

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ALEXANDRE DE SOUSA FONTENELLE**

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS EM  
BARRAGENS DO NORDESTE BRASILEIRO - ESTUDO DE CASO:  
BARRAGENS DO ESTADO DO CEARÁ**

**FORTALEZA - CEARÁ**  
**2007**

ALEXANDRE DE SOUSA FONTENELLE

PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS EM  
BARRAGENS DO NORDESTE BRASILEIRO - ESTUDO DE CASO:  
BARRAGENS DO ESTADO DO CEARÁ

Tese submetida à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Área de Concentração em Recursos Hídricos, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Vicente P.P. B. Vieira

FORTALEZA - CEARÁ  
2007

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGENS DO NORDESTE BRASILEIRO – ESTUDO DE CASO: BARRAGENS DO ESTADO DO CEARÁ**

Esta tese foi apresentada como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, a qual encontrar-se-á a disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade. A citação de qualquer trecho desta tese é permitida desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovada em 10 de agosto de 2007.

---

Alexandre de Sousa Fontenelle

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Vicente de Paulo Pereira Barbosa Vieira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. Dr. Ernesto da Silva Pitombeira  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Carisia Carvalho Gomes  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. Dr. Antonio Nunes de Miranda

---

Prof. Dr. Carlos Henrique de Almeida Couto Medeiros  
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ana Cristina Azevedo U. Melo CRB-3/572

F763 Fontenelle, Alexandre de Sousa

Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens do Nordeste Brasileiro - Estudo de Caso: Barragens do Estado do Ceará / Alexandre de Sousa Fontenelle.

213f., il.color., enc.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2007.

Área de Concentração - Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paula Pereira Barbosa Vieira.

1. Recursos Hídricos. 2. Barragens e Açudes. 3. Avaliação de Riscos. I. Vicente de Paulo Pereira Barbosa Vieira (orientador). II. Universidade Federal do Ceará – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 62

*Dedico a realização desta a Tese a minha  
esposa Themis companheira em todos os  
momentos e a minha filha Mariana.  
Aos meus pais Bernard e Bernadete.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela saúde e força em todos os momentos de minha vida;

Ao meu orientador professor Vicente Vieira pela orientação segura e importantes contribuições para o desenvolvimento da pesquisa;

Aos engenheiros e professores Paulo Cruz e Nelson Pinto e ao consultor Roneí Carvalho pelos conhecimentos repassados quando na participação do Painel de Inspeção e Segurança de Barragens nos projetos e obras de barragens do Estado do Ceará;

Ao amigo e ex-colega da COGERH Rogério Menescal, pelo incentivo, trocas de experiências e discussões, meus agradecimentos;

Um agradecimento especial aos amigos e companheiros da COGERH: Célio Augusto, Disney, Neiva e Vitor, pela amizade, debates, e companheirismo;

Aos amigos e colegas e ex-colegas da Gerência de Segurança de Infra-estrutura (GESIN): Sarita, Adriano, Almir, Arimatéia, Bortolin, Edilberto Feijó, Loiola, Ricardo Coelho, Vilemar e Marcos Wendell, pela amizade, incentivo e apoio técnico;

Aos amigos e colegas da COGERH: Fernanda, Gianni, Lucrecia, Márcia Fernandes, Maria do Céu, Teixeira, Treze, e Yuri, pela amizade e compreensão;

Aos presidentes da COGERH Francisco Viana e Yarley Brito e ao ex-diretor Pedro Castelo, pelo apoio no início desta jornada de estudos que culminou na presente tese;

Aos técnicos das gerências regionais da COGERH, e em especial, aos gerentes regionais Francisco Almeida, Haroldo Peixoto, Khrishna Martins, Rodrigues Júnior, Vicente Lopes, pela disponibilidade das informações técnicas necessárias ao bom desenvolvimento do trabalho;

Ao técnico João Bruno, pela cooperação na montagem final da tese;

Meus agradecimentos, na impossibilidade de destacar todos os nomes dos funcionários da COGERH e receio de cometer alguma injustiça, à funcionária Simônia, pelo incentivo e amizade;

Ao CBDB – Núcleo do Ceará, na pessoa da engenheira Zita Araújo, meus especiais agradecimentos, por sua amizade e sempre disponível cooperação técnica;

A minha família, que sempre me incentivou com seu amor e carinho;

Agradeço o apoio e incentivo da família Campos, especialmente nas pessoas do Sr. Renan e Sra. Zilda Campos;

A todos os colegas do Curso de Doutorado em Engenharia Civil da UFC pela amizade construída e trocas de conhecimentos;

Ao professor do Walter Martins (*in memorian*) pelos primeiros ensinamentos técnicos de hidrologia e pelos conhecimentos transmitidos no doutorado;

Ao saudoso engenheiro José Cândido Parente Pessoa (*in memorian*) com quem tive a honra de manter estreita amizade, pelas lições de humildade, ética e amor à engenharia.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Perdas de vidas x probabilidade de ruptura (BOWLES et al., 1999).....	23
FIGURA 3.2 - Ruptura x Altura (ICOLD, 1995).....	27
FIGURA 3.3 - Número de casos de ruptura nos 10 primeiros anos:.....	28
FIGURA 3.4 - Incertezas inerentes à análise de risco.....	40
FIGURA 3.5 - Exemplo de Árvore de Eventos para a determinação da probabilidade de ruptura por “ <i>piping</i> ” (adaptado de FUNNEMARK et al., 2000).....	51
FIGURA 3.6 - Esquema da metodologia baseada no risco para ações de melhoria da segurança de barragens (adaptado de BOWLES, 1989).....	54
FIGURA 3.7 - Evolução Anual das Inspeções no Estado do Ceará (COGERH, 2007).....	64
FIGURA 3.8 - Faixas de idades das 63 principais barragens estaduais.....	65
FIGURA 3.9 - Capacidade última do Vertedouro versus área da bacia hidrográfica ( <i>apud</i> NOGUEIRA DE SOUSA & PINTO (2001)).....	67
FIGURA 3.10 - Processo de avanço da deterioração com a interferência da manutenção (adaptado de WUNDERLICH, 2005).....	69
FIGURA 4.1 - Classificação em relação a Periculosidade Potencial (PP).....	76
FIGURA 4.2 - Classificação em relação ao Estado Real (ER).....	76
FIGURA 4.3 - Índice de Comportamento (IC).....	77
FIGURA 4.4 - Potencial de Risco (PR) pela metodologia da COGERH.....	87
FIGURA 4.5 - Classes de Periculosidade (P).....	87
FIGURA 4.6 - Classes de Vulnerabilidade (V).....	88
FIGURA 4.7 - Classes de Importância dos Açudes Estaduais.....	88
FIGURA 5.1 - Desenho Esquemático da Proposta Metodológica para a Priorização de Ações de Segurança em Barragens.....	91
FIGURA 5.2 - Localização das 77 barragens objeto do estudo no Estado do Ceará.....	93
FIGURA 5.3 - No. de Barragens por tempo de Operação.....	96
FIGURA 5.4 - Faixas de Altura das 77 barragens estudadas.....	96
FIGURA 5.5 - Seções Tipo das Barragens de Aterro e de Concreto.....	103
FIGURA 5.6 - Foto com Exemplo de Anomalia de Magnitude I (Insignificante).....	107
FIGURA 5.7 - Foto com Exemplo de Anomalia de Magnitude P (Pequena).....	108
FIGURA 5.8 - Foto com Exemplo de Anomalia de magnitude M (Média).....	109
FIGURA 5.9 - Foto com Exemplo de Anomalia de Magnitude G (Grande).....	110
FIGURA 5.10 - Classificação das barragens quanto a Periculosidade (P) pelo ER.....	126
FIGURA 5.11 - Classificação das barragens quanto a Vulnerabilidade (V) pelo E <sub>R</sub> .....	129
FIGURA 5.12 - Classificação das Barragens quanto ao E <sub>R</sub> .....	131
FIGURA 5.13 - Eficiência Financeira: CeNP x NPB reduzido.....	139
FIGURA 5.14 - Eficiência Econômica: BLe Acumulado x CeNP.Acumulado.....	142
FIGURA 5.15 - Números Difusos do PRA e do CRrup.....	150
FIGURA 5.16 - Números Difusos do BLe para as 4 Opções de CeNP - Critério 1.....	153
FIGURA 5.17 - Números Difusos do Ble para as 4 Opções de CeNP - Critério 2.....	156



## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Taxa Anual de Rupturas ou Acidentes no Oeste dos EUA. ....	35
TABELA 3.2 - Taxa Anual de rupturas ou acidentes no Leste dos EUA. ....	36
TABELA 3.3 - Sumário de acidentes e rupturas de barragens do Oeste dos EUA. ....	36
TABELA 3.4 - Sumário de acidentes e rupturas de barragens do Bureau of Reclamation. ....	37
TABELA 3.5 - Estimativa do custo de risco anual (VON THUN,1999). ....	50
TABELA 3.6 - Exemplo de comparação do risco de duas barragens ....	55
TABELA 3.7 - Classificação da Conseqüência de Ruptura de Barragens. ....	55
TABELA 3.8 - Rupturas em barragens e conseqüências em perdas de vidas e custos ....	57
TABELA 5.1 - Principais Características das Barragens Analisadas.....	94
TABELA 5.2 - Classificação pela Probabilidade de Ruptura Anual.....	101
TABELA 5.3 - Custo de Recuperação da Ruptura da barragem (CRrup).....	104
TABELA 5.4 - Custo de Eliminação da Anomalia com $NP \geq 1$ (CeNP) .....	106
TABELA 5.5 - Custo de Recuperação das Anomalias a partir da Magnitude. ....	111
TABELA 5.6 - Severidade da Ruptura da barragem(Sev) .....	113
TABELA 5.7 - Eficiência na Redução do Perigo, NPB/CeNP .....	115
TABELA 5.8 - Benefício Líquido Equivalente (BLE) .....	117
TABELA 5.9 - Índice de Vulnerabilidade (Iv).....	121
TABELA 5.10 - Classificação das 77 barragens nos nove critérios.....	134
TABELA 5.11 - Ponderação: Classificação pela Média .....	136
TABELA 5.12 - Ponderação: Classificação com peso 2 para o Critério 3.....	137
TABELA 5.13 - NPB remanescente X CeNP. ....	140
TABELA 5.14 - Critério 1: (NPB/CeNP) – CeNP x Ble Acumulado.....	144
TABELA 5.15 - Critério 2: (Ble) – CeNP x Ble Acumulado.....	145
TABELA 5.16 - Critério 3: Escore Risco - CeNP x Ble Acumulado.....	146
TABELA 5.17 - Números Difusos de PRA e CRrup. ....	149
TABELA 5.18 - Riscos Difusos do BLE para o Critério 1 .....	152
TABELA 5.19 - Riscos Difusos do BLE para o Critério 2. ....	155
TABELA B.4.1 - Aplicação da Metodologia SABESP.....	200
TABELA B.4.2 - Aplicação da Metodologia do USACE.....	202
TABELA B.4.3 - Aplicação da Metodologia da COGERH.....	204
TABELA B.5.1 - Aplicação da Metodologia do Escore de Risco .....	206
TABELA C.1 - Números Difusos do BLE para o Critério 1: (CeNP/NPB).....	209
TABELA C.2 - Números Difusos do BLE para o Critério 2: BLE .....	212

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 - Avaliação de risco (probabilidades) a partir das árvores de eventos (SILVEIRA, 2007).....	37
QUADRO 3.2 - Principais Fontes/Tipos e Exemplos de Origem e Forma de Tratamento de Incerteza (KREUZER, 2000).....	39
QUADRO 3.3 - Conversores Verbais (BUREAU OF RECLAMATION, 2003).....	48
QUADRO 4.1 - Classificação segundo a Periculosidade Potencial (PP) das barragens. ....	74
QUADRO 4.2 - Classificação segundo o Estado Real (ER) da Barragem.....	75
QUADRO 4.3 - Escores para Classificação dos parâmetros das constantes.....	79
QUADRO 4.4 - Escores para Classificação dos parâmetros variáveis.....	80
QUADRO 4.5 - Parâmetros de Classificação do potencial de perigo para Danos a propriedades e perdas de vidas.....	81
QUADRO 4.6 - Periculosidade (P).....	83
QUADRO 4.7 - Vulnerabilidade (V), estado de condição atual da barragem.....	84
QUADRO 4.8 - Importância Estratégica (I).....	85
QUADRO 4.9 - Potencial de Risco (PR).....	85
QUADRO 4.10 - Frequência de inspeções.....	85
QUADRO 4.11 - Requisitos mínimos quanto à manutenção.....	86
QUADRO 4.12 - Critério para instrumentação.....	86
QUADRO 5.1 - Classificação das Barragens estudadas segundo sua Altura e/ou Volume de acordo com o CBGB ( <i>apud</i> KUPERMAN et al., 2001).....	96
QUADRO 5.2 - Os Níveis de Perigo (NP) e os Pesos respectivos.....	98
QUADRO 5.3 - Pesos das quantidades NP de acordo com as quantidades.....	99
QUADRO 5.4 - Exemplo de Cálculo da Pontuação do NPB da Barragem São Domingos.....	99
QUADRO 5.5 - PRA adotada a partir do NPB.....	100
QUADRO 5.6 - Iv: Pesos da Capacidade do Reservatório e do NPB.....	119
QUADRO 5.7 - Critério de Classificação pelo Índice de Vulnerabilidade (Iv).....	120
QUADRO 5.8 - Critério de Pontuação dos Parâmetros de Periculosidade (P) para o Escore de Risco ( $E_R$ ).....	124
QUADRO 5.9 - Critério de determinação das classes de Periculosidade.....	125
QUADRO 5.10 - Classes de Periculosidade (P).....	125
QUADRO 5.11 - Critério de Pontuação dos parâmetros de Vulnerabilidade (V) para o Escore de risco ( $E_R$ ).....	128
QUADRO 5.12 - Critério de determinação das classes de Vulnerabilidade.....	129
QUADRO 5.13 - Classes da Vulnerabilidade (V).....	129
QUADRO 5.14 - Critério de pontuação referentes a Perdas de Vidas e a Danos (D).....	130
QUADRO 5.15 - Classificação pelo Escore de Risco ( $E_R$ ) para o fator $k=2$ .....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANA** – Agencia Nacional de Águas
- CAGECE**- Companhia de Águas e Saneamento do Estado do Ceará
- CBERS** – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
- CEDEC** - Coordenadoria Estadual de Defesa Civil
- CEMIG** – Centrais Elétricas de Minas Gerais
- CIGB** – Comissão Internacional de Grandes Barragens
- CNPGB** – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
- COGERH** – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
- DNOCS** – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
- DNOS** – Departamento Nacional de Obras e Saneamento (Órgão extinto)
- FUNCEME** – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos hídricos
- GESIN** – Gerência de Segurança e Infra-Estrutura
- INAG** – Instituto das Águas de Portugal
- INCRA** – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
- MI** – Ministério da Integração Nacional
- RBPS** - Risk Based Profile System – Bureau of Reclamation
- RMF** – Região Metropolitana de Fortaleza
- SABESP** – Companhia de Saneamento de São Paulo
- SISB** – Sistema de Segurança de Barragens
- SISOH** – Sistema de Segurança de Obras Hídricas
- SOHIDRA** – Superintendência de Obras Hídricas
- SRH** – Secretaria dos Recursos hídricos do Estado do Ceará
- USACE**- United States of Army Corps of Engineering
- USCOLD** – United States Committee on Large Dams
- USFEMA** – United States Federal Emergency Management Agency
- C<sub>e</sub>NP** – Custo da Eliminação da Anomalia com Nível de Perigo igual ou superior a 1
- NPB** - Nível de Perigo da Barragem
- CRrup** – Custo de Recuperação da Ruptura da Barragem
- BLe** – Benefício Líquido Equivalente
- PRA** – Probabilidade de Ruptura Anual
- USBR** – United States Bureau of Reclamation (BUREC)

## RESUMO

A proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro, com estudo de caso em 77 barragens do Estado do Ceará, sendo 62 barragens estaduais e 15 federais, visa hierarquizar um conjunto de barragens a partir das inspeções, incorporando: o nível de perigo; probabilidades; custos; severidade (prejuízo a ser evitado); benefício líquido equivalente, o qual é o resultado da severidade decrescida do custo da eliminação da anomalia com nível de perigo; e seus riscos, para buscar a eficiência na aplicação dos recursos financeiros de melhoria da segurança através de obras de recuperação das barragens a fim de atender a sociedade. A proposta metodológica parte, inicialmente, da determinação da probabilidade de ruptura anual da barragem (a partir do nível de perigo da anomalia) e dos custos (da recuperação da ruptura hipotética da barragem e da eliminação das anomalias que apresentam perigo). A metodologia considera três critérios a saber: Critério 1: critério da melhor eficiência na aplicação dos recursos para a redução física do perigo da barragem (NPB/CeNP); Critério 2: critério do Benefício Líquido equivalente (BLE); e Critério 3: critério do Escore de Risco ( $E_R$ ), desenvolvido a partir de três metodologias conhecidas de avaliação qualitativa de risco. A metodologia propõe para os tomadores de decisão a classificação das barragens através da ponderação destes três critérios. A metodologia permite também verificar qual dos 3 critérios apresenta melhor eficiência na aplicação dos recursos financeiros para a redução dos riscos, como também possibilita averiguar a eficiência econômica, através do benefício líquido equivalente, em função do valor a ser investido na eliminação da anomalia com perigo. A metodologia proposta possibilita obter-se o risco econômico do benefício líquido equivalente a partir da Teoria dos Números Difusos utilizando as duas principais incertezas do modelo: a estimativa da probabilidade de ruptura anual (PRA) e o custo de recuperação da ruptura da barragem (CRrup), aplicando-se nos dois critérios que consideram custos (critérios 1 e 2). Observou-se para o caso estudado que o risco do benefício líquido econômico, quando a priorização das barragens é feita pelo critério do benefício líquido (Critério - 2), é crescente com a disponibilidade financeira. Os riscos são menores para o critério 2 (BLE), sendo este crescente com o valor a ser utilizado na recuperação. O mesmo não se visualiza no critério 1, quando se tem um risco mínimo intermediário. O risco econômico difuso do benefício líquido equivalente (para ambos os critérios) no caso de se eliminar todos os perigos das anomalias é de 3,83%.

Palavras Chave: Segurança de Barragens, Análise de Risco, Números Difusos.

## ABSTRACT

The methodological proposal of risk analysis in dams of the Brazilian northeast, with case study of 77 dams (62 State and 15 Federal dams) in the State of Ceará, aims to hierarchize a set of dams from the inspections, incorporating level of danger, probabilities, costs, severity (damage to be avoided), equivalent net benefits, which is the cost of elimination of the anomalies with level of danger reduced from the severity and its risks to search for the efficiency in the application of the financial resources improvement of dams safety to the welfare of the society. The proposal begins with the determination of the annual rupture probability (from the hazard) and the costs (from the rehabilitation of an hypothetical rupture of the dam and from the elimination of the anomalies that presents hazard). Three criteria were considered for classification of dams, named as Criteria 1, 2 and 3, as follows: Criterion 1: best efficiency in application of the resources for the physical reduction of hazard of the dams (NPB/CeNP); Criterion 2: economic equivalent Net Benefit (BLE); and Criterion 3: Score of Risk ( $E_R$ ) developed from three known risk qualitative methodologies. The proposal methodology permits the decision makers to classify the dams from the weigh of the three criteria set before. The methodology also permits to verify which of the three criteria presents better efficiency in application of the financial resources to reduce the risks, and also enable to perform an economic efficiency analysis having as base the economic equivalent net benefit in function of the value invested in the elimination of the danger. The methodology proposes to obtain the economic risk from the theory of Fuzzy Sets using the two main uncertainties of the model: the estimation of the probability of annual rupture and the cost of rehabilitation of the dam, applying in the two criteria that consider costs (criteria 1 and 2). In the case study it was observed in the criterion 2 that the risk increases with investments. In the case of partial use of resources, the risks are lesser for the criterion 2 (BLE). In this criterion the economic risk increases with the spent resources. The same does not happen in criterion 1, which presents an intermediate minimum risk. The diffuse economic risk of the equivalent net benefit to be negative is 3,83%, to both criteria, in case of eliminating all the hazards.

Keywords: Dam Safety, Risk analysis, Fuzzy Sets.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>10</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>18</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Aspectos de Segurança de Barragens.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Ruptura de Barragens de Aterro e de Gravidade .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Dados probabilísticos de Acidentes e Rupturas de Barragens .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 Incertezas .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5 Estimativa dos Riscos .....</b>	<b>40</b>
<b>3.6 Avaliação, Análise e Gerenciamento de Risco em Barragens.....</b>	<b>42</b>
<b>3.7 Ações de Segurança de barragens no Estado do Ceará .....</b>	<b>58</b>
<b>3.8 Ações de Manutenção e Segurança .....</b>	<b>67</b>
<b>4 APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCO EM 55 BARRAGENS ESTADUAIS .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1 Análise de risco e Metodologia de Tomada de Decisões para Barragens da Companhia de Saneamento de São Paulo (SABESP).....</b>	<b>72</b>
<b>4.2 Metodologia do USACE - Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (ANDERSEN et al., 1999).....</b>	<b>78</b>
<b>4.3. Metodologia da Companhia de Gestão e Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4 Avaliação dos Resultados .....</b>	<b>89</b>
<b>5. PROPOSTA METODOLÓGICA .....</b>	<b>90</b>
<b>5.1 Introdução Geral da Metodologia .....</b>	<b>90</b>
<b>5.2 Detalhamento e Aplicação da Metodologia .....</b>	<b>97</b>
<b>5.2.1 Probabilidades.....</b>	<b>98</b>
<b>5.2.1.1 Nível de Perigo da Barragem (NPB) .....</b>	<b>98</b>
<b>5.2.1.2 Probabilidade de Ruptura Anual (PRA) .....</b>	<b>99</b>
<b>5.2.2 Custos .....</b>	<b>102</b>
<b>5.2.2.1 Custos de recuperação da barragem no caso de Ruptura (CRrup).....</b>	<b>102</b>
<b>5.2.2.2 Custo de eliminação da anomalia com Nível de Perigo igual ou superior a 1 (CeNP).....</b>	<b>105</b>

5.2.2.3 Custo de Recuperação das Anomalias com base nas Magnitudes.....	105
5.2.3 Severidade da ruptura da barragem ( $S_{vp}$ ) ou prejuízo a ser evitado (probabilidade x custo).....	112
5.2.4 Critérios que Consideram Custos .....	114
5.2.4.1 Critério1: Eficiência na redução do perigo, com base na relação (NPB/CeNP).....	114
5.2.4.2 Critério 2: Benefício Líquido equivalente ( $BL_e$ ) .....	116
5.2.5 Riscos.....	118
5.2.5.1 Índice de Vulnerabilidade ( $I_v$ ).....	118
5.2.5.2 Critério 3: Escore de Risco ( $E_R$ ) .....	122
5.2.6 Classificação das Barragens por Ponderação dos Critérios .....	132
5.2.7 Eficiência na Aplicação dos Recursos Financeiros na Redução dos Riscos .....	138
5.2.8 Eficiência Econômica.....	142
5.2.9 Análise do Risco Econômico através da Teoria dos Números Difusos (TND) .	147
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	157
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	161
7.1 Conclusões .....	161
7.2 Recomendações .....	163
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
GLOSSÁRIO.....	176
APÊNDICE A – Manual de Preenchimento do Nível de Perigo de Barragem de Terra .....	182
APÊNDICE B - Aplicação de Metodologias de Avaliação do Risco .....	198
APÊNDICE C - Aplicação da Teoria dos Números Difusos.....	207

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens são concebidas, projetadas, construídas e operadas tendo como principal objetivo o aproveitamento e a gestão dos recursos hídricos, que se constitui em um problema da maior importância neste século XXI, principalmente na região tão carente deste recurso como o semi-árido do nordeste brasileiro. Para tanto, por força cada vez mais crescente da sociedade, do estabelecimento de legislações e normas, estas obras têm de funcionar com segurança e com um mínimo de risco aceitável pela sociedade, uma vez que não se pode eliminar totalmente o risco.

Mais especificamente, o Estado do Ceará é inserido fundamentalmente dentro do semi-árido brasileiro, com regime de chuvas caracterizado por grande variabilidade espacial, anual e intra-anual. A geologia é caracterizada por solos rasos e impermeáveis de forma que os rios são intermitentes e caudalosos nos períodos chuvosos. As barragens são, portanto, o principal constituinte da infra-estrutura hídrica e servem para armazenamento durante o período chuvoso e liberação no período seco. Esta estrutura deve ser mantida e operada de forma satisfatória a fim de permitir a eficácia na gestão dos recursos hídricos e constitui em elemento essencial na garantia do atendimento das demandas dos recursos hídricos.

Tendo em vista a escassez cada vez mais crescente de recursos financeiros a serem direcionados para a área de recuperação, manutenção e segurança, em face, principalmente, do envelhecimento das estruturas e da deficiência da manutenção como um todo, desenvolveu-se uma metodologia que visa dispor aos proprietários de barragens do nordeste brasileiro de um conjunto de critérios baseados na eficiência da aplicação dos recursos financeiros, considerando-se a redução do perigo e os riscos econômicos das intervenções.

Julga-se, portanto, importante estabelecer uma nova metodologia (pioneira e plenamente aplicável nas barragens da região do nordeste do Brasil, uma região, caracterizada pela carência de recursos) para a priorização de um conjunto de barragens a partir de inspeções periódicas visando à eliminação do perigo a um nível de risco aceitável pela sociedade levando em conta critérios de eficiência financeira e econômica com base no risco, bem como propiciar uma apresentação objetiva para a tomada de decisão pelos proprietários.



Na revisão bibliográfica (capítulo 3) procurou-se dar uma visão dos principais aspectos inerentes em segurança de barragens, com foco na estimativa, análise e gerenciamento do risco. Observou-se que a segurança de barragens vai além do aspecto estrutural, contemplando, também, os aspectos hidráulico-operacionais, ambientais, sociais e econômicos. Analisaram-se, dentro da visão histórica, aspectos relativos às causas de ruptura de barragens de aterro e de concreto. Na perspectiva de estabelecerem-se as probabilidades anuais de rupturas, pesquisaram-se na bibliografia dados probabilísticos de acidentes e rupturas. Comentam-se sobre as incertezas presentes na engenharia e, especificamente, na avaliação de risco de segurança de barragens, apresentam-se alguns métodos de estimativa de riscos. São apresentados os diversos conceitos de risco; tecem-se considerações sobre aspectos e conceitos sobre avaliação, análise e gerenciamento do risco; assim como aspectos da importância da manutenção. Apresenta-se um ligeiro histórico das ações de segurança de barragens no Estado do Ceará, com o foco atual nas inspeções de barragens. Finaliza-se o capítulo apresentando uma avaliação da segurança hidrológica das barragens recém construídas no estado do Ceará.

No capítulo 4 são apresentadas três conhecidas metodologias de avaliação qualitativa do risco que serviram de referência para a formulação de uma nova metodologia, denominada de escore de risco, a ser apresentada no capítulo 5 (item 5.2.5.2). No Apêndice B, estão apresentados os resultados da aplicação das 3 metodologias em 55 barragens estaduais.

O Capítulo 5 apresenta a proposta metodológica da tese tendo como estudo de caso 77 barragens do Estado do Ceará. A proposta metodológica considera nove aspectos: probabilidades de ruptura, custos, a severidade (ou prejuízo a ser evitado), eficiência, risco (através do Escore de risco), proposta de classificação por ponderação de três critérios (minimização dos riscos, maximização econômica e avaliação qualitativa do risco), eficiência financeira, eficiência econômica e riscos econômico com o uso da teoria dos números difusos.

O Capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados obtidos com destaque para os três critérios selecionados para fins de ponderação por parte dos tomadores de decisão.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

Um glossário é apresentado com termos constantes na atividade da engenharia de segurança de barragens.

O Apêndice foi dividido em três partes: o Apêndice A referente ao Manual do preenchimento do Nível de Perigo para Barragens de Terra; o Apêndice B apresenta as tabelas de aplicação das metodologias da SABESP, USACE e COGERH conforme apresentadas no capítulo 4, bem como, a nova análise qualitativa do risco denominada de Escore de Risco ( $E_R$ ) apresentada no capítulo 5; e o Apêndice C com as tabelas da aplicação da Teoria dos Números Difusos.

## 2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa objetiva a elaboração de uma metodologia de priorização de um conjunto de barragens do nordeste brasileiro, com estudo de caso de 77 barragens do Estado do Ceará. A partir das inspeções periódicas, incorporam-se as incertezas referentes à probabilidade anual de ruptura da barragem, custos de recuperação de ruptura da barragem e custo da eliminação das anomalias com perigo, determinando-se a severidade da ruptura ou o prejuízo a ser evitado. A metodologia coloca aos tomadores de decisão alternativas de ponderação de critérios considerando a eficiência financeira na redução dos riscos, a maximização econômica em relação aos recursos financeiros aplicados e a avaliação qualitativa dos riscos, com vista a estabelecer uma classificação final das barragens. Para uma avaliação da decisão, a metodologia propõe a realização de uma análise quantitativa de risco econômico.

Este objetivo geral será alcançado através dos seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar o nível de perigo das barragens com base numa nova metodologia;
- b) Determinar as probabilidades anuais de ruptura com base no nível de perigo da barragem;
- c) Estabelecer um critério de avaliação da eficiência na redução do nível de perigo nas barragens, com base na relação entre o nível de perigo da barragem e seu custo de eliminação de todas as anomalias com perigo da barragem;
- d) Estabelecer um critério de avaliação econômica considerando o benefício econômico a partir do benefício líquido equivalente, tendo como base a severidade (prejuízo a ser evitado) decrescida do custo de eliminação da anomalia com perigo;
- e) Estabelecer um critério com uma nova metodologia qualitativa de análise de risco com base em escores, considerando a periculosidade,

vulnerabilidade e danos a jusante (econômicos, ambientais e perdas de vidas);

- f) Tendo como base os critérios propostos, propiciar aos tomadores de decisão a classificação das barragens por ponderação destes critérios propostos.
- g) Determinar a eficiência financeira na redução do nível de perigo da barragem (riscos);
- h) Determinar a eficiência econômica do benefício líquido equivalente em relação ao custo da eliminação do nível de perigo da barragem
- i) Avaliar, quantitativamente, o risco econômico, através da teoria dos números difusos incorporando as incertezas do modelo (probabilidade de ruptura anual e custo de recuperação da ruptura da barragem).

A metodologia proposta justifica-se por proporcionar, uma classificação das barragens nos diversos aspectos relacionados à eficiência da utilização dos recursos financeiros na redução dos riscos, por conta da eliminação das anomalias com perigo, ou daquelas que ameacem a integridade da barragem, com o viés de aplicação do risco do benefício econômico do capital a ser aplicado nas recuperações.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Aspectos de Segurança de Barragens**

A segurança foi sempre um tema que mereceu uma atenção por parte de todas as entidades envolvidas na exploração das barragens e com forte apelo do Comitê Internacional das Grandes Barragens (ICOLD). Este interesse mantém-se nas últimas décadas, devido a diversos fatores, entre os mais importantes:

As grandes dimensões atingidas por um número significativo de barragens, com alturas máximas que, em algumas obras, ultrapassam 300m e, em cerca de uma centena delas, ultrapassam 150m (ICOLD 1984/88);

A deterioração por envelhecimento que começou a verificar-se em muitas barragens, uma vez que grande parte das obras existentes nos Estados Unidos da América (EUA) foi construída ainda na primeira metade do século XX e, as existentes na Europa, foram em grande parte construídas nas décadas imediatamente a seguir à 2<sup>a</sup> grande guerra (ASCE/USCOLD,1975; ICOLD, 1974.81, 1984/1988; 1984, 1994).

Em relação ao Brasil, lembram-se acidentes graves com barragens devido à cheias inesperadas, as quais geram transbordamentos do reservatório e danos muitas vezes incalculáveis, tais como os casos de Orós (CE), que rompeu em março de 1960 devido a uma cheia provocada por uma chuva de 635mm em menos de uma semana (JENSEN, 1983), e recentemente, as barragens de Arneiroz II (Arneiroz-Ce) em 2004 (BRASIL, 2004) e a Barragem de rejeitos de Cataguases (MG), em 2003. Deve-se destacar também que no ano de 2004 se deu o grave acidente da barragem de Camará (PB) (SANTOS et al, 2004) e (KANJI, 2004).

A ocorrência de alguns grandes acidentes, que puseram em evidência o risco, para pessoas e bens, associado à construção e exploração das barragens, entre os mais importantes os acidentes ocorridos com as barragens de Malpasset (Sul da França) em 1959, de Vajont (Veneza, Itália) em 1963, e de Teton (Estado de Idaho, EUA) em 1976 (ICOLD 1974,1984).

A sensibilização das populações para os riscos das barragens e, de modo geral, para os impactos ambientais associados a estas obras, de que é exemplo a discussão pública que tem sido mantida em torno da grande barragem de Assuam, no rio Nilo (ICOLD, 1993).

A própria evolução da Ciência e da Tecnologia que, ao contribuir para a evolução dos conceitos, para o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, assim como para novas exigências legais, implica a revisão das condições de segurança e funcionalidade de muitas obras.

Como dizia o engenheiro francês André Coyne (*apud* CNPGB, 2005), que projetou mais de 70 barragens em 14 países, “*En matière des barrages c’est la sécurité ce que compte plus*”. O que em português significa “em relação à barragens, a segurança é o que conta mais”. A segurança de barragens constitui um motivo de preocupação para a sociedade, devido aos riscos potenciais a que ficam sujeitas as pessoas e bens instalados nos vales a jusante destas, face à possibilidade, embora remota, de ocorrência de rupturas destas obras.

Evoluções, tais como a do processo natural de envelhecimento das obras, ou a da tendência, frequentemente verificada, para a ocupação dos vales a jusante das barragens, bem como o aumento da percepção do risco associado a este tipo de estrutura, conduzem a maiores exigências de segurança de barragens. Estas se traduzem, nomeadamente, pelo estabelecimento e cumprimento de normas de operação e de programas de inspeção, observação, auscultação (monitoração) e manutenção.

O objetivo de uma avaliação de segurança é determinar as condições relativas à segurança estrutural e operacional de uma barragem. A avaliação deve identificar os problemas e recomendar tanto os reparos corretivos, restrições operacionais e/ou modificações quanto às análises e os estudos para determinar as soluções para os problemas. Deve ser um esforço contínuo, que exige o estabelecimento de inspeções e avaliações periódicas da segurança, durante toda a existência da estrutura. A inspeção é uma observação abrangente dos elementos físicos e visíveis da barragem e das suas estruturas associadas.

No caso de rupturas de barragens, devem-se considerar as conseqüências com prejuízos diretos, como a perda de vidas humanas e os danos materiais no açude e nas áreas inundadas; há ainda que considerar os prejuízos indiretos resultantes da interrupção das atividades produtivas nas zonas afetadas, da impossibilidade de exploração dos recursos hídricos e os resultantes de traumas psicológicos e físicos nos sobreviventes. A determinação exata do valor total dos prejuízos é de difícil estimativa, se não mesmo impossível, principalmente no que concerne a avaliar valores de vidas perdidas.

Deve-se compreender que não é possível atingir uma garantia absoluta de segurança. Para cada barragem há um conjunto de cenários de deterioração que têm maior probabilidade de desenvolver-se e, para cada um deles, subsiste sempre certo risco de ocorrência de acidente (anomalia de grande porte correspondente à ruptura parcial ou total de obra e/ou a sua completa desfuncionalidade, com graves conseqüências econômicas e sociais, VIEIRA, 2005) ou de incidente (evento físico indesejável, de pequeno porte, que prejudica a funcionalidade e/ou a incerteza da obra, podendo vir a gerar eventuais acidentes, se não corrigidas a tempo, VIEIRA, 2005), ainda que muito pequeno.

De acordo com BRASIL (2002) a segurança de uma barragem é definida como a condição em que a ocorrência de ameaças impostas por uma barragem à vida, à saúde, à propriedade ou ao meio ambiente se mantém em níveis de risco aceitáveis; ou ainda, como a capacidade da mesma para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que reflitam nos aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. O risco de acidentes destas estruturas está associado quase sempre a catástrofes. Além da possibilidade da perda de vidas humanas, a ruptura de uma obra hídrica resulta em destruição de patrimônio, danos ao meio ambiente e interrupção de serviços públicos (MENESCAL et al.,2005).

A Figura 3.1 a seguir, conforme BOWLES et al.(1999), apresenta as diferentes formas de redução do risco para a segurança das pessoas em relação às medidas para a redução do risco à ruptura por galgamento nas cheias. O alteamento da barragem implica numa diminuição de probabilidade de galgamento por cheias, no entanto provoca um aumento do risco para as pessoas à jusante em função do aumento do volume armazenado, já o reforço do talude de jusante infere na redução da probabilidade de ruptura mas não afeta a conseqüência de perdas de vidas, enquanto a adoção de Planos de Ações Emergenciais (PAE) reduz as conseqüências de perdas de vidas sem afetar a probabilidade de ruptura da barragem. O ideal seria a adoção das duas últimas medidas citadas: reforço do talude de jusante e PAE.

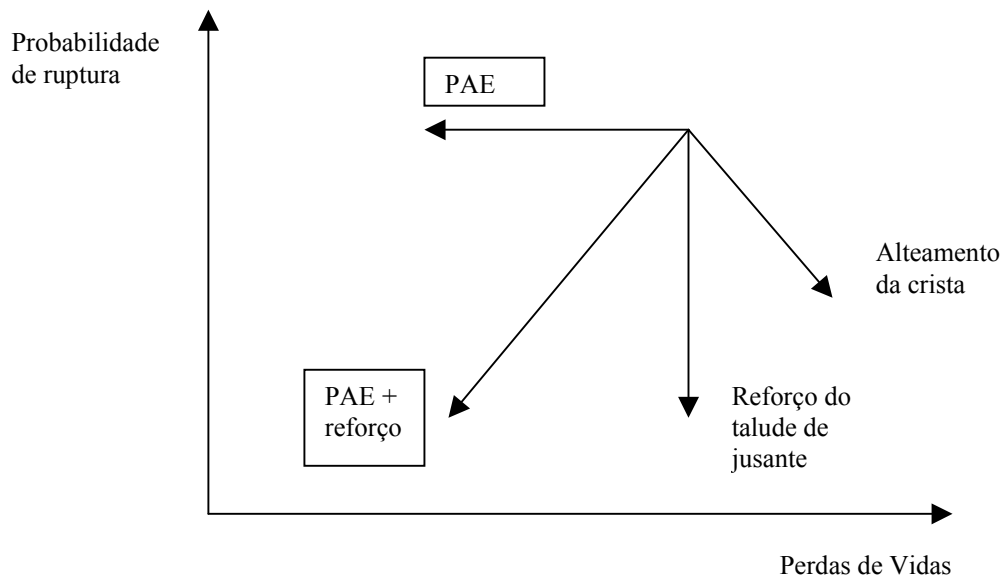


FIGURA 3.1 - Perdas de vidas x probabilidade de ruptura (BOWLES et al., 1999).

Os diferentes fatores que podem afetar a segurança das barragens podem também ser classificados nos três grandes grupos seguintes (INAG, 2001; PEDRO, 2001):

- fatores estruturais, ligados à resistência e estabilidade das obras;
- fatores hidráulico-operacionais, ligados ao funcionamento dos órgãos de segurança e exploração e respectivos equipamentos;
- fatores ambientais, sociais e econômicos, ligados ao impacto sobre as populações, os sistemas produtivos, o meio terrestre, a água, a fauna e a flora.

MEDEIROS (1999) acrescenta a esses fatores a Segurança Financeira, aquela capaz de garantir o retorno do investimento sob forma de desenvolvimento.

De forma que, para MEDEIROS (1999), a palavra “segurança” deve ser entendida dentro do contexto moderno, com o seguinte significado:

Segurança = segurança ambiental + segurança estrutural + segurança operacional + segurança social e econômica + segurança financeira.

MEDEIROS (2005a) comenta os aspectos que devem ser feitos para convergir a Teoria e a prática em segurança de barragens.



Outro ponto importante em relação à segurança de barragens é a ocorrência de deterioração a qual pode ser reduzida por intermédio de adequadas medidas preventivas de projeto, construção e operação, bem como de conservação e manutenção.

As obras devem ser inspecionadas e observadas ao longo da vida, de modo a permitir o controle das suas condições de segurança e operacionalidade. Estas ações podem ser classificadas em: (a) estruturais, consistindo de obras de recuperação e reforço; e (b) não estruturais: constituídas por inspeções formais de barragens através de *check-lists*, treinamento de gerentes e técnicos (capacitação), monitoramento das instrumentações instaladas nas barragens (piezômetros e medidores de vazão pelo maciço e fundação), PAE, etc.

Para seleccionar os critérios para eventos extremos, pode-se utilizar uma consideração baseada no risco. O principio é que uma barragem, cuja ruptura possa causar um dano excessivo ou a perda de muitas vidas, deve ser projetada para um padrão de segurança proporcionalmente mais alto do que o de uma barragem cuja ruptura resultaria em menos danos ou menor perda de vidas.

Na avaliação da segurança de uma barragem existente, os métodos probabilísticos de análise de riscos podem auxiliar na verificação de que fatores qualitativos, tais como erosão interna, bloqueio de vertedouro por entulhos ou cercas, não sejam omitidos e que eles recebam uma atenção equiparável á sua contribuição para a probabilidade de ruptura.

O nível de segurança de uma barragem pode, algumas vezes, ser melhorado pela adoção, nas avaliações, de condições menos severas, porém mais prováveis, do que aquelas associadas a tais eventos extremos como a cheia máxima provável (CMP).

Tendo em vista o crescente interesse pelo tema de segurança de barragens, no Brasil, em dezembro de 2000, foi criado o grupo de discussão [damsafety@yahoogroups.com](mailto:damsafety@yahoogroups.com) que tem por objetivo discutir sobre segurança de barragens, incluindo os aspectos econômicos, sociais e ambientais e as novas tendências em análise de riscos. O grupo de discussão conta na atualidade (julho de 2007) com mais de 300 participantes nacionais e de outros países.

Vale destacar a realização em julho de 2001 do Simpósio: Riscos Associados a Barragens, em São Paulo-SP, através do Núcleo Regional de São Paulo do CBDB, que contou com mais de 220 participantes vindos de Portugal e de 13 Estados do Brasil e que teve entre outros destacados palestrantes, a presença do professor David S. Bowles da Universidade de Utah (EUA). Este seminário contou com seis temas abrangendo Aspectos legais e Institucionais da Segurança de Barragens; Aspectos Ambientais; Aspectos Operacionais; Casos históricos; e Avaliação e Gerenciamento de riscos.

As ações para prevenir e minimizar os riscos de acidentes com barragens em todo país vem sendo conduzidas pelo Ministério da Integração Nacional, juntamente com a Agência Nacional de Águas (ANA), em parceria com Estados, Municípios e proprietários, visando fazer um levantamento para acompanhar permanente e sistematicamente a situação das barragens no Brasil, conforme MENESCAL et al.(2005).

Nos últimos vinte anos, multiplicaram-se as ações no âmbito do tema da segurança das barragens, principalmente, nas atividades de desenvolvimento e melhoria da legislação em muitos países, sob a forma de recomendações, normas e regulamentos nacionais.

Atualmente, segundo MENESCAL (2007) o arcabouço legal sobre o tema segurança de barragens ainda está em fase de consolidação. As barragens atualmente são regulamentadas de forma setorial (e.g. recursos hídricos, meio ambiente, energia e mineração) o que tem causado alguns problemas de padronização e definição de responsabilidades. Segundo MENESCAL (2007) existem diversos tipos de regulamentação nos diferentes estados e órgãos do país que, direta ou indiretamente, tratam desse tema, o que na sua avaliação se constitui no grande problema do nosso país.

No Brasil, está em andamento, no Congresso Nacional, o Projeto de Lei Nº 1.181 de 2003 que tem por objetivo estabelecer uma política nacional de segurança de barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais.

### 3.2 Ruptura de Barragens de Aterro e de Gravidade

Neste item apresentam-se as principais causas de rupturas de barragens de terra e de gravidade, tendo como principais referências os Boletins 99 (ICOLD, 1995) e 109 (ICOLD, 1997) do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD).

A ruptura de barragens de terra tem como principais causas:

- a) Erosões por transbordamento ou galgamento, causado por capacidade inadequada de vertedouros, ou pelo não funcionamento de seus órgãos de controle;
- b) Erosão interna (“piping”) pela fundação, pelo corpo da barragem ou ao longo de interfaces barragem – estruturas;
- c) Resistência insuficiente dos materiais, especialmente por superfícies de descontinuidade pela fundação;
- d) “Liquefação” de areias saturadas, ocasionadas por sismos;
- e) Trincas e fissuras devidas a recalques e/ou ressecamento dos solos, com os efeitos resultantes de erosão interna;
- f) Pressão da água muito alta nos poros do solo ou nas fraturas das rochas.

As rupturas das barragens de gravidade (concreto ou alvenaria) têm como causas principais:

- a) Resistência ao cisalhamento insuficiente em descontinuidades pela fundação;
- b) Sub-pressão excessiva nas fundações, em razão de drenagens não adequadas ou inexistentes;
- c) Não consideração de esforços raros, como resultantes de sismos;
- d) Erosão da rocha de fundação situada no pé de jusante.

A publicação ICOLD (1995) constitui numa importante ferramenta a ser utilizada na segurança de barragens. Sua lista de possíveis cenários de ruptura e sua frequência histórica nos permite apreender um grande número de lições importantes. Em

particular, pode-se aprender como evitar erros que possam levar a ruptura ou a sua propensão no futuro. Embora não se possa assegurar que já tenham acontecido todas as situações possíveis de falhas, tem-se disponível um amplo panorama de cenários de ruptura. No entanto, pode-se incorrer num erro de interpretar erradamente os dados estatísticos.

Relacionam-se alguns dados relativos a rupturas de barragens que foram obtidos do Boletim 99 (ICOLD,1995):

1. 2.2% (117 de um total de 5.268) das barragens construídas antes de 1950 romperam, sendo que a partir desta data o percentual caiu para menos de 0,5% (59 de um total de 12.138), (excluída a China);
2. Em termos absolutos, a maioria das rupturas ocorre nas barragens pequenas, as quais se constituem na maioria das barragens construídas, de forma que a razão entre barragens rompidas e barragens construídas, de uma determinada altura  $H$ , varia muito pouco com a altura, conforme se pode visualizar na Figura 3.2;

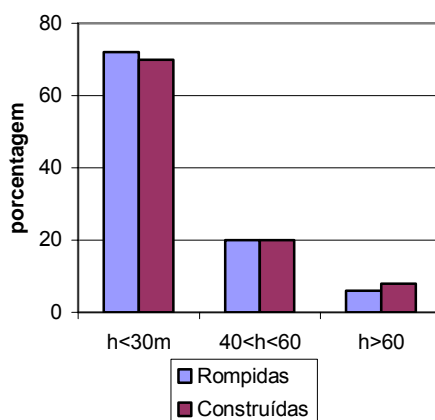
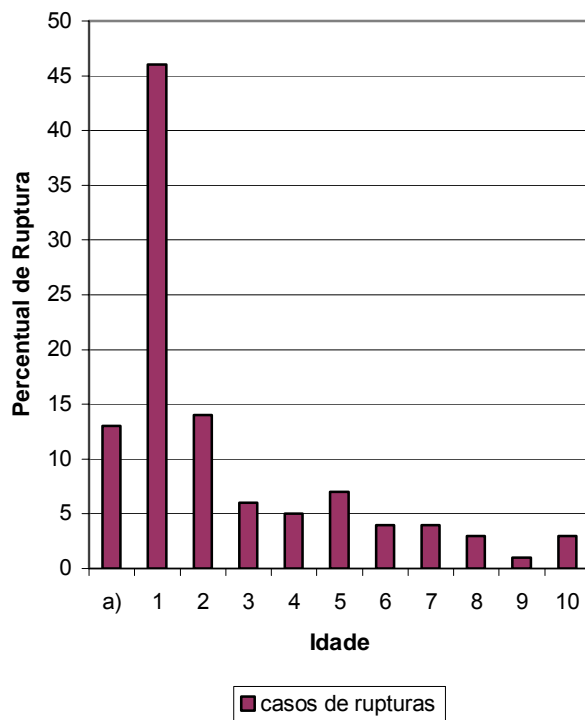


FIGURA 3.2 - Ruptura x Altura (ICOLD, 1995)

3. A maioria das rupturas se dá em barragens recém construídas. A maior proporção (70%) das rupturas ocorre mais freqüentemente nos 10 primeiros anos e mais especialmente no primeiro ano de operação, conforme se pode observar na Figura 3.3 a seguir.



a) indica durante o período construtivo (ICOLD,1995).

FIGURA 3.3 - Número de casos de ruptura nos 10 primeiros anos:

4. Para as barragens de concreto, os problemas de fundação constituem a causa mais freqüente: com a erosão interna e baixa resistência ao cisalhamento, cada uma contando com 21%;
5. Para barragens de terra e enrocamento, a causa mais comum de ruptura é o galgamento (31% como causa principal, 18% como causa secundária) seguida de erosão interna no corpo da barragem (15% como causa principal e 13% como causa secundária) e problemas de fundação (12% como causa principal e 5% como causa secundária);
6. Em relação a barragens de alvenaria de pedra, a causa mais freqüente é o galgamento (43%) seguida de erosão interna das fundações (29%);
7. As principais ações adotadas após a ruptura são: abandono da obra (36%), construção de nova obra a partir de um novo projeto (17%) e reconstrução total com o mesmo projeto (16%);
8. Quando a ruptura está relacionada a estruturas auxiliares, o caso mais freqüente é a insuficiência de vazão do vertedouro.

Tendo em vista que a grande maioria das barragens do Estado do Ceará tem menos de 30 metros de altura (85% do total das 77 barragens analisadas), constitui uma referência importante o Boletim 109 do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1997) sobre barragens de menos de 30 metros de altura. Segundo a publicação, o ano de 1930 constitui um marco separando dois períodos distintos. A seguir um ligeiro relato do histórico e de causas e conseqüências de rupturas de barragens de aterro e de gravidade com foco em barragens com menos de 30 metros de altura.

### 3.2.1 Barragens de Aterro (homogênea/zoneada ou de terra-enrocamento)

Segundo ICOLD (1997) as primeiras barragens de aterro foram construídas a mais de 2.000 anos e algumas centenas foram construídas antes de 1800, principalmente em alguns países da Ásia, ao longo do mediterrâneo e na América Central. Muitas desapareceram, mas algumas ainda estão operacionais 500 a 1.000 anos após a construção.

#### 3.2.1.1 Antes de 1930:

Informa o Boletim que mais de 2.000 “grandes” barragens menores do que 30m de altura e 150 barragens com mais de 30m de altura foram construídas até o ano de 1930, 75% delas no Japão, Grã Bretanha e Estados Unidos da América.

No Japão, em geral as barragens têm menos de 20 metros de altura, as bacias hidrográficas são pequenas e a capacidade de armazenamento das barragens é na ordem de 100.000 m<sup>3</sup>. Até o ano de 1930 não há registro de rupturas, talvez devido a experiência antiga e às cheias reduzidas, nunca maiores do que poucas dezenas de metros cúbicos por segundo.

A Grã-Bretanha construiu em torno de 300 barragens no período de 1800 a 1930, 90% com menos de 30m de altura com capacidades na ordem de 1hm<sup>3</sup>, destas 5% das 200 construídas até 1860 romperam. Após esta data poucas rupturas são reportadas, mesmo nas barragens antigas, em face do avanço considerável na experiência de barragens com núcleo vertical argiloso com material mole “puddle” e das cheias extremas bastante reduzidas (raramente superior a 100m<sup>3</sup>/s).

Nos Estados Unidos da América, entre 1850 e 1930 foram construídas 500 barragens com menos de 30 metros de altura, reservatórios com capacidade superior a 1hm<sup>3</sup>,

sendo 30% excedendo 10 hm<sup>3</sup>. As barragens são situadas em áreas de população esparsa, têm grandes bacias hidrográficas e conseqüentemente ocorrem grandes cheias, as rupturas freqüentemente não eram documentadas naquele tempo, muitas dessas barragens tiveram seus vertedouros ampliados posteriormente. Nos anos de 1930, os EUA tiveram grande progresso em 3 campos relativo a barragens: na análise, ensaios e tratamento de materiais de aterro; na mecanização, com utilização de equipamentos pesados, que proporcionou melhoria nas propriedades mecânicas dos aterros; e no novo enfoque na estimativa de cheias para o dimensionamento da capacidade dos vertedouros (método da cheia máxima provável – CMP).

Em outros países foram construídas 500 barragens, poucas acima de 30m de altura, a capacidade de reservação em geral acima de 1 hm<sup>3</sup> e pouco mais de 10% com capacidade acima de 10 hm<sup>3</sup>.

Em termos gerais, a experiência adquirida na construção de mais de 2.000 grandes barragens de altura moderada constituiu a base da moderna tecnologia que vai permitir a realização de mais de 35.000 grandes barragens de aterro no período de 1930 a 1980. A disseminação desta experiência em todo o mundo facilitou o aumento no porte das obras e o incremento da segurança. Depois de 1960 têm sido reportadas 10 rupturas de barragens construídas antes de 1930. Cinco destas rupturas foram referentes a 300 reservatórios com mais de 10 hm<sup>3</sup>, a probabilidade de ruptura anual (PRA) destas barragens eram de 1/2.000 ( $50 \times 10^{-5}$ ). Alerta a publicação (ICOLD, 1997) que a vigilância não pode ser desprezada nestas velhas barragens, sendo que após 20 anos nenhuma ruptura ocorreu nestas barragens antigas nos países industrializados.

#### 3.2.1.2 Após 1930:

Foram construídas 35.000 barragens de aterro, das quais 30.000 com menos de 30 metros de altura, somente 1.000 delas foram construídas entre 1930 e 1950. Nos países industrializados 6.000 barragens foram construídas com menos de 30 metros de altura, sendo que 50% delas foram nos EUA, quase todas construídas com equipamentos mecânicos e recursos financeiros adequados. Ocorreram 15 rupturas em barragens com menos de 30m de altura (0,25%) quase todas por ruptura interna. A probabilidade de ruptura anual é na ordem de 1/30.000 ( $3,3 \times 10^{-5}$ ) barragens x ano; ocorreram em torno de uma centena de vítimas (graças ao aviso de alerta dezenas de milhares de pessoas têm sido com sucesso

evacuadas das áreas perigosas). Os dados não são, entretanto, satisfatórios para as barragens de rejeitos, quatro rupturas ocorridas desde 1970 provocaram em torno de 200 vítimas.

Com relação à China, o ICOLD (1997) informa que depois de 1950, a China se engajou na construção de mais de 16.000 grandes barragens de aterro com menos de 30 metros de altura e 2.000 com altura superior a 30m, além de 50.000 com alturas de 10-15 metros com reservatórios de 0,1 a 1 hm<sup>3</sup>. Este esforço foi fundamental para o desenvolvimento da agricultura e o controle de cheias na nação (construção de 1.000 barragens/ano nos anos de 1960s); a não utilização de equipamentos e a falta de recursos financeiros explicam a taxa de ruptura de barragens pré-1980 ,em torno de 3%, basicamente devido a galgamentos por sub-dimensionamento dos vertedouros, capazes para suportar cheias apenas de 100 e 200 anos. Após 1980 houve queda substancial no número de rupturas.

Nos demais países foram construídas 800 barragens com mais de 30 metros de altura e alguns milhares de barragens com altura inferior a 30 metros, especialmente a partir de 1950, mas poucos dados estatísticos estão disponíveis desde 1930 e especialmente dados de ruptura, e mesmo o número de barragens existentes (mais de 6.000, o ICOLD regula somente 3.000 barragens). 20 barragens com menos de 30 metros de altura romperam, quase todas com capacidades menores que 10 hm<sup>3</sup>.

Segundo o ICOLD (1997) mais de 90% das rupturas de barragens são devidas a ruptura interna (“piping”) ou devido a cheias.

- Ruptura por “piping”

As probabilidades de ruptura que eram elevadas antes de 1930, especialmente para os grandes reservatórios, foram bastante reduzidas com o aprimoramento dos projetos e utilização de equipamentos mais pesados que melhoraram as propriedades mecânicas dos aterros compactados. Cerca da metade das rupturas de barragens construídas depois de 1930 aconteceram depois do 1º. Enchimento, mais de 25% das rupturas ocorrem próximas às tubulações ou túneis internos à barragem. De 12 rupturas reportadas após o 1º enchimento 50% ocorreram em barragem com extensão superior a 1000 metros. Em geral as tubulações podem criar recalques localizados que podem levar ao galgamento ou a trincas localizadas.



- Cheias:

O sub-dimensionamento de vertedouros causou muitas rupturas antes de 1930, com riscos maiores nos grandes reservatórios. Mas em países industrializados a taxa de ruptura tem sido muito baixa para barragens construídas após 1930 (menos que 0,1%); há mais de 30 anos que a taxa está na faixa de  $10^{-5}$ . Isto é válido tanto para pequenos e como para grandes reservatórios em cheias de projeto de período de retorno de 1.000 e 10.000 anos. Este sucesso pode ser devido à grande margem de segurança resultante da borda livre. Barragens com comportas no vertedouro apresentam maior risco em função da menor borda livre e à dificuldade ou impossibilidade de abertura das comportas; ocorreram 10 rupturas por esta causa em grandes barragens, excluída a China.

- Rupturas de barragens a montante:

Cerca de 3% das rupturas das barragens são devidas a ruptura de uma barragem localizada a montante. Este risco não deve ser subestimado para as barragens novas e as existentes, incluindo as barragens em construção. Nem se deve esquecer o risco de obstrução do vertedouro, muito comum na nossa região com a colocação de cercas que podem provocar a obstrução com a retenção do material flutuante.

- Galgamento durante a Construção:

Na maioria das barragens de até 30 metros de altura parte da barragem pode ser construída em pequena altura no leito do rio durante a estação seca e qualquer consequência do galgamento implica em impactos pouco relevantes. Entretanto mesmo para barragens de 20 a 30 metros de altura, em grandes reservatórios, o atraso no cronograma da construção ou a antecipação da estação chuvosa pode expor a barragem a cheias anteriores a sua conclusão devendo-se dispor de um sistema de alerta.

### 3.2.2 Barragens de gravidade (de concreto ou alvenaria)

Conforme ainda ICOLD (1997), no mundo, das 4.500 “grandes” barragens de gravidade em operação em 1995, em torno de 2.500 têm menos de 30 metros de altura. Existem também milhares de “pequenos” barramentos de barragens de gravidade, em geral, barragens de derivação e aquelas formando os vertedouros de barragens de terra. O concreto gradualmente sucedeu a alvenaria entre 1900 e 1930 nos países industrializados. Nos países

de mão de obra de baixo custo (na África, Ásia e especialmente China e Índia) a alvenaria ainda é bastante utilizada. Cerca de 1/3 das grandes barragens de gravidade menores que 30 m de altura são em alvenaria, a proporção cai com o aumento da altura. Desde 1988 algumas dezenas de estruturas menores que 30 metros de altura têm sido construídas de concreto compactado a rolo (CCR).

Cerca de 120 “grandes” barragens de alvenaria de pedra foram construídas antes de 1900 (incluindo-se 80 barragens com altura inferior a 30m) que apresentavam perfis estreitos e fundação deficiente. Foram reportadas 10 rupturas (8%), incluindo 5 delas com alturas menores que 30m.

Foram construídas 600 grandes barragens, incluindo 300 com altura inferiores a 30 metros, no período entre 1900 e 1930. 10 tiveram suas rupturas reportadas, sendo 6 com alturas menores do que 30 metros.

Os registros de segurança de barragens de gravidade construídas antes de 1930 foi de fato pior que os de barragens de aterro, mesmo a probabilidade de ruptura sendo similar, mas o fato da ruptura de barragem de gravidade ser mais rápida tem-se um maior número de vítimas para este tipo de barragem.

Cerca de 40% das rupturas ocorrem durante o primeiro enchimento, usualmente por causa da fundação; ocorre principalmente em barragens com alturas superiores a 30m. As rupturas subseqüentes ao primeiro enchimento são devidas a anormalidades no nível do reservatório, a preocupação é maior nas barragens mais altas e longas. A maioria das rupturas se dá após os 10 anos de operação, portanto, não deve haver relaxamento na vigilância principalmente devido ao fato de que a ruptura, se ocorrer, será rápida. Das 10 rupturas de barragens ocorridas a partir de 1900, 2 foram por ato de guerra, 6 por cheias e 1 por ruptura de barragem a jusante.

O custo de não cumprir as exigências por granulometria dos materiais, juntas construtivas e resfriamento do concreto não se justifica mesmo para barragens menores que 30 metros de altura, isto faz com que não haja registro de ruptura de barragem por deficiência de concreto, mesmo as construídas de 1930 a 1930.

Na África do Sul o galgamento é responsável por 50% dos incidentes, seguidos da erosão interna (em solos dispersivos) com 30%. A instabilidade de taludes responde por

10%. Os 20% restantes são devidos a erros humanos, práticas inaceitáveis, liquefação ou rupturas nas estruturas auxiliares (OOSTHUIZEN e HATTINGH, 2002).

### **3.3 Dados probabilísticos de Acidentes e Rupturas de Barragens**

Para a realização da análise de risco das barragens selecionadas do Estado do Ceará é importante a obtenção de dados e registros de rupturas e acidentes para a determinação das diversas probabilidades a serem consideradas neste tipo de análise. Os registros de acidentes e rupturas de barragens ainda são escassos no Ceará, como também no Brasil. Uma tentativa de levantamento de acidentes (anomalia grave cujo desenvolvimento pode ocasionar a ruptura da obra) e incidentes (anomalias que embora comprometam a funcionalidade da obra não levam a sua ruptura) ocorridos no Estado do Ceará foi feita por MENESCAL et al. (2001b). Na pesquisa, que abrangeu o período de 1917 a 2001, foram utilizados relatórios, artigos de jornais, anais de congressos, livros e contatos com profissionais da área de barragens. Os autores estimam em torno de três rupturas de barragens por ano, considerando a existência de 30.000 barragens e um risco de ruptura de  $10^{-4}$ .

É importante também destacar o levantamento das enchentes de 2004 efetuado pela Coordenadoria de Defesa Civil do Estado do Ceará (CEDEC, 2004), o qual indicou a necessidade de recuperação de 534 barragens rompidas e a reconstrução de outras 352, sendo que deste total (886) 270 são barragens públicas e 616 barragens de propriedade de particulares.

Em geral, estas centenas de pequenas barragens, são denominadas vulgarmente pelo nome de “barreiros”, são construídos anualmente, sem projeto ou qualquer acompanhamento técnico, às vezes com a ajuda de equipamentos pertencentes às prefeituras, muitos deles sem a umidade e a compactação adequada do maciço (“parede”), os vertedouros ou “sangradouros” estão obstruídos por cercas de arame e vegetação ou mesmo são de pequenas dimensões, arrombando por ocasião de chuvas de maior intensidade. Outras barragens, embora abrangidas pela norma, que exige que os projetos sejam submetidos à apreciação da Secretaria dos Recursos Hídricos (Decreto Estadual No. 23.068/94) pelo fato de não se enquadrarem na Classe de Micro (volume menor que 500.000 m<sup>3</sup> e superfície da bacia hidrográfica menor que 3 km<sup>2</sup>, ou quando a altura máxima da barragem não exceda 10m) são igualmente construídas sem o devido acompanhamento técnico.

da barragem não exceda 10 m), são igualmente construídos sem o devido acompanhamento técnico.

As 126 mais importantes barragens do Estado do Ceará (monitoradas pelo DNOCS e COGERH) perfazem um total de 4.326 anos de operação. O número de rupturas/ano para barragens no Estado do Ceará, por falta de dados estatísticos, pode ser estimado considerando-se, por exemplo, a estatística da Tabela 3.4 para barragens de terra do oeste dos EUA, por apresentar um maior número de barragens,  $6,52 \times 10^{-4}$ , logo obtém-se:

Estimativa do número de rupturas/ano de barragens importantes do Estado Ceará =  $4.326 \times 6,52 \times 10^{-4} = 2,82$ , número elevado para a nossa realidade.

A título de exemplo de estimativas de probabilidade de ruptura anual em nível internacional, tomemos os dados do inventário produzido em 1979 pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*U.S. Corps of Army Engineers*), a partir dos quais VON THUN (1985) obteve os resultados indicados nas Tabelas 3.1 e 3.2. Informa que a grosso modo, de maneira superficial, o risco anual de uma barragem romper pode ser estimada em  $1 \text{ a } 2 \times 10^{-4}$ . As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as taxas anuais de ruptura (danos a estrutura com liberação de água do reservatório) ou de acidente (eventos que ameaçam a integridade estrutural da barragem) por tipo e região dos EUA. Os valores são calculados dividindo-se a quantidade de acidentes ou rupturas com o somatório de anos de operação das barragens.

TABELA 3.1 - Taxa Anual de Rupturas ou Acidentes no Oeste dos EUA.

<b>Tipo de ruptura ou acidente</b>	<b>Taxa Anual (x 10<sup>-4</sup>)</b>	
	<b>Terra homogênea</b>	<b>Terra e Enrocamento</b>
Galgamento	1,24	0,2
Problemas de fundação	0,15	0,8
Piping	0,94	0,6
Deslizamento de taludes	0,075	0,85
Problemas estruturais	0,26	0,96
Problemas nos órgão de descarga (vertedouro)	0,26	0,15
Sismos	0,075	0,1

TABELA 3.2 - Taxa Anual de rupturas ou acidentes no Leste dos EUA.

<b>Local: Leste (do Meridiano 105°) dos EUA; Taxa Anual (x 10<sup>-4</sup>)</b>		
<b>Tipo de ruptura ou acidente</b>	<b>Terra homogênea</b>	<b>Terra e Enrocamento</b>
Galgamento	0,61	0,05
Problemas de fundação	0,17	0,34
Piping	0,33	0,16
Deslizamento de taludes	0,06	0,13
Problemas estruturais	0,12	0,18
Problemas nos órgão de descarga (vertedouro)	0,16	0,13
Sismos	0	0,01

VON THUN justifica a probabilidade menor de ruptura no leste dos Estados Unidos em função de que do lado Oeste há uma maior quantidade de registros de ruptura em função da presença do *Bureau of Reclamation*, - órgão do governo norte-americano fundado em 1902, com atuação em 17 estados, que construiu e opera mais de 600 barragens e 58 hidro-elétricas – que atua nesta região.

Dados do inventário do *Bureau of Reclamation* são apresentados em TATALOVICH E HARRIS (1998) com determinação do risco de acidentes e rupturas em função do tipo de barragem, tempo de construção e altura. Os resumos dos resultados são apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4 a seguir, para efeito de comparação dos acidentes e rupturas em barragens do Oeste dos EUA e do *Bureau of Reclamation*, a partir dos resultados históricos obtidos por VON THUN (1985).

TABELA 3.3 - Sumário de acidentes e rupturas de barragens do Oeste dos EUA.

<b>Tipo</b>	<b>Rupturas</b>	<b>Acidentes</b>	<b>No. de Barragens</b>	<b>Tempo de operação (anos)</b>	<b>Risco Anual (x10<sup>-4</sup>)</b>
<b>Terra</b>	74	100	7.812	267.039	6,52
<b>Enrocamento</b>	17	14	200	7.522	4,12
<b>Concreto</b>					
1.Arco	4	8	200	9.101	13,2
2.Gravidade	4	2	285	13.257	4,53
<b>Todas</b>	99	124	8.497	296.919	7,51

TABELA 3.4 - Sumário de acidentes e rupturas de barragens do Bureau of Reclamation.

<b>Tipo</b>	<b>Rupturas</b>	<b>Acidentes</b>	<b>No. de Barragens</b>	<b>Tempo de operação (anos)</b>	<b>Risco Anual (<math>\times 10^{-4}</math>)</b>
<b>Terra</b>	1	39	211	10.429	38,3
<b>Enrocamento</b>	0	1	10	507	19,7
<b>Concreto</b>					
1.Arco	0	8	30	1.660	48,2
2.Gravidade	1	10	22	1.314	76,1
<b>Todas</b>	1	58	273	13.910	42,4

SILVEIRA (2007) apresenta, tendo essencialmente por base a experiência mundial com as estatísticas sobre rupturas de barragens, como valor atual a probabilidade de  $10^{-4}$  para uma barragem vir a romper por ano, tendo como base também, a experiência com análise de risco aplicada a um grande número de barragens canadenses, norueguesas e australianas. O Quadro 3.1 apresenta o critério proposto para a análise das árvores de evento, tendo por base os resultados mais recentes com o estudo estatístico da ruptura de grande número de barragens.

QUADRO 3.1 - Avaliação de risco (probabilidades) a partir das árvores de eventos (SILVEIRA, 2007).

<b>PROBABILIDADE ANUAL DE RUPTURA</b>	<b>AVALIAÇÃO DE RISCO</b>
ALTAMENTE PREOCUPANTE	$10^{-3}$
PREOCUPANTE	$10^{-4}$
ACEITÁVEL	$10^{-5}$
BOM DESEMPENHO	$10^{-6}$
ÓTIMO DESEMPENHO	$10^{-7}$

### 3.4 Incertezas

A incerteza está presente em muitos problemas de engenharia e mais especificamente, em muitos aspectos da segurança de barragens (SMITH, 2002). A palavra incerteza pode ser usada por diferentes pessoas com diferentes significados. Segundo DENIS (1998), apud SMITH (2002), nos estudos sociológicos ocorrem dois níveis de incerteza:

1. Uma pessoa percebe que um problema é de difícil solução ou devido à falta de informação ou a sua excessiva complexidade.

2. Duas ou mais pessoas percebem diferentemente o problema, e propõem diferentes e conflitantes soluções.

Na área de interesse da engenharia a incerteza pode ser atribuída ao primeiro item.

As incertezas associadas a segurança de barragens podem ser agrupadas em dois grupos principais:

1. Incerteza aleatória que pode ser atribuída a uma variabilidade natural, a qual pode ser espacial ou temporal e estimada com um grande número de dados

2. Incerteza epistêmica referida à incerteza do conhecimento (ou nível de ignorância) acerca dos parâmetros que caracterizam o sistema físico que está sendo modelado. A incerteza pode ser reduzida ou até eliminada com o aumento de dados ensaiados ou medidos e também com a melhoria dos modelos .

Constituem também incertezas as relacionadas a erros humanos, tais como devido a negligência e decisões equivocadas em relação ao real objetivo da análise.

Uma forma de considerar a incerteza epistêmica é adotar uma função de distribuição de probabilidade (*f<sub>dp</sub>*) a um parâmetro, a qual pode ser limitada por valores máximo e mínimo (por exemplo, distribuição retangular ou uniforme, triangular, etc) (VOSE,2000), e de intervalos ilimitados representadas principalmente pela distribuição de Gauss (ou distribuição normal), que são de uso relativamente simples mas de pouca valia prática SMITH (2002).

Um dos elementos que fazem da engenharia de barragem uma ciência de certa dificuldade são as incertezas que devem ser consideradas ao longo do projeto, construção e operação da estrutura. A incerteza das condições de fundação, o significado de uma percolação interna recente, o valor das propriedades dos materiais, as cargas esperadas etc, são questões que o engenheiro de barragens vai ter sempre que tratar. Composto estas incertezas (e.g. cargas aleatórias e *performance*) somam-se as incertezas associadas com as limitações dos modelos e o entendimento da *performance* física das barragens. Muito embora os engenheiros reconheçam muitas destas fontes de incertezas, pouco se tem trabalhado explicitamente com estas incertezas no formato tradicional da engenharia.

Segundo VIEIRA (2005) "riscos existem, em todas as obras, projetos e atividades de engenharia, a abordagem determinística tem procurado, de forma indireta, minimizá-los ou afastá-los, numa ilusória e, por vezes, onerosa tentativa de eliminá-los

totalmente. Na abordagem determinística, o uso de **padrões e coeficientes de segurança** tem sido, certamente, a maneira mais tradicional e mais "segura" de fazê-lo; segura, no ponto de vista da responsabilidade profissional e civil do executor. Quanto aos usuários e público em geral, são induzidos a pensar que estão absolutamente protegidos pela exatidão dos cálculos, pela competência dos engenheiros e pela qualidade das especificações técnicas".

O Quadro 3.2 (KREUZER, 2000) apresenta as principais fontes/tipos, exemplos de origem e forma de tratamento de incertezas.

QUADRO 3.2 - Principais Fontes/Tipos e Exemplos de Origem e Forma de Tratamento de Incerteza (KREUZER, 2000).

<b>Fonte/Tipo</b>	<b>Exemplo de Origem</b>	<b>Tratamento Analítico</b>
Física	Conhecimento limitado da geologia, hidrologia, comportamento estrutural.	Simulação Monte Carlo
Estatística	Amostragem	Desvio padrão, erro médio, limites de confiança.
Epistêmica	Simplificação de modelos matemáticos	Simulação Monte Carlo, Teorema de Bayes, Árvore de eventos
Decisão	Visão humana subjetiva de um estado oculto	Árvore de eventos, Teorema de Bayes
Predição	Eventos futuros incertos	Árvore de eventos, Teorema de Bayes
Reação Pública	Falta de confiança ou impossibilidade de transferência	Comunicação
Erro Humano	Ignorância, negligência, subestimação da influência, falta de experiência e treinamento, falta de autoridade para decidir, falta de habilidade para comunicar, falta de confiança etc.	Teoria do erro grosseiro



Na Figura 3.4, a seguir, são mostradas as incertezas inerentes à análise de risco de barragens.

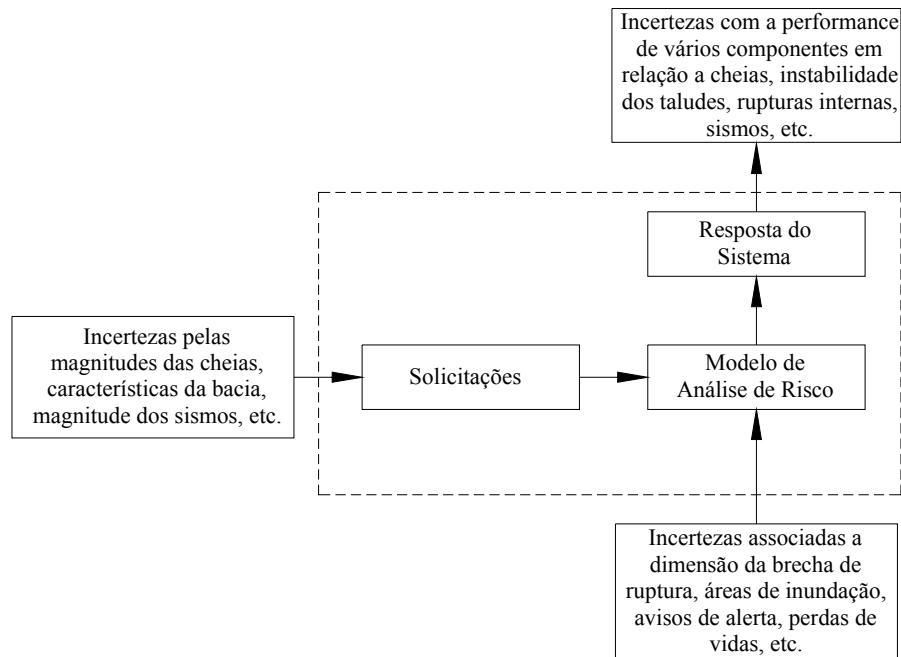


FIGURA 3.4 - Incertezas inerentes à análise de risco.

### 3.5 Estimativa dos Riscos

De acordo com VIEIRA (2005), seja  $S$  o conjunto de solicitações e de  $C$  a capacidade total do sistema, o que se busca é que, para qualquer obra,  $C$  seja sempre maior ou, no mínimo, igual a  $S$ .

A solução tradicional tem sido a de considerar, nos projetos  $C = kS$ , sendo  $k$  o coeficiente de segurança, assumindo valor tanto maior quanto maiores as incertezas na avaliação de  $C$  e  $S$ .

A tendência atual é a de se considerar  $C$  e  $S$  como variáveis aleatórias, definindo-as através de funções de probabilidades, procurando-se então quantificar o risco  $K$  ou a confiabilidade  $G$ , como:

$$K = P[k < 1] \quad (3.1)$$

$$G = P[k > 1] \quad (3.2)$$

Sendo o risco medido por  $P [C < S]$ , pode-se definir  $Z = C - S$  como **coeficiente de desempenho** da obra ou sistema hídrico, de forma que

$$P [ C < S ] = P [ Z < 0 ] \quad (3.3)$$

Este coeficiente  $Z$ , pode ser chamado margem de segurança e então  $P[Z < 1]$  passaria a significar a probabilidade da obra funcionar em condições de insegurança.

O método do **período de retorno** é a forma mais simplista de se avaliar o risco, muito utilizada na avaliação de um evento hidrológico indesejado. É associado ao intervalo de tempo médio de ocorrência,  $T_r$ , e ao risco  $K$ . Sendo o risco  $K$ , para um período de  $n$  anos, dado por

$$K = 1 - (1 - 1/T_r)^n \quad (3.4)$$

O método mais exato para a determinação da probabilidade de falha, porém, com complexidade de aplicação, é através da integração direta das funções densidade de probabilidades das variáveis  $S$  e  $C$ .

Pode-se recorrer ainda ao método de simulação **Monte Carlo** (VOSE, 2000), que pressupõe o conhecimento das funções densidade de probabilidades efetuando-se a geração de valores a partir de suas distribuições de probabilidade, de modo a calcular um conjunto de valores de  $Z$  - funções desempenho do tipo  $Z = C - S = g(X_i)$ , ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ), sendo  $X_i$  as variáveis básicas nas quais se decompõem  $C$  e  $S$  (VIEIRA, 2005) - suficientemente grande para representar uma boa amostra da população  $Z$ .

Outros métodos se baseiam numa aproximação analítica da função  $Z$ , através de sua **expansão em série de Taylor**, truncando-a a partir dos termos de segunda ordem. Quando a expansão da Série de Taylor se dá em torno da média tem-se o método MFOSM (“Mean Value First Order Second Moment”). Se a expansão é feita em torno de um provável ponto de falha leva o nome de AFOSM (“Advanced First Order Second Moment”).

O **método PEM** (“Point Estimate Method”), primeiramente proposto por Rosemblyeth em 1975 e didaticamente exposto por HARR (1987) baseia-se na analogia que pode ser estabelecida entre a distribuição de probabilidade e distribuição vertical de cargas em um sistema rígido. O valor esperado é análogo ao centro de carga.

O conceito de **números difusos** ou nebulosos – *fuzzy sets* – conceito inicialmente proposto por Zadeh em 1965 e indicado por KAUFMANN & GUPTA (1985) como generalização da teoria clássica dos conjuntos. Na abordagem clássica, cada elemento tem pertinência  $\mu$  que vale 1 ou 0, indicando a pertinência ou não pertinência,

respectivamente. No caso do conjunto difuso, vários são os níveis de pertinência para os elementos definidos no intervalo  $\mu = [0,1]$  e pode ser representado por uma função de pertinência  $\mu$ . O nível de pertinência deve refletir a importância relativa da propriedade.

FONTENELLE & VIEIRA (2001) apresentam uma aplicação de análise de risco com a utilização dos métodos de Monte Carlo, PEM e Números Difusos, na verificação da estabilidade de talude de jusante de barragem de terra, para a condição de reservatório cheio.

### **3.6 Avaliação, Análise e Gerenciamento de Risco em Barragens**

O risco potencial associado a um cenário de deterioração é medido pelo custo dos prejuízos resultantes da sua ocorrência. O risco efetivo é obtido pelo produto do risco potencial pela sua probabilidade de ocorrência.

O risco depende assim de fatores intrínsecos da barragem, principalmente das suas características e dimensões, e da qualidade do seu projeto, construção e operação, e de fatores associados ao meio ambiente. Entre estes podem ainda distinguir-se os fatores de natureza física, tais como a ocorrência de sismos e cheias, a agressividade do clima e mesmo a capacidade de armazenamento e as características da sua gestão, e os fatores humanos e econômicos, como a população e as instalações existentes situadas a jusante da barragem.

É muito difícil uma avaliação rigorosa do risco associado à ocorrência de um cenário de deterioração, quer no que diz respeito aos custos quer quanto à avaliação da probabilidade da sua ocorrência.

Assim, o risco é geralmente avaliado por métodos simplificados (CSOPT (1993); FUSARO (1999); KUPERMAN et al.(2001), MENESCAL et al. (2001a) e BUREAU OF RECLAMATION (2001) ou mesmo índices globais caracterizados pelos três níveis seguintes, conforme USCOLD (1982); CSOPT (1990); SANCHES (1983) e USFEMA (1996):

- Risco elevado, quando podem ser afetadas muitas vidas humanas e custos materiais muito elevados;
- Risco significativo, quando podem ser afetadas algumas vidas humanas e custos materiais elevados;

- Risco baixo, quando apenas estão em causa custos materiais não muito elevados.

Segundo MEDEIROS (2005) risco é função dos danos, da probabilidade e consequência dos possíveis eventos, ou seja.

$$\text{Risco} = f(\text{danos, probabilidade, consequência}).$$
$$\text{Risco (consequência/unidade de tempo)} = \text{frequência (eventos/unidade de tempo)} \times \text{magnitude (consequência/evento)}.$$

O termo análise de risco é aqui referido para focar a avaliação das condições de aceitabilidade da segurança de barragem, utilizando informações provenientes da avaliação do risco e outras decisões. A avaliação do risco é um processo sistemático no qual engenheiros profissionais de barragens provêm os tomadores de decisão com estimativas dos riscos e incertezas associadas com os eventos, respostas do sistema e consequências, que caracterizam a “performance” da barragem existente e as várias alternativas reabilitadoras a partir das diversas condições de carregamentos.

Para SILVEIRA (2007) a análise de risco é um processo sistemático que tem por objetivos básicos:

- Identificar os riscos em potencial e os modos de ruptura;
- Proceder a uma estimativa estatística de risco;
- Avaliar a tolerabilidade de risco;
- Avaliar o potencial de redução de risco, através de medidas corretivas eventualmente necessárias;
- Estabelecer uma estratégia de atenuação de risco.

Conforme SILVEIRA (2007), dentre os benefícios e desafios da análise de risco, citando ANCOLD (2003) e ICOLD (2005) tem-se:

“– *Um tratamento explícito e transparente das incertezas;*

– *Um processo racional e sistemático.*

– *Um caso específico de avaliação de segurança. Avaliação de riscos requer uma estimativa detalhada das consequências de uma ruptura em potencial, que é específica para*

*a barragem em questão, e relaciona o nível de segurança requerido para a barragem diretamente a essas conseqüências.*

- Uma avaliação compreensível da segurança da barragem.*
- Uma base racional, quantitativa para comparação de risco entre várias barragens e modos de ruptura.*
- Uma estrutura de trabalho para o planejamento de uma trajetória ótima para a redução de riscos.*
- Uma base para o estabelecimento dos objetivos do plano de segurança público.*
- Uma avaliação de riscos sob todos os níveis de carregamento .*
- Um entendimento apropriado das responsabilidades potenciais da posse de uma barragem.;*
- Uma compreensão amplamente melhorada da segurança de uma barragem.”*

Conforme VON THUN (1985a) duas grandes barreiras ainda permanecem na aplicação da análise de risco em barragens, para que esta se torne uma verdadeira realidade:

1. Desenvolvimento de dados e raciocínio probabilístico para problemas reais.
2. Aceitabilidade do processo por parte de empresas, agências ou órgãos governamentais que têm em seus quadros engenheiros e gerentes com opiniões divergentes sobre a eficiência e a confiabilidade da técnica.

VON THUN (1998) apresenta a estrutura da análise de risco, no qual o processo de decisão em segurança de barragens, é composto por:

- Análise de Risco: consiste no processo de identificar e estimar a probabilidade das cargas, modos de ruptura, e conseqüências da ruptura;

- Avaliação do Risco: consiste na avaliação das possíveis ações relacionadas a uma certa estrutura à luz de todos os fatores de decisão (e.g. custos, tempo, aspectos ambientais, operação, pessoas), e;

- Gerenciamento do Risco: difere da Avaliação do Risco principalmente em escala e tempo. A estimativa de risco está relacionada em obter uma decisão específica em

um projeto específico em certo tempo. O gerenciamento de risco de segurança de barragens é um processo amplo que considera como dados de entrada os resultados da análise de risco e da avaliação do risco. As avaliações são efetuadas repetidas vezes em um grande número de projetos. O gerenciamento do risco busca a eficiência e redução de custos nas atividades e programas de redução de risco, incluindo monitoramento, manutenção, inspeções, e modificações estruturais, não estruturais e operacionais.

O gerenciamento de risco pode ou não existir nas organizações, depende se elas usam ou não a análise de risco e avaliação de risco. A diferença em tais casos está na entrada, caso se trate de análise de risco e avaliação de risco, ou se trata de estudos tradicionais (restrições financeiras, monitoramento, etc).

No estudo e prática do gerenciamento de risco uma dificuldade comum é encontrada nas definições básicas. Neste contexto, MENESCAL et al. (2001d) apresenta uma coletânea de termos e expressões relacionadas à segurança de barragens e ao estudo do risco associado, que visa uniformizar ao máximo os desvios naturais de interpretação. Um Glossário, em português, é sugerido e pretende-se que seja um documento com atualizações constantes na atividade da engenharia de segurança de barragens, ao qual podem ser acrescentados termos que se julguem mais importantes. E retirados os que se considerem não específicos ou não aplicáveis.

McCANN Jr & CASTRO (1998) apresentam os principais passos que compõem uma análise de risco em barragens, quais sejam:

- Definição do objetivo;
- Caracterização do problema (composto por: definir os principais objetivos da análise, complexidade técnica, consequência ou efeito da ruptura; definição do usuário, o grau em que a integridade técnica da análise de risco deve ser defendida);
- Estabelecimento de objetivos claros:
- Estabelecimento do nível da análise;
- Selecionar o escopo da análise de risco;
- Implementação.

McCANN Jr (1998) apresenta as razões para a análise de risco se tornar uma ferramenta cada vez mais atuante na prática da segurança de barragens. Estas razões podem ser: de natureza técnica, devido a troca de experiências em razão da aplicação crescente do uso da ferramenta; de natureza financeira, em face da escassez de recursos para aplicação nas medidas de redução de riscos; de natureza política: representantes públicos responsáveis pelas aplicações de recursos estão sendo requisitados a tomar posição sobre questões de saúde pública e segurança das infraestruturas; sociais: a sociedade está mais consciente dos riscos e demanda mais responsabilidade fiscal nos gastos públicos; consciência profissional: existência de uma nova geração de engenheiros e outros profissionais com conhecimentos em risco e gerenciamento de riscos; tomada de decisão integrada: existe uma tendência de os projetos de obras de engenharia integrar cada vez mais os custos com os riscos.

Segundo OBONI (1999), há realmente uma forte e crescente demanda das pessoas em saber seu nível de exposição ao risco e os esforços que são empreendidos para mitigar esses riscos. Risco deve ser reconhecido como sendo onipresente e considerado como um parâmetro do cotidiano em qualquer atividade humana. Avaliação de Risco, tomada de decisões baseadas em risco, avaliação de viabilidade de projetos baseada em risco, estudos do erro humano e o desenvolvimento de planos mitigadores de risco e planos de administração de crise, para riscos que podem ou não ser mitigados, estão se tornando armas essenciais no arsenal de gerentes modernos, geralmente agrupados na expressão de Gerenciamento de Risco.

Para LAFITTE (1983) a aceitação do risco por parte de um indivíduo ou através da sociedade é influenciada por inúmeros fatores. O homem é inevitavelmente exposto ao risco da morte por doença, nos países industrializados este risco é equivalente a  $10^{-2}$ / pessoa x ano. Por outro lado o menor risco involuntário aceito é aquele causado por eventos naturais, tais como relâmpagos, por exemplo, o qual é de  $10^{-6}$ / pessoa x ano. Entre os dois extremos, as pessoas parecem aceitar o risco na proporção dos benefícios associados.

De acordo com OTWAY & ERDMANN (1970), *apud* LAFITTE (1983), em relação a vários riscos anuais de perda de vida, a atitude da população parece ser a seguinte:

- $10^{-3}$ / pessoa x ano: risco é inaceitável: medidas imediatas são tomadas para reduzir o risco, ou a atividade é abandonada;

- $10^{-4}$ / pessoa x ano: existe pouca inclinação para a tomada de ações imediatas, mas a sociedade está preparada para aplicar recursos financeiros para reduzir o risco (trânsito, incêndios, e outros);
- $10^{-5}$ / pessoa x ano: autoridades devem alertar os cidadãos, os pais devem alertar as filhos;
- $10^{-6}$ / pessoa x ano: o indivíduo não mais sente preocupado, e demonstra que ele está resignado em aceitar o risco.

Ou seja, o risco que um indivíduo está preparado voluntariamente a assumir tem uma probabilidade  $10^3$  menor do que a imposta a ele, para casos com o mesmo benefício.

LAFITTE (1983), portanto, afirma que não existe critério absoluto e objetivo para definir o risco aceitável de perdas de vidas pela sociedade. Mas com base no que se tem estabelecido acerca da aceitação do risco, ele recomenda que uma barragem deve ser projetada de tal modo que o seu potencial de perda de vida não deva ser superior a  $10^{-6}$ / pessoa x ano.

Segundo SALMON & HARTFORD (1995), uma avaliação de risco recorre a três perguntas fundamentais:

1. Que pode dar errado? (Ameaça);
2. Quanto isso é provável? (Probabilidade de ruína);
3. Que danos isso causará? (Conseqüência de ruína).

Ao responder a estas questões obtêm-se os dados necessários para a medida quantitativa do risco, calculado pela seguinte equação:

$$\text{Risco} = C \times R \times Co$$

onde:

C: probabilidade da Carga (solicitação);

R: probabilidade de Resposta do Sistema para a carga dada;

Co: Conseqüências da ruptura.

BUREAU OF RECLAMATION (2003) apresenta uma outra forma de estimar as probabilidades de resposta do sistema através dos denominados “Conversores verbais” (“*Verbal descriptors*”). Esta metodologia é aplicada quando os membros da equipe de



avaliação de risco do *Bureau of Reclamation* são reunidos em seções do tipo “tempestade de idéias” (“*brainstorms*”) e quando não existe base estatística apropriada, ou seja, a frequência de ruptura “conhecida”. O Quadro 3.3 apresenta um exemplo de escala dos conversores verbais.

QUADRO 3.3 - Conversores Verbais (BUREAU OF RECLAMATION, 2003).

<b>CONVERSOR VERBAL</b>	<b>PROBABILIDADE</b>
VIRTUALMENTE CERTO	0,999
MUITO PROVÁVEL	0,99
PROVÁVEL	0,9
NEUTRO	0,5
MPROVÁVEL	0,1
MUITO IMPROVÁVEL	0,01
VIRTUALMENTE IMPOSSÍVEL	0,001

A Tabela 3.6 apresenta um exemplo de análise de estimativa do risco custo anual utilizada pelo *Bureau of Reclamation* (VON THUN, 1999).

De acordo com VON THUN (1999) os principais elementos da avaliação de risco de segurança de barragens são:

1. Listar todos os modos e seqüências de ruptura concebíveis (identificação de ameaças).
2. Fazer um elenco destes modos e selecionar aqueles que são possíveis de acontecer.
3. Exibir estes modos em uma árvore de eventos com a lógica que melhor representa a realidade física dos modos de ruptura potenciais.
4. Estimar as probabilidades em cada ramo da árvore de eventos; alguns ramos levam à ruptura, outros não.
5. Executar os processos de cálculo para conseguir a probabilidade (ou probabilidades) de vários tipos de ruptura.
6. Revisar os ramos críticos da árvore de eventos para verificar qual das probabilidades atribuídas precisam de refinamento adicional.

7. Documentar o processo inteiro de uma maneira transparente, especialmente as razões para a indicação de probabilidades, de forma que todos os passos sejam fáceis para revisar.
8. Determinar as conseqüências dos vários modos de ruptura.
9. Determinar o risco associando probabilidades de ruptura e conseqüências.

As árvores de eventos têm por função simular adequadamente os meios mais prováveis de ruptura em potencial da barragem, e em estimativas das probabilidades destes eventos (SILVEIRA, 1999). Indicam cada etapa do processo de ruptura, representado por uma seqüência de nódulos nos “braços” em que a árvore é desmembrada, com uma probabilidade associada à ocorrência de cada evento. Constitui em elemento “chave”, a avaliação das probabilidades, cuja estimativa, de maneira mais adequada, deve partir de um “*workshop*” com operadores e engenheiros. Normalmente uma árvore de eventos curta conduz a probabilidades maiores que em árvores de eventos longas.

A Figura 3.5 a seguir apresenta um exemplo de árvore de eventos (ou de falha) para a determinação da probabilidade de ruptura por erosão interna (adaptado de FUNNEMARK et al., 2000).

TABELA 3.5 - Estimativa do custo de risco anual (VON THUN,1999).

<b>Parte I</b>					
<b>Intervalo de carga</b>	<b>Probabilidade do intervalo de carga</b>	<b>Modo de ruptura Potencial</b>	<b>Probabilidade de Resposta do Sistema</b>	<b>Custo dos danos a propriedades/ Perda Potencial de vidas (milhões US\$)</b>	<b>Custo do Risco Anual (CRA) (US\$)</b>
	<i>Passo 1</i>	<i>Passo 2</i>	<i>Passo 3</i>	<i>Passo 4</i>	<i>Passo 5</i>
CMP 40-60%	0,004	Ruptura do vertedouro Auxiliar	0,1	35 A	14.000,00
CMP 60-80%	0,0008	Ruptura do vertedouro Auxiliar	0,3	35 A	8.400,00
CMP 60-80%	0,0008	Galgamento	0,05	80 B	3.200,00
CMP 60-80%	0,0008	Ruptura do vertedouro de Serviço	0,05	80 B	3.200,00
CMP 80-100%	0,0002	Ruptura do vertedouro Auxiliar	0,5	35 A	3.500,00
CMP 80-100%	0,0002	Galgamento	0,2	160 C	6.400,00
CMP 80-100%	0,0002	Ruptura do vertedouro de Serviço	0,1	160 C	3.200,00
Erosão Regressiva com reservatório cheio	0,5	Galgamento	0,0005	80 C	20.000,00
Sismo* (5.5-6.5)	0,01	Galgamento	0,005	80 C	4.000,00
Sismo (6.5-7.5)	0,001	Galgamento	0,1	80 C	8.000,00
Sismo 7.5	0,0001	Galgamento	0,3	80 C	2.400,00
Total do Custo do Risco Anual (US\$) =					76.300,00
<b>Parte II</b>					
<b>Perda Potencial de Vidas - Condição de exposição</b>				<b>Probabilidade Anual de ocorrer a condição de exposição</b>	
(A) pessoas em recreação num raio de 16 km da barragem				0,00131	
(B) mortes relacionadas a evacuação				0,00057	
(C) perdas de vidas de até 50 pessoas por ruptura à noite (20h às 4h)				0,00016	

CMP: Cheia Máxima Provável

\* - Escala Richter

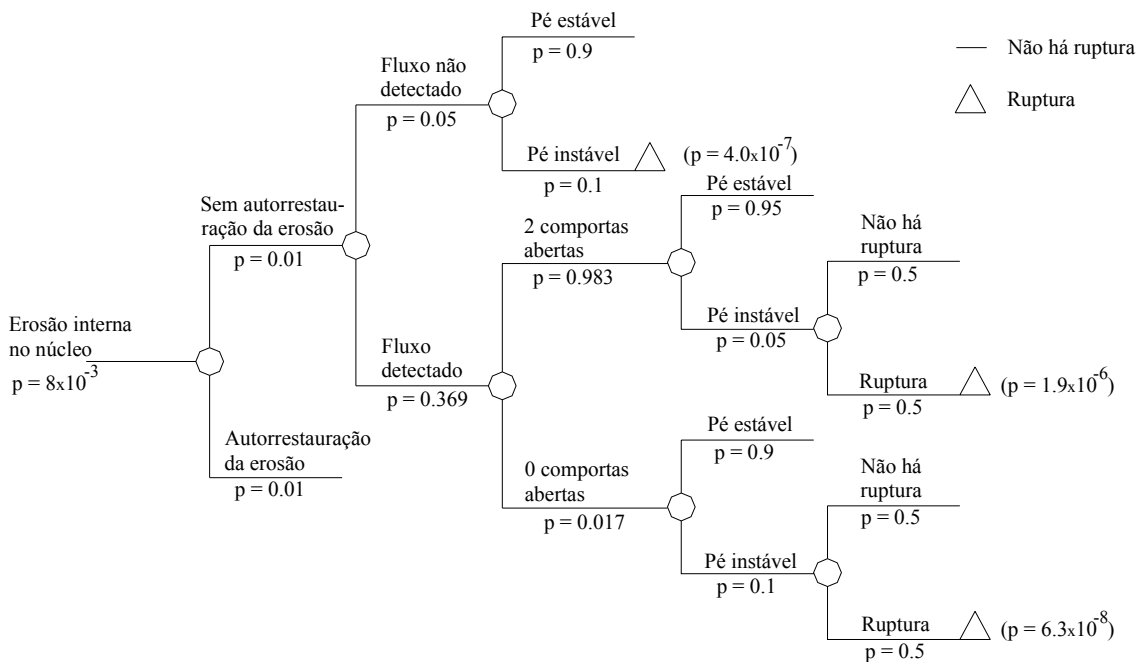


FIGURA 3.5 - Exemplo de Árvore de Eventos para a determinação da probabilidade de ruptura por “piping” (adaptado de FUNNEMARK et al., 2000)

Na árvore de eventos, estes são mutuamente exclusivos sendo, portanto, a probabilidade de ruptura por “piping” dada pelo somatório de p, ou seja:

$$\text{Probabilidade de ruptura} = \Sigma p = 2,36 \times 10^{-6}.$$

Uma dificuldade óbvia com esta abordagem é a atribuição de probabilidades. As probabilidades que a resposta da barragem às cargas aplicadas ou condições levarão à ruptura também devem ser estimadas. Estas probabilidades devem ser estimadas por engenheiros experientes, peritos na área em questão e familiarizados com a barragem e com todas as investigações e estudos prévios à sua disposição.

Segundo FELL et al. (2000) o uso da técnica da avaliação quantitativa do risco inclui:

- Identificação dos modos de ruptura ;
- Análises de estimativa da probabilidade de ruptura da barragem;
- Cálculo das perdas econômicas e ambientais, e perdas de vidas, como consequência da ruptura da barragem.

FELL et al. (2000) apresentam uma análise crítica dos métodos disponíveis para a estimativa da probabilidade de ruptura de barragens de terra e de concreto, o qual

apresenta duas categorias de métodos disponíveis para a estimativa da probabilidade de ruptura:

a) Método da performance histórica: utiliza a frequência de ruptura histórica e assume que a performance futura de tais barragens será a mesma da performance de barragens similares. Este método não considera diretamente os efeitos da carga do reservatório, incluindo as solicitações de operação normal ou das cheias, nem permite detalhar as características da barragem ou a habilidade daquela responder pela operação da barragem para detectar um problema em andamento e intervir. Em geral, este método só deve ser usado para estimativas iniciais e para checagem mais detalhada dos métodos de árvores de eventos, e não devem ser usados sozinhos para estimativas pormenorizadas;

b) Método da árvore de eventos: tem a vantagem de que os mecanismos de ruptura podem ser modelados desde o início, assim como o nível do reservatório, os pormenores da barragem e da fundação e a habilidade de intervir na prevenção da ruptura. Entretanto, algumas vezes, existe pouca base objetiva, e muito raciocínio subjetivo é utilizado na estimativa das probabilidades condicionais dentro da árvore de eventos, podendo-se, assim, ser necessário redirecionar para a performance histórica como uma forma de “verificação de credibilidade” das respostas.

Segundo CYGANIEWICZ & SMART (2000) a análise de risco tem muitos benefícios incluindo os seguintes:

1. Comunicação do risco;
2. Melhoria do entendimento do comportamento da barragem;
3. Identificar as informações necessárias;
4. Formular alternativas de ações corretivas;
5. Alocações de recursos finitos (pessoal, equipamentos, investimentos, tempo).

Os principais benefícios de uma avaliação de risco são:

- Um processo estruturado para o uso consistente e efetivo de juízo de engenharia (cenários de ruína, árvores de eventos, probabilidades estimadas, etc);

- A oportunidade para descrição e quantificação explícita do juízo de engenharia;
- Uma avaliação da importância relativa de perigos, para subsidiar decisões no requisito para estudos adicionais e melhoria da segurança;
- Uma consideração equilibrada de todos os fatores, proporcional com sua contribuição para a probabilidade de ruína, inclusive aquelas não agradáveis para análise, porque avaliação segue a partir das condições, peculiaridades, vulnerabilidades e modos de ruína associados únicos para cada barragem individualmente;
- Um método consistente por comparar a segurança (risco) relativa de barragens;
- Uma base mais formal para priorizar melhorias da segurança de barragens;
- A melhor resposta disponível para a pergunta, “quão segura é nossa barragem?”.

Uma outra abordagem na avaliação da segurança da barragem pode ser obtida através da estimativa de danos incrementais, que provê a estimativa de acréscimo em danos econômicos e em perdas de vidas para cenários de rupturas de barragens, comparando-se com casos onde não se considera a existência da barragem (i.e. fluxos naturais).

É importante na análise de risco investigar as condições específicas do sítio barrável em relação a cada elemento do sistema barragem-fundação e vertedouro, revisão dos dados históricos e dados construtivos (projetos “*as built*”) e das investigações de campo e laboratório. As condições de campo deverão ser estudadas no que se refere às condições de superfície e sub-superfície (sondagens e ensaios de campo) de cada elemento da barragem, análise dos dados hidrológicos e sísmicos da região.

Segundo BOWLES (1989) a avaliação de risco de barragens deve conter quatro etapas, ver Figura 3.6.

Numa **primeira etapa**, deve-se fazer uma **identificação do risco**, que consiste em reconhecer e listar os vários fatores que podem contribuir para o risco de uma barragem, e em seguida organizá-los numa seqüência lógica de eventos, abrangendo todos os

“possíveis” modos de ruptura, tal organização é conhecida como “**árvore de eventos**” que serve como um modelo de risco para a avaliação da segurança da barragem existente ou para avaliar a eficiência das alternativas de propostas corretivas.

A **segunda etapa** consiste na **estimativa das probabilidades** para cada ramo da “árvore de eventos” proposta e no cálculo das conseqüências da ruptura da barragem para cada modo de ruptura. O resultado dessa etapa é uma estimativa da probabilidade de ruptura e perdas de vidas ou econômicas associadas a cada modo de ruptura, ou combinação de modos de ruptura, para uma determinada barragem existente (alternativa nada a fazer).

Se os riscos são inaceitáveis, a **análise prossegue para a terceira etapa**, chamada de **aversão ao risco**, que engloba a formulação e avaliação de alternativas para a redução ao risco. Para barragens, em geral, são avaliadas diversas alternativas de obras de recuperação. A análise de aversão ao risco pode ser alcançada reduzindo-se as probabilidades associadas a cada ramo da árvore de eventos ou pela redução das conseqüências. Em ambos os casos medidas estruturais e não estruturais devem ser consideradas.

O **passo final** do processo consiste em decidir **qual risco residual é aceitável**. BOWLES (1989) apresenta exemplos de vários critérios de aceitação de risco, no entanto alerta o autor, que para uma barragem em particular, o critério escolhido deve ser acordado entre o proprietário e o agente regulador de segurança de barragens.

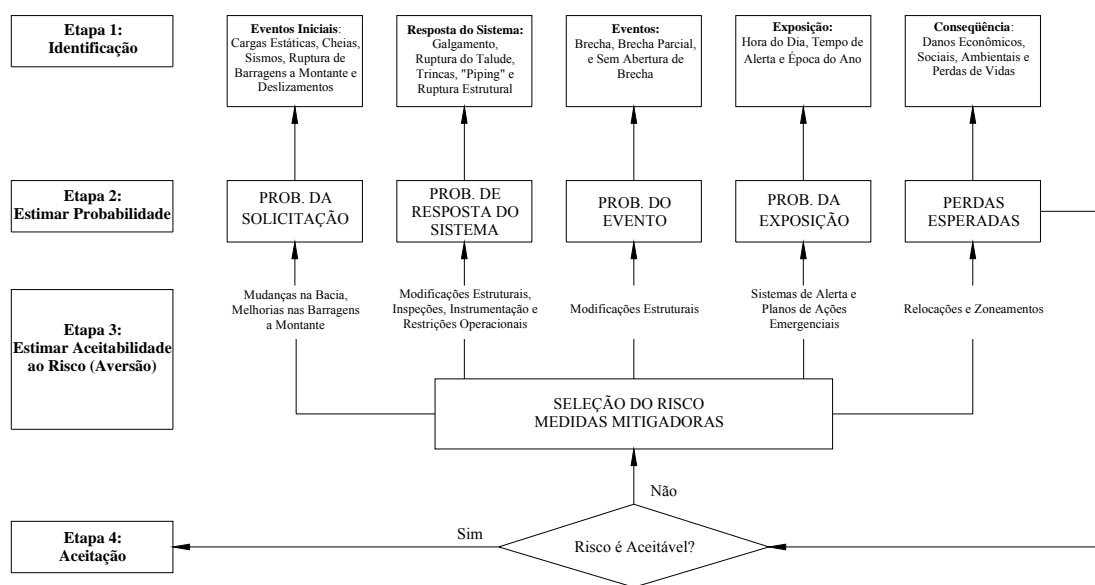


FIGURA 3.6 - Esquema da metodologia baseada no risco para ações de melhoria da segurança de barragens (adaptado de BOWLES, 1989)

Segundo COLLISCHONN & TUCCI (1997) o risco imposto pela barragem pode ser dado pelo produto da probabilidade de rompimento e do prejuízo que pode ocorrer expresso em prejuízo esperado anual. A Tabela 3.6 apresenta um exemplo de análise de risco para um grupo de duas barragens. Pode-se observar que, embora a barragem B apresente uma menor probabilidade de rompimento que A, ela não pode ser considerada mais segura porque os prejuízos materiais são tão superiores aos de A, que o prejuízo esperado anual de B é superior. Neste caso poderia ser mais eficiente dirigir os recursos a uma diminuição da probabilidade de falha da barragem B, o que resultaria num ganho maior de segurança por parte da empresa que administra o conjunto de barragens.

TABELA 3.6 - Exemplo de comparação do risco de duas barragens

<b>Barragem</b>	<b>Probabilidade de Rompimento</b>	<b>Prejuízos \$ (x 10<sup>6</sup>)</b>	<b>Prejuízo esperado anual (\$)</b>
A	1/10.000 por ano	10	1.000,00
B	1/20.000 por ano	30	1.500,00

Uma outra classificação das barragens quanto à consequência da sua ruptura pode ser visualizada na Tabela 3.7. Avaliação do potencial de perdas, com ou sem a ruptura da barragem, deve ser baseada em estudos de inundação, e deve considerar o desenvolvimento existente e o previsto, na utilização das terras a jusante. Ao mesmo tempo, o estudo apropriado do nível de inundação deverá depender das consequências potenciais da ruptura. Para as barragens onde houver incertezas acerca das consequências de seu colapso, deve-se utilizar uma análise simplificada e conservadora, quanto às previsões preliminares. Se esta análise demonstrar um certo potencial de risco, uma análise mais detalhada deve ser adotada. No caso de barragens onde as consequências de ruptura recaiam claramente dentro de uma categoria “muito baixa”, um estudo formal de inundação não será necessário.

TABELA 3.7 - Classificação da Consequência de Ruptura de Barragens.

<b>Consequência de Ruptura</b>	<b>Perda de vidas</b>	<b>Econômico, Social e Danos Ambientais</b>
Muito Alta	Significativa	Dano Excessivo
Alta	Alguma	Dano Substancial
Baixa	Nenhuma	Dano Moderado
Muito Baixa	Nenhuma	Dano Mínimo



As conseqüências do rompimento de uma barragem podem ser diminuídas com sistemas de alerta e evacuação e o zoneamento de áreas inundáveis. A implementação de sistemas de alerta ou planos de ação emergencial (PAE) e evacuação deve ser adotada como forma de diminuir os riscos de perdas de vidas humanas.

Com relação a estimativa de perdas de vidas por ruptura de barragens, segundo GRAHAM (1998) três fatores influenciam, em muito, as perdas de vidas em ruptura de barragens:

1. Número de pessoas na área provável de inundação (pessoas em risco);
2. A totalidade de avisos colocados disponíveis para a população a ser exposta a inundação;
3. A severidade da cheia.

Sugere, ainda, os seguintes passos para estimar as perdas de vidas na ruptura de uma barragem:

1. Determinar os vários cenários de ruptura a analisar;
2. Determinar as categorias de tempo para as quais a estimativa de perdas de vidas são necessárias;
3. Determinar quando devem ser iniciados os avisos da ruptura da barragem;
4. Determinar a área de inundação para cada cenário;
5. Estimar o número de pessoas em risco para cada cenário de ruptura e categorias de tempo;
6. Estimar o número de fatalidades com base em fórmulas empíricas;
7. Avaliar as incertezas.

A Tabela 3.8, de BOWLES. et al. (1998), mostra as solicitações que causam ruptura nas barragens da Austrália e seus impactos em perdas de vidas e no custo do risco. Pode-se observar que o impacto maior em perdas de vidas ocorre quando da situação de carregamentos estáticos, tais como, deslizamentos de taludes e ruptura interna (“*piping*”). As

cheias não acarretam maiores perdas de vidas em função dos planos emergenciais em situações de chuvas intensas, mas provocam grandes danos.

TABELA 3.8 - Rupturas em barragens e conseqüências em perdas de vidas e custos (BOWLES et al.,1998)

Solicitações	Ruptura (%)	Perdas de vidas (%)	Custo do Risco total (%)
Cheias	91	31	80
Terremotos	1	1	1
Carregamentos estáticos	8	68	19
Total	100	100	100

McCANN & ROBERTSON (1999) discutem as fontes das incertezas para a estimativa de perdas de vidas em rupturas de barragens e apresenta um modelo através de função de densidade de probabilidade para a estimativa de perdas de vidas. McCLELLAND E BOWLES (1999) apresentam um resumo dos fatores que afetam a quantidade de perdas de vidas devido a ruptura de barragens e as lições que são apreendidas, baseada numa detalhada revisão de rupturas históricas de barragens. Tais fatores são: o modo de ruptura, a detecção da ruptura, o tempo de aviso de evacuação, os tipos e modos de evacuação, a dinâmica da onda de cheia, abrigos, área de inundação, densidade populacional, traumas psicológicos, etc.

HARRALD et al. (2004) apresentam uma revisão de algumas metodologias que utilizam o risco como ferramenta de tomada de decisão em segurança de barragens, com destaque nas metodologias adotadas pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), e do United States Bureau of Reclamation (USBR). As metodologias do USACE foram desenvolvidas no Programa REMR (*Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation*) de reparo, avaliação, manutenção e habilitação, no início dos anos 80's (ANDERSEN et al., 1999) e é baseada em índices de Condição (*Condition Indices – CI*) que variam de 0 a 100, e medem as condições físicas das estruturas em relação a suas características operacionais e de desempenho, a metodologia foi fundamentada no trabalho de ANDERSEN & TORREY III (1995) para barragens de aterro. Em relação à metodologia adotada pelo USBR informa que este desenvolveu, implementou e passou a utilizar a partir de 1997 o risco como ferramenta em segurança de barragens a partir do Sistema Baseado no Risco (RBPS - *Risk Based Profile System*) após uma minuciosa investigação sobre o sistema em operação vigente, o procedimento denominado de TPR (*Technical Priority Rating*) desenvolvido em 1986 e que não utilizava o risco como ferramenta.

Conforme citado anteriormente o RBPS incorporou a seguinte equação para o risco da barragem:

Risco = probabilidade da carga x probabilidade de um evento adverso x Conseqüências.

### **3.7 Ações de Segurança de barragens no Estado do Ceará**

O grande número de barragens existentes no Ceará e a importância destas na vida da população já justificariam os cuidados devidos a estes elementos essenciais da infraestrutura estadual. Centenas destas barragens, por deficiências de projeto, construção, operação ou manutenção, são destruídas nos períodos de cheias acarretando, por consequência, danos ambientais, econômicos e sociais, e em algumas vezes perdas de vidas humanas.

No Estado do Ceará, antes de 1987, predominou a ação do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), com a construção de obras hídricas (canais, adutoras, açudes, poços, estações elevatórias, perímetros irrigados, etc.) de médio e grande porte.

O DNOCS, criado em 21.10.1909, sob a denominação de IOCS - Inspetoria de Obras Contra as Secas, recebeu ainda em 1919, o nome de Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas - IFOCS - antes de assumir sua denominação atual, DNOCS, que lhe foi conferida em 28.12.1945.

Conforme ARAÚJO (2003) é de se destacar o pioneirismo do DNOCS no desenvolvimento de tecnologia para construção de barragens quando em 1938, a então IFOCS, apenas dezoito anos após o nascimento da Mecânica dos Solos - cujos princípios fundamentais foram publicados somente por ocasião do Primeiro Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Fundações, realizado em 1936 - adquiriu os primeiros aparelhos para a montagem de um Laboratório de Solos e Tecnologia de Concreto. Logo depois, o IPT- Instituto Tecnológico de São Paulo - também montava o seu laboratório de solos.

O Laboratório Central de Solos e Concreto do DNOCS tinha a finalidade de fazer o controle de construção da Barragem do Açude Curema (em Piancó - PB)- a mais importante obra do DNOCS, à época. Pela primeira vez no Nordeste foram utilizados

métodos e ensaios de caracterização e compactação, destinados ao estudo dos solos da região, para sua aplicação no corpo da barragem.

Até 1948, era o único Laboratório de Mecânica dos Solos do Nordeste. Este proporcionou o desenvolvimento de metodologia própria, inédita, como o Método de Ensaio de Solos, proposto e aprovado para utilização pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como o Ensaio de Limite de Contração, além de instruções para coleta de amostras nos empréstimos para estudos. Nos ensaios realizados eram utilizadas as normas da ABNT e especificações do *Bureau of Reclamation (EUA)*, algumas adaptadas às condições especiais de trabalho no Laboratório. Nele, foram feitos os primeiros estudos de pesquisa de estabilização granulométrica para pavimentação rodoviária. Em 1954, o DNOCS participou do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, mostrando sua experiência sobre o Laboratório.

O DNOCS, a partir de 1945 e mais especificamente nas décadas de 50 e 60, intensificou suas ações no desenvolvimento dos recursos hídricos, com a ampliação da oferta de água, com destaque para a construção de três dos quatro maiores açudes do Estado: Araras (1958), Orós (1962) e Banabuiú (1966).

Até 1920, o DNOCS havia construído 61 açudes, até 1930, o total subia a 96, para em 1940, já contar com 128 açudes públicos. De 1940 até 1981, o número de barragens aumentou para 263, estando atualmente (2003) com 299 açudes, armazenando um total de  $17,7 \times 10^9$  metros cúbicos d'água.

Nesta fase, destaca-se ainda o trabalho dos seguintes órgãos: a) Departamento de Poços e Açudes da Superintendência de Obras do Estado do Ceará (SOEC); b) Superintendência de Obras e Serviços Públicos do Estado do Ceará (SOSP); c) Companhia de Águas e Esgotos do Ceará (CAGECE), que com o apoio do extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), projetou e construiu as obras do Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, composto pelas barragens Pacajús, Pacoti, Riachão e Gavião e o Canal do Trabalhador; d) Outras instituições, tais como Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens (DAER), atualmente Departamento de Edificações Rodovias e Transportes (DERT), Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e Secretaria de Ação Social (SAS), e programas governamentais com a construção de obras em épocas de emergência, devido às secas.

As ações destes órgãos, complementadas pelas dos proprietários rurais, resultou em um imenso número de obras hídricas que possibilitaram ao Estado do Ceará conviver com as características peculiares do seu meio físico e as irregularidades climáticas da Região Nordeste. MENESCAL et al. (2001a) apresenta algumas generalidades sobre a construção de açudes e avalia o número de barragens existentes no Estado do Ceará em aproximadamente 30 mil considerando-se todos os tamanhos e tipos.

No entanto, o Convênio em andamento firmado entre a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e o Ministério da Integração Nacional (MI) de Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil identificou, em caráter preliminar (julho/2007), a partir de imagens CBERS (sigla, em inglês, de Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) um total de 1.326 espelhos d'água com área superior a 20 hectares no Estado do Ceará, correspondendo a 6,03% do total do Brasil. (MARTINS et al. 2007). Foi identificado ainda que o maior número de reservatórios para este estado concentra-se na faixa de 5 a 10 hectares, e que o total de espelhos d'água com área igual ou superior a 5 hectares foi de 4.814 (CARVALHO, 2007).

Estas obras hídricas foram operadas e mantidas de forma diferenciada. As construídas pelo DNOCS eram operadas por equipes sediadas junto aos reservatórios e perímetros irrigados e recebiam alguma manutenção. O mesmo pode ser dito em relação aos barramentos da CAGECE na Região Metropolitana de Fortaleza. As obras públicas construídas pelo Estado eram normalmente entregues às Prefeituras e quase não recebiam cuidados de manutenção. Quanto à manutenção dada às obras particulares, esta varia muito em função do interesse e disponibilidade financeira dos proprietários rurais.

Após 1987, com a criação da Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH-Ce) (Lei Nº. 11.306 de 01/04/87), aliado a atuação do DNOCS, tem-se uma efetiva estruturação institucional e o planejamento do setor hídrico do Ceará, concomitante ao estabelecimento de uma política de recursos hídricos. Dentro da ótica de gerenciamento dos recursos hídrica assumida a partir de 1987, no que diz respeito à operação e segurança das obras hidráulicas foram empreendidas as seguintes ações:

- Criação da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH (Lei No.12.217 de 18/11/93) com a missão de gerenciar a oferta dos recursos hídricos constantes dos corpos d'água superficiais e subterrâneos de domínio do Estado. É considerada por

alguns autores como a primeira Agência de Bacia nos molde da lei de criação da Agência Nacional de Águas - ANA (Lei Nº 9.984/2000);

- Regulamentação do Controle Técnico das Obras de Oferta Hídrica – Decreto Nº. 23.068 de 11/02/94, objetivando inibir a falta de registros técnicos e melhorar o nível de projeto e controle da execução de novos açudes;
- Criação do Painel de Inspeção e Segurança de Barragens para as obras financiadas pelo Banco Mundial – 1994;
- Publicação do Roteiro de Procedimentos para Apresentação de Projetos de Pequenos Barramentos objetivando a manualização do disposto no Decreto no. 23.068, (SRH-CE, 1996);
- Criação de uma Câmara Técnica para controle de obras de oferta hídrica envolvendo os diversos órgãos competentes do Sistema de Gestão de Recursos Hídricos - 1994;
- Criação do Departamento de Engenharia de Segurança de Obras Hídricas – DESOH, atual Gerência de Segurança e Infra-estrutura (GESIN), vinculado à Diretoria de Operações, responsável pelas ações normativas e de controle das obras hídricas operadas pela COGERH - 1995;
- Divulgação da Minuta de Norma da Elaboração de Projetos das Barragens do Programa de Desenvolvimento Urbano e Recursos Hídricos – PROURB (SRH, 1996);
- Celebração do Convênio entre a COGERH e o DNOCS para Operação conjunta das barragens federais no Estado do Ceará (1996);
- Elaboração do Projeto e Execução de Obras de Recuperação de Açude Estaduais – 1ª Etapa, contemplado 18 açudes estaduais (1996);
- Concepção do Manual Básico de Operação e Manutenção Preventiva de Equipamentos Hidromecânicos para Açudes (MENESCAL et al., 1996);
- Elaboração de Projeto e Execução dos Serviços de Recuperação e Modernização dos Equipamentos Hidromecânicos de Açudes Estaduais (1999);

- Institucionalização das Inspeções formais a partir de 2000;
- Elaboração dos Relatórios Anuais de Segurança - Inspeções e Riscos por parte da GESIN, nos anos de 2003, 2004, 2005 e 2006;

### 3.7.1 Inspeções de Segurança de Barragens

As inspeções de barragens constituem em uma das atividades mais importantes nas ações de segurança de barragens. Elas podem ser de Rotina, Formal, de Especialista ou de Emergência (BRASIL, 2002).

As Inspeções de rotina são aquelas executadas pelas equipes locais de operação e manutenção, como parte regular de suas atividades. A frequência dessas inspeções deve ser semanal ou mensal. Não geram relatórios específicos, mas apenas comunicações de eventuais anomalias detectadas.

A Inspeção formal composta por uma lista de anomalias, no formato de um *check-list*, permite acompanhar a evolução das anomalias através da indicação da sua situação, sua magnitude e o seu nível de perigo. As inspeções formais devem ser feitas por técnicos devidamente treinados e capacitados. São realizadas obedecendo a uma lista previamente definida de itens que cubram todas as partes, estruturas, equipamentos e aspectos do funcionamento da barragem. Delas resultam relatórios contendo as observações de campo e as recomendações pertinentes. Engloba os seguintes campos de avaliação (BRASIL, 2005):

- a) Situação: permite uma indicação da existência da anomalia e de sua evolução no tempo e no espaço, tais como: aumentou, diminuiu, permaneceu constante, o item não é aplicável, anomalia não existe, desapareceu, item não inspecionado;
- b) Magnitude: (P-Pequena) determina se a correção será executada pelo responsável local da barragem, (denominado de AGIR), ou se dependerá de apoio da gerência da bacia (M - Média) ou da GESIN (G - Grande) ou se a anomalia deve ser simplesmente mantida sob observação (I-Insignificante);

c) Nível de Perigo (NP): que visa quantificar o nível de perigo causado pela anomalia e indicar a presteza com que esta anomalia deve ser corrigida, pode ser de 4 tipos: **0 –Nenhum**: anomalia que não compromete a segurança da barragem, pode ser entendida como descaso e /ou má conservação; NP=1 – **Atenção**: não compromete a estrutura da barragem a curto prazo (1 ano), mas deve ser monitorada ao longo do tempo; , NP=2 – **Alerta**: risco a segurança da barragem, devem ser tomadas providências para a eliminação ou controle do problema e NP=3 – **Emergência**: situação pode ficar fora de controle e pode haver risco de ruptura iminente, pode haver a necessidade de rebaixamento imediato do reservatório, eventualmente de abandono do local..

As inspeções de especialistas são aquelas executadas por especialistas da área relativa a algum problema detectado em uma inspeção rotineira ou formal. Sua realização requer o estudo prévio do projeto e de toda documentação disponível. Não existe uma frequência para sua realização e ocorrem sempre que um problema exija a participação de um especialista para seu diagnóstico e solução. Delas deve resultar um relatório específico capaz de orientar de forma conclusiva o encaminhamento da solução. Um exemplo de inspeções de especialistas é a convocação, por parte da SRH/CE, de membros do Painel de Inspeção e Segurança de Barragens (PISB) para o apoio nas soluções de problemas ocorridos, como por exemplo, os das barragens de Olho d'água (Várzea Alegre-Ce), Jaburu I (Tianguá-Ce), Pacajús (Pacajús-Ce) e Rosário (Lavras da Mangabeira-Ce), nos anos de 2003, 2004 e 2005.

As inspeções de emergência são aquelas executadas por especialistas das diversas áreas relativas à emergência em curso, bem como membros da equipe técnica e operacional do proprietário. Devem estar presentes pessoas com autoridade suficiente para tomar as decisões que venham a se tornar necessárias no caso da situação se agravar e medidas drásticas tenham que ser adotadas. Acontecem em resposta a uma emergência e obviamente não existe uma frequência para sua realização. Apesar das condições em que se processam, delas deve resultar um relatório específico capaz de justificar as medidas eventualmente adotadas, contendo diagnóstico, análise e histórico do acidente.

Nas barragens de propriedade do Estado do Ceará, as atividades de inspeções formais e de rotina foram iniciadas de forma sistemática na COGERH no ano 2000 (FONTENELLE et al. 2006b). No ano de 2006 foram aplicadas 108 inspeções formais em



76 barragens do Estado do Ceará (COGERH, 2007). A Figura 3.7 a seguir apresenta a evolução anual das inspeções efetuadas pela COGERH.

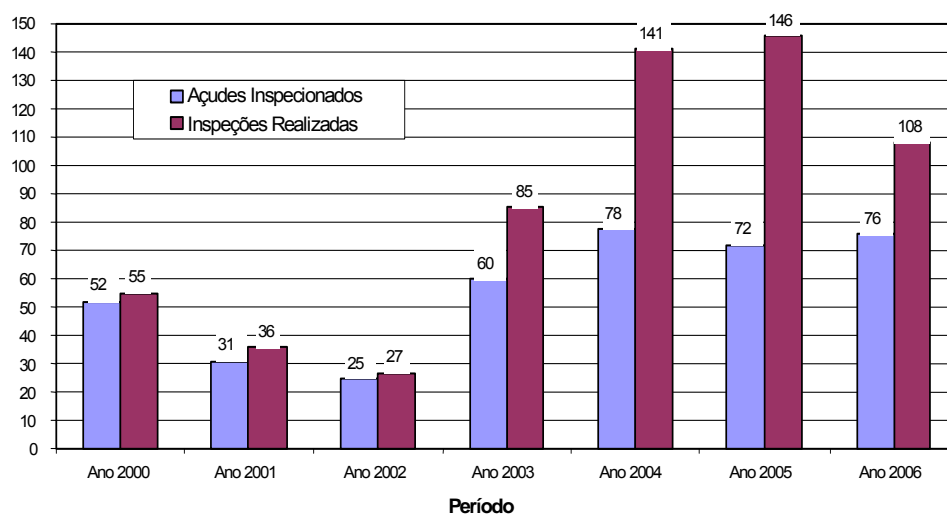


FIGURA 3.7 - Evolução Anual das Inspeções no Estado do Ceará (COGERH, 2007)

Na COGERH, as inspeções formais são programadas para serem realizadas antes (quando as barragens estão em seu nível mínimo, permitindo a inspeção nos taludes e paramentos de montante) e após (quando o reservatório impõe carga máxima sobre as estruturas) o período chuvoso, que corresponde ao período de fevereiro a maio. As inspeções formais constituem em ferramenta importante na elaboração das diversas metodologias apresentadas nesta dissertação.

As inspeções formais são armazenadas num banco de dados. Na COGERH esse banco de dados foi desenvolvido com o nome de Sistema de Segurança de Obras Hídricas (SISOH). O Ministério da Integração Nacional iniciou o desenvolvimento um sistema semelhante (Sistema de Segurança de Barragens – SISB) usando o ACCESS da Microsoft que, posteriormente, será distribuído aos estados e instituições responsáveis por barragens em todo o Brasil. O grande número de anomalias observadas exige que seja estabelecida uma sistemática para priorização e descentralização das ações de manutenção.

### 3.7.2 A Segurança Hidrológica das Barragens Financiadas pelo Banco Mundial

A construção de barragens importantes pelo estado do Ceará ocorreu preponderantemente a partir da década de 80, sendo que na década de 90 houve um impulso considerável na construção de barragens em função dos programas de financiamento do Banco Mundial, com a construção de 22 barragens de médio porte a partir de 1994. A Figura 3.8 apresenta as faixas de idades das principais barragens de propriedade do Estado do Ceará.

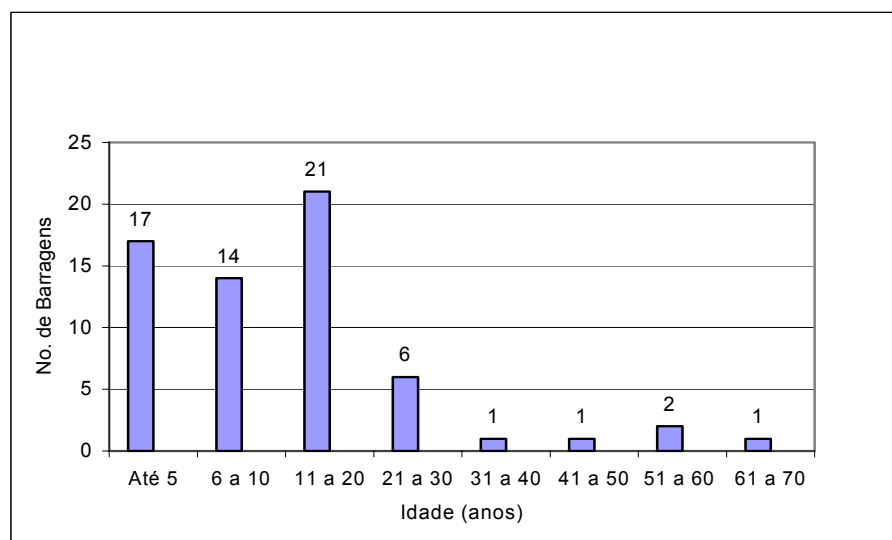


FIGURA 3.8 - Faixas de idades das 63 principais barragens estaduais

Na figura acima se pode observar que em torno de 50% das principais barragens monitoradas do Ceará têm menos de 10 anos de idade, ou seja, as barragens são relativamente novas, o que enseja uma preocupação por parte do responsável tendo em vista que segundo o Comitê Internacional de Grandes barragens (ICOLD,1995) 70% das barragens rompidas tinham menos de 10 anos de construídas.

As barragens construídas no semi-árido nordestino são, em geral, de aterro compactado dotadas de vertedouro de soleira livre, sem comportas. O vertedouro é escavado em rocha, sem revestimento, com a seção de controle composta por uma viga em concreto simples ancorada ou engastada à fundação, identificada regionalmente como “cordão de fixação”. No local do vertedouro, quando as condições geológicas ao nível da soleira vertente são desfavoráveis ao assentamento da fundação utilizam-se uma soleira vertente clássica denominada de perfil “Creager” ou do tipo Labirinto, também em canal, sem

revestimento. Este tipo de solução, de não revestir o canal de restituição, visa a minimizar os custos iniciais.

Nas barragens construídas recentemente (nos últimos 13 anos) pela SRH-CE, com o apoio técnico do painel de segurança de barragens do Banco Mundial, os cuidados foram no sentido de proteger a estrutura de controle ou a própria barragem. Dois acidentes recentes de erosão regressiva de grande proporção após a primeira cheia em duas destas barragens (Barragens Itaúna, em Chaval-Ce, (SOUSA et al., 2002) e Rosário, em Lavras da Mangabeira-Ce, (FONTENELLE et al., 2007)) requereram um reforço adicional para a proteção do pé da soleira vertente e muros alas.

NOGUEIRA DE SOUSA & PINTO (2001) apresentaram uma avaliação da segurança ao galgamento em 22 destas barragens, cujos vertedouros foram dimensionados para uma vazão de 1.000 anos de recorrência e a segurança ao galgamento foi verificada para uma cheia de 10.000 anos de período de retorno, com uma borda livre mínima requerida de 0,5 metro. Os autores utilizaram a curva envoltória de Francou Rodier (FRANCOU & RODIER, 1967) para indicar a variação dos picos máximos de cheia com a área da bacia hidrográfica. A equação da envoltória de FRANCOU & RODIER (1967) é a seguinte:

$$\frac{Q}{Q_0} = \left( \frac{S}{S_0} \right)^{\left(1 - \frac{K}{10}\right)} \quad (1)$$

onde:

Q = vazão de cheia: em m<sup>3</sup>/s;

S = área da bacia em km<sup>2</sup>;

em unidades métricas, Q<sub>0</sub>=10<sup>6</sup> e S<sub>0</sub>=10<sup>8</sup>.

Em NOGUEIRA DE SOUSA & PINTO (2001) o valor adotado para o coeficiente K, referente a um grande número de vertedouros brasileiros, foi de 4,8.

Para K=4,8, a equação (1) pode ser escrita:

$$q = 70 S^{-0,48} \quad (2)$$

onde q = Q/S é a descarga máxima específica (m<sup>3</sup>/s.km<sup>2</sup>).

Foi confrontada a capacidade última dos vertedouros estudados - definida como a capacidade de vazão para a condição de borda livre nula - com a curva que define a envoltória de pico das cheias de projeto, valores expressos em termos de descarga específica ( $m^3/s.km^2$ ).

Conforme se pode verificar na Figura 3.9 (*apud* NOGUEIRA DE SOUSA & PINTO (2001), a seguir, a capacidade última dos vertedouros mostrou-se, em muitos casos, inferior ao pico da cheia correspondente ( $q=70S^{-0,48}$ ), indicando uma dependência da segurança no efeito amortecedor do reservatório e alerta para a maior atenção necessária na estimativa da cheia.

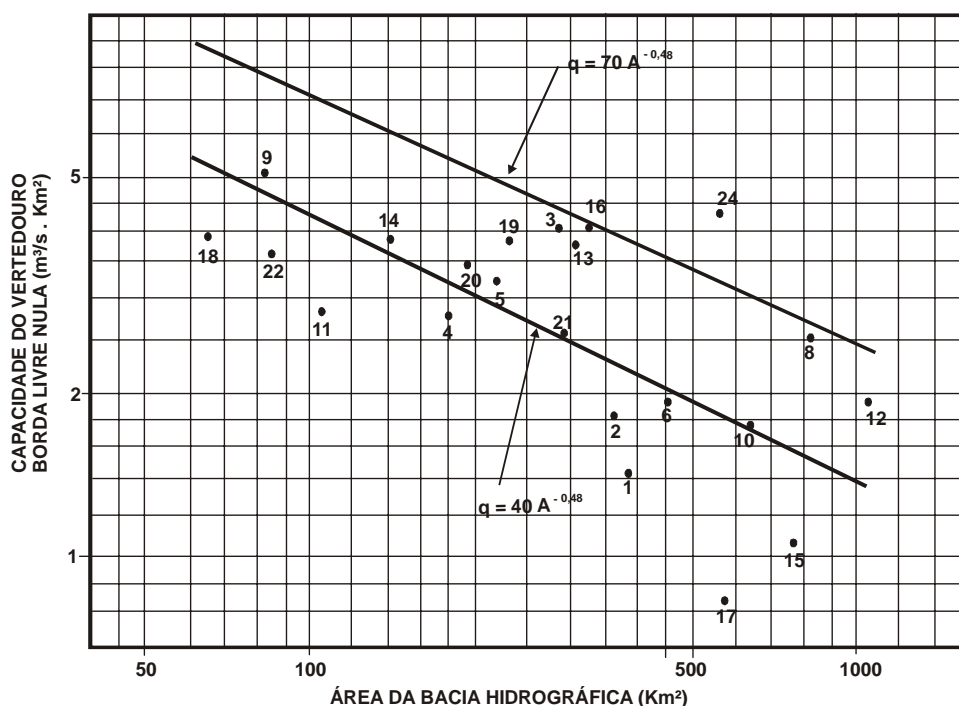


FIGURA 3.9 - Capacidade última do Vertedouro versus área da bacia hidrográfica (*apud* NOGUEIRA DE SOUSA & PINTO (2001))

### 3.8 Ações de Manutenção e Segurança

A barragem, como qualquer outra estrutura, deve ser mantida de forma a não necessitar de obras de recuperação. Na realidade do semi-árido nordestino as barragens são construídas e, na maioria das vezes, são praticamente deixadas ao abandono.

A palavra manutenção, literalmente significa “ter em mãos” (Latin: *manu tere*, do francês: *maintenir*). De acordo com WUNDERLICH (2005) um equipamento de produção em operação, mesmo se automatizado de algum modo, em geral, não pode ser deixado inteiramente por ele mesmo, mesmo em períodos curtos. Há necessidade de supervisão, ajustes e reparos permanentes.

O envelhecimento, efeitos ambientais, tensões operacionais, desgaste do material e outras fraquezas, cedo ou tarde, pode levar o equipamento a uma parada inesperada. Quando o número de paradas aumenta, aumenta os custos de operação e manutenção, a confiabilidade diminui, a credibilidade com os clientes é perdida, e a ruptura ou falha pode parar a operação, por períodos longos ou para sempre.

Segundo o ICOLD (1994) o envelhecimento corresponde a um tipo de deterioração que ocorre após 5 anos do início da operação. A deterioração ocorrida antes deste período é atribuída à inadequação de projeto, construção e/ou operação. Recomenda-se portanto, após o período de 5 anos, uma revisão geral das condições da estrutura.

A Figura 3.10 apresenta uma adaptação da Figura 5-6 de WUNDERLICH (2005) ilustrando o processo de avanço da deterioração das anomalias em direção a ruptura. À esquerda, as setas na direção vertical indicam o caminho que conduz do estado normal de de operação (Op. Nor.) passando por crescentes estados de deterioração (Falha Inicial; Falha Av.: Falha Avançada) até a ruptura (Rup.). Os caminhos na horizontal são iniciados pela inspeção (Insp.) seguidos pela detecção (Det.). Para a detecção ser bem sucedida esta deve ser comunicada (Com.), sua importância deve ser reconhecida (Rec.), e a ação deve ser tomada através de serviços de manutenção (reparo ou substituição). Qualquer falha ao longo desse caminho retorna o processo em direção a ruptura, e por consequência, aumentando o nível de perigo da anomalia constatada. No caso de detecção de uma anomalia com NP = 3, deve-se emitir um alarme para uma ação corretiva imediata. Se a interferência (manutenção) é bem sucedida, o sistema retorna ao processo de operação normal.

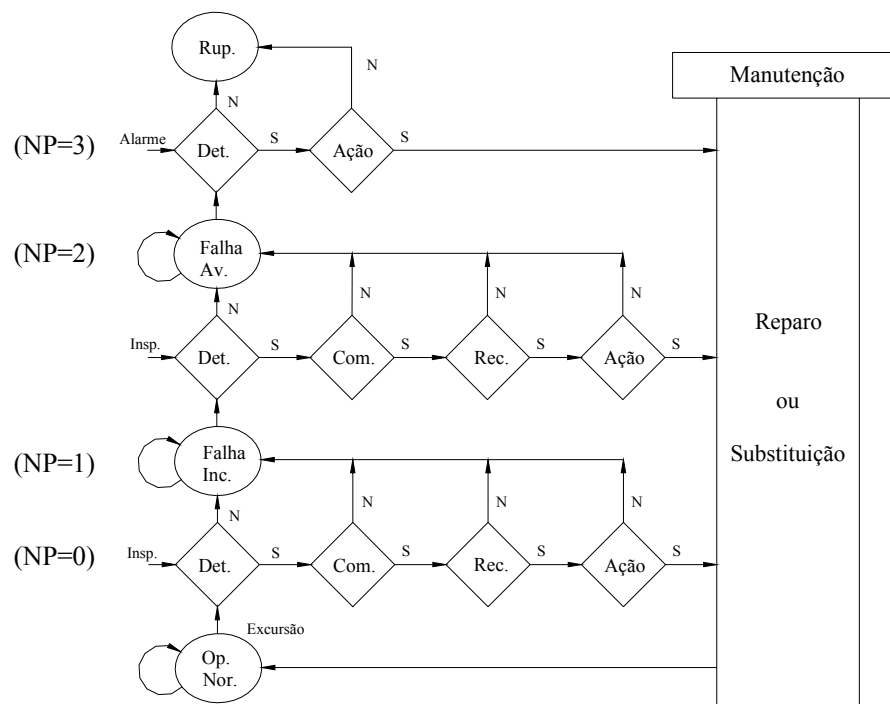


FIGURA 3.10 - Processo de avanço da deterioração com a interferência da manutenção (adaptado de WUNDERLICH, 2005)

Segundo ainda WUNDERLICH (2005) a mais extensiva investigação nesta área, já realizada, foi provavelmente o programa REMR do USACE que teve início em 1984 e foi concluído em 1988. O REMR define manutenção como uma ação que previne ou retarda danos ou deterioração, ou corrige deficiências que poderiam, de certa forma, levar a reparos incipientes ou a necessidade de recuperação. Entende-se reparo como uma recomposição de um componente deteriorado, danificado ou rompido. A recuperação é uma modificação de grande porte ou reconstrução de uma estrutura existente para atender às necessidades de operação e normas. A substituição é a troca de um componente defeituoso, inadequado ou obsoleto por um novo.

As barragens, pela quantidade de massa de água que armazenam também criam um potencial de perigo de exposição à vida e à propriedade das pessoas a jusante da barragem. A manutenção eficaz faz com que este risco seja fortemente minimizado.

Basicamente a manutenção contribui em três áreas, no que se refere às estruturas hidráulicas (termo que se refere às estruturas e equipamentos que operam sistemas que fazem uso ou se relacionam com a água, tais como barragens, hidrelétricas, canais de irrigação, estações de bombeamento, adutoras, túneis, redes de abastecimento de água, e outros):

1. Garantir a integridade dos materiais que constituem os sistemas e os equipamentos. Tais como o concreto, aço, madeira, plástico e outros;
2. Garantir a operacionalidade dos componentes dos sistemas e do sistema como um todo;
3. Tornar o sistema preparado para suportar eventos externos prejudiciais, tais como percolação, rupturas de fundação, cheias, sismos, vandalismos e outros eventos naturais e humanos.

Tendo em vista a limitação da disponibilidade de recursos financeiros disponíveis para aplicação em obras de recuperação, deve-se trabalhar no sentido de encontrar uma melhor metodologia visando definir uma priorização nas barragens que apresentarem um maior risco para a sociedade. Em barragens o risco pode ser definido como a probabilidade de ocorrência de um evento adverso, e/ou como o produto da probabilidade de ocorrência da ruptura com as suas conseqüências.

#### **4 APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCO EM 55 BARRAGENS ESTADUAIS**

A classificação de barragens pelo risco tem por objetivo definir as prioridades para a alocação de recursos de manutenção e recuperação, bem como servir referência para ações de segurança, priorização de investimentos em reparos ou recuperações, melhorias, monitoramento por instrumentação, periodicidade de inspeções, treinamentos, modernização de equipamentos, planos de ação emergenciais, etc. As barragens de maior risco obviamente deverão ser as mais prioritárias para estas ações.

Neste capítulo é feita uma descrição sucinta e aplicação de três metodologias de análise qualitativa de risco em 55 barragens de propriedade do Ceará, que serviram de referência para uma nova proposta de avaliação qualitativa do risco denominada de Escore de Risco a ser apresentada no item 5.5.2. Quais sejam:

1. Análise de risco e Metodologia de Tomada de Decisões para Barragens da Companhia de Saneamento de São Paulo -SABESP, conforme KUPERMAN et al. (2001);
2. Metodologia do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*U.S. Army Corps of Engineers - USACE*) conforme ANDERSEN et al. (1999);
3. Metodologia da Companhia de Gestão e Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH, conforme MENESCAL et al., (2001a).

Pode-se citar também outros critérios de avaliação de risco: o Risk Based Profile System - RBPS do *Bureau of Reclamation* dos Estados Unidos da América (BUREAU OF RECLAMATION , 2001); a metodologia de segurança de barragens das Centrais Elétricas de Minas Gerais – CEMIG (FUSARO,1999) e a Análise do comportamento e avaliação de segurança das normas de observação e inspeção de barragens de Portugal (CSOPT, 1993b).

Além dos trabalhos citados acima, vale destacar OPYRCHAL et al. (2000) com a determinação de um índice de risco para as barragens polonesas; HOWLEY et al. (2000) para barragens australianas, com o estabelecimento do fator de risco dado através do somatório dos produtos das probabilidades de ruptura pelo fator de risco da consequência e MATALUCCI (2002) que apresenta um levantamento abrangente das diversas metodologias de avaliação da segurança de barragens.



#### 4.1 Análise de risco e Metodologia de Tomada de Decisões para Barragens da Companhia de Saneamento de São Paulo (SABESP)

A metodologia da SABESP (KUPERMAN et al., 2001) adota uma classificação quanto ao comportamento diferenciada em dois contextos distintos, quais sejam aquele definido pela Periculosidade Potencial (PP) em que cada unidade apresenta em função de suas características de localização e de projeto e aquele definido pelo seu Estado Real de funcionamento (ER). No primeiro caso (periculosidade potencial) a classificação consiste numa hierarquia baseada principalmente no potencial existente para a ocorrência de prejuízos materiais ou perdas de vidas humanas ou eventual paralisação operativa devido a um colapso ocasionado pelas cheias. Este potencial não está associado ao estado real da barragem ou a o seu comportamento. Quanto ao Estado Real, por outro lado, a hierarquização é ponderada em função das informações relativas ao comportamento da barragem e às condições de seus elementos constituintes.

Com base nos dois índices classificatórios definidos anteriormente, é possível determinar o “Índice de Comportamento” (IC) de cada unidade, pela atribuição de “notas”. O índice de comportamento é dado pela equação a seguir:

$$IC= 0,4PP +0,6ER \quad (4.1)$$

Os Quadros 4.1 e 4.2 apresentam os fatores de avaliação segundo a Periculosidade Potencial (PP) e o Estado Real (ER).

Como resultado final, a cada barragem é atribuído um número que determina sua inserção em uma das seguintes classes.

<b>Classe</b>	<b>Índice de Comportamento</b>
IC>70	Normal
60<IC<70	Atenção
50<IC<60	Alerta
IC<50	Emergência

A Tabela B.4.1 no APÊNDICE B apresenta o resultado da avaliação de risco pela metodologia da SABESP com as pontuações atribuídas para cada barragem, em ordem decrescente do risco.

Conforme se pode observar, nesta metodologia pontuações mais elevadas indicam condições de menor risco.

QUADRO 4.1 - Classificação segundo a Periculosidade Potencial (PP) das barragens.

IMPORTÂNCIA PARA A SABESP	DIMENSÃO DA BARRAGEM	VOLUME DE ÁGUA ARMAZENADA	IMPACTO A JUSANTE			TIPO DE BARRAGEM	ORGÃO VERTENTE	VAZÃO DE PROJETO
			SOCIAL	AMBIENTAL	ECONÔMICO			
pequena (10)	pequena (10)	baixo (5)	baixo (10)	baixo (10)	baixo (5)	concreto (15)	de superfície sem controle (15)	VMP (*) 1000 <Tr<10000 (20)
média (8)	média (6)	pequeno (4)	pequeno (8)	pequeno (8)	pequeno (4)	enrocamento (12)	de superfície. com controle (10)	100<Tr<1000 (12)
significativa (6)	grande (2)	médio (3)	médio (6)	médio (3)	médio (3)	terra (8)	de fundo (5)	Tr <100 ou desconhecido ou calculado há mais de 20 anos (2)
grande (4)		grande (2)	grande (0)	grande (0)	grande (0)			
elevada (2)		elevado (1)						

Classificação segundo a Periculosidade Potencial (PP)

PP<60 = elevada;

60≤PP≤80 = significativa;

PP>80 = baixa;

Tr = Período de Retorno  
VMP = Vazão Máxima Provável

QUADRO 4.2 - Classificação segundo o Estado Real (ER) da Barragem.

<b>INFORMAÇÕES DE PROJETO</b>	<b>FREQÜÊNCIA NA AVALIAÇÃO CO COMPORTAMENTO</b>	<b>PERCOLAÇÃO</b>	<b>DEFORMAÇÕES</b>	<b>NÍVEL DE DETERIORAÇÃO DOS PARAMENTOS OU TALUDES</b>	<b>EROSÕES A JUSANTE</b>	<b>CONDIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DOS DESCARREGADORES</b>
5-completas	10 - adequada	20 -conforme previsto em projeto	20 - conforme previsto em projeto ou inexistente	15- mínimo ou nenhum	15- mínimas ou inexistente	15- boa
4-parciais	6 - razoável	15 - fora do previsto mas não crítica	15 - Fora do previsto mas não crítica	12- baixo	12 – poucas	8- razoável
2-incompletas	2-inadequada	5 - crítica	5- crítica	6- moderado	6 -moderadas	6 – ruim
0-inexistentes	0-nenhuma	0- desconhecida	0 - desconhecida	4 – alto	4 -elevadas	3 - inoperantes ou sem registro
				3- excessivo	3 – Significativas	

Classificação segundo o Estado Real (ER):

ER > 80 = Satisfatório;  
 60 ≤ ER ≤ 80 = Regular;  
 ER < 60 = Insatisfatório.

Os resultados acima estão ilustrados nas Figuras 4.1 a 4.3. A Figura 4.1 apresenta a classificação das barragens quanto a PP onde se observa uma predominância de PP significativa.

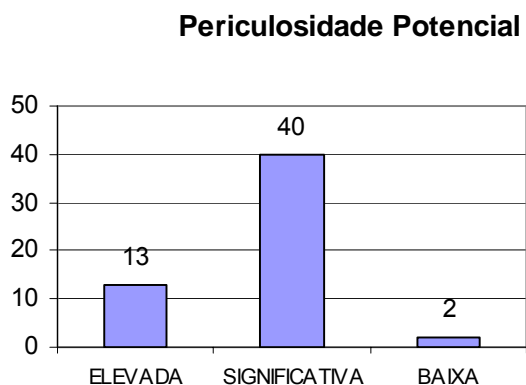


FIGURA 4.1 - Classificação em relação a Periculosidade Potencial (PP)

A Figura 4.2 apresenta a classificação quanto ao Estado Real observa-se um equilíbrio entre o satisfatório e o regular.

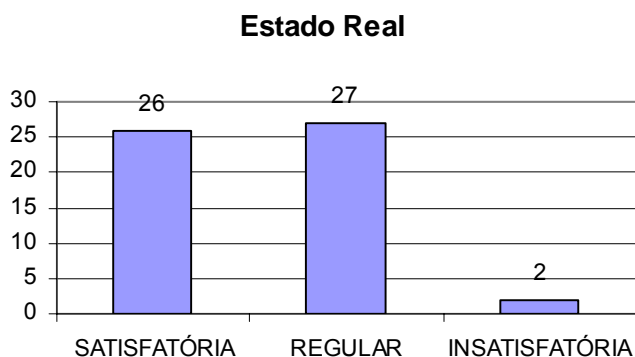


FIGURA 4.2 - Classificação em relação ao Estado Real (ER)

Quanto ao resultado final onde se obtém o índice de comportamento, IC, observou-se forte predominância da Normalidade, conforme pode-se observar na Figura 4.3.

### Índice de Comportamento

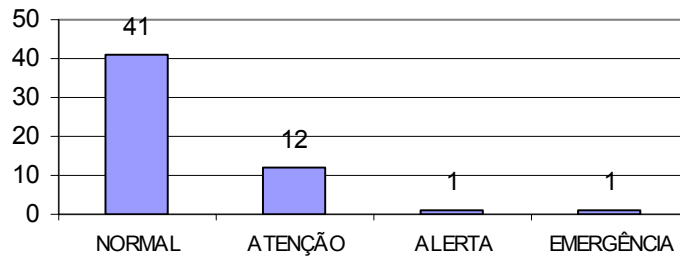


FIGURA 4.3 - Índice de Comportamento (IC).

A metodologia da SABESP não considera o tempo de operação (idade); o tipo de drenagem interna, o tipo de fundação e o nível d'água normal do reservatório.

## 4.2 Metodologia do USACE - Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (ANDERSEN et al., 1999)

Nesta metodologia as barragens são classificadas tendo com base um escore de pontuação de 13 parâmetros, os quais são divididos em três categorias: as primeiras duas categorias (parâmetros de constantes físicas e parâmetros variáveis) descrevem a vulnerabilidade da barragem, representada pela probabilidade de ruptura e a terceira categoria descreve as conseqüências, isto é o potencial de danos às populações e às propriedades.

A metodologia foi proposta com o objetivo de obter um índice que refletisse a importância da barragem com o fim de priorização de serviços nos diversos locais da barragem.

Os escores para cada um dos 13 parâmetros estão determinados nos Quadros 4.3 (Parâmetro A) e 4.4 (Parâmetro B) a seguir.

A Vulnerabilidade (V) da barragem é a soma aritmética da média dos escores das constantes físicas (A) com a média aritmética dos escores da soma dos parâmetros das variáveis (B), ou seja:

$$V = A + B \quad (4.2)$$

A classificação da barragem é dada pela escala de classificação do Escore global (S), que vem a ser a soma da vulnerabilidade (V) com o triplo do escore do parâmetro de potencial de perigo referente a danos a propriedades e Perdas de Vidas. O Quadro 4.5 apresenta os escores para a pontuação dos Danos a propriedades e Perdas de Vidas (C) (função da densidade populacional, da extensão das áreas agrícolas e do desenvolvimento de indústrias). A soma é dividida por 50 para a normalização, ou seja:

$$S = \frac{(V + 3C)}{50} \quad (4.3)$$

A Tabela B.4.2 no APÊNDICE B apresenta o resultado da avaliação de risco pela metodologia do USACE com as pontuações atribuídas para cada barragem, em ordem decrescente do risco.

Poderemos considerar como deficiência da metodologia do USACE o fato de esta não considerar para efeito de pontuação a situação da barragem no que se refere a percolação, deformação e deterioração.

QUADRO 4.3 - Escores para Classificação dos parâmetros das constantes.

<b>A<sub>1</sub></b>	<b>Altura da Barragem (m).</b>	<b>Escore</b>
	<10	1
	10-30	3
	30-100	6
	>100	10
<b>A<sub>2</sub></b>	<b>Largura do Coroamento (m).</b>	
	>15	1
	6-15	3
	3-6	6
	<3	10
<b>A<sub>3</sub></b>	<b>Tipo de Barragem.</b>	
	Terra e Enrocamento	4
	Terra	10
<b>A<sub>4</sub></b>	<b>Tipo de Fundação.</b>	
	Rocha	1
	Rocha Tratada	2
	Solo argiloso	4
	Solo argiloso tratado	6
	Aluvião tratado	8
	Aluvião	10
<b>A<sub>5</sub></b>	<b>Capacidade de armazenamento (hm<sup>3</sup>).</b>	
	<1	1
	1 – 50	2
	50 – 1.000	4
	1000 – 5.000	6
	>5.000	10
<b>A<sub>6</sub></b>	<b>Tipo de Sistema de Filtração.</b>	
	Filtração Moderna	1
	Drenos horizontais e Verticais	
	Aterro homogêneo resistente ao “piping”	
	Poços de Alívio, drenos de pé	
	Sem controle drenagem interna	10
$A = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6}{6}$		



QUADRO 4.4 - Escores para Classificação dos parâmetros variáveis.

<b>B<sub>1</sub></b>	<b>Idade da Barragem - (anos).</b>	<b>Escore</b>
	0 – 5	8
	5 – 15	7
	15 – 30	3
	30 – 50	2
	> 50	1
<b>B<sub>2</sub></b>	<b>Altura Hidráulica máxima atingida no reservatório (%) – como um % da altura hidráulica máxima.</b>	
	>95%	1
	75 - 95%	5
	50 - 75%	8
	> 50%	10
<b>B<sub>3</sub></b>	<b>Sismicidade – Velocidade de deslocamento do topo rochoso (m/s).</b>	
	< 4	1
	4 – 8	2
	8 – 16	6
	16 – 32	8
	> 32	10
<b>B<sub>4</sub></b>	<b>Confiabilidade do vertedouro – opera em condições de Confiabilidade.</b>	
	Satisfatório	1
	Insatisfatório	10
<b>B<sub>5</sub></b>	<b>Continuidade do Monitoramento da barragem - a continuidade do monitoramento é crítica para resposta imediata em condições adversas e de cargas elevadas.</b>	
	Mudanças diárias	1
	Presença diária	4
	Instrumentação Automatizada	6
	Presença inconstante	10
<b>B<sub>6</sub></b>	<b>Altura Normal do reservatório – como um % da carga máxima (altura ou capacidade?)</b>	
	Reservatório seco	1
	<50%	3
	50% - 75%	6
	>75%	10
$B = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6}{6}$		

QUADRO 4.5 - Parâmetros de Classificação do potencial de perigo para Danos a propriedades e perdas de vidas.

<b>C - Danos a propriedades e perdas de vidas</b> (função da densidade populacional, das áreas agrícolas e desenvolvimento de indústrias)		
<b>Potencial de Perigo</b>	<b>Área Afetada</b>	<b>Score</b>
Mínimo	Área não habitada e não desenvolvida com poucos recursos naturais	1
Significante	Território pouco ocupado, com terras agrícolas	3
Importante	Áreas rurais desenvolvidas (menos de 2.000 habitantes), indústrias de pequeno e médio porte, alguns recursos naturais	5
Alto	Áreas rurais e Urbanas desenvolvidas (menos de 2.000 habitantes), indústrias de porte médio a grande, recursos naturais importantes	8
Muito Alto	Cidades importantes (com mais de 100.000 habitantes), área com indústrias importantes.	10
Notas:		
a) O tamanho da área afetada deverá ser determinado a partir de resultados de análises de rupturas de barragens. A área afetada é igual a área de inundação. Quando os resultados de tais estudos não estão disponíveis, utilizar uma previsão pessimista da área de inundação.		
b) O termo "indústria" inclui usinas hidrelétricas.		

### 4.3. Metodologia da Companhia de Gestão e Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH

Esta metodologia foi instituída pela COGERH no ano de 2001 (MENESCAL et al., 2001a) ela calcula o potencial de risco (PR), através da Matriz de Avaliação do Potencial de Risco, a partir de três parâmetros: P – Periculosidade (ver critérios e pontuações no Quadro 4.6); V – Vulnerabilidade (ver critérios e pontuações no Quadro 4.7) e I – Importância Estratégica (ver critérios e pontuações no Quadro 4.8) e permite a priorização de ações a serem desenvolvidas na fase de planejamento e programação da manutenção.

Considerando as informações técnicas de projeto e construção (dimensão, capacidade, tipo de barragem, tipo de fundação e vazão de projeto) é determinada a periculosidade (P) das estruturas. Com base nos dados de inspeção de campo e de leituras de instrumentação (tempo de operação, existência de projeto “*as built*”, confiabilidade das estruturas vertedouras, tomada d’água, percolação, deformações, deterioração) é efetuada uma avaliação preliminar da segurança que permitirá a estimativa da vulnerabilidade (V) das estruturas. A partir do estabelecimento de critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais (volume útil, população à jusante e custo da barragem) define-se a importância estratégica (I) das barragens.

O potencial de risco (PR) é calculado através da seguinte equação:

$$PR = \frac{(P + V)}{2} \times I \quad (4.4)$$

O Quadro 4.9 apresenta as 5 faixas de classificação das barragens com base no PR obtido.

Os Quadros 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam, em função da classificação obtida pela barragem, qual deverá ser a frequência de inspeções, os requisitos mínimos quanto à manutenção e os critérios de instrumentação, respectivamente.

QUADRO 4.6 - Periculosidade (P).

<b>DIMENSÃO DA BARRAGEM</b> <sup>1</sup>	<b>VOL. TOTAL DO RESERVATÓRIO</b> <sup>2</sup>	<b>TIPO DE BARRAGEM</b> <sup>3</sup>	<b>TIPO DE FUNDAÇÃO</b> <sup>4</sup>	<b>VAZÃO DE PROJETO</b> <sup>5</sup>
Altura ≤ 10m Comprimento ≤ 200m (1)	Pequeno < 20hm <sup>3</sup> (3)	Concreto (4)	Rocha (1)	Decamlenar (1)
Altura 10 a 20m Comprimento ≤ 2000m (3)	Médio até 200hm <sup>3</sup> (5)	Alvenaria de pedra / Concreto rolado (6)	Rocha alterada / Saprolito (4)	Milenar (2)
Altura 20 a 50m Comprimento 200m a 3000m (6)	Regular 200 a 800hm <sup>3</sup> (7)	Terra / Enrocamento (8)	Solo residual / Aluvião até 4m (5)	500 anos (4)
Altura > 50m Comprimento > 500m (10)	Muito grande > 800hm <sup>3</sup> (10)	Terra (10)	Aluvião arenoso espesso / Solo orgânico (10)	Inferior a 500 anos ou Desconhecida (10)

NOTAS – Se a vazão for desconhecida, deverá ser reavaliada, independentemente da pontuação.

P > 30 – Elevado

P = 20 a 30 – Significativo

$$P = \sum_{i=1}^5 p_i$$

P = 10 a 20 – Baixo a Moderado

QUADRO 4.7 - Vulnerabilidade (V), estado de condição atual da barragem.

TEMPO DE OPERAÇÃO <sup>6</sup>	EXISTÊNCIA DE PROJETO (AS BUILT) <sup>7</sup>	CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS VERTEICOURAS <sup>8</sup>	TOMADA DE ÁGUA <sup>9</sup>	PERCOLAÇÃO <sup>10</sup>	DEFORMAÇÕES/AFUNDAMENTOS ASSENTAMENTOS <sup>11</sup>	DETERIORAÇÃO DOS TALUDES/PARAMENTOS <sup>12</sup>
> 30 anos (0)	Existem projetos "as built" e avaliação do desempenho (1)	Muito Satisfatória (2)	Satisfatória Controle a montante (1)	Totalmente Controlada Pelo sistema de drenagem (1)	Inexistente (0)	Inexistente (1)
10 a 30 anos (1)	Existem projetos "as built" (3)	Satisfatória (3)	Satisfatória Controle a jusante (2)	Sinais de umedecimento nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras (4)	Pequenos abatimentos da crista (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de Jusante (3)
5 a 10 anos (2)	Só projeto básico (5)	Suficiente (6)	Aceitável (3)	Zonas úmidas em taludes de jusante, ombreiras, área alagada a jusante devida ao fluxo (6)	Ondulações pronunciadas, Fissuras (6)	Falha nas proteções – drenagens insuficiente e sulcos nos taludes. (7)
< 5 anos (3)	Não existe projeto (7)	Não satisfatório (10)	Deficiente (5)	Surgência de água em taludes, ombreiras e área de jusante (10)	Depressão na crista – Afundamentos nos taludes, ou na fundação /Trincas (10)	Depressão no rip-rap Escorregamentos – sulcos profundos de Erosão, Vegetação (10)

NOTA: Pontuação (10) em qualquer coluna implica em intervenção na barragem, a ser definida com base em Inspeção Especial.

V > 35 – Elevada

V = 20 – 35 – Moderada a Elevada

V = 5 a 20 – Baixa a Moderada

V < 5 – Muito baixa

$$V = \sum_6^{12} v_i$$

QUADRO 4.8 - Importância Estratégica (I).

VOL. ÚTIL <sup>1</sup> hm <sup>3</sup> (A)	POPULAÇÃO A JUSANTE (B)	CUSTO DA BARRAGEM (C)
Grande (2) > 800	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
Médio (1,5) 200 a 800	Média (2,0)	Médio (1,2)
Baixo (1) < 200	Pequena (1,0)	Pequeno (1,0)

NOTA:

1. Volume regularizado anual a partir dos dados de operação

$$I = \frac{A + B + C}{3}$$

QUADRO 4.9 - Potencial de Risco (PR).

CLASSE	POTENCIAL DE RISCO - PR
A	> 65 (ou Vi=10) - alto
B	40 a 65 – médio
C	25 a 40 – normal
D	15 a 25 – baixo
E	< 15 – muito baixo

NOTAS:

1. Barragens com PR acima de 55 devem ser reavaliadas por critérios de maior detalhe.
2. Barragens incluídas na classe A exigem intervenção, a ser definida com base em Inspeção Especial.

QUADRO 4.10 - Frequência de inspeções.

TIPO DE INSPEÇÃO	CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM				
	A	B	C	D	E
Rotina		12/ ano (mensal)	4/ ano (trimestral)	2/ ano (semestral)	1/ ano (anual)
Periódica		1/ ano (relatório completo)	1/ ano (relatório simplificado), 1/ 2 anos (relatório completo)	1/ 2 anos (relatório simplificado)	1/ 4 anos (relatório simplificado)
Formal		1/ 5 anos	1/ 10 anos	1/ 15 anos	1/ 15 anos
Especial	Para definir intervenção e reclassificação	Em oportunidades tais como cheias excepcionais, rebaixamento rápido do reservatório, sismos etc.			
Emergência	Após eventos de magnitude especial.				

QUADRO 4.11 - Requisitos mínimos quanto à manutenção.

CLASSE DA BARRAGEM	REQUISITOS MÍNIMOS
A	Intervenção e reclassificação
B	I – deficiências inexistentes ou irrelevantes
C	P – pequenas deficiências
D	P – pequenas deficiências
E	M - deficiências médias

QUADRO 4.12 - Critério para instrumentação

ALTURA DA BARRAGEM (m)	DESLOCAMENTOS		TENSÕES TOTAIS	VAZÕES	PIEZÔMETROS	SISMOLOGIA
	SUPERFICIAIS	INTERNOS				
< 10	-	-	-	-	-	-
10 a 20	(x)	-	-	(x)	(x)	-
20 a 50	x se classe B ou I=2	-	-	x vazão total se classe B ou I=2	x se classe B ou I=2	(x)
> 50	x	(x)	(x)	(x) vazão parcial ou x vazão total	x	x se classe B ou I=2

NOTA:

x – Dispositivo obrigatório

(x) – Dispositivo opcional

A Figura 4.4 apresenta o resultado das classes do potencial de risco (PR) para as 55 barragens, pela metodologia da COGERH.

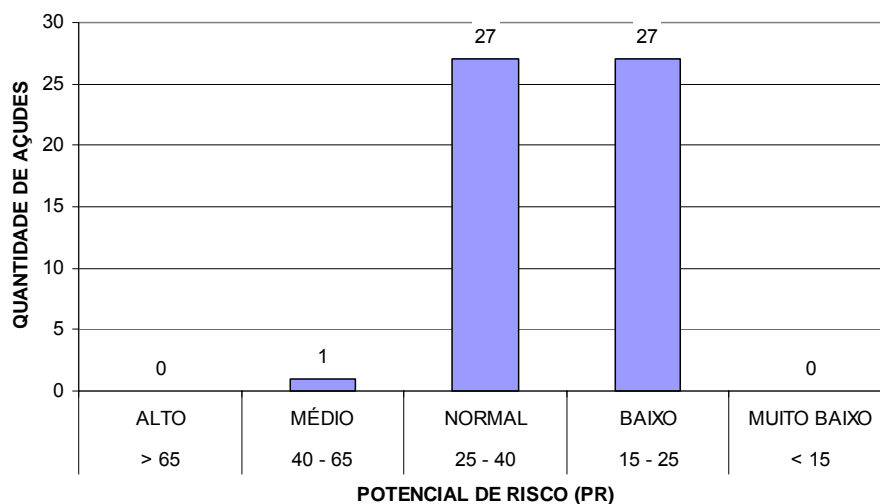


FIGURA 4.4 - Potencial de Risco (PR) pela metodologia da COGERH

Observa-se a ocorrência de uma barragem com classe de risco médio, e as demais distribuídas entre as classes de risco normal e baixo.

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam a estatística das barragens de acordo com a classificação da periculosidade, a vulnerabilidade, e a importância estratégica conforme a metodologia da COGERH, respectivamente.

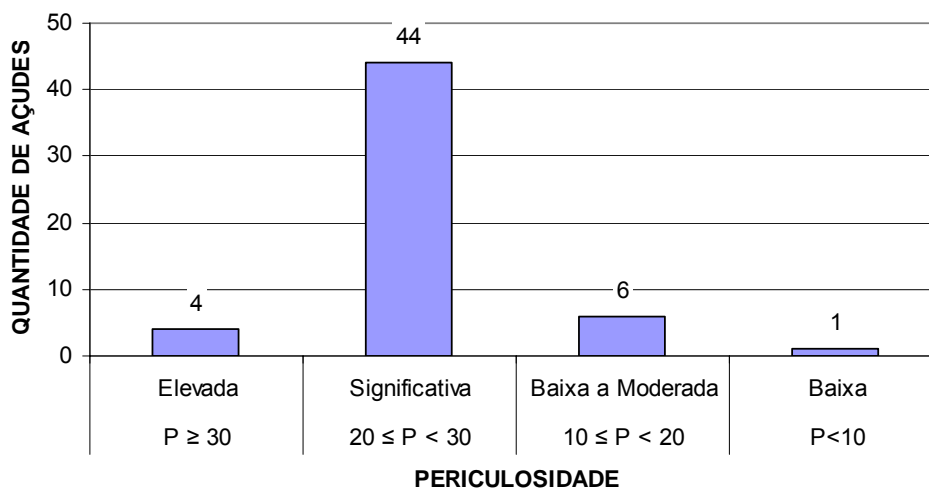


FIGURA 4.5 - Classes de Periculosidade (P)



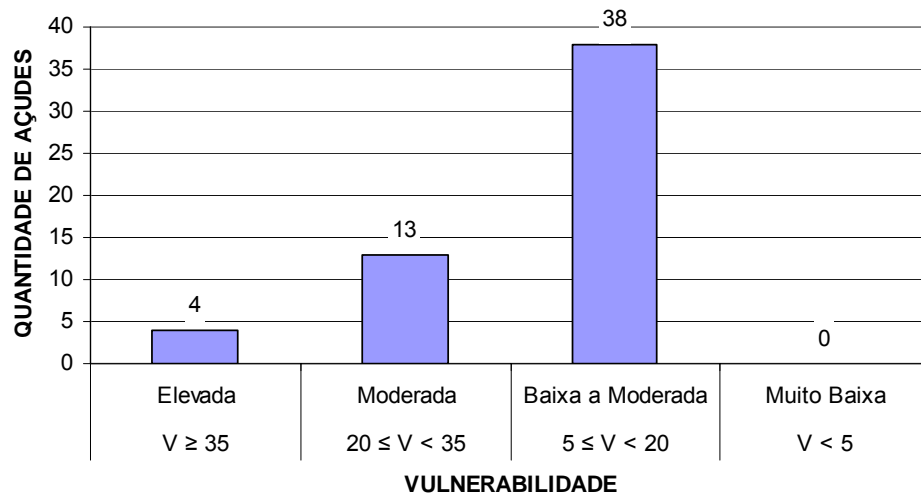


FIGURA 4.6 - Classes de Vulnerabilidade (V)

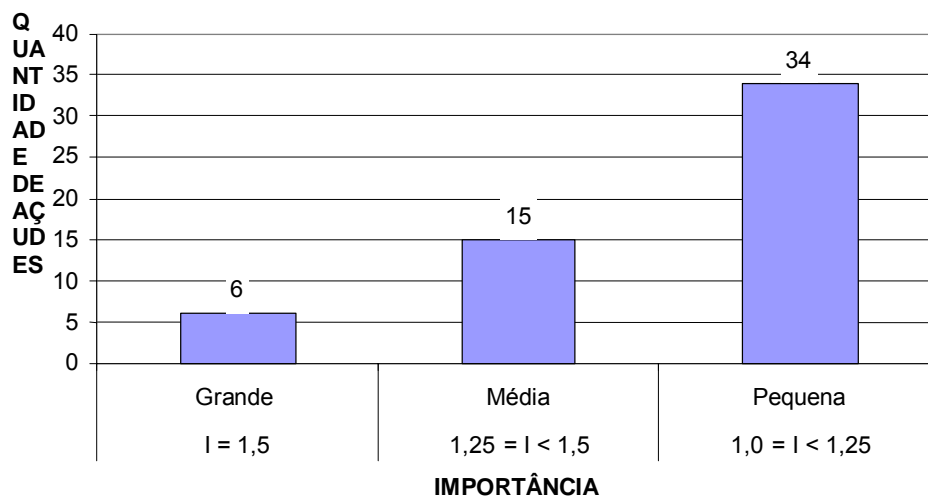


FIGURA 4.7 - Classes de Importância dos Açudes Estaduais

A metodologia apresenta algumas deficiências, tais como: a idade da barragem aparece com pontuação de risco nula na fase final de operação da barragem (acima de 30 anos), quando deveria apresentar pontuação elevada devido principalmente ao envelhecimento dos materiais. Em relação à vulnerabilidade, apresenta subjetividade em relação à confiabilidade das estruturas vertedoras, percolação, deformações/ afundamentos/ assentamentos e deterioração dos taludes/paramentos. Observa-se uma deficiência na classificação da importância estratégica por não apresentar critérios quantitativos para a classificação grande, média e pequena tanto para a população a jusante como para o custo da barragem. No que se refere a pontuação da

Importância estratégica (I), que tem peso forte na pontuação do potencial de risco (PR), não existem critérios de pontuação para o que vem a ser população a jusante grande, média e pequena (Quadro 4.8); o mesmo se dá com o custo da barragem, a metodologia não explicita o que vêm a ser os critérios de custo elevado, médio e pequena, e ainda assim, entendemos que o mesmo já está considerado no critério de dimensão da barragem.

A Tabela B.4.3 no APÊNDICE B apresenta o resultado da avaliação de risco pela metodologia da COGERH, em ordem decrescente do Potencial de Risco (PR).

#### **4.4 Avaliação dos Resultados**

As três metodologias apresentam algumas deficiências ou ausências de critérios relevantes para as barragens do nordeste brasileiro. Como por exemplo: a metodologia da SABESP não considera efeitos do tempo de operação, quando se sabe que nos primeiros tempos de operação (devido às primeiras solicitações) e nas idades mais avançadas (devido ao envelhecimento) é que se apresentam maiores riscos para as barragens, nesta metodologia, não se consideram outros aspectos de risco, tais como, tipo de drenagem interna, de fundação e tempo de permanência do nível do reservatório.

Em relação à metodologia do USACE, esta se refere mais especificamente a determinar um valor índice de acordo com a importância da barragem para ser ponderado com um outro valor referente à importância do local a ser recuperado visando priorizar um conjunto de barragens do proprietário. Ela não classifica em relação ao risco, mas foi utilizada como referência para alguns critérios da nova proposição de avaliação qualitativa de risco, a ser apresentada no item 5.2.5.2 (Escore de Risco –  $E_R$ ).

Já com relação à metodologia da COGERH, esta apresenta algumas deficiências em relação a alguns critérios. No que se refere à pontuação do tempo de operação esta deveria ser maior após os longos anos de operação. Apresenta, também, como critérios de pontuação aspectos subjetivos na avaliação da vulnerabilidade. Mas o que fica mais latente de deficiência desta metodologia é aplicar um fator multiplicador referente à importância estratégica (I) em cima de critérios subjetivos e não explicitados, especificamente, em relação à população a jusante (B) e ao custo da barragem (C).

## 5. PROPOSTA METODOLÓGICA

### 5.1 Introdução Geral da Metodologia

A metodologia propõe a classificação das barragens do nordeste brasileiro a partir de uma ponderação de três critérios.

A Figura 5.1 a seguir ilustra esquematicamente a proposta metodológica para a classificação de barragens do nordeste brasileiro para fins de priorização para recuperação. A metodologia proposta parte de elementos básicos : a probabilidade de ruptura anual da barragem (PRA), os custos e o risco. A PRA (item 5.2.1.2) é obtida a partir do nível de perigo da barragem (NPB). Os custos (item 5.2.2) a serem considerados pela metodologia são o custo de recuperação da ruptura da barragem ( $CR_{rup}$ ) e o custo de eliminação da anomalia com nível de perigo (CeNP).

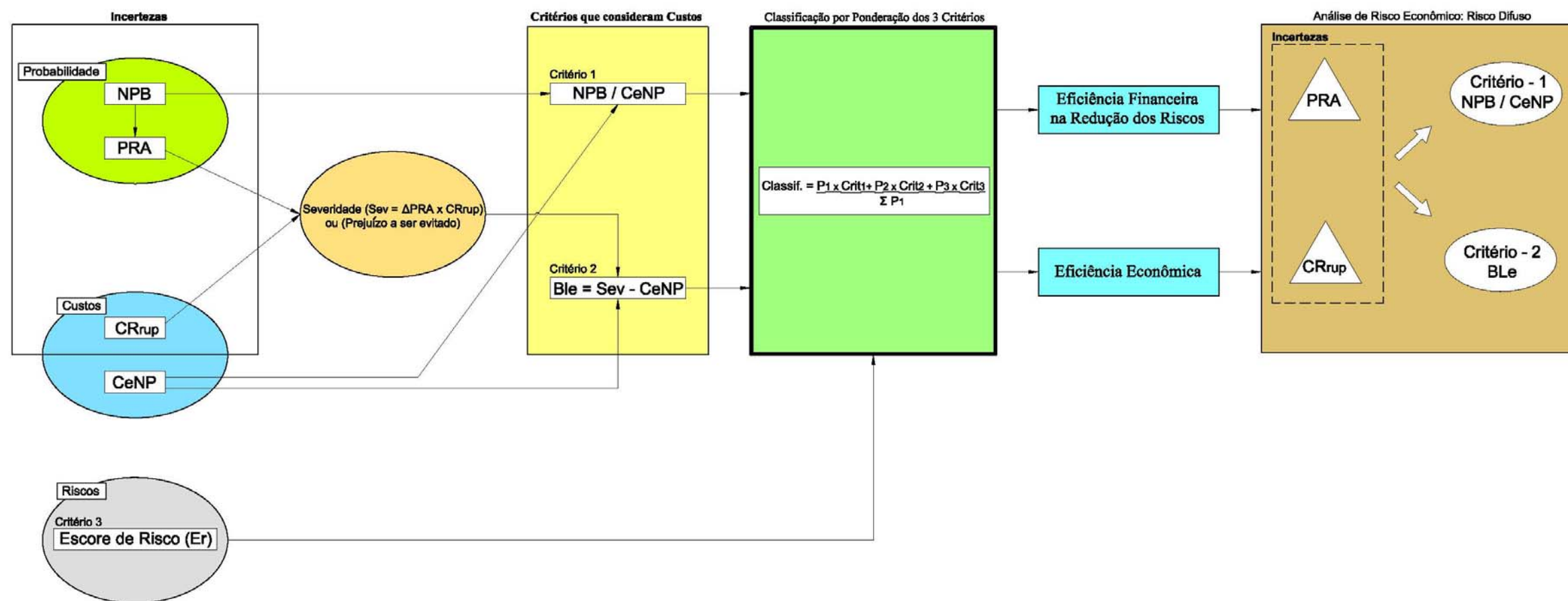
Em seguida o modelo propõe o conceito da **severidade** da ruptura (Sev) ou prejuízo a ser evitado (item 5.2.3), a qual é obtida a partir da diferença entre a PRA e a probabilidade de ruptura aceitável ( $PRA_{ac}$ ) multiplicada pelo  $CR_{rup}$ .

A relação entre o NPB e o CeNP (item 5.2.4.1) constitui no primeiro critério proposto pela metodologia (Critério 1).

O segundo critério proposto para fins de classificação das barragens é composto pela severidade decrescida do CeNP, que determina o Benefício Líquido equivalente (BLE), que constitui no Critério 2 (item 5.2.4.2).

O terceiro critério (Critério 3) é o que se refere ao risco, denominado de Escore de Risco ( $E_R$ ) (item 5.2.5.2), e foi desenvolvido a partir de três metodologias de avaliação qualitativa de risco conhecidas (apresentadas no capítulo anterior).

Após efetuada a priorização com a ponderação dos três critérios (item 5.2.6), a metodologia permite também verificar a **eficiência financeira** para a redução dos riscos (item 5.2.7), como também possibilita averiguar a **eficiência econômica**, através do benefício líquido equivalente, em função do valor a ser investido na eliminação da anomalia com perigo (item 5.2.8).



**LEGENDA**

NPB – Nível de Perigo da Barragem

PRA – Probabilidade de Ruptura Anual

$\Delta PRA = PRA - PRA_{ac}$

$PRA_{ac} = PRA \text{ Aceitável} = 10^{-6}$

CRrup – Custo de Recuperação da Ruptura

CeNP – Custo da Eliminação da Anomalia com Nível de Perigo  $\geq 1$

BLE – Benefício Líquido equivalente

Pi - Fator de Ponderação (Peso)

Crit.i – Classificação da Barragem no Critério i

FIGURA 5.1 - Desenho Esquemático da Proposta Metodológica para a Priorização de Ações de Segurança em Barragens

E por fim, a metodologia proposta possibilita obter-se o **risco econômico** do benefício líquido equivalente a partir da Teoria dos Números Difusos (item 5.2.9) utilizando as duas principais incertezas do modelo: a PRA e o CRrup, aplicando-se nos dois critérios que consideram custos (Critérios 1 e 2).

A presença do custo de recuperação das anomalias (item 5.2.3) visa mostrar que o valor demandado para estes serviços excede em muito a capacidade financeira dos proprietários mantenedores de barragens. Há, portanto, a necessidade de se seguir uma segunda linha de ação, priorizando-se a alocação de recursos nas anomalias que impliquem na eliminação do perigo.

A metodologia proposta trabalha com a utilização das inspeções através do preenchimento da Lista de Inspeção do Ministério da Integração Nacional, cujo manual de preenchimento é apresentado em BRASIL (2005). Em relação ao preenchimento do nível de perigo é apresentado no APÊNDICE A um Manual proposto para Barragens de Terra.

Para efeito aplicação da metodologia foi efetuado um estudo de caso de um total de 77 barragens, nas quais se incluem as principais barragens de propriedade do Estado do Ceará monitoradas, operadas e mantidas pela COGERH (62 barragens), e 15 barragens de terra de propriedade da União e administradas pelo DNOCS, incluindo-se as três maiores: Orós, Araras e Banabuiu. As 12 barragens federais foram incluídas por terem sido inspecionadas recentemente (final de 2006 e início de 2007). A Figura 5.2 apresenta a localização das 77 barragens estudadas no estado do Ceará.

A Tabela 5.1 apresenta algumas características técnicas das 77 barragens a serem analisadas pela metodologia proposta incluindo os quantitativos das magnitudes e níveis de perigo (NP) nas anomalias levantadas das inspeções. Na tabela, pode-se observar a pequena quantidade de informação dos projetos, cerca de 50% (38 barragens) só dispõem de ficha técnica.

Considerando-se os custos de mobilização e desmobilização, torna-se mais econômico a priorização da recuperação de barragens se ater à avaliação dos riscos da barragem como um todo, ao invés de priorizar os riscos setoriais (por exemplo: maciço, vertedouro ou tomada d'água) tais como incorporam algumas metodologias de países mais desenvolvidos, tais

como as adotadas pelo (USACE) conforme ANDERSEN et al. (1999), e MEGHELLA & EUSEBIO (2003) na Itália.

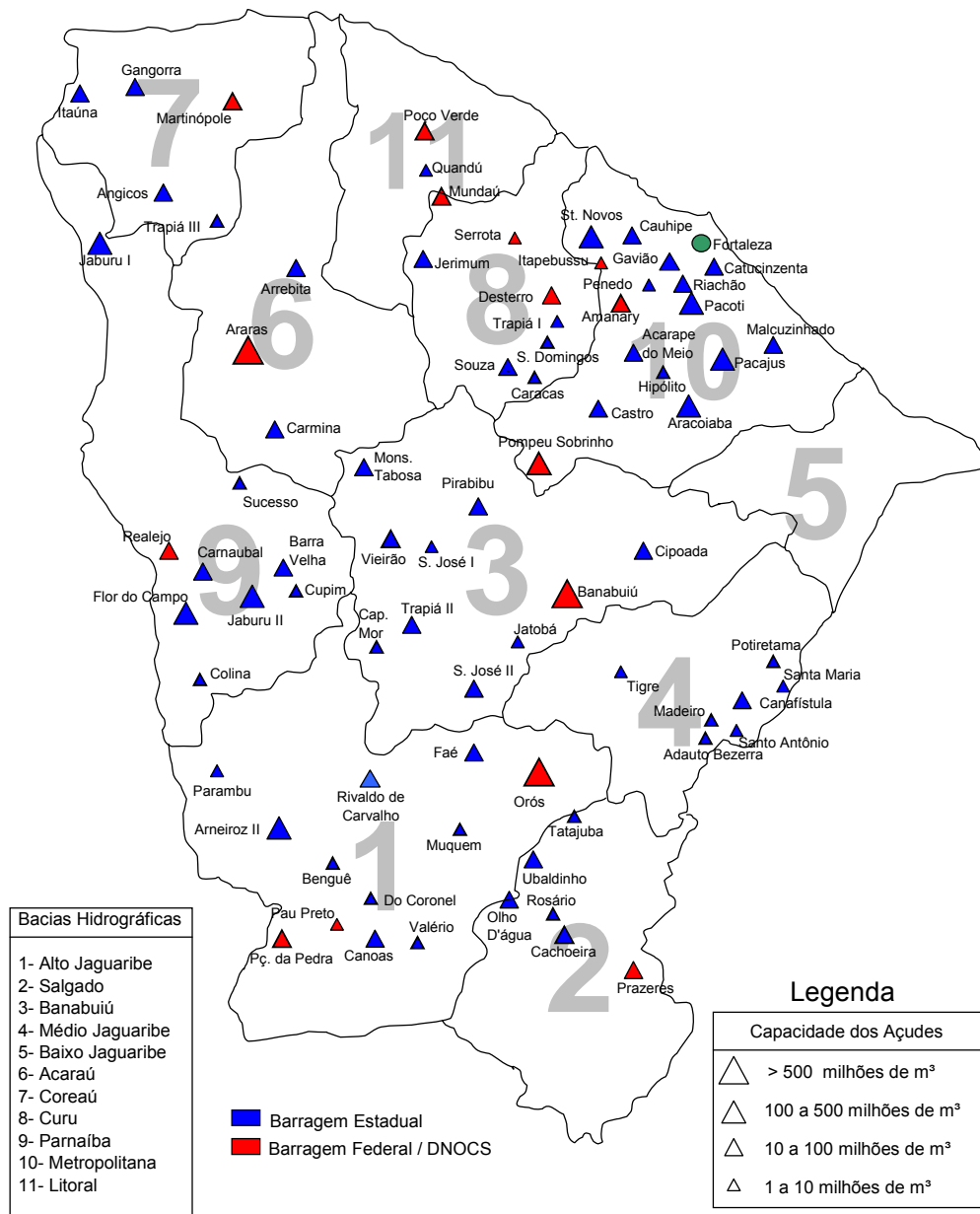


FIGURA 5.2 - Localização das 77 barragens objeto do estudo no Estado do Ceará



É importante ressaltar que das 62 barragens de propriedade do Estado do Ceará objeto nesta tese, 22 delas foram construídas nos últimos 15 anos, com recursos financiados do Banco Mundial, pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, através de vários programas: PROURB - Programa de Desenvolvimento Urbano e Gestão dos Recursos Hídricos; PROGERIRH – Programa de Gerenciamento e Integração dos Recursos Hídricos e o PROÁGUA – Sub-programa de Desenvolvimento Sustentável de Recursos Hídricos para o Semi-Árido Brasileiro. A execução dos projetos e a construção até a elaboração do projeto construído (“as built”) foram acompanhados por um painel de consultores aprovados pelo Banco Mundial, o que garantiu *a priori* uma maior segurança a estes empreendimentos.

O Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) classifica as barragens em grandes e pequenas conforme o critério abaixo:

**Barragem Grande:** com altura superior a 15m. As barragens com altura entre 10 e 15m metros são consideradas grandes caso atendam a apenas um dos seguintes requisitos:

- a) O comprimento da crista ou coroamento superior a 500 metros;
- b) A capacidade do reservatório superior a 1.000.000 m<sup>3</sup>;
- c) A vazão do vertedouro superior a 2.000 m<sup>3</sup>/s;
- d) A barragem apresenta problemas de fundação especificamente difíceis;
- e) A barragem é de concepção não usual.

**Barragem Pequena:** com altura inferior a 15m e não atenda a nenhum dos requisitos (a) a (e) listados acima.

Portanto, pelo ICOLD a considerar estes requisitos, todas as 77 barragens objeto deste estudo se enquadram como Grandes.

O Quadro 5.1 a seguir, apresenta a classificação das 77 barragens estudadas, conforme estabelecida pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBDB), adaptada por KUPERMAN et al. (2001).



QUADRO 5.1 - Classificação das Barragens estudadas segundo sua Altura e/ou Volume de acordo com o CBGB (*apud* KUPERMAN et al., 2001).

<b>Categoria</b>	<b>H = Altura (m)</b>	<b>V= Volume do Reservatório (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>No. de Barragens</b>
Pequena	H<15	0,05 < V < 1	01
Média	15 <H < 30	1<V<50	51
Grande	H>30	V>50	25

A Figura 5.3 a seguir, mostra o número de barragens em função da quantidade de anos de operação. As 77 barragens estudadas perfazem um total de 1.670 anos de operação.

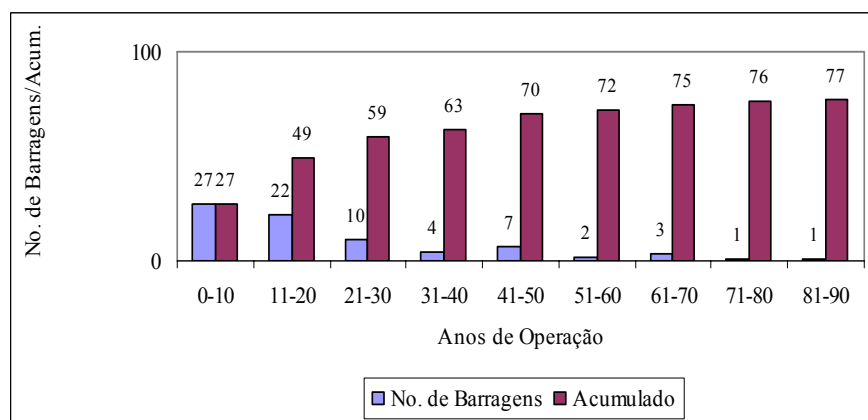


FIGURA 5.3 - No. de Barragens por tempo de Operação

A Figura 5.4 apresenta as barragens em relação a altura, observa-se grande predominância das barragens até 30 metros de altura (cerca de 85% do total).

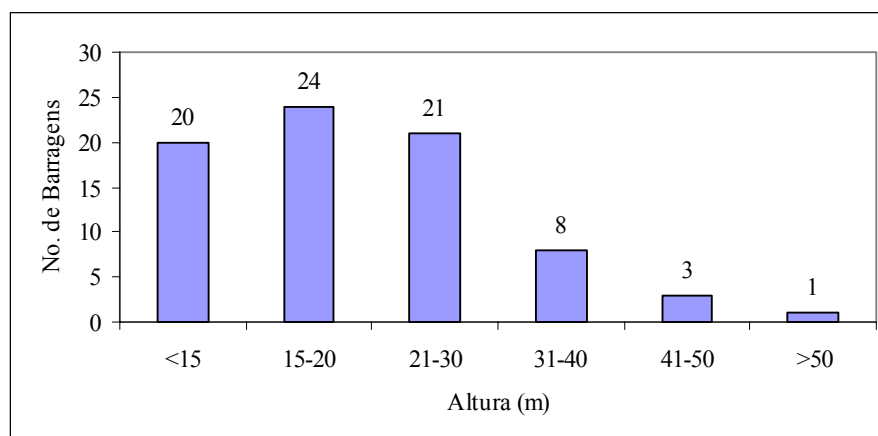


FIGURA 5.4 - Faixas de Altura das 77 barragens estudadas

## **5.2 Detalhamento e Aplicação da Metodologia**

Os itens, a seguir, apresentam o detalhamento da metodologia proposta apresentando a conceituação e os resultados da sua aplicação nas 77 barragens analisadas.

Considerando o disposto na Figura 5.1, a metodologia será apresentada conforme a estruturação indicada a seguir, considerando-se nove aspectos: probabilidades, custos, severidade, critérios que consideram custos, riscos, classificação por ponderação dos critérios propostos, eficiência financeira, eficiência econômica e riscos econômicos.

### 5.2.1 Probabilidades:

5.2.1.1 Nível de Perigo da Barragem (NPB);

5.2.1.2 Probabilidade de Ruptura Anual (PRA)

### 5.2.2 Custos

5.2.2.1 Custo da Recuperação da barragem no caso de Ruptura (CRrup)

5.2.2.2 Custo da Eliminação das Anomalias com Nível de Perigo igual ou superior a 1 ( $C_{eNP}$ );

5.2.2.3 Custo de Recuperação das Anomalias;

5.2.3. Severidade da Ruptura ou Prejuízo a ser Evitado (probabilidade x custos);

### 5.2.4. Critérios que consideram Custos

5.2.4.1 Eficiência na redução do perigo, com base na relação( $NPB/C_{eNP}$ );

5.2.4.2 Benefício Líquido equivalente (BLE);

### 5.2.5. Riscos

5.2.5.1 Índice de Vulnerabilidade (Iv);

5.2.5.2 Escore de Risco.

5.2.6. Classificação das Barragens por Ponderação dos Critérios.

5.2.7 Eficiência na Aplicação dos Recursos Financeiros na Redução dos Riscos

## 5.2.8 Eficiência Econômica

## 5.2.9 Análise de Risco Econômico através da Teoria dos Números Difusos

### 5.2.1 Probabilidades

#### 5.2.1.1 Nível de Perigo da Barragem (NPB)

O NPB é calculado a partir dos Níveis de Perigo das anomalias (NP) apontadas no preenchimento da lista de inspeção. Conforme citado anteriormente, para cada anomalia deve ser preenchido o nível de perigo correspondente (0 - Nenhum; 1- Atenção; 2- Alerta; 3- Emergência) seguindo as recomendações do manual proposto para barragens de terra, o qual está apresentado no Anexo D.

Conforme pode-se observar na Quadro 5.2, para os quatro níveis de perigo foram propostos quatro pesos distintos proporcionais à probabilidade de ruptura para a barragem.

QUADRO 5.2 - Os Níveis de Perigo (NP) e os Pesos respectivos.

<b>Nível de Perigo da Anomalia (NP)</b>	<b>Peso do NP (a)</b>
Nenhum (0)	0
Atenção (1)	1
Alerta (2)	4
Emergência (3)	9

Obs: Os números entre parêntesis indicam a numeração utilizada na coluna do NP da lista de inspeção.

Em seguida, faz-se um levantamento das quantidades de cada um dos quatro níveis de perigo e efetua-se uma segunda ponderação, agora referente à quantidade de cada NP presente na lista de inspeção da barragem de acordo com o Quadro 5.3.

QUADRO 5.3 - Pesos das quantidades NP de acordo com as quantidades.

Quantidades de NP na lista de inspeção	Peso das quantidades
0-5	1
6-10	2
11-15	3
16-20	4
21-35	5
36-50	6

A pontuação final do NPB da barragem é feita conforme procedimento indicado na Quadro 5.4, utilizando, como exemplo, os dados da barragem São Domingos.

QUADRO 5.4 - Exemplo de Cálculo da Pontuação do NPB da Barragem São Domingos.

Nível de Perigo da Anomalia (NP)	Peso do NP (a)	Quantidade na Lista de Inspeção	Peso das quantidades (b)	Pontuação NPB (a x b)
Nenhum (0)	0	0	1	= 0 x 1 = 0
Atenção (1)	1	6	2	= 1 x 2 = 2
Alerta (2)	4	16	4	= 4 x 4 = 16
Emergência (3)	9	1	1	= 9 x 1 = 9
Total da Pontuação NPB da Barragem =				27

De acordo com a Lista de inspeção podem-se obter as seguintes quantidades máximas de NP para as anomalias listadas:

$$NP=1, \Rightarrow 10 \Rightarrow (\text{Quadro 5.3}) \text{ Peso} = 2 \Rightarrow NPB = 2 \times 1 = 2;$$

$$NP=2, \Rightarrow 30 \Rightarrow (\text{Quadro 5.3}) \text{ Peso} = 5 \Rightarrow NPB = 5 \times 4 = 20;$$

$$NP=3, \Rightarrow 49 \Rightarrow (\text{Quadro 5.3}) \text{ Peso} = 6 \Rightarrow NPB = 6 \times 9 = 54;$$

$$\text{Logo, } NPB_{\text{máx}} = 2 + 20 + 54 = 76$$

#### 5.2.1.2 Probabilidade de Ruptura Anual (PRA)

A probabilidade de ruptura anual (PRA) considera a probabilidade a partir do valor global do Nível de Perigo da Barragem (NPB) conforme conceito apresentado anteriormente no item 5.2.1.1.

No Quadro 5.5 apresentam-se os valores propostos para a PRA em função do Nível de Perigo da Barragem (NPB), e a respectiva classificação. SILVEIRA (2007), tendo por base a experiência mundial com as estatísticas sobre rupturas de barragens, revela como valor atual a probabilidade de  $10^{-4}$  para uma barragem vir a romper por ano.

QUADRO 5.5 - PRA adotada a partir do NPB.

NPB	PRA	Classificação	Nº. de Barragens
>30	$10^{-2}$	ALTAMENTE PREOCUPANTE (AP)	-
9-30	$10^{-3}$	PREOCUPANTE (P)	22
2 -8	$10^{-4}$	ACEITÁVEL (Ac)	40
1	$10^{-5}$	BOM DESEMPENHO (BD)	8
0	$10^{-6}$	ÓTIMO DESEMPENHO (OD)	7

A Tabela 5.2 apresenta, para as 77 barragens estudadas, os resultados dos NPB com as respectivas probabilidades de ruptura anual (PRA) e o número de barragens das , priorizadas a partir da PRA e classificadas conforme o Quadro 5.5 acima.

Para verificação desta correlação, a título de exemplo, foi aplicada a metodologia de cálculo da probabilidade de ruptura anual (PRA) por “piping”, desenvolvida por FOSTER (1999) e FOSTER et al. (1998, 2000a e 2000b), para a barragem Olho d’água, em Várzea Alegre-Ce, que além de apresentar uma documentação detalhada também encontrava-se numa situação de alerta com ocorrência de vazão elevada pela fundação e *sand boils* (SALES et al., 2006). O resultado obtido por esta metodologia foi de  $5,4 \times 10^{-5}$ , cerca de 100 vezes inferior ao valor da PRA obtida a partir do NPB (Tabela 5.2) que foi de  $1,0 \times 10^{-3}$ .



## 5.2.2 Custos

### 5.2.2.1 Custos de recuperação da barragem no caso de Ruptura (CRrup)

O custo da recuperação da barragem, no caso de ruptura (CRrup), é o parâmetro utilizado pelo modelo para representar os impactos referentes à consequências da ruptura da barragem. Não foram considerados os impactos de perdas de vidas e os danos na área de inundação a jusante da barragem.

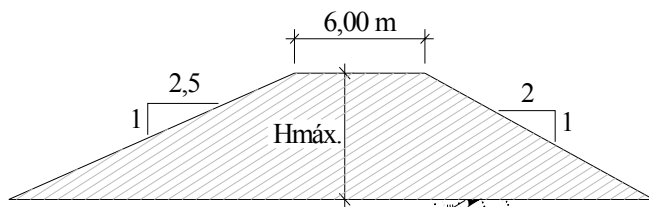
O valor do CRrup se refere exclusivamente ao valor da recomposição do aterro da brecha de ruptura do maciço da barragem, calculado multiplicando-se o volume da brecha pelo custo unitário do m<sup>3</sup> do maciço recomposto.

Em relação às características da brecha de ruptura, conforme INAG (2001) estas dependem, basicamente do tipo de barragem e da causa do acidente e da ruptura. Nas barragens de concreto do tipo gravidade, poderá ocorrer o colapso geral no caso de situação de instabilidade provocada por cargas hidrostáticas, situação resultante de deficiência de projeto, ou ainda num problema generalizado nas fundações; para a situação de galgamento, admite-se, em geral, uma ruptura parcial e gradual por remoção sucessiva de blocos.

Nas barragens de aterro a ruptura é, em geral, uma ruptura gradual e parcial, onde a brecha é iniciada por erosão interna por percolação (“piping”) ou por galgamento, leva mais tempo a evoluir. A modelagem da ruptura gradual de uma barragem de aterro é um procedimento de muita dificuldade tendo em conta que as dimensões da brecha e as características do escoamento através dela são interdependentes. O processo de abertura da brecha em geral tem duas fases: primeiramente a barragem sofre uma erosão na zona mais fraca com uma elevada taxa de erosão na vertical. A seguir inicia-se a erosão lateral e a brecha alarga-se até se atingir uma situação de equilíbrio.

Na metodologia adotada, para a definição do volume da brecha, considerou-se uma brecha, de paredes verticais, ao longo de toda a extensão da barragem limitada a no máximo 500 metros, multiplicada por uma seção com dimensões de acordo com o tipo de barragem (aterro ou concreto) conforme indicado na Figura 5.5 referente a seção máxima.

SECÃO TIPO – BARRAGEM DE ATERRO



SECÃO TIPO – BARRAGEM DE CONCRETO

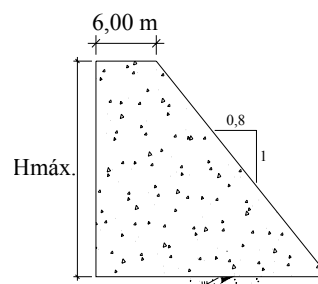


FIGURA 5.5 - Seções Tipo das Barragens de Aterro e de Concreto

O custo unitário da recuperação foi calculado tendo como base o custo médio do maciço de várias barragens constuídas no Estado do Ceará, onde adotou-se de R\$ 10,00 por m<sup>3</sup> para a recuperação de barragens de aterro (terra e terra mais enrocamento) e R\$ 60,00 por m<sup>3</sup> para a recuperação de barragens de alvenaria de pedra e concreto compactado a rolo.

O valor total do custo da recuperação no caso de ruptura para as 77 barragens foi de R\$ 416.721.557,95, sendo que o valor médio foi de R\$ 5.411.968,29 por barragem.

A Tabela 5.3 apresenta os custos de recuperação no caso de ruptura (CRrup) das 77 barragens em ordem decrescente de custo.



TABELA 5.3 - Custo da Recuperação da barragem no caso de Ruptura (CRrup).

Barragem	Município	Propr.	Cap. (hm <sup>3</sup> )	Altura (m)	Extensão (m)	Tipo de Barragem	Custo da Recuperação da barragem no caso de Ruptura (CRrup) (R\$)
1 Orós	Orós	DNOCS	1.940,00	54,00	670,00	T	34.425.000,00
2 Jaburu I	Tianguá	Estado	210,00	47,00	770,00	T	26.261.250,00
3 Araras	Varjota	DNOCS	891,00	38,00	2.780,00	TE	17.385.000,00
4 Banabuiu	Banabuiu	DNOCS	1.601,00	37,70	824,00	T	17.120.512,50
5 Aracoiaba	Aracoiaba	Estado	170,70	35,00	2.000,00	T	14.831.250,00
6 Prazeres	Barro	DNOCS	32,50	48,80	255,00	T	14.410.152,00
7 Arneiroz II	Arneiroz	Estado	197,00	34,20	1.161,00	T	14.184.450,00
8 Mundaú	Uruburetama	DNOCS	21,30	36,30	444,00	T	14.130.755,10
9 Poço da Pedra	Campos Sales	DNOCS	52,00	31,40	797,00	T	12.034.050,00
10 Acarape do Meio	Redenção	Estado	31,50	33,00	267,50	AP	10.169.280,00
11 Pacoti	Itaitinga	Estado	380,00	27,00	1.600,00	T	9.011.250,00
12 Canoas	Canoas	Estado	69,25	48,80	116,50	CCR	8.705.178,24
13 Castro	Itapiuna	Estado	63,90	25,90	606,00	T	8.323.612,50
14 Olho d'água	Várzea Alegre	Estado	21,20	25,30	683,00	T	7.960.012,50
15 Benguê	Aiuaba	Estado	19,56	23,61	480,00	T	6.700.234,68
16 Muquém	Cariús	Estado	47,64	27,60	355,23	T	6.676.760,99
17 Rivaldo de Carvalho	Catarina	Estado	19,52	19,00	401,60	AP	6.226.406,40
18 Riachão	Itaitinga	Estado	46,95	22,00	600,00	T	6.105.000,00
19 Sítos Novos	Caucaia	Estado	123,20	21,50	1.818,00	T	5.845.312,50
20 Flor Do Campo	Novo Oriente	Estado	111,30	21,14	697,80	T	5.661.820,50
21 Realejo	Cratêus	DNOCS	31,55	21,00	712,00	T	5.591.250,00
22 Pompeu Sobrinho	Choró	DNOCS	143,00	31,00	235,00	T	5.518.387,50
23 Cipoada	Morada Nova	Estado	86,09	20,80	1.130,00	T	5.491.200,00
24 Rosário	Lavras da Mangabeira	Estado	47,20	20,80	670,00	T	5.491.200,00
25 Gangorra	Granja	Estado	62,50	20,66	1.033,00	T	5.421.700,50
26 Serrota	Pentecoste	DNOCS	4,57	22,00	426,00	T	5.201.460,00
27 Jerimum	Irauçuba	Estado	20,50	23,20	385,00	TE	5.198.424,00
28 Souza	Canindé	Estado	30,84	19,90	660,00	T	5.052.112,50
29 Trapá II	Pedra Branca	Estado	18,19	27,40	270,00	T	5.004.747,00
30 Carmina	Catunda	Estado	13,63	19,00	770,00	T	4.631.250,00
31 Angicos	Coreau/Frecheirinha	Estado	56,05	18,90	1.367,00	T	4.585.612,50
32 Malcuzinhado	Cascavel	Estado	37,84	18,50	755,00	T	4.405.312,50
33 Cachoeira	Aurora	Estado	34,33	25,50	270,00	T	4.363.368,75
34 Vieirão	Boa Viagem	Estado	20,96	22,50	340,00	T	4.331.812,50
35 Monsenhor Tabosa	Monsenhor Tabosa	Estado	12,10	23,10	315,00	T	4.218.550,88
36 Pirabibu	Quixeramobim	Estado	74,00	18,00	1.650,00	T	4.185.000,00
37 Amanary	Maraguape	DNOCS	11,01	19,10	435,00	T	4.069.087,88
38 Ubalzinho	Cedro	Estado	31,80	18,00	475,00	T	3.975.750,00
39 Caracas	Canindé	Estado	9,63	17,00	636,00	T	3.761.250,00
40 Carnaubal	Cratêus	Estado	87,69	17,00	742,00	T	3.761.250,00
41 Itaiúna	Chaval	Estado	77,50	18,00	436,00	T	3.649.320,00
42 Arrebata	Forquilha	Estado	19,60	17,30	464,00	T	3.606.219,60
43 Catucinzenta	Aquiraz	Estado	27,13	16,25	1.055,00	T	3.458.203,13
44 Jaburu II	Cratêus	Estado	116,00	16,20	1.054,00	T	3.438.450,00
45 Gavião	Itaitinga	Estado	32,90	16,00	668,00	T	3.360.000,00
46 Faé	Quixelô	Estado	23,40	20,00	329,00	T	3.355.800,00
47 Do Coronel	Antonina do Norte	Estado	1,70	16,40	440,00	T	3.095.664,00
48 Barra Velha	Independência	Estado	99,50	17,51	387,00	T	3.076.302,57
49 São José II	Piquet Carneiro	Estado	29,14	19,00	330,00	T	3.056.625,00
50 Parambu	Parambu	Estado	8,53	20,80	278,00	T	3.053.107,20
51 Pacajus	Pacajús	Estado	240,00	15,00	1.960,00	T	2.981.250,00
52 Canafístula	Iracema	Estado	13,11	14,80	850,00	T	2.908.200,00
53 Poço Verde	Itapipoca	DNOCS	13,65	14,00	750,00	T	2.625.000,00
54 Itapebussu	Maranguape	DNOCS	7,64	13,40	684,00	T	2.422.050,00
55 Capitão Mor	Pedras Brancas	Estado	6,00	22,00	180,00	T	2.197.800,00
56 Madeiro	Pereiro	Estado	2,81	15,50	346,00	T	2.192.126,25
57 Trapá III	Coreaú	Estado	5,50	12,42	533,57	T	2.107.984,50
58 Penedo	Maranguape	Estado	2,40	12,20	474,00	T	1.934.346,60
59 Quandú	Itapipoca	Estado	4,00	19,50	195,00	T	1.896.496,88
60 Valério	Altaneira	Estado	2,02	19,90	180,00	T	1.818.760,50
61 Cauhipe	Caucaia	Estado	12,00	11,37	1.298,00	T	1.795.465,13
62 Tigre	Solonópole	Estado	20,00	15,80	270,00	T	1.772.523,00
63 Santa Maria	Ererê	Estado	11,20	11,00	557,00	T	1.691.250,00
64 Sucesso	Tamboril	Estado	10,00	10,20	498,00	T	1.470.544,20
65 São Domingos	Caridade	Estado	3,04	12,73	330,53	T	1.457.634,08
66 Trapia I	Caridade	Estado	2,01	13,50	295,00	T	1.448.634,38
67 Potiretama	Potiretama	Estado	6,33	11,80	375,00	T	1.440.337,50
68 Desterro	Caridade	DNOCS	5,01	9,80	600,00	T	1.374.450,00
69 Hipólito	Acarape	Estado	6,54	14,95	222,36	T	1.317.662,28
70 Tatajuba	Ícó	Estado	2,72	16,60	149,80	T	1.077.975,78
71 Cupim	Independência	Estado	4,55	10,00	350,00	T	997.500,00
72 Colina	Quiterianópolis	Estado	3,25	11,50	267,00	T	978.721,88
73 Martinópolis	Martinópolis	DNOCS	23,20	11,00	240,00	T	811.800,00
74 São José I	Boa Viagem	Estado	7,67	10,70	230,00	T	740.145,75
75 Santo Antonio	Iracema	Estado	0,83	13,20	135,00	T	636.174,00
76 Adatao Bezerra	Pereiro	Estado	5,25	14,00	117,00	T	614.250,00
77 Pau Preto	Potengi	DNOCS	1,77	7,74	241,00	T	436.769,36
			7.740,90				416.721.557,95

AP - Alvenaria de Pedra; CCR - Concreto Compactado a Rolo; T - Terra; TE - Terra e Enrocamento

#### 5.2.2.2 Custo de eliminação da anomalia com Nível de Perigo igual ou superior a 1 (CeNP)

O CeNP representa o custo para a recuperação das anomalias que representam perigo para a integridade física da estrutura, e têm nível de perigo (NP) superior ou igual a 1, ou seja, nos níveis de Atenção (NP=1), ALERTA (NP=2) e EMERGÊNCIA (NP=3). São aquelas, portanto, que podem levar à ruptura física do empreendimento. Os custos das anomalias que representam nenhum perigo (NP=0), mesmo aquelas de magnitude Grande (G) não são considerados para o CeNP.

O valor do custo de eliminação de cada anomalia com níveis de perigo (NP) 1, 2 e 3 foi determinado considerando a barragem onde se localiza a anomalia e sua magnitude.

No modelo adotado o CeNP constitui em elemento para a determinação da eficiência na aplicação dos recursos financeiros.

A Tabela 5.4 apresenta o somatório dos valores obtidos por Nível de Perigo e por barragem hierarquizadas pelo CeNP.

#### 5.2.2.3 Custo de Recuperação das Anomalias com base nas Magnitudes

Para a estimativa de custos de recuperação das anomalias com base na Magnitude (I, P, M ou G) das anomalias da Ficha de Inspeção de Barragens (BRASIL, 2005) foi utilizada a experiência de 13 anos do autor na COGERH trabalhando em atividades de operação e manutenção e recuperação das barragens.



a) A Figura 5.6 apresenta uma canaleta longitudinal de berma do talude de jusante da barragem Barra Velha (Independência-Ce) contendo material granular (brita/cascalho). Anomalia de magnitude Insignificante, em que não há a incorporação de recursos, pois pode ser mantida apenas sob observação pela Administração Local.



FIGURA 5.6 - Foto com Exemplo de Anomalia de Magnitude I (Insignificante)

b) A Figura 5.7 mostra a ocorrência de vegetação arbustiva junto ao cordão de fixação da soleira do vertedouro da barragem Parambu (Parambu-Ce). Anomalia de magnitude P-Pequena (anomalia que pode ser resolvida pela própria Administração local). Foi estimado o custo no valor de R\$ 200,00 para a remuneração de horas de trabalho do agente local.



FIGURA 5.7 - Foto com Exemplo de Anomalia de Magnitude P (Pequena)

c) A Figura 5.8 mostra a ocorrência de buracos devido ao tráfego de veículos por sobre o coroamento da barragem Canafístula (Iracema,Ce). Anomalia de magnitude M - Média (Anomalia que só pode ser resolvida pela Administração Local com apoio da Administração Regional). Foi estimado o custo no valor de R\$ 2.000,00 para a remuneração de horas de trabalho do agente local e do pessoal da gerência e compra de materiais e ferramentas tais como foices, tintas, cimento, brita e pagamento de diárias.



FIGURA 5.8 - Foto com Exemplo de Anomalia de magnitude M (Média)

d) A Figura 5.9 apresenta a erosão regressiva junto ao muro ala direito do vertedouro do tipo labirinto da barragem Rosário (Lavras da Mangabeira-Ce). A anomalia de magnitude G - Grande (a Anomalia só pode ser resolvida pela Administração Regional com o apoio técnico/material da Administração Central). Anomalia que requer estudos e contratação de serviço por parte da Administração Central. Em média, foi estimado o custo no valor de R\$ 4.000,00 para a recuperação da anomalia G.



FIGURA 5.9 - Foto com Exemplo de Anomalia de Magnitude G (Grande)

Os resultados do cálculo para as 77 barragens, em ordem decrescente de custo de recuperação de anomalias, estão apresentados no Tabela 5.5, a seguir.

O valor total do custo de recuperação das anomalias para as 77 barragens foi de R\$ 2.257.800,00 e o valor médio foi de R\$ 29.322,07, por barragem.

A presença deste item teve como objetivo frisar que, em face da limitação de recursos dos proprietários mantenedores de barragens, há necessidade de seguir uma segunda linha de ação, priorizando-se a alocação de recursos nas anomalias que impliquem na eliminação do perigo.





### 5.2.3 Severidade da ruptura da barragem ( $S_{vp}$ ) ou prejuízo a ser evitado (probabilidade x custo)

Com este critério procura-se verificar o prejuízo a ser evitado pela possível ruptura da barragem através do termo denominado de *severidade*. Inicialmente calcula-se a severidade anual ( $S_{anual}$ ) em função do custo para a recuperação da ruptura da barragem (ver item 5.2.2.1) e da redução da probabilidade de ruptura anual estimada para uma probabilidade anual aceitável, admitida de  $1 \times 10^{-6}$ , de acordo com a probabilidade de ruptura aceitável pela sociedade ( $10^{-6}$  mortes/pessoa x ano) conforme comentado no Capítulo 3

A atualização da severidade anual para o valor presente é feita de tal forma que a recuperação da anomalia tenha uma validade em um período estimado ( $n$ ) de 15 anos a uma taxa de juros ( $i$ ) de 6% ao ano.

Para a severidade atualizada da ruptura, adotou-se a seguinte expressão

$$S_{vp} = S_{anual} \times VP(i,n) \quad (5.1)$$

onde,

$$S_{anual} = CR_{rup} \times (PRA - PRA_{ac}) \quad (5.2)$$

sendo,

$CR_{rup}$  = Custo da Recuperação da Ruptura da barragem;

$PRA$  = Probabilidade de Ruptura Anual (ver item 5.1.2);

$PRA_{ac}$  = Probabilidade de Ruptura Anual aceitável =  $1,0 \times 10^{-6}$ .

$VP(i,n)$  = Valor Presente a partir de uma amortização anual =

$$= \frac{[(1+i)^n - 1]}{i \cdot (1+i)^n} \quad (5.3)$$

Foram adotados:  $n=15$  anos e  $i$  (taxa de juros) de 6,0 % ao ano, ou seja,

$$VP(6\%,15) = 9,71.$$



#### 5.2.4 Critérios que Consideram Custos

Para a priorização a partir da eficiência na aplicação dos recursos financeiros foram considerados na metodologia dois critérios tendo como base o custo da eliminação da anomalia com nível de perigo igual ou superior a 1 (CeNP), os quais são apresentados a seguir:

##### 5.2.4.1 Critério1: Eficiência na redução do perigo, com base na relação (NPB/CeNP).

Neste critério procurou-se verificar a eficiência da aplicação dos recursos financeiros na redução da probabilidade de ruptura da barragem, representada pela relação. NPB (item 5.2.1.1) e CeNP (item 5.2.2.2) obtém-se dessa forma o custo da redução do perigo para cada unidade monetária expedida. Não há preocupação neste critério em relação ao impacto (conseqüência/danos) da ruptura do empreendimento.

A Tabela 5.6 apresenta a hierarquização das barragens pelo critério da razão: NPB/C<sub>e</sub>NP.



#### 5.2.4.2 Critério 2: Benefício Líquido equivalente ( $BL_e$ )

O segundo critério é referente à eficiência econômica, e é definido com base no Benefício Líquido equivalente ( $BL_e$ ) correspondente a diferença entre a Severidade atualizada da ruptura ( $S_{vp}$ ) (item 5.3) e o Custo da Eliminação da Anomalia com Nível de Perigo igual ou superior a 1 ( $C_eNP$ ) (item 5.2.2.2), ou seja:

$$BL_e = S_{vp} - C_eNP \quad (5.4)$$

Os resultados para as 77 barragens hierarquizadas pelo  $BL_e$  estão apresentados na Tabela 5.8. Observa-se que 54,5% das barragens (42) apresentaram valores de  $BL_e$  negativos indicando a não sustentabilidade econômica em termos de risco da eliminação das anomalias que apresentam perigo. Obviamente, não se deve tratar a segurança das pessoas em termos somente econômicos, uma vez que vidas podem ser afetadas no caso de ruptura.



### 5.2.5 Riscos

Os critérios de avaliação de risco apresentados a seguir consideram o risco ( $r$ ), em geral, com sendo o produto da probabilidade de ruptura ( $p$ ) com as conseqüências (econômicas, sociais e ambientais) ( $C$ ) ou seja:

$$r = p \times C \quad (5.5)$$

Foram aplicados às 77 barragens do estado do Ceará dois critérios de avaliação do risco. O primeiro denominado de Índice de Vulnerabilidade ( $I_v$ ) foi adaptado de FONTENELLE et al. (2005), consiste de uma estimativa bastante simplificada e está sendo apresentada para exemplificar uma utilização de critério de risco, como também para efeito comparativo com o segundo critério, denominado de Escore de Risco ( $E_R$ ), o qual em face da sua maior abrangência de parâmetros foi o critério de avaliação do risco adotado na metodologia.

#### 5.2.5.1 Índice de Vulnerabilidade ( $I_v$ )

Neste critério, por analogia ao conceito acima, buscou-se considerar os fatores  $p$  e  $C$  através do nível de perigo da barragem (NPB) substituindo a probabilidade de rompimento  $p$ , e a Capacidade do reservatório considerando proporcional aos custos das conseqüências substituindo o  $C$ .

O Índice de Vulnerabilidade ( $I_v$ ) é obtido através de uma escala de composição para dois fatores: a capacidade do reservatório ( $hm^3$ ) e a pontuação do NPB (obtido no item 5.2.1.1), conforme o indicado no Quadro 5.6.

O valor do  $I_v$  é composto conforme a expressão:

$$I_v = \text{Peso NPB (probabilidade)} \times \text{Peso CAP (conseqüência)} \quad (5.6)$$

QUADRO 5.6 - Iv: Pesos da Capacidade do Reservatório e do NPB

Capacidade (hm <sup>3</sup> )	Peso da Capacidade	Nível de Perigo da Barragem (NPB)	Peso NPB
0-5	1	0	0
5-10	1,5	1-5	1
10-17,5	2	5-10	1,5
17,5 - 25	2,5	10-15	2
25-37,5	3	15-20	2,5
37,5 - 50	3,5	20-25	3
50 - 62,5	4	25-30	3,5
62,5 - 75	4,5	30-35	4
75 - 87,5	5	35-40	4,5
87,5 – 100	5,5	40-45	5
100 – 125	6	45-50	5,5
125-150	6,5	50-55	6
150 – 225	7	55-58	6,5
225 – 300	7,5	58-61	7
300 -450	8	61-63	7,5
450 – 600	8,5	63-66	8
600 – 1400	9	66-69	8,5
.400 – 2.200	9,5	69-72	9
2.200 – 6.700	10	72-74	9,5
		74-76	10

O resultado do Iv para 77 barragens estudadas está apresentado na Tabela 5.9, hierarquizadas do maior para o menor Iv.

Este critério apresenta a vantagem de sua fácil aplicação, no entanto, tem a desvantagem de considerar a capacidade do reservatório, que representa um valor fixo, sendo muitas vezes não representativo do nível d'água do reservatório por ocasião da inspeção. O mais correto seria, portanto, considerar o nível médio histórico do reservatório.

O Quadro 5.7, a seguir, apresenta o critério de classificação baseado no Iv e o resultado obtido das 77 barragens estudadas.



QUADRO 5.7 - Critério de Classificação pelo Índice de Vulnerabilidade (Iv).

<b>Escala</b>	<b>Índice de Vulnerabilidade</b>	<b>No. de Barragens</b>
Nula (N)	0	07
Muito Baixo (MB)	1 – 2,5	26
Baixo (B)	2,6 – 4,0	16
Regular (R)	4,1 – 8,0	20
Alto (A)	8,1 – 25,0	8
Muito Alto (MA)	Maior que 25,0	0



### 5.2.5.2 Critério 3: Escore de Risco ( $E_R$ )

Observamos que as metodologias apresentadas no capítulo 4 eram bastante abrangentes, no entanto, vimos a necessidade de propor uma metodologia mais completa para a região semi-árida do nordeste brasileiro, incorporando os resultados dos níveis de perigo das anomalias detectadas nas inspeções formais como referência para a pontuação. Esta versatilidade corresponde basicamente ao que se refere aos critérios de confiabilidade das estruturas vertedouras, fugas de água, deformações/drenagem do coroamento e deterioração dos taludes/paramentos. Incorporou-se, também, com relação a idade da barragem, pontuações maiores nos primeiros anos de operação (primeiras solicitações) e na fase de envelhecimento. Em relação ao danos (econômicos e ambientais) e de perdas de vidas, a metodologia apresenta um critério de pontuação baseado em análise quantitativa.

A determinação da pontuação final barragem é denominada de Escore de risco ( $E_R$ ) e é feita considerando a situação técnica do empreendimento e os danos à propriedade (econômicos e ambientais) e perdas de vidas na área de inundação de jusante no caso de ruptura. O efeito de tais danos na estimativa do risco, é feito considerando-se fator  $k$  variando de 2 a 3 acordo com o grau de conhecimento do impacto da onda de cheia a jusante da barragem.

O risco determinado por esta metodologia é denominado de Escore de Risco ( $E_R$ ) da barragem o qual é dado pela equação:

$$E_R = \left( \frac{P + V + k.D}{2 + k} \right) \quad (5.7)$$

Onde:

- **P** = Periculosidade;
- **V** = Vulnerabilidade;
- **D** = Danos à Propriedade, Ambientais e Perdas de Vidas;
- Fator **k**: pode ser adotado entre 2 a 3 conforme o grau de conhecimento dos Danos. Na aplicação às 77 barragens foi adotado o fator  $k = 2$ , referente a um grau de conhecimento baixo.

#### 5.2.5.2.1 Periculosidade (P)

A Periculosidade (P) representando as características técnicas da barragem, é utilizada na classificação das barragens com base no critério de pontuação apresentado no Quadro 5.8, e contempla os seguintes fatores: Altura e Extensão ( $P_1$ ), Capacidade ( $P_2$ ), Tipo de Barragem ( $P_3$ ), Tipo de Fundação ( $P_4$ ), Sistema de Drenagem Interna ( $P_5$ ) e Vazão de Projeto ( $P_6$ ).

O Valor do Periculosidade (P) é dada pela expressão:

$$P = \frac{1}{56} \sum_1^6 P_i \quad (5.8)$$

onde o valor 56 corresponde à pontuação máxima dos somatório dos  $P_i$ .

Para a determinação das classes de P estabeleceu-se, para cada um dos quatro níveis (elevada, significativa, moderada e mínima) pontuações para os seis  $P_{is}$ , somou-se e dividiu-se por 56. O Quadro 5.9, apresenta o critério para a determinação das classes para a Periculosidade(P).

QUADRO 5.8 - Critério de Pontuação dos Parâmetros de Periculosidade (P) para o Escore de Risco (E<sub>R</sub>).

Dimensão da Barragem (P <sub>1</sub> )		Volume Total do Reservatório (P <sub>2</sub> )	Material da Barragem (P <sub>3</sub> )	Sistema de Drenagem Interna (P <sub>4</sub> )	Tipo de Fundação (P <sub>5</sub> )	Vazão de Projeto (P <sub>6</sub> )
Altura (m)	Comprimento (m)	Volume Máximo (hm <sup>3</sup> )				
<10 (1)	<400 (1)	<10 (1)	Concreto (4)	Drenos Verticais e Horizontais (1)	Rocha sã (1)	Decamilenar (1)
10,1 -15 (2)	400,1 - 700 (3)	10,1-20 (2)	Alvenaria de pedra/ Concreto rolado (6)	Dreno horizontal e Dreno de Pé (3)	Aluvião c/ trincheira de vedação apoiada em rocha são tratada (2)	Milenar (2)
15,1 - 20 (5)	700,1 - 1.000 (8)	20.1-30 (3)	Terra Enrocamento (8)	Dreno de Pé (7)	Rocha sedimentar (4)	500 anos (4)
20, -30 (6)	1.000 - 1.500 (9)	30,1-50 (4)	Terra (10)	Desconhecido (10)	Aluvião profundo com tapete sem poços de alivio (6)	Inferior a 500 anos ou Desconhecida (6)
30,1 - 50 (8)	>1500 (10)	50,1-100 (5)			Aluvião profundo com trincheira de vedação parcial c/ poços de alivio (8)	
>50 (10)		100,1-120 (6)			Aluvião profundo com trincheira de vedação parcial sem tapete a montante e sem poços de alivio(9)	
		120,1-170 (7)			Desconhecido (sem projeto) (10)	
		170,1-200 (8)				
		200,1-2000 (9)				
		>2000 (10)				

Obs: Os valores entre parêntesis se referem aos escores de pontuação

QUADRO 5.9 - Critério de determinação das classes de Periculosidade

Periculosidade	Máxima	Elevada	Significativa	Moderada	Mínima
1P	10	8	4	1,5	1
2P	10	8	3	2	1
3P	10	8	8	6	4
4P	10	6	3	3	1
5P	10	6	2	2	1
6P	6	4	2	2	1
Soma	56	40	22	16,5	9
Normalizado =		0,72	0,39	0,29	0,16

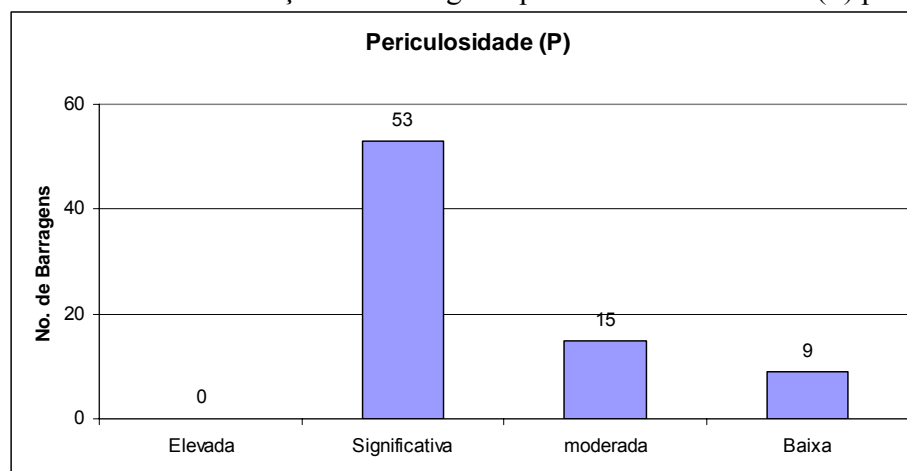
O Quadro 5.10 apresenta, tendo como referência o quadro acima, as Classes de periculosidade adotadas:

QUADRO 5.10 - Classes de Periculosidade (P).

Valores de P	Classe
$P \geq 0,72$	Elevada
$0,39 \leq P < 0,72$	Significativa
$0,29 \leq P < 0,39$	Moderada
$P < 0,29$	Baixa

A Figura 5.10 apresenta o resultado da classificação da periculosidade das 77 barragens estudadas. Observa-se uma grande predominância da periculosidade significativa, o que implica no necessário acompanhamento destas barragens.

FIGURA 5.10 - Classificação das barragens quanto a Periculosidade (P) pelo ER.



#### 5.2.5.2.2 Vulnerabilidade (V)

A Vulnerabilidade (V) representa a situação atual da barragem, é utilizada na classificação das barragens com base no critério de pontuação apresentado no Quadro 5.9 a seguir, e contempla os seguintes fatores: Tempo de Operação ( $V_1$ ), Informação de Projeto ( $V_2$ ), Confiabilidade das estruturas vertedouras ( $V_3$ ), Tomada de água ( $V_4$ ), Fugas d'água ( $V_5$ ), Deformações/Drenagem do Coroamento ( $V_6$ ), Deterioração dos Taludes/Paramentos ( $V_7$ ).

Para os fatores  $V_3$ ,  $V_5$ ,  $V_6$  e  $V_7$  que tratam da Confiabilidade das estruturas do vertedouro, Fugas d'água, das condições de Deformação/drenagem do coroamento e das Deteriorações dos taludes/Paramentos, respectivamente, a classificação será dada em função do Nível de Peirgo (NP) das anomalias presentes no local e/ou situação observados, anotados nas inspeções formais (check-lists). Assim para NP=1, considerou-se peso 1, NP=2, peso 4; NP=3 peso 9.

Em relação ao tempo de operação ( $V_1$ ) considerou-se a pontuação mais elevada nos extremos, tendo em vista que nos primeiros anos de operação a barragem será solicitada pela primeira vez e que após vários anos de operação ocorre o envelhecimento dos materiais em face da deterioração e solicitações, como por exemplo a desobstrução de filtros e drenos. No que se refere ao enquadramento quanto às Informações de projeto ( $V_2$ ) e Tomada de água ( $V_4$ ), foi

tomado como base a classificação conforme MENESCAL et al (2001a) conforme apresentado no Quadro 5.11.

O valor da Vulnerabilidade é dado pela expressão:

$$V = \frac{1}{57} \sum_1^7 V_i \quad (5.9)$$

Analogamente, o valor 57 corresponde à pontuação máxima dos somatório dos  $V_i$ .

Para a determinação das classes de V estabeleceu-se, para cada um dos quatro níveis (elevada, significativa, moderada e mínima) pontuações para os sete  $V_{is}$ , somou-se e dividiu-se por 57 O Quadro 5.12 abaixo, apresenta o critério para a determinação das classes para a Vulnerabilidade (V):

O Quadro 5.13 apresenta, tendo como referência o quadro acima, as Classes de Vulnerabilidade (V) adotadas:

A Figura 5.11 a seguir apresenta o resultado da classificação da Vulnerabilidade das 77 barragens estudadas. Observa-se uma grande predominância da vulnerabilidade moderada, o que implica numa boa conservação das barragens estudadas.



QUADRO 5.11 - Critério de Pontuação dos parâmetros de Vulnerabilidade (V) para o Escore de risco (E<sub>R</sub>).

<b>Tempo de Operação (V<sub>1</sub>)</b>	<b>Informação de projeto (V<sub>2</sub>)</b>	<b>Confiabilidade das estruturas vertedoras (V<sub>3</sub>)</b>	<b>Tomada de Água (V<sub>4</sub>)</b>	<b>Fugas d'água (V<sub>5</sub>)</b>	<b>Deformações /Drenagem do Coroamento (V<sub>6</sub>)</b>	<b>Deterioração dos Taludes/ Paramentos (V<sub>7</sub>)</b>
0-5 (8)	completo - projeto executivo/como construído (1)	satisfatório – sem erosões regressivas, taludes estáveis, sem obstruções, NP=0 (0)	Satisfatória Controle a Montante (1)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)
5-15 (5)	projeto básico com avaliação de desempenho (2)	razoável – pequenas obstruções, erosão regressiva distante superior a 10m do cordão ou perfil do vertedouro, taludes instáveis, NP=1 (1)	Satisfatória: Controle a Montante com stop-log (2)	NP=1; Fluxo sem carregamento de material, com medidor de vazão(1)	NP=1; rachaduras localizadas,vegetação rasteira, desalinhamento/defeito no meio-fio (1)	NP=1; erosões até 10cm, rip-rap incompleto, presença de rachaduras/trincas (concreto),canaletas trincadas (1)
15-30 (3)	projeto básico completo (3)	ruim - vegetação excessiva, deslizamento de taludes, erosão regressiva inferior a 10m do cordão ou perfil do vertedouro, NP=2. (4)	Satisfatória: Controle a Jusante (3)	NP=2; Fluxo sem carregamento de material, sem medidor de vazão(4)	NP=2; rachaduras localizadas superiores a 1m, presença de arbustos localizadas, fissuras generalizadas no meio-fio,formigueiros, sinais de movimento até 30cm (4)	NP=2; erosão superior a 10cm e inferior a 50cm, rip-rap incompleto com talude exposto, presença de rachaduras/trincas (concreto), afundamento abrupto inferior a 5cm, trincas generalizadas de canaletas (4)
30-50 (4)	projeto básico incompleto (8)	insatisfatório - presença generalizada de arbustos, erosão regressiva solapando o pé do cordão ou perfil vertedouro, ou muros alas, obstruções por cercas, equipamentos , NP=3. (9)	Aceitável (5)	NP=3; Fluxo com carregamento de material, com medição de vazão (9)	NP=3; trincas generalizadas, afundamento abrupto (sinkhole), presença generalizada de arbustos, fissuras generalizadas no meio-fio, formigueiros generalizados, sinais de movimento superior a 30cm (9)	NP=3; erosão superior a 50cm, rip-rap incompleto sub-verticalização do talude, placas com afundamentos que permitam a passagem da água (concreto), afundamento abrupto superior a 5cm, presença de erosão profunda no local da canaleta quebrada, presença generalizada de arbustos. (9)

QUADRO 5.12 - Critério de determinação das classes de Vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	Máximo	Elevada	Significativa	Moderada	Baixa	Mínimo
1V	8	8	8	5	3	3
2V	8	5	3	2	1	1
3V	9	9	4	1	4	0
4V	5	4	4	3	1	1
5V	9	6	4	1	1	0
6V	9	4	4	1	1	0
7V	9	4	4	1	0	0
Soma	57	40	31	14	11	5
Normalizado =		0,70	0,54	0,25	0,19	0,09

QUADRO 5.13 - Classes da Vulnerabilidade (V).

Valores de V	Classe
$V \geq 0,70$	Elevada
$0,54 \leq V < 0,70$	Significativa
$0,25 \leq V < 0,54$	Moderada
$V < 0,25$	Baixa

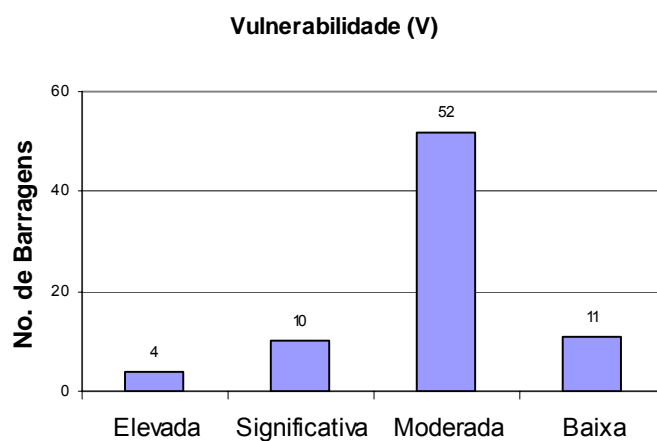


FIGURA 5.11 - Classificação das barragens quanto a Vulnerabilidade (V) pelo  $E_R$

### 5.2.5.2.3 Danos à Propriedades (Econômicos e Ambientais) e Perdas de Vidas (D)

Uma das maiores versatilidades da metodologia é a de considerar como uma variável o peso conforme o nível de conhecimento que se tem dos danos (impactos) da ruptura de uma barragem. O dano à propriedade é ponderado no escore de risco a partir de um fator  $k$ , sendo que este pode variar de 2 a 3 (ver equação 5.7). Adotou-se o fator de 2 para o  $k$  tendo em vista ainda a pouca informação existente nas barragens estudadas.

Conforme se pode observar no Quadro 5.14, foram estabelecidas cinco faixas de classificação conforme o potencial de perigo admitido em função da taxa de ocupação da população que poderia ser afetada pela onda de cheia devido a ruptura da barragem, ao tipo de uso econômico da terra e recursos naturais importantes e impacto da falta de abastecimento das cidades. A pontuação de D varia de 0 a 1,0.

QUADRO 5.14 - Critério de pontuação referentes a Perdas de Vidas e a Danos (D).

<b>Potencial de perigo</b>	<b>Área afetada</b>	<b>Escore</b>
Mínimo	Inabitadas e pouco desenvolvidas, com poucos recursos naturais.	0,1
Significante	Território ocasionalmente habitado, terras agricultáveis.	0,3
Médio	Área rural , impacto em até 2.000 pessoas, impacto no abastecimento de cidades de médio e grande porte, algum recurso natural.	0,5
Alto	Área rural e urbana, impacto em mais de 2.000 pessoas, impacto no abastecimento de cidades de médio e grande porte, recursos naturais importantes.	0,8
Muito Alto	Muito Alto - cidades com mais de 20.000 hab afetadas, impacto em mais de 2.000 pessoas, impacto em indústrias importantes.	1,0

#### 5.2.5.2.4 Classificação das barragens pelo Escore de Risco ( $E_R$ )

Para o fator  $k=2$ , pode-se utilizar o Quadro 5.15 para a classificação de risco das barragens a partir do Escore de Risco ( $E_R$ ). Obviamente, os intervalos de pontuações das classes deverão ser alteradas, no caso de utilizar-se valor de  $k$  superior a 2.

QUADRO 5.15 - Classificação pelo Escore de Risco ( $E_R$ ) para o fator  $k=2$ .

Classe	Escore de risco
A	$E_R \geq 0,70$ – Muito Alto
B	$0,50 \leq E_R < 0,70$ – Alto
C	$0,37 \leq E_R < 0,50$ – Moderado
D	$0,20 \leq E_R < 0,37$ – Baixo
E	$E_R < 0,20$ – Muito Baixo

A Tabela B.5.1 no APÊNDICE B apresenta o resultado da aplicação da metodologia do Escore de Risco e as pontuações atribuídas às 77 barragens.

A Figura 5.12 a seguir apresenta o resultado da classificação das 77 barragens estudadas quanto ao Escore de Risco. Observa-se a predominância de barragens com o risco Baixo.

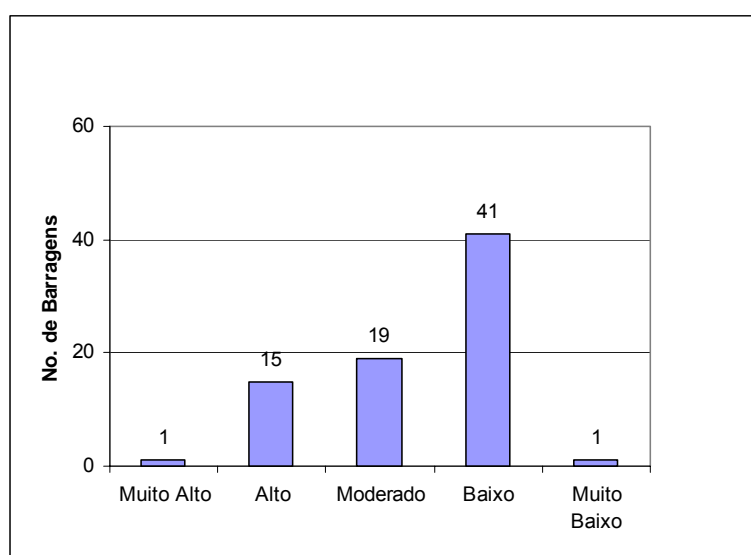


FIGURA 5.12 - Classificação das Barragens quanto ao  $E_R$

Esta metodologia de risco apresenta a vantagem de englobar todos os aspectos das outras metodologias três metodologias apresentadas no capítulo 4, tendo como sua principal vantagem aplicar na avaliação da vulnerabilidade- V, que indica o seu estado real ou atual, os resultados dos níveis de perigo das anomalias detectadas nas inspeções formais de forma quantitativa. Além de considerar um fator multiplicativo k proporcional ao nível de conhecimento dos danos.

#### 5.2.6 Classificação das Barragens por Ponderação dos Critérios

Dos critérios apresentados, são significativos para efeito de classificação das barragens para fins de melhoria da segurança através de obras de recuperação para a eliminação do perigo, somente três critérios, os quais foram denominados de Critérios 1, 2 e 3, a saber:

Critério 1 – Critério da melhor eficiência na aplicação dos recursos para a redução física do nível de perigo da barragem, seu valor é quantificado pela razão NPB/CeNP, (item 5.2.4.1). Os resultados deste parâmetro, que indica o quanto custa, em reais, para recuperar 1 NPB, estão priorizados na Tabela 5.7 na ordem decrescente do valor. Deve-se ressaltar que este critério contempla apenas o efeito da redução do perigo (ou da probabilidade de ruptura), não leva em conta os custos dos danos (conseqüências) a jusante.

Critério 2 - Critério do Benefício Líquido equivalente (BLE), (item 5.2.4.2). Este critério tem representatividade, pois considera a relação Benefício menos Custo (B-C), estão priorizados na Tabela 5.8, sendo estes representados pelo prejuízo evitado ou severidade (dado em função da redução da probabilidade de ruptura da barragem em relação ao custo de recuperação da ruptura) e pelo o valor a ser aplicado na eliminação do perigo, respectivamente. Também neste critério não se considera o custo dos danos para jusante.

Critério 3 - Critério do Escore de Risco ( $E_R$ ), (item 5.2.5.2). Este critério se enquadra no tipo de análise de risco qualitativa. É importante ser considerado, pois considera, a partir de pontuação em escores, os efeitos do perigo, representado pela soma dos escores da periculosidade (P) e a vulnerabilidade (V), e a ponderação dos danos (D) para jusante. Vale ressaltar também a importância deste critério por considerar os danos a jusante, não considerados nos 2 critérios citados anteriormente.

Apenas para efeito comparativo, a Tabela 5.10 apresenta um resumo das classificações das 77 barragens objeto do estudo (em ordem alfabética) nos nove critérios apresentados. Os números indicados na Tabela indicam a ordem de prioridade na classificação no critério considerado. Quanto menor o número, maior a relevância ou a importância da barragem. Assim, o número 1 representa a barragem com maior relevância, ou seja, a que tem a maior prioridade e, por consequência, a barragem de número 77 é referente àquela que tem menor relevância ou prioridade no critério.

Justifica-se a não ponderação final dos demais critérios por estes já estarem, de alguma forma, inseridos nos três critérios destacados, a saber:

- O critério do PRA (item 5.2.1.2), representa o perigo ou ameaça, portanto está embutido nos três critérios acima;
- O critério do Custo de recuperação da ruptura da barragem (CRrup) (item 5.2.2.1) faz parte da composição da severidade (item 5.2.2.3), que por sua vez está embutido também no Critério 2 (BLE).
- O CeNP (item 5.2.2.2) está presente no BLE;
- O Custo de recuperação das anomalias por magnitude (item 5.2.2.3), contém também custos que não representam perigo para a estrutura, e, portanto, não é priorizado;
- O critério do Índice de vulnerabilidade (Iv), (item 5.2.5.1) representa o risco da ruptura de uma forma bastante simplificada.



A metodologia, portanto, propõe para os tomadores de decisão a ponderação por pesos dos 3 critérios anteriores, conforme a seguinte expressão:

$$\text{Classificação} = \frac{P_1 \times \text{Critério 1} + P_2 \times \text{Critério 2} + P_3 \times \text{Critério 3}}{\sum P_i} \quad (5.10)$$

Onde:

Critério 1, por exemplo: indica o número da classificação da barragem no Critério 1;

$P_i$  é o fator de ponderação (peso) para cada critério que o tomador de decisão considera para efeito de hierarquização.

A Tabela 5.11 apresenta a hierarquização das 77 barragens pela média dos 3 critérios (pesos  $P_1 = P_2 = P_3 = 1$ ).

Por exemplo, a classificação da Barragem Orós foi calculada da seguinte forma:

$$\text{Pontuação (Orós)} = (1 \times 2 + 1 \times 5 + 1 \times 7) / 3 = 4,7.$$

De acordo com a Tabela 5.11, Orós foi a barragem que apresentou a menor pontuação e, portanto, maior risco e melhor classificada neste critério.

A Tabela 5.12 apresenta a classificação das barragens no caso de adotar-se, por exemplo, o peso 2 para o critério 3 (Escore de Risco).

Assim, a classificação da Barragem Orós fica da seguinte forma:

$$\text{Pontuação (Orós)} = (1 \times 2 + 1 \times 5 + 2 \times 7) / 4 = 5,3$$

De acordo com a Tabela 5.12, também foi a menor pontuação e, portanto, maior risco e melhor classificada neste critério.

No caso de descartar-se de um critério, este deverá ter peso zero ou nulo.



TABELA 5.11 - Ponderação: Classificação pela Média.

Barragem	Município	Propr.	Cap. (hm <sup>3</sup> )	Critério - 1	Critério - 2	Critério - 3	Média
				NPB/CeNP	Ble	Escore de Risco (Er)	
				(item 5.2.4.1)	(item 5.2.4.2)	(item 5.2.5.2)	
TAB 5.7	TAB. 5.8	TAB. B.5.1					
Peso=1	Peso=1	Peso=1					
1 Orós	Orós	DNOCS	1.940,00	2	5	7	4,7
2 Arneiroz II	Arneiroz	Estado	197,00	5	28	10	14,3
3 Riachão	Itaitinga	Estado	46,95	17	15	14	15,3
4 Gavião	Itaitinga	Estado	32,90	20	25	4	16,3
5 Banabuiu	Banabuiu	DNOCS	1.601,00	44	2	6	17,3
6 Acarape do Meio	Redenção	Estado	31,50	11	29	15	18,3
7 Araras	Varjota	DNOCS	891,00	51	1	3	18,3
8 Pacoti	Itaitinga	Estado	380,00	35	18	2	18,3
9 Carnaubal	Crateús	Estado	87,69	6	34	16	18,7
10 São José II	Piquet Carneiro	Estado	29,14	22	7	37	22,0
11 Aracoiaba	Aracoiaba	Estado	170,70	38	11	18	22,3
12 Poço da Pedra	Campos Sales	DNOCS	52,00	14	9	44	22,3
13 Olho d'água	Várzea Alegre	Estado	21,20	64	4	1	23,0
14 Caracas	Canindé	Estado	9,63	40	12	19	23,7
15 Barra Velha	Independência	Estado	99,50	16	35	22	24,3
16 Prazeres	Barro	DNOCS	32,50	9	27	41	25,7
17 Valério	Altaneira	Estado	2,02	39	13	25	25,7
18 Vieirão	Boa Viagem	Estado	20,96	59	8	13	26,7
19 Pirabibu	Quixeramobim	Estado	74,00	12	20	49	27,0
20 Catucinzenta	Aquiraz	Estado	27,13	3	19	63	28,3
21 Hipólito	Acarape	Estado	6,54	15	36	36	29,0
22 Benguê	Aiuaba	Estado	19,56	19	16	55	30,0
23 Faé	Quixelô	Estado	23,40	24	47	20	30,3
24 Muquém	Cariús	Estado	47,64	13	14	64	30,3
25 Trapiá II	Pedra Branca	Estado	18,19	53	6	33	30,7
26 Parambu	Parambu	Estado	8,53	4	21	68	31,0
27 Capitão Mor	Pedras Brancas	Estado	6,00	47	24	24	31,7
28 Rosário	Lavras da Mangabeira	Estado	47,20	7	31	59	32,3
29 Itapebussu	Maranguape	DNOCS	7,64	1	22	75	32,7
30 Cupim	Independência	Estado	4,55	26	46	29	33,7
31 Malcuzinhado	Cascavel	Estado	37,84	23	23	58	34,7
32 Ubaldinho	Cedro	Estado	31,80	10	33	62	35,0
33 Do Coronel	Antonina do Norte	Estado	1,70	27	38	42	35,7
34 Serrota	Pentecoste	DNOCS	4,57	49	10	48	35,7
35 Sítos Novos	Caucaia	Estado	123,20	54	44	9	35,7
36 Cachoeira	Aurora	Estado	34,33	8	32	70	36,7
37 Tatajuba	Icó	Estado	2,72	29	49	34	37,3
38 Carmina	Catunda	Estado	13,63	30	39	46	38,3
39 São José I	Boa Viagem	Estado	7,67	37	51	28	38,7
40 Trapiá I	Caridade	Estado	2,01	33	17	67	39,0
41 Potiretama	Potiretama	Estado	6,33	32	54	32	39,3
42 Canafístula	Iracema	Estado	13,11	60	30	30	40,0
43 Jaburu II	Crateús	Estado	116,00	58	45	17	40,0
44 Monsenhor Tabosa	Monsenhor Tabosa	Estado	12,10	25	26	69	40,0
45 São Domingos	Caridade	Estado	3,04	34	68	21	41,0
46 Itaúna	Chaval	Estado	77,50	31	42	51	41,3
47 Tigre	Solonópole	Estado	20,00	45	43	39	42,3
48 Pau Preto	Potengi	DNOCS	1,77	41	58	31	43,3
49 Cauhipe	Caucaia	Estado	12,00	18	37	77	44,0
50 Flor Do Campo	Novo Oriente	Estado	111,30	36	40	56	44,0
51 Canoas	Canoas	Estado	69,25	67	3	71	47,0
52 Jaburu I	Tianguá	Estado	210,00	75	59	8	47,3
53 Pacajus	Pacajús	Estado	240,00	66	71	5	47,3
54 Colina	Quiterianópolis	Estado	3,25	50	66	27	47,7
55 Amanary	Maraguape	DNOCS	11,01	42	55	47	48,0
56 Santo Antonio	Iracema	Estado	0,83	21	50	73	48,0
57 Madeiro	Pereiro	Estado	2,81	28	48	72	49,3
58 Gangorra	Granja	Estado	62,50	77	65	11	51,0
59 Jerimum	Irauçuba	Estado	20,50	43	52	60	51,7
60 Castro	Itapiuna	Estado	63,90	72	73	12	52,3
61 Angicos	Coreau/Frecheirinha	Estado	56,05	52	56	50	52,7
62 Sucesso	Tamboril	Estado	10,00	74	61	23	52,7
63 Santa Maria	Ererê	Estado	11,20	63	57	40	53,3
64 Trapiá III	Coreaú	Estado	5,50	55	41	66	54,0
65 Mundaú	Uruburetama	DNOCS	21,30	68	64	38	56,7
66 Poço Verde	Itapipoca	DNOCS	13,65	61	74	35	56,7
67 Cipoada	Morada Nova	Estado	86,09	73	72	26	57,0
68 Martinópolis	Martinópolis	DNOCS	23,20	46	60	65	57,0
69 Rivaldo de Carvalho	Catarina	Estado	19,52	65	67	43	58,3
70 Souza	Canindé	Estado	30,84	57	62	57	58,7
71 Adatao Bezerra	Pereiro	Estado	5,25	56	69	52	59,0
72 Penedo	Maranguape	Estado	2,40	48	63	76	62,3
73 Quandú	Itapipoca	Estado	4,00	69	77	45	63,7
74 Desterro	Caridade	DNOCS	5,01	62	76	54	64,0
75 Arrebita	Forquilha	Estado	19,60	70	70	53	64,3
76 Realejo	Crateús	DNOCS	31,55	71	53	74	66,0
77 Pompeu Sobrinho	Choró	DNOCS	143,00	76	75	61	70,7
			7.740,90				

TABELA 5.12 - Ponderação: Classificação com peso 2 para o Critério 3.

Barragem	Município	Propr.	Cap. (hm <sup>3</sup> )	Critério - 1	Critério - 2	Critério - 3	Peso 2 no Critério 3
				NPB/CeNP (item 5.2.4.1)	Ble (item 5.2.4.2)	Escore de Risco (Er) (item 5.2.5.2)	
				TAB 5.7 Peso=1	TAB. 5.8 Peso=1	TAB. B.5.1 Peso=2	
1 Orós	Orós	DNOCS	1.940,00	2	5	7	5,3
2 Arneiroz II	Arneiroz	Estado	197,00	5	28	10	13,3
3 Gavião	Itaitinga	Estado	32,90	20	25	4	13,3
4 Pacoti	Itaitinga	Estado	380,00	35	18	2	14,3
5 Banabuiu	Banabuiu	DNOCS	1.601,00	44	2	6	14,5
6 Araras	Varjota	DNOCS	891,00	51	1	3	14,5
7 Riachão	Itaitinga	Estado	46,95	17	15	14	15,0
8 Acarape do Meio	Redenção	Estado	31,50	11	29	15	17,5
9 Olho d'água	Várzea Alegre	Estado	21,20	64	4	1	17,5
10 Carnaubal	Crateús	Estado	87,69	6	34	16	18,0
11 Aracoiaaba	Aracoiaaba	Estado	170,70	38	11	18	21,3
12 Caracas	Canindé	Estado	9,63	40	12	19	22,5
13 Vieirão	Boa Viagem	Estado	20,96	59	8	13	23,3
14 Barra Velha	Independência	Estado	99,50	16	35	22	23,8
15 Valério	Altaneira	Estado	2,02	39	13	25	25,5
16 São José II	Piquet Carneiro	Estado	29,14	22	7	37	25,8
17 Poço da Pedra	Campos Sales	DNOCS	52,00	14	9	44	27,8
18 Faé	Quixelô	Estado	23,40	24	47	20	27,8
19 Sítos Novos	Caucaia	Estado	123,20	54	44	9	29,0
20 Prazeres	Barro	DNOCS	32,50	9	27	41	29,5
21 Capitão Mor	Pedras Brancas	Estado	6,00	47	24	24	29,8
22 Hipólito	Acarape	Estado	6,54	15	36	36	30,8
23 Trapiá II	Pedra Branca	Estado	18,19	53	6	33	31,3
24 Pirabibu	Quixeramobim	Estado	74,00	12	20	49	32,5
25 Cupim	Independência	Estado	4,55	26	46	29	32,5
26 Jaburu II	Crateús	Estado	116,00	58	45	17	34,3
27 São José I	Boa Viagem	Estado	7,67	37	51	28	36,0
28 São Domingos	Caridade	Estado	3,04	34	68	21	36,0
29 Benguê	Aiuaba	Estado	19,56	19	16	55	36,3
30 Tatajuba	Icó	Estado	2,72	29	49	34	36,5
31 Pacajus	Pacajús	Estado	240,00	66	71	5	36,8
32 Catucinzenta	Aquiraz	Estado	27,13	3	19	63	37,0
33 Do Coronel	Antonina do Norte	Estado	1,70	27	38	42	37,3
34 Potiretama	Potiretama	Estado	6,33	32	54	32	37,5
35 Canafístula	Iracema	Estado	13,11	60	30	30	37,5
36 Jaburu I	Tiangúá	Estado	210,00	75	59	8	37,5
37 Muquém	Cariús	Estado	47,64	13	14	64	38,8
38 Serrota	Pentecoste	DNOCS	4,57	49	10	48	38,8
39 Rosário	Lavras da Mangabeira	Estado	47,20	7	31	59	39,0
40 Parambu	Parambu	Estado	8,53	4	21	68	40,3
41 Carmina	Catunda	Estado	13,63	30	39	46	40,3
42 Pau Preto	Potengi	DNOCS	1,77	41	58	31	40,3
43 Malcuzinhado	Cascavel	Estado	37,84	23	23	58	40,5
44 Gangorra	Granja	Estado	62,50	77	65	11	41,0
45 Tigre	Solonópole	Estado	20,00	45	43	39	41,5
46 Ubaldinho	Cedro	Estado	31,80	10	33	62	41,8
47 Castro	Itapiuna	Estado	63,90	72	73	12	42,3
48 Colina	Quiterianópolis	Estado	3,25	50	66	27	42,5
49 Itapebussu	Maranguape	DNOCS	7,64	1	22	75	43,3
50 Itaúna	Chaval	Estado	77,50	31	42	51	43,8
51 Cachoeira	Aurora	Estado	34,33	8	32	70	45,0
52 Sucesso	Tamboril	Estado	10,00	74	61	23	45,3
53 Trapiá I	Caridade	Estado	2,01	33	17	67	46,0
54 Flor Do Campo	Novo Oriente	Estado	111,30	36	40	56	47,0
55 Monsenhor Tabosa	Monsenhor Tabosa	Estado	12,10	25	26	69	47,3
56 Amanary	Maraguape	DNOCS	11,01	42	55	47	47,8
57 Cipoada	Morada Nova	Estado	86,09	73	72	26	49,3
58 Santa Maria	Ererê	Estado	11,20	63	57	40	50,0
59 Poço Verde	Itapipoca	DNOCS	13,65	61	74	35	51,3
60 Angicos	Coreau/Frecheirinha	Estado	56,05	52	56	50	52,0
61 Mundaú	Uruburetama	DNOCS	21,30	68	64	38	52,0
62 Cauhipe	Caucaia	Estado	12,00	18	37	77	52,3
63 Canoas	Canoas	Estado	69,25	67	3	71	53,0
64 Jerimum	Irauçuba	Estado	20,50	43	52	60	53,8
65 Santo Antonio	Iracema	Estado	0,83	21	50	73	54,3
66 Rivaldo de Carvalho	Catarina	Estado	19,52	65	67	43	54,5
67 Madeiro	Pereiro	Estado	2,81	28	48	72	55,0
68 Trapiá III	Coreaú	Estado	5,50	55	41	66	57,0
69 Adatao Bezerra	Pereiro	Estado	5,25	56	69	52	57,3
70 Souza	Canindé	Estado	30,84	57	62	57	58,3
71 Martinópole	Martinópole	DNOCS	23,20	46	60	65	59,0
72 Quandú	Itapipoca	Estado	4,00	69	77	45	59,0
73 Desterro	Caridade	DNOCS	5,01	62	76	54	61,5
74 Arrebita	Forquilha	Estado	19,60	70	70	53	61,5
75 Penedo	Maranguape	Estado	2,40	48	63	76	65,8
76 Realejo	Crateús	DNOCS	31,55	71	53	74	68,0
77 Pompeu Sobrinho	Choró	DNOCS	143,00	76	75	61	68,3
			7.740,90				

### 5.2.7 Eficiência na Aplicação dos Recursos Financeiros na Redução dos Riscos

De acordo com a metodologia proposta no item anterior, pode-se admitir para efeito de análise três classificações de barragens ponderando-se, neste caso, os três critérios com o mesmo peso 1, ou seja:

Classificação 1: Critério 1:  $P_1=1$ ;  $P_2=0$  e  $P_3 = 0$ .

Classificação 2: Critério 2:  $P_1=0$ ;  $P_2=1$  e  $P_3 = 0$ .

Classificação 3: Critério 3:  $P_1=0$ ;  $P_2=0$  e  $P_3 = 1$ .

De forma que utilizando-se a metodologia, pode-se verificar qual das três classificações apresenta melhor eficiência na aplicação dos recursos financeiros para a redução dos riscos, caso não se tenha disponível o total de recursos previstos para a eliminação total dos níveis de perigo das 77 barragens (R\$ 1.081.540,00, Tab 5.4).

Uma forma de avaliar este problema e observar a configuração da Figura 5.13, onde se observa o dispêndio de recursos em relação a redução do nível de perigo (NPB) para os 3 critérios adotados. Observa-se, como era de se esperar, melhor eficiência na aplicação dos recursos financeiros na redução do nível de perigo das barragens (NPB) para na ordem de priorização do Critério - 1 (NPB/CeNP), com a menor eficiência na ordem de priorização do Critério 2 - Escore do Risco ( $E_R$ ). A Tabela 5.13 apresenta para os valores dos três critérios de priorização das barragens o NPB a ser reduzido (remanescente) em função do CeNP acumulado. O total do NPB para as 77 barragens perfaz o valor de 516.

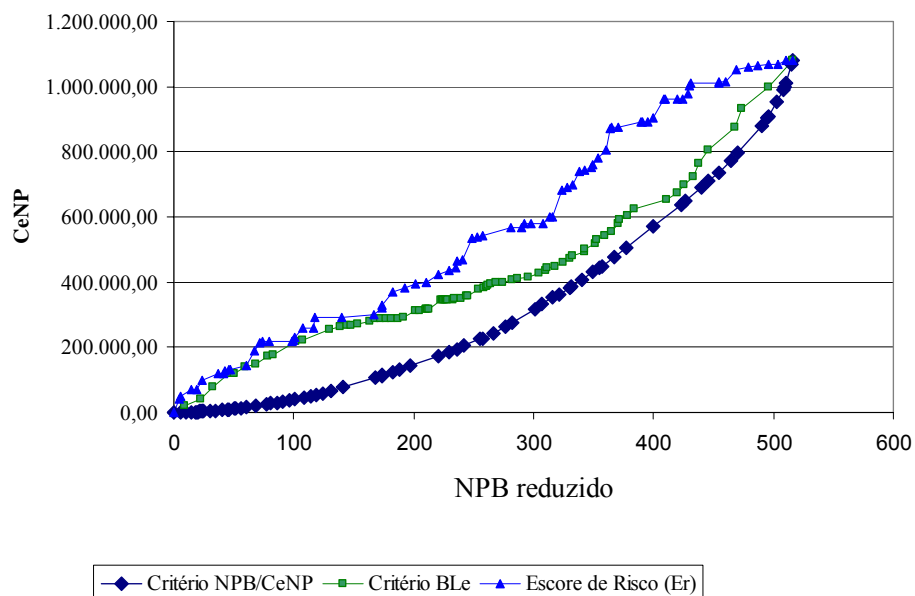


FIGURA 5.13 - Eficiência Financeira: CeNP x NPB reduzido

Exemplificando, na hipótese do proprietário dispor no ano de R\$ 400.000,00, se o interesse for de reduzir o perigo das anomalias, o critério escolhido deverá ser o critério-1, com este valor (Tabela 5.13, Eficiência NPB/CeNP) poderiam ser recuperadas 54 barragens, restando ainda um risco NPB remanescente de 185, equivalente a 35% (185/516). Caso o interesse seja o critério 2 do Benefício Líquido equivalente (BLe), poderiam ser recuperadas 46 barragens (Tabela 5.13, BLe), ficando ainda remanescente o NPB de 247 (48%), e se caso o interesse for em relação ao critério 3, do escore de risco (Tabela 5.13,  $E_R$ ), poderiam ser recuperadas 29 barragens, restando ainda um risco NPB remanescente de 314, equivalente a 61% (314/516).

TABELA 5.13 - NPB remanescente x CeNP.

Eficiência na Redução do Perigo (NPB/CeNP)					Benefício Líquido equivalente (Ble)					Escore de Risco (Er)				
TAB 5.7					TAB. 5.8					TAB. B.5.1				
Barragem	CeNP	Acumulado	NPB	NPB Remanescente	Barragem	CeNP	Acumulado	NPB	NPB Remanescente	Barragem	CeNP	Acumulado	NPB	NPB Remanescente
1 Itapebussu	200,00	200,00	6	510	Araras	20.000,00	20.000,00	9	507	Olho d'Água	43.000,00	43.000,00	14	502
2 Orós	200,00	400,00	4	506	Banabuiú	20.400,00	40.400,00	13	494	Pacoti	5.800,00	48.800,00	5	497
3 Catucinzenta	500,00	900,00	4	502	Canoas	37.500,00	77.900,00	10	484	Araras	20.000,00	68.800,00	9	488
4 Parambu	600,00	1.500,00	4	498	Olho d'Água	43.000,00	120.900,00	14	470	Gavião	2.000,00	70.800,00	4	484
5 Arneiroz II	200,00	1.700,00	1	497	Orós	200,00	121.100,00	4	466	Pacajus	26.900,00	97.700,00	8	476
6 Carnaubal	200,00	1.900,00	1	496	Trapiá II	20.500,00	141.600,00	9	457	Banabuiú	20.400,00	118.100,00	13	463
7 Rosário	200,00	2.100,00	1	495	São José II	5.100,00	146.700,00	9	448	Orós	200,00	118.300,00	4	459
8 Cachoeira	200,00	2.300,00	1	494	Vieirão	27.400,00	174.100,00	10	438	Jaburu I	11.000,00	129.300,00	1	458
9 Prazeres	200,00	2.500,00	1	493	Poço da Pedra	1.400,00	175.500,00	5	433	Sítios Novos	2.300,00	131.600,00	1	457
10 Ubaldinho	200,00	2.700,00	1	492	Serrota	42.000,00	217.500,00	19	414	Arneiroz II	200,00	131.800,00	1	456
11 Acarape do Meio	200,00	2.900,00	1	491	Aracoiaba	6.300,00	223.800,00	5	409	Gangorra	11.800,00	143.600,00	1	455
12 Pirabibu	1.200,00	4.100,00	5	486	Caracas	29.500,00	253.300,00	23	386	Castro	43.700,00	187.300,00	7	448
13 Muquém	1.300,00	5.400,00	5	481	Valério	11.400,00	264.700,00	9	377	Vieirão	27.400,00	214.700,00	10	438
14 Poço da Pedra	1.400,00	6.800,00	5	476	Muquém	1.300,00	266.000,00	5	372	Riachão	1.600,00	216.300,00	4	434
15 Hipólito	1.500,00	8.300,00	5	471	Riachão	1.600,00	267.600,00	4	368	Acarape do Meio	200,00	216.500,00	1	433
16 Barra Velha	400,00	8.700,00	1	470	Benguê	2.400,00	270.000,00	5	363	Carnaubal	200,00	216.700,00	1	432
17 Riachão	1.600,00	10.300,00	4	466	Trapiá I	10.800,00	280.800,00	10	353	Jaburu II	5.300,00	222.000,00	2	430
18 Cauhipe	400,00	10.700,00	1	465	Pacoti	5.800,00	286.600,00	5	348	Aracoiaba	6.300,00	228.300,00	5	425
19 Benguê	2.400,00	13.100,00	5	460	Catucinzenta	500,00	287.100,00	4	344	Caracas	29.500,00	257.800,00	23	402
20 Gavião	2.000,00	15.100,00	4	456	Pirabibu	1.200,00	288.300,00	5	339	Faé	2.900,00	260.700,00	5	397
21 Santo Antônio	4.300,00	19.400,00	8	448	Parambu	600,00	288.900,00	4	335	São Domingos	29.400,00	290.100,00	27	370
22 São José II	5.100,00	24.500,00	9	439	Itapebussu	200,00	289.100,00	6	329	Barra Velha	400,00	290.500,00	1	369
23 Malcozinhado	2.300,00	26.800,00	4	435	Malcozinhado	2.300,00	291.400,00	4	325	Sucesso	9.000,00	299.500,00	1	368
24 Faé	2.900,00	29.700,00	5	430	Capitão Mor	19.800,00	311.200,00	10	315	Capitão Mor	19.800,00	319.300,00	10	358
25 Mons. Tabosa	2.900,00	32.600,00	5	425	Gavião	2.000,00	313.200,00	4	311	Valério	11.400,00	330.700,00	9	349
26 Cupim	3.200,00	35.800,00	5	420	Mons. Tabosa	2.900,00	316.100,00	5	306	Cipoada	38.400,00	369.100,00	5	344
27 Do Coronel	3.300,00	39.100,00	5	415	Prazeres	200,00	316.300,00	1	305	Colina	13.300,00	382.400,00	6	338
28 Madeiro	5.700,00	44.800,00	8	407	Arneiroz II	200,00	316.500,00	1	304	São José I	11.300,00	393.700,00	9	329
29 Tatujuba	4.700,00	49.500,00	5	402	Acarape do Meio	200,00	316.700,00	1	303	Cupim	3.200,00	396.900,00	5	324
30 Carmina	4.800,00	54.300,00	5	397	Canafistula	27.700,00	344.400,00	10	293	Canafistula	27.700,00	424.600,00	10	314
31 Itaiúna	5.000,00	59.300,00	5	392	Rosário	200,00	344.600,00	1	292	Pau Preto	12.000,00	436.600,00	9	305
32 Potiretama	7.000,00	66.300,00	7	385	Cachoeira	200,00	344.800,00	1	291	Potiretama	7.000,00	443.600,00	7	298
33 Trapiá I	10.800,00	77.100,00	10	375	Ubaldinho	200,00	345.000,00	1	290	Trapiá II	20.500,00	464.100,00	9	289
34 São Domingos	29.400,00	106.500,00	27	348	Carnaubal	200,00	345.200,00	1	289	Tatujuba	4.700,00	468.800,00	5	284
35 Pacoti	5.800,00	112.300,00	5	343	Barra Velha	400,00	345.600,00	1	288	Poço Verde	66.200,00	535.000,00	23	261
36 Flor do Campo	1.200,00	113.500,00	1	342	Hipólito	1.500,00	347.100,00	5	283	Hipólito	1.500,00	536.500,00	5	256
37 São José I	11.300,00	124.800,00	9	333	Cauhipe	400,00	347.500,00	1	282	São José II	5.100,00	541.600,00	9	247
38 Aracoiaba	6.300,00	131.100,00	5	328	Do Coronel	3.300,00	350.800,00	5	277	Mundaú	24.000,00	565.600,00	6	241
39 Valério	11.400,00	142.500,00	9	319	Carmina	4.800,00	355.600,00	5	272	Tigre	3.300,00	568.900,00	2	239
40 Caracas	29.500,00	172.000,00	23	296	Flor do Campo	1.200,00	356.800,00	1	271	Santa Maria	9.100,00	578.000,00	3	236
41 Pau Preto	12.000,00	184.000,00	9	287	Trapiá III	21.800,00	378.600,00	9	262	Prazeres	200,00	578.200,00	1	235
42 Amanary	10.800,00	194.800,00	7	280	Itaiúna	5.000,00	383.600,00	5	257	Do Coronel	3.300,00	581.500,00	5	230

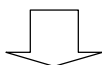


TABELA 5.13 - NPB remanescente x CeNP (Continuação).

Eficiência na Redução do Perigo (NPB/CeNP)					Benefício Líquido equivalente (Ble)					Escore de Risco (Er)					
TAB 5.7					TAB. 5.8					TAB. B.5.1					
Barragem	CeNP	Acumulado	NPB	NPB Remanescente	Barragem	CeNP	Acumulado	NPB	NPB Remanescente	Barragem	CeNP	Acumulado	NPB	NPB Remanescente	
43	Jerimum	9.400,00	204.200,00	6	274	Tigre	3.300,00	386.900,00	2	255	Rivaldo de Carvalho	19.100,00	600.600,00	6	224
44	Banabuiú	20.400,00	224.600,00	13	261	Sítios Novos	2.300,00	389.200,00	1	254	Poço da Pedra	1.400,00	602.000,00	5	219
45	Tigre	3.300,00	227.900,00	2	259	Jaburu II	5.300,00	394.500,00	2	252	Quandú	81.840,00	683.840,00	20	199
46	Martinópolis	16.600,00	244.500,00	9	250	Cupim	3.200,00	397.700,00	5	247	Carmina	4.800,00	688.640,00	5	194
47	Capitão Mor	19.800,00	264.300,00	10	240	Faé	2.900,00	400.600,00	5	242	Amanary	10.800,00	699.440,00	7	187
48	Penedo	12.000,00	276.300,00	6	234	Madeiro	5.700,00	406.300,00	8	234	Serrota	42.000,00	741.440,00	19	168
49	Serrota	42.000,00	318.300,00	19	215	Tatajuba	4.700,00	411.000,00	5	229	Pirabibu	1.200,00	742.640,00	5	163
50	Colina	13.300,00	331.600,00	6	209	Santo Antônio	4.300,00	415.300,00	8	221	Angicos	11.300,00	753.940,00	5	158
51	Araras	20.000,00	351.600,00	9	200	São José I	11.300,00	426.600,00	9	212	Itaúna	5.000,00	758.940,00	5	153
52	Angicos	11.300,00	362.900,00	5	195	Jerimum	9.400,00	436.000,00	6	206	Adauto Bezerra	22.000,00	780.940,00	9	144
53	Trapiá II	20.500,00	383.400,00	9	186	Realejo	6.000,00	442.000,00	1	205	Arrebita	23.200,00	804.140,00	5	139
54	Sítios Novos	2.300,00	385.700,00	1	185	Potiretama	7.000,00	449.000,00	7	198	Desterro	68.000,00	872.140,00	23	116
55	Trapiá III	21.800,00	407.500,00	9	176	Amanary	10.800,00	459.800,00	7	191	Benguê	2.400,00	874.540,00	5	111
56	Adauto Bezerra	22.000,00	429.500,00	9	167	Angicos	11.300,00	471.100,00	5	186	Flor do Campo	1.200,00	875.740,00	1	110
57	Souza	14.700,00	444.200,00	6	161	Santa Maria	9.100,00	480.200,00	3	183	Souza	14.700,00	890.440,00	6	104
58	Jaburu II	5.300,00	449.500,00	2	159	Pau Preto	12.000,00	492.200,00	9	174	Malcozinhado	2.300,00	892.740,00	4	100
59	Vieirão	27.400,00	476.900,00	10	149	Jaburu I	11.000,00	503.200,00	1	173	Rosário	200,00	892.940,00	1	99
60	Canafístula	27.700,00	504.600,00	10	139	Martinópolis	16.600,00	519.800,00	9	164	Jerimum	9.400,00	902.340,00	6	93
61	Poço Verde	66.200,00	570.800,00	23	116	Sucesso	9.000,00	528.800,00	1	163	Pompeu Sobrinho	58.200,00	960.540,00	5	88
62	Desterro	68.000,00	638.800,00	23	93	Souza	14.700,00	543.500,00	6	157	Ubalzinho	200,00	960.740,00	1	87
63	Santa Maria	9.100,00	647.900,00	3	90	Penedo	12.000,00	555.500,00	6	151	Catucinzenta	500,00	961.240,00	4	83
64	Olho d'Água	43.000,00	690.900,00	14	76	Mundaú	24.000,00	579.500,00	6	145	Muquém	1.300,00	962.540,00	5	78
65	Rivaldo de Carvalho	19.100,00	710.000,00	6	70	Gangorra	11.800,00	591.300,00	1	144	Martinópolis	16.600,00	979.140,00	9	69
66	Pacajus	26.900,00	736.900,00	8	62	Colina	13.300,00	604.600,00	6	138	Trapiá III	21.800,00	1.000.940,00	9	60
67	Canoas	37.500,00	774.400,00	10	52	Rivaldo de Carvalho	19.100,00	623.700,00	6	132	Trapiá I	10.800,00	1.011.740,00	10	50
68	Mundaú	24.000,00	798.400,00	6	46	São Domingos	29.400,00	653.100,00	27	105	Parambu	600,00	1.012.340,00	4	46
69	Quandú	81.840,00	880.240,00	20	26	Adauto Bezerra	22.000,00	675.100,00	9	96	Mons. Tabosa	2.900,00	1.015.240,00	5	41
70	Arrebita	23.200,00	903.440,00	5	21	Arrebita	23.200,00	698.300,00	5	91	Cachoeira	200,00	1.015.440,00	1	40
71	Realejo	6.000,00	909.440,00	1	20	Pacajus	26.900,00	725.200,00	8	83	Canoas	37.500,00	1.052.940,00	10	30
72	Castro	43.700,00	953.140,00	7	13	Cipoada	38.400,00	763.600,00	5	78	Madeiro	5.700,00	1.058.640,00	8	22
73	Cipoada	38.400,00	991.540,00	5	8	Castro	43.700,00	807.300,00	7	71	Santo Antônio	4.300,00	1.062.940,00	8	14
74	Sucesso	9.000,00	1.000.540,00	1	7	Poço Verde	66.200,00	873.500,00	23	48	Realejo	6.000,00	1.068.940,00	1	13
75	Jaburu I	11.000,00	1.011.540,00	1	6	Pompeu Sobrinho	58.200,00	931.700,00	5	43	Itapebussu	200,00	1.069.140,00	6	7
76	Pompeu Sobrinho	58.200,00	1.069.740,00	5	1	Desterro	68.000,00	999.700,00	23	20	Penedo	12.000,00	1.081.140,00	6	1
77	Gangorra	11.800,00	1.081.540,00	1	0	Quandú	81.840,00	1.081.540,00	20	0	Cauhipe	400,00	1.081.540,00	1	0
		1.081.540,00		516			1.081.540,00		516			1.081.540,00		516	

### 5.2.8 Eficiência Econômica

Trabalhando-se com as três classificações ponderadas da mesma forma que no item anterior, pode-se aplicar um outro aspecto importante da metodologia, que é o de averiguar a eficiência econômica na aplicação dos recursos financeiros em relação ao custo da eliminação de todas as anomalias com nível de perigo, tendo como base o Benéfico Líquido equivalente acumulado (BLE Acumulado). Verificou-se a variação do BLE em relação ao custo para a eliminação do nível de perigo (CeNP) acumulado, o resultado está ilustrado na Figura 5.14. Os valores do BLE em função do CeNP para os 3 critérios estão apresentados nas Tabelas 5.14 a 5.16.

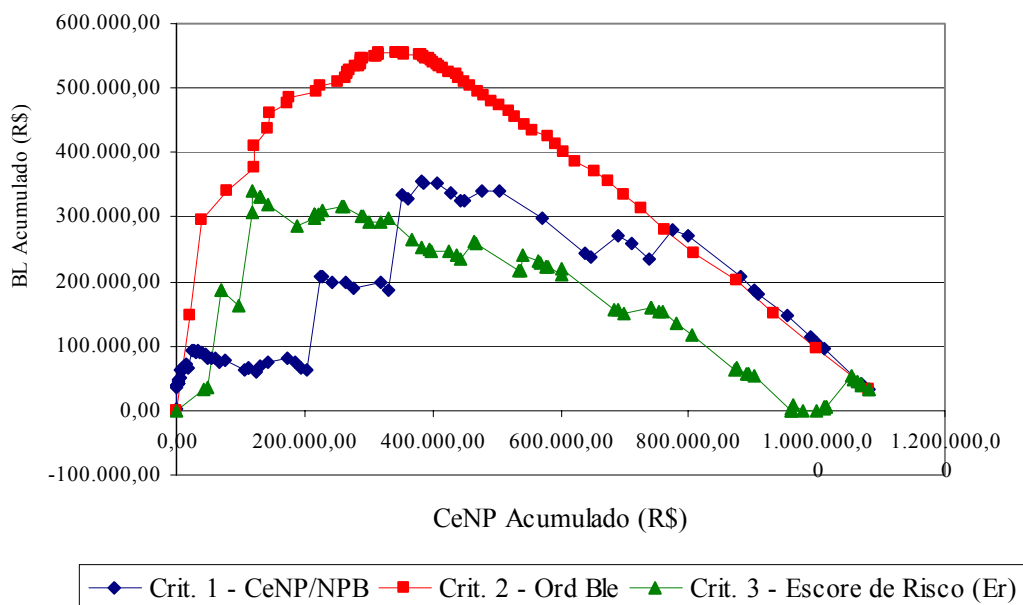


FIGURA 5.14 - Eficiência Econômica: BLE Acumulado x CeNP.Acumulado

Pode-se observar na Figura 5.14 acima uma preponderância de maior eficiência econômica do critério de priorização do benefício líquido equivalente (BLE) em até aproximadamente 80% do valor total do CeNP (R\$ 1.081.540,00), sendo então suplantado pelo critério da eficiência da eliminação do nível de perigo (Critério-1). O Critério-1 apresenta menor eficiência econômica até os R\$200.000,00 iniciais, passando a mais eficiente nos valores de CeNP mais elevados. Tendo-se disponibilidade de recursos financeiros para eliminação de todos os níveis de Perigo, o BLE acumulado é logicamente igual para os 3 critérios, perfazendo ao final um benefício líquido acumulado positivo no valor de R\$ 31.370,73.

Citemos, por exemplo, na hipótese do proprietário dispor no ano de R\$ 400.000,00, se o interesse for de reduzir o perigo das anomalias, o critério escolhido deverá ser o critério-1, com este valor (Tabela 5.14) poderiam ser recuperadas 54 barragens, o benefício econômico (BLE) seria de R\$ 353.978,04. Caso o interesse seja pelo lado econômico o Benefício Líquido equivalente (BLE), com este valor poderiam ser recuperadas 46 barragens (Tabela 5.15), o benefício econômico (BLE) seria de R\$ 540.077,99; e se caso o interesse for em relação ao risco (Tabela 5.16) poderiam ser recuperadas 29 barragens, o benefício econômico (BLE) seria então de R\$ 246.851,64.









## 5.2.9 Análise do Risco Econômico através da Teoria dos Números Difusos (TND)

### 5.2.9.1 Introdução

Para a avaliação do risco econômico para a recuperação de um conjunto de barragens, a metodologia propõe a utilização da Teoria dos Números Difusos (TND) considerando-se dois parâmetros de entrada que apresentam relevantes incertezas (ver Figura 5.1), que são: a Probabilidade de ruptura anual (PRA) e o Custo de recuperação da ruptura da barragem (CRrup).

A probabilidade de ruptura anual (PRA) envolve incertezas referentes ao nível de conhecimento dos tipos de ruptura (galgamento, colapso de fundações ou de ombreiras e erosão interna) que a barragem estará susceptível e a suas respectivas probabilidades. Em função da escassez de informação de dados de rupturas de barragens na região, trabalhou-se anteriormente de forma determinística com a PRA dada em função do valor do nível de perigo NPB correlacionada com dados de probabilidades de ruptura locais e internacionais.

O Custo da recuperação da ruptura (CRrup) envolve incertezas referentes ao custo unitário do aterro a ser recomposto e do tamanho da brecha de ruptura, conforme apresentado, anteriormente, no item 5.2.1.

Para fazer frente a estas incertezas utilizou-se da análise de risco com base no conceito de números difusos ou nebulosos – *fuzzy sets* – conceito inicialmente proposto por Zadeh em 1965 e indicado por KAUFMANN & GUPTA (1985) como generalização da teoria clássica dos conjuntos (GALVÃO & VALENÇA, 1999). Na abordagem clássica, cada elemento tem pertinência,  $\mu$ , que vale 1 ou 0, indicando a pertinência ou não pertinência, respectivamente. No caso do conjunto difuso, vários são os níveis de pertinência para os elementos definidos no intervalo  $\mu \in [0,1]$  e pode ser representado por uma função de pertinência  $\mu$ . O nível de pertinência deve refletir a importância relativa da propriedade.

Formalmente um conjunto difuso,  $\tilde{A}$  é definido como:

$$\tilde{A} = \{(z, \mu_A(z)) / z \in Z\} \quad (5.11)$$

Onde:  $Z$  é o universo onde os elementos de  $z$  estão definidos e  $\mu_A(z)$  é a função de pertinência de  $z$  em  $\tilde{A}$ . As funções de pertinência dos conjuntos difusos podem assumir diversas formas, sendo a trapezoidal, ou um de seus casos particulares (como a triangular), a mais utilizada e será utilizada aqui nesta metodologia.

O risco difuso ( $K$ ) pode ser definido, na lógica difusa, através da expressão:

$$K = \frac{\int_{Z < 0} \mu_z(z) dz}{\int \mu_z(z) dz} \quad (5.12)$$

Onde:  $Z$  é o Benefício Líquido equivalente (BLe).

#### 5.2.9.2 Metodologia de análise pelo risco difuso

A metodologia de análise de risco pelos números difusos aqui desenvolvida apresenta os seguintes passos:

- i) identificação do perigo – o rompimento da barragem;
- ii) definição do tipo de perigo – no caso o nível de perigo da barragem (NPB);
- iii) definição do número difuso para a probabilidade de ruptura anual ( $\tilde{PRA}$ );
- iv) definição do risco aceitável – admitido de  $10^{-6}$  ( $PRA_{ac}$ );
- v) definição do número difuso para o Custo da Recuperação da ruptura da barragem ( $\tilde{CR}_{rup}$ );
- vi) avaliação de risco difuso considerando 2 Critérios de priorização das barragens – o critério da eficiência da aplicação dos recursos na redução do perigo (Critério 1 – NPB/CeNP) e o critério do Benefício Líquido equivalente (Critério 2 – BLe). Para tanto são calculados Benefícios Líquidos equivalentes difusos ( $\tilde{BLe}$ ), conforme a expressão:

$$(\tilde{BLe}) = ((\tilde{PRA}) - PRA_{ac}) \times (\tilde{CR}_{rup}) - CeNP \quad (5.13)$$

para quatro hipóteses de dispêndio de recursos para a eliminação do perigo (CeNP) e avaliados os riscos difusos destas situações hipotéticas.

A Tabela 5.17 apresenta os números difusos para a PRA e o CRrup propostos. Os valores indicados nos diversos níveis de pertinência do PRA Difuso indicado na Tabela se refere ao multiplicador da probabilidade anual de ruptura (PRA) calculada conforme o item 5.1.2. De forma análoga é apresentado o multiplicador para o  $\tilde{C}Rrup$  difuso.

TABELA 5.17 - Números Difusos de PRA e CRrup.

Nível de Pertinência $\mu(z)$	PRA Difuso		CRrup Difuso	
	Ponto	$z$ (PRA) (*)	Ponto	$z$ (CRrup) (*)
0	Ao	0,1	Co	1
0,25	A1	0,325	C1	1
0,50	A2	0,55	C2	1
0,75	A3	0,775	C3	1
1,00	A4	1	C4	1
0,75	B3	3,25	D3	1,125
0,50	B2	5,5	D2	1,25
0,25	B1	7,75	D1	1,375
0	Bo	10	Do	1,5

(\*) multiplicadores

A Figura 5.14, a seguir, apresenta a representação dos números difusos triangulares do PRA e do CRrup com os valores considerados nas respectivas pertinências.

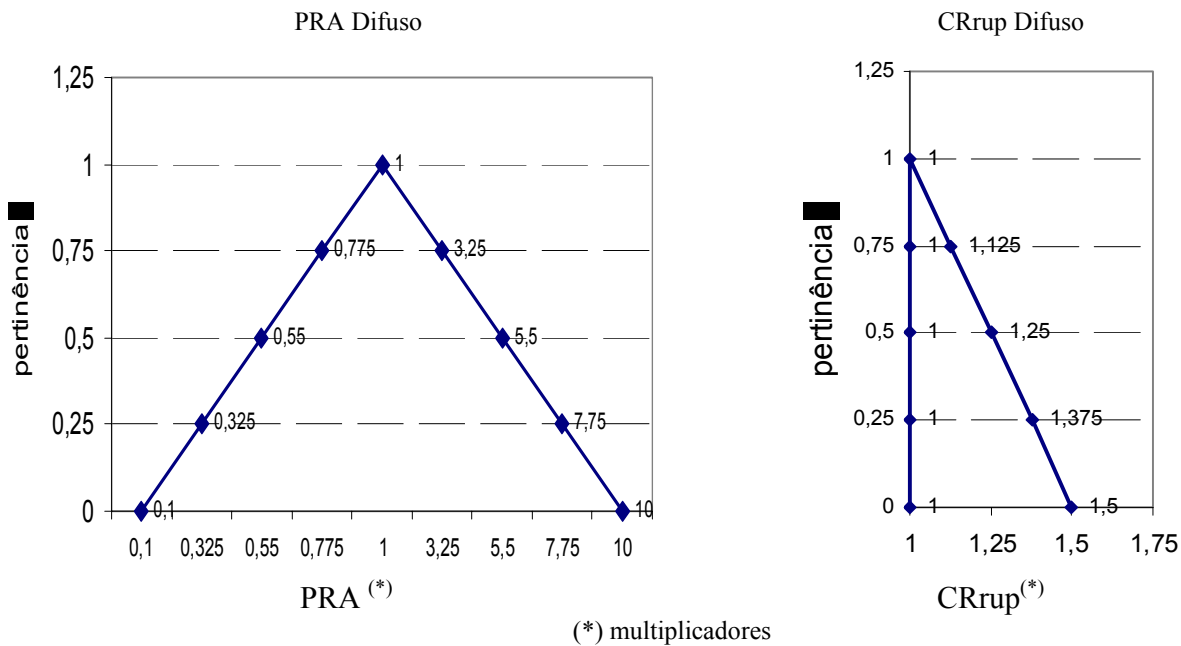


FIGURA 5.15 - Números Difusos do PRA e do CRrup

### 5.2.9.3 Resultados

#### a) Avaliação do risco Difuso pelo Critério-1:

Buscou-se com a utilização da Teoria dos números difusos conhecer os riscos econômicos, com a utilização dos benefícios líquidos econômicos (BLE), referentes a diversas alternativas de aplicação de recursos financeiros para a eliminação do perigo (CeNP).

Para tanto, utilizou-se a marcha de cálculo conforme a Tabela C.1 no APÊNDICE C. Nesta Tabela são apresentados os resultados dos BLE Difusos (acumulados) das 77 barragens prioritizadas pelo Critério – 1, dos quais foram selecionados os BLE Difusos acumulados referentes aos CeNP (acumulados) para os valores parciais de R\$ 194.800; R\$ 365.700,00; R\$570.800,00 e o valor total de R\$ 1.081.540,00.

A Tabela 5.18 apresenta os valores dos números difusos do BLE acumulados nas suas respectivas pertinências, para 4 opções de CeNP (disponibilidade financeira). Os valores dos riscos difusos para as 4 opções também são apresentados. A Figura 5.16 apresenta as representações dos números difusos dos BLE para as 4 opções, a partir dos quais foram obtidos os riscos difusos. O risco difuso (K), conforme apresentado anteriormente, foi obtido pela

relação entre as áreas  $S(z<0)$  e  $S$  (área total), cujos valores estão indicados, também, na Tabela 5.19, ou seja:

$$K = \frac{\text{Area}_{-S_{z<0}}}{\text{Area}_{-Total(S)}} \quad (5.14)$$

Observa-se que o risco difuso  $K$  do benefício líquido econômico, quando a priorização das barragens é pelo critério da eficiência da diminuição do risco (critério 1), varia de 0,89% a 3,83%.



TABELA 5.18 - Riscos Difusos do BLe para o Critério 1.

Benefícios Líquidos (BLe)						
Z		Pertinência	CeNP Acumulado (R\$)			
			194.800,00	385.700,00	570.800,00	1.081.000,00
$\mu z$ A0	0,1	-	-168.576,21	-311.731,81	-483.802,54	-970.248,34
$\mu z$ A1	0,325	0,25	-109.572,68	-145.303,37	-288.058,25	-719.842,11
$\mu z$ A2	0,55	0,50	-50.569,16	21.125,06	-92.313,96	-469.435,89
$\mu z$ A3	0,775	0,75	8.434,37	187.553,49	103.430,33	-219.029,66
$\mu z$ A4	1	1,00	67.437,89	353.981,93	299.174,62	31.376,57
$\mu z$ B3	3,25	0,75	870.541,45	2.619.257,83	2.963.471,90	3.439.683,57
$\mu z$ B2	5,5	0,50	1.968.662,63	5.716.675,91	6.606.490,64	8.100.021,72
$\mu z$ B1	7,75	0,25	3.361.801,45	9.646.236,16	11.228.230,82	14.012.391,01
$\mu z$ B0	10	-	5.049.957,89	14.407.938,57	16.828.692,45	21.176.791,44
		<b>Ble=</b>	<b>1.917.307,71</b>	<b>4.816.729,56</b>	<b>5.548.021,51</b>	<b>6.745.973,22</b>
		<b>y=</b>	<b>0,71</b>	<b>0,47</b>	<b>0,62</b>	<b>0,97</b>
		<b>S(Z&lt;0)=</b>	<b>60.203,90</b>	<b>72.986,87</b>	<b>149.471,09</b>	<b>469.927,33</b>
		<b>S=</b>	<b>2.901.241,51</b>	<b>8.203.864,02</b>	<b>9.634.304,38</b>	<b>12.280.783,01</b>
		<b>Risco Difuso (K) = [S(Z&lt;0)/S]=</b>	<b>2,08%</b>	<b>0,89%</b>	<b>1,55%</b>	<b>3,83%</b>

y=pertinência para Z=0

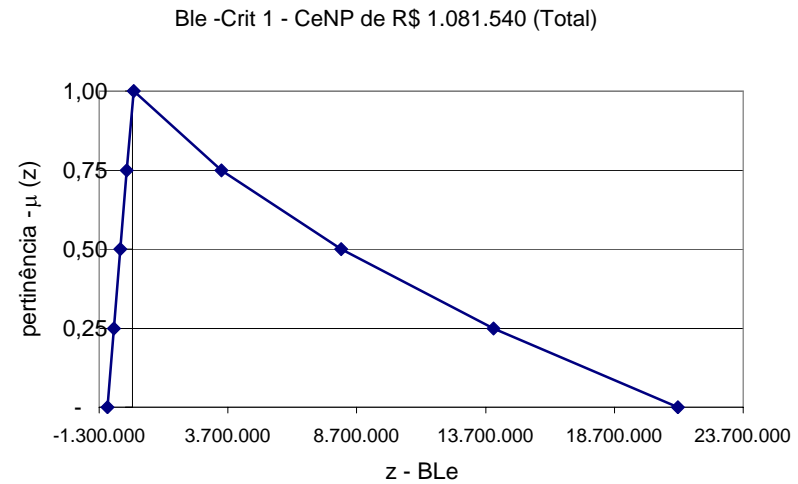
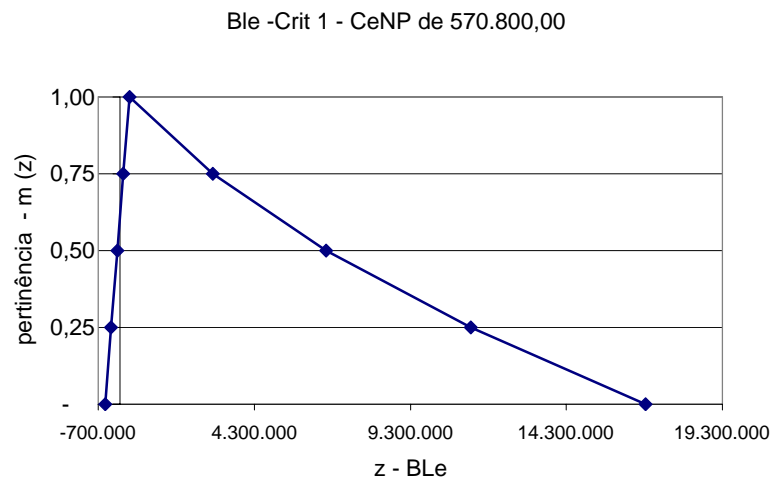
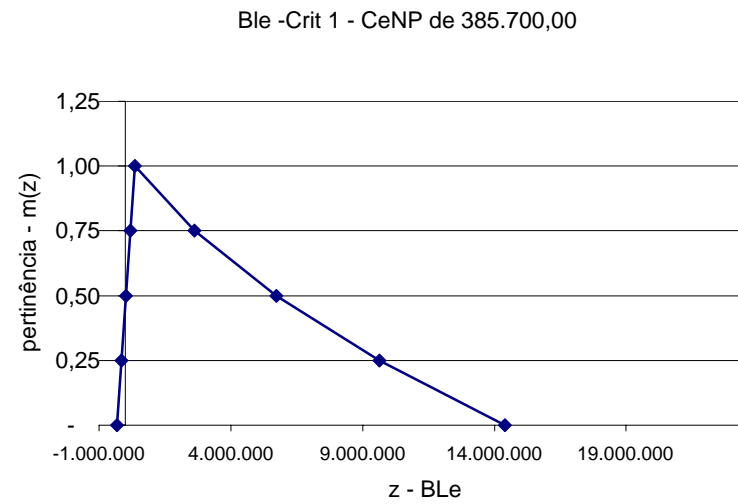
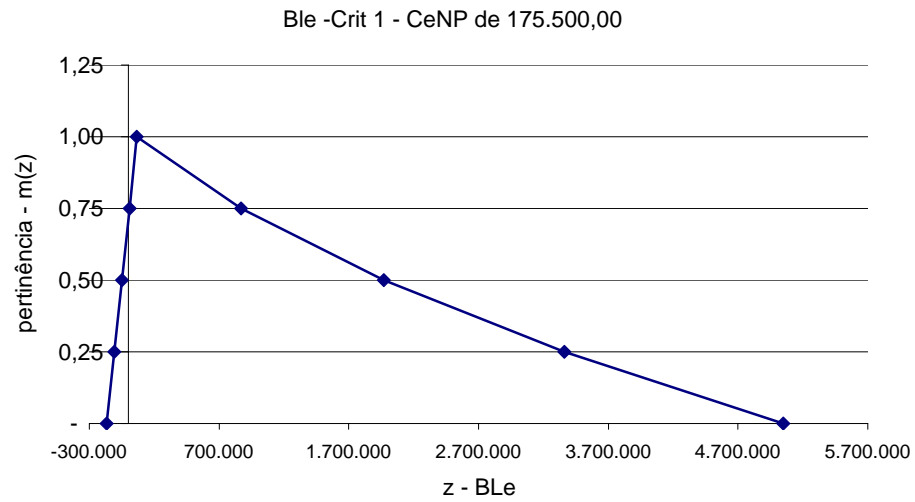


FIGURA 5.16 - Números Difusos do BLe para as 4 opções de CeNP – Critério 1

a) Avaliação do risco Difuso pelo Critério-2:

Para se fazer a análise do risco difuso, utilizou-se a marcha de cálculo conforme a Tabela C.2 no APÊNDICE C. Nesta Tabela são apresentados os resultados dos BLe difusos (acumulados) das 77 barragens priorizadas pelo Critério – 2, dos quais foram selecionados os BLe Difusos acumulados referentes aos CeNP (acumulados) para aos valores parciais de R\$ 194.800; R\$ 365.700,00; R\$ 570.800,00 e ao valor total R\$ 1.081.540,00.

A Tabela 5.19 apresenta os valores dos números difusos do BLe acumulados nas suas respectivas pertinências, para 4 opções de CeNP (disponibilidade financeira). Os valores dos riscos difusos para as 4 opções também são apresentados. A Figura 5.17 apresenta as representações dos números difusos dos BLe para as 4 opções, a partir dos quais foram obtidos os riscos difusos (K). O risco difuso (K), conforme apresentado anteriormente, foi obtido pela relação entre as áreas  $S(z<0)$  e  $S$  (área total), cujos valores estão indicados, também, na Tabela 5.20, ou seja:

$$K = \frac{\text{Area}_{-S_{z<0}}}{\text{Area}_{\text{Total}}(S)} \quad (5.15)$$

Observa-se que o risco difuso K do benefício líquido econômico, quando a priorização das barragens é pelo Critério 2, é crescente com a disponibilidade financeira e varia de 0,14% a 3,83%.

TABELA 5.19 - Riscos Difusos do BLe para o Critério 2.

Benefícios Líquidos (BLe)						
Z		Pertinência	CeNP Acumulado (R\$)			
			175.500,00	367.700,00	591.300,00	1.081.000,00
<b>μz A0</b>	0,1	-	-109.359,46	-303.661,04	-490.924,30	-970.248,34
μz A1	0,325	0,25	39.456,75	39.456,75	-265.078,99	-719.842,11
μz A2	0,55	0,50	188.272,97	119.514,28	-39.233,68	-469.435,89
μz A3	0,775	0,75	337.089,18	331.101,94	186.611,64	-219.029,66
<b>μz A4</b>	1	1,00	485.905,00	542.689,60	412.456,95	31.376,57
μz B3	3,25	0,75	2.511.459,41	3.422.632,76	3.486.462,62	3.439.683,57
μz B2	5,5	0,50	5.281.094,50	7.360.514,21	7.689.694,86	8.100.021,72
μz B1	7,75	0,25	8.794.810,66	12.356.333,97	13.022.153,67	14.012.391,01
<b>μz B0</b>	10	-	13.052.607,89	18.410.092,03	19.483.839,05	21.176.791,44
		<b>Ble=</b>	<b>4.476.384,47</b>	<b>6.216.373,53</b>	<b>6.468.457,23</b>	<b>6.745.973,22</b>
		<b>y=</b>	0,18	0,36	0,54	0,97
		<b>S(Z&lt;0)=</b>	10.045,53	54.475,07	133.391,45	469.927,33
		<b>S=</b>	7.356.866,38	10.408.626,46	11.124.251,00	12.280.783,01
		<b>Risco Difuso (K) = [S(Z&lt;0)/S]=</b>	<b>0,14%</b>	<b>0,52%</b>	<b>1,20%</b>	<b>3,83%</b>

y=pertinência para Z=0

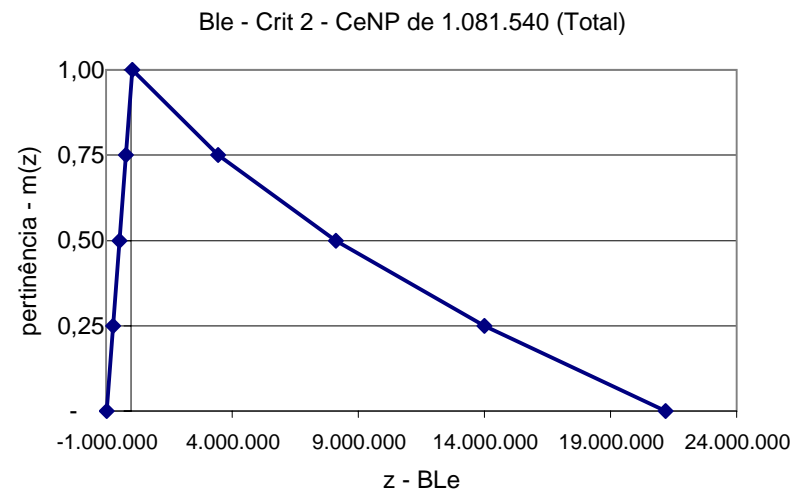
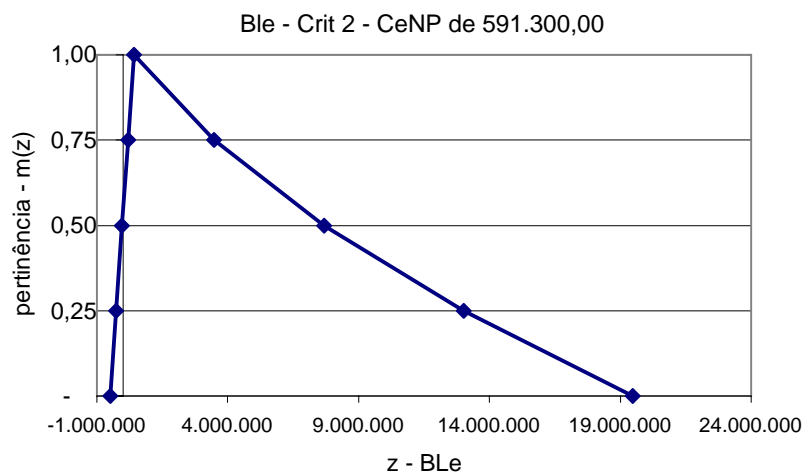
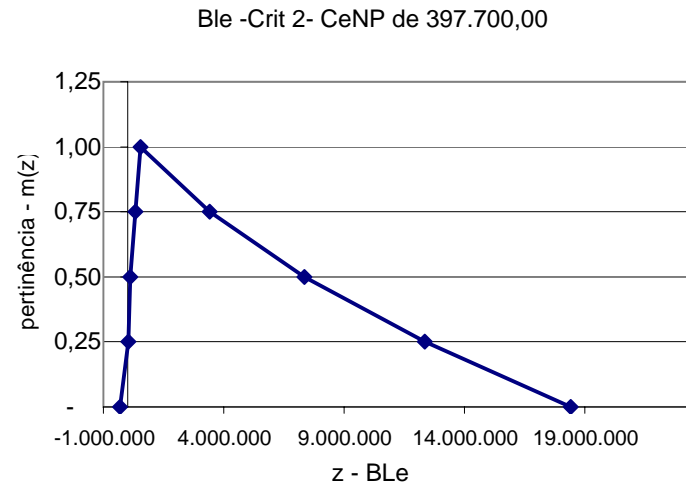
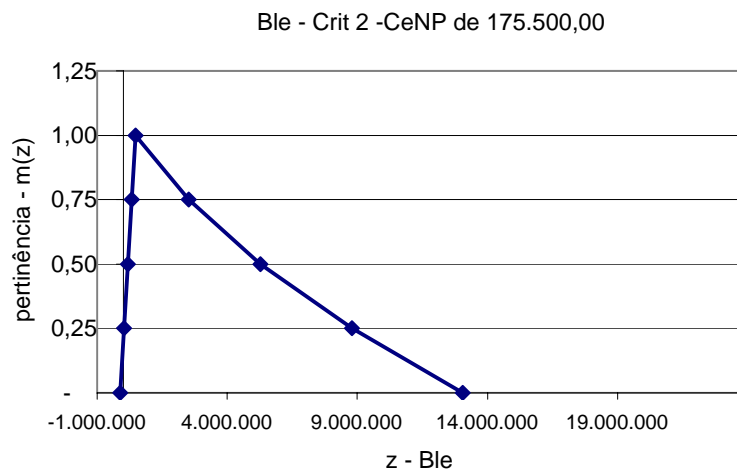


FIGURA 5. 17 - Números Difusos do BLE para as 4 opções de CeNP – Critério 2

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As 77 barragens objeto desta proposta metodológica foram classificadas por nove critérios (PRA, CRrup, CeNP, custo da recuperação da anomalia por magnitude, Severidade, NPB/CeNP, BLe, Iv e Escore de Risco) cujo resultado está apresentado na Tabela 5.10. Destes, foram selecionados três critérios (NPB/CeNP, BLe e Escore de Risco) para reclassificação conforme a ponderação a ser adotada de acordo com o discutido e apresentado no item 5.2.6.

Em relação aos três critérios considerados observamos o seguinte:

No critério 1 (item 5.2.4.1) - da eficiência da aplicação de recursos para a redução dos riscos - observou-se para as 10 melhores classificadas a presença de barragens de menor porte até grandes reservatórios, com reservatórios de capacidade variando de 7,64 hm<sup>3</sup> (Itapebussu) na primeira colocação, até a barragem de Orós, segunda colocada, com 1.940 hm<sup>3</sup>. As outras duas barragens de grande porte do DNOCS, ocuparam posição intermediária (Banabuiu, posição 44 e Araras na posição 51). Barragens de certa importância como Pacajus (na posição 66) que atende a RMF e Jabubu I (posição 75), que atende a mais de 200.000 pessoas, estão entre as últimas posicionadas, o que mostra a necessidade de uma ponderação com outros critérios, como por exemplo o critério - 3. Este critério de priorização apresenta pequena eficiência econômica em relação ao benefício líquido equivalente, quando se aplicam poucos recursos na recuperação, no entanto, se os recursos a serem disponibilizados forem elevados, passa a se tornar bastante atraente economicamente, conforme Figura 5.18.

O critério 2 (item 5.2.4.2), Tabela 5.8, do critério econômico do Benefício Líquido equivalente (BLe), dado pela severidade descontada do custo de eliminação do perigo, apresentou nas 10 primeiras colocações 3 grandes barragens Araras (1), Banabuiu (2) e Orós (5). As 7 restantes são de porte médio a com predominância de porte baixo. Ressalte-se os BLe das barragens Araras e Banabuiu com valores muito próximos e com o dobro da terceira colocada (Canoas). Dentre as 77, 40 barragens apresentaram BLe positivo e outras 37 (quase 50%) apresentaram benefício líquido negativos. Esta porcentagem poderia ser até maior caso houvesse sido realizada inspeção nas tubulações de tomada d'água, que acarretaria em aumento do custo da eliminação do perigo (CeNP), e por consequência uma redução do BLe. Dentre as últimas 10 barragens classificadas destaca-se na última posição a barragem Quandú, que apresentou o maior custo de eliminação do perigo. Destacam-se também entre estas 10 a presença de barragens

médias: Pacajus (71), muito importante para o abastecimento da RMF, este devido a baixa severidade, em função da pequena probabilidade de ruptura e do custo de recuperação da ruptura em função da baixa altura da barragem (15m) e Pompeu Sobrinho (75) com elevado CeNP.

O critério 3 (item 5.2.5.2.) referente ao Escore de Risco ( $E_R$ ), se enquadra no tipo de análise qualitativa do risco, considera tanto o perigo (P+V, representado pela periculosidade e vulnerabilidade) com as conseqüências, indicadas no parâmetro D. Apresentou as 7 maiores barragens em capacidade dentro das 10 maiores barragens classificadas em relação ao risco, a exceção coube às barragens Sítios Novos na 11<sup>a</sup> posição; Olho d'água, por seu risco elevado, e Gavião, pela sua importância; foram excluídas Aracoiaba (18), Pompeu sobrinho (61) e Jaburu II (17). Com relação às 10 últimas classificadas quanto ao risco as 10 barragens menores em capacidade de armazenamento formam uma minoria, são elas: Madeiro (72), Penedo (76) e Santo Antonio (73) indicando que estas barragens, em geral, apresentam maiores riscos.

Com relação aos dois critérios de priorização apresentados: o primeiro, considerando a média das classificações; e o segundo, considerando peso 2 para o critério 3 (Escore de Risco) e peso 1 para os outros dois critérios, cabem os seguintes comentários:

Na priorização pela média dos três critérios (Tabela 5.11), englobando igualmente os critérios selecionados, onde se consideram em iguais prioridades os riscos (critério 1), não importando a dimensão da barragem e seus impactos; o benefício econômico líquido (critério 2) considerando o lado econômico, como também o critério que considera o perigo e as conseqüências (danos), critério 3, sem considerar os custos de recuperação, observou-se entre as 10 primeiras priorizadas a presença de barragens de menor porte, mas importantes, tais como (Riachão, Gavião e Acarape do Meio, que fazem parte importante do sistema de abastecimento da região metropolitana de Fortaleza - RMF) ao lado da barragem Pacoti, de porte médio, também pertencente ao sistema da RMF. Também fazem parte deste grupo as três barragens maiores no Estado do Ceará de propriedade do DNOCS (foi excluída a barragem do Castanhão, por se tratar de uma barragem preponderantemente de concreto compactado a rolo (CCR) e, pelo fato, de ainda não se dispor de um manual de preenchimento do nível de perigo das anomalias de concreto como forma de critério de padronização, o que poderia causar problemas na interpretação no preenchimento dos níveis de perigo das anomalias detectadas nas inspeções): Orós, Banabuiú e Araras. Constam também neste grupo as barragens de porte médio de Arneiroz

II e Carnaubal e a “pequena” barragem de São José II (Piquet Carneiro), que apresentou boa colocação em função do BLe. Em relação às 10 barragens últimas classificadas, pela priorização pela média, preponderaram barragens de pequeno porte, à exceção da barragem de Pompeu Sobrinho.

Na priorização considerando peso 2 para o critério 3 (Escore de Risco), Tabela 5.12, entre as 10 primeiras colocadas, mantiveram as duas primeiras posições as barragens de Orós e Arneiroz II, a barragem Gavião ganhou uma posição passando para a 3<sup>a</sup>. posição, Banabuiu manteve-se na 5<sup>a</sup>. posição, Araras ganhou uma posição . pelo seu porte, Riachão passou de 3<sup>a</sup>. para a 7<sup>a</sup>. posição , também pelo seu porte, Acarape do Meio perdeu 2 posições, de 6<sup>a</sup>. para a 8<sup>a</sup>. posição, enquanto Olho d’água passou da 13<sup>a</sup>. para 9<sup>a</sup>. posição, em função da sua 1<sup>a</sup>. posição no escore de risco, Carnaubal passou de 9<sup>a</sup>. para a 10<sup>a</sup>. posição, enquanto São José II passou da 10<sup>a</sup> para a 16<sup>a</sup>. posição. Em relação aos 10 últimas classificadas, Realejo e Pompeu Sobrinho mantiveram as 2 últimas posições. Penedo perdeu 3 posições e Trapiá III entrou no grupo passando da 64<sup>a</sup>. para 68<sup>a</sup>. posição.

Pode-se visualizar também pela metodologia, quais as barragens - a escolher o critério de priorização – a serem recuperadas a partir de uma determinada quantia anual disponível pelo proprietário.

A metodologia permite também elaborar uma análise econômica tendo como base o benefício líquido acumulado (BLe) em função do valor a ser investido na eliminação do perigo (CeNP). Os resultados mostraram que se atinge o BLe máximo de R\$ 555.125,31 para um CeNP de R\$ 345.200,00 (Tabela 5.15). A partir deste valor há uma perda econômica até atingir-se o valor de R\$ 31.370,73.

Verificou-se em função das incertezas presentes no modelo, referentes a probabilidade de ruptura anual (PRA) e ao custo da recuperação da barragem pela ruptura (CRrup) que elas poderiam ser tratadas através da Teoria do Número Difuso (TND) de forma a avaliar o risco de se ter o benefício líquido econômico negativo (BLe <0). Isto foi feito para os critérios 1 e 2, que consideram custos na sua aplicação. Os resultados mostraram que o benefício econômico, no caso de eliminar-se os perigos de todas os 77 barragens, poderia variar entre R\$ 970.448,31 negativos a R\$ 21.176.791,44 positivos, caso se pretenda investir no valor próximo de R\$ 600.000,00, estes valores seriam: para o critério de priorização de barragens pelo Critério



1: de R\$ 483.802,54 negativos a R\$ 16.828.292,45 positivos, com valor médio de R\$ 5.548.021,51; pelo critério de priorização pelo Critério 2: de R\$ 490.924,30 negativos a R\$ 19.483.839,05 positivos, com valor médio de R\$ 6.468.457,23.

Utilizando-se o valor total do CeNP, o risco difuso é de 3,83 % do benefício dar negativo (para ambos os critérios). No caso de utilização parcial do recurso previsto, os riscos são menores para o critério 2 (BLE), neste critério o risco é crescente com o valor a ser dispendido (Tabela C.2). O mesmo não se visualiza no critério 1, quando se tem um risco mínimo intermediário (Tabela C.1).

Observa-se que o risco difuso K do benefício líquido econômico, quando a priorização das barragens é pelo critério do benefício líquido (Critério - 2), é crescente com a disponibilidade financeira para a eliminação no nível de perigo, variando de 0,14% a 3,83%.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

Em face das restrições orçamentárias dos órgãos operadores e mantenedores de barragens, foi apresentada uma metodologia de priorização de barragens do nordeste do Brasil, para fins de recuperação, com estudo de caso em 77 barragens no estado do Ceará.

A metodologia, além de ser pioneira, proporciona uma comparação dos diversos aspectos ligados a segurança, considerando probabilidade, custos, nível de perigo, severidade, benefícios e riscos econômicos, e tem sua versatilidade na sua facilidade de aplicação mesmo em barragens com pouca informação de projeto, o que é comum na região.

O nível de perigo da Barragem (NPB) foi determinado ponderando-se, por pesos, os quatro níveis de perigo (NP) das anomalias e suas quantidades. A estimativa da probabilidade de ruptura anual (PRA) foi feita a partir do NPB, tendo como referência os dados estatísticos mundiais e a correlação com o NPB da barragem. As barragens foram classificadas, preponderantemente, como de probabilidade de ruptura ao nível de aceitável pela sociedade.

Em relação ao critério de avaliação da eficiência na redução do nível de perigo da barragem em relação ao custo (critério 1), observou-se em relação às melhores classificadas, a presença de barragens de menor porte até grandes reservatórios, já entre as últimas barragens posicionadas apareceram barragens de certa importância, o que mostra a necessidade de uma ponderação com outros critérios.

Quanto ao critério econômico do Benefício Líquido equivalente (BLe), dado pela severidade descontada do custo de eliminação do perigo (critério 2) obteve-se nas dez primeiras colocações três barragens de grande porte, sendo as restantes com predominância de barragens de baixo porte. Houve um equilíbrio entre o número de barragens com o BLe positivo e as que apresentaram BLe negativo.

No que se refere à classificação quanto ao Escore de Risco ( $E_R$ ), critério 3, que se enquadra no tipo de análise qualitativa do risco e considera tanto o perigo (representado pela periculosidade e vulnerabilidade) com as conseqüências, relacionadas aos danos a jusante (econômicos, ambientais e de perdas de vidas), obteve-se a presença das sete maiores barragens em capacidade de acumulação dentro das dez maiores barragens classificadas em relação ao risco. Em relação às dez últimas classificadas quanto ao risco, as dez barragens menores em

capacidade formam uma minoria, indicando que estas barragens, em geral, apresentam maiores riscos. O escore de risco desenvolvido nesta tese tem como das suas versatilidades a de possibilitar ao tomador de decisão considerar um fator multiplicativo  $k$  proporcional ao grau de conhecimento dos danos estimados.

Para fins de priorização das barragens, a metodologia desenvolvida nesta tese coloca à disposição dos tomadores de decisão, conforme o grau de interesse, a ponderação dos três critérios desenvolvidos (eficiência na redução do perigo, benefício líquido equivalente e escore de risco).

Na priorização pela média das classificações dos três critérios, observou-se entre as dez primeiras priorizadas a presença de barragens de menor porte, mas importantes, ao lado da barragem de porte médio, também fazendo parte deste grupo as três barragens maiores no estado do Ceará. Constam também neste grupo duas barragens de porte médio e uma “pequena” barragem. Em relação às 10 barragens últimas classificadas, pela priorização pela média, preponderaram barragens de pequeno porte, à exceção de uma barragem.

Na priorização considerando peso 2 para o critério 3, em relação às dez primeiras colocadas, mantiveram as barragens das duas primeiras posições em relação à ponderação da média, sendo que uma barragem passou da 13<sup>a</sup>. para 9<sup>a</sup>. posição, em função da sua 1<sup>a</sup>. posição no escore de risco. No que tange às dez últimas classificadas, duas mantiveram-se nas últimas posições e uma entrou no grupo.

A metodologia permite, a partir do critério de priorização escolhido pelo proprietário, definir, com base na eficiência financeira determinar, a partir de uma determinada quantia anual disponível pelo proprietário, qual a melhor alternativa de critério para redução do nível de perigo.

Possibilita, também, elaborar uma análise econômica tendo como base o benefício líquido equivalente (BLE). Avaliando a sua variação de acordo com o valor a ser investido na eliminação da anomalia com perigo, pode-se, por este critério econômico, adotar como critério de decisão o valor máximo do BLE e a partir deste ponto determinar as barragens a serem recuperadas e o valor a ser investido.

Considerando-se as duas principais incertezas do modelo: a probabilidade de ruptura anual (PRA) e o custo da recuperação da barragem pela ruptura (CRrup), desenvolveu-se uma metodologia com a utilização da teoria dos números difusos para avaliar o risco de se ter o benefício líquido econômico negativo (BLe <0). A partir de uma determinada disponibilidade financeira por parte do proprietário, pode-se avaliar qual o intervalo de variação do benefício líquido equivalente e qual o risco do mesmo ser negativo. Pode-se também determinar a variação do risco em relação ao valor a ser investido. A aplicação desta metodologia nas 77 barragens do Estado do Ceará apresentou em relação ao investimento uma variação crescente do BLe (critério 2) e uma variação apresentando um valor mínimo intermediário (critério 1). Obteve-se o risco econômico de 3,83% para o caso de recuperar-se todas as 77 barragens estudadas.

A metodologia propicia, portanto, estimar e avaliar a redução dos riscos e o benefício econômico do capital a ser aplicado nas recuperações de barragens. Diminuindo-se as incertezas e ampliando-se o leque de avaliação das conseqüências, a metodologia constituirá em poderosa ferramenta a ser disponibilizada pelos engenheiros para a sociedade e aos proprietários na busca da eficiência da segurança de suas barragens.

## 7.2 Recomendações

Estudos posteriores deverão ser efetuados para a redução da incerteza em relação à probabilidade de ruptura anual considerando os diversos modos de ruptura (galgamento por cheias, instabilidade de taludes, ruptura interna (por *piping*) e sismos) e pela aplicação, por exemplo, do processo de árvores de eventos.

Estabelecendo-se um índice para a importância da barragem, pode-se determinar um índice de prioridade de recuperação para cada local da barragem e, dessa forma, priorizar os serviços por local em todo o conjunto das barragens.

A metodologia pode ser aperfeiçoada com a melhoria dos projetos de barragens para que nestes se inclua, sistematicamente, a quantificação dos custos de recuperação da ruptura hipotética da barragem e a quantificação dos danos econômicos, sociais e ambientais. Esta quantificação pode ser feita a partir da utilização de programas de computadores de referência tais como os do USACE, compreendendo o HEC-HMS (simulação hidrológica) e o HEC-RAS (simulação da ruptura, por estudos de *dam break*, e simulação hidráulica a jusante). Pode-se

utilizar também o apoio do geo-referenciamento através dos programas HEC-GeoRAS e HEC-Geo-HMS e da modelagem digital do terreno (com o uso do programa ArcGIS®) para a determinação de mapas de inundação a jusante em cruzamento com as informações necessárias (*layers*) tais como existência de cidades, estradas, etc.

A metodologia pode ser melhor aplicada para barragens de gravidade (concreto ou alvenaria de pedra) no caso de elaborar-se um manual de preenchimento de nível de perigo para as anomalias específicas para este tipo de barragem.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE/USCOLD. **Lessons from Dam Incidents, USA.** New York. 1975.

ANCOLD. **Guidelines on Risk Assesment.** Australian National Committee on Large Dams Inc., Oct., 2003.

ANDERSEN, G. R. & TORREY III, V. H. **Function-Based Condition Indexing for Embankment Dams.** *Journal of Geotechnical Engineering*, p. 579-588. Aug., 1995.

ANDERSEN, G.; CHOUINARD, L.; FOLTZ, S. **USACE. REMR Management Systems – Flood Control Structures: Condition Rating Procedures for Earth and Rockfill Embankment Dams.** *USACE Construction Engineering Research Laboratory. Technical Report REMR-OM-25*, Sept. 1999. 106 p.

ARAÚJO, M. Z. T. **Barragens no Nordeste do Brasil: experiência do DNOCS em barragens na região Semi-Árida.** 3.ed.atual. Fortaleza: DNOCS, 2003.330p.

ASCE/USCOLD. **Lessons from dam incidents,** USA. New York. 1975/1988.

BOWLES, D.S.. **Risk Assessment in Dam Safety Decision Making,** *Proceedings. Of the 4<sup>th</sup> Conference/EF/WR Div./ ASCE*, California/October 15-20, 1989.

BOWLES, D.S.; ANDERSON L.R.; GLOVER T.F. **A Role for Risk Assesment in Dam Safety Management.** *Proceedings of the 3th. Intl. Conference HYDROPOWER 97*, Trondheim, Norway, June, 1997.

BOWLES, D.S.; L.R. ANDERSON; T.F. GLOVE. **The Practice of Dam Safety Risk Assessment and Management. Its Roots, Its Branches, and its Fruit.** *Proceedings of USCOLD 1998 Meeting and Lecture*, Buffalo, New York. August, 1998a.

BOWLES, D.S.; PARSONS A. M.; ANDERSON L. R.; GLOVER T. F. **Portfolio Risk Assesment os Water's Large Dams.** *Proceedings of the 1998 Australian Committee on Large Dams (ANCOLD) Annual Meeting Sydney*, Australia. September, 1998b.

BOWLES, D.S., ANDERSON L.R.; GLOVER T.F.; CHAUHAN, S.S. **Portfolio Risk Assessment: A Tool for Dam Safety Risk Management.** In *Proceedings of USCOLD 1998 Annual Lecture*, Buffalo, New York, August, 1998c.

BOWLES, D.S., ANDERSON L.R.; GLOVER T.F.; CHAUHAN, S.S. **Understanding and Managing the Risks of Aging Dams; Principles and Case Studies.** 19<sup>th</sup>. *USCOLD Annual and Lecture Atlanta*, Georgia, May 16-21, 1999.

BOWLES, D.S.; ANDERSON, L. R.; GLOVER, T. F.; CHAUHAN, S. **Dam Safety Decision-Making: Combining Engineering Assessments with Risk Information.** In *Proceedings of the 2003 US Society on Dams Annual Lecture*, Charleston, South Carolina, April, 2003.

BRASIL. Ministério da integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens.** Brasília. 2002. 148p.

BRASIL. Ministério da integração Nacional. **Manual de Preenchimento da Ficha de Inspeção de Barragem.** Brasília. 2005. 119p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Secretaria de Infra-estrutura Hídrica. Relatório Técnico – Construção da Barragem Arneiroz II - Ocorrências durante o período chuvoso.** Brasília. 2004.

BUREAU OF RECLAMATION. **Dam Safety Risk Analysis Methodology.** Technical Service Center, Denver –CO, USA. May. 2003.

BUREAU OF RECLAMATION. **Risk Based Profiling System.** Technical Service Center, Denver –CO, USA. 2001.

CARVALHO, M.S.B.S. Correspondência eletrônica (e-mail). Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente/FUNCEME. 2007.

CEDEC (Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Ceará). **Relatório de Rupturas de Barragens no Estado do Ceará.** 2004.

CNPGB (Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens). **Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens - 1º Relatório de Progresso.** Lisboa. Portugal. Jan. 2005.

COGERH. **Manual de Preenchimento de Nível de Perigo das Anomalias de Barragens de Terra**. Relatório Interno. Fortaleza-CE. 2005.

COGERH. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Riscos e Inspeções 2006**. Fortaleza-CE. Abr. 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI C. E. **Análise de Risco de Rompimento de Barragens**. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória – ES, Novembro. 1997.

CSOPT (Conselho Superior de Obras Públicas e Transportes). **Normas de Projecto de Barragens**. Portaria n.º 846/93 de 1 de Setembro, dos Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, da Agricultura, da Indústria e Energia, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, e do Ambiente e Recursos Naturais. Lisboa. 1993a.

CSOPT. **Normas de Observação e Inspeção de Barragens**. Portaria n.º 847/93 de 10 de Setembro, dos Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, da Agricultura, da Indústria e Energia, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, e do Ambiente e Recursos Naturais. Lisboa. 1993b.

CSOPT. **Regulamento de Segurança de Barragens**. Decreto Lei n.º 11/90, de 6 de Janeiro, Lisboa. 1990.

CSOPT. **Regulamento de Pequenas Barragens**. Decreto Lei n.º 409/93, de 14 de Dezembro, Lisboa. 1993.

CYGANIEWICZ, J. M.; SMART, J. D. **U.S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making**. ICOLD, 20<sup>th</sup> Congress, Beijing, China. 2000.

DENIS, H. **Comprendre et Gérer les Risques Sociotechnologiques Majeurs**. *Éditions de l'École Polytechnique de Montreal*. Montreal. 1998.

DUCKSTEIN L.; BOGARDI, I. **Reliability with Fuzzy Elements in Water Quantity and Quality Problems**. *Water Resources Engineering Risk Assessment. NATO ASI Series. Series G: Ecological Sciences*, 1996.



FELL, R.; BOWLES, D.S.; ANDRESON, L.R.;BELL, G. **The Status of Methods for Estimating of the Probability of Dams for Use in Quantitative Risk Assessment.** Q76-R. ICOLD, 20<sup>th</sup> Congress, Beijing, China. 2000.

FONTENELLE, A. S. ; SOUZA, V. A. D.; OLIVEIRA, Y. C.; SALES, C. A. T. **Estabilização e Melhoria da Segurança de Vertedouros de Barragens do Estado do Ceará (Pacajús e Rosário).** XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens – Belém. 2007.

FONTENELLE, A. S.; CAVALCANTE S.; SALES, C. A. T.; VIEIRA, V.P.P.B. **Priorização de Ações de Segurança em Barragens do Estado do Ceará através de Inspeções e Matriz de Risco.** XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens – Belém. 2007.

FONTENELLE, A. S.; CAVALCANTE S.; SALES, C. A. T.; VIEIRA, V.P.P.B. **Monitoramento de Segurança de Barragens por Instrumentação no Estado do Ceará.** Comitê Brasileiro de Barragens. III Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens. São Paulo – SP, Set. 2006a.

FONTENELLE, A. S. **Gestão de Segurança do Ceará.** Boletim Informativo do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), Rio de Janeiro, Ano 12, Nº 3, p.14, Nov. 2006b.

FONTENELLE A.S.; OLIVEIRA, Y.C.; VIEIRA, V.P.P.B; MIRANDA A. N. **Ações de Segurança de Barragens no Estado do Ceará com Ênfase em Inspeções e Risco.** XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa –PB. 2005.

FONTENELLE A.S.; OLIVEIRA, Y.C.; VIEIRA, V.P.P.B. **Riscos e Ações de Segurança de Barragens no Estado do Ceará.** VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luis-Ma. 2004.

FONTENELLE, A.S.; VIEIRA, V.P.P.B. **Análise de Risco Aplicada à Estabilidade de Talude de Barragem de Terra no Estado do Ceará.** XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – CE.2001.

FOSTER M.A FELL R.; SPANNAGLE M. **Analysis of Embankment Dam Incidents.** *UNICIV Report No. R-374, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.* ISBN: 85841 349 3.1998.

FOSTER M.A. **The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping.** *PhD Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia.*1999.

FOSTER M.A. FELL R.; SPANNAGLE M. **The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents.** *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5):pp.1000-1024. 2000a.

FOSTER M.A. FELL R.; SPANNAGLE M. **A Method for Assessing the Relative Likelihood of Failure of Embankment Dams by Piping.** *Canadian Geotechnical Journal.*, Vol 37, p.1025-1061. 2000b.

FRANCOU, J.; RODIER, J. A. A. **Essai de Classification des Crues Maximales.** *Floods and their Computation. Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Hydrol, Vol. IV, n<sup>o</sup>3,1967.*

FUNNEMARK, E.; ODGARARD, E.; EHHJE, S.A. **Risk Analysis of the Valldalen Dam.** *Twentieth Congress on Large Dams, Beijing, China.* 2000.

FUSARO, T.C. **Um Programa de Segurança de Barragens no Setor Elétrico Privatizado,** XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais Volume II, pág45-56, Belo Horizonte - MG. 1999.

GALVÃO C.O.; VALENÇA, M.J.S. **Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais.** Porto Alegre: Editora da Universidade. UFRGS. 1999

GRAHAM, W. J. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused By Dam Failure.** 1998.

HARR, M. E. **Reliability - Base Design in Civil Engineering. Shaw Lecture Series in Civil Engineering.** North cCarolina State University: Raleigh. 1987. 290p.

HARRALD J. R.; RENDA-TANALI I.; SHAW G.L.; RUBIN C.B.; YELETAYSI S. **Review of Risk Based Prioritization/Decision Making Methodologies for Dams**. USACE, The George Washington University. 2004.

HOWLEY, I; McGRATH S.; STEWART, D. **A Business Risk Approach to Prioritizing Dam Safety Upgrading Decisions**. XX Congress on Large Dams. Beijing. China. 2000. p.261-277.

ICOLD (International Commission on Large Dams), - **Lessons from dam incidents**. Paris. 1974.81.

ICOLD. **Finite element methods in analysis and design of dams**. Bulletin 30a, Paris. 1978, 1982, 1987.

ICOLD. **Deterioration of dams and reservoirs**. Committee on Deterioration of Dams and Reservoirs. Paris. 1984.

ICOLD. **World Register of Dams**. Paris. 1984/88.

ICOLD. **Dam Safety. Guidelines**. Bulletin 59. Paris. 1987.

ICOLD. **Dam Design Criteria. Philosophy of choice**. Bulletin 61. Paris. 1988.

ICOLD. **Understanding the need for Dams and their Safety**. Committee on Dam Safety, Paris.1988a.

ICOLD. **Monitoring of dams and their foundations**. State-of-the-Art. Bulletin 68. Paris. 1989.

ICOLD. **The High Aswan dam. A vital achievement, fully controlled**. ICOLD Symposium, Cairo. 1993.

ICOLD. **Ageing of Dams and Appurtenant Works**. Bulletin 93. Paris. 1994

ICOLD. **Dam Failures, Statistical Analysis**. Bulletin 99, Paris. 1995.

ICOLD. **Dams Less than Thirty Metres High**. Bulletin 109. Paris. 1997

ICOLD. **Risk Assessment in Dam Safety Management**”, Bulletin 130. 2005.

INAG (INSTITUTO DA ÁGUA). **Curso de Exploração e Segurança de Barragens**. A.A. Balkema Publishers, Lisboa, 2001. 710p.

JANSEN, R.B. **Dams and Public Safety. A Water Resources Technical Publication**. U.S. Bureau of Reclamation. Engineering and Research Center. Denver, Colorado, USA. 1983.

KANJI, M.A . **Parecer Técnico sobre as Causas da Ruptura da Barragem Camará**. [www.prpb.mpf.gov.br/docs/Camara/r1](http://www.prpb.mpf.gov.br/docs/Camara/r1). Ministério Público da Paraíba. João Pessoa. Nov. 2004.

KAUFMANN, A.; GUPTA, M.M. **Introduction of Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications**. New York :Van Nostrand Reinhold, 1985. 351 p.

KREUZER, H. **General Report**. Twentieth Congress on Large Dams, Vol 1, Question 76, Beijing, China. 2000.

KUPERMAN, S.C.; RE G.; FERREIRA,W.; TUNG, W.S.; VASCONCELOS, S.E.; ZUNIGA, J.E.V. **Análise de Risco e Metodologia de Tomada de Decisões para Barragens: Evolução do Sistema Empregado pela SABESP**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – Ce. 2001.

LAFITTE. R. **Probabilistic risk analysis of Large Dams: its value and Limits**. Water Power& Dam Construction. Mar.1983.

MARTINS, E.S.P.R.; MENESCAL, R.A; SCHERER-WARREN. M.; CARVALHO, M. S. B. S.; MELO, M.S.; PERINI, D.S.; OLIVEIRA, F.A J. **Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 969-976. Abr. 2007.

MATALUCCI, R.V. **Risk Assessment Methodology for Dams (RAM-D)** in the Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM6), 23-28 June 2002, San Juan, Puerto Rico, USA, Vol.1, 2002.pp.169-176.

McCANN Jr., M. W.; CASTRO, G. **A Framework for Applying and Conducting Risk-Based Analysis for Dams**. USCOLD Annual Meeting, Buffalo,NY. 1998.

McCANN Jr., M. W.; ROBERTSON, M.J. **Estimating Loss of Life Due to Dam Failures: Pitfalls, Fallacies and Recommendations.** 1999.

McCLELLAND, D. M; BOWLES D. S. **Life-Loss Estimation: What Can We Learn From Cases Histories.** *Procc. of the Australian Committee on Large Dams (ANCOLD) Annual Meeting*, Australia, November. 1999.

MEDEIROS, C. H. de A. C . **How Risky can be a Risk Assessment Technique on Safety Dams Evaluation - A Critical Review.** *In: 73rd Annual Meeting, ICOLD*, Teerã, 2005.

MEDEIROS, C. H. de A. C. **Como Garantir a Segurança de Barragens sob os cuidados de Organizações Comunitárias, Técnica e Economicamente Deficitárias?** . in: XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - SNGB, 2001, Fortaleza, 2001.

MEDEIROS, C. H. de A. C. **Utilização Da Técnica De Análise De Probabilidade De Risco Na Avaliação De Segurança De Barragens.** In: XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, 1999, Belo Horizonte, 1999.

MEGHELLA, M.;EUSEBIO, M. **A risk assessment tool to effectively support decision makers to prioritize maintenance, repair and upgrading of dams.** *Dam Maintenance and Rehabilitation, Lianos tl al. (eds) Swetesa &Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 534 7*, Madrid, 2003.

MENESCAL, R. A; MIRANDA, A. N.; PITOMBEIRA, E.S.; PERINI, D.S. **Prevenção de acidentes envolvendo barragens: Projeto de diagnóstico da segurança de barragens no Brasil** . In Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB. 2005.

MENESCAL, R.A., [damsafetygroup@yahoo.com.br](mailto:damsafetygroup@yahoo.com.br). 2007.

MENESCAL, R.A.; CARVALHO, V.R.S.; OLIVEIRA, Y.C. **Manual Básico de Operação e Manutenção de Equipamentos Hidromecânicos de Açudes.** COGERH, Fortaleza-CE. 1996.

MENESCAL, R.A.; CRUZ, P.T.; CARVALHO, R.V.; FONTENELLE, A.S. & OLIVEIRA, S.K.F. **Uma Metodologia para Avaliação do Potencial de Risco em Barragens do Semi-Arido.** XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – Ce. 2001a..

MENESCAL, R.A.; FONTENELLE, A.S.; OLIVEIRA, S.K.F.; VIEIRA, V.P.P.B. **Acidentes e Incidentes de Barragens no Estado do Ceará**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – CE. 2001b.

MENESCAL, R.A.; OLIVEIRA, S.K.F.; VIEIRA, V.P.P.B. **Proposta de Terminologia de Riscos**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – CE. 2001d.

NOGUEIRA DE SOUSA, L.; PINTO, N. L. S. **Segurança ao Galgamento de Barragens do Nordeste Brasileiro**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Anais, Fortaleza – CE. 2001.

OBONI, F. **Geo-Environmental Risk: Assessment, Analysis, Management and Planning**. Simpósio Brasileiro de Geotecnia Ambiental. 1999.

OOSTHUIZEN, C.; HATTINGH L.C. **Risk-Based Rehabilitation of Dams. Dam Maintenance e Rehabilitation**. A. A. Balkema Publishers, Netherlands, 2003.

OPYRCHAL L.; HRABOWSKI, W.; JANKOWSKI, W. **The Hazard of the Polish Hydro-technical Structures**. XX Congress on Large Dams. Beijing. China. 2000. p17-28.

OTWAY, H.J.; ERDMANN R.C. **Reactor Siting and Design from a risk Viewpoint, Nuclear Engineering and Design**, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands; no. 13, 1970.

PEDRO, J.O. **Segurança Estrutural, Hidráulico-Operacional e Ambiental das Barragens**. 1º. Congresso Sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português – ABES, Rio de Janeiro, Março, 2000.

SALES, C. A. T.; FONTENELLE, A. S.; CAVALCANTE, S. P. P. ; SOUZA, V. A. D. **Monitoramento de Segurança de Barragens por Instrumentação no Estado do Ceará**. Anais do III Simpósio sobre Instrumentação de Barragens, Comitê Brasileiro de Barragens, São Paulo, Set, 2006. p 497-523.

SALMON, G.M.; HARTFORD, D.N.D. **Risk Analysis for Dam Safety**. International Water Power & Dam Construction, March, 1995. p. 42 – 47.

SANCHES R. **Acerca da segurança das pequenas barragens**. Revista Electricidade, Energia, Electrónica, n.º 188. Junho, 1983.

SANTOS, C.A.G. ; LIRA, B. B.; Barbosa, N. P.; MENDONÇA, Â. V.: **Rompimento da Barragem de Camará. Relatório técnico; Esclarecer acidente da Barragem Barra do Câmará**. Ministérios Públicos Federal e Estadual, João Pessoa-PB. 2004.

SILVEIRA, J.F. **Análise de Risco Aplicada a Segurança de barragens**. Revista do Comitê Brasileiro de Barragens. Edição Especial. p.1-42. Nov. 1999.

SILVEIRA, J.F.; CARNEIRO, E. F.; PÍNFARE J. C. **O Grande Potencial Apresentado pela Análise de Risco de Usinas Hidrelétricas – A Experiência da CESP**. XXVII Seminário Nacional De Grandes Barragens. Belém – Pa, 2007.

SOUZA, V. A. D.; CARVALHO, J.H.Q.S.; ARARUNA JÚNIOR, J.T.; LUCENA, A. M. **Aspectos Geotécnicos Associados à Ocorrência de Erosão Regressiva a Jusante do Vertedouro da Barragem Itaúna**. In: COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002, São Paulo. Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo: ABMS, 2002.

SMITH, M. **Influence of Uncertainty in the Stability Analysis of a Dam Foundation**. Proceedings of the International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams, Madrid. Spain, Nov. 2002.

SRH-CE. **Minuta de Norma da Elaboração de Projetos das Barragens do PROURB**. Fortaleza-Ce. 1996.

TATALOVICH J.; HARRIS, D. W. **Comparision of Failure Modes From Risk Assessment and Historical Data for Bureau of Reclamation Dams**, DSO-98-1, Denver. 1998.

USCOLD (U.S. Committee on Large Dams). **Dam safety practices and concerns in the United States**. Denver. 1982.

USFEMA (US Federal Emergency Management Agency). **National dam safety program. 1994 & 1995 progress report**. Washington. 1996.

VIEIRA, P.P. B.; MIRANDA, A. N. **Avaliação Probabilística da Estabilidade de Taludes de uma Barragem de Terra**, Seminário Regional de Engenharia Civil, Recife, Tema 3. 1990.

VIEIRA; V.P.P.B. **Análise de Riscos em Recursos Hídricos – Fundamentos e Aplicações**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Porto Alegre–RS. Nov. 2005.

VON THUN J. L. **Application of Statistical Data from Dam Failures and Accidents to Risk-Based Decision analysis on Existing Dams**. *Bureau of Reclamation, Denver*. 1985.

VON THUN J. L. **Use of Risk-Based Analysis in Making Decisions on Dam Safety**. *Nato Advanced Study Institute on Engineering and Risk, Tucson, Arizona*. 1985a.

VON THUN J. L. **Risk Assessment for Dam Safety – A Frame work for Understanding**. *USCOLD Annual Meeting, Buffalo, New York*. 1998.

VON THUN J. L., 1999. **Use of Risk Based Analysis in Making Decisions Dam Safety**. *Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA*. 1999.

VOSE, D., 2000: **Risk Analysis: A Quantitative Guide**. England, West Sussex, John Wiley & Sons. 2000. 418p.

WUNDERLICH, W. O. **Hdraulic Structures – Probabilistic Approaches to Maintenance**. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, Virginia, USA. 2005. 646p.



## GLOSSÁRIO

**ACIDENTE:** Anomalia grave cujo desenvolvimento pode ocasionar a ruptura da obra.

**AÇÕES ESTRUTURAIS:** Ações de modo a permitir o controle das suas condições de segurança e operacionalidade, consistindo de obras de recuperação e reforço.

**AÇÕES NÃO ESTRUTURAIS:** Ações de modo a permitir o controle das suas condições de segurança e operacionalidade consistindo de inspeções, monitoramento por instrumentação, avaliação de risco, capacitação, etc.

**AÇUDE:** Obra que contempla as estruturas de maciço com suas estruturas associadas e o reservatório de acumulação.

**ALTURA MÁXIMA:** Distância vertical do ponto de cota mais baixa do pé da barragem ao coroamento.

**ANA:** Agência Nacional de Águas.

**ANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM:** Análise que possibilita uma estimativa dos efeitos da onda de cheia resultantes da ruptura da barragem.

**ANÁLISE DE RISCOS:** A utilização da informação disponível para estimar o risco.

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE:** Análise para determinar o grau de variação de um dado resultado em função da variação unitária de um ou mais dados de entrada.

**ANÁLISE QUALITATIVA DO RISCO:** Uma análise que usa forma escrita, descritiva ou escalas de ordenação numérica para descrever a grandeza de conseqüências potenciais e a verossimilhança da ocorrência dessas conseqüências.

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO RISCO:** Uma análise, baseada em valores numéricos, das conseqüências potenciais e da verossimilhança, pretendendo-se que tais valores sejam uma representação válida da grandeza real das conseqüências e da probabilidade dos vários cenários que são examinados.

**APRECIÇÃO DO RISCO EM PORTFÓLIO:** Forma particular de apreciação ou de análise do risco, na qual é efetuada uma estimativa dos riscos associados a todas ou a algumas das obras de um único dono, ou sujeitas à jurisdição de uma só entidade reguladora.

**ÁRVORE DE EVENTOS (ou ÁRVORE DE FALHA):** Tem por função simular os meios prováveis de ruptura, representam cada etapa do processo de ruptura, através de uma seqüência de “braços”, com uma probabilidade associada a cada evento.

**AVALIAÇÃO DO RISCO:** Avaliação das possíveis ações relacionadas a uma certa estrutura na luz de todos os fatores de decisão (e.g. custos, tempo, aspectos ambientais, operação, pessoas)

**BARRAGEM DE ATERRO:** Barragem construída de material natural escavado, tais como solo e enrocamento.

**BARRAGEM DE GRAVIDADE:** Barragem construída de alvenaria (pedra ou tijolo) ou concreto (ciclópico, compactado a rolo) que mantém a sua estabilidade com o próprio peso.

**BARRAGEM DE REJEITOS:** Barragem de aterro, usualmente construída em estágios, para armazenar resíduos do processo industrial. Os resíduos são convertidos em material de suspensão e armazenados pelo aterro. O aterro é constituído de material convencional, mas pode também incorporar os rejeitos.

**BARRAGEM:** (1) Obra em que o eixo principal do maciço está num plano que intercepta a seção transversal de um curso d'água e respectivos terrenos marginais, alterando as suas condições de escoamento natural, objetivando a formação de um reservatório a montante, tendo como principal finalidade a regularização das vazões, liberadas à jusante, por meio de estruturas controladoras de descargas. (2) Estrutura construída transversalmente a um rio. (3) Qualquer obstrução em um curso permanente ou temporário de água, ou talvegue, para fins de retenção ou

acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo a estrutura do barramento, suas estruturas associadas e o reservatório formado pela acumulação. Diques para proteção contra enchentes e aterros-barragem de estradas também se incluem nessa definição.

**BENEFÍCIO LÍQUIDO ECONÔMICO:** É a diferença entre a severidade e o custo de eliminação da anomalia com nível de perigo igual ou superior a 1.

**BORDA LIVRE:** Distância vertical entre a maior cota da superfície da água junto à barragem e a cota mais baixa do topo de uma barragem ou outra estrutura de contenção.

**CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO:** Capacidade bruta total do reservatório em seu nível máximo de armazenamento.

**CARREAMENTO:** Transporte de material fino ou granular por fluxo pelo aterro ou fundação.

**CHEIA ANUAL:** (1) Descarga máxima instantânea observada num ano hidrológico; (2) Cheia que foi igualada ou excedida, em média, uma vez por ano.

**CHEIA MÁXIMA PREVISTA:** A cheia mais forte que se prevê, considerando todos os fatores geográficos, meteorológicos, hidrológicos e geológicos pertinentes.

**CHEIA MÁXIMA PROVÁVEL (CMP):** Estimativa hipotética da cheia (fluxo de pico, volume e forma da hidrografia) que é considerada como a condição mais severa “fisicamente possível de ocorrer” numa determinada localidade e época do ano, com base em uma análise hidrometeorológica relativamente pormenorizada de uma precipitação crítica que resulte em escoamento, e de fatores hidrológicos favoráveis a um escoamento máximo da cheia.

**CIGB:** Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, International Commission on Large Dams).

**COMPACTAÇÃO MECÂNICA:** Ação que aumenta a densidade com uma redução dos vazios do material, com certa umidade ótima.

**CONFIABILIDADE:** Probabilidade de desempenho satisfatório de um dado elemento do empreendimento.

**CONSEQÜÊNCIA DE RUPTURA:** Impactos a montante e a jusante da barragem, resultantes da sua ruptura ou das estruturas associadas. Uma escala de conseqüências adversas que poderiam ser causadas pela ruptura de uma barragem, pode ser utilizada para classificação.

**CONSEQÜÊNCIAS INCREMENTAIS DA RUPTURA:** Perdas incrementais ou danos que a ruptura da barragem pode infligir às áreas a montante, a jusante ou à estrutura da ocorrência para o mesmo evento natural, ou condição, caso a barragem não tivesse rompido.

**CONSEQÜÊNCIAS:** (1) No que se refere às análises de riscos, resultados de um risco se concretizar. Constituem os impactos resultantes da ruptura de uma barragem previsto de pessoas mortas e feridas, a extensão dos prejuízos materiais e os custos de desorganização da atividade econômica em conseqüência do cenário de ruptura. (2) perdas de vidas ou danos a propriedades a jusante da barragem causada por uma liberação incontrolada devido a ruptura parcial ou completa da barragem. Também provoca deslizamentos de terra no contorno do reservatório

**COROAMENTO OU CRISTA DA BARRAGEM:** Cota da superfície superior da barragem, não se levando em conta qualquer abaulamento, meio-fio, parapeitos, defensas ou outras estruturas que não sejam parte da estrutura principal do barramento de água.

**CUSTO POR CADA VIDA ESTATISTICAMENTE SALVA:** Custo associado a um incremento da redução do risco para a segurança das vidas. Não se trata pois de atribuir um custo à vida humana, nem de uma compensação por uma perda de vida acidental, paga por um seguro ou por um processo legal.

**DANOS FÍSICOS:** Danos à estrutura e às propriedades a jusante.

**EFICIÊNCIA:** No contexto do uso dos recursos da sociedade, é a base de um critério que procura a obtenção do maior benefício a partir dos recursos disponíveis.

**ENVELHECIMENTO:** Processo de deterioração dos materiais constituintes da estrutura por ação de cargas aplicadas ou naturais. Segundo o ICOLD, este tipo de deterioração ocorre somente após 5 anos do início da operação. A deterioração ocorrida antes deste período é atribuída a inadequação de projeto, construção ou operação.

**ESTRUTURAS ASSOCIADAS:** Estruturas e equipamentos locais, que não façam parte da barragem propriamente dita. Incluem estruturas tais como torres de tomada d'água, túneis, canais, condutos forçados, descargas de fundo, bacias de amortecimento, poços, galerias, mecanismos de acionamento de comportas, etc.

**EVENTO EXTREMO:** (1) Evento que tem uma probabilidade de excedência anual (AEP) muito pequena; (2) Um evento que possui uma probabilidade de excepcionalidade anual muito pequena.

**EXTENSÃO DO COROAMENTO:** Medida do comprimento ao longo do crista ou coroamento ou topo da barragem.

**FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE:** Uma função que descreve a verossimilhança relativa de uma variável aleatória assumir um dado valor em contraste com a assunção de outros valores.

**FUNDAÇÃO:** Maciço de rocha e/ou solo que forma a base de assentamento para uma barragem, dique e suas estruturas associadas.

**GALGAMENTO:** Transbordamento devido à insuficiência hidráulica do vertedouro ou cheia não prevista no período de construção.

**GERENCIAMENTO DE RISCO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS:** É um processo amplo que considera como dados de entrada os resultados da análise de risco e da avaliação do risco.

**GESTÃO DO RISCO:** Aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, análise, apreciação, avaliação, mitigação e controle do risco.

**INCERTEZA:** Qualquer grandeza ou situação sem certeza, seja ou não descrita por uma distribuição de probabilidades.

**INCIDENTE:** (1) Evento físico indesejável que prejudica a funcionalidade e/ou a inteireza da obra, podendo vir a gerar eventuais acidentes, se não for corrigido a tempo. (2) Anomalias que embora comprometam a funcionalidade da obra não levam a sua ruptura.

**INSPEÇÃO:** Inspeção da barragem, diques e estruturas associadas, e suas fundações com a finalidade de se observar as suas condições e desempenho.

**INSTRUMENTAÇÃO:** Um arranjo de dispositivos instalados no corpo ou próximo da barragem para obtenção de medidas que podem ser usadas para avaliar o comportamento estrutural e desempenho da barragem.

**LIQUEFAÇÃO:** Fenômeno de perda de resistência em areias fofas devido a uma solicitação rápida, sismos ou terremotos, por exemplo.

**MANUTENÇÃO:** (1) Atividade que implica conservar aparelhos, máquinas, equipamentos e instalações em bom estado de conservação e operação. (2) Ação que previne ou retarda danos ou deterioração, ou corrige deficiências que poderiam de certa forma, levar a reparos incipientes ou a necessidade de recuperação.

**MECANISMO DE RUPTURA:** Mecanismo descrito pelos processos e estados físicos que devem ocorrer de acordo com as leis da natureza que regem a progressão do modo de ruptura, desde a causa iniciadora até à realização do efeito último da ruptura em análise.

**MITIGAÇÃO** - Medidas tomadas antes de uma catástrofe visando reduzir ou eliminar o seu impacto na sociedade e no ambiente.

**MITIGAÇÃO DE CHEIAS POR MEIOS NÃO ESTRUTURAIS** - Sistema para a redução dos efeitos das cheias utilizando meios não estruturais, v.g. ordenamento do território e sua ocupação, sistemas de pré-aviso, seguros contra inundações.

**MITIGAÇÃO DO RISCO:** A aplicação seletiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para reduzir a verossimilhança de uma ocorrência ou das suas conseqüências adversas ou ambas.

**MODO DE RUPTURA.** Um processo de ruptura potencial fisicamente possível para romper uma barragem por resultado de uma falha ou defeito relacionado a fundação, aterro, estruturas auxiliares, falhas de construção, sub-dimensionamento do vertedouro, deficiência dos materiais, falha na operação e na manutenção, ou processo de envelhecimento, que pode levar a uma liberação incontrolada do reservatório.

**OBRA HIDRÁULICA:** Qualquer obra permanente ou temporária, capaz de alterar o regime natural das águas superficiais ou subterrâneas, incluídas as condições qualitativas e quantitativas

**OMBREIRA:** Parte da encosta contra a qual a barragem é construída.

**ONDA DE CHEIA:** Elevação do nível das águas de um rio até um pico e subsequente recessão, causada por um período de precipitação, fusão de neves, ruptura de barragem ou liberação de águas por central elétrica.

**OPERAÇÃO:** atividade que implica fazer funcionar instalações, equipamentos ou mecanismos para produzir determinados efeitos ou produtos.

**PERCOLAÇÃO:** (1) Movimento da água através de interstícios de uma substância, como através do solo; (2) Movimento de água através dos poros ou fissuras de um solo ou rocha, sob pressão hidrodinâmica, exceto quando o movimento ocorre através de aberturas amplas, tais como covas; (3) Tipo de escoamento laminar que se produz nos interstícios de um material poroso saturado sob a ação de gradientes hidráulicos moderados, dirigidos principalmente para baixo.

**PERIGO POTENCIAL:** Ameaça ou condição em potencial que pode resultar de uma causa externa, por exemplo, as cheias, com possibilidade de criar conseqüências adversas.

**PERIGO:** (1) Evento ameaçador, ou a possibilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente danificador, em determinada região e durante um determinado período de tempo. (2) Ameaça. Condição, que pode resultar tanto de uma causa externa (e.g.sismo, cheia ou causa humana) como ser devida a uma qualquer vulnerabilidade interna com o potencial para iniciar o modo de ruptura. Uma fonte de danos potenciais ou uma situação com o potencial para provocar perdas.

**PERÍODO DE RETORNO** (sinônimo TEMPO DE RECORRÊNCIA) - Intervalo de tempo médio ou número de anos necessários para que um determinado evento (ponta de cheia, por exemplo) seja igualado ou excedido.

**PIEZÔMETRO.** Instrumento projetado para medir o nível d'água num ponto ou a poro-pressão em aterros, fundação, ombreiras, solo, rocha ou concreto.

**PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL (PAE):** Documento que contém os procedimentos para atuação em situações de emergência, bem como os meios de comunicação e os mapas de inundação que mostrem os níveis d'água de montante e jusante e os tempos de chegada das ondas de cheia, que poderiam resultar da ruptura da barragem ou de suas estruturas associadas.

**POPULAÇÃO EM RISCO (PAR):** Todos os indivíduos que, caso não sejam evacuados, serão atingidos pela onda de inundação provocada por uma ruptura na barragem.

**PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL (PMP):** Maior precipitação pluviométrica para uma dada duração meteorologicamente possível, para uma dada área de tormenta em uma localização específica, em uma determinada época do ano sem levar em consideração tendências climáticas

de longa duração. A PMP é uma estimativa e um limite físico conectado à precipitação que a atmosfera pode produzir.

**PREVENÇÃO** - Abrange as atividades destinadas a oferecer proteção permanente contra catástrofes. Inclui obras de engenharia adequadas e outras medidas de proteção física e legislação controladora do ordenamento do território e planejamento urbano

**PRINCÍPIO ALARP (*as low as reasonably practicable*)**: Princípio metodológico que estabelece que os riscos, inferiores ao limite de tolerabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a essa redução forem fortemente desproporcionados (dependendo do nível do risco) relativamente aos benefícios daí decorrentes.

**PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA ANUAL (AEP)**: A probabilidade estimada de um acontecimento, de uma dada magnitude, ser igualado ou excedido em qualquer ano.

**PROBABILIDADE DE EXCEPCIONALIDADE ANUAL (PEA)**: Probabilidade de que um evento de magnitude específica seja igualado ou superado em qualquer ano.

**PROBABILIDADE DE RUPTURA ANUAL (PRA)**: Razão entre o número de rupturas em relação ao total de barragens ano.

**PROBABILIDADE**: Uma medida do grau de confiança numa previsão, ditada pelas evidências, tendo em conta a natureza de uma grandeza incerta ou a ocorrência de um evento futuro incerto.

**PROCESSO DE DECISÃO**: O processo global, estruturado ou não, necessário para chegar a uma decisão.

**PROCESSO DETERMINÍSTICO**: Processo com um mesmo resultado para um determinado conjunto de dados de entrada. Assim, o resultado é “determinado” pelos dados de entrada.

**PROCESSO PROBABILÍSTICO**: Processos baseados na aplicação das leis da probabilidade. A análise de probabilidades considera explicitamente o carácter aleatório dos fenómenos naturais, bem como de outros acontecimentos e propriedades.

**PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA**: Processo para determinar a alteração hidrográfica da cheia, estudando o movimento da cheia através do braço de rio, reservatório ou outro curso de água.

**RECUPERAÇÃO**: Modificação de grande porte ou reconstrução de uma estrutura existente para atender às necessidades de operação e normas.

**REPARO**: Uma recomposição de um componente deteriorado, danificado ou rompido.

**RESPOSTA DO SISTEMA**: Forma de resposta de uma barragem, expressa como uma probabilidade condicional de ruptura, relativamente a um dado cenário de cargas aplicadas e condições concomitantes.

**RISCO ACEITÁVEL** : Risco que pode ser aceito pelos indivíduos ou pela sociedade eventualmente afetados, admitindo que não há alterações nos mecanismos de controle do risco.

**RISCO TOLERÁVEL**: Risco dentro de uma gama com a qual a sociedade pode aceitar de forma a assegurar determinados benefícios.

**RISCO**: (1) Probabilidade de ocorrência de evento adverso, geralmente associada com a magnitude de suas conseqüências. (2) Prejuízos estimados (vidas, pessoas feridas, bens danificados e interrupção da atividade econômica) para perigo a ocorrer em determinada região e período de tempo. Baseado em cálculos matemáticos, o risco é o produto do perigo e vulnerabilidade.

**RISCOS AMBIENTAIS**: Riscos associados aos ecossistemas naturais ou à beleza e amenidade da natureza.

**RUPTURA DE BARRAGEM**: Consiste na perda de capacidade de uma barragem, ou de parte dela, de funcionar como previsto. No contexto da segurança da barragem, a ruptura é restrita a

aspectos de integridade estrutural, consiste na liberação incontrolável do conteúdo do reservatório ocasionada pelo colapso total ou parcial da barragem.

**SEGURANÇA DE BARRAGEM:** (1) Condição em que a ocorrência de ameaças impostas por uma barragem à vida, à saúde, à propriedade ou ao meio ambiente se mantém em níveis de risco aceitáveis. (2) Segurança de barragem é a arte e ciência de assegurar a integridade e viabilidade de barragens tal que eles não apresentem riscos inaceitáveis ao público, propriedade, e o ambiente. Requer a aplicação coletiva de princípios e conhecimentos de engenharia, e uma filosofia de administração de risco que reconhece que uma barragem é uma estrutura cuja função segura não é determinada explicitamente por seu projeto original e construção. Também inclui todas as ações levadas a identificar ou prever deficiências e conseqüências relacionadas a ruptura, e documentar, publicar, e reduzir, eliminar, ou remediar para uma extensão razoavelmente possível, qualquer risco inaceitável.

**SEGURANÇA:** Capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

**SEVERIDADE:** Significa também prejuízo evitado, é dada pelo produto da redução da probabilidade de ruptura anual pelo custo da recuperação da ruptura da barragem.

**SISMICIDADE INDUZIDA:** Atividade sísmica resultante de atividades humanas, tais, como mineração, grandes explosões ou injeção de grandes quantidades de líquido no solo, v.g. campos petrolíferos, lixeiras ou alagamento de reservatórios.

**SISMO MÁXIMO DE PROJETO (SMP):** O sismo que resultaria da mais severa movimentação da fundação que a estrutura da barragem pode ser capaz de resistir, sem uma liberação incontrolável de água do reservatório..

**TEMPO DE ALERTA OU AVISO:** Intervalo de tempo entre o instante do primeiro aviso à população em risco (PAR) e o instante de chegada da onda de cheia à PAR, utilizado em métodos para a estimativa de perdas de vidas humanas devido a ruptura de barragens.

**TEMPO DE EXPOSIÇÃO:** O período de tempo que interessa para os cálculos de risco sísmico, de perigo sísmico ou da configuração de estruturas. Para as estruturas, o tempo de exposição é muitas vezes escolhido para que seja igual à sua vida útil.

**TOMADA D'ÁGUA:** Estrutura ou local cuja finalidade é controlar, regular, derivar e receber água diretamente da fonte por uma entrada d'água construída à montante.

**VERTEDOURO / SANGRADOURO:** Estrutura projetada somente para permitir descargas do excesso d'água do reservatório, tais como soleira vertente, canal, túnel, etc.

**APÊNDICE A – Manual de Preenchimento do Nível de Perigo de Barragem de Terra**

MANUAL PARA O PREENCHIMENTO DA COLUNA  
NÍVEL DE PERIGO (NP) NO CHECK-LIST DE **BARRAGENS DE TERRA**



LOCALIZAÇÃO / ANOMALIA		SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
	BARRAGEM													
	Talude de Montante													
1	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	<b>AU</b>	NI	I	P	<b>M</b>	G	<b>2</b>
2	Escorregamentos	NA	NE	PV	DS	<b>DI</b>	PC	AU	NI	I	<b>P</b>	M	G	
3	Rachaduras/afundamento (laje de concreto)	NA	NE	PV	DS	DI	<b>PC</b>	AU	NI	I	P	M	<b>G</b>	<b>3</b>

Versão 2.0 – dezembro 2006



## 1. PREENCHIMENTO DO NÍVEL DE PERIGO DA ANOMALIA

=>Obs: No caso de anomalias com Magnitudes NA, NE, DS, NI não devem ser preenchidas com o NP. Verificar os níveis de perigos para os demais caso de magnitudes (PV, DI, PC ou AU).

Nível de perigo	Caracterização
<u>0</u> ou <u>em branco</u> - nenhum	anomalia que não compromete a segurança da barragem, pode ser entendida como descaso e /ou má conservação.
<u>1</u> -Atenção	não compromete a estrutura da barragem a curto prazo (1 ano), <b>mas deve ser monitorada ao longo do tempo.</b>
<u>2</u> - Alerta	<b>risco a segurança da barragem</b> , devem ser tomadas providências para a <b>eliminação ou controle do problema.</b>
<u>3</u> - Emergência	situação <b>pode ficar fora de controle</b> e pode haver risco de ruptura iminente, pode haver a necessidade de rebaixamento imediato do reservatório, eventualmente de abandono do local.

## 2. METODOLOGIA DO CÁLCULO NO NÍVEL DE PERIGO (NP) DA BARRAGEM

A Tabela a seguir apresenta o peso ponderado adotado para o NP da anomalia como forma de obter-se uma estimativa do perigo da barragem através do somatório ao longo do check-list.

Nível de Perigo da Anomalia	Preenchimento no Check-list	Peso do Nível de Perigo (*)
Nenhum	0	0
Atenção	1	1
Alerta	2	4
Emergência	3	9

(\*) a ser calculado posteriormente

Exemplo de cálculo do NP de uma barragem:

*Uma barragem cuja estatística de nível de perigo é indicada a seguir terá como NP = 59, conforme se pode observar na tabela abaixo.*

Nível de Perigo	Preenchimento no Check-list	Peso (a)	Quantidade no check-list (b)	Pontuação (a x b)
Nenhum	0	0	1	=0x1=0
Atenção	1	1	6	=1x6=6
Alerta	2	4	2	=4x2=8
Emergência	3	9	5	=9x 5= 45
			<b>Total de NP da Barragem</b>	<b>= 59</b>

A pontuação criteriosa do NP permitirá uma hierarquização do risco das barragens com vistas embasar os tomadores de decisão (gerentes/diretores/SRH) nas prioridades de obras de recuperação.

Não se preocupem em calcular, o sistema SISOH irá calcular o NP de cada açude (soma de todos os NP das anomalias) e das bacias (soma dos NP dos açudes).

### 3. CRITÉRIOS DE ESTABELECIMENTO DOS NP PARA AS AMOMALIAS

#### A. INFRAESTRUTURA OPERACIONAL

Não precisa indicar o NP

#### B. BARRAGEM

##### B.1 Talude de Montante

##### 1. Erosões:

NP=0, inferior a 10cm de profundidade, espaçadas;

NP=2, superior a 10 cm e inferior a 50cm de profundidade;

NP=3, superior a 50cm de profundidade.

##### 2. Escorregamentos:

NP=3, só se houver a formação de superfície de deslizamento quase vertical no talude ou no coroamento. Nas demais situações, NP=0.

##### 3. Rachaduras/afundamento (aplicado à laje de alvenaria/concreto):

NP=1, presenças de trincas de dilatação;

NP=2, placas rachadas e/ou com pequenos afundamentos;

NP=3, placas com afundamentos (superiores a 5cm) e trincas que permitam a passagem de água.

##### 4. Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado:

NP=0, alguns blocos deslocados mas com a presença de proteção, acima da cota da soleira;

NP=1, alguns blocos deslocados mas com ainda com presença de proteção, abaixo da cota da soleira;

NP=2, alguns blocos deslocados com o talude em solo exposto a ação das ondas;

NP=3, alguns blocos deslocados com o talude em solo exposto a ação das ondas com erosões (sub-verticalização) no talude.

5. Afundamentos e buracos:

NP=2, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro;

NP=3, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro, superior a 5cm em vários pontos dispersos.

6. Árvores e arbustos:

NP=2: vegetação rasteira superior a 0,5m, presença de arbustos (juremas) localizadas;

NP=3: não se consegue visualizar nem se aproximar do trecho inspecionado (presença generalizada de arbustos, juremas, etc).

7. Erosões nos encontros das ombreiras:

NP=0, inferior a 10cm de profundidade, espaçadas;

NP=2, superior a 10 cm e inferior a 30cm de profundidade;

NP=3, superior a 30cm de prof. Contínua, analisar para ver se necessidade de NP=3.

8. Canaletas quebradas ou obstruídas:

NP= 1 , quando ocorrem apenas trincas espaçadas (esp. Inferior a 3mm);

NP= 2 , quando ocorrem trincas generalizadas ou canaletas quebradas;

NP=3, quando houver erosão profunda (acima de 30cm) no trecho da canaleta quebrada.

9. Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais

NP= 2, formigueiros com ou sem formação de morrotes de areia;

NP=3, formação de morrotes generalizados com afundamentos nas proximidades

## **B.2 Coroamento**

1. Erosões:

NP=0, inferior a 10cm de profundidade, espaçadas;

NP=2, superior a 10 cm e inferior a 30cm de profundidade;

NP=3, superior a 30cm de prof. contínua, analisar para ver se necessidade de NP=3.

2. Rachaduras:

NP=1, presença de rachaduras de até 1 metro, localizadas;

NP=2, extensão maior que 1 metro;

NP=3, trincas generalizadas em todo o coroamento.

3. Falta de revestimento: (Não aplicar NP).

4. Falha no revestimento: (Não aplicar NP).

5. Afundamentos e Buracos:

NP=2, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro;

NP=3, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro, superior a 5cm em vários pontos dispersos.

6. Árvores e arbustos:

NP= 0, não existe;

NP=1: vegetação rasteira superior a 0,5m, sem arbustos;

NP=2: presença de arbustos (juremas) localizadas;

NP=3: não se consegue visualizar nem se aproximar do trecho inspecionado (presença generalizada de arbustos, juremas, etc).

7. Defeitos na drenagem (aplicar só quando houver água empossada):

NP=2, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro;

NP=3, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro, superior a 5cm em vários pontos dispersos.

8. Defeitos no meio-fio:

NP=0, trincas espaçadas;

NP=2, fissuras generalizadas;

NP=3, muretas quebradas, (aplicar no caso de existência de muretas, ex. Vieirão e Quandú), outros açudes NP=0).

9. Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais:

NP= 2, formigueiros com ou sem formação de morrotes de areia;

NP=3, formação de morrotes generalizados com abatimentos nas proximidades.

10. Sinais de Movimento:

NP=2, até 30cm para o lado ou para baixo;

NP=3, mais de 30cm para o lado ou para baixo.

11. Desalinhamento do meio fio:

NP=0, até 10cm para o lado ou para baixo;

NP=1, mais de 20cm até 30cm para o lado ou para baixo;

NP=2, mais de 30cm para o lado ou para baixo.

12. Ameaça de transbordamento da barragem:

NP=0, nenhum;

NP= 1, até 10cm para o lado ou para baixo;

NP=2, mais de 10cm até 30cm para o lado ou para baixo;

NP=3, mais de 30cm para o lado ou para baixo.

**B.3 Talude de Jusante**

1. Erosões:

NP=1, até 10cm de prof. sem presença de umidade e fluxo nas proximidades;

NP=2, prof. superior a 10cm ou presença de umidade e **fluxo** nas proximidades, **sem carreamento** de material;

NP=3, prof. sup a 50cm ou presença de umidade e **fluxo** nas proximidades **com carreamento** de material.

2. Escorregamentos:

NP=3, só se houver a formação de superfície de deslizamento quase vertical no talude ou no coroamento. Nas demais situações, NP=0.

3. Rachaduras/afundamento (laje de concreto):

NP=1, presenças de trincas de dilatação;

NP=2, placas quebradas e/ou com pequenos afundamento;

NP=3, placas com grandes afundamentos (superiores a 10cm), com passagem de água nas proximidades.

4. Falha na proteção granular:

NP=2, trechos de brita/seixos/blocos deslocados com solo exposto;

NP=3, trechos generalizados de deslocamentos de brita/seixos/blocos, com solo exposto com a presença erosões/ravinas superiores a 50cm de profundidade e/ou verticalização do talude de forma.

5. Falha na proteção vegetal:

NP=2, trechos de ausência de vegetação com solo exposto;

NP=3, trechos generalizados de deslocamentos de brita/seixos/blocos, com solo exposto com a presença erosões/ravinas superiores a 50cm de profundidade e/ou verticalização do talude de forma.

6. Afundamentos e Buracos:

NP=2, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro;

NP=3, afundamento abrupto (sinkholes) por recalque localizado do aterro, superior a 5cm em vários pontos dispersos, sinais de umidade e de fluxo no talude a jusante.

7. Árvores e Arbustos:

NP=2: vegetação rasteira superior a 0,5m, presença de arbustos (juremas) localizadas;

NP=3: não se consegue visualizar nem se aproximar do trecho inspecionado (presença generalizada de arbustos, juremas, etc).

8. Erosão no encontro das ombreiras:

NP=1, sem presença de umidade e fluxo nas proximidades;

NP=2, presença de umidade e **fluxo** nas proximidades, **sem carreamento** de material;

NP=3, presença de umidade e **fluxo** nas proximidades, **com carreamento** de material.

9. Cavernas e buracos nas ombreiras: (NP=0).

10. Canaletas quebradas ou obstruídas:

NP= 1 , quando ocorrem apenas trincas espaçadas (esp. Inferior a 3mm);

NP= 2 , quando ocorrem trincas generalizadas ou canaletas quebradas;

NP=3, quando houver erosão profunda (acima de 30cm) no trecho da canaleta quebrada.

11. Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais:

NP= 2, formigueiros com ou sem formação de morrotes de areia;

NP=3, formação de morrotes generalizados com abatimentos nas proximidades.

12. Sinais de Movimento:

NP=2, até 30cm para o lado ou para baixo;

NP=3, mais de 30cm para o lado ou para baixo.

13. Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas

NP=2, fluxo **sem carreamento** de material;

NP=3, fluxo **com carreamento** de material.

14. Carreamento de material na área dos drenos:

NP=0, se não houver carreamento;

NP=2, sempre (saída pelo pé do rock-fill ou poços de alívio, se houver).

#### **B.4 Região a Jusante da Barragem**

1. Construções próximas ao rio: (NP=0).

##### Fuga d'água

NP=1, fluxo **sem** carreamento de material, com medidor de vazão;

NP=2, fluxo **sem** carreamento de material;

NP=3, fluxo **com** carreamento de material.

2. Erosão nas ombreiras:

NP=1, sem presença de umidade e fluxo nas proximidades;

NP=2, presença de umidade e fluxo nas proximidades, **sem carreamento** de material;

NP=3, presença de umidade e fluxo **com carreamento** de material nas proximidades.

3. Cavernas e buracos nas ombreiras:

NP=1, sem presença de umidade e fluxo nas proximidades;

NP=2, presença de umidade e fluxo nas proximidades, **sem carreamento** de material;

NP=3, presença de umidade e fluxo **com carreamento** de material nas proximidades.

4. Árvores e arbustos na faixa de 10m do pé da barragem:

NP=1: vegetação rasteira superior a 0,5m e/ou presença de arbustos (juremas) localizadas;

NP=2: não se consegue visualizar nem se aproximar do trecho inspecionado (presença generalizada de arbustos, juremas, etc).

#### **B.5 Instrumentação**

1. Acesso precário aos instrumentos: (NP=2, quando aplicável).
2. Piezômetros entupidos ou defeituosos: (NP=2, quando aplicável).
3. Marcos de recalques defeituoso: (NP=2, quando aplicável).
4. Medidores de vazão de percolação defeituosos: (NP=2, quando aplicável).
5. Falta de instrumentação: (NP=2, quando aplicável).
6. Falta de registros de leituras de instrumentação: (NP=2, quando aplicável).
7. Deficiências no poço de alívio: (NP=2, quando aplicável).

## C. SANGRADOURO/VERTEDOIRO

### C.1 Canais de Aproximação e Restituição

#### 1. Arvores e Arbustos

NP=0, sem vegetação, até 5cm;  
NP=1, vegetação rasteira, gramíneas, até 30cm;  
NP=2, vegetação acima de 30cm e/ou presença de arbustos (juremas) localizadas;  
NP=3, não se consegue visualizar nem se aproximar do trecho inspecionado (presença generalizada de arbustos, juremas, etc).

#### 2. Obstrução ou entulhos:

NP=0, até 5cm de altura;  
NP=1, até 20cm, blocos de rocha isolados, menos de 5;  
NP=2, blocos de rocha superiores a 1 m<sup>3</sup> , mais de 5.

#### 3. Desalinhamento dos taludes e muros laterais:

NP=1, desalinhamento no topo do muro até 2cm;  
NP=2, desalinhamento no topo do muro superior a 2cm;  
NP=3, desalinhamento no topo do muro superior a 2cm no caso de muro em contato com o maciço da barragem.

#### 4. Erosões ou escorregamento de taludes:

NP=0, até 5cm de altura;  
NP=1, queda de solo e blocos de rocha isolados até 1m do pé do talude;  
NP=2, queda de solo e blocos de rocha a distancia superior 1m do pé do talude e/ou blocos de rocha superiores 1 m<sup>3</sup>;  
NP=3, presença de obstrução acima de 40cm.

#### 5. Erosão na base dos canais escavados:

NP=1, erosão a distancia superior a 10m do cordão ou perfil vertedouro;  
NP=2, erosão a distancia inferior a 10m do cordão ou perfil vertedouro;  
NP=3, erosão solapando o pé do cordão ou perfil vertedouro, ou muros alas.

#### 6. Erosão na área à jusante (erosão regressiva):

NP=1, erosão a distancia superior a 10m do cordão ou perfil vertedouro;  
NP=2, erosão a distancia inferior a 10m do cordão ou perfil vertedouro;  
NP=3, erosão solapando o pé do cordão ou perfil vertedouro, ou muros alas.



7. Construções irregulares (aterro, casa, cerca):

NP=2, presença de cercas, aterro de estradas, construções isoladas.

## **C.2 Estrutura de Fixação da Soleira**

1. Rachaduras ou trincas no concreto:

NP= 1 , quando ocorrem apenas trincas espaçadas (esp. inferior a 3mm);

NP= 2 , quando ocorrem trincas/rachaduras até 10mm;

NP=3, quando ocorrem trincas/rachaduras com espessuras superiores a 10mm, generalizadas;

2. Ferragem exposta: (se houver, NP=2).

3. Deterioração da superfície do concreto:

NP= 1, concreto com bolhas de reação álcalis-agregado (cimento–areia/brita), localizadas;

NP= 2, erosões, deslocamentos, concreto com bolhas de reação álcalis-agregado (cimento-areia/brita), generalizadas.

4. Descalçamento da estrutura:

NP=1, descalçamento do cordão ou perfil vertedouro na prof. max de 10cm, localizado;

NP=2, descalçamentos generalizados do cordão ou perfil vertedouro na prof. max de 10cm, generalizados;

NP=3, descalçamento perpassando todo cordão ou perfil vertedouro .

5. Juntas danificadas:

NP=1, localmente (máx. 2);

NP=2, generalizadas.

6. Sinais de deslocamento das estruturas (para perfis vertedouro):

NP=1, desalinhamento no topo do muro até 2cm;

NP=2, desalinhamento no topo do muro superior a 2cm.

7. Para cordões de fixação: (NP=0, sempre).

### **C.3 Rápido/Bacia de Dissipação**

1. Rachaduras ou trincas no concreto:

NP= 1, quando ocorrem apenas trincas espaçadas (esp. inferior a 3mm);

NP= 2, quando ocorrem trincas/rachaduras com esp superiores a 10mm, generalizadas.

2. Ferragem exposta: (se houver, NP=2).

3. Deterioração da superfície do concreto: (se houver, NP=1).

4. Ocorrência de buracos na soleira:

NP= 1, profundidades de até 10 cm;

NP= 2, profundidades superior a 10 cm.

5. Erosões:

NP=1, erosão a distancia superior inferior a 10 metros da estrutura da bacia;

NP=2, erosão solapando o pé da estrutura da bacia.

6. Presença de entulho na bacia: (se houver, NP=1).

7. Presença de vegetação na bacia: (se houver, NP=1).

8. Falha no enrocamento de proteção: (se houver, NP=1).

### **C.4 Muros Laterais**

1. Erosão na fundação: (se houver, NP=2).

2. Erosão nos contatos dos muros: (se houver, NP=2).

3. Rachaduras no concreto:

NP= 1, quando ocorrem apenas trincas espaçadas (esp. inferior a 3mm);

NP= 2, quando ocorrem trincas/rachaduras até 10mm;

NP=3, quando ocorrem trincas/rachaduras com esp. superiores a 10mm, generalizadas.

4. Ferragem do concreto exposta: (se houver, NP=2).

5. Deterioração da superfície do concreto:

NP= 1, concreto com bolhas de reação álcalis-agregado (cimento–areia/brita), localizadas;

NP= 2, erosões, deslocamentos, concreto com bolhas de reação álcalis-agregado (cimento–areia/brita), generalizadas.

### C.5 Comportas do Vertedouro

#### 1. Peças Fixas:

NP=1, falha na pintura;

NP=2, pequenas corrosões superficiais;

NP=3, corrosões generalizadas.

#### 2. Estrutura:

NP=1, falha na pintura;

NP=2, pequenas corrosões superficiais;

NP=3, corrosões generalizadas.

#### 3. Defeitos nas vedações:

NP=1, vazões desprezíveis, localizadas;

NP=2, vazão, em jatos.

#### 4. Defeitos nas rodas (comportas vagão): (se houver, NP=3).

#### 5. Defeitos nos rolamentos ou buchas e retentores: (se houver, NP=3).

#### 6. Defeito no ponto de içamento: (se houver, NP=3).

### D. RESERVATÓRIO

- Itens de 1 a 6: (NP=0).

#### 7. Desmoronamento das margens:

NP=0, margens planares, de pequena inclinação sem prob. de deslizamentos;

NP=1, presença de taludes íngremes em solo;

NP=2, presença de taludes íngremes em blocos de rocha soltos a longa distância (sup. a 100m).

NP=3, presença de taludes íngremes em blocos de rocha soltos a longa distância (inf. a 100m).

- Itens de 8 a 11: (sempre NP=0).

## **E. TORRE DA TOMADA D'ÁGUA**

### **E.1 Entrada**

### **E.2 Acionamento**

### **E.3 Comportas**

Obs: Os itens acima são inspecionáveis quando a entrada está emersa. Em geral, só inspecionável por mergulho sub-aquático (ou seja, NI).

### **E.4 Estrutura**

1. Ferragem exposta na estrutura da torre : (se houver, NP=2).
2. Falta de Guarda corpo na escada de acesso: (se houver, NP=0).
3. Deterioração do Guarda corpo na escada de acesso (se houver, NP=0).
4. Ferragem exposta na plataforma (passadiço): (se houver, NP=2).
5. Falta de Guarda corpo no passadiço (se houver, NP=0).
6. Deterioração do Guarda corpo no passadiço (se houver, NP=0).
7. Deterioração do tubo de aeração e by-pass:
  - NP=1, falha na pintura;
  - NP=2, pequenas corrosões superficiais;
  - NP=3, corrosões generalizadas.
8. Deterioração da instalação de controle: (se houver, NP=0).

## **F. CAIXA DE MONTANTE (BOCA DE ENTRADA E “STOP-LOG)**

- Os itens 1 a 10: só serão inspecionáveis quando a entrada está emersa. Em geral, só inspecionável por mergulho sub-aquático (ou seja, NI).

## **G. GALERIA**

- Em geral não inspecionáveis (NI), à exceção dos itens 7 e 10.

7. Surgência de água no concreto:

- NP=1, surgência de água limpa, monitorada;
- NP=2, surgência de água limpa, sem monitoramento;
- NP=3, surgência de água com carreamento de material, sem monitoramento.

10. Surgência de água junto à galeria:

- NP=1, surgência de água limpa, monitorada;
- NP=2, surgência de água limpa, sem monitoramento;
- NP=3, surgência de água com carreamento de material, sem monitoramento.

## **H. ESTRUTURA DE SAÍDA**

1. Corrosão e vazamentos na tubulação:

- NP=1, falha na pintura;
- NP=2, pequenas corrosões superficiais e vazamentos;

2. Sinais de Abrasão ou Cavitação (se houver, NP=1)

3. Ruídos estranhos: (se houver, se houver, NP=1)

4. Defeito nos dispositivos de controle:

- NP=1, falha na pintura;
- NP=2, pequenas corrosões superficiais, sem acionamento;

5. Surgência de água no concreto: (se houver, NP=1).

6. Precariedade de acesso (árvores e arbustos):

- NP=1, acesso dificultoso;
- NP=2, falta de caminho, e/ou presença de arbustos (juremas), não se consegue visualizar nem se aproximar do trecho inspecionado (presença generalizada de arbustos, juremas, etc).

7. Vazamentos nos dispositivos de controle (válvulas):

- NP=1, falha na pintura;
- NP=2, pequenas corrosões superficiais e vazamentos.

8. Falta de Manutenção: (se houver, NP=1).

9. Construções irregulares: (NP=0).
10. Falta ou deficiência de drenagem da caixa de válvulas: (NP=0).
11. Presença de pedras ou lixo dentro da caixa de válvulas: (NP=0).
12. Defeitos no concreto: (se houver, NP=1).
13. Defeitos na cerca de proteção: (NP=0).

#### **I. MEDIDOR DE VAZÃO DA GALERIA**

- Itens de 1 a 5: (NP=0);
6. Erosão à jusante do medidor: (se houver, NP=1).

## **APÊNDICE B - Aplicação de Metodologias de Avaliação do Risco**

TABELA B.4.1 - Aplicação da Metodologia SABESP

TABELA B.4.2 - Aplicação da Metodologia do USACE

TABELA B.4.3 - Aplicação da Metodologia da COGERH

TABELA B.5.1 - Aplicação da Metodologia do Escore de Risco

TABELA B.4.1 - Aplicação da Metodologia SABESP



TABELA B.4.1 - Aplicação da Metodologia da SABESP.

Barragem Estadual	Importância	Dimensão da Barragem	Volume de água Armazenada	Impacto a Jusante			Tipo de Barragem	Orgão Vertente	Vazão de Projeto	PP	Classe	Inf. de Projeto	Freq. na Avaliação do Comportamento	Percolação	Deformações	Nível de deterioração dos parâmetros ou taludes	Erosões a jusante	Cond. Dos Equipamentos dos descarregadores	Índice de ER	Estado Real	Índice de Comportamento (IC)	Comportamento
				Social	Ambiental	Econômico																
1 Olho d'água	8	6	3	6	3	0	8	15	12	61	Significativa	2	6	5	5	4	4	8	34	Insatisfatório	44,8	Emergência
2 Valério	10	6	3	8	10	4	8	15	2	66	Significativa	0	6	15	15	4	4	8	52	Regular	57,6	Alerta
3 Quandú	8	6	3	8	8	4	8	15	2	62	Significativa	0	6	15	20	6	4	8	59	Regular	60,2	Atenção
4 São Domingos	8	6	3	8	10	4	8	15	2	64	Significativa	0	6	5	15	12	12	8	58	Insatisfatório	60,4	Atenção
5 Potiretama	8	6	3	8	8	4	8	15	2	62	Significativa	0	6	15	20	6	6	8	61	Regular	61,4	Atenção
6 Pacajus	4	2	1	6	0	0	8	15	20	56	Elevada	4	6	15	20	6	6	8	65	Regular	61,4	Atenção
7 Acarape do Meio	6	2	3	0	3	5	15	15	2	51	Elevada	2	6	15	15	12	12	8	70	Regular	62,4	Atenção
8 Jaburu I	2	2	1	0	0	0	8	15	20	48	Elevada	4	10	15	20	6	6	15	76	Regular	64,8	Atenção
9 Capitão Mor	10	6	3	8	8	4	8	15	2	64	Significativa	0	6	5	20	12	15	8	66	Regular	65,2	Atenção
10 Trapiá II	8	6	3	6	3	4	8	15	2	55	Elevada	0	6	15	20	12	12	8	73	Regular	65,8	Atenção
11 Jaburu II	6	2	1	6	0	4	8	15	12	54	Elevada	0	6	15	15	12	12	15	75	Regular	66,6	Atenção
12 Tatajuba	10	6	3	8	10	4	8	15	2	66	Significativa	0	6	15	15	12	12	8	68	Regular	67,2	Atenção
13 Hipólito	10	6	3	8	8	4	8	15	2	64	Significativa	0	6	15	15	12	15	8	71	Regular	68,2	Atenção
14 Colina	4	6	3	6	8	3	8	15	12	65	Significativa	0	6	15	20	12	12	8	73	Regular	69,8	Atenção
15 Canafstula	6	6	3	8	8	4	8	15	12	70	Significativa	2	6	15	15	12	12	8	70	Regular	70	Normal
16 Do coronel	10	6	3	8	10	4	8	15	2	66	Significativa	0	6	15	20	12	12	8	73	Regular	70,2	Normal
17 Carnaubal	4	2	2	6	0	4	8	15	12	53	Elevada	2	6	15	20	12	12	15	82	Satisfatório	70,4	Normal
18 São José II	8	6	3	8	3	4	8	15	2	57	Elevada	0	6	15	20	12	12	15	80	Satisfatório	70,8	Normal
19 Cipoada	8	2	2	8	3	4	8	15	12	62	Significativa	2	6	20	15	4	15	15	77	Regular	71	Normal
20 São José I	10	6	3	8	8	4	8	15	2	64	Significativa	0	6	15	20	12	15	8	76	Regular	71,2	Normal
21 Aduato Bezerra	10	6	3	8	8	4	8	15	2	64	Significativa	0	6	15	20	12	15	8	76	Regular	71,2	Normal
22 Pacoti	2	2	1	0	0	0	8	15	20	48	Elevada	4	6	15	20	15	12	15	87	Satisfatório	71,4	Normal
23 Arrebata	4	6	3	6	3	3	8	15	12	60	Significativa	4	6	15	20	12	15	8	80	Satisfatório	72	Normal
24 Sítios Novos	2	2	1	0	3	0	8	15	20	51	Elevada	5	6	20	20	15	6	15	87	Satisfatório	72,6	Normal
25 Sucesso	6	6	3	8	3	3	8	15	12	64	Significativa	0	6	15	20	12	12	15	80	Satisfatório	73,6	Normal
26 Vieirão	8	6	3	6	3	3	8	15	2	54	Elevada	4	6	15	20	15	12	15	87	Regular	73,8	Normal
27 Santa Maria	8	6	3	8	8	4	8	15	12	72	Significativa	2	6	15	20	12	12	8	75	Regular	73,8	Normal
28 Cupim	10	6	3	6	8	3	8	15	12	71	Significativa	0	6	15	20	15	12	8	76	Regular	74	Normal
29 Itauna	8	6	2	6	3	0	8	15	20	68	Significativa	5	6	15	20	15	12	8	81	Satisfatório	75,8	Normal
30 Castro	6	6	2	0	3	3	8	15	20	63	Significativa	5	6	20	15	12	12	15	85	Satisfatório	76,2	Normal
31 Trapiá I	10	6	3	8	10	4	8	15	2	66	Significativa	0	6	15	20	12	15	15	83	Satisfatório	76,2	Normal
32 Gangorra	6	2	3	6	3	3	8	15	20	66	Significativa	5	6	20	20	12	6	15	84	Satisfatório	76,8	Normal
33 Gavião	2	6	3	0	3	0	8	15	20	57	Elevada	0	10	15	20	15	15	15	90	Satisfatório	76,8	Normal
34 Riachão	2	6	3	6	3	0	8	15	20	63	Significativa	0	6	15	20	15	15	15	86	Satisfatório	76,8	Normal
35 Aracoiaba	10	2	1	0	0	3	8	15	20	59	Elevada	5	10	20	15	12	12	15	89	Satisfatório	77	Normal
36 Angicos	6	2	2	8	3	4	8	15	20	68	Significativa	5	6	20	20	12	12	8	83	Satisfatório	77	Normal
37 Barra Velha	6	2	2	8	3	3	8	15	20	67	Significativa	5	6	20	15	15	12	15	88	Satisfatório	79,6	Normal
38 Canoas	4	2	2	6	3	0	15	15	20	67	Significativa	4	10	15	20	12	12	15	88	Regular	79,6	Normal
39 Rosário	10	6	3	6	3	3	8	15	20	74	Significativa	5	6	20	18	15	12	8	84	Satisfatório	80	Normal
40 Parambu	6	6	3	6	3	3	8	15	12	62	Significativa	2	6	15	20	20	15	15	93	Satisfatório	80,6	Normal
41 Catucinzenza	8	6	3	0	3	3	8	15	20	66	Significativa	5	6	20	20	15	12	15	93	Satisfatório	82,2	Normal
42 Arneiroz II	10	2	1	0	0	0	8	15	20	56	Elevada	5	10	20	20	15	15	15	100	Satisfatório	82,4	Normal
43 Malcozinhado	10	6	3	6	3	3	8	15	20	74	Significativa	5	6	20	15	15	12	15	88	Satisfatório	82,4	Normal
44 Ubaldinho	10	6	3	6	3	3	8	15	20	74	Significativa	5	6	15	20	15	12	15	88	Satisfatório	82,4	Normal
45 Jerimum	8	6	3	8	3	4	12	15	20	79	Significativa	5	6	20	20	15	12	8	86	Satisfatório	83,2	Normal
46 Pirabitbu	10	2	2	8	3	4	8	15	20	72	Significativa	5	6	15	20	15	15	15	91	Satisfatório	83,4	Normal
47 Monsenhor Tabosa	10	6	3	8	3	4	8	15	20	77	Significativa	5	6	20	15	15	12	15	88	Satisfatório	83,6	Normal
48 Cachoeira	6	6	3	8	3	4	8	15	20	73	Significativa	5	6	20	20	15	12	15	93	Satisfatório	85	Normal
49 Muquém	6	6	3	8	3	4	8	15	20	73	Significativa	5	6	20	20	15	12	15	93	Satisfatório	85	Normal
50 Carmina	10	6	3	6	3	3	8	15	20	74	Significativa	5	6	20	20	15	12	15	93	Satisfatório	85,4	Normal
51 Benguê	8	6	3	8	3	4	8	15	20	75	Significativa	5	6	20	20	15	12	15	93	Satisfatório	85,8	Normal
52 Flor do Campo	8	2	1	8	0	3	8	15	20	65	Significativa	5	10	20	20	15	15	15	100	Satisfatório	86	Normal
53 Souza	10	6	3	8	10	4	8	15	20	84	Baixa	5	6	20	20	12	12	15	90	Satisfatório	87,6	Normal
54 Faé	10	6	3	8	3	3	8	15	20	76	Significativa	5	10	20	20	15	15	15	100	Satisfatório	90,4	Normal
55 Cauhipe	10	6	3	8	8	4	8	15	20	82	Baixa	5	6	20	20	15	15	15	96	Satisfatório	90,4	Normal
<b>média=</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>67</b>	<b>Significativa</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>87</b>	<b>Regular</b>	<b>79,2</b>	<b>Atenção</b>

TABELA B.4.2 - Aplicação da Metodologia do USACE

TABELA B.4.2 -Aplicação da Metodologia do USACE

Barragem Estadual	Altura (m)	Extensão (m)	Cap. (hm3)	Vazio de Projeto	Tipo de Barragem	Quadro 4.3 - Constantes Físicas						Quadro 4.4 - Parâmetros Variáveis (B)													
						Altura da Barragem (A1)	Largura da crista (A2)	Tipo de barragem (A3)	Tipo de Fundação (A4)	Capacidade de Armazenamento (A5)	Tipo de Drenagem Interna (A6)	Parâmetro A	Ano de Construção	Idade (anos)	Idade (B1)	% da Altura Hidráulica (B2)	Sismicidade (B3)	Confiabilidade do Vertedouro (B4)	Continuidade de Monitoramento da barragem (B5)	Nível d'água Normal (B6)	Parâmetro B	Vulnerabilidade (V)	Danos Econômicos e Perdas de Vidas (C) Quadro 4.5	Escore Geral: S=(V+3C)/50	
1 Pacoti	27,00	1.597,00	370,00	Decamilenar	T	3	3	10	2	4	3	4,17	1981	25	3	1	1	1	4	3	2,17	6,33	10,00	0,727	
2 Pacajus	15,00	1.960,00	240,00	Decamilenar	T	3	6	10	2	4	3	4,67	1990	16	3	1	1	2	4	10	3,50	8,17	8,00	0,643	
3 Sítios Novos	21,50	1.818,00	123,20	Decamilenar	T	3	6	10	2	4	1	4,33	1999	7	7	1	1	2	4	6	3,50	7,83	8,00	0,637	
4 Olho d'água	25,30	383,00	21,00	Decamilenar	T	3	6	10	10	2	10	6,83	1998	8	7	1	1	1	4	6	3,33	10,17	5,00	0,503	
5 Vieirão	22,50	340,00	20,96	-	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1988	18	3	1	1	6	4	6	3,50	9,17	5,00	0,483	
6 Gangorra	20,66	1.033,00	46,20	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	1999	7	7	1	1	8	4	6	4,50	8,50	5,00	0,470	
7 Itaúna	17,95	436,00	77,50	Decamilenar	T	3	6	10	2	4	1	4,33	2001	5	7	1	1	2	4	10	4,17	8,50	5,00	0,470	
8 Souza	19,90	660,00	30,84	Decamilenar	T	3	6	10	10	2	2	4	5,83	1999	7	7	8	1	1	4	3	4,00	9,83	5,00	0,497
9 Jaburí II	16,20	1.054,00	127,00	-	T	3	6	10	8	4	5	6,00	1984	22	3	1	1	1	4	6	2,67	8,67	5,00	0,473	
10 Aracoíaba	35,00	2.000,00	170,70	Decamilenar	T	6	6	10	2	4	1	4,83	2002	4	8	1	1	1	4	6	3,50	8,33	5,00	0,467	
11 Rosário	20,80	670,00	47,20	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2001	5	7	1	1	2	4	10	4,17	8,17	5,00	0,463	
12 Angicos	18,90	1.367,00	56,05	Decamilenar	T	3	6	10	8	4	1	5,33	1996	10	7	1	1	2	4	3	3,00	8,33	5,00	0,467	
13 Riachão	22,00	600,00	46,95	1000	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1981	25	3	1	1	1	4	6	2,67	8,33	5,00	0,467	
14 Castro	25,90	606,00	63,90	Decamilenar	T	3	6	10	2	4	1	4,33	1996	10	7	1	1	3	4	6	3,67	8,00	5,00	0,460	
15 Carnaubal	18,35	760,00	87,70	-	T	3	6	10	8	4	1	5,33	1990	16	3	1	1	1	4	6	2,67	8,00	5,00	0,460	
16 Cachoeira	25,50	273,00	34,33	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2000	6	7	1	1	1	4	6	3,33	7,33	5,00	0,447	
17 Gavião	16,00	668,00	32,90	-	T	3	6	10	2	2	2	4,17	1974	32	2	1	1	1	4	10	3,17	7,33	5,00	0,447	
18 Canoas	50,00	116,00	69,25	-	CCR	6	6	10	2	2		2,67	1999	7	7	1	1	1	4	6	3,33	6,00	5,00	0,420	
19 Colina	10,00	267,00	3,25	-	T	3	6	10	8	4	8	6,50	1988	18	3	1	1	1	10	6	4,83	11,33	3,00	0,407	
20 Acarape do Meio	33,00	267,50	31,50	-	AP	6	6	10	2	2		2,67	1924	82	2	1	1	1	4	6	2,50	5,17	5,00	0,403	
21 Quandú	19,50	195,00	4,00	100	T	3	6	10	8	2	8	6,17	1990	16	3	1	1	8	4	10	4,50	10,67	3,00	0,393	
22 Hipólito	14,95	222,36	6,54	-	T	3	6	10	8	2	4	5,50	1975	31	2	1	1	8	10	6	4,67	10,17	3,00	0,383	
23 Sucesso	10,20	498,00	10,00	-	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1988	18	3	1	1	6	10	6	4,50	10,17	3,00	0,383	
24 Jaburí I	56,00	670,00	230,00	-	T	6	6	10	2	4	3	5,17	1983	23	3	1	1	10	4	10	4,83	10,00	3,00	0,380	
25 São José II	19,00	330,00	29,14	-	T	3	6	10	8	2	3	5,33	1992	14	7	1	1	8	4	6	4,50	9,83	3,00	0,377	
26 Potiretama	11,80	375,00	6,33	100	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1992	14	7	1	1	6	4	6	4,17	9,83	3,00	0,377	
27 São José I	12,70	224,00	7,67	-	T	3	6	10	8	2	8	6,17	1988	18	3	1	1	6	4	6	3,50	9,67	3,00	0,373	
28 Trapá II	27,40	270,00	18,19	-	T	3	6	10	8	2	2	5,17	1992	14	7	1	1	6	4	6	4,17	9,33	3,00	0,367	
29 Trapá I	13,50	29,50	2,01	100	T	3	6	10	8	2	3	5,33	1985	21	3	1	1	3	10	6	4,00	9,33	3,00	0,367	
30 Cipoadá	20,80	1.130,00	86,00	-	T	3	6	10	8	4	5	6,00	1992	14	7	1	1	1	4	6	3,33	9,33	3,00	0,367	
31 Cupim	10,00	350,00	4,55	-	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1970	36	2	1	1	1	10	6	3,50	9,17	3,00	0,363	
32 Ubaldinho	18,00	475,00	32,00	Decamilenar	T	3	6	10	10	2	4	5,83	1998	8	7	1	1	1	4	6	3,33	9,17	3,00	0,363	
33 Canafistula	14,80	850,00	13,11	-	T	3	6	10	8	2	8	6,17	1992	14	7	1	1	1	4	3	2,83	9,00	3,00	0,360	
34 Arrebida	17,30	464,00	16,60	-	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1992	14	7	1	1	1	4	3	2,83	8,50	3,00	0,350	
35 Parambu	20,80	278,00	8,53	-	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1985	21	3	1	1	1	4	6	2,67	8,33	3,00	0,347	
36 Piribibu	18,00	1.650,00	74,00	1000	T	3	6	10	8	4	1	5,33	2000	6	7	1	1	1	4	3	2,83	8,17	3,00	0,343	
37 Flor do Campo	21,14	697,00	111,30	Decamilenar	T	3	6	10	2	4	1	4,33	1999	7	7	1	1	1	4	6	3,33	7,67	3,00	0,333	
38 Barra Velha	17,51	396,80	99,50	Decamilenar	T	3	6	10	2	4	1	4,33	1999	7	7	1	1	1	4	6	3,33	7,67	3,00	0,333	
39 Malcozinhado	15,11	755,00	37,84	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2003	3	8	1	1	1	4	6	3,50	7,50	3,00	0,330	
40 Catucinzenta	16,25	1.055,00	27,13	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2002	4	8	1	1	1	4	6	3,50	7,50	3,00	0,330	
41 Muquem	27,60	356,00	47,65	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2000	6	7	1	1	1	4	6	3,33	7,33	3,00	0,327	
42 Monsenhor Tabosa	23,10	315,00	12,10	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	1999	7	7	5	1	1	4	6	4,00	8,00	3,00	0,340	
43 Cauhipe	11,37	1.298,00	11,00	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	1998	8	7	5	1	1	4	6	4,00	8,00	3,00	0,340	
44 Arneiroz II	34,20	1.161,00	197,00	Decamilenar	T	6	3	10	2	4	1	4,33	2005	1	8	10	1	1	4	3	4,50	8,83	3,00	0,357	
45 Carmina	19,00	770,00	13,32	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2002	4	8	8	1	1	4	3	4,17	8,17	3,00	0,343	
46 Faé	20,00	329,00	23,40	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2004	2	8	8	1	1	4	3	4,17	8,17	3,00	0,343	
47 Benguê	23,61	487,10	19,56	Decamilenar	T	3	6	10	2	2	1	4,00	2000	6	7	5	1	1	4	3	3,50	7,50	3,00	0,330	
48 Jerimum	23,20	385,00	20,50	Decamilenar	TE	3	6	4	2	2	1	3,00	1996	10	7	1	1	1	4	3	2,83	5,83	3,00	0,297	
49 Tatajuba	16,60	149,80	2,72	-	T	3	6	10	8	2	4	5,50	1999	7	7	1	1	8	10	6	5,50	11,00	1,00	0,280	
50 Capitão Mor	22,00	180,00	6,31	-	T	3	6	10	8	2	3	5,33	1988	18	3	1	1	8	10	6	4,83	10,17	1,00	0,263	
51 São Domingos	12,73	330,53	3,03	-	T	3	6	10	8	2	5	5,67	1977	29	3	1	1	6	10	6	4,50	10,17	1,00	0,263	
52 Valério	19,90	180,00	2,02	-	T	3	6	10	8	2	3	5,33	1996	10	7	1	1	3	10	6	4,67	10,00	1,00	0,260	
53 Santa Maria	11,00	557,00	5,86	-	T	3	6	10	8	2	3	5,33	1999	7	7	1	1	2	10	3	4,00	9,33	1,00	0,247	
54 Do Coronel	16,40	440,00	1,77	-	T	3	3	10	8	2	8	5,67	1946	60	2	1	1	8	4	6	3,67	9,33	1,00	0,247	
55 Adatao Bezerra	14,00	117,00	5,25	100	T	3	6	10	8	2	8	6,17	1984	22	3	1	1	1	4	6	2,67	8,83	1,00	0,237	
<b>Média =</b>						<b>5,2</b>	<b>5,8</b>	<b>9,6</b>	<b>5,4</b>					<b>15,1</b>	<b>5,5</b>		<b>1,0</b>	<b>3,3</b>	<b>5,2</b>	<b>5,6</b>	<b>3,7</b>				

AP - Alvenaria de Pedra; CCR - Concreto Compactado a Rolo; T - Terra; TE - Terra e Enrocamento

TABELA B.4.3 - Aplicação da Metodologia da COGERH

TABELA B.4.3 - Aplicação da Metodologia da COGERH

Barragem Estadual	P - Periculosidade										V - Vulnerabilidade										I - Importância			P	V	I	PR	Potencial de Risco	Classe
	Altura (m)	Extensão (m)	Dimensão (1)	Capacidade (hm3)	Volume (2)	Tipo	Tipo (3)	Tipo de Fundação (4)	Vazão de projeto	Vazão de projeto (5)	Ano de Construção	Idade (anos)	Tempo de Operação (6)	Existência de Projeto "as built"(7)	Confiabilidade das Estruturas Vertedouras (8)	Tomada de Água (9)	Percolação (10)	Deformações (11)	Deterioração (12)	Volume Útil (13)	População à Jusante (14)	Custo (15)							
1 Olho d'água	25,30	383,00	6	21,00	3	T	10	10	1000	2	1998	8	2	5	3	3	10	10	10	1,20	2,5	1,2	9,0	41,0	1,63	40,8	Médio	B	
2 Jaburu I	47,00	770,00	10	230,00	7	T	10	4	Decamilenar	2	1983	23	1	1	10	3	1	0	1	2,00	1,00	1,5	33,0	17,0	1,50	37,5	Normal	C	
3 Pacoti	27,00	1.600,00	6	370,00	7	T	10	4	Decamilenar	2	1981	25	1	5	3	2	1	0	1	2,00	2,5	1,5	29,0	7,0	2,00	36,0	Normal	C	
4 Castro	25,90	606,00	6	63,90	3	T	10	5	Decamilenar	1	1996	10	1	3	9	3	4	2	7	1,00	2,00	1,00	25,0	29,0	1,33	36,0	Normal	C	
5 Cupim	10,00	350,00	3	4,55	1	T	10	5	100	10	1970	36	0	4	7	5	1	2	6	1,00	2,00	1,00	26,0	25,0	1,33	34,0	Normal	C	
6 Pacajus	15,00	1.960,00	6	240,00	7	T	10	4	Decamilenar	2	1990	16	1	5	3	2	1	1	7	2,00	2,0	1,5	29,0	6,0	1,83	32,1	Normal	C	
7 Vieira	22,50	340,00	6	20,96	3	T	10	5	1000	2	1988	18	1	5	10	2	1	0	3	1,00	2,00	1,00	26,0	22,0	1,33	32,0	Normal	C	
8 Canafístula	14,80	850,00	3	13,11	3	T	10	5	-	4	1992	14	1	5	3	6	6	10	7	1,00	1,00	1,00	25,0	38,0	1,00	31,5	Normal	C	
9 Rosário	20,80	670,00	6	47,20	3	T	10	5	Decamilenar	1	2001	2	3	3	6	2	1	0	1	1,40	2,00	1,2	25,0	16,0	1,53	31,4	Normal	C	
10 Aracoiaíba	35,00	2.000,00	6	170,70	3	T	10	5	Decamilenar	1	2002	4	3	3	1	5	1	0	3	1,00	2,00	1,5	25,0	16,0	1,50	30,8	Normal	C	
11 Quandú	19,50	195,00	3	4,00	1	T	10	5	100	4	1990	16	1	7	8	2	9	0	7	1,20	1,00	1,00	23,0	34,0	1,07	30,4	Normal	C	
12 Acarape do Meio	33,00	267,50	6	31,50	3	AP	6	1	1000	2	1924	82	0	5	3	2	1	6	0	1,50	2,5	1,2	18,0	17,0	1,73	30,3	Normal	C	
13 São Domingos	12,73	330,53	3	3,03	1	T	10	5	1000	2	1977	29	1	7	7	5	6	7	7	1,00	1,00	1,00	21,0	10,0	1,00	30,0	Normal	C	
14 Do Coronel	16,40	440,00	3	1,77	3	T	10	4	100	10	1946	60	0	7	6	5	4	2	5	1,00	1,00	1,00	30,0	29,0	1,00	29,5	Normal	C	
15 Souza	19,90	660,00	3	30,84	3	T	10	10	Decamilenar	1	1999	7	2	3	2	2	1	0	4	1,00	2,00	1,2	27,0	14,0	1,40	28,7	Normal	C	
16 Adauto Bezerra	14,00	117,00	3	5,25	2	T	10	5	1000	2	1984	22	1	7	6	5	6	2	8	1,00	1,00	1,00	22,0	35,0	1,00	28,5	Normal	C	
17 Capitão Mor	22,00	180,00	6	6,31	2	T	10	5	-	4	1988	18	1	7	6	5	4	2	5	1,00	1,00	1,00	27,0	30,0	1,00	28,5	Normal	C	
18 Gangorra	20,66	1.033,00	6	46,20	3	T	10	5	Decamilenar	1	1999	7	2	3	2	5	1	0	2	1,00	2,00	1,2	25,0	15,0	1,40	28,0	Normal	C	
19 Colina	11,80	267,00	3	3,25	1	T	10	5	100	10	1988	18	1	4	6	3	4	6	3	1,00	1,00	1,00	29,0	27,0	1,00	28,0	Normal	C	
20 Sítios Novos	21,50	1.818,00	6	123,20	3	T	10	5	Decamilenar	1	1999	7	2	3	3	2	1	0	1	1,00	2,00	1,5	25,0	12,0	1,50	27,8	Normal	C	
21 Santa Maria	11,00	557,00	3	5,86	3	T	10	4	-	2	1999	7	2	5	6	5	6	2	7	1,00	1,00	1,00	22,0	33,0	1,00	27,5	Normal	C	
22 Itaipã	18,00	436,00	3	77,50	3	T	10	5	Decamilenar	1	2001	5	2	3	3	2	6	0	1	1,00	2,00	1,2	22,0	17,0	1,40	27,3	Normal	C	
23 Trapaiá I	13,50	295,00	3	2,01	1	T	10	5	100	4	1985	21	1	7	3	5	6	2	7	1,00	1,00	1,00	23,0	31,0	1,00	27,0	Normal	C	
24 Valério	19,90	180,00	3	2,02	1	T	10	5	100	10	1996	10	1	7	8	3	1	2	3	1,00	1,00	1,00	29,0	25,0	1,00	27,0	Normal	C	
25 Arneiroz II	34,20	1.161,00	6	197,00	3	T	10	5	Decamilenar	1	2005	1	3	3	1	1	1	0	1	1,00	2,00	1,5	25,0	10,0	1,50	26,3	Normal	C	
26 Muquém	27,60	356,00	6	47,65	3	T	10	5	Decamilenar	1	2000	6	2	3	3	2	1	0	3	1,00	2,00	1,00	25,0	14,0	1,33	26,0	Normal	C	
27 Sucesso	10,20	498,00	3	10,00	3	T	10	5	100	10	1988	18	1	7	2	3	4	1	3	1,00	1,00	1,00	31,0	21,0	1,00	26,0	Normal	C	
28 Cachoeira	25,50	273,00	6	34,33	3	T	10	5	Decamilenar	1	2000	6	2	3	2	2	1	1	1	1,00	2,00	1,00	25,0	12,0	1,33	24,7	Baixo	D	
29 Barra Velha	17,51	387,00	3	99,50	3	T	10	10	Decamilenar	1	1999	7	2	3	1	2	4	3	3	1,00	1,00	1,2	27,0	18,0	1,07	24,0	Baixo	D	
30 Trapaiá II	27,40	270,00	6	18,19	3	T	10	5	1000	2	1992	14	1	7	6	3	1	2	2	1,00	1,00	1,00	26,0	22,0	1,00	24,0	Baixo	D	
31 São José I	10,70	230,00	3	7,67	2	T	10	4	-	4	1988	18	1	7	3	5	4	0	3	1,00	1,00	1,00	23,0	23,0	1,00	23,0	Baixo	D	
32 Tatujuba	16,60	149,80	3	2,72	1	T	10	5	-	4	1999	7	2	7	3	3	1	0	7	1,00	1,00	1,00	23,0	23,0	1,00	23,0	Baixo	D	
33 Gavião	16,00	668,00	3	32,90	3	T	10	5	Decamilenar	1	1974	32	0	5	2	2	1	0	1	1,000	2,5	1	22,0	8,0	1,50	22,5	Baixo	D	
34 Catucinzenta	16,25	1.055,00	3	27,13	3	T	10	5	Decamilenar	1	2002	4	3	3	1	2	1	0	1	1,00	2,00	1,00	22,0	11,0	1,33	22,0	Baixo	D	
35 Malcozinhado	18,50	755,00	3	37,84	3	T	10	5	Decamilenar	1	2003	3	3	3	1	2	1	0	1	1,00	2,00	1,00	22,0	11,0	1,33	22,0	Baixo	D	
36 Carnaubal	18,35	760,00	3	87,70	3	T	10	4	1000	2	1990	16	1	5	2	2	1	0	1	1,00	2,5	1,2	20,0	8,0	1,57	21,9	Baixo	D	
37 Flor do Campo	21,14	697,80	6	111,30	3	T	10	10	Decamilenar	1	1999	7	2	3	1	2	1	0	2	1,00	1,00	1,2	30,0	11,0	1,07	21,9	Baixo	D	
38 Ubaldinho	18,00	475,00	3	32,00	3	T	10	10	Decamilenar	1	1998	8	2	3	1	2	3	0	1	1,00	1,00	1,2	27,0	12,0	1,07	20,8	Baixo	D	
39 Potiretama	11,80	375,00	3	6,33	2	T	10	5	1000	2	1992	14	1	7	6	2	1	0	2	1,00	1,00	1,00	22,0	19,0	1,00	20,5	Baixo	D	
40 Hipólito	14,95	222,36	3	6,54	2	T	10	5	1000	2	1975	31	0	7	2	5	1	0	3	1,00	1,00	1,00	22,0	18,0	1,00	20,0	Baixo	D	
41 Jerimum	23,20	385,00	6	20,50	3	TE	8	5	Decamilenar	1	1996	10	1	3	5	2	2	2	2	1,00	1,00	1,00	23,0	17,0	1,00	20,0	Baixo	D	
42 Parambu	20,80	278,00	6	8,53	3	T	10	4	1000	2	1985	21	1	5	1	2	1	0	2	1,00	1,00	1,2	25,0	12,0	1,07	19,7	Baixo	D	
43 Arrebita	17,30	464,00	3	16,60	3	T	10	5	1000	2	1992	14	1	5	6	2	1	0	1	1,00	1,00	1,00	23,0	16,0	1,00	19,5	Baixo	D	
44 São José II	19,00	330,00	3	29,14	3	T	10	5	1000	2	1992	14	1	7	3	2	2	0	1	1,00	1,00	1,00	23,0	16,0	1,00	19,5	Baixo	D	
45 Pirabitu	18,00	1.650,00	4	74,00	3	T	10	7	1000	2	2000	6	2	3	0	2	2	0	1	1,00	1,00	1,2	26,0	10,0	1,07	19,2	Baixo	D	
46 Riachão	22,00	600,00	6	46,95	3	T	10	5	1000	2	1981	25	1	5	0	2	2	0	0	1,00	1,00	1,2	26,0	10,0	1,07	19,2	Baixo	D	
47 Angicos	18,90	1.367,00	3	56,05	3	T	10	5	Decamilenar	1	1996	10	1	3	3	2	2	2	3	1,00	1,00	1,00	22,0	16,0	1,00	19,0	Baixo	D	
48 Carmina	19,00	770,00	3	13,32	3	T	10	5	Decamilenar	1	2002	4	3	3	1	2	6	0	1	1,00	1,00	1,00	22,0	16,0	1,00	19,0	Baixo	D	
49 Bengué	23,61	487,10	6	19,56	3	T	10	4	Decamilenar	1	2000	6	2	3	2	2	1	0	4	1,00	1,00	1,00	24,0	14,0	1,00	19,0	Baixo	D	
50 Monsenhor Tabosa	23,10	315,00	6	12,10	3	T	10	5	Decamilenar	1	1999	7	2	3	2	2	2	0	1	1,00	1,00	1,00	25,0	12,0	1,00	18,5	Baixo	D	
51 Faé	20,00	329,00	3	23,40	3	T	10	5	Decamilenar	1	2004	2	3	3	1	2	1	0	2	1,00	1,00	1,00	22,0	12,0	1,00	17,0	Baixo	D	
52 Canoas	50,00	116,00	6	69,25	3	CCR	6	1	Decamilenar	1	1999	7	2	5	6	1	4	2	3	1,00	2,00	1,5	16,0	6,0	1,50	16,5	Baixo	D	
53 Cauhupe	11,37	1.298,00	3	11,00	3	T	8	5	Decamilenar	1	1998	8	2	3	1	2	1	0	2	1,00	1,00	1,00	20,0	11,0	1,00	15,5	Baixo	D	
54 Cipoada	20,80	1.130,00	4	86,00	3	T	10	4	1000	2	1992	14	1	5	3	2	1	0	6	1,00									

TABELA B.5.1 - Aplicação da Metodologia do Escore de Risco

TABELA B.5.1 - Aplicação da Metodologia do Escore de Risco (Er)

Barragem	Município	Propr.	Cap. (hm <sup>3</sup> )	Altura (m)	Extensão (m)	Periculosidade												Vulnerabilidade										V	Class. Da Vulnerabilidade	SOMA S= (P+V)	Danos Econômicos e Perdas de Vida (D)	Escore de Risco (S+2D)/5	Classificação Geral
						Peso Altura	Peso Extensão	Média (1P)	Volume (2P)	Material da Barragem	Tipo (3P)	Sistema de Drenagem Interna (4P)	Tipo de Fundação (5P)	Vazio de projeto	Vazio de projeto (6P)	p	Classificação da Periculosidade	Ano de Construção	Idade (anos)	Tempo de Operação (1V)	Informação de Projeto (2V)	Confabilidade das Estruturas Vertedouras (3V)	Tomada de Água/ Descarga de Fundo (4V)	Fugas d'água (5V)	Deformações/ Drenagem do Coroamento (6V)	Deterioração dos taludes e Paramentos (7V)							
1	Olho d'água	Várzea Alegre	Estado	21,00	25,30	683,00	6	5	5,5	3	T	10	2	8	1000	2	0,330	Sign.	1998	9	5	2	2	3	9	9	9	0,684	Elev.	1,01	0,9	0,704	Muito Alto
2	Pacoti	Itaitinga	Estado	370,00	27,00	1.600,00	6	10	8,0	9	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,536	Sign.	1981	26	3	3	0	2	4	0	0	0,211	Moder.	0,75	1,0	0,687	Alto
3	Araras	Varjota	DNOCS	891,00	38,00	2.780,00	8	10	9,0	9	TE	8	1	2	100	2	0,375	Sign.	1958	49	4	2	4	2	0	4	4	0,351	Moder.	0,73	1,0	0,681	Alto
4	Gavião	Itaitinga	Estado	32,90	16,00	668,00	2	5	3,5	4	T	10	1	2	10000	1	0,384	Sign.	1974	33	4	5	1	2	4	0	0,281	Moder.	0,66	1,0	0,666	Alto	
5	Pacajus	Pacajús	Estado	240,00	15,00	1.960,00	2	10	6,0	9	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,500	Sign.	1990	17	3	3	0	2	0	1	1	0,158	B	0,66	1,0	0,664	Alto
6	Banabuiu	Banabuiu	DNOCS	1.601,00	37,70	824,00	8	8	8,0	9	T	10	1	2	100	2	0,357	Sign.	1966	41	4	3	0	5	0	4	4	0,281	Moder.	0,64	1,0	0,659	Alto
7	Orós	Orós	DNOCS	1.940,00	54,00	670,00	10	3	6,5	9	T	10	1	2	1000	2	0,330	Sign.	1962	45	4	5	4	1	0	0	0	0,246	Moder.	0,58	1,0	0,644	Alto
8	Jaburu I	Tiangúá	Estado	230,00	47,00	770,00	10	8	9,0	9	T	10	1	4	Decamilenar	1	0,607	Elev.	1983	24	3	2	1	3	1	0	1	0,193	B	0,80	0,8	0,600	Alto
9	Sítos Novos	Caucaia	Estado	123,20	21,50	1.818,00	6	10	8,0	7	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,518	Sign.	1999	8	5	1	1	2	4	0	0	0,228	Moder.	0,75	0,8	0,586	Alto
10	Arneiroz II	Arneiroz	Estado	197,00	34,20	1.161,00	8	9	8,5	8	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,545	Sign.	2005	2	8	1	1	1	0	0	0	0,193	B	0,74	0,8	0,584	Alto
11	Gangorra	Granja	Estado	46,20	20,66	1.033,00	6	9	7,5	4	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,455	Sign.	1999	8	5	1	1	5	4	0	0	0,281	Moder.	0,74	0,8	0,584	Alto
12	Castro	Itaipuna	Estado	63,90	25,90	606,00	6	5	5,5	5	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,420	Sign.	1996	11	5	1	0	3	4	4	1	0,316	Moder.	0,74	0,8	0,584	Alto
13	Vieirão	Boa Viagem	DNOCS	20,96	22,50	340,00	6	3	4,5	3	T	10	2	2	1000	2	0,420	Sign.	1988	19	3	5	2	2	1	0	4	0,298	Moder.	0,72	0,8	0,579	Alto
14	Riachão	Itaitinga	Estado	46,95	22,00	600,00	6	5	5,5	4	T	10	1	2	1000	2	0,438	Sign.	1981	26	3	3	3	2	4	0	0	0,263	Moder.	0,70	0,8	0,575	Alto
15	Acarape do Meio	Redenção	Estado	31,50	33,00	267,50	8	3	5,5	4	AP	6	1	1	1000	2	0,348	Sign.	1924	83	8	5	2	0	0	0	0,298	Moder.	0,65	0,8	0,562	Alto	
16	Carauari	Cratéis	Estado	87,70	17,00	742,00	5	8	6,5	5	T	10	1	2	1000	2	0,438	Sign.	1990	17	3	5	0	2	0	0	0	0,175	B	0,61	0,8	0,553	Alto
17	Jaburu II	Cratéis	Estado	127,00	16,20	1.054,00	5	9	7,0	7	T	10	7	2	1000	4	0,589	Elev.	1984	23	3	8	2	4	1	1	1	0,368	Moder.	0,96	0,5	0,489	Moderado
18	Aracoiaba	Aracoiaba	Estado	170,70	35,00	2.000,00	8	10	9,0	8	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,554	Sign.	2002	5	8	1	5	2	0	0	1	0,351	Moder.	0,90	0,5	0,476	Moderado
19	Caracas	Camindé	Estado	9,63	17,00	636,00	5	5	5,0	1	T	10	7	2	100	6	0,554	Sign.	1986	21	3	8	3	2	4	9	4	0,579	Sign.	1,13	0,3	0,433	Moderado
20	Faç	Quixeló	Estado	23,40	20,00	329,00	6	3	4,5	3	T	10	1	2	Decamilenar	1	0,384	Sign.	2004	3	8	1	1	2	0	0	4	0,281	Moder.	0,66	0,5	0,416	Moderado
21	São Domingos	Caridade	Estado	3,03	12,73	330,53	2	3	2,5	1	T	10	6	2	1000	2	0,420	Sign.	1977	30	3	8	2	5	4	9	0,614	Sign.	1,03	0,3	0,408	Moderado	
22	Barra Velha	Independência	Estado	99,50	17,51	387,00	5	3	4,0	5	T	10	1	5	Decamilenar	1	0,464	Sign.	1999	8	5	1	1	2	0	0	0	0,158	B	0,62	0,5	0,406	Moderado
23	Sucesso	Tamboril	Estado	10,00	10,20	498,00	2	5	3,5	1	T	10	6	2	100	10	0,580	Elev.	1988	19	3	8	2	3	4	0	4	0,421	Moder.	1,00	0,3	0,400	Moderado
24	Capitão Mor	Pedras Brancas	Estado	6,31	22,00	180,00	6	1	3,5	1	T	10	7	2	100	6	0,527	Sign.	1988	19	3	8	3	5	4	0	4	0,474	Sign.	1,00	0,3	0,400	Moderado
25	Valério	Altaneira	Estado	2,02	19,90	180,00	5	1	3,0	1	T	10	6	2	100	6	0,500	Sign.	1996	11	5	8	2	3	0	4	4	0,456	Moder.	0,96	0,3	0,389	Moderado
26	Cipoada	Morada Nova	Estado	86,00	20,80	1.130,00	6	9	7,5	5	T	10	7	2	1000	2	0,563	Sign.	1992	15	5	5	2	2	0	4	4	0,386	Moder.	0,95	0,3	0,387	Moderado
27	Colina	Quiterianópolis	Estado	3,25	11,50	267,00	2	3	2,5	1	T	10	7	2	100	6	0,509	Sign.	1988	19	3	8	5	3	4	1	1	0,439	Moder.	0,95	0,3	0,387	Moderado
28	São José I	Boa Viagem	Estado	7,67	10,70	230,00	2	3	2,5	1	T	10	6	2	-	6	0,491	Sign.	1988	19	3	8	2	5	4	0	4	0,456	Moder.	0,95	0,3	0,387	Moderado
29	Cupim	Independência	Estado	4,55	10,00	350,00	1	3	2,0	1	T	10	7	2	100	6	0,500	Sign.	1970	37	4	8	3	5	4	0	1	0,439	Moder.	0,94	0,3	0,385	Moderado
30	Canafistula	Iracema	Estado	13,11	14,80	850,00	2	8	5,0	2	T	10	1	2	100	6	0,464	Sign.	1992	15	5	8	3	6	0	4	1	0,474	Sign.	0,94	0,3	0,384	Moderado
31	Pau Preto	Potengi	DNOCS	1,77	7,74	241,00	1	1	1,0	1	T	10	10	10	100	6	0,393	Sign.	1990	17	3	8	4	4	4	4	4	0,544	Sign.	0,94	0,3	0,384	Moderado
32	Potiretama	Potiretama	Estado	6,33	11,80	375,00	2	3	2,5	1	T	10	6	2	100	6	0,491	Sign.	1992	15	5	8	1	2	4	4	1	0,439	Moder.	0,93	0,3	0,382	Moderado
33	Trapíá II	Coreaú	Estado	18,19	27,40	270,00	6	3	4,5	2	T	10	6	2	1000	2	0,473	Sign.	1992	15	5	8	2	3	4	0	4	0,456	Moder.	0,93	0,3	0,382	Moderado
34	Tatajuba	Icó	Estado	2,72	16,60	149,80	5	1	3,0	1	T	10	6	2	100	6	0,500	Sign.	1999	8	5	8	2	3	4	1	1	0,421	Moder.	0,92	0,3	0,380	Moderado
35	Poço Verde	Itaipoca	DNOCS	13,65	14,00	750,00	2	8	5,0	2	T	10	1	2	100	6	0,179	B	1955	52	8	8	4	4	4	4	9	0,719	Elev.	0,90	0,3	0,374	Moderado
36	Hipólito	Acarape	Estado	6,54	14,95	222,36	2	3	2,5	1	T	10	7	2	1000	2	0,438	Sign.	1975	32	4	8	3	5	4	0	1	0,439	Moder.	0,88	0,3	0,369	Baixo
37	São José II	Piquet Carneiro	Estado	29,14	19,00	330,00	5	3	4,0	3	T	10	6	2	1000	2	0,482	Sign.	1992	15	5	5	2	2	0	4	4	0,386	Moder.	0,87	0,3	0,367	Baixo
38	Mundaú	Uruburetama	DNOCS	21,30	36,30	444,00	8	3	5,5	3	T	10	1	2	100	6	0,205	B	1988	19	3	5	1	5	0	0	0	0,246	Moder.	0,45	0,5	0,363	Baixo
39	Tigre	Solonópole	Estado	20,00	15,80	270,00	5	3	4,0	2	T	10	6	2	100	6	0,536	Sign.	1991	16	3	5	2	6	0	0	1	0,298	Moder.	0,83	0,3	0,358	Baixo
40	Santa Maria	Ereré	Estado	5,86	11,00	557,00	2	5	3,5	1	T	10	2	2	100	6	0,438	Sign.	1999	8	5	5	1	5	4	1	1	0,386	Moder.	0,82	0,3	0,356	Baixo
41	Prazeres	Barro	DNOCS	32,50	48,80	255,00	8	1	4,5	4	T	10	3	2	1000	2	0,241	B	1988	19	3	5	0	1	1	0	0	0,175	B	0,42</			

**APÊNDICE C - Aplicação da Teoria dos Números Difusos**

TABELA C.1 - Números Difusos do BLe para o Critério 1: (CeNP/NPB)

TABELA C.2 - Números Difusos do BLe para o Critério 2: BLe



TABELA C.1 - Números Difusos do BLe para o Critério 1: (CeNP/NPB)

TABELA C.1 - Números Difusos do BLE para o Critério 1: (CeNP/NPB).

Barragem	Altura (m)	Extensão (m)	Cap. (hm <sup>3</sup> )	Tipo de Barragem	Propr.	(I) Custo da Recuperação da Ruptura - CRrup (R\$)	(C0,C1,C2,C3,C4)	Do	D1	D2	D3	(Ia) CeNP (R\$)	CeNP Acumulado	PRA	Simulação (aumento da PRA em 10x)	Ao	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	
Z							1	1,5	1,375	1,250	1,125				1	0,1	0,325	0,55	0,775	1	10	7,75	5,5	3,25	
1	ITAPEBUSSU	13,40	684,00	7,64	T	DNOCS	2.422.050,00	2.422.050,00	3.633.075,00	3.330.318,75	3.027.562,50	2.724.806,25	200,00	200,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
2	ORÓS	54,00	670,00	1.940,00	T	DNOCS	34.425.000,00	34.425.000,00	51.637.500,00	47.334.375,00	43.031.250,00	38.728.125,00	200,00	400,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
3	CATUCINZENTA	16,25	1.055,00	27,13	T	Estado	3.458.203,13	3.458.203,13	5.187.304,69	4.755.029,30	4.322.753,91	3.890.478,52	500,00	900,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
4	PARAMBU	20,80	278,00	8,53	T	Estado	3.053.107,20	3.053.107,20	4.579.660,80	4.198.022,40	3.816.384,00	3.434.745,60	600,00	1.500,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
5	ARNEIROZ II	34,20	1.161,00	197,00	T	Estado	14.184.450,00	14.184.450,00	21.276.675,00	19.503.618,75	17.730.562,50	15.957.506,25	200,00	1.700,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
6	CARNAUBAL	17,00	742,00	87,69	T	Estado	3.761.250,00	3.761.250,00	5.641.875,00	5.171.718,75	4.701.562,50	4.231.406,25	200,00	1.900,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
7	ROSÁRIO	20,80	670,00	47,20	T	Estado	5.491.200,00	5.491.200,00	8.236.800,00	7.550.400,00	6.864.000,00	6.177.600,00	200,00	2.100,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
8	CACHOEIRA	25,50	270,00	34,33	T	Estado	4.363.368,75	4.363.368,75	6.545.053,13	5.999.632,03	5.454.210,94	4.908.789,84	200,00	2.300,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
9	PRAZERES	48,80	255,00	32,50	T	DNOCS	14.410.152,00	14.410.152,00	21.615.228,00	19.813.959,00	18.012.690,00	16.211.421,00	200,00	2.500,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
10	UBALDINHO	18,00	475,00	31,80	T	Estado	3.975.750,00	3.975.750,00	5.963.625,00	5.466.656,25	4.969.687,50	4.472.718,75	200,00	2.700,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
11	ACARAPE DO MEIO	33,00	267,50	31,50	AP	Estado	10.169.280,00	10.169.280,00	15.253.920,00	13.982.760,00	12.711.600,00	11.440.440,00	200,00	2.900,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
12	PIRABIBU	18,00	1.650,00	74,00	T	Estado	4.185.000,00	4.185.000,00	6.277.500,00	5.754.375,00	5.231.250,00	4.708.125,00	1.200,00	4.100,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
13	MUQUEM	27,60	355,23	47,64	T	Estado	6.676.760,99	6.676.760,99	10.015.141,48	9.180.546,36	8.345.951,24	7.511.356,11	1.300,00	5.400,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
14	POÇO DA PEDRA	31,40	797,00	52,00	T	DNOCS	12.034.050,00	12.034.050,00	18.051.075,00	16.546.818,75	15.042.562,50	13.538.306,25	1.400,00	6.800,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
15	HIPÓLITO	14,95	222,36	6,54	T	Estado	1.317.662,28	1.317.662,28	1.976.493,42	1.811.785,63	1.647.077,85	1.482.370,06	1.500,00	8.300,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
16	BARRA VELHA	17,51	387,00	99,50	T	Estado	3.076.302,57	3.076.302,57	4.614.453,86	4.229.916,03	3.845.378,21	3.460.840,39	400,00	8.700,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
17	RIACHÃO	22,00	600,00	46,95	T	Estado	6.105.000,00	6.105.000,00	8.394.375,00	7.631.250,00	6.868.125,00	6.177.000,00	1.600,00	10.300,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
18	CAUIHIPE	11,37	1.298,00	12,00	T	Estado	1.795.465,13	1.795.465,13	2.693.197,69	2.468.764,55	2.244.331,41	2.019.898,27	400,00	10.700,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
19	BENGUÊ	23,61	480,00	19,56	T	Estado	6.700.234,68	6.700.234,68	10.050.352,02	9.212.822,69	8.375.293,35	7.537.764,02	2.400,00	13.100,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
20	GAVIÃO	16,00	668,00	32,90	T	Estado	3.360.000,00	3.360.000,00	4.620.000,00	4.200.000,00	3.780.000,00	3.400.000,00	2.000,00	15.100,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
21	SANTO ANTONIO	13,20	135,00	0,83	T	Estado	636.174,00	636.174,00	954.261,00	874.739,25	795.217,50	715.695,75	4.300,00	19.400,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
22	SÃO JOSÉ II	19,00	330,00	29,14	T	Estado	3.056.625,00	3.056.625,00	4.584.937,50	4.202.859,38	3.820.781,25	3.438.703,13	5.100,00	24.500,00	1,00E-03	1,00E-03	9,99E-05	3,25E-04	5,49E-04	7,74E-04	9,99E-04	9,99E-03	7,74E-03	5,49E-03	3,25E-03
23	MALCOZINHADO	18,50	755,00	37,84	T	Estado	4.405.312,50	4.405.312,50	6.607.968,75	6.057.304,69	5.506.640,63	4.955.976,56	2.300,00	26.800,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
24	FAÉ	20,00	329,00	23,40	T	Estado	3.355.800,00	3.355.800,00	5.033.700,00	4.614.225,00	4.194.750,00	3.775.275,00	2.900,00	29.700,00	1,00E-05	1,00E-05	9,00E-07	2,93E-06	4,95E-06	6,98E-06	9,00E-06	9,00E-05	6,98E-05	4,95E-05	2,93E-05
25	MONS. TABOSA	23,10	315,00	12,10	T	Estado	4.218.550,88	4.218.550,88	6.327.826,31	5.800.507,45	5.273.188,59	4.745.869,73	2.900,00	32.600,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
26	CUPIM	10,00	350,00	4,55	T	Estado	997.500,00	997.500,00	1.496.250,00	1.371.562,50	1.246.875,00	1.122.187,50	3.200,00	35.800,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
27	DO CORONEL	16,40	440,00	1,70	T	Estado	3.095.664,00	3.095.664,00	4.643.496,00	4.256.538,00	3.869.580,00	3.482.622,00	3.300,00	39.100,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
28	MADEIRO	15,50	346,00	2,81	T	Estado	2.192.126,25	2.192.126,25	3.288.189,38	3.014.173,59	2.740.157,81	2.466.142,03	5.700,00	44.800,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
29	TATAJUBA	16,60	149,80	2,72	T	Estado	1.077.975,78	1.077.975,78	1.616.963,67	1.482.216,70	1.347.469,73	1.212.722,75	4.700,00	49.500,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
30	CARMINA	19,00	770,00	13,63	T	Estado	4.631.250,00	4.631.250,00	6.946.875,00	6.367.968,75	5.789.062,50	5.210.156,25	4.800,00	54.300,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
31	ITAUNA	18,00	436,00	77,50	T	Estado	3.649.320,00	3.649.320,00	5.473.980,00	5.017.815,00	4.561.650,00	4.105.485,00	5.000,00	59.300,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
32	POTIRETAMA	11,80	375,00	6,33	T	Estado	1.440.337,50	1.440.337,50	2.160.506,25	1.980.464,06	1.800.421,88	1.620.379,69	7.000,00	66.300,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
33	TRAPIA I	13,50	295,00	2,01	T	Estado	1.448.634,38	1.448.634,38	2.172.951,56	1.991.872,27	1.810.792,97	1.629.713,67	10.800,00	77.100,00	1,00E-03	1,00E-03	9,99E-05	3,25E-04	5,49E-04	7,74E-04	9,99E-04	9,99E-03	7,74E-03	5,49E-03	3,25E-03
34	SÃO DOMINGOS	12,73	330,53	3,04	T	Estado	1.457.634,08	1.457.634,08	2.186.451,12	2.004.246,86	1.822.042,60	1.639.838,34	29.400,00	106.500,00	1,00E-03	1,00E-03	9,99E-05	3,25E-04	5,49E-04	7,74E-04	9,99E-04	9,99E-03	7,74E-03	5,49E-03	3,25E-03
35	PACOTI	27,00	1.600,00	380,00	T	Estado	9.011.250,00	9.011.250,00	13.516.875,00	12.390.468,75	11.264.062,50	10.137.656,25	5.800,00	112.300,00	1,00E-04	1,00E-04	9,90E-06	3,22E-05	5,45E-05	7,67E-05	9,90E-05	9,90E-04	7,67E-04	5,45E-04	3,22E-04
36	FLOR DO CAMPO	21,14	697,80	111,30	T	Estado	5.661.820,50	5.661.820,50	8.492.730,75	7.785.003,19	7.077														

TABELA C.1 - Números Difusos do BLE para o Critério 1: (CeNP/NPB) (Continuação).

Barragem	Altura (m)	Extensão (m)	Cap. (hm³)	Tipo de Barragem	Propr.	µAo	µAo Acum.	µBo	µ zBo Acum.	µA1	µA1 Acum.	µB1	µB1 Acum.	µzA	µzA Acum.	µzB	µzB Acum.	µzA3	µzA3 Acum.	µzB3	µzB3 Acum.	µzA4	µzA4 Acum.	(1) x (2) Severidade Anual. = Dif. RRA x Custo do Arrombam.= prejuizo estimado	(3) Severidade Atualizada (n=15anos, Taxa= 6% a. a.)	(3) - (1a) Benefício Líquido equivalente (BLE)	Benefício Líquido Acumulado
1 ITAPEBUSSU	13,40	684,00	7,64	T	DNOCs	32,88	32,88	34.732,66	34.732,66	556,87	556,87	24.616,74	24.616,74	1.080,86	1.080,86	15.810,80	15.810,80	1.604,85	1.604,85	8.314,84	8.314,84	2.128,84	2.128,84	239,78	2.328,83	2.128,83	2.128,83
2 OROS	54,00	670,00	1.940,00	T	DNOCs	3.110,02	3.142,91	496.303,70	531.036,36	10.557,58	11.114,45	352.524,51	377.141,25	18.005,14	19.086,00	227.364,20	243.175,00	25.452,69	27.057,55	120.822,78	129.137,61	32.900,25	35.029,09	3.408,08	33.100,07	32.900,07	35.028,90
3 CATUCINZENTA	16,25	1.055,00	27,13	T	Estado	-167,49	2.975,42	49.376,85	580.413,21	580,67	11.695,12	34.933,35	412.074,60	1.328,82	20.414,82	22.360,22	265.535,22	2.076,97	29.134,52	11.657,48	140.795,10	2.825,12	37.854,21	342,36	3.325,11	2.825,11	37.854,01
4 PARAMBU	20,80	278,00	8,53	T	Estado	-306,44	2.668,98	43.434,25	623.847,46	354,08	12.049,20	30.682,66	442.757,26	1.014,59	21.429,41	19.582,36	285.117,59	1.675,10	30.809,62	10.133,35	150.928,44	2.335,62	40.189,83	302,26	2.935,60	2.335,60	40.189,61
5 ARNEIROZ II	34,20	1.161,00	197,00	T	Estado	-76,01	2.592,97	18.398,09	642.245,55	202,96	12.252,15	13.012,39	455.769,65	481,93	21.911,34	8.324,12	293.441,71	760,90	31.570,52	4.333,28	155.261,73	1.039,87	41.229,70	127,66	1.239,87	1.039,87	41.229,48
6 CARNAUBAL	17,00	742,00	87,69	T	Estado	-167,12	2.425,85	4.731,60	646.977,16	-93,15	12.159,01	3.303,49	459.073,15	-19,17	21.892,16	2.060,32	295.502,03	54,80	31.625,32	1.002,08	156.263,81	128,77	41.358,48	33,85	328,77	128,77	41.358,25
7 ROSÁRIO	20,80	670,00	47,20	T	Estado	-152,00	2.273,85	6.999,84	653.977,00	-44,00	12.115,00	4.914,89	463.988,04	63,99	21.956,16	3.099,93	298.601,92	171,99	31.797,31	1.554,96	157.818,77	279,99	41.638,47	49,42	479,99	279,99	41.638,24
8 CACHOEIRA	25,50	270,00	34,33	T	Estado	-161,86	2.211,99	5.521,08	659.498,08	-76,04	12.038,96	3.864,35	467.852,38	9,77	21.956,93	2.422,16	301.024,12	95,59	31.892,90	1.194,51	159.013,28	181,41	41.819,87	39,27	381,40	181,40	41.819,64
9 PRAZERES	48,80	255,00	32,50	T	DNOCs	-74,04	2.037,95	18.694,02	678.192,10	209,37	12.248,33	13.222,63	481.075,01	492,78	22.458,71	8.459,76	309.483,88	776,19	32.669,09	4.405,42	163.418,70	1.059,60	42.879,47	129,69	1.259,59	1.059,59	42.879,23
10 UBALDINHO	18,00	475,00	31,80	T	Estado	-165,25	1.872,70	5.012,85	683.204,95	-87,05	12.161,27	3.503,29	484.578,31	-8,86	22.449,85	2.060,32	311.673,10	69,33	32.738,42	1.070,63	164.489,33	147,52	43.027,00	35,78	347,52	147,52	43.026,76
11 ACARAPE DO MEIO	33,00	267,50	31,50	AP	Estado	-111,11	1.761,59	13.133,56	696.338,50	88,89	12.250,17	9.272,38	493.850,69	288,90	22.738,75	5.911,21	317.584,31	488,90	33.227,32	3.050,05	167.539,39	688,90	43.715,90	91,52	888,90	91,52	888,90
12 MIRABITU	18,00	1.650,00	74,00	T	Estado	-797,60	963,99	59.159,27	755.497,78	107,78	12.357,95	41.680,23	535.530,92	1.013,17	23.751,92	26.464,67	344.048,98	1.918,56	35.145,89	13.512,57	181.051,96	2.823,95	46.539,85	414,32	4.023,93	2.823,93	46.539,59
13 MUQUÊM	27,60	355,23	47,64	T	Estado	-658,02	305,97	94.997,36	850.495,14	786,44	13.144,39	67.111,25	602.642,17	2.230,90	25.982,82	42.836,29	386.885,27	3.675,36	38.821,25	22.172,48	203.224,44	5.119,82	51.659,68	661,00	6.419,79	5.119,79	51.659,38
14 POÇO DA PEDRA	31,40	797,00	52,00	T	DNOCs	-242,90	63,06	172.164,28	1.022.659,42	2.360,56	15.504,95	121.902,96	724.545,13	4.964,02	30.946,85	78.150,30	465.035,57	7.567,49	46.388,74	40.906,29	244.130,73	10.170,95	61.830,63	1.191,37	11.570,89	10.170,89	61.830,27
15 HIPÓLITO	14,95	222,36	6,54	T	Estado	-1.373,30	-1.310,24	17.504,33	1.040.163,75	-1.088,24	14.416,71	12.001,00	736.546,12	-803,17	30.143,67	7.210,32	472.245,89	-518,11	45.870,63	3.132,31	247.263,04	-233,04	61.597,58	130,45	1.266,95	-233,05	61.597,22
16 BARRA VELHA	17,51	387,00	99,50	T	Estado	-373,11	-1.683,35	3.633,53	1.043.797,28	-312,61	14.104,11	2.465,48	739.011,61	-252,10	29.891,57	1.448,70	473.694,59	-191,60	45.679,03	583,17	247.846,21	-131,10	61.466,49	268,90	2.689,90	-131,10	61.466,12
17 RIACHAO	22,00	600,00	46,95	T	Estado	-1.012,99	-2.696,34	86.450,98	1.130.248,26	307,77	14.411,88	60.952,89	799.964,49	1.628,54	31.520,10	38.756,70	512.451,29	2.949,30	48.628,33	19.862,43	267.708,64	4.270,07	65.736,55	604,40	5.870,03	4.270,03	65.736,15
18 CAUHIPE	11,37	1.298,00	12,00	T	Estado	-384,31	-3.080,65	1.954,14	1.132.202,40	-348,99	14.062,89	1.272,42	1.001.236,92	-313,68	31.206,42	678,98	513.130,27	-278,37	48.349,96	173,82	267.882,46	-243,06	65.493,49	16,16	156,94	-243,06	65.493,09
19 BENGUE	23,61	480,00	19,56	T	Estado	-1.755,76	-4.836,41	94.235,91	1.226.438,32	-306,22	13.756,66	66.251,76	867.488,68	1.143,32	32.349,74	41.891,46	555.021,73	2.592,86	50.942,81	21.155,00	289.037,46	4.042,39	69.535,89	663,32	6.442,36	4.042,36	69.535,45
20 GAVIAO	16,00	668,00	32,90	T	Estado	-1.676,93	-6,513,34	46.460,49	1.272.898,81	-950,02	12.806,64	32.427,14	899.915,82	-223,12	32.126,62	20.211,06	575.232,79	503,79	51.446,61	9.812,24	298.849,71	1.230,70	70.766,59	332,64	3.230,68	1.230,68	70.766,14
21 SANTO ANTÔNIO	13,20	135,00	0,83	T	Estado	-4.238,83	-10.752,17	4.875,39	1.277.774,20	-4.101,20	8.705,44	2.218,35	902.134,17	-3.965,57	28.163,05	-94,61	575.138,17	-3.825,94	-2.063,50	298.976,21	-3.688,31	67.078,28	62,60	611,69	-3.688,31	67.078,83	
22 SÃO JOSÉ II	19,00	330,00	29,14	T	Estado	-2.134,28	-12.886,45	439.757,58	1.717.531,78	4.538,58	13.244,02	310.934,24	1.213.068,41	11.211,44	39.374,50	198.793,06	773.931,23	17.884,31	65.504,98	103.334,04	400.120,25	24.557,17	91.635,45	3.053,57	29.657,02	24.557,02	91.634,84
23 MALCOZINHADO	18,50	755,00	37,84	T	Estado	-1.876,42	-14.762,88	61.236,79	1.778.768,57	-923,37	12.320,65	42.837,59	1.255.906,00	29,68	39.404,18	26.821,03	800.752,26	982,73	66.487,71	13.187,09	413.307,34	1.935,79	93.571,24	436,13	4.235,76	1.935,76	93.570,61
24 FAÉ	20,00	329,00	23,40	T	Estado	-2.870,67	-17.633,54	1.499,99	1.780.268,56	-2.804,67	9.515,99	225,83	1.256.131,83	-2.738,67	36.665,51	-883,34	799.868,92	-2.672,67	63.815,04	-1.827,50	411.479,84	-2.606,67	90.964,57	30,20	293,33	-2.606,67	90.963,94
25 MONS. TABOSA	23,10	315,00	12,10	T	Estado	-2.494,38	-20.127,92	57.943,17	1.838.211,73	-1.581,73	7.934,25	40.324,00	1.296.455,83	-669,08	35.996,43	24.986,45	824.855,38	243,56	64.058,61	11.930,52	423.410,36	1.156,21	92.120,78	417,64	4.056,19	1.156,19	92.120,13
26 CUPIM	10,00	350,00	4,55	T	Estado	-3.104,09	-23.232,01	11.186,71	1.849.398,44	-2.888,29	5.045,97	7.020,56	1.303.476,39	-2.672,49	33.323,94	3.393,91	828.249,29	-2.456,69	61.601,92	306,76	423.717,12	-2.240,89	89.879,90	98,75	959,11	-2.240,89	89.879,24
27 DO CORONEL	16,40	440,00	1,70	T	Estado	-3.002,35	-26.234,36	41.348,04	1.890.746,48	-2.332,63	2.713,34	28.418,71	1.331.895,10	-1.662,91	31.661,04	17.163,68	845.412,97	-993,18	60.608,73	7.582,96	431.300,08	-323,46	89.556,43	306,47	2.976,52	-323,48	89.555,76
28 MADEIRO	15,50	346,00	2,81	T	Estado	-5.489,22	-31.723,58	25.916,52	1.916.663,00	-5.014,98	-2.301,64	16.760,90	1.348.656,01	-4.540,73	27.120,31	8.790,91	854.203,87	-4.066,48	56.542,25	2.006,53	433.306,61	-3.592,23	85.964,20	217,02	2.107,76	-3.592,24	85.963,51
29 TATAJUBA	16,60	149,80	2,72	T	Estado	-4.596,35	-36.319,93	10.847,39	1.927.510,39	-4.363,14	-6.664,77	6.345,13	1.355.001,13	-4.129,93	22.990,38	2.425,89	856.629,76	-3.896,72	52.645,54	-910,32	432.396,28	-3.663,51	82.300,69	106,72	1.036,49	-3.663,51	82.300,00
30 CARMINA	19,00	770,00	13,63	T	Estado	-4.354,70	-40.674,63	61.995,43	1.989.505,82	-3.352,77	-10.017,54	42.652,59	1.397.653,72	-2.350,83	20.639,55	25.814,57	882.444,34	-1.348,90	51.296,63	11.481,39	443.877,67	-346,97	81.953,72	458,49	4.453,01	-346,99	81.953,01
31 ITAÚNA	18,00	436,00	77,50	T	Estado	-4.649,11	-45.323,74	47.633,29	2.037.139,11	-3.859,61	-13.877,15	32.391,56	1.430.045,28	-3.070,11	17.569,43	19.123,59	901.567,93	-2.280,61	49.016,02	7.829,36	451.707,03	-1.491,11	80.462,61	361,28	3.508,87	-1.491,13	80.461,87
32 POTIRETAMA	11,80	375,00	6,33	T	Estado	-6.861,51	-52.185,25	13.773,65	2.050.912,76	-6.549,90	-2.027,06	7.757,95	1.437.803,23	-6.238,30	11.331,13	2.521,26	904.089,18	-5.926,69	43.089,33	-1.936,42	449.770,61	-5.615,09	74.847,52	142,59	1.384,90	-5.615,10	74.846,78
33 TRAPIÁ I	13,50	295,00	2,01	T	Estado	-9.394,45	-61.579,70	200.032,53	2.250.945,29	-6.231,96	-26.659,02	138.978,94	1.576.782,18	-3.069,47	8.261,66	85.831,58	989.920,76	93,01	43.182,34	40.590,43	490.361,04	3.255,50	78.103,02	1.447,19	14.055,43	3.255,43	78.102,20
34 SÃO DOMINGOS	12,73	330,53	3,04	T	Estado																						

TABELA C.2 - Números Difusos do BLe para o Critério 2: BLe

TABELA C.2 - Números Difusos do BLe para o Critério 2: BLe.

Barragem	Altura (m)	Extensão (m)	Cap. (hm³)	Tipo de Barragem	Prop.	(I) Custo da Recuperação da Ruptura - CRrup (R\$)	(C0,C1,C2,C3,C4)	D0	D1	D2	D3	(Ia) CeNP (R\$)	CeNP Acumulado	Nível de Perigo da Barragem (NPB)	PRA	(2) Dif. da PRA	Ao	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3
Z						1	1,5	1,375	1,25	1,125							0,1	0,325	0,55	0,775	1	10	7,75	5,5	3,25
1 ARARAS	38,00	2.780,00	891,00	T	DNOCS	17.385.000,00	17.385.000,00	26.077.500,00	23.904.375,00	21.731.250,00	19.558.125,00	20.000,00	20.000,00	9	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
2 BANABUIÚ	37,70	824,00	1.601,00	T	DNOCS	17.120.512,50	17.120.512,50	25.680.768,75	23.540.704,69	21.400.640,63	19.260.576,56	20.400,00	40.400,00	13	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
3 CANOAS	48,80	116,50	69,25	CCR	Estado	8.705.178,24	8.705.178,24	13.057.767,36	11.969.620,08	10.881.472,80	9.793.325,52	37.500,00	77.900,00	10	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
4 OLHO D'ÁGUA	25,30	683,00	21,20	T	Estado	7.960.012,50	7.960.012,50	11.940.018,75	10.945.017,19	9.950.015,63	8.955.014,06	43.000,00	120.900,00	14	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
5 ORÓS	54,00	670,00	1.940,00	T	DNOCS	34.425.000,00	34.425.000,00	51.637.500,00	47.334.375,00	43.031.250,00	38.728.125,00	200,00	121.100,00	4	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
6 TRAPIÁ II	27,40	270,00	18,19	T	Estado	5.004.747,00	5.004.747,00	7.507.120,50	6.881.527,13	6.255.933,75	5.630.340,38	20.500,00	141.600,00	9	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
7 SÃO JOSÉ II	19,00	330,00	29,14	T	Estado	3.056.625,00	3.056.625,00	4.584.937,50	4.202.859,38	3.820.781,25	3.438.703,13	5.100,00	146.700,00	9	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
8 VIEIRÃO	22,50	340,00	20,96	T	Estado	4.331.812,50	4.331.812,50	6.497.718,75	5.956.242,19	5.414.765,63	4.873.289,06	27.400,00	174.100,00	10	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
9 POÇO DA PEDRA	31,40	797,00	52,00	T	DNOCS	12.034.050,00	12.034.050,00	18.051.075,00	16.546.818,75	15.042.562,50	13.538.306,25	1.400,00	175.500,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
10 SERROTA	22,00	426,00	4,57	T	DNOCS	5.201.460,00	5.201.460,00	7.802.190,00	7.152.007,50	6.501.825,00	5.851.642,50	42.000,00	217.500,00	19	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
11 ARACOÍABA	35,00	2.000,00	170,70	T	Estado	14.831.250,00	14.831.250,00	22.246.875,00	20.392.968,75	18.539.062,50	16.685.156,25	6.300,00	223.800,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
12 CARACAS	17,00	636,00	9,63	T	Estado	3.761.250,00	3.761.250,00	5.641.875,00	5.171.718,75	4.701.562,50	4.231.406,25	29.500,00	253.300,00	23	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
13 VALÉRIO	19,90	180,00	2,02	T	Estado	1.818.760,50	1.818.760,50	2.728.140,75	2.500.795,69	2.273.450,63	2.046.105,56	11.400,00	264.700,00	9	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
14 MUQUÊM	27,60	355,23	47,64	T	Estado	6.676.760,99	6.676.760,99	10.015.141,48	9.180.546,36	8.345.951,24	7.511.356,11	1.300,00	266.000,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
15 RIACHÃO	22,00	600,00	46,95	T	Estado	6.105.000,00	6.105.000,00	9.157.500,00	8.394.375,00	7.631.250,00	6.868.125,00	1.600,00	267.600,00	4	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
16 BENGUÊ	23,61	480,00	19,56	T	Estado	6.700.234,68	6.700.234,68	10.050.352,02	9.212.822,69	8.375.293,35	7.537.764,02	2.400,00	270.000,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
17 TRAPIÁ I	13,50	295,00	2,01	T	Estado	1.448.634,38	1.448.634,38	2.172.951,56	1.991.872,27	1.810.792,97	1.629.713,67	10.800,00	280.800,00	10	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
18 PACOTI	27,00	1.600,00	380,00	T	Estado	9.011.250,00	9.011.250,00	13.516.875,00	12.390.468,75	11.264.062,50	10.137.656,25	5.800,00	286.600,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
19 CATUCINZENTA	16,25	1.055,00	27,13	T	Estado	3.458.203,13	3.458.203,13	5.187.304,69	4.755.029,30	4.322.753,91	3.890.478,52	500,00	287.100,00	4	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
20 PIRABIBU	18,00	1.650,00	74,00	T	Estado	4.185.000,00	4.185.000,00	6.277.500,00	5.754.375,00	5.231.250,00	4.708.125,00	1.200,00	288.300,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
21 PARAMBU	20,80	278,00	8,53	T	Estado	3.053.107,20	3.053.107,20	4.579.660,80	4.198.022,40	3.816.384,00	3.434.745,60	600,00	288.900,00	4	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
22 ITAPEBUSSU	13,40	684,00	7,64	T	DNOCS	2.422.050,00	2.422.050,00	3.633.075,00	3.330.318,75	3.027.562,50	2.724.806,25	200,00	289.100,00	6	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
23 MALCOZINHADO	18,50	755,00	37,84	T	Estado	4.405.312,50	4.405.312,50	6.607.968,75	6.057.304,69	5.506.640,63	4.955.976,56	2.300,00	291.400,00	4	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
24 CAPITÃO MOR	22,00	180,00	6,00	T	Estado	2.197.800,00	2.197.800,00	3.296.700,00	3.021.975,00	2.747.250,00	2.472.525,00	19.800,00	311.200,00	10	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
25 GAVIÃO	16,00	668,00	32,90	T	Estado	3.360.000,00	3.360.000,00	5.040.000,00	4.620.000,00	4.200.000,00	3.780.000,00	2.000,00	313.200,00	4	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
26 MONS. TABOSA	23,10	315,00	12,10	T	Estado	4.218.550,88	4.218.550,88	6.327.826,31	5.800.507,45	5.273.188,59	4.745.869,73	2.900,00	316.100,00	5	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	3,25E-05	5,50E-05	7,75E-05	1,00E-04	1,00E-03	7,75E-04	5,50E-04	3,25E-04
27 PRAZERES	48,80	255,00	32,50	T	DNOCS	14.410.152,00	14.410.152,00	21.615.228,00	19.813.959,00	18.012.690,00	16.211.421,00	200,00	316.300,00	1	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-06	3,25E-06	5,50E-06	7,75E-06	1,00E-05	1,00E-04	7,75E-05	5,50E-05	3,25E-05
28 ARNEIROZ II	34,20	1.161,00	197,00	T	Estado	14.184.450,00	14.184.450,00	21.276.675,00	19.503.618,75	17.730.562,50	15.957.306,25	200,00	316.500,00	1	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-06	3,25E-06	5,50E-06	7,75E-06	1,00E-05	1,00E-04	7,75E-05	5,50E-05	3,25E-05
29 ACARAPE DO MEIO	33,00	267,50	31,50	AP	Estado	10.169.280,00	10.169.280,00	15.253.920,00	13.982.760,00	12.711.600,00	11.440.440,00	200,00	316.700,00	1	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-06	3,25E-06	5,50E-06	7,75E-06	1,00E-05	1,00E-04	7,75E-05	5,50E-05	3,25E-05
30 CANAFISTULA	14,80	850,00	13,11	T	Estado	2.908.200,00	2.908.200,00	4.362.300,00	3.998.775,00	3.635.250,00	3.271.725,00	27.700,00	344.400,00	10	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-04	3,25E-04	5,50E-04	7,75E-04	1,00E-03	1,00E-02	7,75E-03	5,50E-03	3,25E-03
31 ROSÁRIO	20,80	670,00	47,20	T	Estado	5.491.200,00	5.491.200,00	8.236.800,00	7.550.400,00	6.864.000,00	6.177.600,00	200,00	344.600,00	1	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-06	3,25E-06	5,50E-06	7,75E-06	1,00E-05	1,00E-04	7,75E-05	5,50E-05	3,25E-05
32 CACHOEIRA	25,50	270,00	34,33	T	Estado	4.363.368,75	4.363.368,75	6.545.053,13	5.999.632,03	5.454.210,94	4.908.789,84	200,00	344.800,00	1	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-06	3,25E-06	5,50E-06	7,75E-06	1,00E-05	1,00E-04	7,75E-05	5,50E-05	3,25E-05
33 UBALDINHO	18,00	475,00	31,80	T	Estado	3.975.750,00</																			

TABELA C.2 - Números Difusos do BLE para o Critério 2: Ble (Continuação).

Barragem	Altura (m)	Extensão (m)	Cap. (hm³)	Tipo de Barragem	Prop.	µzAo	µzAo Acum.	µzBo	µzBo Acum.	µzA1	µzA1 Acum.	µzB1	µzB1 Acum.	µz2A	µzA2 Acum.	µzB2	µzB2 Acum.	µzA3	µzA3 Acum.	µzB3	µzB3 Acum.	µzA4	µzA4 Acum.	(1) x (2) Severidade Anual = Dif. PRA x Custo do Arrombam. = prejuízo estimado	(3) Severidade Atualizada (n=15anos, Taxa= 6% a. a.)	(3) - (1a) Benefício Líquido equivalente (BLE)	Benefício Líquido Acumulado
1 ARARAS	38,00	2.780,00	891,00	T	DNOCs	-3.115,17	-3.115,17	2.512.725,03	2.512.725,03	34.875,71	34.875,71	1.779.290,08	1.779.290,08	72.866,58	72.866,58	1.140.832,31	1.140.832,31	110.857,46	110.857,46	597.351,73	597.351,73	148.848,34	148.848,34	17.385,00	168.847,45	148.847,45	148.847,45
2 BANABUIÚ	37,70	824,00	1.601,00	T	DNOCs	-3.772,04	-6.887,21	2.473.793,30	4.986.518,34	33.640,85	68.516,56	1.751.516,49	3.530.806,57	71.053,75	143.920,34	1.122.771,93	2.263.604,24	108.466,65	219.324,11	587.559,62	1.184.911,34	145.879,55	294.727,89	17.120,51	166.278,68	145.878,68	294.726,13
3 CANOAS	48,80	116,50	69,25	CCR	Estado	-29.045,27	-35.932,48	1.230.709,54	6.217.227,88	-10.022,13	58.494,44	863.457,19	4.394.263,76	9.001,02	152.921,36	543.762,71	2.807.366,94	28.024,16	247.348,27	271.626,08	1.456.537,42	47.047,30	341.775,19	8.705,18	84.546,86	47.046,86	341.772,99
4 OLHO D'ÁGUA	25,30	683,00	21,20	T	Estado	-35.269,00	-71.201,48	1.116.650,44	7.333.878,32	-17.874,24	40.620,20	780.835,00	5.175.098,76	-479,48	152.441,87	488.506,45	3.295.873,39	16.915,27	264.263,55	239.664,80	1.696.202,21	34.310,03	376.085,22	7.960,01	77.309,62	34.309,62	376.082,61
5 ORÓS	54,00	670,00	1.940,00	T	DNOCs	3.143,46	-68.058,02	501.318,89	7.835.197,21	10.666,24	51.286,44	356.087,38	5.531.186,14	-189,03	170.630,90	229.662,83	3.525.536,22	25.711,81	289.975,36	122.045,23	1.818.247,44	33.234,59	409.319,81	3.442,50	33.434,42	33.234,42	409.317,03
6 TRAPIÁ II	27,40	270,00	18,19	T	Estado	-15.639,24	-83.697,26	708.614,06	8.543.811,27	-4.702,53	46.583,91	497.474,78	6.028.660,92	6.234,18	176.865,08	313.677,28	3.839.213,50	17.170,89	307.146,25	157.221,55	1.975.469,00	28.107,60	437.427,42	5.004,75	48.607,35	28.107,35	437.424,38
7 SÃO JOSÉ II	19,00	330,00	29,14	T	Estado	-2.131,31	-85.828,57	440.202,88	9.884.014,16	4.548,23	51.132,14	311.250,59	6.339.911,52	11.227,77	188.092,85	198.997,16	4.038.210,66	17.907,32	325.053,56	103.442,58	2.078.911,58	24.586,86	462.014,28	3.056,63	29.686,70	24.586,70	462.011,08
8 VIEIRÃO	22,50	340,00	20,96	T	Estado	-23.192,81	-109.021,39	603.677,94	9.587.692,09	-13.726,64	37.405,40	420.928,29	6.760.839,50	-4.260,48	183.832,05	261.844,05	4.300.054,71	5.205,69	330.259,26	126.425,25	2.205.336,82	14.671,86	476.686,14	4.331,81	42.071,64	14.671,64	476.682,72
9 POÇO DA PEDRA	31,40	797,00	52,00	T	DNOCs	-231,22	-109.252,60	173.917,46	9.761.609,55	2.398,54	39.804,04	123.148,44	6.883.988,24	5.028,31	188.860,68	78.953,83	4.379.008,54	7.658,07	337.917,33	41.333,63	2.246.670,45	10.287,83	486.973,97	1.203,41	11.687,77	10.287,77	486.970,49
10 SERROTA	22,00	426,00	4,57	T	DNOCs	-36.948,19	-146.200,79	10.477.381,65	-25.581,60	14.222,44	496.333,93	7.380.322,17	-14.215,02	174.645,66	305.312,21	4.684.320,76	-2.848,44	335.068,89	142.706,95	2.389.377,40	8.518,14	495.492,11	5.201,46	50.517,87	8.517,87	495.488,37	
11 ARACOIABA	35,00	2.000,00	170,70	T	Estado	-4.859,54	-151.060,33	209.768,32	10.687.149,97	-1.618,52	12.603,92	147.198,54	7.527.520,71	1.622,51	176.268,17	92.731,42	4.777.052,07	4.863,53	339.932,42	46.366,65	2.435.744,06	8.104,55	503.596,66	1.483,13	14.404,48	8.104,48	503.592,84
12 CARACAS	17,00	636,00	9,63	T	Estado	-25.846,96	-176.907,29	518.455,83	11.205.605,80	-17.627,62	-5.023,71	359.776,95	7.887.297,66	-9.408,29	166.859,88	221.646,42	4.998.698,49	-1.188,95	338.743,47	104.064,23	2.539.808,29	7.030,39	510.627,05	3.761,25	36.530,20	7.030,20	510.623,04
13 VALÉRIO	19,90	180,00	2,02	T	Estado	-9.633,57	-186.540,86	253.565,21	11.459.171,01	-5.659,09	-10.682,79	176.835,70	8.064.133,37	-1.684,61	165.175,27	110.042,39	5.108.740,88	2.289,87	341.033,34	53.185,27	2.592.993,56	6.264,35	516.891,40	1.818,76	17.664,25	6.264,25	516.887,30
14 MUQUÉM	27,60	355,23	47,64	T	Estado	-651,53	-187.192,39	95.970,06	11.555.141,07	807,52	-9.875,28	67.802,27	8.131.935,64	2.266,57	167.441,84	43.282,11	5.152.022,99	3.725,62	344.758,96	22.409,58	2.615.403,14	5.184,67	522.076,07	667,68	6.484,64	5.184,64	522.071,93
15 RIACHÃO	22,00	600,00	46,95	T	Estado	-1.007,06	-188.199,46	87.340,39	11.642.481,46	327,04	-9.548,24	61.584,73	8.193.520,37	1.661,15	169.102,99	39.164,34	5.191.187,34	2.995,25	347.754,21	20.079,22	2.635.482,36	4.329,36	526.405,43	610,50	5.929,33	4.329,33	526.401,26
16 BENGUÊ	23,61	480,00	19,56	T	Estado	-1.749,25	-189.948,71	95.212,03	11.737.693,49	-285,07	-9.833,31	66.945,22	8.260.465,59	1.179,11	170.282,09	42.338,85	5.233.526,18	2.643,29	350.397,50	21.392,93	2.656.875,29	4.107,47	530.512,90	670,02	6.507,43	4.107,43	530.508,69
17 TRAPIÁ I	13,50	295,00	2,01	T	Estado	-9.393,04	-199.341,75	200.243,57	11.937.937,07	-6.227,39	-16.060,70	139.128,87	8.399.594,46	-3.061,74	167.220,36	85.928,31	5.319.454,49	103,92	350.501,42	40.641,87	2.697.517,16	3.269,57	533.782,47	1.448,13	14.069,50	3.269,50	533.778,19
18 POCOTI	27,00	1.600,00	380,00	T	Estado	-4.924,80	-204.266,55	125.247,95	12.063.417,01	-2.955,60	-19.016,30	87.463,46	8.487.057,92	-986,40	166.233,62	54.369,97	5.373.824,46	982,80	351.484,21	26.199,41	2.723.716,65	2.952,00	536.734,47	901,13	8.751,95	2.951,95	536.730,14
19 CATUCINZENTA	16,25	1.055,00	27,13	T	Estado	-164,13	-204.430,68	49.880,66	12.113.297,67	591,58	-18.424,72	35.291,26	8.522.349,18	1.347,29	167.581,25	22.591,14	5.396.415,60	2.103,00	353.587,21	11.780,29	2.735.496,93	2.858,71	539.593,18	345,82	3.358,69	2.858,69	539.588,84
20 PIRABIBU	18,00	1.650,00	74,00	T	Estado	-793,54	-205.224,22	59.768,96	12.173.066,64	120,99	-18.303,72	42.113,37	8.564.462,55	1.035,53	168.616,78	26.744,11	5.423.159,71	1.950,06	355.537,28	13.661,18	2.749.158,12	2.864,60	542.457,78	418,50	4.064,58	2.864,58	542.453,41
21 PARAMBU	20,80	278,00	8,53	T	Estado	-303,47	-205.527,70	43.879,04	12.216.945,68	363,71	-17.940,01	30.998,65	8.595.461,20	1.030,90	169.647,67	17.786,23	5.442.945,93	1.698,08	357.235,36	10.241,77	2.759.399,88	2.365,27	544.823,05	305,31	2.965,25	2.365,25	544.818,67
22 ITAPEBUSSU	13,40	684,00	7,64	T	DNOCs	35,24	-205.492,46	35.085,51	12.252.031,19	564,52	-17.375,49	24.867,42	8.620.328,62	1.093,80	170.741,48	15.972,53	5.458.918,46	1.623,08	358.858,44	8.400,84	2.767.800,73	2.152,37	546.975,41	242,21	2.352,36	2.152,36	546.971,02
23 MALCOZINHADO	18,50	755,00	37,84	T	Estado	-1.872,14	-207.364,60	61.878,57	12.313.909,76	909,46	-18.284,96	43.293,53	8.663.622,15	53,21	170.794,69	27.115,18	5.486.033,64	1.015,89	359.874,34	13.343,53	2.781.144,26	1.978,57	548.953,98	440,53	4.278,55	1.978,55	548.949,57
24 TRAPIÁ MOR	22,00	180,00	6,00	T	Estado	-17.665,43	-225.030,03	300.385,39	12.614.295,16	-12.862,65	-31.147,60	207.928,29	8.871.287,19	-8.059,87	162.734,82	126.951,64	5.612.985,28	-3.257,09	356.617,25	58.245,19	2.839.389,44	1.545,69	550.499,68	2.197,80	21.345,58	1.545,58	550.495,15
25 GAVIÃO	16,00	668,00	32,90	T	Estado	-1.673,67	-226.703,70	46.949,99	12.661.245,15	-939,42	-32.087,02	32.774,89	8.904.062,08	-205,17	162.529,66	20.435,41	5.633.420,69	529,08	357.146,33	9.931,56	2.849.321,01	1.263,33	551.763,01	336,00	3.263,32	1.263,32	551.758,47
26 MONS. TABOSA	23,10	315,00	12,10	T	Estado	-2.490,28	-229.193,98	58.557,75	12.719.802,90	-1.568,42	-33.655,44	40.760,61	8.944.822,68	-646,55	161.883,11	25.268,13	5.658.688,83	275,32	357.421,65	12.080,33	2.861.401,33	1.197,18	552.960,19	421,86	4.097,16	1.197,16	552.955,63
27 PRAZERES	48,80	255,00	32,50	T	DNOCs	-60,04	-229.254,02	20.793,36	12.740.596,26	254,86	-33.400,58	14.714,03	8.959.536,72	569,76	162.452,86	9.421,96	5.668.110,78	884,66	358.306,31	4.917,13	2.866.318,46	1.199,56	554.159,75	144,10	1.399,55	1.199,55	554.155,18
28 ARNEIRO II	34,20	1.161,00	197,00	T	Estado	-62,24	-229.316,26	20.464,55	12.761.060,80	247,73	-33.152,85	14.480,44	8.974.017,15	557,70	163.010,56	9.271,25	5.677.382,03	867,47	359.173,97	4.836,98	2.871.155,45	1.777,64	555.337,39	141,84	1.377,63	1.777,63	555.332,81
29 ACARAPE DO MEIO	33,00	267,50	31,50	AP	Estado	-101,23	-229.417,49	14.615,06	12.775.675,87	120,99	-33.031,86	10.324,87	8.984.342,02	344,22	163.353,78	6.990,24	5.683.972,27	565,65	359.739,42	3.411,17	2.874.566,62	787,67	556.125,06	101,69	987,67	787,67	556.120,47
30 CANAFÍSTULA	14,80	850,00	13,11	T	Estado	-24.875,47	-254.292,96	395.979,66	13.171.655,53	-18.520,27	-51.552,13	273.289,09	9.257.631,12	-12.165,08	151.188,70	166.486,51	5.850.458,78	-5.809,88	353.929,54	75.571,92	2.950.138,54	545,31	556.670,37	2.908,20	28.245,16	545,16	556.665,64
31 ROSÁRIO	20,80	670,00	47,20	T	Estado	-146,67	-254.439,63	7.799,83	13.179.455,36	-26,67	-51.578,80	5.483,21	9.263.114,33	93,33	151.282,03	3.466,59	5.853.925,37	213,32	354.142,86	1.749,96	2.951.888,49	333,32	557.003,69				