresenta os deslocamentos horizontais através de uma seção vertical entre a crista da barragem (El..436,2m) e a elevação 426,0m da Seção B, na posição que foi identificada a trinca. Observa-se um deslocamento horizontal médio de 4,0cm entre a condição excepcional e a condição em que ocorre o descarregamento devido ao rebaixamento do reservatório.

O gráfico do deslocamento vertical em um plano horizontal na elevação 433,0m da Seção B da barragem é apresentado na Figura 14, plano este que corta o núcleo em argila e parte do espaldar em enrocamento entre as distâncias 57,2m e 63,2m. Verificou-se um recalque diferencial entre essas duas distâncias, após condição de esvaziamento do reservatório até elevação 422,0m, de cerca de 1,0 cm.

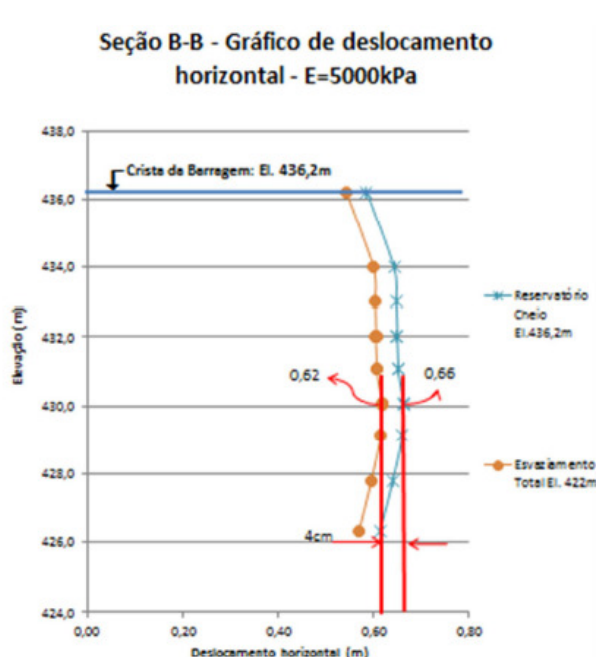


Figura 13 – Seção B: Análise de tensão x deformação – Deslocamento horizontal

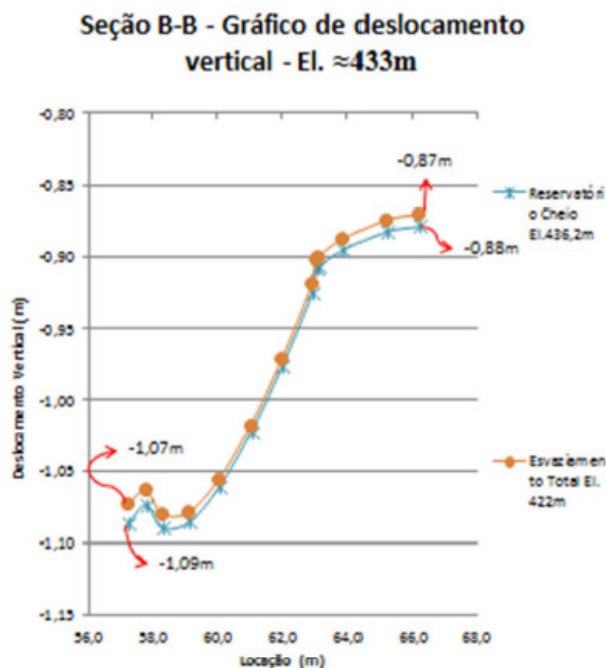


Figura 14 - Seção B: Análise de tensão x deformação – Deslocamento vertical

Da mesma maneira, a Figura 15 apresenta os deslocamentos horizontais através de uma seção vertical entre a crista da barragem (El..436,2m) e a elevação 426,0m da Seção D, na posição que foi identificada a trinca. Observa-se um deslocamento horizontal médio de 3,0cm entre a condição excepcional e a condição em que ocorre o descarregamento devido ao rebaixamento do reservatório.

Já o gráfico do deslocamento vertical em um plano horizontal na elevação 433,0m da Seção D da barragem é apresentado na Figura 16, plano este que corta o núcleo em argila e parte do espaldar em enrocamento entre as distâncias 97,60m e 105,30m.

Verificou-se um recalque diferencial entre essas duas distâncias, após condição de esvaziamento do reservatório até elevação 422,0m, de cerca de 3,0 cm.

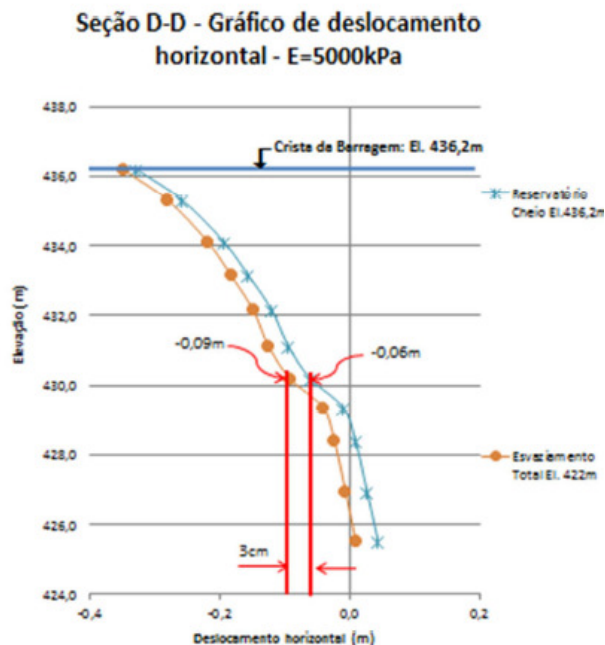


Figura 15 – Seção D: Análise de tensão x deformação – Deslocamento horizontal

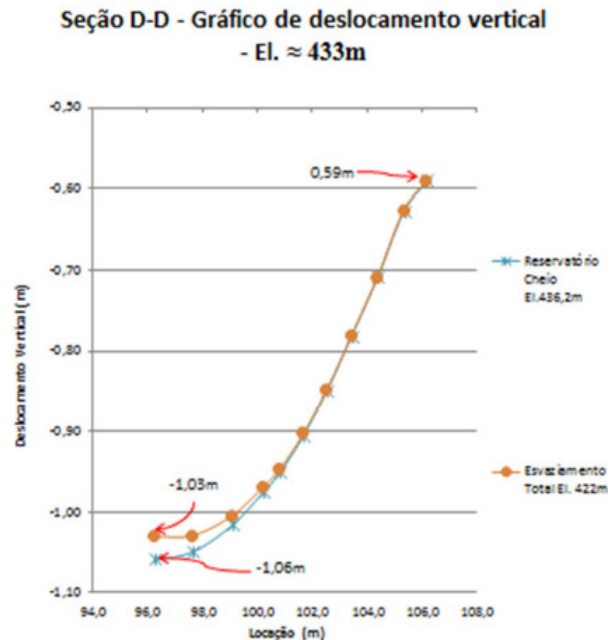


Figura 16 – Seção D: Análise de tensão x deformação – Deslocamento vertical

Finalizando as análises, a Figura 17 apresenta os deslocamentos horizontais através de uma seção vertical entre a crista da barragem (El..436,2m) e a elevação 426,0m na Seção F, na posição que foi identificada a trinca. Observa-se um deslocamento horizontal médio de 1,0cm entre a condição excepcional e a condição em que ocorre o descarregamento devido ao rebaixamento do reservatório.

E o gráfico do deslocamento vertical em um plano horizontal na elevação 433,0m da Seção F da barragem é apresentado na Figura 18, plano este que corta o núcleo em argila e parte do espaldar em enrocamento entre as distâncias 86,80m e 93,90m. Verificou-se um recalque diferencial entre essas duas distâncias, após condição de esvaziamento do reservatório até elevação 422,0m, de cerca de 1,0 cm.

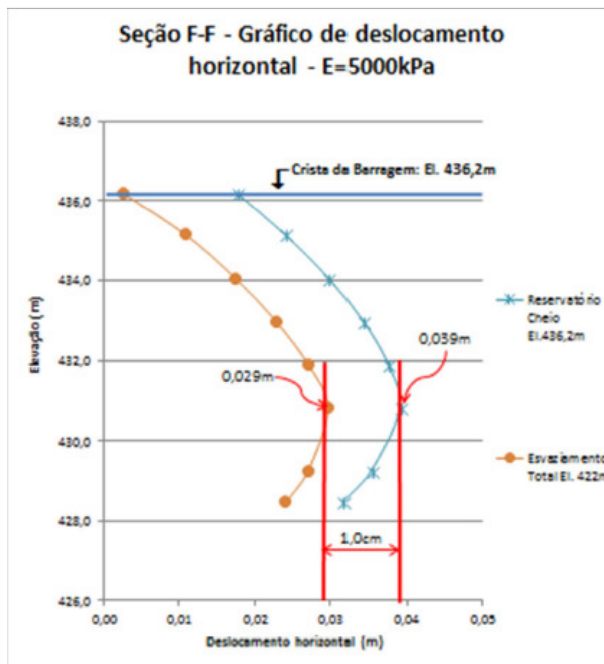


Figura 17 – Seção F: Análise de tensão x deformação – Deslocamento horizontal

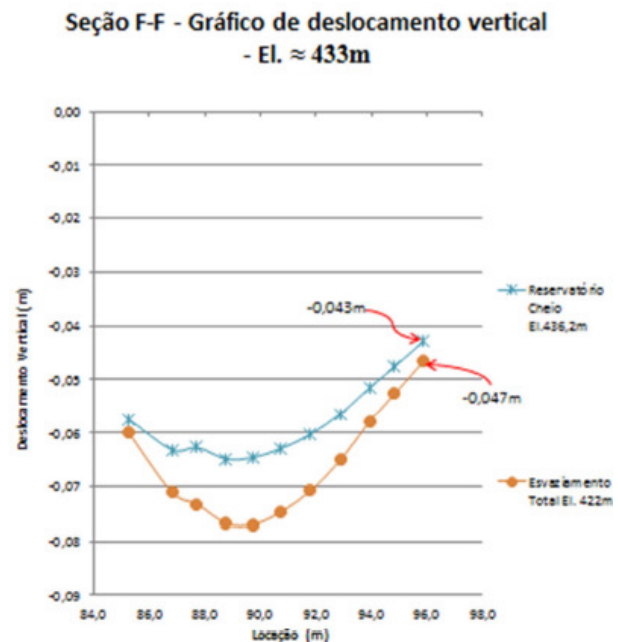


Figura 18 – Seção F: Análise de tensão x deformação – Deslocamento vertical

Através das análises dos modelos de tensão vs deformação, foi possível verificar indícios de que a causa das trincas se deu por deslocamentos diferenciais entre as seções que compõem o barramento.

Comportamento semelhante já havia sido exposto por Divino (2010) quando da avaliação das trincas transversais recorrentes na barragem de Emborcação, influenciadas pela variação do nível do reservatório. De interesse, os processos progressivos de perda de resistência nos contatos entre os enrocamentos por intemperismo, assim como a oscilação do nível do reservatório com indução cíclica de cargas e descargas na barragem, com reflexos cumulativos de deformações plásticas.

Visto os deslocamentos registrados pela análise numérica na barragem de Casca III, em função das oscilações do reservatório, há de se observar alterações em termos de percolação, as quais indicam prejuízo à capacidade vedante do núcleo, principalmente pelo fato das campanhas de sondagens cujos SPTs obtidos no núcleo forneceram valores baixos a muito baixos, incompatíveis com os requisitos de um núcleo de barragem. Para tanto se faz necessário instalar novos instrumentos, assim como realizar ensaios laboratoriais para obtenção de parâmetros confiáveis a fim de refinar tais análises.

Outra questão a ser observada é a variação de recalques observada longitudinalmente pelo modelo de cálculo, provocada pela variação de seção da barragem sobre o “canyon” preenchido com o aluvião para a fundação em rocha.

8 Sistema de Comunicação do Plano de Segurança de Barragem e Plano de Ação Emergencial

O Plano de Segurança da barragem (PSB) da PCH Casca III com o monitoramento através de inspeções regulares e especiais, informações de projeto e avaliação do sistema de auscultação disponível, segue procedimentos conforme níveis de resposta da barragem, com avaliações de anomalias, eventos excepcionais e controles para garantir a segurança da barragem.

A organização da equipe técnica capacitada a realizar atividades relacionadas à segurança de barragens em situação de Emergência está apresentada na Figura 19.

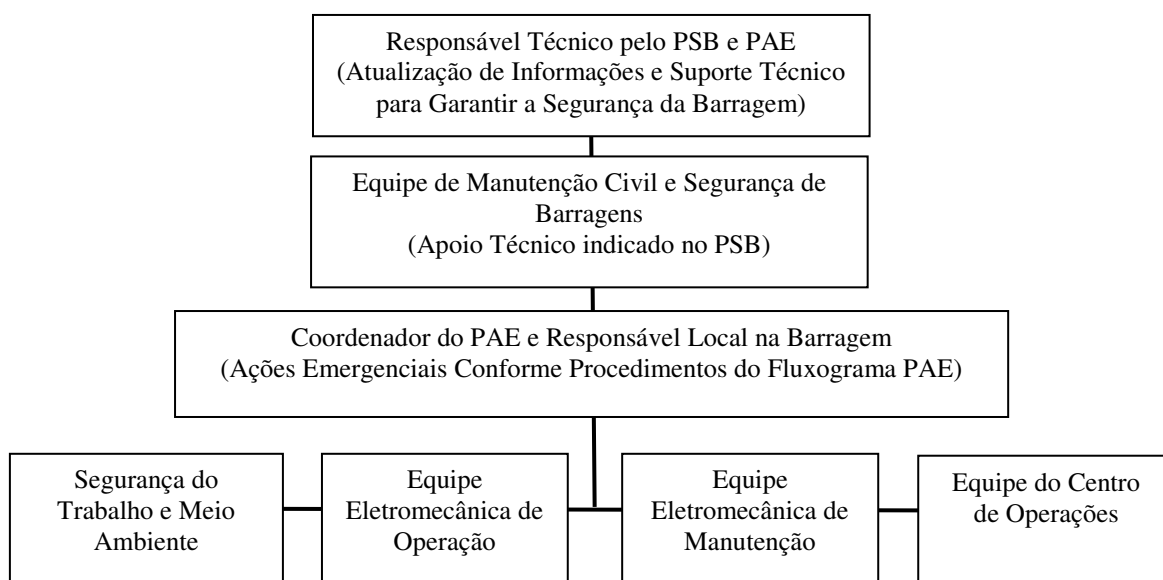


Figura 19 – Organização da Equipe Técnica

O número de profissionais e disponibilidade em operação normal e emergencial da barragem da PCH Casca III, está em conformidade com a diretriz organizacional da Enel Green Power e equipes disponíveis indicadas nas Figuras 20 e 21, com qualificação técnica de segurança de barragens, conforme determina o artigo 6º da RN696/15 ANEEL e artigo 8º, parágrafo III da Lei 12.334/10, com a estrutura e prazos para o PSB.

O PSB da PCH Casca III com as novas diretrizes da ANEEL foi implementado desde 22 de dezembro de 2017, conforme prazo exigido pelo agente regulador. Apesar da não obrigatoriedade do Plano de Ação Emergencial de acordo com o artigo 13º da RN696/15 ANEEL, pois a barragem está classificada como “C”, a Enel Green Power seguiu o fluxograma de comunicação da Figura 21, na ocorrência do caso excepcional do dia 29/01/2016.

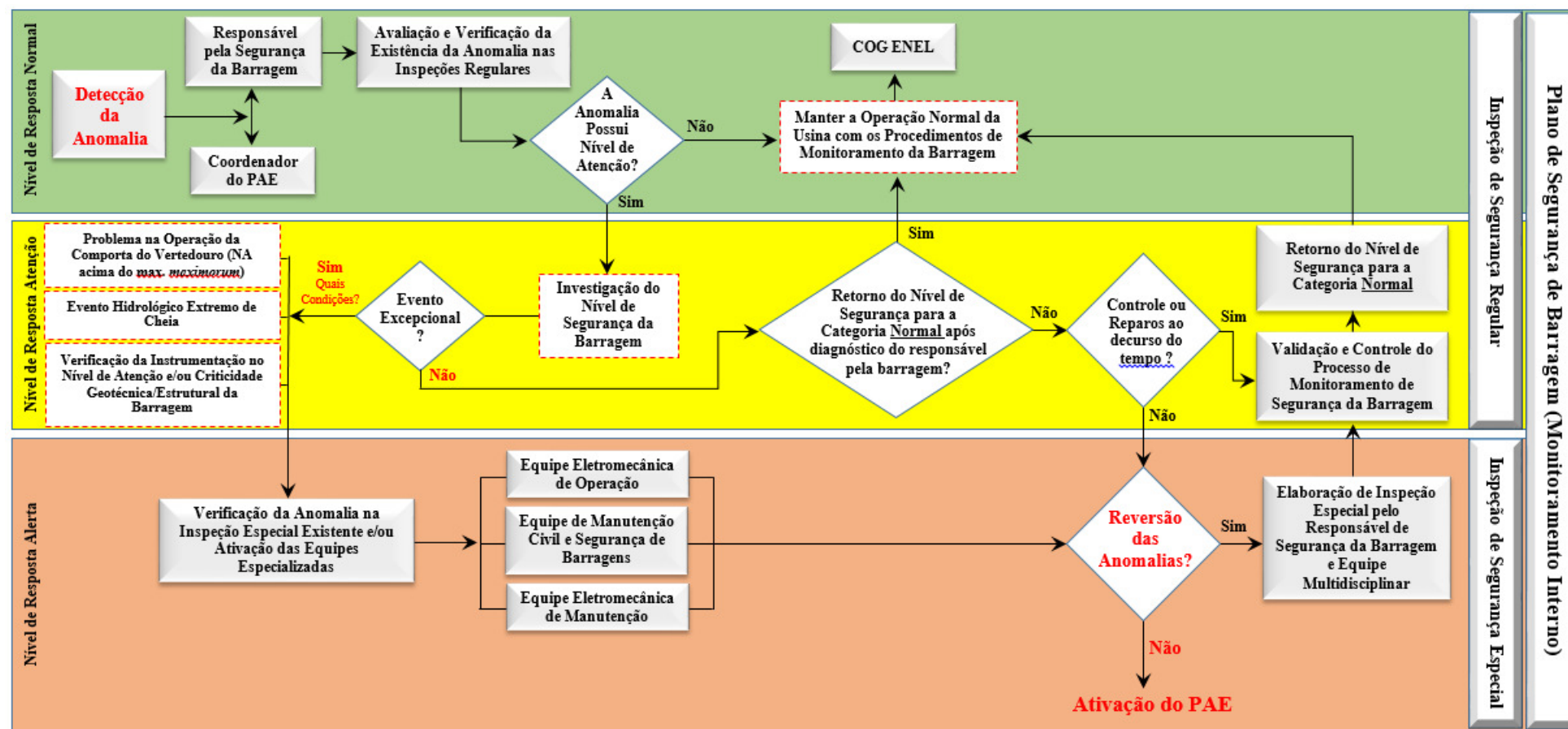


Figura 20 – Plano de Segurança e Níveis de Resposta da Barragem – PCH Casca III – Enel Green Power

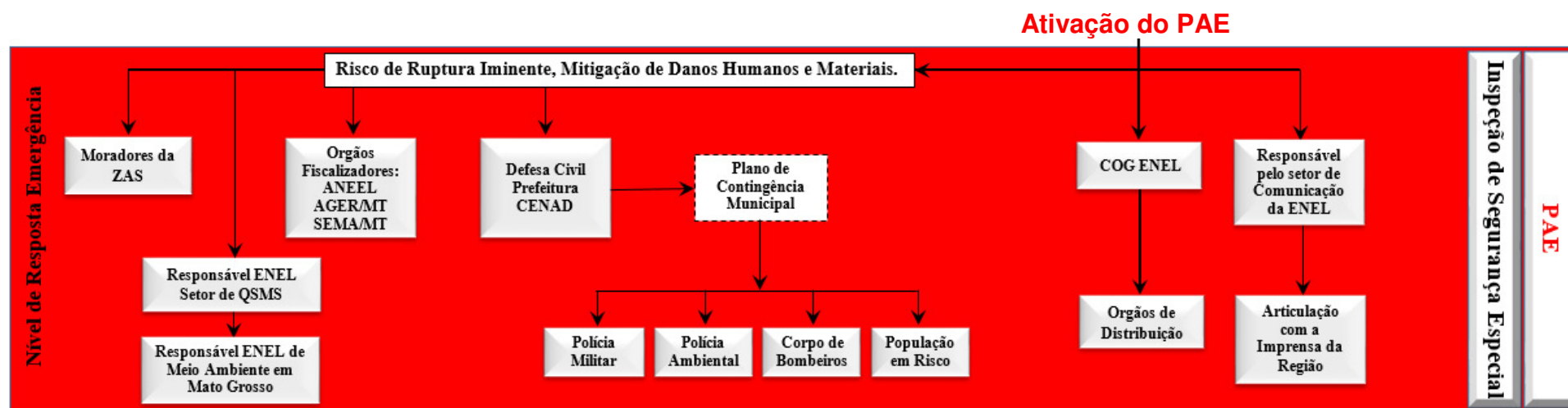


Figura 21 – PAE e Nível de Emergência – PCH Casca III – Enel Green Power

8.4 Inspeções Regulares e Especial

As Inspeções de Segurança são classificadas em Regular e Especial, sendo o PSB atualizado em decorrência de suas exigências e recomendações. A Inspeção de Segurança Especial é realizada substitutivamente à Inspeção de Segurança Regular, sempre que o diagnóstico de segurança for definido em Alerta ou Emergência, em conformidade com Art. 11º da Resolução Normativa N° 696, de 15 de Dezembro de 2015.

A periodicidade da inspeção de segurança regular, conforme determina o Art. 10º da RN696/15 para Classe da Barragem atual “C” é de 2 anos. Logo, o prazo máximo para a realização da próxima Inspeção de Segurança da PCH Casca III será em 15 de dezembro 2019.

Após a inspeção especial da PCH Casca III, que se encontrava com nível de segurança da barragem (NSB) como Emergência no evento excepcional em 29/01/2018, apresentou NSB Normal em junho de 2016, após investigações, ativação das equipes multidisciplinares, validações de projeto e processos de monitoramento de segurança da barragem.

A PCH Casca III está operando normalmente e os trabalhos de monitoramento e revisão periódica estão em andamento.

8.5 Revisão Periódica de Segurança de Barragens

A Revisão Periódica de Segurança (RPS), Seção IV da RN696/15 ANEEL tem o objetivo de diagnosticar o estado geral de segurança da barragem, levando-se em conta o avanço tecnológico, a atualização de informações hidrológicas na respectiva bacia hidrográfica, de critérios de projeto e de condições de uso e ocupação do solo a montante e a jusante do empreendimento. A elaboração da RPS compete ao empreendedor e deverá ser conduzida pelo responsável técnico.

Segundo ICOLD-CBDB (1986), deve-se verificar, todos os registros referentes ao comportamento operacional do empreendimento, sua manutenção e inspeção, e periodicamente, se o equipamento eletromecânico está sendo usado e operado de acordo com as instruções e os esquemas de funcionamento do projeto original. Os procedimentos atualizados da PCH Casca III estão representados no Manual de Operação, Manutenção e Inspeção de Segurança da Barragem (OMI-S).

Para usinas existentes, a periodicidade de realização da RPS é definida de acordo com a classe da Barragem, observado o interstício máximo disposto no Art. 17º da Resolução Normativa N° 696, de 15 de dezembro de 2015. Para a PCH Casca III, classificada como “C”, o prazo máximo é 15 de dezembro de 2025.

10 Lições Aprendidas

A sequência de eventos de precipitação intensa ocorrida em 29 e 30/01/2016, segundo registros apresentados no item 4.3.1, em conjunto com as características fisiográficas de alta potencialidade de picos de cheias (Item 4.1) e os processos erosivos da bacia hidrográfica do Rio Casca com alto índice de assoreamento observado no reservatório da PCH Casca III (Item 4.2), foram fatores determinantes para a rápida sobre-elevação do reservatório (Item 4.3.2). O Sistema de Alarme de cheias está ativo e envolve procedimentos operacionais de comportas do vertedor, estudos para mitigação do processo de assoreamento, e informações hidrometeorológicas em tempo real.

É importante frisar que o cumprimento da Lei 12.334/10 e da RN 696/15 ANEEL, no que tange às inspeções regulares e especiais, passa pela real necessidade de uma base de dados com relação às informações técnicas da barragem para que as inspeções sejam eficientes e possam realmente colaborar para a segurança do empreendimento. Conclui-se que a elaboração do “*as built*” da barragem de Casca III, a partir de poucos dados disponíveis, torna-se um ato contínuo de aprimoramento do projeto existente em função das necessidades que irão surgindo ao longo do tempo de operação desta usina.

Destaca-se também que apesar da importância da instrumentação para a classificação da barragem dentro da matriz de risco apresentada pela RN 696/15 ANEEL, verifica-se que se não bem selecionado o plano de auscultação a ser seguido, o mesmo pode não atuar significativamente na manutenção de segurança do empreendimento, tampouco na confirmação dos critérios de projeto. Para a barragem de Casca III a Enel Green Power contratou serviços para a instalação de novos piezômetros para as medidas de pressões neutras, e também a instalação de instrumentos diversificados para medição de vazões e deslocamentos, a fim de ter um modelo geológico-geotécnico de funcionamento da barragem melhor estruturado e desta maneira ser possível refinar as análises sob esta barragem.

Durante o evento excepcional, verificou-se um elevado aumento da pressão neutra do PZ-14 instalado no aluvião arenoso presente na fundação, o que chama atenção por ocorrer em uma camada que, apesar do processo de densificação pelo qual este material da fundação passou, verificou-se que o SPT da camada é da ordem de 3 a 7 golpes. Tendo como base os critérios de projeto atuais, seria de boa prática avaliar durante a revisão periódica da barragem o potencial de liquefação desse material de fundação, diante dos carregamentos envolvidos, a fim de avaliar a segurança do empreendimento.

Durante a Inspeção Especial realizada durante o evento excepcional, foi descartada a ocorrência da ruptura global do talude de jusante visto os resultados obtidos das análises de estabilidade realizadas. As análises dos modelos de tensão vs deformação, forneceu indícios de que a causa das trincas se deu por deslocamentos diferenciais entre as seções que compõem o barramento. Contudo, se faz importante para a etapa de revisão periódica deste empreendimento que seja avaliada a integridade do núcleo quanto à impermeabilização.

11 Considerações Finais e Recomendações

A lei 12334/10 e a RN696/15 ANEEL de segurança de barragens estabelecem critérios técnicos e prazos aos agentes de acordo com a classificação da matriz de risco do empreendimento. Apesar das deficiências nas definições dos critérios técnicos, as obrigаторiedades e fiscalizações atuais das barragens no setor elétrico, proporcionam o desenvolvimento da organização da equipe técnica e responsável técnico pela barragem, para o monitoramento contínuo com inspeções e revisões periódicas de segurança de barragem. Os procedimentos operacionais das comportas do vertedouro foram aprimorados com o sistema de alarme de cheias e aplicação dos procedimentos do Item 8.

Vale ressaltar, que o sistema de alarme de cheias necessita de aprimoramentos devido à complexidade da bacia hidrográfica do rio Casca, em virtude das alterações do uso e ocupação do solo e que serão acompanhados e atualizados na RPS. Recomenda-se que o sistema seja integrado com modelo chuva x vazão e procedimentos de previsões meteorológicas.

Há de se lembrar que os principais modos de falhas que ocasionam rupturas de barragens de terra são galgamento, seja por modelo hidrológico e/ou operação inadequados, e “piping”, sendo esse fenômeno associado a “minor geological details”, assim, os modelos e instrumentação não são capazes de retratar esses extremos, sendo difícil prever exatamente o local onde ela pode iniciar, por isso a importância de se conhecer o modelo geológico geotécnico da barragem e a linha de defesa de projeto.

Destaca-se que a determinação de níveis de referência para instrumentação, sem estar aliada a um trabalho de reconhecimento de seu papel para a barragem, não proporciona ganho de segurança para a barragem, portanto todo plano de instrumentação deve estar sob responsabilidade de equipe qualificada.

12 Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução Normativa nº696, de 15 de dezembro de 2015.

CRUZ, P.T. 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto. São Paulo, Oficina de textos, 1996.

DIVINO, P. L. Comportamento de enrocamentos em barragens: estudo de caso da Barragem de Emborcação. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas NUGEO. Ouro Preto, 2010.

ELETROBRÁS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Eletrobrás, 2003

Empesa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária, Abastecimento – Chuvas Intensas no Estado de Mato Grosso. ISSN 1679-043X, 2ª edição revisada, Fevereiro, 2011

ICOLD-CBDB - Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. Segurança de barragens. Recomendações para a formulação e verificação de critérios e procedimentos. Comissão Técnica de Segurança de Barragens. Rio de Janeiro, 1986.

Lei de Segurança de Barragens nº12.334. Presidência da República Casa Civil, de 20 de setembro de 2010.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. Engenharia de Recursos Hídricos, Editora da Universidade de São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978.

QUEIROZ, L. A., OLIVEIRA, H. G., NAZÁRIO, F. A. S. Foundation treatment of Rio Casca III dam. Transactions of the 9th Int. Congress on Large Dams, Instambul. Paris: ICOLD. V.1, 1967

TUCCI, C., E., M. Hidrologia: Ciência e Aplicação – 4ª edição, Editora da UFRGS/ABRH 2009.