



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS**

**JULIERME SIRIANO DA SILVA**

**MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM BARRAGENS**

**Palmas – TO  
2017**



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS**

**JULIERME SIRIANO DA SILVA**

**MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM BARRAGENS**

**Palmas – TO  
2017**

# **MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM BARRAGENS**

*Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Fundação Universidade Federal do Tocantins como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental. Orientador: Dr. Fernán E. Vergara Figueroa.*

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistema de  
Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

S586m Silva, Julierme Siriano da.  
MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM BARRAGENS. / Julierme Siriano da Silva. – Palmas, TO,  
2017.

141 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins  
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em  
Engenharia Ambiental, 2017.

Orientador: Fernan Enrique Vergara Figueroa

1. Classificação de risco. 2. Barragens. 3. ELECTRE TRI. 4. AUXÍLIO  
MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD) . I. Título

**1.CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

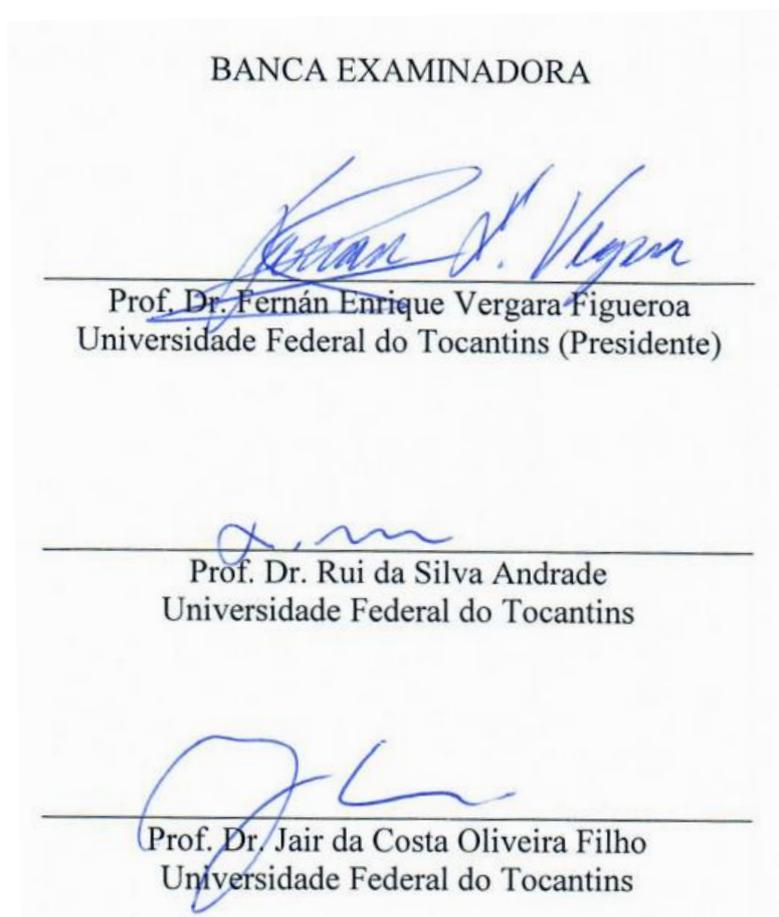
**2.Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

JULIERME SIRIANO DA SILVA

### MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM BARRAGENS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:



Aprovada em: 19 de junho de 2017.

Local da defesa: Sala 40 do Bloco 3

Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

## AGRADECIMENTOS

À minha querida companheira Bárbara.

Ao Prof. Fernán E. Vergara, pela excelente orientação, paciência e credibilidade. Apresentando grande virtude ao “polir” e nortear este trabalho.

Aos colegas do curso pela integração e cooperação nas disciplinas e trabalhos o que tornou esta caminhada menos árdua.

E a equipe da SEPLAN-TO que disponibilizou os dados para a aplicação do estudo.

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi comparar modelos importantes de classificações de risco em barragens (Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH e Resolução CNRH n° 143), empregados por instituições no Brasil e no Mundo, na forma padrão e utilizando adaptações para o método multicritério ELECTRE TRI. Propôs-se também um método que atendesse às especificidades do ELECTRE TRI com apoio de um decisor com conhecimento técnico em segurança de barragens. Essas classificações foram aplicadas nas barragens dos projetos de irrigação Rio Formoso e Manuel Alves sob gestão da SEPLAN - TO. Levantaram-se informações técnicas por meio de projetos executivos e visitas técnicas nas construções para a realização do enquadramento das barragens nas classificações, tanto para os métodos já existentes, como para o método proposto pelo estudo que utilizou especificamente o ELECTRE TRI. Para a barragem do projeto Rio Manuel Alves a classificação foi de Baixo Risco. As barragens do Projeto Rio Formoso apresentaram classificações de Alto Risco e Risco Extremo.

## ABSTRACT

The objective of this study was to compare important models of risk classifications in dams (Global Modified Risk Index, USACE, COGERH and Resolution CNRH n ° 143), employed by institutions in Brazil and in the world, in the standard form and using adaptations to the method Multicriteria ELECTRE TRI. It was also proposed a method that would meet the specificities of ELECTRE TRI with the support of a decision maker with technical knowledge on dam safety. These classifications were applied to the dams of the Rio Formoso and Manuel Alves irrigation projects under the management of SEPLAN - TO. Technical information was obtained through executive projects and technical visits to the constructions for the implementation of the classification of dams in the classifications, both for the existing methods and for the method proposed by the study that specifically used ELECTRE TRI. For the Rio Manuel Alves dam, the classification was Low Risk. The Rio Formoso Project dams presented High Risk and Extreme Risk ratings.

## SUMÁRIO

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>FOLHA DE APROVAÇÃO</b> .....   | Erro! Indicador não definido. |
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....   | i                             |
| <b>RESUMO</b> .....   | ii                            |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | iii                           |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>13</b>                     |
| 1.1 O PROBLEMA.....   | 14                            |
| 1.2 OBJETIVOS.....  | 15                            |
| <b>1.2.1 Objetivo geral</b> .....   | <b>15</b>                     |
| 1.2.1.1 Objetivos específicos.....  | 15                            |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>16</b>                     |
| 2.1 BARRAGENS.....  | 16                            |
| 2.2 RISCO .....   | 21                            |
| 2.3 GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS.....   | 22                            |
| <b>2.3.1 Avaliação de risco</b> .....   | <b>25</b>                     |
| 2.3.1.1 Análise de risco .....  | 28                            |
| 2.3.1.2 Apreciação de risco.....  | 29                            |
| <b>2.3.2 Controle de risco</b> .....  | <b>31</b>                     |
| 2.3.2.1 Gestão de risco no Brasil .....   | 32                            |
| 2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DE RISCO EM BARRAGENS .....                                    | 34                            |
| <b>2.4.1 Índice Global de Risco Modificado (<math>\alpha_g</math>)</b> .....          | <b>35</b>                     |
| <b>2.4.2 Metodologia de classificação de risco do USACE</b> .....                     | <b>39</b>                     |
| <b>2.4.3 Potencial de Risco – Metodologia COGERH</b> .....                            | <b>42</b>                     |
| <b>2.4.4 Matrizes de classificação: Lei 12.334</b> .....                              | <b>45</b>                     |
| 2.5 AUXÍLIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD).....  | 50                            |
| <b>2.5.1 Fases do Processo AMD</b> .....  | <b>51</b>                     |
| <b>2.5.2 Atores</b> .....   | <b>52</b>                     |
| 2.5.2.1 Decisor .....   | 52                            |
| 2.5.2.2 Facilitador.....  | 52                            |
| 2.5.2.3 Analista.....   | 52                            |
| 2.5.2.4 Stakeholder .....   | 53                            |
| <b>2.5.3 Elementos para estruturação do AMD</b> .....                                 | <b>53</b>                     |
| 2.5.3.1 Alternativas.....   | 53                            |
| 2.5.3.2 Critérios .....   | 53                            |
| 2.5.3.3 Problemática .....  | 54                            |
| <b>2.5.4 Escolha do método multicritério</b> .....                                    | <b>55</b>                     |
| <b>2.5.5 ELECTRI-TRI</b> .....  | <b>56</b>                     |
| 2.5.5.1 Limiar de indiferença ( $q_j$ ), preferência ( $p_j$ ) e veto ( $v_j$ ) ..... | 58                            |
| Limiar de indiferença ( $q_j$ ).....  | 58                            |
| Limiar de preferência ( $p_j$ ) .....   | 59                            |
| Limiar de veto ( $v_j$ ) .....  | 59                            |
| 2.5.5.2 Relação de subordinação no ELECTRE TRI.....                                   | 59                            |
| <b>2.5.6 Método de Análise Hierárquica (AHP – Clássico)</b> .....                     | <b>63</b>                     |
| <b>3. METODOLOGIA</b> .....   | <b>66</b>                     |
| 3.1 FASE DE ESTRUTURAÇÃO .....  | 67                            |
| <b>3.1.1 Ambiente de tomada de decisão</b> .....                                      | <b>67</b>                     |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| 3.1.1.1      | Locais de aplicação .....   | 68         |
| 3.1.1.2      | Barragem do Projeto Rio Manuel Alves.....   | 69         |
| 3.1.1.3      | Barragem do Projeto Rio Formoso.....  | 71         |
| <b>3.1.2</b> | <b>Identificação dos Fatores de Risco .....</b>                                   | <b>73</b>  |
| <b>3.2</b>   | <b>CONSTRUÇÃO DO MODELO ELECTRE TRI .....</b>                                     | <b>75</b>  |
| <b>3.2.1</b> | <b>Definição dos Critérios e pesos.....</b>                                       | <b>75</b>  |
| 3.2.1.1      | Índice global de risco modificado.....  | 75         |
| 3.2.1.2      | Metodologia de Classificação de risco do USACE .....                              | 76         |
| 3.2.1.3      | Potencial de risco – Metodologia COGERH .....                                     | 77         |
| 3.2.1.4      | Matrizes de classificação: Lei 12.334 – Resolução CNRH n° 143 .....               | 78         |
| 3.2.1.5      | Método proposto pelo estudo .....   | 79         |
|              | Ações da natureza (g <sub>1</sub> ) .....   | 80         |
|              | Dimensão da Barragem (g <sub>2</sub> ) .....                                      | 82         |
|              | Tipo de barragem (g <sub>3</sub> ).....   | 83         |
|              | Tipo de fundação (g <sub>4</sub> ) .....  | 84         |
|              | Idade da Barragem (g <sub>8</sub> ) .....   | 85         |
|              | Vazão de Projeto (g <sub>6</sub> ).....   | 86         |
|              | Volume (g <sub>7</sub> ).....   | 87         |
|              | Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (g <sub>8</sub> ) .....                | 88         |
|              | Confiabilidade das Estruturas de Adução (g <sub>9</sub> ) .....                   | 89         |
|              | Percolação (g <sub>10</sub> ).....  | 89         |
|              | Deformações e Recalques (g <sub>11</sub> ).....                                   | 90         |
|              | Deterioração dos Taludes / Paramentos (g <sub>12</sub> ) .....                    | 91         |
|              | Projetos (g <sub>13</sub> ).....  | 92         |
|              | Gestão do reservatório (g <sub>14</sub> ) .....                                   | 92         |
|              | Impactos a jusante (g <sub>15</sub> ).....  | 93         |
| 3.2.1.6      | Pesos - Método proposto pelo estudo .....   | 94         |
| <b>3.2.2</b> | <b>Definição das Classes de risco .....</b>                                       | <b>95</b>  |
| <b>3.2.3</b> | <b>Procedimento de Codificação e Definição das Fronteiras.....</b>                | <b>96</b>  |
| <b>3.2.4</b> | <b>Definição dos Limites de Preferência (p), Indiferença (q) e Veto (v) .....</b> | <b>99</b>  |
| <b>3.3</b>   | <b>FASE DE AVALIAÇÃO DAS BARRAGENS .....</b>                                      | <b>101</b> |
| <b>3.4</b>   | <b>APLICAÇÃO DO MODELO ELECTRE TRI NA ANÁLISE DE RISCO DE BARRAGENS .....</b>     | <b>102</b> |
| <b>4.</b>    | <b>DISCUSSÃO E RESULTADOS.....</b>  | <b>104</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS .....</b>  | <b>104</b> |
| 4.1.1        | Índice Global de Risco Modificado.....  | 104        |
| 4.1.2        | Metodologia de Classificação de risco da USACE .....                              | 109        |
| 4.1.3        | Potencial de risco – Metodologia COGERH.....                                      | 111        |
| 4.1.4        | Resolução CNRH n° 143 .....   | 113        |
| 4.1.5        | Modelo proposto pelo estudo .....   | 117        |
| <b>5.</b>    | <b>CONCLUSÃO .....</b>  | <b>122</b> |
| <b>6.</b>    | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>124</b> |
|              | <b>APÊNDICE I.....</b>  | <b>131</b> |
|              | <b>APÊNDICE II.....</b>   | <b>132</b> |
|              | <b>APêndice III.....</b>  | <b>133</b> |
|              | <b>ANEXO I .....</b>  | <b>136</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 2.1 - Distribuição de barragens de uso único no registro ICOLD.....   | 18  |
| Figura 2.2 - Perspectivas de sociedades orientadas para a segurança e o risco. ....  | 24  |
| Figura 2.3 - Diagrama com as etapas fundamentais da gestão de risco. ....  | 24  |
| Figura 2.4 - Definições para termos de gerenciamento do risco. ....  | 25  |
| Figura 2.5 - Relação entre a análise de risco, avaliação de risco e gestão de risco. ....                                  | 26  |
| Figura 2.6 – Processo de análise de risco. ....  | 29  |
| Figura 2.7 - Tolerabilidade da estrutura de risco para barragens. ....   | 30  |
| Figura 2.8 - Atividades fundamentais da gestão de risco .....  | 32  |
| Figura 2.9 - Tipos de problemáticas.....   | 54  |
| Figura 2.10 - Problemas de Classificação.....  | 57  |
| Figura 2.11 - Categorias e limites no método ELECTRE TRI.....  | 58  |
| Figura 3.1- Fases do processo de AMD.....  | 66  |
| Figura 3.2 - Localização da Barragem Rio Manoel Alves – TO .....   | 70  |
| Figura 3.3 - Maciço da barragem do Projeto Manuel Alves.....   | 71  |
| Figura 3.4 - Localização das barragens do projeto Rio Formoso. ....  | 73  |
| Figura 3.5 - Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B (“Rocha”)..... | 81  |
| Figura 3.6 - Falhas em barragens x tipo de barragens.....  | 84  |
| Figura 3.7 – Classes de risco de barragens.....  | 96  |
| Figura 4.1 - Escorregamentos no talude a jusante da barragem Taboca. ....  | 105 |
| Figura 4.2 - Surgência a jusante da barragem Taboca. ....  | 106 |
| Figura 4.3 - Classificação do Índice Global de Risco Modificado com ELECTRE TRI.....                                       | 107 |
| Figura 4.4 - Matriz de comparação $\lambda=0,76$ .....   | 108 |
| Figura 4.5 - Matriz de comparação $\lambda=0,636$ .....  | 108 |
| Figura 4.6 - Classificação de risco Índice Global de Risco Modificado com $\lambda=0,636$ .....                            | 108 |
| Figura 4.7 - Visualização dos desempenhos das barragens. ....  | 109 |
| Figura 4.8 - Classificação de risco do USACE com ELECTRE TRI.....  | 111 |
| Figura 4.9 - Classificação de risco da COGERH com ELECTRE TRI. ....  | 113 |
| Figura 4.10 - Classificação de risco da Resolução CNRH n° 143 com ELECTRE TRI.....   | 116 |
| Figura 4.11 - Classificação de risco apenas com parâmetros da Classificação de risco com o ELECTRE TRI.....                | 117 |
| Figura 4.12 - Classificação de risco apenas com parâmetros do DPA com o ELECTRE TRI. ....                                  | 117 |
| Figura 4.13 - Classificação de risco do método proposto com ELECTRE TRI. ....  | 119 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Países com maior número de grandes barragens no registro do ICOLD .....  | 17 |
| Tabela 2.2 - Índice global de risco Modificado .....                                  | 38 |
| Tabela 2.3 - Periculosidade (P).....  | 43 |
| Tabela 2.4 - Vulnerabilidade (V). .....   | 44 |
| Tabela 2.5 - Importância Estratégica (I) .....  | 45 |
| Tabela 2.6 – Potencial de risco (PR).....   | 45 |
| Tabela 2.7 - Matriz categoria de risco, Resolução CNRH n° 143. ....                   | 47 |
| Tabela 2.8 - Matriz de dano potencial associado, Resolução CNRH n° 143. ....          | 47 |
| Tabela 3.1 - Características Principais do Barramento .....                           | 71 |
| Tabela 3.2 - Características Principais dos Barramentos .....                         | 72 |
| Tabela 3.3 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_2$ .....     | 82 |
| Tabela 3.4 - Altura da barragem de terra x falhas .....                               | 82 |
| Tabela 3.5 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_2$ .....     | 83 |
| Tabela 3.6 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_3$ .....     | 83 |
| Tabela 3.7 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_4$ .....     | 85 |
| Tabela 3.8 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_5$ .....     | 85 |
| Tabela 3.9 - Idades das barragens de terra x falhas .....                             | 86 |
| Tabela 3.10 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_6$ .....    | 86 |
| Tabela 3.11 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_7$ .....    | 87 |
| Tabela 3.12 - Capacidade do reservatório das barragens de terra.....                  | 88 |
| Tabela 3.13 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_8$ .....    | 88 |
| Tabela 3.14 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_9$ .....    | 89 |
| Tabela 3.15 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_{10}$ ..... | 90 |
| Tabela 3.16 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_{11}$ ..... | 90 |
| Tabela 3.17 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_{12}$ ..... | 91 |
| Tabela 3.18 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_{13}$ ..... | 92 |
| Tabela 3.19 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_{14}$ ..... | 92 |
| Tabela 3.20 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério $g_{15}$ ..... | 94 |
| Tabela 3.21 - Análise a consistência dos pesos.....                                   | 95 |
| Tabela 3.22 – Fronteiras para os Critérios Índice Global de Risco Modificado.....     | 97 |
| Tabela 3.23 – Fronteiras para os Critérios do USACE .....                             | 97 |
| Tabela 3.24 – Fronteiras para os Critérios da COGERH.....                             | 98 |
| Tabela 3.25 – Fronteiras para os Critérios da Resolução CNRH n° 143 .....             | 98 |
| Tabela 3.26 – Fronteiras para os Critérios do método proposto pelo estudo .....       | 99 |
| Tabela 3.27 – Limiares discriminatórios – Índice Global de Risco Modificado.....      | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 3.28 – Limiares discriminatórios – USACE .....               | 100 |
| Tabela 3.29 – Limiares discriminatórios – COGERH.....               | 100 |
| Tabela 3.30 – Limiares discriminatórios Resolução CNRH nº 143 ..... | 100 |

## LISTA DE QUADROS

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 2.1 - Rompimento de barragens de acumulação nos últimos 22 anos .....                      | 20  |
| Quadro 2.2 - Classificação do Índice de Condição.....   | 39  |
| Quadro 2.3 - Escores para Classificação dos parâmetros das constantes.....                        | 40  |
| Quadro 2.4 - Escores para Classificação dos parâmetros variáveis.....                             | 41  |
| Quadro 2.5 - Danos a propriedades e perdas de vidas.....  | 42  |
| Quadro 2.6 - Matriz de categoria de risco e dano potencial associado .....                        | 47  |
| Quadro 2.7 - Discriminação dos descritores e pesos da Resolução 143/CNRH.....                     | 48  |
| Quadro 2.8 - Principais métodos de MDA .....  | 55  |
| Quadro 2.9 - Métodos da família ELECTRE. ....   | 56  |
| Quadro 2.10 - Relações de preferências utilizadas pelos métodos ELECTRE.....                      | 60  |
| Quadro 2.11 - Princípios para a determinação dos Índices de credibilidade .....                   | 62  |
| Quadro 2.12 - Escala Fundamental de Saaty .....   | 64  |
| Quadro 2.13 - Índice de consistência relativo. ....   | 65  |
| Quadro 3.1 - Estudo de classificação de risco com ELECTRE TRI.....                                | 67  |
| Quadro 3.2 – Projetos de Irrigação no Tocantins .....   | 69  |
| Quadro 3.3 – Elementos analisados pelos decisores.....  | 74  |
| Quadro 3.4 – Pesos dos critérios do método Índice Global de Risco Modificado.....                 | 75  |
| Quadro 3.5 – Pesos dos critérios do método do USACE .....   | 77  |
| Quadro 3.6 – Pesos dos critérios do método da COGERH.....   | 78  |
| Quadro 3.7 – Pesos dos critérios do método da Resolução CNRH n° 143 .....                         | 79  |
| Quadro 3.8 – Pesos dos critérios do método .....  | 80  |
| Quadro 3.9 - Pesos dos critérios Método proposto pelo estudo .....                                | 95  |
| Quadro 3.10 – Limiares discriminatórios – Método proposto.....                                    | 101 |
| Quadro 4.1 - Classificação de risco padrão Índice Global de Risco Modificado .....                | 104 |
| Quadro 4.2 – Classificação de risco padrão do método do USACE .....                               | 110 |
| Quadro 4.3 – Classificação de risco padrão do método da COGERH.....                               | 112 |
| Quadro 4.4 – Classificação de risco padrão do método da Resolução CNRH n° 143 .....               | 114 |
| Quadro 4.5 – Classificação de Dano Potencial Associado do método da Resolução CNRH n°<br>143..... | 115 |
| Quadro 4.6 – Parâmetros de Classificação pelo modelo proposto pelo estudo.....                    | 118 |
| Quadro 4.7 – Classificações de risco das barragens para os métodos analisados .....               | 120 |
| Quadro 7.1 - Classificação Unificada.....   | 136 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações.

|                      |  |
|----------------------|--|
| a                    | Descritores ( $\alpha$ )   |
| $a_g$                | Aceleração sísmica horizontal                                    |
| $\alpha_g$           | Índice global de risco ( $\alpha_g$ )                            |
| $a_j$                | Alternativa  |
| A                    | Escores para Classificação dos parâmetros das constantes - USACE |
| <i>A<sub>j</sub></i> | Alternativas   |
| ABNT                 | Associação Brasileira de Normas Técnicas                         |
| AHP                  | Analytic Hierarchy Process                                       |
| AMD                  | Auxílio Multicritério à Decisão                                  |
| AMFE                 | Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos                        |
| ANA                  | Agência Nacional de Águas  |
| ANCOLD               | Australian National Committee on Large Dams                      |
| ANEEL                | Agência Nacional de Energia Elétrica                             |
| ANP                  | Analytic Network Processes                                       |
| B                    | Escores para Classificação dos parâmetros variáveis - USACE      |
| $b_n$                | Limite   |
| C                    | Perdas de Vidas – USACE  |
| $c_j$                | Índice de concordância parcial                                   |
| $C_j$                | Índice de concordância Global                                    |
| CBDB                 | Comitê Brasileiro de Barragens                                   |
| CEMIG                | Companhia Energética de Minas Gerais                             |
| CMB                  | Comissão Mundial de Barragens                                    |
| CMP                  | Cheia Máxima Provável  |
| CNPGB                | Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens               |
| CNRH                 | Conselho Nacional de Recursos Hídricos                           |
| CI                   | Condition Indices  |
| COGERH               | Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará      |
| COPAM                | Conselho de Política Ambiental                                   |
| CT                   | Características técnicas   |
| $D_j$                | Índice de discordância parcial                                   |
| d.C                  | Depois de cristo   |
| DNOCS                | Departamento Nacional de Obras Contra as Secas                   |
| DNPM                 | Departamento Nacional de Produção Mineral                        |
| DPA                  | Dano Potencial Associado   |
| EC                   | Estado de Conservação  |
| ELECTRE              | Elimination et Choix Traduisant la Réalité                       |
| EPA                  | Environmental Protection Agency                                  |
| ETA                  | Análise por árvores de eventos                                   |
| F                    | Conjunto de Critérios  |
| FEAM                 | Fundação Estadual do Meio Ambiente                               |
| FEMA                 | Federal Emergency Management Agency                              |
| FMEA                 | Análise dos modos de falha e seus efeitos                        |
| FERC                 | Federal Energy Regulatory Commission                             |
| FTA                  | Análise Árvore por Falhas  |
| $g_j$                | Critério   |
| H                    | Altura   |
| hm <sup>3</sup>      | Hectômetro cúbico  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| HSE             | Health and Safety Executive  |
| I               | Importância – COGERH   |
| IBGE            | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                      |
| IC              | Índice de Consistência   |
| ICOLD           | International Commission on Large Dams                               |
| ISO             | International Organization for Standardization                       |
| IR              | Índice de Consistência Relativo                                      |
| $k_j$           | Peso do critério   |
| km              | Quilômetro   |
| $\lambda$       | Plano de corte   |
| $\lambda_{max}$ | Autovalor  |
| L               | Comprimento  |
| LCI             | Causa e Indicadores de Falhas  |
| m               | Metro  |
| m <sup>2</sup>  | Metro quadrado   |
| m <sup>3</sup>  | Metro cúbico   |
| MACBETH         | Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique |
| MAUT            | Multiattribute Utility Theory  |
| MCDM            | Multicriteria Decision Aid   |
| MCDM            | Multicriteria Decision Making  |
| MG              | Minas Gerais   |
| mm              | Milímetro  |
| MW              | Megawatts  |
| n               | Número de elementos  |
| NA              | Nível de Água  |
| NBR             | Norma Brasileira de Regulamentação                                   |
| NATURATINS      | Instituto Natureza do Tocantins                                      |
| P               | Periculosidade – COGERH  |
| $p_j$           | Limite de preferência  |
| $P\alpha$       | Problemática de Escolha  |
| $P\beta$        | Problemática de Classificação  |
| $P\gamma$       | Problemática de Ordenação  |
| $P\delta$       | Problemática de Descrição  |
| PAE             | Plano de ação emergencial  |
| PNSB            | Política nacional de segurança de barragens                          |
| PR              | Potencial de Risco - COGERH  |
| PROPERTINS      | Programa de Perenização das Águas do Tocantins                       |
| PS              | Plano de Segurança da Barragem                                       |
| $q_j$           | Limite de indiferença  |
| RC              | Razão de Consistência  |
| REMR            | Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation                   |
| $\sigma_s$      | Índice de credibilidade  |
| S               | Escore Global - USACE  |
| SABESP          | Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo                |
| SEAGRO          | Secretaria Estadual de Agricultura e Abastecimento                   |
| SEPLAN          | Secretaria do Planejamento e Orçamento do Tocantins                  |
| SMART           | Simple Multi Attribute Rating Technique                              |
| SNISB           | Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens         |
| TO              | Tocantins  |
| TOPSIS          | Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution        |

|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| TR      | Tempo de Retorno (anos)             |
| TWh     | Terawatts-hora                      |
| USACE   | Army Corps of Engineers             |
| USBR    | United States Bureau of Reclamation |
| V       | Vulnerabilidade                     |
| $v_j$   | Veto                                |
| $w_j$   | Pesos                               |
| W (AHP) | Vetor de prioridade                 |

## 1. INTRODUÇÃO

Há vários séculos barragens proporcionam vários benefícios à sociedade com seus diversos usos, sendo essencial para o desenvolvimento da economia de um país.

Segundo a Comissão Mundial de Barragens - CMB (2000) a geração de energia elétrica em um terço de todos os países provém de usinas hidrelétricas, representando 19% de toda a eletricidade produzida mundialmente. Metade das barragens foi construída para irrigação, onde cerca de 30% a 40% dos 271 milhões de hectares irrigados no planeta dependem dessas obras. Além de proporcionar desenvolvimento regional e nacional, gerando empregos e fomentando uma base industrial com potencial exportador.

No nordeste, o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS possui mais de 100 barragens sob sua gerência para mitigar os efeitos da seca. E o Ministério da Integração Nacional também implantou três mil barragens de água pluvial a partir do Programa Água para Todos para promover a produção agrícola e pecuária da região.

No Tocantins, há seis grandes projetos de irrigação gerenciados pela Secretaria do Planejamento e Orçamento - SEPLAN, onde dois possuem como fonte hídrica reservatórios de acumulação para irrigação e pecuária: Projeto Manuel Alves e Projeto Rio Formoso.

Por outro lado, a acumulação de água ou resíduos por meio de barragens representam riscos para a população vizinha deste tipo de construção, com registros de graves acidentes em todo mundo.

Essa condição gerou uma preocupação da sociedade em relação ao nível de exposição a riscos para quem ocupa áreas próximas a essas estruturas.

Nesse sentido, em 20 de setembro de 2010, foi sancionada no Brasil a Lei nº 12.334 que estabelece a 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, e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Essa lei é destinada às barragens que possuem maciço com altura acima de 15 m, da fundação até a crista; e/ou capacidade de armazenamento do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>; e/ou

reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e/ou reservatórios com categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Em 2012, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH por meio da Resolução CNRH nº 143, instituiu critérios gerais para a classificação de acordo com o Risco e Dano Potencial Associado, em diferentes classes, fundamentando as ações de gerenciamento que os empreendedores de barragens devem implantar com vistas à segurança da estrutura.

Segundo Melo (2014), para que uma barragem seja considerada segura, deve ser adequadamente planejada, projetada, construída e mantida, no entanto, um número elevado de acidentes recentes com essas estruturas, tem mostrado que isso não tem sido plenamente atendido.

Kochen (2015) afirma que é primordial aprimorar a Lei Nacional de Segurança de Barragens e principalmente a sua fiscalização, para que órgãos reguladores e autoridades certifiquem-se de que os requisitos necessários para segurança estejam sendo efetivamente atendidos.

Os métodos de análise e classificação voltados para a gestão dos riscos associados às barragens são ferramentas em crescente utilização em nosso país e podem auxiliar no desenvolvimento de técnicas de detecção e prevenção de acidentes.

## 1.1 O PROBLEMA

A Lei nº 12.334/2010 é recente e ainda está em fase de implantação, tanto por parte dos responsáveis por barragens, como pelos órgãos fiscalizadores.

Depois do acidente em Mariana, já existem movimentos que pedem mudanças na Lei.

O senado brasileiro, em 2016, criou a Comissão Temporária da Política Nacional de Segurança de Barragens com a missão de avaliar toda a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB, criada pela Lei 12.334/2010, bem como o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB, para propor soluções eficazes quanto à segurança de barragens.

Kochen (2015) também afirma que é necessário realizar a revisão da Lei de Segurança de Barragens no Brasil, enfatizando a fiscalização pelas entidades competentes.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia multicritério efetiva que permita contribuir com a melhoria e complementação das práticas de classificação, análise e gestão de risco em barragens, e assim fornecer aos gestores, fiscalizadores e especialistas uma nova ferramenta com um conceito diferente que permita o avanço do tema no meio técnico nacional.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia de classificação de risco em barragens utilizando o método multicritério ELECTRE TRI.

#### 1.2.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Adaptar metodologias de classificação de risco em barragens Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH e resolução CNRH n° 143 ao ELECTRE TRI;
- Aplicar em estudo de caso, tanto os modelos padrões como os construídos com o ELECTRE TRI;
- Comparar e discutir os resultados obtidos pelos modelos padrões com os construídos com o ELECTRE TRI e o método proposto neste estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BARRAGENS

Os primeiros projetos de barragens para irrigação datam de há mais de 6000 anos, na Pérsia. As barragens de aterro foram as primeiras a serem construídas. Após o primeiro milênio d.C. ocorreram avanços significativos na Ásia com barragens de aterro com altura superior a 15 m, e na Europa com a construções de barragens de alvenaria (NEVES *et al.*, 2015).

No Brasil, a barragem mais antiga está registrada em um mapa holandês de 1577. Ela foi construída onde hoje é área urbana do Recife - PE, possivelmente, no final do Século XVI, antes mesmo da invasão holandesa, conhecida hoje como açude Apipucos. A barragem original foi alargada e reforçada para permitir a construção de uma importante via de acesso ao centro do Recife (MELLO, 2011).

Há várias referências históricas, que falam que em 1638 o conde Maurício de Nassau mandou construir a primeira barragem no leito do rio Capibaribe para proteger Recife das enchentes. Foi chamada de dique de Afogados, com mais de 2 km, que veio a colapso em 1950 em decorrência de uma cheia. No local hoje situa-se na rua Imperial.

Segundo Mello (2011), o desenvolvimento que o país alcançou nos últimos 40 anos juntamente com as ações de combate à seca no nordeste foram fatores determinantes para a implantação de um grande número de barragens construídas desde a última década do século XIX.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens – ICOLD possui um registro mundial com 57.705 barragens com mais de 15 metros de altura ou em condições especiais. Ao todo, mais de 90 países fazem parte da organização. A Tabela 2.1 apresenta os 10 países com maior número de barragens.

Fica na China a maior hidrelétrica do mundo, Usina de Três Gargantas tem capacidade de geração de 22.500 MW e média de 88,2 TWh<sup>1</sup> de eletricidade por ano. Em 2014, a usina estabeleceu um novo recorde mundial de 98,8 TWh de eletricidade gerada em um ano, o que é aproximadamente equivalente à energia de 49 Milhões de toneladas de carvão. No entanto, o principal objetivo da barragem é controlar inundações rio Yangtze, que está sujeito a inundações extremas, com

---

<sup>1</sup> Terawatt-hora (TWh) equivale a 10<sup>12</sup> Wh ou 3,6×10<sup>15</sup> joule.

eventos maiores ocorrendo até quatro e cinco vezes por ano (WORLD ENERGY RESOURCES, 2016).

Em segundo lugar vem Itaipu, localizada na divisa entre Brasil e Paraguai, com capacidade 14.000 MW instalados e 20 unidades geradoras de 700 MW cada, é a maior represa hidrelétrica em funcionamento no mundo em geração de energia, superando até mesmo a Usina de Três Gargantas, que é a maior em dimensões (REVISTA GRANDES CONSTRUÇÕES, 2013).

Além de Itaipu, destaca-se também a barragem de Tucuruí que faz parte de aglomerado de barragens situada no rio Tocantins, estado do Pará. A usina é a maior em potência 100% brasileira (8.370 MW), cujo funcionamento exigiu a formação de um lago artificial, que inundou uma área de 2.830 km<sup>2</sup> (SANTANA *et al.*, 2014).

Tabela 2.1 – Países com maior número de grandes barragens no registro do ICOLD<sup>2</sup>

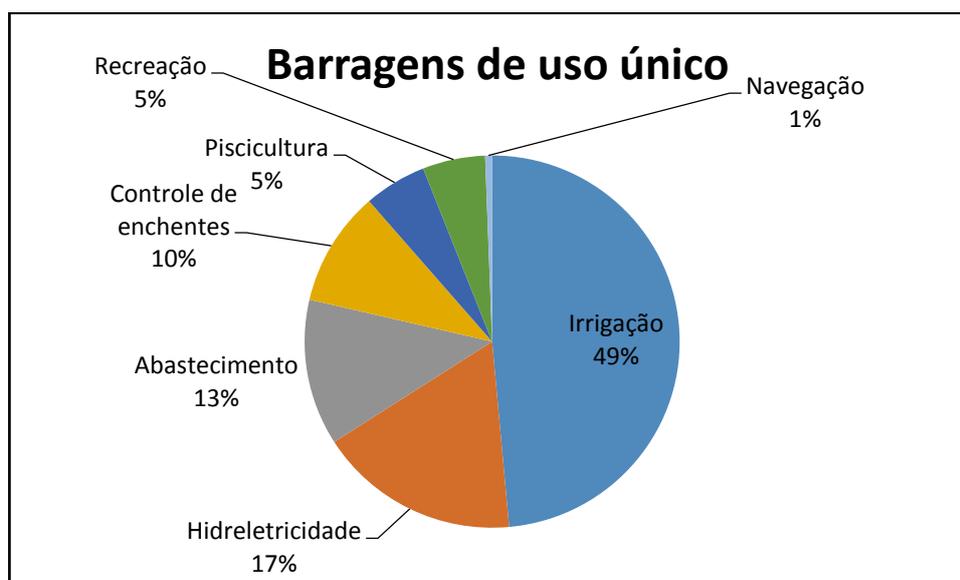
| País           | Número de barragens |
|----------------|---------------------|
| China          | 23842               |
| Estados Unidos | 9265                |
| Índia          | 5102                |
| Japão          | 3108                |
| Brasil         | 1392                |
| Coreia do Sul  | 1306                |
| Canadá         | 1170                |
| África do Sul  | 1114                |
| Espanha        | 1082                |
| Turquia        | 972                 |

Fonte: ICOLD (2008).

Ainda segundo o ICOLD (2008), a maioria das barragens é de uso único (71,7%), embora haja um número crescente (28,3%) de barragens de usos múltiplos. A Figura 2.1 apresenta a distribuição das funções entre as barragens de uso único:

<sup>2</sup> Disponível em: [http://www.icold-cigb.org/GB/World\\_register/general\\_synthesis.asp?IDA=206](http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp?IDA=206). Acesso em: agosto de 2016.

Figura 2.1 - Distribuição de barragens de uso único no registro ICOLD.



Fonte: ICOLD (2008).

No Brasil, segundo o último relatório do ano de 2015 da Agência Nacional de Águas - ANA, existem 17.259 barragens cadastradas no país. Desse número, a cada 10 barragens, 9 são para usos múltiplos (91%). As demais correspondem à geração hidrelétrica (4%), contenção de rejeitos de mineração (4%) e resíduos industriais (1%).

Consonante ao crescimento do número de barragens no Brasil cresceu também a preocupação com a segurança desses empreendimentos, principalmente, com a região à jusante.

O Ministério da Integração Nacional (2002) afirma que obras de barragens apresentam um elevado potencial de risco devido à possibilidade de um eventual colapso, podendo gerar danos catastróficos com perdas materiais (quando se prejudica a própria estrutura da barragem), ambientais e humanas.

De acordo com Vianna (2015) a segurança deve ser o foco principal nas fases de projeto, construção e operação das obras de engenharia, em especial nas barragens. Assim, mesmo que as execuções dessas fases sejam realizadas adequadamente, deve se possuir um mecanismo de avaliação de riscos das estruturas visando controlar e mitigar riscos remanescentes.

Almeida (2003) cita que a palavra segurança está estreitamente associada aos termos: risco e incerteza. Onde, o risco pretende caracterizar a possibilidade de eventos que alterem o estado de segurança existente. E a incerteza (aleatória ou

epistémica) acompanha-o, impedindo a garantia de o mesmo se concretizar, no entanto só verificável posteriormente.

No que diz respeito a barragens, o conceito de risco apresenta-se como aspecto de segurança muito importante em todo mundo.

Pelo mundo lançaram-se metodologias de classificação de barragens, mas foi a partir da década de 1980 que iniciaram os primeiros estudos para concepção de métodos de análise de risco, que foram precursores nas décadas seguintes, com embasamento teórico para os métodos de análise probabilística que buscavam a quantificação científica e matemática dos riscos associados a essas estruturas (FUSARO, 2003).

O interesse crescente pela análise de riscos em barragens se alicerça na necessidade de evitar graves catástrofes ocasionadas pela ruptura de barragens, como o ocorrido na China, em 1975, onde as barragens Shimantan e Banqiao, vieram a colapso por causa da ruptura de 60 pequenas barragens agrícolas à montante, resultando em 230.000 mortes de forma direta e indireta (VALENCIO; GONÇALVES, 2006).

Infelizmente, o Brasil também tem sua história marcada por desastres causados por rompimento de barragens.

Em 26 de março de 1960 a Barragem de Orós construída no rio Jaguaribe, próximo à cidade de Orós, no estado do Ceará, veio a colapso inundando várias cidades situadas à jusante (MELLO, 2011). Alertas foram emitidos e o exército ajudou 100.000 pessoas escaparem, mesmo assim, muitas vidas humanas foram declaradas como perdidas (JANSEN, 1980).

Em um contexto mais atual, o estado de Minas Gerais se destaca negativamente com um número de rompimentos de barragens considerado alto. Nos últimos 21 anos aconteceram seis rompimentos com vários óbitos. Já no restante do país, no mesmo período, ocorreram quatro rompimentos (ALVES, 2015).

Quadro 2.1 - Rompimento de barragens de acumulação nos últimos 22 anos

| LOCAL                         | ANO  | NOME                             | TIPO                 | DANOS CAUSADOS   |
|-------------------------------|------|----------------------------------|----------------------|--|
| Itabirito (MG)                | 1986 | Barragem de Fernandinho          | Rejeitos minerários  | 7 óbitos   |
| Nova Lima (MG)                | 2001 | Barragem de Macacos              | Rejeitos minerários  | 5 óbitos   |
| Cataguases (MG)               | 2003 | Barragem em Cataguases           | Rejeitos industriais | Contaminação do rio Paraíba do Sul, mortandade de animais e peixes e interrupção do abastecimento de água de 600.000 pessoas |
| Alagoa Nova (PB)              | 2004 | Camará                           | Barragem de água     | 5 óbitos e aproximadamente 3 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas   |
| Miraí (MG)                    | 2007 | Barragem da Rio Pomba/Cataguases | Rejeitos minerários  | Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou desalojadas   |
| Vilhena (RO)                  | 2008 | Apertadinho                      | Geração de energia   | Danos ambientais variados (assoreamento de rios, erosão do solo, entre outros).  |
| Cocal e Buriti dos Lopes (PI) | 2009 | Algodões                         | Barragem de água     | Entre 9 e 24 mortos e aproximadamente 2000 pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas.                                      |
| Laranjal do Jari (AP)         | 2014 | Santo Antônio                    | Geração de energia   | 4 óbitos   |
| Itabirito (MG)                | 2014 | Barragem da Herculano            | Rejeitos minerários  | 3 óbitos   |
| Mariana (MG)                  | 2015 | Barragem Fundão                  | Rejeitos minerários  | 19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados   |

Fonte: Adaptado Alves (2015).

Minas Gerais é o terceiro estado brasileiro com maior número de barragens segundo o Relatório de Segurança de Barragens da ANA (2015), no entanto, possui o maior número de barragens para Contenção de Rejeitos de Mineração. De certa forma, essas barragens oferecem maior risco que as demais devido aos poucos investimentos em manutenção e outros custos que vão desde o planejamento até o descomissionamento. .

O acidente na cidade de Mariana – MG ocasionada pela ruptura da barragem do Fundão no dia 05 de novembro de 2015 causou grande mobilização na sociedade brasileira e cobrança por mudanças na legislação e nos órgãos de fiscalização visando diminuir os riscos para a população que vive a jusante (POEMAS, 2015).

Há um consenso, entre especialistas e a sociedade, que a legislação de fiscalização de barragens brasileira deve ser revista, priorizando ações que venham diminuir os riscos dos indivíduos afetados por essas estruturas.

## 2.2 RISCO

O conceito de risco vem se apresentando na sociedade atual de forma crescente devido ao cenário de desastres naturais ou de origem antrópica que afetam um meio.

Zuffo (2010) define risco como um eventual perigo que poderá causar alguma perda ou dano.

Segundo Moraes (2013), ao utilizar-se abordagens mais qualitativas que se baseiam na experiência, é normal expressar o risco como o produto direto da probabilidade de ocorrência e a consequência de um evento. Assim, o risco associado com uma atividade específica é avaliada pela estimativa da probabilidade por meio da frequência e a consequência em termos relativos, tais como “baixo”, “médio” ou “alto”, e combinando os dois usando alguns preceitos previamente ajustadas.

### **Risco = Probabilidade do evento x Consequência do evento**

No Brasil, o conceito de risco mais difundido e trabalhado está estabelecido na NBR ISO 31000:2009, que define risco como efeito da incerteza sobre os objetivos, onde esses objetivos podem ser de diferentes vertentes ou níveis (ABNT, 2009).

Oliveira *et al.* (2014) explana que a incerteza consiste na possibilidade da existência de erros em cálculos ou medidas, como na determinação de variáveis, no uso de métodos de resolução de problemas ou em tomada de decisão. Dessa forma, o ideal consiste em tentar minimizar a incerteza no decorrer da elaboração de empreendimentos.

Já Melo (2014), afirma que o termo “risco” pode ser compreendido em duas definições distintas. A primeira se refere a uma condição com potencial de gerar um dano, com caráter de incerteza. A segunda se trata, de modo geral, na metodologia de identificação de riscos, trabalhando com uma investigação no que pode dar errado, por que e como, e as consequências geradas.

Segundo Almeida (2003) quando se almeja mensurar ou determinar o grau de incerteza de um algum caso potencial identificado faz-se uso do conceito de probabilidade, com uma base estatística ou por análises subjetivas de especialistas.

No entanto, para Oliveira et al. (2014) o processo de realização da estimativa das probabilidades se apresenta como muito trabalhoso, uma vez que para fazer estimativas é necessário buscar a alternativa mais apropriada, mediante critérios instituídos.

Nesse sentido, a experiência e o conhecimento sobre determinados fatores de riscos são determinantes para a avaliação dos riscos envolvidos.

De acordo com Mendes (2015) os riscos preconizados às estruturas de engenharia advêm de fenômenos naturais, tais como sismos, enchentes, cheias, ventos, etc., e de origem antrópicos, tais como a ausência de planejamento ou estudos preliminares, acidentes, avarias ou patologias, e impactos ambientais.

### 2.3 GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS

Segundo Araújo *et al.* (2015) o risco em uma barragem pode variar com o tempo a partir da alteração da vulnerabilidade da barragem, ou pela alteração da ocupação do solo ou de medidas de proteção adotadas.

Balbi (2008) salienta que apesar das barragens se apresentarem como estruturas hidráulicas com fins de controle de cheias, geração de energia, lazer, irrigação ou abastecimento, a sua implantação em uma determinada região representa maiores riscos para as comunidades que vivem ou passam a viver a jusante delas.

Cabe salientar, que barragens são consideradas obras de engenharia de grande complexidade, ou seja, apresentam maior nível de incerteza, onde o comportamento verificado na execução em campo não ocorre exatamente como planejado no projeto (VIANNA, 2015).

Contudo rompimentos de barragens são eventos considerados raros, com frequência de uma ruptura para cada 10.000, ou até 100.000 barragens (BALBI, 2008).

Logo, devido a essa complexidade apresentada em obras como as barragens, levaram os pesquisadores a um consenso: não existe risco zero.

Mendes (2015) explana que existem riscos impossíveis de eliminar, além de que, a eliminação total de determinados riscos pode trazer consequências

econômicas e sociais inviáveis, e por fim, as medidas de prevenção dos riscos são elas próprias, por vezes, geradoras de novos riscos.

Almeida (2003) salienta que o ideal é buscar o risco aceitável. Dessa forma, uma das vertentes mais trabalhadas é a de risco “potencial” que classifica a barragem de acordo com os danos que ela poderá causar em: alto, médio ou baixo.

Essas ações que visam buscar um risco mínimo em barragens, fazem parte da gestão de risco.

A gestão de risco começou a ser discutida ainda no século XX, em virtude do aumento de atividades relacionadas às tecnologias químicas e nucleares (ZUFFO, 2010).

Em seguida, diante das incertezas e dificuldades da realização do gerenciamento de riscos de novas tecnologias, concebeu-se um novo tópico designado de avaliação de risco (VIANNA, 2015).

Conforme Perini (2009) a gestão de riscos estrutura-se por meio de um procedimento interativo constituído de várias etapas que interagem entre si. Colle (2008) explana que o processo de Gerenciamento do Risco (Risk Management) é formado pela avaliação, apreciação e controle do risco.

Para Melo (2014) os conceitos atuais de gestão de risco têm origem nas fortes demandas da sociedade por responsabilidade e transparência na tomada de decisão, tendo em vista que as consequências da ruptura de barragens são de interesse da população em geral.

De acordo com Melo e Fusaro (2015) a segurança de barragens é regida por normas de segurança, com uma abordagem tradicional que sempre apresentou bons frutos em termos de gestão na maior parte do mundo.

Entretanto, para Melo (2015) a sociedade vem desenvolvendo uma concepção de que sempre existirá um risco residual associado a barragens e que a segurança, como um valor absoluto, é inatingível. Essas duas perspectivas (segurança e risco) são ilustradas na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Perspectivas de sociedades orientadas para a segurança e o risco.



Fonte: Adaptado Melo e Fusaro (2015).

Já, para a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens – CNPGB (2005) a gestão de risco consiste na adoção de práticas que possam realizar um controle sobre os eventos e incertezas que a barragem está exposta, bem como a população a jusante, conforme está apresentado no diagrama com as etapas fundamentais da gestão de risco (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Diagrama com as etapas fundamentais da gestão de risco.



Fonte: Adaptado CNPGB (2005).

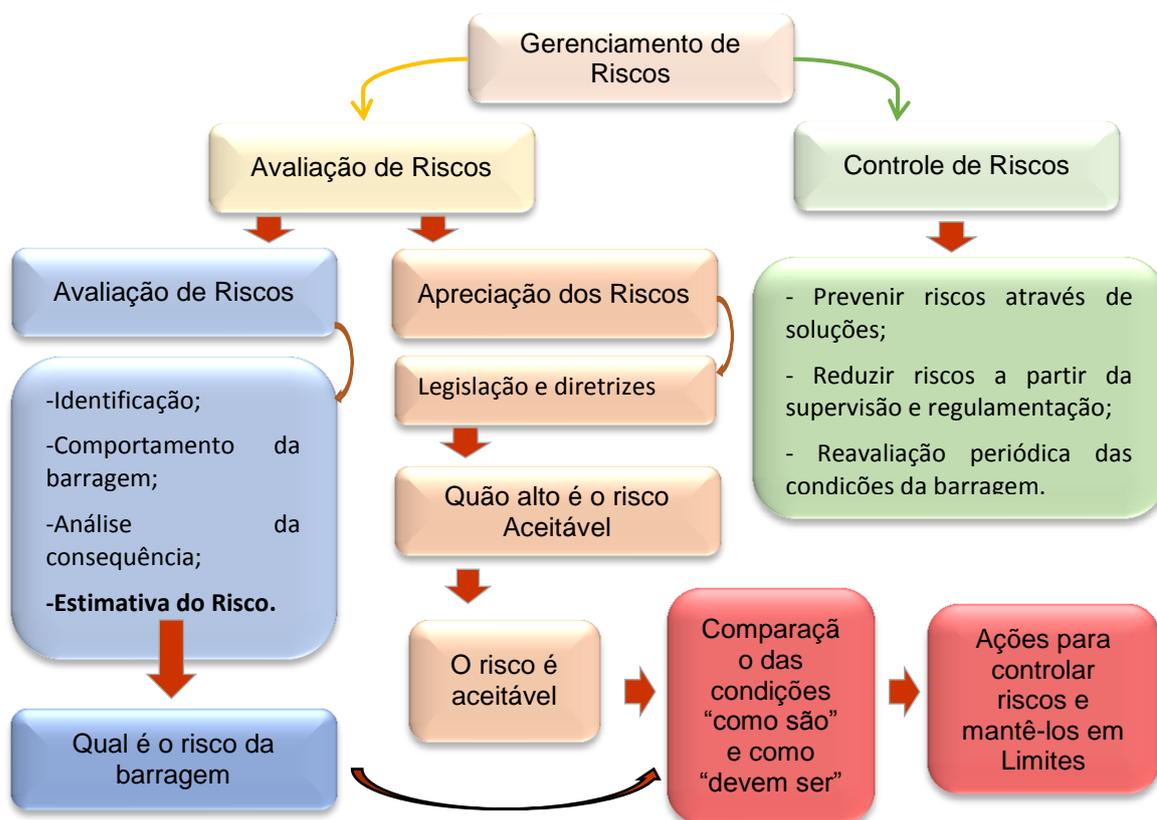
Para Melo (2014) a gestão de risco consiste, no contexto atual, na aplicação sistemática, coordenada e integrada de políticas de gestão, procedimentos e práticas para as tarefas de identificação, análise, avaliação, mitigação e controle do risco.

Valerius (2014) elucida que esse processo compreende, no caso de barragens, na execução de uma avaliação de risco para identificar os potenciais modos de falhas e suas consequências, um plano de gestão de riscos para reduzir

os riscos por meio de projetos de melhoria ou mudanças nas atividades de operação, e um plano de emergência em caso de possíveis falhas.

Kreuzer (2000) apresenta os instrumentos de gestão de risco apresentados no esquema da Figura 2.4.

Figura 2.4 - Definições para termos de gerenciamento do risco.



Fonte: Adaptado Kreuzer (2000).

A literatura se divide em duas partes de fundamental importância para a realização do gerenciamento de risco de barragens:

- Avaliação de risco: análise de risco e apreciação de risco;
- Controle de risco: mitigação, prevenção, detecção, plano de emergência, revisão e comunicação.

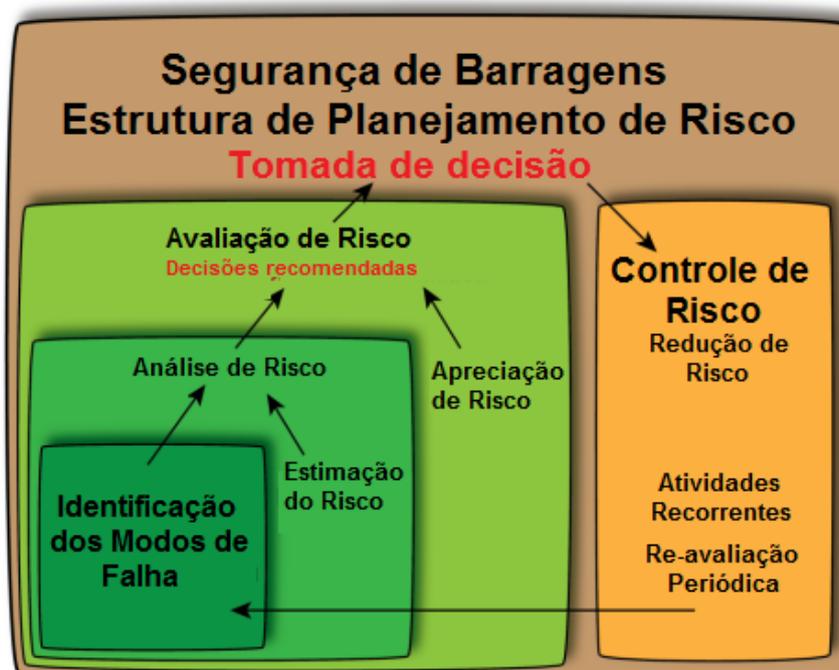
### 2.3.1 Avaliação de risco

A avaliação de riscos é o processo que trabalha com os resultados da análise de risco estimados qualitativamente e quantitativamente de uma barragem ou projeto existente, juntamente com todos os outros fatores relacionados a uma decisão que envolva a segurança. Esses fatores podem incluir o caso de segurança

de barragens, impactos sociais e econômicos, impactos ambientais, construtibilidade e os danos potenciais (FERC, 2016).

A avaliação do risco é conduzida para determinar um curso de ação recomendado (que pode envolver e considerar uma gama de opções) para mitigar ou aceitar os riscos de uma barragem ou projeto específico, ou no que diz respeito a uma questão de segurança de barragens específica ou preocupação operacional no projeto (FEMA, 2015). A Figura 2.5 apresenta as etapas de avaliação de risco:

Figura 2.5 - Relação entre a análise de risco, avaliação de risco e gestão de risco.



Fonte: Adaptado FEMA (2015).

A avaliação de risco utiliza os resultados da análise de risco para determinar os mecanismos de controle e monitoramento de uma área afetada na barragem que são conduzidos mediante comparações entre critérios de tolerabilidade de riscos previamente estabelecidos (Oliveira *et al.*, 2014).

Para Colle (2008), em casos que venham acarretar em perdas de vidas, a referência para o processo de tomada de decisão, que definirá quais ações deverão ser tomadas, é realizada por normas de risco social (risco para a sociedade como um todo, podendo a falha causar morte, danos, perdas financeiras e ambientais, entre outras) e individual (risco para qualquer indivíduo identificável que mora dentro da zona impactada pela falha ou que segue um particular padrão de vida que pode ser alterado pelas consequências da falha).

Vianna (2015) discorre que com a avaliação de risco torna-se possível determinar os níveis de risco e ameaça, identificar vulnerabilidades, e elencar ações importantes que deverão ser abordadas para realizar o gerenciamento das barragens.

Segundo Melo e Fusaro (2015) a avaliação de riscos é, em determinados momentos, denominada apreciação de riscos (comparação da estimativa do risco com critérios de aceitabilidade e tolerabilidade).

Já Zuffo (2010) cita que os elementos globais da avaliação de risco são:

- Análise do risco (estimativa);
- Apreciação do risco (decisão sobre quais riscos serão tolerados – o que pode levar a estabelecer políticas sobre riscos aceitáveis);
- Comparação entre os riscos tolerados com as políticas sobre riscos aceitáveis, levando a recomendações sobre ações futuras que devem auxiliar no processo final de tomada de decisão.

Melo (2014) afirma que a avaliação de risco incorpora o processo total de análise e apreciação de risco, sendo feitas recomendações sobre a necessidade de se reduzir o risco. Podendo ser trabalhado com um grupo de barragens, o que é de grande valia para os empreendedores de barragens.

A FEMA (2015) listou alguns princípios que devem ser aplicados em avaliações de risco, que incluem:

- Soluções adotadas não devem apresentar danos;
- O objetivo das ações corretivas de segurança em barragens deve buscar reduzir o risco a níveis toleráveis;
- Algumas ações corretivas podem ter consequências inesperadas;
- A fim de implementar algumas ações corretivas, os riscos de construção podem apresentar de forma excessiva durante certas fases da obra. A ação de correção para resolver um modo de falha potencial específico pode aumentar temporariamente ou permanentemente a probabilidade de outro modo de falha potencial;
- As decisões de risco devem ser informadas, não utilizar uma metodologia de *risco baseado*<sup>3</sup>;

---

<sup>3</sup> Risco baseado: Este termo implica que a comparação de uma estimativa de risco com critérios de risco é a base para a tomada de decisões (FEMA, 2015).

- As decisões devem se basear nos resultados de uma análise de risco como processo principal, no entanto fatores como a incerteza das estimativas de risco também devem ser considerados;

### 2.3.1.1 Análise de risco

A análise de risco é o primeiro componente da gestão de risco. É a parte do processo em que são identificados os modos de falha potencial, o desempenho estrutural e consequências adversas (FEMA, 2015).

Conforme Valerius (2014) a análise de risco é a ferramenta empregada no gerenciamento de segurança de barragens que busca fornecer dados para subsidiar o planejamento de ações, com foco na identificação e mensuração de danos que representam um maior risco.

A análise de risco trabalha com a definição do escopo e com a busca de um método de análise, definição e identificação de cenários que podem representar perigo, bem como a estimativa da probabilidade de ocorrência de falha da barragem e consequência (VIANNA, 2015).

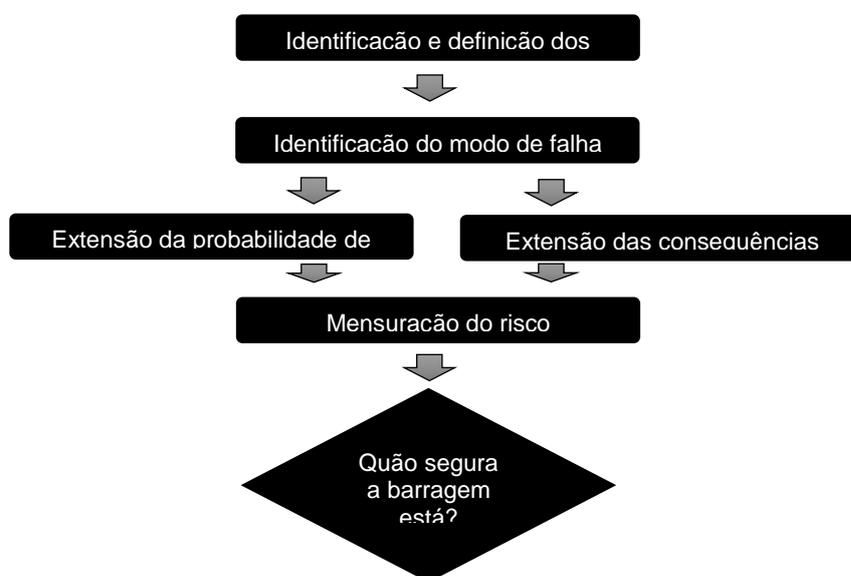
As análises de risco podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa, no entanto apresentam limitações importantes. As análises qualitativas se empregam de uma forma descritiva ou escalas de ordenação numérica para apresentar a magnitude de consequências potenciais e sua probabilidade da ocorrência, tendendo a serem subjetivas. Já as análises quantitativas são baseadas em valores numéricos das consequências potenciais e suas probabilidades, tomando-se que tais valores apresentam uma representação válida da magnitude real das consequências e da probabilidade dos vários cenários estudados, mas apresentam aplicações restritas na área de barragens em virtude da dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas no processo (MELO, 2014).

De acordo com Žvanut *et al.* (2016) o processo de análise de risco (descrito na Figura 2.6) para a segurança da barragem geralmente envolve as seguintes atividades:

- Definição de escopo;
- Identificação e definição de carregamentos e perigos;
- Análise probabilística de riscos e carregamentos;
- Identificação do modo de falha;
- Resposta da barragem e análise da probabilidade de falha;

- Estimativa das consequências correspondentes a cada evento de falha;
- Estimativa do risco;
- Análises de incertezas e sensibilidade;
- Documentação;
- Análise de especialistas e/ou verificação (se possível);
- Atualização da análise (se necessário).

Figura 2.6 – Processo de análise de risco.



Fonte: Adaptado Žvanut *et al.* (2016)

Segundo Melo (2014), ainda que todo o processo de análise de risco apresente certa complexidade na execução, sendo onerosa e demorada, ele pode ser extremamente útil em construções cujos eventuais riscos sejam elevados e associados a consequências relevantes. O conhecimento minucioso das vulnerabilidades e do desempenho da barragem, já assegurará a validade de aplicação do processo.

#### 2.3.1.2 Apreciação de risco

A apreciação de risco compreende a etapa de estabelecimento de políticas de riscos aceitáveis, em concordância com legislações pertinentes e manuais de segurança da avaliação de risco (ZUFFO, 2010).

De acordo com Melo (2014), a apreciação de risco é atividade que busca definir os critérios de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos, no entanto,

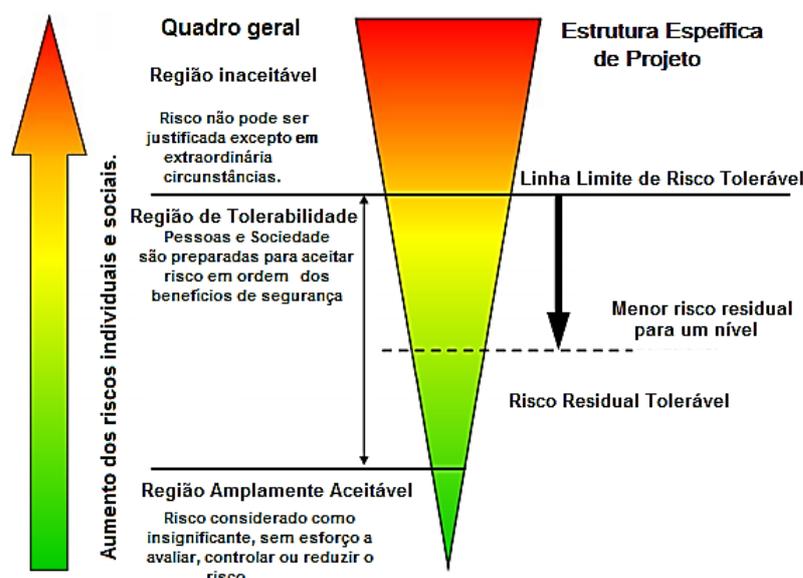
apresenta-se como o tema mais polêmico no gerenciamento de risco. O processo sai da esfera técnica da engenharia de barragens e interage com demais áreas da sociedade (política, economia, interesse social e legal, mídia, entre outros) o que leva a um enfoque mais subjetivo de julgamento de valores.

A FERC (2016) descreve quais os riscos toleráveis que devem ser estimados, são:

- Os riscos que a sociedade está disposta a conviver, de forma a garantir certos benefícios;
- Riscos que a sociedade considera insignificante (amplamente aceitável) ou algo que poderia ignorar;
- Riscos que a sociedade confie que estão sendo devidamente geridos pelo responsável;
- Riscos que o responsável mantém em análise e que poderão ser reduzidos quanto possível.

Um quadro para a compreensão da tolerabilidade do risco foi proposto pelo Health and Safety Executive (HSE) do Reino Unido e é mostrado na Figura 2.7 (HSE, 2001). Fundamentalmente o triângulo representa o aumento dos níveis de risco para um perigo particular, como um se move a partir da parte inferior do triângulo na direção do topo. A largura do triângulo sugere o esforço que deve ser gasto na abordagem dos riscos (FERC, 2016).

Figura 2.7 - Tolerabilidade da estrutura de risco para barragens.



Fonte: Adaptado FERC (2016).

As zonas podem ser descritas como:

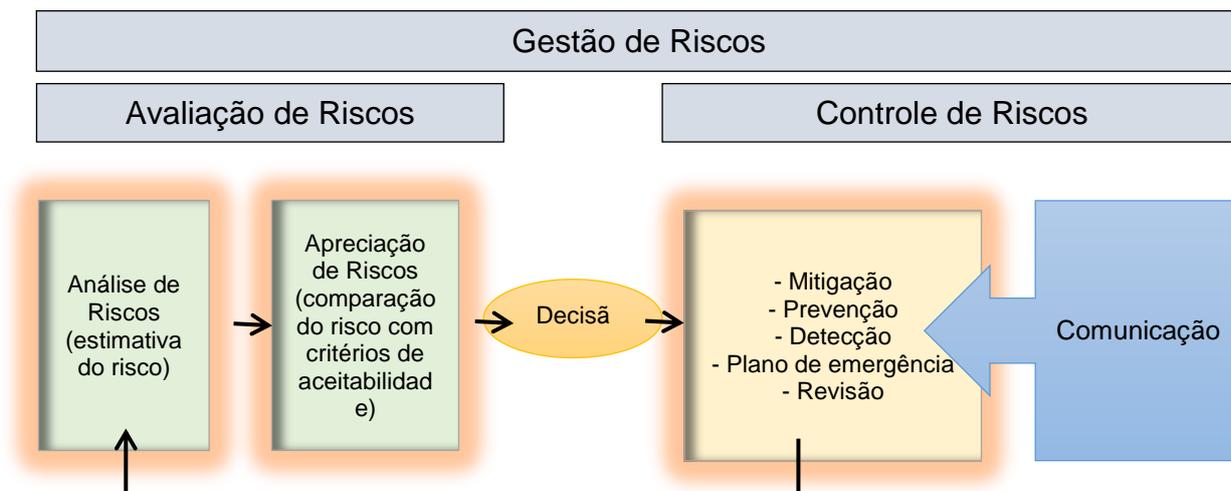
1. A zona inferior da amplamente aceitável, predominante por riscos considerados insignificantes e de natureza adequadamente controlada. Correspondem por situações comuns em suas vidas diárias;
2. A zona presente entre as regiões inaceitáveis e amplamente aceitáveis é a gama de risco tolerável. Outros fatores devem ser considerados para determinar se os riscos nesta zona são verdadeiramente considerados para ser tolerável.
3. A zona na parte superior representa uma região inaceitável. Para fins práticos, um risco que cai nesta região é considerado inaceitável, independentemente do benefício associado a ele. Qualquer atividade ou prática que dê origem a riscos nesta região deve-se, a princípio, ser excluída, a não ser que a atividade ou prática possa ser modificada para reduzir o grau de risco, de modo que passa para umas das regiões abaixo.

### **2.3.2 Controle de risco**

Zuffo (2010) define controle de risco como processo de implementação e reforço das ações a serem feitas a fim de controlar os riscos e periódica reavaliação da eficácia dessas ações ou medidas.

Melo (2014) afirma que o controle de risco corresponde à etapa final para gerenciamento de risco, contemplando ações de decisão, mitigação, prevenção, detecção, planos de emergência, revisão e comunicação de riscos. Como pode se observar na Figura 2.8:

Figura 2.8 - Atividades fundamentais da gestão de risco



Fonte: Adaptado Melo (2014).

Conforme a CNPGB (2005) o controle de risco busca atingir o risco aceitável ou o risco tolerável, que possuem diferentes definições. O risco aceitável compreende àquele considerado pela sociedade afetada como suficientemente baixo e adequadamente controlado a ponto não ser necessário reduzi-lo, e o segundo, apesar de inferior ao limite de tolerabilidade, ser considerado ainda susceptível de redução, a todo o tempo, desde que tal redução seja possível.

### 2.3.2.1 Gestão de risco no Brasil

Até o ano de 2010 o Brasil não possuía uma legislação de segurança de barragens. Somente em 2010 entrou em vigor a Lei 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SINISB.

Até então, as atividades de controle e fiscalização eram restritas a alguns estados. Para Menescal (2009), isso se explica devido ao fato da maior importância as grandes barragens, que dificilmente apresentavam problemas devidos ao empenho em realizar bons projetos e manutenção. A falta de dados sobre acidentes envolvendo estes empreendimentos também favorecia essa condição.

Com a criação da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH (Lei nº 12.217 de 18/11/93), o estado do Ceará foi um dos primeiros estados a implantar um sistema de gestão de segurança de barragens do país. Essa

necessidade surgiu devido a grande quantidade de barragens para acumulação de água. Um dos instrumentos utilizados foi a elaboração de um Manual de Segurança de Barragens que preconizava as diretrizes de risco no estado.

No estado de Minas Gerais, que possui uma grande quantidade de barragens de rejeitos industriais e minerais, e um histórico envolvendo acidentes de grande magnitude, iniciou um debate de gestão de segurança que levou a criação das Deliberações Normativas pelo Conselho de Política Ambiental – COPAM nº 62/2002 e 87/2005 que constituem um marco na legislação ambiental estadual. Em seguida, em 2007 realizou-se o primeiro inventário com a situação das barragens quanto à estabilidade (FEAM, 2015).

No âmbito nacional, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002) foi o primeiro instrumento elaborado com o propósito de estabelecer parâmetros e dar suporte aos proprietários com práticas que visavam segurança compatível com seu papel social.

A Lei nº 12.334/2010 aplica-se as barragens que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros);
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas

Para Vianna (2015), ainda que esta regulamentação seja recente, ela representa um marco para o setor.

A Lei 12.334 definiu que os agentes fiscalizadores tem a responsabilidade de classificarem a as barragens, por categoria de risco, dano potencial associado e volume, seja para geração hidrelétrica, acumulação de água, disposição de rejeitos minerais ou industriais.

Logo, esses órgãos, especialistas em suas respectivas áreas de atuação, têm a responsabilidade por regulamentações complementares. No caso das barragens de hidrelétricas, essa atribuição cabe à Agência Nacional de Energia

Elétrica – ANEEL (MELO, 2014). Em barragens de rejeitos minerais fica a cargo do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM.

Em reservatórios de acumulação para irrigação, recreação ou abastecimento ficou sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas - ANA realizar a fiscalização em rios federais. Em rios que não ultrapassam os limites territoriais de um estado, cabe ao órgão estadual realizar esta ação.

A ANA também é responsável pela implantação do SNISB, além de captar os dados de todas as barragens correspondentes aos órgãos fiscalizadores nacionais e estaduais para elaboração do Relatório de Segurança de Barragens e conduzir, anualmente, ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH.

Quanto à responsabilidade por atender os critérios de segurança da barragem, fica a cargo do empreendedor, que pode ser gestor privado ou público.

A Lei estabelece como obrigação do empreendedor:

- Elaborar o Plano de Segurança da Barragem e o Plano de Ação de Emergência;
- Realizar as Inspeções de Segurança Regular e Especial nas barragens;
- Realizar a Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

Além de encaminhar as informações obtidas às autoridades competentes e aos organismos de Defesa Civil (ARAÚJO, 2014)

Há de certa forma, uma expectativa quanto à funcionalidade desta Lei, vindo sanar os anseios da sociedade quanto à gestão de risco de barragens em todo o território brasileiro. Devido ao acidente envolvendo as barragens de acúmulo de rejeitos do Fundão em Mariana – MG percebe-se que há um apelo da sociedade quanto à implantação dos instrumentos prescritos na Lei nº 12.334/2010.

## 2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DE RISCO EM BARRAGENS

Segundo Melo (2014), desde a década de 60 do século passado têm-se registros da utilização de métodos de análise de risco em várias áreas de conhecimento, várias metodologias com potencial de uso em barragens, cujas aplicações são recentes. Os métodos de análise podem ser categorizados de diferentes formas, como, por exemplo:

- pela sua natureza: qualitativa ou quantitativa;

- pelo seu tratamento: indutivo ou dedutivo;
- pelo seu potencial de aplicação: análise preliminar em portfólio ou análise em barragens individuais.

Dentre os vários métodos existentes com potenciais aplicações em análise preliminar de risco em portfólio e em barragens individuais, a serem descritos mais detalhadamente nos itens subsequentes, podem ser citados como exemplo:

- Métodos de análise preliminar de risco em portfólio de barragens baseados em índices: Índice Global de Risco; Índice Global de Risco Modificado; Índice de Lafitte; Metodologia de Classificação de barragens SABESP; Potencial de Risco; Metodologia de Classificação de barragens CEMIG e Matrizes de Classificação (Lei 12.334).

- Métodos de análise de risco em barragens individuais: Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas - LCI; Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos - AMFE; Análise por Árvore de Eventos - ETA e Análise por Árvore de Falhas - FTA.

A seguir serão discutidos os principais métodos de classificação de risco disponíveis na literatura.

#### **2.4.1 Índice Global de Risco Modificado ( $\alpha_g$ )**

O Índice Global de Risco Modificado é uma variação do Índice global de risco proposto pelo ICOLD em 1982, sendo um dos pioneiros no sentido de potencializar a aplicação de um método em portfólio de barragens. Esse método tem como escopo principal uma abordagem baseada no monitoramento de barragens voltado à instrumentação de acordo com as condições impostas a cada barragem (MELO, 2014).

O primeiro país a adotar a utilização do Índice Global de Risco como instrumento de regulamentação de segurança de barragens foi Portugal. No entanto, foi necessário realizar ajustes no método proposto originalmente, ajustando-se ao portfólio de barragens portuguesas (MELO; FUSARO, 2015). Essas mudanças geraram o Índice Global de Risco Modificado.

A avaliação das condições de risco é realizada impondo valores de descritores ( $\alpha$ ) para fatores que afetam a barragem. O método divide-se em três diferentes descritores, apresentados nas equações 2.1, 2.2 e 2.3:

- Fatores externos ou ambientais (Fator E)

Índice parcial E – Relativo às condições exteriores ou de ambiente

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

1. Sismicidade
2. Escorregamento de taludes
3. Cheias superiores ao Projeto
4. Gestão do reservatório
5. Ações agressivas (Clima, água, água de processo, rejeito)

- Condição da barragem (Fator F)

$$F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 \alpha_i \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

6. Dimensionamento estrutural
7. Fundações
8. Órgãos de descarga
9. Manutenção

- Danos humanos e econômicos potenciais (Fator R)

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} \alpha_i \quad \text{Equação 2.3}$$

10. Volume do reservatório
11. Instalações à jusante

Os descritores, classes e elementos de classificação são apresentados na Tabela 2.2.

A definição do tipo de sistema de monitoramento e intervenção sintetiza o conjunto de fatores de apreciação das condições de risco formando o **índice global de risco ( $\alpha_g$ )**.

O valor do índice de risco global ( $\alpha_g$ ) é o produto dos índices parciais:

$$\alpha_g = E \times F \times R \quad \text{Equação 2.4}$$

O índice de risco global ( $\alpha g$ ) classifica barragens em três diferentes classes de risco:

- Classe A - barragens que possuem ao menos um dos índices parciais com valor 6, correspondendo, de acordo com a Tabela 2.6, as condições que obrigam a intervenção técnica;
- Classe B - barragens que possuem  $\alpha g$  superior a 20 e o fator **R** maior ou igual a 3;
- Classe C – demais barragens.

Tabela 2.2 - Índice global de risco Modificado

| CONDIÇÕES EXTERNAS OU AMBIENTAIS (FATOR E) |                                |   |  |   |   | CONDIÇÃO DA BARRAGEM / CONFIABILIDADE (FATOR F) |               |                             |              | DANOS POTENCIAIS HUMANOS / ECONÔMICOS (FATOR R) |  |
|--|--------------------------------|---|--|---|---|---|---------------|-----------------------------|--------------|---|--|
| Descritor (ai)                             | Sismicidade                    | Escorregamento de taludes (probabilidade) | Cheias superiores à do projeto (probabilidade) | Gestão do reservatório                        | Ações ambientais agressivas (clima, água) | Dimensionamento estrutural                      | Fundações     | Órgãos de descarga          | Manutenção   | Volume do reservatório (m³)                     | Instalações a jusante (associada à prob. de ocorrência de pessoas e instalações nas áreas potencialmente inundáveis) |
|  | (1)                            | (2)                                       | (3)  | (4)   | (5)                                       | (6)   | (7)           | (8)                         | (9)          | (10)  | (11)   |
| 1  | -                              | Mínimo ou nulo                            | Baixa (barragens de concreto e alvenaria)      | Muito boa                                     | Mínimas                                   | Adequado  | Muito boas    | Elevada confiabilidade      | Muito boa    | $< 10^5$  | Muito reduzida   |
| 2  | Muito baixa $0,05g < a < 0,1g$ | Baixa (barragens de concreto e alvenaria) | Baixa (barragens de aterro)                    | Boa (barragens de concreto e alvenaria)       | Fracas                                    | Adequado sob o ponto de vista estático          | Boas          | Média confiabilidade        | Boa          | $10^5 - 10^6$                                   | Pequena  |
| 3  | Baixa $0,1 < a < 0,2g$         | Baixa (barragens de aterro)               | Média (barragens de concreto e alvenaria)      | Média (barragens de aterro)                   | Médias                                    | Satisfatório                                    | Satisfatórias | Baixa confiabilidade        | Satisfatória | $10^6 - 10^7$                                   | Média  |
| 4  | -                              | Média (barragens de concreto e alvenaria) | Média (barragens de aterro)                    | Aceitável (barragens de concreto e alvenaria) | Fortes                                    | Aceitáveis                                      | Aceitáveis    | Reduzida confiabilidade     | Aceitável    | $10^7 - 10^9$                                   | Grande   |
| 5  | -                              | Média (barragens de aterro)               | Grande   | Medíocre (barragens de aterro)                | Muito fortes                              | Medíocres                                       | Medíocres     | Não confiáveis              | Medíocre     | $> 10^9$  | Elevad   |
| 6  | -                              | Elevada                                   | Elevada  | -   | Associadas a danos estruturais            | Inadequado                                      | Inaceitável   | Inexistentes ou inoperantes | Inaceitável  | -   | Muito elevada  |

Fonte: Adaptado de ICOLD (1982).

## 2.4.2 Metodologia de classificação de risco do USACE

O método do USACE é baseado em uma metodologia desenvolvida pela organização canadense Hydro-Quebec que adota um procedimento de classificação de barragens com base no risco e consequências de um possível rompimento.

A organização utiliza o conceito de índices de Condição (Condition Indices – CI) que variam de 0 a 100, em que se medem as condições operacionais da barragem e seu desempenho. O valor de IC foi adaptado para gerar a classificação de risco em que corresponde  $IC=(100 - S.10)$ . Quanto maior o Escore global (S) calculado com a Equação 2.5, mais importante e urgente a ação a ser tomada na barragem. O Quadro 2.2 apresenta a classificação das barragens.

Quadro 2.2 - Classificação do Índice de Condição

| Zona | Índice de condição - IC | Descrição da condição   |
|------|-------------------------|---|
| 1    | 85 a 100                | Excelente: Sem defeitos visíveis. Algum envelhecimento ou desgaste pode ser visível.                      |
|      | 70 a 84                 | Bom: Somente pequenas deteriorações ou defeitos são evidentes.  |
| 2    | 55 a 69                 | Razoável: Algumas deteriorações ou defeitos são evidentes, mas a função não é significativamente afetada. |
|      | 40 a 54                 | Marginal: Deterioração moderada, mas a função ainda é adequada.   |
| 3    | 25 a 39                 | Pobre: Deterioração grave em pelo menos algumas porções da estrutura. A função é inadequada.              |
|      | 10 a 24                 | Muito pobre: Deterioração extensa, mal funcional.   |
|      | 0 a 9                   | Falha: Não mais funções, falha geral ou falha completa de um componente estrutural principal.             |

Fonte: Peyras *et al.* (2011).

Esse método foi idealizado por Andersen *et al.* (1999), utilizando como base 13 escores de risco em barragens.

Essa classificação gera o Escore Global (S) que assume o mesmo valor de IC na classificação do Quadro 2.2, 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 (C) (função da densidade populacional, da extensão das áreas agrícolas e do desenvolvimento de indústrias).

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

Equação 2.5

A Vulnerabilidade (V) da barragem pode ser obtida pela soma aritmética da média dos escores das *constantes físicas* (A) com a média aritmética dos escores da soma dos *parâmetros das variáveis* (B), conforme a Equação 2.3.

$$V = A + B$$

Equação 2.6

Para os valores dos escores de A para o cálculo da vulnerabilidade utiliza-se o Quadro 2.3:

Quadro 2.3 - Escores para Classificação dos parâmetros das constantes

|   |  |                    |
|---|--|--------------------|
| <b>A<sub>1</sub></b>                              | <b>Altura da Barragem (m).</b><br><10                                  | <b>Escore</b><br>1 |
|   | 10-30  | 3                  |
|   | 30-100   | 6                  |
|   | >100   | 10                 |
| <b>A<sub>2</sub></b>                              | <b>Largura do Coroamento (m).</b><br>>15                               | 1                  |
|   | 6-15   | 3                  |
|   | 3-6  | 6                  |
|   | <3   | 10                 |
| <b>A<sub>3</sub></b>                              | <b>Tipo de Barragem.</b><br>Terra e Enrocamento                        | 4                  |
|   | Terra  | 10                 |
| <b>A<sub>4</sub></b>                              | <b>Tipo de Fundação.</b><br>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><br><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><br>Filtração Moderna              | 1                  |
|   | Drenos horizontais e Verticais Aterro homogêneo resistente ao “piping” |                    |
|   | Poços de Alívio, drenos de pé  |                    |
|   | Sem controle drenagem interna  | 10                 |
| $A = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6}{6}$ |  |                    |

Fonte: Fontenelle (2007).

Para os valores dos escores de B utiliza-se o Quadro 2.4:

Quadro 2.4 - 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<sup>4</sup></b><br><b>(%) – 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<br>Insatisfatório  | 1<br>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><math>B = \frac{B1 + B2 + B3 + B4 + B5 + B6}{6}</math></b> |   |               |

Fonte: Fontenelle (2007).

<sup>4</sup> A altura hidráulica de uma barragem é a distância vertical entre o nível de água máximo projetado e o ponto mais baixo no leito original medido na ponta da barragem, ou seja, a borda livre ou folga do vertedouro (FEMA, 2007).

No Quadro 2.5 verifica-se o escore que melhor se adequa às condições de habitação e perdas e vidas na área afetada pela barragem.

Quadro 2.5 - Danos a propriedades e perdas de vidas.

| C - Danos a propriedades e perdas de vidas (função da densidade populacional, das áreas agrícolas e desenvolvimento de indústrias)  |   |        |
|---|---|--------|
| Potencial de Perigo   | Área Afetada  | Escore |
| 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 | 8      |
| Muito Alto  | Cidades importantes (com mais de 100.000 habitantes), área com indústrias   | 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.   |   |        |

Fonte: Fontenelle (2007).

Segundo Fontenelle (2007), uma deficiência da metodologia do USACE descrita por ela é que o método não considera para efeito de pontuação a situação da barragem no que se refere a percolação, deformação e deterioração.

### 2.4.3 Potencial de Risco – Metodologia COGERH

A metodologia utilizada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH, foi baseada na avaliação do potencial de risco que as barragens ofereciam, sendo idealizada e desenvolvida por Menescal *et al.* (2001)

Melo (2014) relata que, basicamente, essa metodologia foi à percussora do *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens* elaborado pelo Ministério da Integração Nacional, e em seguida, viria a influenciar na elaboração das matrizes de análise da Lei 12.334/2010. O Potencial de Risco (PR) é constituído de três fatores:

- Periculosidade (P): composto por descritores relativos a parâmetros intrínsecos da barragem ou características técnicas do projeto;
- Vulnerabilidade (V): composto por descritores associados ao estado atual da barragem;
- Importância (I): com descritores relacionados à consequência de uma eventual ruptura da barragem.

O potencial de risco (PR) pode ser calculado através da Equação 2.7:

$$PR = \frac{(P+V)}{2} \times I \quad \text{Equação 2.7}$$

Tabela 2.3 - Periculosidade (P).

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

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

P > 30 – Elevado;

P = 20 a 30 – Significativo

P = 10 a 20 – Baixo a Moderado

<sup>5</sup> Se a vazão for desconhecida, deverá ser reavaliada, independentemente da pontuação.

Tabela 2.4 - Vulnerabilidade (V).

| TEMPO DE OPERAÇÃO (6) | EXISTÊNCIA DE PROJETO (AS BUILT) (7)                      | CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS VERTEDOURAS (8) | TOMADA DE ÁGUA (9)                   | PERCOLAÇÃO (10)   | DEFORMAÇÕES/ AFUNDAMENTOS ASSENTAMENTOS (11)                                 | DETERIORAÇÃO DOS TALUDES/ PARAMENTOS (12)   |
|-----------------------|---|---|--------------------------------------|---|--|---|
| > 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. Depressão no rip-rap |
| < 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) | Escorregamento s – sulcos profundos de Erosão, Vegetação (10)                           |

$$V = \sum_{i=1}^5 V_i$$

V > 35 – Elevada

V = 20 – 35 – Moderada a Elevada

V = 5 a 20 – Baixa a Moderada ;

V < 5 – Muito baixa

Tabela 2.5 - Importância Estratégica (I)

| (A) VOL. ÚTIL <sup>6</sup> hm <sup>3</sup> | (B) POPULAÇÃO A JUSANTE | (C) CUSTO DA BARRAGEM |
|--|-------------------------|-----------------------|
| 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)         |

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

Equação 2.8

Tabela 2.6 – 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.

#### 2.4.4 Matrizes de classificação: Lei 12.334

Com a criação da lei, todos os proprietários de barragens que apresentam riscos a jusante são obrigados a criar o Plano de Ação Emergencial (PAE) que identifica os procedimentos e os processos que serão seguidos pelos operadores de barragens e pelas autoridades públicas em uma situação de emergência, além de manter uma equipe responsável pela inspeção.

Apesar da recente sanção da lei, já existe cobranças para melhorias nos seus instrumentos devido à repercussão do acidente ocorrido com a barragem do Fundão em Mariana – MG.

No entanto, um dos maiores desafios está em torno da aplicação da lei. Tendo em vista, que segundo dados revelados pelo Relatório de Segurança de Barragens de 2015, elaborado pela ANA, o Brasil deixou de fiscalizar 96% de suas barragens devido à falta de estrutura dos órgãos fiscalizadores.

<sup>6</sup> Volume regularizado anual a partir dos dados de operação

A classificação da barragem é realizada pelos agentes fiscalizadores com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de acordo com a Resolução CNRH nº 143. Barragens construídas em rios de domínio dos estados são fiscalizadas por órgãos estaduais, caso do estado do Tocantins, que cabe ao Instituto Natureza do Tocantins – NATURATINS essa responsabilidade. Em rios de domínio federal, a ANA é responsável pela classificação de barragens de uso comum, já que para barragens de geração de energia cabe a ANEEL e de resíduos de mineração ao DNPM.

A Lei 12.334 instituiu, como primeiro de seus instrumentos, um sistema de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado. Esse modelo de classificação, baseada em índices de risco e matrizes de classificação, é fruto de uma longa experiência acumulada com outras metodologias anteriormente citadas (MELO, 2014).

Assim como a metodologia utilizada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH, a Resolução CNRH Nº 143/2012 que estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, foi criada para atender o art. 7º da Lei nº 12.334. Definindo as classes de riscos de risco: alto, médio ou baixo risco.

A resolução CNRH Nº 143 divide os critérios a serem avaliados em uma barragem em quatro grupos: Características técnicas (CT), Estado de Conservação (EC), Plano de Segurança da Barragem (PS) e Dano Potencial Associado (DPA).

A soma dos valores dos critérios de enquadramento fornecem a classe de risco e da classe de dano da barragem, conforme a Equação 2.9:

$$\text{Categoria de risco} = \sum_1^6 CT + \sum_7^{12} EC + \sum_{13}^{17} PS \quad \text{Equação 2.9}$$

$$\text{Classe de dano} = \sum_{18}^{21} DPA \quad \text{Equação 2.10}$$

As categorias de riscos podem ser observados na Tabela 2.7:

Tabela 2.7 - Matriz categoria de risco, Resolução CNRH n° 143.

| <b>Categoria de Risco</b> | <b>CRI</b>                 |
|---------------------------|----------------------------|
| Alto                      | $\geq 60$ ou $EC^* \geq 8$ |
| Médio                     | 35 a 60                    |
| Baixo                     | $\leq 35$                  |

Tabela 2.8 - Matriz de dano potencial associado, Resolução CNRH n° 143.

| <b>Dano Potencial Associado</b> | <b>DPA</b> |
|---------------------------------|------------|
| Alto                            | $\geq 16$  |
| Médio                           | 10 a 16    |
| Baixo                           | $\leq 10$  |

Desta forma, a matriz de classificação pode ser realizada, conforme o Quadro 2.6:

Quadro 2.6 - Matriz de categoria de risco e dano potencial associado

| <b>Classe da Barragem</b> |              | <b>Classe de dano potencial associado</b> |              |              |
|---------------------------|--------------|---|--------------|--------------|
|                           |              | <b>Alto</b>                               | <b>Médio</b> | <b>Baixo</b> |
| <b>Classe de Risco</b>    | <b>Alto</b>  | A   | B            | C            |
|                           | <b>Médio</b> | A   | C            | D            |
|                           | <b>Baixo</b> | A   | C            | E            |





## 2.5 AUXÍLIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD)

Os métodos Auxílio Multicritério à Decisão visam auxiliar a tomada de decisão perante múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes, por meio da aplicação de um conjunto de técnicas e métodos estruturados (LIMA *et al.*, 2014)

A Análise Multicritério é uma técnica que pode ser empregada qualitativamente e quantitativamente situada entre abordagens puramente exploratórias e pouco estruturadas de tomada de decisão (Brainstorm e Grupos de Discussão) e os modelos quantitativos estritamente estruturados da Pesquisa Operacional. No entanto, diferentemente dessa última, que procura a solução ótima para um objetivo específico, o AMD segue uma linha de compromisso, negociada frente aos vários objetivos a que a solução deve atender. Busca, então, não a solução estritamente ótima, mas a solução de consenso (GOMES *et al.*, 2012; TEODORO, 2015).

Com os métodos multicritério é possível obter a grande vantagem de poder quantificar e avaliar diversos critérios que não seriam cotejados nas análises de critério único. Contudo, necessitam de um grande número de informações para a avaliação, além disto, os decisores e a escolha dos critérios têm bastante relevância no processo, o que torna a análise excessivamente subjetiva (CARVALHO, 2013; TEODORO, 2015).

O interesse pelas metodologias de análise de multicritério surgiu após a década de 1960, com o desenvolvimento de pesquisas operacionais para a formulação de problemas de otimização (ROY e BOUYSSOU, 1993). Depois, a partir de 1970, este interesse aumentou dada a necessidade de se tratar sistemicamente uma crescente multiplicidade de alternativas as quais as organizações se deparam dentro de um contexto crescente de instabilidade e incertezas (SIMÕES, 2013).

Pacheco (2013) elenca que, a partir da década de 1980 foram desenvolvidas novas metodologias multicritérios prescritivistas e construtivistas, onde diferentemente dos modelos tradicionais, promoveu uma mudança de paradigma, marcado pela representação da complexidade em um processo decisório e a indissociabilidade do objeto e a subjetividade dos atores. Para atender ao novo paradigma as metodologias incorporaram instrumentos voltados a estruturar o

raciocínio em situações de decisões complexas, em que estejam presentes múltiplos pontos de vista personalizados aos atores do contexto.

Faziam parte deste novo paradigma duas escolas com pensamentos distintos: a Escola Americana, que desenvolve métodos Multicritério de Tomada de Decisão, denominados MCDM (Multicriteria Decision Making), e caracteriza-se por adotar o paradigma científico do racionalismo, e a Escola Européia, que desenvolve métodos de Apoio à Decisão, denominados MCDA (Multicriteria Decision Aid) ou Auxílio Multicritério à Decisão, e caracteriza-se por adotar o paradigma científico do construtivismo (BAIMA, 2015).

A Escola Americana desenvolveu-se sob o paradigma Positivista. Essa corrente se caracteriza pela busca de uma visão objetivista do problema, onde o decisor age em busca da razão com imparcialidade total, desta forma, todo conhecimento gerado provém do objeto em estudo (ROY e BOUYSSOU, 1993).

Já a Escola Europeia desenvolveu-se sob o paradigma Construtivista. Essa corrente se caracteriza por ter uma visão construtivista do problema, onde o conhecimento é gerado com base na interação e aprendizagem entre o objeto e o sujeito (ROY e BOUYSSOU, 1993). Os instrumentos de avaliação que incorporam os critérios de valor julgados relevantes aos decisores em cada contexto, assim como um conjunto de condições e meios que lhes sirva de apoio às decisões (PACHECO, 2013).

Para BAIMA (2015) a principal vantagem desta metodologia é auxiliar não apenas a obtenção de resultados, mas a compreensão de todo o processo decisório através de um processo interativo.

### **2.5.1 Fases do Processo AMD**

As fases de análise de decisão podem variar de acordo com o tipo de problemática que deseja-se trabalhar.

Já Gomes *et al.* (2012) dividem este processo em seis etapas:

1. Identificação e Análise do problema;
2. Desenvolvimento de alternativas;
3. Confrontar as alternativas;
4. Classificação dos riscos;
5. Selecionar a melhor alternativa;
6. Execução e avaliação.

Assim, com o problema claramente definido, levantadas as alternativas para sua solução, o conjunto de decisores identificados e especificados e os critérios de avaliação das alternativas definidos, passa-se, então, à aplicação do procedimento quantitativo de análise multicritério (JANNUZZI *et al.*, 2009 *apud* TEODORO, 2015).

## 2.5.2 Atores

Para se desenvolver uma melhor compreensão dos métodos AMD é necessário conhecer os componentes fundamentais do processo de tomada de decisão.

Esse processo é realizado por atores identificados, pessoas que estão inseridas ou possuem posição no contexto decisional, com interesses comuns nos resultados das decisões e influenciam na decisão com seus valores individuais (BOAS, 2006).

### 2.5.2.1 Decisor

Roy e Vanderpooten (1997) apontam que o papel do decisor pode ser assumido por uma única pessoa ou por um grupo encarregado pela tomada de decisão. Para Mello *et al.*, (2003) os *decisores* podem atuar em interesse individual ou em função de um grupo realizando escolhas e preferencias de acordo com seu entendimento.

### 2.5.2.2 Facilitador

Segundo Bana e Costa (1992) o *facilitador* assume dois papéis: primeiro deve esclarecer o processo de avaliação e/ou negociação inerente à tomada de decisões, realizando o diálogo e entendimento entre os atores, e construir um modelo que considere os pontos de vistas dos atores e seus juízos de valores.

O facilitador deve elucidar e sistematizar o processo de avaliação necessário à tomada de decisão e manter-se neutro durante o processo, excluindo seu juízo de valor, de maneira que não interfira na decisão dos demais envolvidos (BARAN, 2015).

### 2.5.2.3 Analista

Segundo Baran (2015), o analista é responsável por analisar e auxiliar facilitadores e decisores a estruturar os problemas, além de identificar fatores

externos e do ambiente que podem interferir na evolução, estruturação e resolução do problema.

Já Mello *et al.*, (2003) atribui ao facilitador o papel de analisar os dados dos decisores, e assim, apresentar os resultados para a decisão (BARAN, 2015).

#### 2.5.2.4 Stakeholder

O *Stakeholder* pode ser qualquer indivíduo ou grupo de pessoas que possuam alguma ligação com o problema ou possam ser afetados pelo mesmo. Eles apresentam um interesse direto na solução do problema, contudo não participam ativamente do processo de decisão.

### 2.5.3 Elementos para estruturação do AMD

Além da definição dos atores, devem-se conhecer outros componentes fundamentais para a formulação do processo de tomada de decisão. Como a definição das alternativas, critérios e a problemática do processo.

#### 2.5.3.1 Alternativas

Teodoro (2015) discorre que as *alternativas* são os objetos de decisão ou para onde a tomada de decisão devem ser conduzida. Elas podem ser políticas, programas, projetos, opções ou alternativas que são objeto de análise multicritério.

As alternativas também podem ser expressas como sinônimo de ações.

As alternativas de um problema de decisão são analisadas e avaliadas de acordo com o ponto de vista e preferências do decisor, sendo matematicamente formalizado pela noção de critério (BAIMA, 2015).

#### 2.5.3.2 Critérios

Os *critérios* são ferramentas que permitem comparar ações de acordo com um determinado enfoque. Assim, um grupo de critérios é o conjunto de critérios utilizados em uma determinada situação de decisão, que deverá permitir modelar preferências em um nível global (ROY e BOYSSOU, 1993).

Segundo Szajubok *et al.*, (2006) a família de critérios deve representar de forma clara e correta o juízo de valores do decisor e deve ser efetuada com base nos objetivos do decisor, envolvendo, portanto, sua participação.

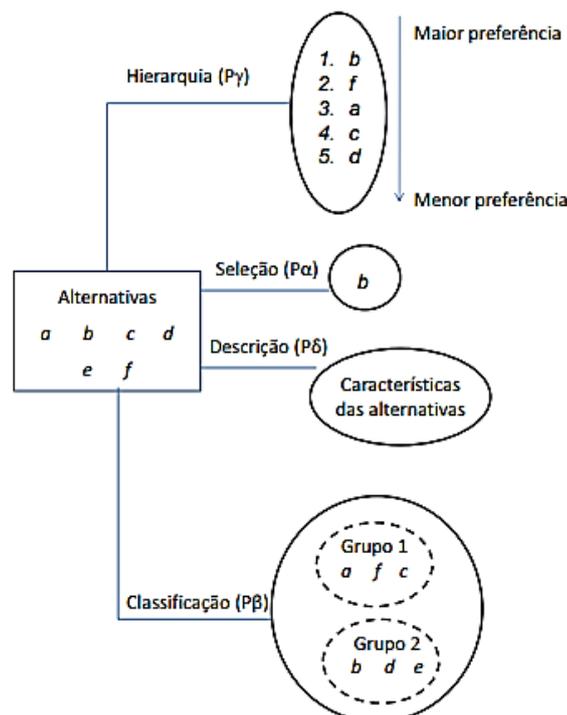
### 2.5.3.3 Problemática

Durante a estruturação do processo decisório, é primordial compreender o tipo de problemática em que a decisão está inserida.

Roy e Boyssou (1993) afirmam que para a estruturação do modelo de decisão é fundamental compreender a *problemática* em que o processo se insere. Os métodos AMD podem se distinguir, em quatro tipos de problemáticas:

- Escolha (choice) é mais clássica das problemáticas, na qual se busca identificar a melhor alternativa ou selecionar um conjunto limitado das melhores alternativas. Representada por  $P\alpha$ .
- Classificação (classification/sorting), na qual a intenção é classificar/alocar as ações em grupos, classes ou categorias, de forma que sigam algum tipo de ordem de preferência ou importância entre si. Representada por  $P\beta$ .
- Ordenação ou hierarquia (ranking) objetiva-se em construir uma lista ordenada das ações, das melhores para as piores. Esta ordenação pode ser parcial ou completa no conjunto de alternativas. Representada por  $P\gamma$ .
- Descrição (description) tem como propósito identificar e descrever as principais características que distinguem as alternativas. Onde, as ações tem acesso a todas as informações relacionadas às ações. Representada por  $P\delta$ .

Figura 2.9 - Tipos de problemáticas.



Fonte: Baima (2015).

### 2.5.4 Escolha do método multicritério

Há um número considerável de métodos que trabalham com Auxílio multicritério à decisão na literatura acadêmica. Rodriguez *et al.*, (2013) apresenta no Quadro 2.8, cita alguns dos métodos mais trabalhados (primeira coluna), bem como suas respectivas classificações (segunda coluna) e autores (terceira coluna).

Quadro 2.8 - Principais métodos de MDA

| Método   | Classificação                     | Referências seminais  |
|--|-----------------------------------|---|
| Electre  | Método de Classificação           | ELECTRE I (ROY, 1968);  |
|  |                                   | ELECTRE II (ROY; BERTIER, 1971);                                    |
|  |                                   | ELECTRE III (ROY; HUGONNARD, 1981);                                 |
|  |                                   | ELECTRE IV (ROY; HUGONNARD, 1981);                                  |
|  |                                   | ELECTRE IS (ROY; SKALKA, 1985);                                     |
|  |                                   | ELECTRE TRI (YU, 1992; MOUSSEAU; SLOWINSKI; ZIELNIEWICZ, 2000)      |
| Promethee  | Método de superação               | Brans, Mareschal e Vincke (1984) e Brans, Vincke e Mareschal (1986) |
| Regime   | Método de superação               | Hinloopen, Nijkamp e Rietveld (1983)                                |
| Multiattribute Utility Theory (MAUT)   | Teoria da Utilidade Multiatributo | Fishburn (1970) e Keeney e Raiffa (1976)                            |
| Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART)                                | Teoria da Utilidade Multiatributo | Edwards (1977)  |
| Analytic Hierarchy Process (AHP)   | Teoria da Utilidade Multiatributo | Saaty (1977) e Saaty (1980)   |
| Analytic Network Processes (ANP)   | Teoria da Utilidade Multiatributo | Saaty (1996)  |
| Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH) | Teoria da Utilidade Multiatributo | Bana e Costa e Vansnick (1994)                                      |
| Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution (TOPSIS)         | Teoria da Utilidade Multiatributo | Hwang e Yonn (1981)   |

Fonte: Rodriguez *et al.* (2013)

Tendo em vista que pesquisa visa construir um sistema de classificação de risco em barragens, buscou-se realizar a alocação das barragens de acordo com o seu grau de risco: alto, moderado e baixo risco. Com esta problemática, a técnica de multicritério que se enquadra é a de P $\beta$  (classificação/alocação).

O ELECTRE TRI é um método de classificação que procura realizar a definição de classes contendo as ações, baseado nos níveis de aspiração do decisor (YU, 1992).

Conforme Szajubok *et al.* (2006) o método ELECTRE TRI classifica as diversas alternativas para a solução de um problema por meio da comparação de cada alternativa potencial com uma referência estável (padrão/alternativa de referência).

### 2.5.5 ELECTRI-TRI

O ELECTRE TRI é um dos métodos da família ELECTRE (*Elimination and Choice Translating algorithm*), que é composta pelos métodos ELECTRE I, II, III, IV, IS e TRI. Cada um dos métodos ELECTRE tem uma finalidade de acordo com a problemática da metodologia. O Quadro 2.9 apresenta um resumo dos métodos:

Quadro 2.9 - Métodos da família ELECTRE.

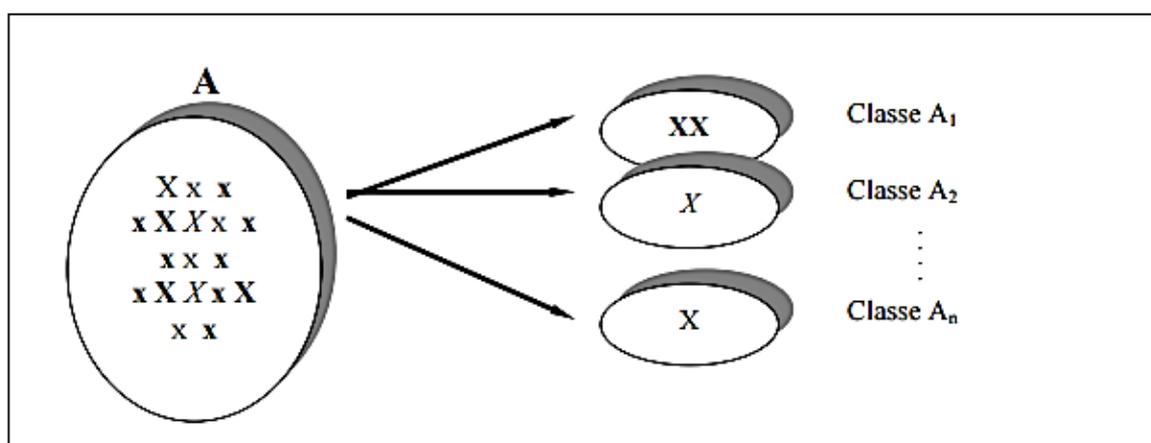
| ELECTRE | Problemática              | Autor           | Ano  | Tipo de Critério  |
|---------|---------------------------|-----------------|------|---|
| I       | Escolha ( $\alpha$ )      | Roy             | 1968 | O método ELECTRE I usa o conceito de critério verdadeiro, no qual há uma concordância plena (em um critério genérico $j$ ) de que uma alternativa $a$ é pelo menos tão boa quanto uma outra alternativa $b$ se o desempenho de $b$ for inferior ao de $a$ (mesmo que apenas infinitesimalmente inferior). |
| II      | Ordenação ( $\gamma$ )    | Roy e Bertier   | 1971 | O método ELECTRE II usa o conceito de critério verdadeiro para estabelecer as relações de subordinação, porém usa uma estrutura de relaxamento para obter a ordenação das alternativas. Nesta estrutura de relaxamento considera-se a construção de dois grafos: Grafo Forte; e Grafo Fraco.              |
| III     | Ordenação ( $\gamma$ )    | Roy e Hugonnard | 1982 | Os métodos ELECTRE III e IV utilizam o conceito de pseudo-critério para estabelecer uma relação de credibilidade, a partir do qual ordenam as alternativas através de um processo de "destilação".  |
| IV      | Ordenação ( $\gamma$ )    | Roy e Hugonnard | 1982 | O método ELECTRE IV é utilizado em problemas de ordenação quando não se pode (ou não se deseja) atribuir pesos aos critérios.   |
| IS      | Escolha ( $\alpha$ )      | Roy e Skalka    | 1985 | O ELECTRE IS usa o conceito de pseudocritério, no qual há uma concordância plena (em um critério genérico $j$ ) de que uma alternativa $a$ é pelo menos tão boa quanto uma outra alternativa $b$ mesmo que o desempenho de $a$ seja um pouco menor (dentro de um limite aceitável $q$ ) do que o de $b$ . |
| TRI     | Classificação ( $\beta$ ) | Roy e Yu        | 1992 | O método ELECTRE TRI busca resolver problemas de classificação ordenada. Classifica-se alternativas presentes no conjunto de alternativas viáveis em classes que mantêm uma relação de preferência entre si.  |

Fonte: Costa *et al.* (2007); Simões (2013); Teodoro (2015).

Segundo Costa *et al.* (2007) a família ELECTRE é a mais conhecida família de métodos de subordinação, que tiveram origem no trabalho de Roy e Boissou (1993), sendo adotados tanto no apoio quanto na tomada de decisão.

Dado conjunto finito de alternativas/ações (A), valoradas sobre uma família/vetor de critérios (F), o ELECTRE TRI constrói uma relação de subordinação, que representa as preferências estabelecidas pelo decisor, onde a exploração desta relação visa auxiliar o decisor a resolver o problema. Assim, dado um conjunto de A alternativas, classifica-se subconjuntos específicos ou classes ordenadas  $A_1, A_2, \dots, A_n$  (LAURINDO *et al.*, 2005). A Figura 2.10 descreve essa metodologia.

Figura 2.10 - Problemas de Classificação.



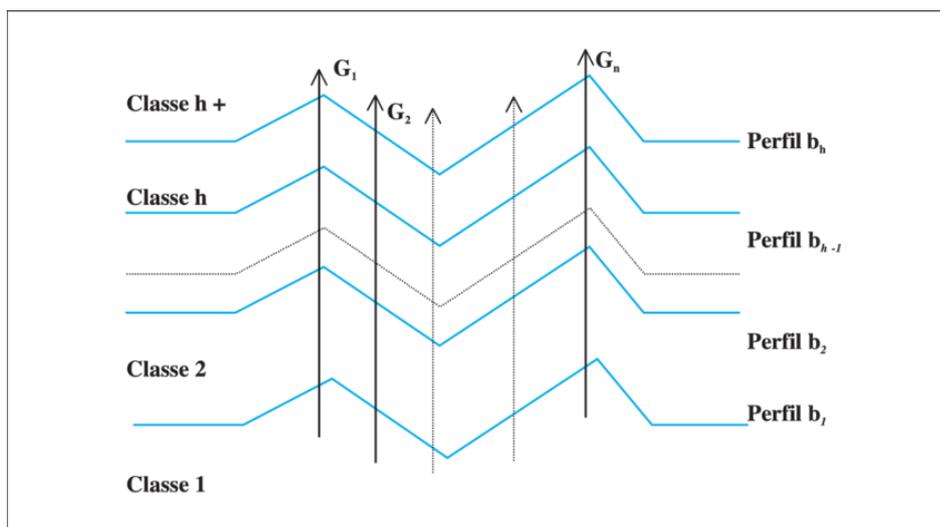
Fonte: Laurindo *et al.* (2005).

Conforme Yu (1992) o processo de estruturação método ELECTRE TRI passa por 5 passos:

- (i) Determinação do conjunto A de alternativas viáveis,  $A = \{A_1, A_2, a_3, \dots, A_n\}$ ;
- (ii) Determinação do conjunto de critérios  $F = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_m\}$  e seus pesos  $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_j)$ ;
- (iii) Definição dos limites de preferência  $(p_j(b_h))$ , indiferença  $(q_j(b_h))$  e veto  $(v_j(b_h))$ , para cada critério;
- (iv) Uma classe genérica  $C_h$  é delimitada por um limite inferior  $b_h$  e um limite superior  $b_h - 1$ .
- (v) Desempenhos das alternativas em função dos critérios.

A Figura 2.11 apresenta um conjunto formado por  $h+1$  classes, os limites das classes são  $h$ , considerando o conjunto de critérios  $F = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_m\}$ :

Figura 2.11 - Categorias e limites no método ELECTRE TRI.



Fonte: Costa *et al.* (2007).

As relações de subordinação e as preferências em cada critério são construídas através de pseudocritérios (limites preferência e de indiferença), que permitem analisar a natureza imprecisa das avaliações. Ou seja, pseudocritério é o critério que não permite o ordenamento completo de alternativas, podendo ocorrer relação de indiferença, fraca preferência e não comparabilidade entre alternativas. Dessa forma, os limiares de indiferença ( $q$ ) e de preferência ( $p$ ) compõem a informação de preferência intracritério e podem ser assim definidos (TEODORO, 2015). Esses limiares são definidos para cada critério e estabelecem, de certa maneira, a margem de incerteza que pode existir na definição de uma relação de preferência entre ações tendo em vista os valores encontrados para aquele critério em questão (OLIVEIRA, 2015).

#### 2.5.5.1 Limiar de indiferença ( $q_j$ ), preferência ( $p_j$ ) e veto ( $v_j$ )

##### *Limiar de indiferença ( $q_j$ )*

O limiar de indiferença ( $q_j$ ) corresponde a maior diferença na performance, em que a situação de indiferença é validada, ou seja,  $q_j(b)$  é a maior diferença entre  $g_j(a) - g_j(b)$  que garante a indiferença entre a e b em relação a um critério.

Exemplo: *Um indivíduo decide comprar uma casa, e o preço do imóvel é um dos critérios analisados para que se faça a escolha mais satisfatória.*

*Nota-se o limiar de indiferença quando, na avaliação de compra do imóvel, pode-se considerar que, no máximo, uma diferença de R\$ 10 mil entre diferentes*

*opções de casas não apresentam uma diferença expressiva a ponto de formar uma preferência por uma das alternativas neste critério.*

#### *Limiar de preferência ( $p_j$ )*

O Limiar de preferência ( $p_j$ ) é o valor acima do qual o decisor demonstra uma clara preferência de uma alternativa sobre a outra, ou seja,  $p_j(b)$  é a menor diferença entre  $g_j(a) - g_j(b)$  compatível com a preferência pela alternativa  $a$ , em relação a um critério.

*Exemplo: Na avaliação para a compra de uma casa, um valor de R\$ 30 mil pode ser posto como um valor mínimo para constituir uma preferência em prol uma das alternativas. Então, segundo Nascimento (2012), qualquer valor acima deste será validado como uma preferência estrita de uma alternativa sobre outra. Qualquer diferença de performance entre alternativas que esteja situada entre R\$ 10 mil e R\$ 30 mil, será considerada uma preferência fraca.*

#### *Limiar de veto ( $v_j$ )*

Limiar de veto ( $v_j$ ) é o valor acima do qual o decisor irá negar qualquer possibilidade de relação de preferência indicada por outro critério. O limiar de veto é utilizado no teste de discordância e representa a menor diferença entre  $g_j(b) - g_j(a)$  incompatível com a preferência de  $a$  em relação  $ab$ .

*Exemplo: Na avaliação para a compra de uma casa, se for definido como R\$ 70.000,00 o limiar de veto no critério preço, e uma determinada casa for R\$ 80.000,00 mais que outra, independente dos resultados dos outros critérios, o ELECTRE TRI não aprovará a superação.*

#### 2.5.5.2 Relação de subordinação no ELECTRE TRI

Como os métodos da família ELECTRE baseiam-se na construção de uma relação de subordinação (também denominados sobreclassificação) que congrega as preferências colocadas pelo decisor diante dos problemas e das alternativas disponíveis (SZAJUBOK *et al.*, 2006), são utilizados uma “relação de preferência” que representa as preferências do decisor em relação a uma opção. Essas relações estão apresentadas no Quadro 2.10:

Quadro 2.10 - Relações de preferências utilizadas pelos métodos ELECTRE

| Situação                                 | Definição   | Relação Binária                 |
|--|---|---------------------------------|
| Indiferença                              | Existem razões claras e positivas que justificam a equivalência entre duas ações  | I: Simétrica<br>Reflexiva       |
| Preferência estrita ou Preferência forte | Existem razões claras e positivas que justificam uma preferência significativa em favor de uma (bem definida) das duas opções   | P: Assimétrica<br>(Irreflexiva) |
| Preferência fraca                        | Existem razões claras e positivas que não implicam uma preferência estrita em favor de uma (bem definida) das duas ações, mas essas razões são insuficientes para que seja assumida uma preferência estrita em favor da outra, ou a indiferença entre as ações. | Q: Assimétrica<br>(Irreflexiva) |
| Incomparabilidade                        | Inexistem razões claras e positivas que justificam uma das três situações precedentes.  | R: Simétrica<br>(Irreflexiva)   |

Fonte: Gomes e Gomes (2012).

Conforme Laurindo *et al.* (2005), já a relação de subordinação é construída para tornar possível a comparação de uma alternativa genérica  $a$  pertencente a  $A$  com um limite padrão  $b_h$  pertencente a  $B$  e vice-versa:

- A afirmação de que  $aSb_h$ , denota que “ $a$  não tem uma performance inferior ao definido pelo o limite  $b_h$ ”.
- Por outro lado, a afirmação de que  $b_hSa$ , denota que “o limite  $b_h$  não tem uma performance inferior ao da alternativa  $a$ ”.

Para realizar a validação da afirmação ( $aSb_h$  ou  $b_hSa$ ) necessita-se obter duas condições:

- Concordância: para que  $aSb_h$  (ou  $b_hSa$ ) seja aceita, uma maioria suficiente de critérios deve ser favorável à afirmação.
- Não-discordância: quando na condição de concordância esperada, nenhum dos critérios na minoria não pode ser favorável à afirmação  $aSb_h$ (ou  $b_hSa$ ).

De acordo com Teodoro (2015) para o alcance da relação de subordinação deve-se determinar os índices de concordância parciais  $c_j(a,b)$  e  $c_j(b,a)$ , os índices de concordância globais  $C_j(a,b)$  e  $C_j(b,a)$ , os índices de discordância parciais  $D_j(a,b)$  e  $D_j(b,a)$  e os índices de credibilidade  $\sigma_s(a,b)$  e  $\sigma_s(b,a)$ .

O índice de concordância parcial  $c_j(a,b)$  em relação ao critério  $j$  expressa que em que medida pode-se afirmar que a ação  $a$  não tem desempenho inferior a ação de referência  $b$ . Quando o critério  $j$  apresenta o sentido de preferência em uma direção crescente, o Índice de Concordância Global  $C_j(a, b_n)$  pode ser calculado da seguinte forma:

- Se  $g_j(a) \leq g_j(b_h) - p_j(b_h)$ , então  $c_j(a, b_h) = 0$

- Se  $g_j(b_h) - q_j(b_h) < g_j(a)$ , então  $c_j(a, b_h) = 1$
- Se  $g_j(b_h) - p_j(b_h) < g_j(a) \leq g_j(b_h) - q_j(b_h)$ ,  $0 < c_j(a, b) \leq 1$ , então:

$$c_j(a, b) = \frac{g_j(a) - g_j(b) + p_j(b)}{p_j(b) - q_j(b)} \quad \text{Equação 2.11}$$

No entanto, quando o critério  $j$  apresenta o sentido de preferência em uma direção decrescente, denomina-se Índice de concordância global  $C_j(a, b_h)$ , onde indica-se que a ação de  $a$ , é, no mínimo, tão boa quanto a ação de referência  $b$ . Sendo calculado da seguinte forma:

- Se  $g_j(a) \geq g_j(b_h) + p_j(b_h)$ , então  $c_j(a, b_h) = 0$
- Se  $g_j(b_h) + q_j(b_h) > g_j(a)$ , então  $c_j(a, b_h) = 1$
- Se  $g_j(b_h) + q_j(b_h) \leq g_j(a) \leq g_j(b_h) + p_j(b_h)$

$$c_j(a, b) = \frac{g_j(b) - g_j(a) + p_j(b)}{p_j(b) - q_j(b)} \quad \text{Equação 2.12}$$

Segundo Luarindo *et al.* (2005) o índice de concordância global  $C_j(b_h, a)$  expressa até que ponto as avaliações de  $a$  e  $b_h$ , considerando globalmente o conjunto de critérios  $j \in F$ , é favorável a afirmação de que “ $a$  subordina  $b_h$ ”:

$$C(a, b_h) = \frac{\sum_{j \in F} c_j(a, b_j)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad \text{Equação 2.13}$$

O grau de credibilidade resulta da combinação entre o índice de discordância e o índice de concordância (LUARINDO *et al.*, 2005). Os Índices de credibilidade,  $\sigma_s(a, b)$  e  $\sigma_s(b, a)$ , estabelecem relações de subordinação/desclassificação entre a ação  $a$  e a ação de referência  $b$  (TEODORO, 2015). Os índices de credibilidade são separados em:

- $\sigma_s(a, b)$  - Índice de credibilidade de desclassificação aonde a medida a ação  $a$  desclassifica a ação de referência  $b$ ;
- $\sigma_s(b, a)$  - Índice de credibilidade de desclassificação aonde a medida a ação de referência  $b$  desclassifica a ação  $a$ .

Para a determinação dos índices de credibilidade devem-se levar em consideração três princípios mostrados no Quadro 2.11 seguinte:

Quadro 2.11 - Princípios para a determinação dos Índices de credibilidade

| Índices de credibilidade          | Princípios   |
|-----------------------------------|--|
| $\sigma_s(a,b) = C(a,b)$          | O índice de credibilidade é igual ao valor do índice de concordância global quando não há critérios discordantes ou quando os índices de concordância são julgados insuficientes de forma relativa ao valor de $C(a,b)$ .  |
| $\sigma_s(a,b) = 0$               | O índice de credibilidade é igual à zero, quando um determinado critério $j$ veta a afirmação de que a ação $a$ desclassifica a ação de referência $b$ , situação em que $D_j(a,b)=1$ .  |
| $\sigma_s(a,b) = \text{Variável}$ | Índice de credibilidade é calculado a partir dos índices de concordância e discordância, recebendo uma redução que corresponde a um “veto parcial” da expressão $a$ desclassifica $b$ , quando para um determinado critério $i$ , o valor de $D_i(a,b)$ está entre $C(a,b)$ e 1. |

Fonte: Teodoro (2015); Simões (2013).

O valor de  $\sigma(a,b_h)$  é calculado como se segue ( $\sigma(b_h,a)$  é calculado de forma análoga):

$$\sigma(a, b_h) = c(a, b_h) \prod_{j \in F} \frac{1 - d_j(a, b_h)}{1 - c_j(a, b_h)} \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde,  $F = \{j: d_j(a, b_h) > c(a, b_h)\}$

Assim, segundo Laurindo *et al.* (2005) observa-se:

- Se nenhum critério for discordante, a credibilidade da relação de subordinação  $\sigma(a,b_h)$  se iguala ao índice de concordância  $C_j(a, b_h)$ .
- Se  $d_j(a, b_h) = 1$ , então o índice de credibilidade  $\sigma(a, b_h)$  torna-se nulo (a afirmação “ $a$  subordina  $b_h$ ” é totalmente não acreditável). Ou seja: veta-se totalmente a afirmação de que “ $a$  não é pior do que  $b$ ”.
- Se existe  $C(a, b_h) < d_j(a, b_h) < 1$ , o índice de credibilidade  $\sigma(a, b_h)$  torna-se mais baixo do que o índice de concordância global  $C(a, b_h)$ , sendo justo o efeito de oposição deste critério.

Conforme Simões (2013) a partir do método ELETRE TRI, são definidas 4 relações binárias entre uma ação  $a$  e a ação de referência  $b$ :

- **Indiferença** ( $a I b$ ) –  $a$  é indiferente a  $b$ :  $aIb_h \Leftrightarrow aSb_h \text{ é } b_hSa$ ;
- **Preferência** ( $b > a$ ) –  $b$  é preferível a  $a$ , fraca ou fortemente:  $a P b_h \Leftrightarrow aSb_h \text{ e não } b_hSa$ ;

- **Preferência** ( $a > b$ ) –  $a$  é preferível a  $b$ , fraca ou fortemente:  $b_h P a \Leftrightarrow$  não  $aSb_h$  e  $b_hSa$ ;
- **Incomparabilidade** ( $a R b$ ) –  $a$  é incomparável a  $b$ :  $a R b_h \Leftrightarrow$  não  $aSb_h$  e não  $b_hSa$ .

O plano de corte  $\lambda$ , é considerado como o menor valor admissível do índice de credibilidade compatível com a aceitação da  $\sigma_s(a,b)$  (Laurindo *et al.*, 2005). Se o valor de  $\lambda$  se aproxima de 1, indica-se que almejam decisões onde as incertezas são minimizadas e permite-se uma ocorrência mais frequente da relação de incompatibilidade entre as ações, mantendo-se as demais condições. Já, quando os valores de  $\lambda$  se aproximam de 0,5, indicam que se almejam decisões com menor exigência em relação às incertezas. Com isso, em seguida, são realizadas comparações entre  $\sigma_s(a,b)$ ,  $\sigma_s(b,a)$  e  $\lambda$ , com fim de se determinar a situação de preferência entre  $a$  e  $b$ , que podem ser assim definidas (TEODORO, 2015; SIMÕES, 2013).

$$\sigma(a, b_h) \geq \lambda \Rightarrow aSb_h$$

De acordo com Teodoro (2015), após a definição das relações de subordinação, o próximo passo será o processo de exploração, onde realiza-se para analisar o modo em que uma alternativa  $a$  é comparada com os limites padrão determinados para a classe na qual  $a$  deve ser enquadrada.

Costa *et al.* (2007) pode acontecer da classificação de algumas alternativas em diferentes classes, onde o procedimento otimista tende a classificar as alternativas em classes mais altas; e o procedimento pessimista tende a classificar as alternativas nas categorias mais baixas; e o procedimento ascendente tende a classificar as alternativas nas categorias mais elevadas.

Assim, essencialmente, estabelece-se a relação de sobreclassificação, a qual aceita todas as relações de preferência existentes ( $P$ ,  $Q$ ,  $I$ ,  $R$ ) e, em seguida, ocorre a exploração desta relação (TEODORO, 2015).

### 2.5.6 Método de Análise Hierárquica (AHP – Clássico)

O método de Análise Hierárquica (AHP) foi idealizado por Saaty (1977) para auxiliar em decisões estruturadas, utilizando-se de uma rede formada por hierarquias de alternativas e critérios interligadas entre si, objetivando identificar a influência entre as alternativas e os critérios de um sistema e realizando a

comparação de duas alternativas em relação a uma terceira, tendo como base uma escala estabelecida pelo autor como referência.

Um dos benefícios do método AHP é de oportunizar ao usuário a chance de atribuir pesos relativos para múltiplos critérios, ou múltiplas alternativas para um dado critério, de forma subjetiva, por meio de comparação par a par entre os mesmos. Desta forma, mesmo que os critérios avaliados sejam incomparáveis, a partir do julgamento do decisor torna-se possível determinar qual é mais importante, em forma de hierarquia (SAATY, 1991).

Para a realização do Método AHP, a primeira etapa corresponde à definição dos critérios que serão comparados para auxiliar na escolha das alternativas.

A segunda etapa corresponde à montagem de uma Matriz de Prioridades de Critérios. Para isto, utiliza-se como base, a regra sugerida por Saaty (1991): preenche-se a matriz comparando-se os critérios que aparecem na coluna da esquerda em relação às características que aparecem na linha superior.

Saaty (1991) também definiu uma escala de valores para comparação, que não deve exceder um total de nove fatores, a fim de se manter a matriz consistente. Conforme o Quadro 2.12.

Quadro 2.12 - Escala Fundamental de Saaty

|                   |  |  |
|-------------------|--|--|
| 1                 | Igual importância                        | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo   |
| 3                 | Importância pequena de uma sobre a outra | A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra                               |
| 5                 | Importância grande ou essencial          | A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra                      |
| 7                 | Importância muito grande ou demonstrada  | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática. |
| 9                 | Importância absoluta                     | A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.        |
| <b>2, 4, 6, 8</b> | <b>Valores Intermediários</b>            | <b>Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições</b>                       |

Fonte: Saaty (1991).

Finalizada a comparação par a par das alternativas, calcula-se a Razão de Consistência (RC) para avaliar se os julgamentos foram consistentes em relação às amostras de juízo inteiramente aleatórios.

As avaliações do método AHP são fundamentadas na suposição de que o decisor é racional, logo, se A é preferido a B e B é preferível a C, então A é preferido a C. Se o RC é superior a 0,1 (10%) os julgamentos não são confiáveis; neste caso, os resultados obtidos não apresentam valores consistentes (LIMA *et al.*, 2015).

Para obter o valor da RC é necessário, primeiro calcular o valor de  $\lambda_{max}$  que representa o maior *autovalor* da matriz A, obtido a partir da seguinte equação:

$$Aw = \lambda_{max} x w \quad \text{Equação 2.15}$$

Onde “A” é a matriz de prioridades e “w” é o vetor de prioridade. Calculado o Autovalor ( $\lambda_{max}$ ), deve-se obter o Índice de Consistência (IC) para calcular a Razão de Consistência (RC). O IC é determinado de acordo com a fórmula abaixo, sendo  $n$  é o número de critérios:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Equação 2.16}$$

A RC é obtida pela fórmula:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad \text{Equação 2.17}$$

O IR é o índice de consistência relativo a um amplo número de comparações realizadas par a par. Este é um índice aleatório elaborado para matrizes quadradas de ordem  $n$  pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge, nos EUA. Os valores de IR correspondem ao numero de critérios a serem comparados e estão apresentados no Quadro 2.13:

Quadro 2.13 - Índice de consistência relativo.

|    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| IR | 0,00 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,51 |

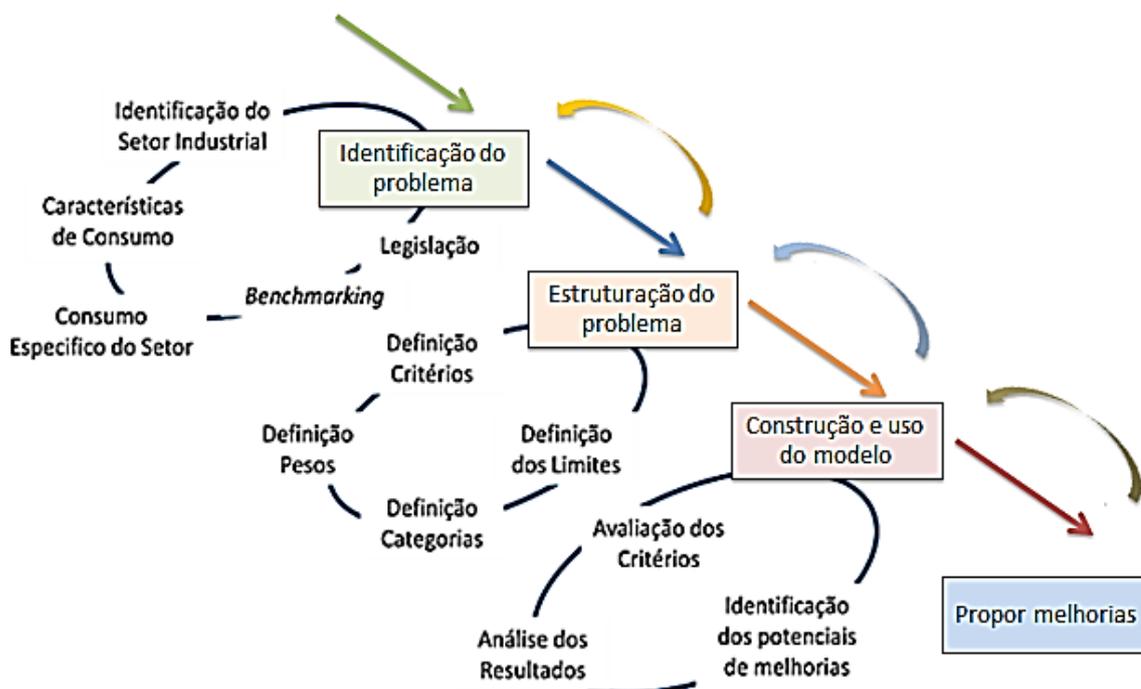
### 3. METODOLOGIA

Neste tópico, é apresentada a construção do modelo de classificação de índice de Riscos em barragens com o ELECTRE TRI. Segundo Belton e Stewart (2002) o processo de AMD é desenvolvido em três etapas: a primeira compreende a estruturação do problema, a segunda corresponde à construção de um modelo que, por fim, será utilizado para informar e incentivar análises.

Para Duarte (2011), embora distintas, as fases apresentam ligações intrínsecas. Desta forma, o primeiro passo, antes que qualquer análise seja realizada, os indivíduos envolvidos (facilitador e decisor) devem estar cientes a respeito do problema, da decisão que precisa ser tomada e dos elementos que a compõem.

Essa três fases podem ser observadas na Figura 3.1:

Figura 3.1- Fases do processo de AMD.



Fonte: Adaptado de Belton e Stewart (2002) *apud* Marques (2014).

Com as fases e etapas do processo descrito, esse modelo foi utilizado em outros trabalhos de que envolveram a análise de multicritério, como descrito no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 - Estudo de classificação de risco com ELECTRE TRI

|                   |   |
|-------------------|---|
| Nascimento (2012) | Classificação de risco em operações com aeronaves embarcadas.                               |
| Araújo (2014)     | Avaliação de Riscos em Edificações com Redes de Distribuição Interna de Gases Combustíveis. |
| Marques (2014)    | Classificação de Indústrias segundo o desempenho energético.                                |

Fonte: Autor (2016).

### 3.1 FASE DE ESTRUTURAÇÃO

Segundo Pacheco (2013) a metodologia AMD se constrói considerando valores e percepções de um determinado decisor, bem como, que estes valores e percepções devam estar relacionados a um determinado contexto. Nessa fase identifica-se o subsistema de atores descreve-se o ambiente relacionado ao contexto, e define-se um rótulo que represente este contexto.

A fase de estruturação sistematiza o início do processo decisório, dividindo-se em três fases: determinação do contexto decisório (ambiente onde o problema se insere e identificação dos atores), os objetivos e a identificação dos fatores de risco.

#### 3.1.1 Ambiente de tomada de decisão

Esse trabalho busca auxiliar os agentes envolvidos em todo o contexto de decisão de gestão de segurança das barragens. São eles:

- Gestores de barragens na realização de ações de gerenciamento e manutenção de forma técnica e economicamente consistente;
- Órgãos de fiscalização no acompanhamento mais efetivo, priorizando, as barragens que possuem maior grau de risco;
- E a sociedade que se encontra em área de abrangência de risco.

Os critérios avaliados na metodologia são os mesmos apresentados nos métodos de classificação de risco discutidos no Capítulo 2.4: Resolução CNRH n° 143 e os métodos de análise de risco em barragens Índice Global de Risco Modificado, USACE e COGERH.

Na idealização dessa etapa de formação do ambiente decisional realizou-se entrevistas com especialistas na área da pesquisa correspondente, para identificar os fatores de risco para a construção da metodologia. Esses especialistas foram designados como os **decisores**.

Nesse estudo, consideraram-se os elementos (altura, volume acumulado, tipo de barramento, e outros) dos métodos discutidos, como critérios que foram adotados no ELECTRE TRI. Assim, o papel do decisor coube aos especialistas que elaboraram os métodos: Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH e Resolução CNRH n° 143.

Assim, classificou-se as barragens com os diferentes métodos apresentados (neste caso corresponderá a seis classificações diferentes). Em seguida, foram realizadas as classificações utilizando o ELECTRE TRI para a mesma barragem.

O **autor** também construiu um modelo de auxílio à decisão para a realização de classificação de risco, paralelo aos existentes. Aonde, ele contou com o auxílio de um decisor que trabalha com gestão de barragens para tomada de decisão.

Os elementos adotados pelos métodos foram idealizados a partir do conhecimento e a experiência de especialistas relacionados à classificação e análise de risco em barragens, o que corresponde ao princípio da AMD.

Quanto ao papel de **facilitador**, coube ao autor do trabalho intermediar, esclarecer e organizar as opiniões recomendadas pelo decisor na estruturação do método.

Segundo Baran (2015) os **Stakeholders** são formados por uma organização ou qualquer pessoa que tenha interesse no processo de análise, que podem afetar ou ser afetados pelo resultado do modelo. O papel desse grupo é contribuir e estar envolvido com a aplicação do modelo e auxiliar no processo de decisão. Podem ser incluídos neste grupo: moradores ribeirinhos, comunidade a jusante, agricultores, técnicos especializados e o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Formoso.

#### 3.1.1.1 Locais de aplicação

Os locais de aplicação da metodologia foram nas barragens gerenciadas pela Secretaria do Planejamento e Orçamento (SEPLAN). São barragens de grande porte e com grande relevância para as comunidades que vivem em suas imediações.

A SEPLAN é responsável pela gestão de cinco grandes projetos de irrigação no estado do Tocantins, onde os Projetos Manuel Alves e Rio Formoso são abastecidos por grandes reservatórios de água.

Com mais de 4 milhões de hectares disponíveis para irrigação, o Tocantins se destaca, atualmente, como um dos estados que mais crescem em produção agrícola.

Devido ao interesse de expansão das áreas agrícolas e da grande oferta de água no estado, investiu-se nos últimos anos, em grandes projetos hidroagrícolas que promovem a irrigação de grandes áreas. O Quadro 3.2 apresenta as características destes projetos.

Quadro 3.2 – Projetos de Irrigação no Tocantins

| Projeto      | Localização                               | Fonte Hídrica  | Área do Projeto (ha) | Sistema de irrigação                               | Precipitação (mm) | Culturas  |
|--------------|---|--|----------------------|--|-------------------|---|
| São João     | Porto Nacional                            | Lago da UHE Luiz Eduardo Magalhães (rio Tocantins)     | 5.129,00             | Microaspersão, gotejamento                         | 1.700,00          | Banana, maracujá, goiaba, melancia, coco          |
| Rio Formoso  | Formoso do Araguaia                       | Rio Formoso e barragens Taboca, Calumbi I e Calumbi II | 27.787,00            | Inundação e subirrigação                           | 1.600,00          | Arroz, soja, milho, feijão e melancia             |
| Manuel Alves | Dianópolis/Porto Alegre do Tocantins      | Rio Manuel Alves                                       | 5.000,00             | Microaspersão, Gotejamento e Aspersão convencional | 1400,00           | Abacaxi, banana, coco, mamão, maracujá e melancia |
| Sampaio      | Sampaio, Carrasco Bonito e Augustinópolis | Rio Tocantins  | 1.046,72             | Aspersão   | 1.500,00          | Pastagem irrigada para produção leiteira          |
| Gurita       | Itapiratins                               | Rio Tocantins  | 204,08               | Aspersão convencional, microaspersão, gotejamento  | 1.700,00          | Frutas e culturas anuais                          |

Fonte: Tocantins (2016).

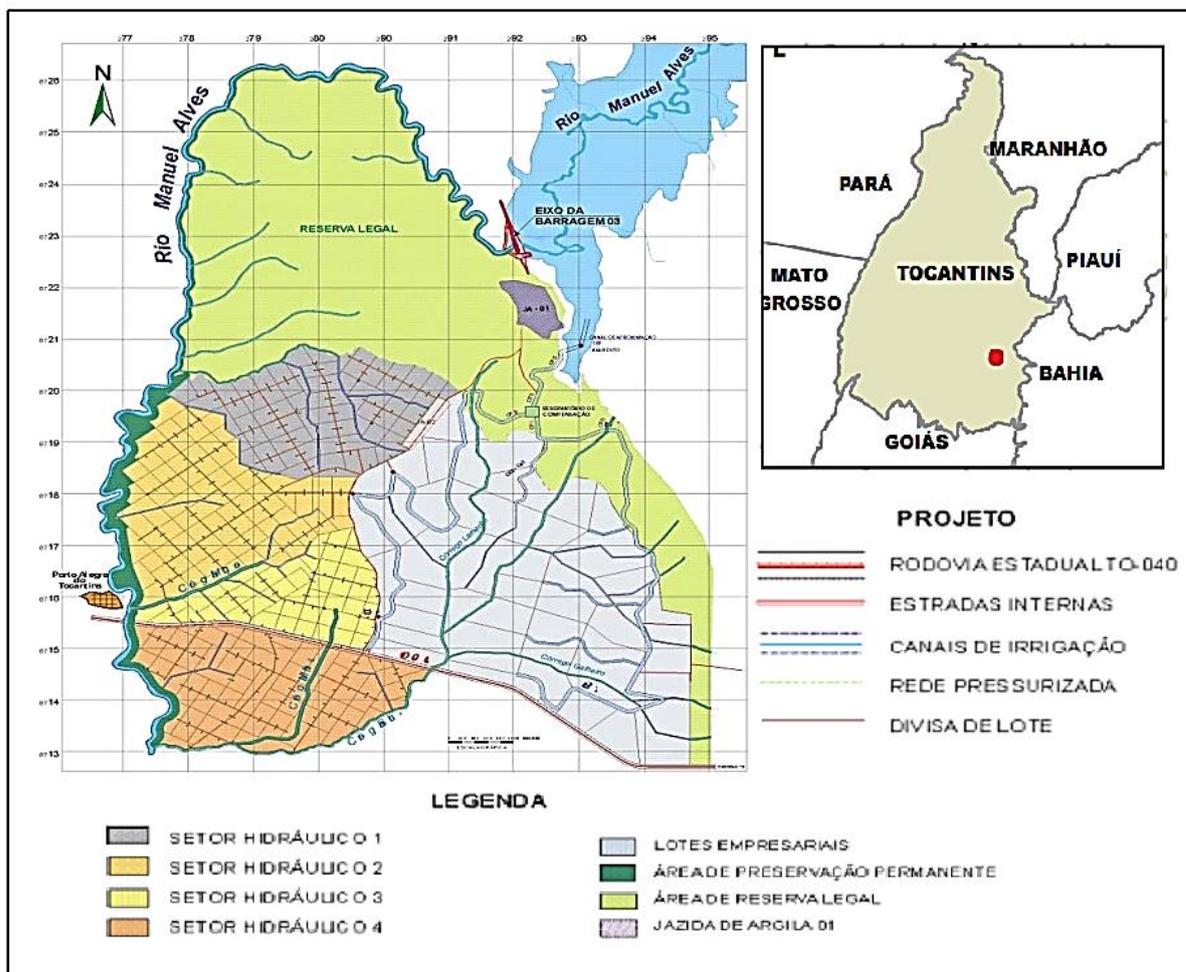
A metodologia foi aplicada nas barragens dos Projetos Rio Manuel Alves e Rio Formoso.

### 3.1.1.2 Barragem do Projeto Rio Manuel Alves

A Barragem no Rio Manuel Alves abastece o Sistema de Aproveitamento Hidroagrícola do Rio Manuel Alves, localizado nos municípios de Porto Alegre do Tocantins e Dianópolis (Obra Prioritária do Programa de Perenização das Águas do

Tocantins – PROPERTINS) iniciando sua construção em 2001 e finalizando em 2003.

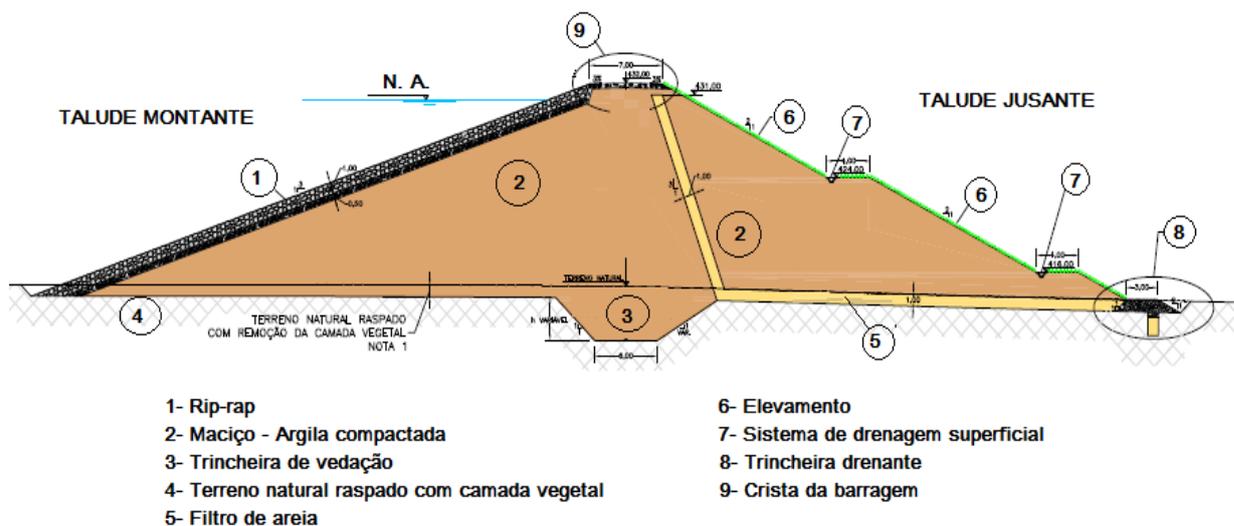
Figura 3.2 - Localização da Barragem Rio Manoel Alves – TO



Fonte: Adaptado ACL (2002).

A Figura 3.3 apresenta os elementos e materiais que constituem o maciço da barragem do Projeto Rio Manoel Alves.

Figura 3.3 - Maciço da barragem do Projeto Manuel Alves.



Fonte: SEAGRO (2005).

A Tabela 3.1 apresenta as principais características do barramento da barragem do Projeto Rio Manuel Alves.

Tabela 3.1 - Características Principais do Barramento

| Altura máxima | Comprimento | Largura do Coroamento | Tipo de barragem | Inclinação dos taludes      | Volume total do reservatório <sup>7</sup> |
|---------------|-------------|-----------------------|------------------|-----------------------------|---|
| 30,00 m       | 1.470 m     | 7,00 m                | Terra homogênea  | Montante 1:3<br>Jusante 1:2 | 214.000.000 m <sup>3</sup>                |

Fonte: SEAGRO (2005).

### 3.1.1.3 Barragem do Projeto Rio Formoso

Localizado no município de Formoso do Araguaia, o Projeto Rio Formoso está em funcionamento desde a década de 70, com objetivo de aproveitamento sustentável das várzeas do vale do Rio Araguaia para a produção de grãos. A localização das barragens do projeto Rio Formoso está apresentada na Figura 3.4.

As barragens foram construídas na década de 1970, portanto, necessitam de obras de restauração que possam torná-las seguras e eficientes no desempenho de suas funções. O Programa de Recuperação das Obras de Infraestrutura Hídrica de Uso Comum do Projeto Rio Formoso objetiva estabelecer intervenções e obras de engenharia para a recuperação das estruturas de irrigação e drenagem existentes nesse empreendimento (TOCANTINS, 2016).

<sup>7</sup> Volume total soma do Volume inativo: 66.000.000 m<sup>3</sup>; Volume útil: 148.500.000 m<sup>3</sup>.

A área total de superfície agrícola útil do projeto atinge cerca de 27.787 hectares. Sua demanda hídrica é suprida por três barragens na bacia do rio Formoso: Taboca, Calumbi I e Calumbi II (TOCANTINS, 2016). A Tabela 3.2 apresenta as principais características de seus barramentos.

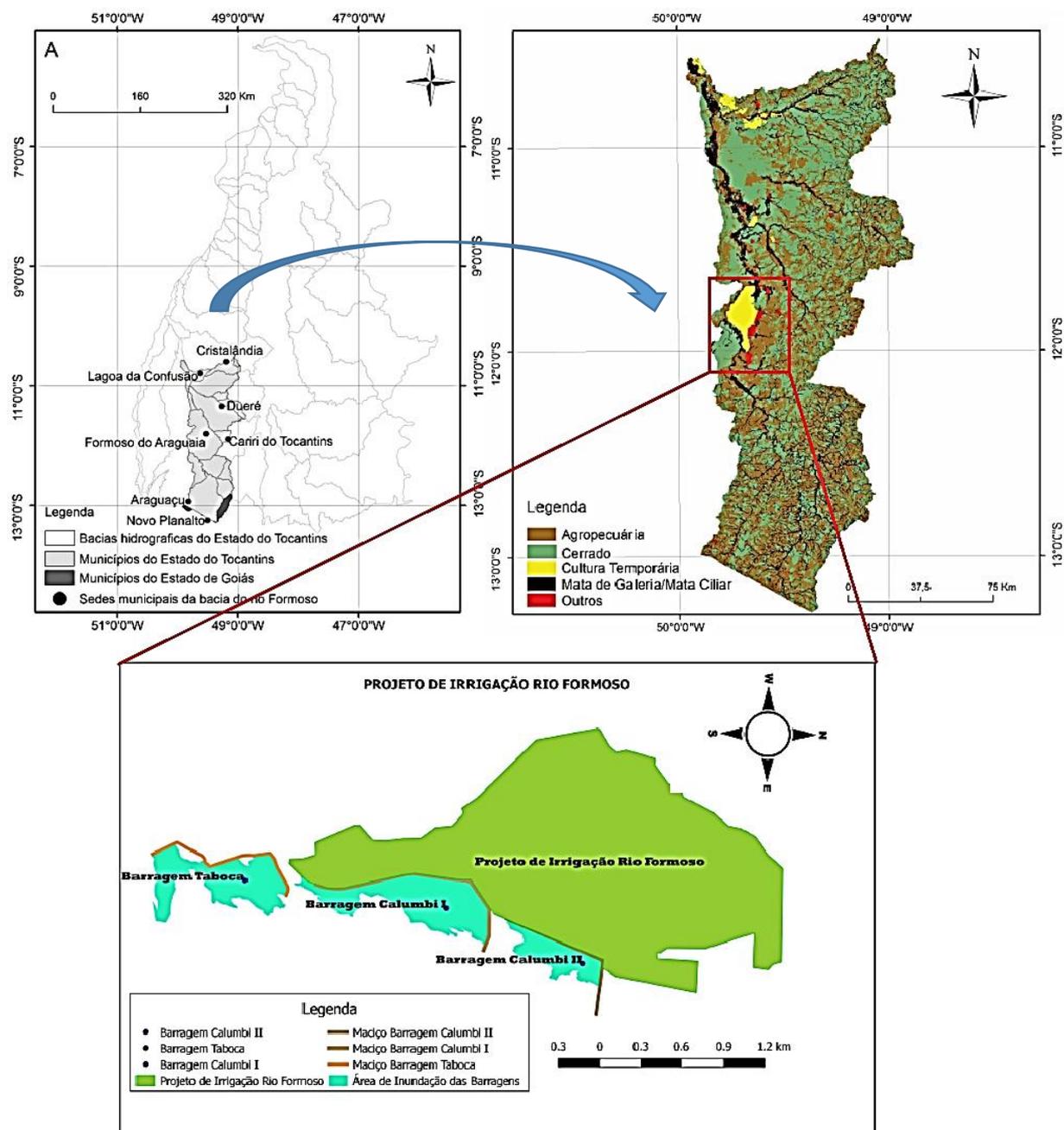
Tabela 3.2 - Características Principais dos Barramentos

| <b>Barragem</b> | <b>Altura máxima</b> | <b>Comprimento<sup>8</sup></b> | <b>Largura do Coroamento</b> | <b>Tipo de barragem</b> | <b>Volume total do reservatório</b> |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Calumbi I       | 7,00 m               | 17.200 m                       | 7,00 m                       | Terra homogênea         | 110.190.000 m <sup>3</sup>          |
| Calumbi II      | 7,00 m               | 12.700 m                       | 12,00 m                      | Terra homogênea         | 93.520.000 m <sup>3</sup>           |
| Taboca          | 20,60 m              | 10.300 m                       | 7,00 m                       | Terra homogênea         | 141.900.000 m <sup>3</sup>          |

Fonte: ANA (2015).

<sup>8</sup> Valores aproximados, obtidos a partir de GPS.

Figura 3.4 - Localização das barragens do projeto Rio Formoso.



Fonte: Adaptado Alves *et al.* (2015).

A barragem Calumbi I se rompeu em 1985, depois de recuperada adotou-se a operacionalização a 40% da capacidade.

### 3.1.2 Identificação dos Fatores de Risco

Nessa etapa, a Resolução CNRH n° 143 e os métodos de análise de risco em barragens discutidos anteriormente (Índice Global de Risco Modificado, USACE

e COGERH) serviram como base de estruturação do modelo fornecendo os critérios  $g_j(a)$  e seus respectivos níveis.

Os mesmos parâmetros utilizados nos métodos foram tomados para formarem os critérios adotados no ELECTRE TRI.

Logo, com os critérios definidos a partir dos elementos de cada método, considerou-se que o papel de decisor correspondeu-se aos seus desenvolvedores.

O Quadro apresenta os quatro métodos e os elementos correspondentes utilizados para classificarem as barragens.

Quadro 3.3 – Elementos analisados pelos decisores

|  | Resolução n° 143  | USACE                                     | COGERH                                    | Índice Global de Risco Modificado              |
|--|---|---|---|--|
| <b>E<br/>L<br/>E<br/>M<br/>E<br/>N<br/>T<br/>O<br/>S</b> | Altura  | Altura da Barragem                        | Dimensão da barragem                      | Sismicidade (período de retorno de 1.000 anos) |
|  | Comprimento   | Largura do Coroamento                     | Tipo de barragem                          |  |
|  | Tipo de barragem  | Tipo de Barragem                          | Volume                                    | Escorregamento de taludes (probabilidade)      |
|  | Tipo de Fundação  | Tipo de Fundação                          | Tipo de fundação                          |  |
|  | Idade da Barragem   | Capacidade de armazenamento               | Vazão de projeto                          | Cheias superiores à do projeto (probabilidade) |
|  | Vazão de Projeto  |   | Tempo de operação                         |  |
|  | Confiabilidade das estruturas extravasoras                      | Tipo de Sistema de Filtração              | Custo da barragem                         | Gestão do reservatório                         |
|  | Confiabilidade das estruturas de adução                         |   | Confiabilidade das estruturas vertedouras | Ações agressivas                               |
|  | Percolação  | Idade da Barragem                         |   |  |
|  | Deformações e recalques   |   | Sismicidade                               | Tomada de água                                 |
|  | Deterioração dos taludes  | Altura Hidráulica máxima                  |   |  |
|  | Eclusa  |   | Confiabilidade do vertedouro              | Deformações/afundamentos assentamentos         |
|  | Existência de documentação de projeto                           | Continuidade do Monitoramento da barragem |   |  |
|  | Estrutura organizacional  |   | Altura Normal do reservatório             | Deterioração dos taludes/paramentos            |
|  | Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança             | Vol. útil                                 |   |  |
|  | Regra operacional dos dispositivos de descarga                  |   | Danos a propriedades                      | População a jusante                            |
|  | Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação | Capacidade de armazenamento               |   |  |
|  | Volume total do reservatório                                    |   | Altura Normal do reservatório             |  |
|  | Potencial de perda de vidas humanas                             |   |   |  |
|  | Impacto ambiental   |   |   |  |
| Impacto sócio econômico                                  |   |   |   |  |

## 3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO ELECTRE TRI

### 3.2.1 Definição dos Critérios e pesos

Cada elemento elencado em seu respectivo método formou um critério ( $g_j$ ). Para a avaliação dos elementos, denotam-se os critérios  $F = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_m)$ . Desta forma,  $g(a)$  representa o desempenho da alternativa (elemento)  $a$  de acordo com o critério  $g_j$  com  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Os critérios são colocados em uma escala ordinal, onde, são reescritos com suas respectivas análises.

Após a definição de todos os critérios, os decisores devem realizar uma avaliação julgando pesos para cada um deles, levando em consideração o seu nível de importância para a segurança das barragens. Logo, o critério que entenderem como mais importante receberá o maior peso, e assim, seguirá a respectiva ordem.

Como, neste trabalho, a figura do decisor coube aos idealizadores dos métodos, a distribuição de pesos foi adaptada de acordo com a pontuação dada a cada um dos parâmetros dentro de seu respectivo método.

#### 3.2.1.1 Índice global de risco modificado

A distribuição dos pesos dos critérios para este método foi valorada uniformemente para todos, com os valores máximos atingidos por cada descritor ( $\alpha$ ) no método padrão.

Assim, como o valor máximo que o descritor pode atingir é de até 6, que representa situações com maior risco no método padrão, adotou-se esse valor como o peso correspondente a cada critério do ELECTRE TRI.

Quadro 3.4 – Pesos dos critérios do método Índice Global de Risco Modificado

|          | <b>Critérios</b>                               | <b>Pesos</b> |
|----------|--|--------------|
| $g_1$    | Sismicidade (período de retorno de 1.000 anos) | 6            |
| $g_2$    | Escorregamento de taludes (probabilidade)      | 6            |
| $g_3$    | Cheias superiores à do projeto (probabilidade) | 6            |
| $g_4$    | Gestão do reservatório                         | 6            |
| $g_5$    | Ações agressivas (Clima, água, etc)            | 6            |
| $g_6$    | Dimensionamento estrutural                     | 6            |
| $g_7$    | Fundações                                      | 6            |
| $g_8$    | Órgãos de descarga                             | 6            |
| $g_9$    | Manutenção                                     | 6            |
| $g_{10}$ | Volume do reservatório ( $m^3$ )               | 6            |
| $g_{11}$ | Instalações a jusante                          | 6            |

### 3.2.1.2 Metodologia de Classificação de risco do USACE

A metodologia do USACE foi proposta com o objetivo de obter um índice que refletisse a importância da barragem a fim de priorizar serviços a serem executados. Para isso, obtiveram-se os escores dos 13 parâmetros para a classificação da barragem. Dada pela Equação 2.5.

Diferente do método do Índice Global de Risco Modificado, que utilizou os mesmos valores da tabela padrão para a inserção no ELECTRE TRI, o método do USACE necessitou de uma adaptação para a valoração de seus critérios.

Para a obtenção dos pesos dos critérios substituiu-se a Vulnerabilidade (V) pela soma da média aritmética dos escores máximos das constantes físicas (A) mais a média aritmética dos escores máximos dos parâmetros das variáveis (B). Em seguida, somou-se com o escore máximo de Perdas de Vidas (C) multiplicado por três. A Equação 3.1 apresenta o seguinte passo.

$$S = \frac{\left( \frac{A_1+A_2+A_3+A_4+A_5+A_6}{6} + \frac{B_1+B_2+B_3+B_4+B_5+B_6}{6} \right) + 3C}{50} \quad \text{Equação 3.1}$$

Com os valores dos escores máximos dos parâmetros calculados, pode-se obter o valor correspondente de cada critério. Desconsiderou-se o divisor 50, visto que os valores já estavam normalizados e não apresentam diferenças no resultado final. Conforme pode se observar na Equação 3.2:

$$S = \frac{(1,67+1,67+1,67+1,67+1,67+1,67+1,33+1,67+1,67++1,67+1,67+1,67)+30}{50} \quad \text{Equação 3.2}$$

O Apêndice I apresenta a valoração detalhada para obtenção dos pesos dos critérios para o método do USACE.

O Quadro 3.5 apresenta os pesos dos critérios do método do USACE que foram inseridos no ELECTRE TRI:

Quadro 3.5 – Pesos dos critérios do método do USACE

|          | <b>Critérios</b>                                  | <b>Pesos</b> |
|----------|---|--------------|
| $g_1$    | Altura da Barragem                                | 1,67         |
| $g_2$    | Largura do Coroamento (m)                         | 1,67         |
| $g_3$    | Tipo de Barragem                                  | 1,67         |
| $g_4$    | Tipo de Fundação                                  | 1,67         |
| $g_5$    | Capacidade de armazenamento                       | 1,67         |
| $g_6$    | Tipo de Sistema de Filtração                      | 1,67         |
| $g_7$    | Idade da Barragem                                 | 1,33         |
| $g_8$    | Altura Hidráulica máxima atingida no reservatório | 1,67         |
| $g_9$    | Sismicidade                                       | 1,67         |
| $g_{10}$ | Confiabilidade do vertedouro                      | 1,67         |
| $g_{11}$ | Continuidade do Monitoramento da barragem         | 1,67         |
| $g_{12}$ | Altura Normal do reservatório                     | 1,67         |
| $g_{13}$ | Danos a propriedades e perdas de vidas            | 30           |

### 3.2.1.3 Potencial de risco – Metodologia COGERH

Da mesma forma que o método do USACE, para a valoração dos pesos dos critérios da metodologia da COGERH foi necessária à realização de uma adaptação.

Neste caso, substituíram-se os fatores *Importância (I)*, *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)* da Equação 2.7, pelos valores máximos atingidos pelos descritores correspondentes. Conforme se pode observar na Equação 3.3:

$$PR = \left( \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{3}{2} + \frac{7}{2} + \frac{10}{2} + \frac{5}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} \right) \times \left( \frac{2}{3} + \frac{2,5}{3} + \frac{1,5}{3} \right) \quad \text{Equação 3.3}$$

No entanto, considerou-se o fator *Importância (I)* como duas vezes maior que os somatórios dos elementos *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)* na equação.

$$PR = 52,5 \times (2) \quad \text{Equação 3.4}$$

Portanto, os descritores de Importância resultaram do produto entre o somatório e seu valor máximo.

$$PR = 52,5 \times (0,67 + 0,83 + 0,5) \quad \text{Equação 3.5}$$

O Apêndice II apresenta o passo a passo para obtenção dos pesos obtidos para cada critério do método adotado pela COGERH. E seus respectivos pesos estão descritos no Quadro 3.6:

Quadro 3.6 – Pesos dos critérios do método da COGERH

|          | <b>Crítérios</b>                          | <b>Pesos</b> |
|----------|---|--------------|
| $g_1$    | Dimensão da barragem                      | 5            |
| $g_2$    | Vol. Total do reservatório                | 5            |
| $g_3$    | Tipo de barragem                          | 5            |
| $g_4$    | Tipo de fundação                          | 5            |
| $g_5$    | Vazão de projeto                          | 5            |
| $g_6$    | Tempo de operação                         | 1,5          |
| $g_7$    | Existência de projeto (as built)          | 3,5          |
| $g_8$    | Confiabilidade das estruturas vertedouras | 5            |
| $g_9$    | Tomada de água                            | 2,5          |
| $g_{10}$ | Percolação                                | 5            |
| $g_{11}$ | Deformações/ afundamentos assentamentos   | 5            |
| $g_{12}$ | Deterioração dos taludes/ paramentos      | 5            |
| $g_{13}$ | Vol. Útil                                 | 35           |
| $g_{14}$ | População a jusante                       | 43,75        |
| $g_{15}$ | Custo da barragem                         | 26,25        |

#### 3.2.1.4 Matrizes de classificação: Lei 12.334 – Resolução CNRH n° 143

Para a valoração dos pesos do método adotado na matriz de classificação da Resolução CNRH n° 143 adotou os valores máximos que os descritores avaliados atingem.

A alteração, no que se refere à valoração de pesos adotada neste método para o Índice Global de Risco Modificado, corresponde à diferença dos valores apresentada pelos descritores.

Quadro 3.7 – Pesos dos critérios do método da Resolução CNRH n° 143

|          | <b>Critérios</b>   | <b>Pesos</b> |
|----------|--|--------------|
| $g_1$    | Altura   | 3            |
| $g_2$    | Comprimento  | 3            |
| $g_3$    | Tipo de barragem quanto ao material de construção  | 3            |
| $g_4$    | Tipo de Fundação   | 5            |
| $g_5$    | Idade da Barragem  | 4            |
| $g_6$    | Vazão de Projeto   | 10           |
| $g_7$    | Confiabilidade das estruturas extravasoras   | 10           |
| $g_8$    | Confiabilidade das estruturas de adução  | 6            |
| $g_9$    | Percolação   | 8            |
| $g_{10}$ | Deformações e recalques  | 8            |
| $g_{11}$ | Deterioração dos taludes / paramentos  | 7            |
| $g_{12}$ | Eclusa   | 4            |
| $g_{13}$ | Existência de documentação de projeto  | 6            |
| $g_{14}$ | Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem | 8            |
| $g_{15}$ | Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e monitoramento                                  | 6            |
| $g_{16}$ | Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem   | 6            |
| $g_{17}$ | Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação                                      | 5            |
| $g_{18}$ | Volume total do reservatório   | 5            |
| $g_{19}$ | Potencial de perda de vidas humanas  | 12           |
| $g_{20}$ | Impacto ambiental  | 5            |
| $g_{21}$ | Impacto sócio econômico  | 8            |

### 3.2.1.5 Método proposto pelo estudo

A construção deste modelo foi realizada a partir do entendimento de um especialista em segurança em barragens que atuou como decisor.

A opção de contar com um único decisor foi acarretada pela restrição existente na região, que possui poucos especialistas trabalhando na área de segurança em barragens no estado do Tocantins.

Foi realizada uma entrevista, aonde o especialista tomou conhecimento do conteúdo da pesquisa: métodos discutidos e seus respectivos critérios e níveis.

O decisor, baseado em seu conhecimento técnico e experiência, elegeu os critérios mais significativos para compor o quadro de classificação de barragens. Para tal, em primeiro momento, avaliou e separou os mais importantes e considerados indispensáveis em um portfólio de segurança em barragens, dentro de cada método.

Em seguida, o decisor escolheu, entre os critérios separados como fundamentais, mas que se repetiam em dois ou mais métodos, aqueles considerados mais adequados para o quadro de classificação.

Coube também ao decisor julgar os níveis dos critérios, propondo mudanças, quando necessárias. Podendo alterar a ordem, o valor codificado ou a quantidade de níveis em um determinado critério.

Por fim, ele dividiu os critérios em cinco grupos descritos no Quadro 3.8:

Quadro 3.8 – Pesos dos critérios do método

|                                  | <b>Crítérios</b>                           | <b>Cod.</b> |
|----------------------------------|--|-------------|
| CRITÉRIOS EXTERNOS OU AMBIENTAIS | Ações da natureza                          | $g_1$       |
| CRITÉRIOS TÉCNICOS DE PROJETO    | Dimensão do barramento                     | $g_2$       |
|                                  | Tipo de barragem                           | $g_3$       |
|                                  | Tipo de fundação                           | $g_4$       |
|                                  | Idade da barragem                          | $g_5$       |
|                                  | Vazão de Projeto                           | $g_6$       |
|                                  | Volume total do reservatório               | $g_7$       |
| CRITÉRIOS DE CONSERVAÇÃO         | Confiabilidade das Estruturas Extravasoras | $g_8$       |
|                                  | Confiabilidade das Estruturas de Adução    | $g_9$       |
|                                  | Percolação                                 | $g_{10}$    |
|                                  | Deformações e Recalques                    | $g_{11}$    |
|                                  | Deterioração dos Taludes / Paramentos      | $g_{12}$    |
| CRITÉRIOS DE DOCUMENTAÇÃO        | Projetos                                   | $g_{13}$    |
|                                  | Gestão da barragem                         | $g_{14}$    |
| CRITÉRIOS DE IMPACTOS A JUSANTE  | Impactos a jusante                         | $g_{15}$    |

Para facilitar o entendimento do decisor, adotou-se uma escala de 0 a 100 para construção dos níveis dos critérios. Aonde, os níveis que representam menor risco receberam menor nota, em contrapartida os que ofereçam maior risco receberam maiores notas. Outro motivo que justifica a adoção desta escala deve-se ao fato de ser a mesma escala adotada pelo ELECTRE TRI.

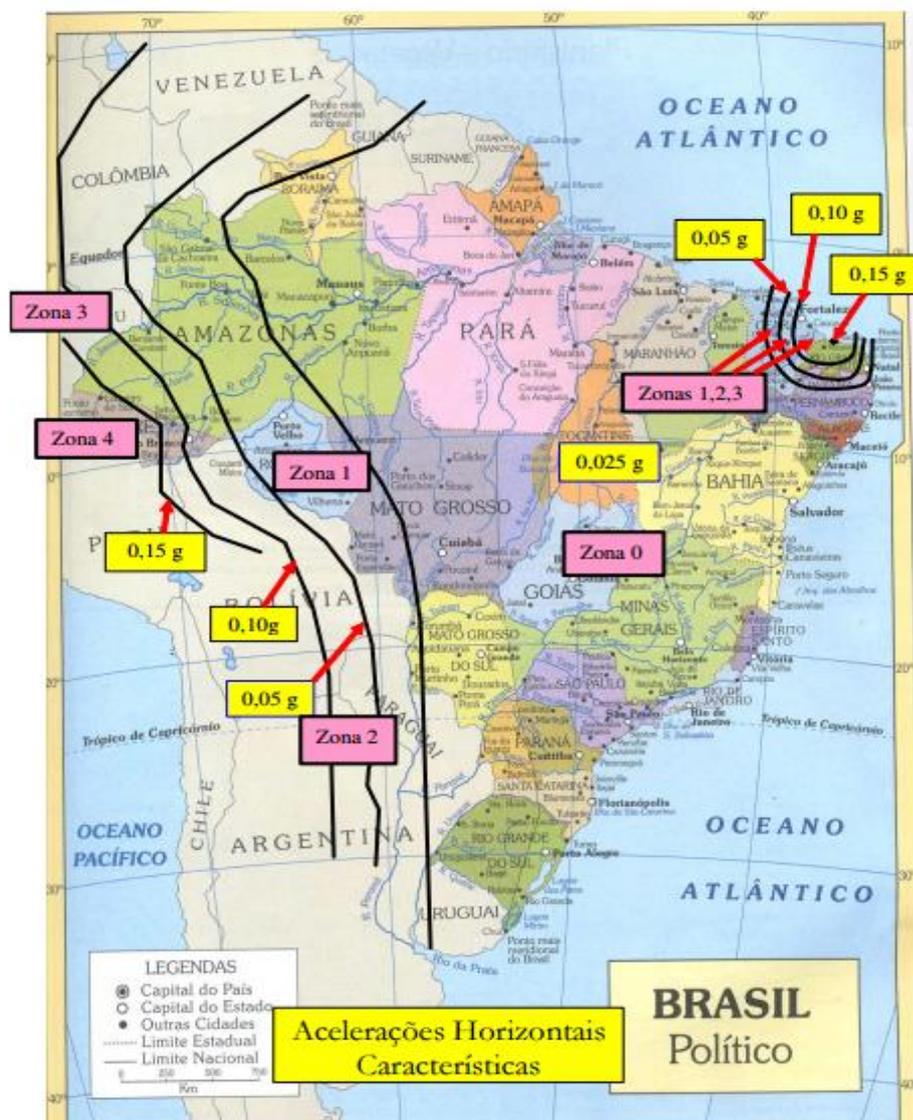
A seguir são apresentadas as características dos critérios definidos pelo decisor.

#### *Ações da natureza ( $g_1$ )*

Esse critério integra os descritores do Índice Global de Risco Modificado referentes a Sismicidade e Ações agressivas (Clima, água, etc).

O decisor optou pela escolha do critério sismicidade, tendo em vista que mesmo que ela seja considerada baixa no território brasileiro, como é evidenciada pelo mapa da Figura 3.5, há alguns sismos que podem ser induzidos pela formação de grandes reservatórios em virtude do próprio peso da lamina d'água e de pressões internas que promovem o deslocamento do solo.

Figura 3.5 - Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B (“Rocha”).



Fonte: NBR 15421<sup>9</sup> (2006).

No que se refere às ações agressivas, no Brasil, a principal ação corresponde aos ventos combinados ao elevado comprimento do *fetch*<sup>10</sup> que induzem a ocorrência de falhas no rip-rap devido a formação de ondas que colidem com o talude a montante do maciço e levam ao deslocamento das rochas. A Tabela 3.3 mostra a ordem dos níveis e seus respectivos pesos.

<sup>9</sup> NBR 15421:2006 - Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento, fixa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos.

<sup>10</sup> *Fetch* corresponde a distância na qual o vento pode atuar sobre as águas. Geralmente é definida pelo ponto mais a montante até a estrutura, na direção do vento.

Tabela 3.3 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_2$ 

| Ordem | Codificação numérica | Ações da natureza - $g_2$                            |
|-------|----------------------|--|
| I     | 10                   | Mínimas  |
| II    | 20                   | Fracas ou Sismicidade muito baixa $0,05g < a < 0,1g$ |
| III   | 40                   | Médias ou Sismicidade Baixa $0,1 < a < 0,2g$         |
| IV    | 60                   | Fortes   |
| V     | 80                   | Muito Fortes   |
| VI    | 100                  | Associadas a danos estruturais                       |

A metodologia que utiliza ordenação qualitativa e codificação numérica dos critérios foi adotada nos trabalhos de Nascimento (2012) e Felix (2014). Onde os critérios foram analisados e os níveis foram definidos e validados por decisores.

#### *Dimensão da Barragem ( $g_2$ )*

Este critério integra o método da COGERH e corresponde à união dos elementos altura e comprimento do maciço.

A altura da barragem corresponde à distância vertical entre a superfície do terreno de construção da barragem até a cota da crista do maciço. Logo, quanto mais alto o barramento, maior será o volume de água armazenado e a pressão hidrostática.

Zhang *et al.* (2007) verificou em um estudo realizados em 593 casos coletados em todo o mundo, que quanto menor for a altura da barragem, maior será a probabilidade de rompimento.

Tabela 3.4 - Altura da barragem de terra x falhas

| Altura (m)   | Número de casos | Porcentagem (%) |
|--------------|-----------------|-----------------|
| >100         | 4               | 0.7             |
| 100-60       | 10              | 1.7             |
| 60-30        | 44              | 7.4             |
| 30-15        | 135             | 22.8            |
| <15          | 301             | 50.8            |
| Desconhecido | 99              | 16.6            |
| <b>Total</b> | <b>593</b>      | <b>100.0</b>    |

Fonte: Zhang *et al.* (2007).

Zuffo (2005) explana que barragens com menores alturas não recebem monitoramento frequente e eficiente, falta de instrumentação de monitoramento e regras de manobras de vertedouros definidas e detalhadas, caso diferente de barragens com altura superiores, que podem causar maiores danos à jusante devido ao maior acúmulo de água.

Necessariamente, barragens com maiores comprimentos podem representar menores riscos, como por exemplo, aquelas construídas em regiões que possuem pouca declividade no terreno e que apresentam barramentos pequenos.

Nesse critério, considerou-se que quanto maior a altura e o comprimento do barramento, maior são os custos de manutenção e danos gerados a jusante, em caso de rompimento. A Tabela 3.5 mostra a ordem dos níveis e seus respectivos pesos.

Tabela 3.5 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_2$

| Ordem | Codificação numérica | Dimensão da barragem – $g_2$   |
|-------|----------------------|--|
| I     | 10                   | $H \leq 15\text{m}$ e $L \leq 200\text{m}$   |
| II    | 30                   | $H \leq 15\text{m}$ e $200\text{m} < L \leq 1500\text{m}$  |
| III   | 50                   | $H \leq 15\text{m}$ e $L > 1500\text{m}$   |
| IV    | 70                   | $15\text{m} < H \leq 30\text{m}$ e $L \leq 200\text{m}$  |
| V     | 80                   | $H > 50\text{m}$ e $L \leq 200\text{m}$ ;<br>ou $15\text{m} < H \leq 30\text{m}$ e $200\text{m} < L \leq 1500\text{m}$ |
| VI    | 90                   | $H > 50\text{m}$ e $200\text{m} < L \leq 1500\text{m}$ ;<br>ou $15\text{m} < H \leq 30\text{m}$ e $L > 1500\text{m}$   |
| VII   | 100                  | $H > 50\text{m}$ e $L > 1500\text{m}$  |

#### *Tipo de barragem ( $g_3$ )*

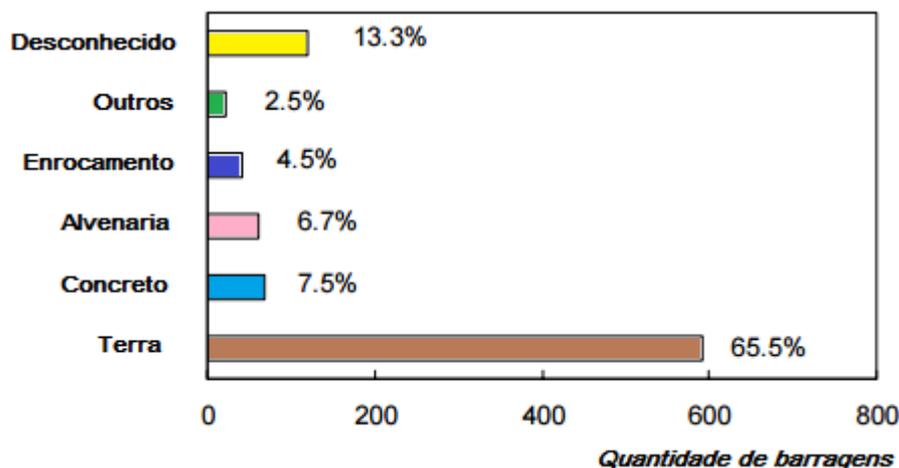
Esse critério integra os métodos do USACE, COGERH e Resolução CNRH nº 143. O decisor optou pelo critério adotado da COGERH. Porém, apresentou mudanças na codificação numérica inserindo um novo nível relacionado ao tipo de filtração e vertedouro. A Tabela 3.6 apresenta a ordem dos níveis e seus respectivos pesos.

Tabela 3.6 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_3$

| Ordem | Codificação numérica | Tipo de barramento – $g_3$  |
|-------|----------------------|---|
| I     | 10                   | Concreto convencional   |
| II    | 30                   | Alvenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR         |
| III   | 50                   | Terra enrocamento   |
| IV    | 70                   | Terra Homogênea com sistema de filtração e vertedouro de soleira livre  |
| V     | 100                  | Terra Homogênea sem sistema de filtração ou vertedouro de soleira livre |

Conforme Zhang *et al.* (2007), em dados recolhidos de 900 casos de falhas de barragens em todo o mundo, excluindo a China, os acidentes ocorrem em sua grande maioria em barragens de terra. Conforme pode se observar na Figura 3.6:

Figura 3.6 - Falhas em barragens x tipo de barragens.



Fonte: Zhang *et al.* (2007).

#### *Tipo de fundação ( $g_4$ )*

Este critério integra os métodos do USACE, COGERH e Resolução CNRH nº 143. O decisor também optou pelo critério adotado da COGERH, apresentando mudanças na codificação numérica.

Para Massad (2003), é necessário conviver com os problemas em fundações de barragens, sendo permitido, no máximo, submetê-las a um tratamento para melhorar as suas características quanto à percolação. No caso de uma barragem de concreto, se o terreno de fundação for um maciço rochoso de baixa resistência deve-se aprofundar a cota de apoio através de escavações, procurando a rocha mais resistente, ou então, mudar o local de construção da barragem.

Já barragens de terra construídas em locais onde ocorrem solos lateríticos<sup>11</sup> ou argilas moles (frequentemente nas várzeas dos rios) pode-se escavar o solo compressível, total ou parcialmente, e construir a barragem a partir de uma cota mais profunda, ou então conviver com o problema dos recalques. Outra solução constitui-se na construção de bermas de equilíbrio.

Bueno e Vilar (1999) listam que fundações com solos formados por pedregulhos mesclados com outros solos se configuram como boas ou excelentes. Já solos formados por turfa e outros solos altamente orgânicos devem ser removidos

<sup>11</sup> Solos lateríticos - solos porosos predominante em grandes áreas do território nacional.

por serem impermeáveis e com baixa resistência. A classificação completa com todos os solos está apresentada no Anexo I. A Tabela 3.7 apresenta a ordem dos níveis e seus respectivos pesos.

Tabela 3.7 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_4$

| Ordem | Codificação numérica | Tipo de fundação – $g_4$                           |
|-------|----------------------|--|
| I     | 10                   | Rocha  |
| II    | 30                   | Rocha alterada saprolito                           |
| III   | 50                   | Solo residual/Aluvião até 4m                       |
| IV    | 80                   | Aluvião arenoso espesso/Solo orgânico/desconhecido |

#### *Idade da Barragem ( $g_8$ )*

Este critério integra os métodos do USACE, COGERH e Resolução CNRH nº 143. O decisor optou pelo critério adotado do USACE, apresentando mudanças na codificação numérica. O critério Tipo de fundação está descrito na Tabela 3.8:

Tabela 3.8 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_5$

| Ordem | Codificação numérica | Idade da barragem – $g_5$     |
|-------|----------------------|-------------------------------|
| I     | 10                   | > 50 anos                     |
| II    | 20                   | 30 < idade ≤ 50               |
| III   | 40                   | 15 < idade ≤ 30               |
| IV    | 60                   | 5 < idade ≤ 15                |
| V     | 80                   | Idade ≤ 5 anos                |
| VI    | 100                  | Não completou o 1º enchimento |

Segundo o ICOLD (1995) verifica-se que a maioria das rupturas em barragens acontece àquelas com idade inferior a 10 anos de operação, quanto maior for o tempo de construção, menor é o número de rupturas. Segundo Andriolo (1993) esse período corresponde à fase em que o reservatório recebe as pressões totais no enchimento, e que podem acarretar anomalias como infiltrações, percolação e movimentação de massa, se não for realizado de forma lenta e gradual.

Segundo Zhang *et al.* (2007) a falhas em barragens estão mais susceptíveis a acontecer em seus primeiros cinco anos após a construção, especialmente durante o primeiro ano. Conforme pode se verificar na Tabela 3.9:

Tabela 3.9 - Idades das barragens de terra x falhas

| <b>Idade</b> | <b>Número de casos</b> | <b>Porcentagem</b> |
|--------------|------------------------|--------------------|
| 0-1          | 85                     | 14.3               |
| 1-5          | 96                     | 16.2               |
| 5-10         | 36                     | 6.1                |
| 10-20        | 62                     | 10.5               |
| 20-40        | 58                     | 9.8                |
| 40-60        | 31                     | 5.2                |
| 60-80        | 16                     | 2.7                |
| 80-100       | 7                      | 1.2                |
| 100-150      | 10                     | 1.7                |
| >150         | 6                      | 1.0                |
| Desconhecido | 186                    | 31.3               |
| <b>Total</b> | <b>593</b>             | <b>100.0</b>       |

Fonte: Zhang *et al.* (2007).

No entanto, segundo Pierre (2003) o fato de uma barragem estar em operação há longo tempo não é garantia de sua segurança, já que tanto a barragem, quanto suas fundações estão sujeitas a um lento processo de deterioração devido a diversos fatores, tais como variações de temperatura, alterações físico-químicas e os ciclos de enchimento e esvaziamento.

#### *Vazão de Projeto ( $g_6$ )*

Este critério integra os métodos da COGERH e Resolução CNRH n° 143. No método Índice Global de Risco Modificado apresenta o descritor Perigos de cheias superiores às de projeto possui funções análogas a este critério. O decisor optou pelo critério adotado da COGERH, apresentando mudanças na codificação numérica. O critério Tipo de fundação está descrito na Tabela 3.10:

Tabela 3.10 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_6$ 

| <b>Ordem</b> | <b>Codificação numérica</b> | <b>Vazão de projeto – <math>g_7</math></b> |
|--------------|-----------------------------|--|
| <b>I</b>     | <b>10</b>                   | <b>Decamilenar</b>                         |
| <b>II</b>    | <b>40</b>                   | <b>Milenar</b>                             |
| <b>III</b>   | <b>70</b>                   | <b>500 anos</b>                            |
| <b>IV</b>    | <b>100</b>                  | <b>Desconhecida</b>                        |

A partir do cálculo da vazão de projeto realiza-se o dimensionamento correto do vertedouro que tem a função de descarregar completamente grandes volumes de água do reservatório, principalmente em grandes chuvas.

Um extravasor mal projetado pode ocasionar o galgamento, gerando deslizamentos em barragens de gravidade e destruição parcial ou total no caso de

barragens de terra ou de enrocamento, mais suscetíveis a esse tipo de falha devido à presença de material constituinte solto (MASCARENHAS, 1990).

Existem várias fórmulas que levam ao cálculo da vazão máxima de projeto, onde o elemento mais importante é o tempo de retorno da chuva máxima, que quanto maior o período em anos, maior é a segurança contra galgamento.

De acordo com Hradilek (2002) em caso de grandes barragens, onde sua ruptura causaria grandes prejuízos à jusante, é necessário o dimensionamento da obra com a máxima cheia provável. Já para o caso de pequenas barragens, que quando analisadas não causam demasiados prejuízos, o uso de cheias menores pode ser justificável, considerando os aspectos econômicos.

#### *Volume ( $g_7$ )*

Este critério integra os métodos Índice Global de Risco Modificado, COGERH e Resolução CNRH n° 143. Onde o decisor optou pelo critério similar à Resolução CNRH n° 143. O critério Volume está descrito na Tabela 3.11:

Tabela 3.11 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_7$

| <b>Ordem</b> | <b>Codificação numérica</b> | <b>Volume – <math>g_7</math></b>                                     |
|--------------|-----------------------------|--|
| <b>I</b>     | <b>10</b>                   | <b>Pequeno (<math>\leq 5</math> milhões <math>m^3</math>)</b>        |
| <b>III</b>   | <b>30</b>                   | <b>Médio (5 milhões a 75 milhões <math>m^3</math>)</b>               |
| <b>III</b>   | <b>60</b>                   | <b>Grande (75 milhões a 200 milhões <math>m^3</math>)</b>            |
| <b>V</b>     | <b>100</b>                  | <b>Muito grande (<math>&gt; 200</math> milhões <math>m^3</math>)</b> |

O volume acumulado em barragens é considerado como um dos critérios mais importantes para a segurança em barragens. A acumulação de água pode gerar uma grande pressão no barramento, que quando projetado inadequadamente pode causar o seu rompimento, e conseqüentemente, danos à jusante.

A Tabela 3.12 reflete o número de falhas em barragens de terra com menores volumes. Assim como a altura, estas falhas estão mais presentes em barragens com menores alturas, decorrentes da falta de manutenção.

Tabela 3.12 - Capacidade do reservatório das barragens de terra

| Volume ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ) | Número de Casos | Porcentagem (%) |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|
| >1000                                | 7               | 1.2             |
| 1000-100                             | 19              | 3.2             |
| 100-10                               | 62              | 10.5            |
| 10-1                                 | 63              | 10.6            |
| <1                                   | 96              | 16.2            |
| Desconhecido                         | 346             | 58.3            |
| <b>Total</b>                         | <b>593</b>      | <b>100.0</b>    |

Fonte: Zhang *et al.* (2007).

### Confiabilidade das Estruturas Extravasoras ( $g_8$ )

Apesar de apresentar conceitos diferentes, este critério integra os métodos Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH e Resolução CNRH n° 143. O decisor optou pelo critério adotado na Resolução CNRH n° 143, apresentando mudanças na codificação numérica.

Uma observação que deve ser salientada é que esse critério atinge a escala máxima de 100. Isto se dá, segundo o decisor, devido às anomalias apresentarem um potencial de risco e serem suscetíveis de acontecerem em pequenas e grandes barragens. Logo, elas potencializam e agravam barragens que já se encontram em alto risco. Conforme pode se observar na Tabela 3.13:

Tabela 3.13 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_8$ 

| Ordem | Codificação numérica | Confiabilidade das Estruturas Extravasoras – $g_8$   |
|-------|----------------------|--|
| I     | 0                    | Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos   |
| II    | 40                   | Estruturas civis e eletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente.   |
| III   | 70                   | Estruturas civis comprometidas ou Dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente. |
| IV    | 100                  | Estruturas civis comprometidas ou Dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas  |

A ANA (2016) explana no Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem que as estruturas extravasoras devem ser inspecionadas regularmente visando à detecção e correção de anomalias. Além de promover a limpeza para a manutenção do bom funcionamento.

#### *Confiabilidade das Estruturas de Adução ( $g_9$ )*

Este critério foi extraído do método da Resolução CNRH n° 143. O decisor optou pelo critério adotado na Resolução CNRH n° 143, apresentando mudanças na codificação numérica. Conforme pode se observar na Tabela 3.14:

Tabela 3.14 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_9$

| Ordem | Codificação numérica | <b>Confiabilidade das Estruturas de Adução – <math>g_9</math></b>  |
|-------|----------------------|--|
| I     | 0                    | <b>Estruturas civis e dispositivos hidro eletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento</b>  |
| II    | 40                   | <b>Estruturas civis comprometidas ou Dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e com medidas corretivas em implantação</b> |
| III   | 60                   | <b>Estruturas civis comprometidas ou Dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas</b>                |
| IV    | 100                  | <b>Estruturas civis comprometidas ou Dispositivos hidroeletromecanicos com problemas não identificados, em estado de abandono</b>  |

A confiabilidade das estruturas de adução depende, assim como as estruturas extravasoras e outros órgãos da barragem, de manutenções preventivas e correções das anomalias identificadas.

#### *Percolação ( $g_{10}$ )*

Este critério está inserido nos métodos COGERH e Resolução CNRH n° 143. O decisor optou pelo critério adotado na Resolução CNRH n° 143, apresentando mudanças na codificação numérica.

Esse critério atingiu a escala máxima de 100 devido ao potencial de risco e ser suscetível de acontecerem em pequenas e grandes barragens. Conforme pode se observar na Tabela 3.15:

Tabela 3.15 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_{10}$ 

| Ordem | Codificação numérica | Percolação – $g_{10}$   |
|-------|----------------------|---|
| I     | 0                    | Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem   |
| II    | 30                   | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada.             |
| III   | 60                   | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico. |
| IV    | 100                  | Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente.              |

É consenso que em barragens de terra é impossível a estanqueidade completa do maciço, verificando que há sempre, certa percolação de água, tanto a que infiltra pela face de montante como as que infiltram pelas fundações.

A ANA (2016) recomenda que sejam realizados os ensaios de permeabilidade em solos de jazidas disponíveis. Stephens (2011) recomenda que o projetista deve considerar a permeabilidade do solo maciço e da fundação, a posição da linha freática e elementos de vedação e filtração.

Segundo Aguiar (2014) a percolação pode gerar a erosão interna na barragem e causar um fenômeno conhecido como “piping” ou erosão tubular regressiva, que difere da erosão superficial por ocorrer internamente ao maciço e contrário ao sentido do fluxo.

#### *Deformações e Recalques ( $g_{11}$ )*

Este critério está inserido nos métodos COGERH e Resolução CNRH nº 143. O decisor também optou pelo critério adotado na CNRH 143, apresentando mudanças na codificação numérica. Com a escala máxima de 100 conforme pode se observar na Tabela 3.16:

Tabela 3.16 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_{11}$ 

| Ordem | Codificação numérica | Deformações e Recalques – $g_{11}$  |
|-------|----------------------|---|
| I     | 0                    | Inexistente   |
| II    | 30                   | Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo                                    |
| III   | 60                   | Trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento. |
| IV    | 100                  | Trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento a segurança.        |

Stephens (2011) descreve que o assentamento do aterro em caso de barragens terra, quando significativo, pode gerar rachaduras na parede do maciço. Este assentamento é diferencial e pode levar uma estrutura rígida a deformar-se a tal ponto que ocorrem fissuras.

Quando o maciço é construído com solos argilosos, ao longo do tempo, na fase operacional do aterro, o solo tende-se a adensar, tornando-se mais rígido, vindo a causar recalques. O que torna interessante o serviço de retirada do solo mole na execução da barragem para evitar recalques diferenciais, originado pela pressão da água combinado com peso próprio do maciço (MASSAD, 2003).

#### *Deterioração dos Taludes / Paramentos ( $g_{12}$ )*

Este critério está inserido nos métodos Índice Global de Risco Modificado, COGERH e Resolução CNRH n° 143. O decisor também optou pelo critério adotado na Resolução CNRH n° 143, apresentando mudanças na codificação numérica. Com a escala máxima de 100 conforme pode se observar na Tabela 3.17:

Tabela 3.17 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_{12}$

| Ordem | Codificação numérica | Deterioração dos Taludes / Paramentos – $g_{12}$   |
|-------|----------------------|--|
| I     | 0                    | Inexistente  |
| II    | 30                   | Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo                                     |
| III   | 60                   | Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva |
| IV    | 100                  | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento a segurança             |

A falta de manutenção nos taludes pode desencadear anomalias graves na estrutura do maciço. É necessária a realização de inspeções visando a identificação de anomalias, tais como: sinais de fissuras, erosões, deslizamentos e buracos (ANA, 2016).

A manutenção da camada de *rip-rap*, o controle de animais e árvores, execução de instrumentação e adoção de medidas corretivas fazem parte da rotina de gestão do barramento.

### *Projetos (g<sub>13</sub>)*

Este critério está inserido nos métodos COGERH como o elemento Existência De Projeto (*As Built*) e Resolução CNRH n° 143. O decisor também optou pelo critério adotado na Resolução CNRH n° 143. Conforme se pode observar na Tabela 3.18:

Tabela 3.18 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério *g<sub>13</sub>*

| Ordem | Codificação numérica | Projetos – <i>g<sub>13</sub></i>       |
|-------|----------------------|--|
| I     | 0                    | Projeto executivo e "como construído"  |
| II    | 20                   | Projeto executivo ou "como construído" |
| III   | 40                   | Projeto básico                         |
| III   | 60                   | Projeto conceitual                     |
| V     | 100                  | Não há documentação de projeto         |

Segundo Melo (2014) a concepção e a gestão de uma barragem carece de bom planejamento, projeto, construção, inspeção e monitoramento.

Barragens em operação, projetadas e construídas sem o rigor técnico necessário e sem o registro de sua memória técnica: elementos de projeto, relatório do “as built”, relatórios de inspeção, leituras com análise e interpretação dos instrumentos, entre outros, dificultam o controle e a identificação de anomalias (MEDEIROS, 2003).

### *Gestão do reservatório (g<sub>14</sub>)*

Este critério compreende todas as ações de gestão que visam à segurança e manutenção das condições de bom funcionamento da barragem. Ele abrange ações de monitoramento, inspeção, instrumentação e operação que são executadas por uma equipe e responsável técnico. A Tabela 3.19 apresenta a ordem dos níveis e seus respectivos pesos.

Tabela 3.19 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério *g<sub>14</sub>*

| Ordem | Codificação numérica | Gestão do reservatório – <i>g<sub>14</sub></i>   |
|-------|----------------------|--|
| I     | 10                   | Possui estrutura organizacional que realiza a instrumentação, inspeção e relatórios com periodicidade                            |
| II    | 40                   | Possui estrutura organizacional que realiza a instrumentação, inspeção e relatórios sem periodicidade                            |
| III   | 70                   | Não possui estrutura organizacional ou responsável técnico pela segurança da barragem, mas realiza a instrumentação da barragem  |
| IV    | 100                  | Não possui estrutura organizacional ou responsável técnico pela segurança da barragem e não realiza a instrumentação da barragem |

A equipe que trabalha na gestão e monitoramento da barragem deve ser qualificada. Dado que, barragens com informações em abundância, mas, desorganizadas, sem análises e interpretações dificultam a identificação das anomalias (MEDEIROS, 2003).

Para Aguiar (2014), entre os problemas que podem levar a rompimento da estrutura ou falha de funcionamento, está na falta de profissionais capacitados e de avaliações preventivas e periódicas, principalmente, barragens abaixo de quinze metros de altura em propriedades rurais particulares, construídas para fins de abastecimento, irrigação ou recreação, mas que não apresentam um projeto adequado.

Os relatórios de inspeção devem conter dados sobre anomalias e perigos em potencial e iminente da barragem. Deve ser feito regularmente pela própria equipe de segurança da barragem, devendo estar disponível ao órgão fiscalizador e à sociedade civil (ANA, 2016b).

Os relatórios resultantes das inspeções de segurança especiais devem indicar as ações a serem seguidas pelo empreendedor para a manutenção da segurança. Os registros dessas inspeções são parte complementar do Plano de Segurança da Barragem, o qual é um dos instrumentos da PNSB, nos termos da Lei nº 12.334/2010.

#### *Impactos a jusante (g<sub>15</sub>)*

Este critério está inserido nos métodos Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH e Resolução CNRH nº 143. O decisor optou por um critério que abrangesse os impactos socioeconômicos, ambientais e a vidas da população que na área a jusante da barragem.

Apresenta a escala máxima de 100, conforme pode se observar na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Ordenação qualitativa e codificação numérica do critério  $g_{15}$ 

| Ordem | Codificação numérica | Impactos a jusante – $g_{15}$   |
|-------|----------------------|---|
| I     | 20                   | <b>BAIXO</b><br>(Pessoas transitando, não representa área de interesse ambiental, e não possui indústrias)  |
| II    | 40                   | <b>MODERADO</b><br>(não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local, além de APPS e Pastagens).  |
| III   | 70                   | <b>ALTO</b><br>(não existem pessoas ocupando permanentemente, mas existe rodovias, e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas, além de interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) |
| IV    | 100                  | <b>MUITO ALTO</b><br>(existem pessoas ocupando permanentemente, com grande concentração de instalações residenciais e empreendimentos, além de possuir interesse ambiental)   |

Este critério é considerado como mais importante por vários pesquisados, tendo em vista que os métodos de classificação de risco são concebidos em função da promoção da segurança da população a jusante. Logo, quanto mais pessoas viverem no vale a jusante, maiores serão os danos e os riscos.

#### 3.2.1.6 Pesos - Método proposto pelo estudo

Para a definição dos pesos do método proposto pelo autor foi utilizado Método de Análise Hierárquica (AHP).

O decisor atribuiu valores relativos na construção da matriz para os 15 critérios definidos anteriormente. Utilizando a escala de Saaty (1, 3, 5, 7 e 9), definiu uma hierarquia de critérios, onde os mais importantes e que ofereciam maior risco receberam a maiores notas, e os critérios considerados menos importantes e que ofereciam menor risco, receberam menores notas. O Apêndice III apresenta a matriz de Prioridades e a Matriz Normalizada. O Quadro 3.9 apresenta o *autovetor* normalizado com os pesos de cada critério.

Quadro 3.9 - Pesos dos critérios Método proposto pelo estudo

| <b>Critérios</b>                           | <b>Cod.</b>     | <b>Autovetor Normalizado</b> |
|--|-----------------|------------------------------|
| Ações da Natureza                          | g <sub>1</sub>  | 0,0090                       |
| Dimensões da barragem                      | g <sub>2</sub>  | 0,1293                       |
| Tipo de barragem                           | g <sub>3</sub>  | 0,0270                       |
| Tipo de fundação                           | g <sub>4</sub>  | 0,0556                       |
| Idade da barragem                          | g <sub>5</sub>  | 0,0090                       |
| Vazão de Projeto                           | g <sub>6</sub>  | 0,0556                       |
| Volume total do reservatório               | g <sub>7</sub>  | 0,1293                       |
| Confiabilidade das Estruturas Extravasoras | g <sub>8</sub>  | 0,0556                       |
| Confiabilidade das Estruturas de Adução    | g <sub>9</sub>  | 0,0556                       |
| Percolação                                 | g <sub>10</sub> | 0,1293                       |
| Deformações e Recalques                    | g <sub>11</sub> | 0,1293                       |
| Deterioração dos Taludes / Paramentos      | g <sub>12</sub> | 0,0556                       |
| Projetos                                   | g <sub>13</sub> | 0,0152                       |
| Gestão da Barragem                         | g <sub>14</sub> | 0,0152                       |
| Impactos a jusante                         | g <sub>15</sub> | 0,1293                       |
|  | <b>Σ</b>        | <b>1,0000</b>                |

Utilizando a Equação 2.14 para obtenção do Autovalor ( $\lambda_{max}$ ) e a Equação 2.15 para o Índice de Consistência pode-se verificar a Razão de Consistência com Equação 2.16. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 3.21:

Tabela 3.21 - Análise a consistência dos pesos

| <b>Autovalor (<math>\lambda_{max}</math>)</b> | <b>IC</b> | <b>Razão de consistência</b> |
|---|-----------|------------------------------|
| 15,43   | 0,0305    | 2%                           |

Como a RC é inferior a 0,1 (10%) os julgamentos são confiáveis, apresentando resultados consistentes.

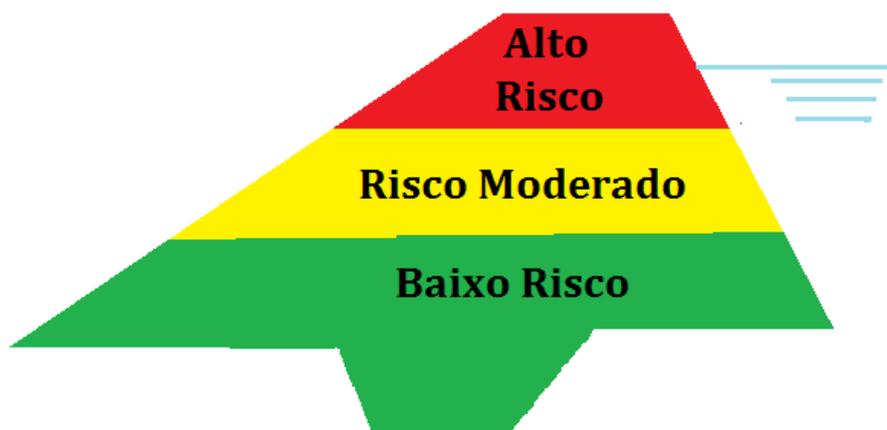
### 3.2.2 Definição das Classes de risco

Esta etapa corresponde à construção de escalas de risco que permitem realizar o enquadramento da barragem em categorias definidas, e assim, auxiliar a tomada de decisão referente às ações de gerenciamento de riscos pertinentes.

Para os métodos Índice Global de Risco Modificado, USACE e Resolução CNRH n° 143 foram utilizadas três categorias: Alto risco, Risco moderado e Baixo risco.

O esquema com a escala de risco está ilustrado na Figura 3.7:

Figura 3.7 – Classes de risco de barragens.



Fonte: Autor (2016).

Para o método adotado pela COGERH procurou-se manter a mesma quantidade de classes utilizadas para a realização de suas classificações com o ELECTRE TRI. As classes de Potencial de risco se dividem em cinco, são: Alto, Médio, Normal, Baixo e Muito Baixo.

Para o Novo método proposto pelo estudo foram criadas 4 categorias de risco: baixo risco, risco moderado, alto risco e risco extremo.

Segundo o decisor, a categoria **risco extremo** abrange grandes barragens que apresentam anomalias em níveis avançados. Na ausência destas anomalias, as barragens são enquadradas nas classes de risco inferiores.

### 3.2.3 Procedimento de Codificação e Definição das Fronteiras

Para transformar as ordenações qualitativas dos critérios em valores numéricos, é necessário realizar uma codificação embasada na literatura relacionada com o tema discutido ou em entrevista com o decisor. O procedimento de codificação permite obter uma escala de preferências ordenadas equivalentes (NASCIMENTO, 2012; ARAÚJO, 2014).

A realização da atividade de codificação dos valores numéricos de cada critério pode ser realizada utilizando a mesma escala adotada dos níveis nos respectivos métodos. Nos métodos adotados, zero representa a situação desejada, visto que representa a situação que trás o mínimo de risco possível, e a medida que o níveis apresentam maior risco, a numeração aumenta. Assim, se estabelece um valor dentro deste intervalo para cada nível de critério representando seu grau de risco (NASCIMENTO, 2012; ARAÚJO; 2014).

O decisor define os limites que cada nível do critério poderá atingir dentro das categorias de risco. Segundo Araújo (2014), neste caso define-se fronteiras limítrofes de cada categoria, respeitando os níveis definidos pelo decisor.

As Tabelas 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25 apresentam os limites de cada fronteira dos métodos discutidos.

Tabela 3.22 – Fronteiras para os Critérios Índice Global de Risco Modificado

| FRONTEIRAS            | CLASSIFICAÇÃO DE RISCO | VALORES DAS FRONTEIRAS DE CADA CRITÉRIO |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |
|-----------------------|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
|                       |                        | $g_1$                                   | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ |
| <b>Alto Risco</b>     |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |
| Fronteira $b_2$       |                        | 4                                       | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4        | 4        |
| <b>Risco Moderado</b> |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |
| Fronteira $b_1$       |                        | 2                                       | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2        | 2        |
| <b>Baixo Risco</b>    |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |

Tabela 3.23 – Fronteiras para os Critérios do USACE

| FRONTEIRAS            | CLASSIFICAÇÃO DE RISCO | VALORES DAS FRONTEIRAS DE CADA CRITÉRIO |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |
|-----------------------|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
|                       |                        | $g_1$                                   | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ | $g_{12}$ | $g_{13}$ |
| <b>Alto Risco</b>     |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |
| Fronteira $b_2$       |                        | 8                                       | 8     | 10    | 8     | 8     | 10    | 7     | 8     | 8     | 10       | 8        | 8        | 8        |
| <b>Risco Moderado</b> |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |
| Fronteira $b_1$       |                        | 3                                       | 3     | 4     | 3     | 3     | 1     | 2     | 3     | 3     | 1        | 4        | 3        | 3        |
| <b>Baixo Risco</b>    |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |

Tabela 3.24 – Fronteiras para os Critérios da COGERH

| FRONTEIRAS               | CLASSIFICAÇÃO DE RISCO | VALORES DAS FRONTEIRAS DE CADA CRITÉRIO |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |  |  |  |  |
|--------------------------|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|--|--|
|                          |                        | $g_1$                                   | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ | $g_{12}$ | $g_{13}$ | $g_{14}$ | $g_{15}$ |  |  |  |  |
| <b>Alto Risco</b>        |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |  |  |  |  |
| Fronteira $b_4$          |                        | 6,5                                     | 6,5   | 6,5   | 6,5   | 6,5   | 1,95  | 4,55  | 6,5   | 3,25  | 6,5      | 6,5      | 6,5      | 1,3      | 1,63     | 0,98     |  |  |  |  |
| <b>Risco Médio</b>       |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |  |  |  |  |
| Fronteira $b_3$          |                        | 4                                       | 4     | 4     | 4     | 4     | 1,2   | 2,8   | 4     | 2     | 4        | 4        | 4        | 0,8      | 1        | 0,6      |  |  |  |  |
| <b>Risco Normal</b>      |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |  |  |  |  |
| Fronteira $b_2$          |                        | 2,5                                     | 2,5   | 2,5   | 2,5   | 2,5   | 0,75  | 1,75  | 2,5   | 1,25  | 2,5      | 2,5      | 2,5      | 0,5      | 0,63     | 0,38     |  |  |  |  |
| <b>Risco Baixo</b>       |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |  |  |  |  |
| Fronteira $b_1$          |                        | 1,5                                     | 1,5   | 1,5   | 1,5   | 1,5   | 0,45  | 1,05  | 1,5   | 0,75  | 1,5      | 1,5      | 1,5      | 0,3      | 0,38     | 0,23     |  |  |  |  |
| <b>Risco Muito Baixo</b> |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |  |  |  |  |

Tabela 3.25 – Fronteiras para os Critérios da Resolução CNRH n° 143

| FRONTEIRAS            | CLASSIFICAÇÃO DE RISCO | VALORES DAS FRONTEIRAS DE CADA CRITÉRIO |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                       |                        | $g_1$                                   | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ | $g_{12}$ | $g_{13}$ | $g_{14}$ | $g_{15}$ | $g_{16}$ | $g_{17}$ | $g_{18}$ | $g_{19}$ | $g_{20}$ | $g_{21}$ |
| <b>Alto Risco</b>     |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Fronteira $b_2$       |                        | 2                                       | 3     | 2     | 4     | 3     | 8     | 7     | 4     | 5     | 5        | 5        | 2        | 6        | 6        | 5        | 5        | 4        | 3        | 6        | 5        | 6        |
| <b>Risco Moderado</b> |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Fronteira $b_1$       |                        | 1                                       | 2     | 1     | 2     | 1     | 5     | 4     | 2     | 2     | 1        | 1        | 1        | 2        | 2        | 2        | 1        | 1        | 1        | 2        | 3        | 2        |
| <b>Baixo Risco</b>    |                        |   |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |



Tabela 3.28 – Limiares discriminatórios – USACE

| LIMIARES              | CRITÉRIOS |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |
|-----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
|                       | $g_1$     | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ | $g_{12}$ | $g_{13}$ |
| Indiferença ( $q_j$ ) | 0         | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Preferência ( $p_j$ ) | 2         | 2     | 6     | 1     | 1     | 6     | 1     | 2     | 1     | 9        | 2        | 2        | 2        |

Tabela 3.29 – Limiares discriminatórios – COGERH

| LIMIARES              | CRITÉRIOS |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                       | $g_1$     | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ | $g_{12}$ | $g_{13}$ | $g_{14}$ | $g_{15}$ |
| Indiferença ( $q_j$ ) | 0         | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Preferência ( $p_j$ ) | 2         | 2     | 2     | 1     | 1     | 1     | 2     | 1     | 1     | 2        | 2        | 2        | 8,75     | 17,5     | 3,5      |

Tabela 3.30 – Limiares discriminatórios Resolução CNRH nº 143

| LIMIARES              | CRITÉRIOS |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |
|-----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|
|                       | $g_1$     | $g_2$ | $g_3$ | $g_4$ | $g_5$ | $g_6$ | $g_7$ | $g_8$ | $g_9$ | $g_{10}$ | $g_{11}$ | $g_{12}$ | $g_{13}$ | $g_{14}$ | $g_{15}$ | $g_{16}$ | $g_{17}$ | $g_{18}$ | $g_{19}$ | $g_{20}$ |   |
| Indiferença ( $q_j$ ) | 0         | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |   |
| Preferência ( $p_j$ ) | 1         | 2     | 1     | 2     | 1     | 5     | 4     | 2     | 2     | 1        | 1        | 1        | 2        | 2        | 2        | 1        | 1        | 1        | 2        | 3        | 2 |

Para o modelo proposto pelo estudo o decisor definiu os valores dos limiares de preferência dos critérios.

De acordo com a escala de codificação numérica que se estende de 0 a 100, o decisor decidiu quais os níveis apresentavam diferença estrita, uma vez que o limiar de diferença é o menor valor das diferenças entre os níveis dos critérios em que percebe a preferência estrita.

Desta forma, para o critério  $g_1$  (Ações da natureza) foram realizadas comparações par a par entre os níveis da escala para verificar o limiar de preferência:

1. **Nível 2 – Nível 1 : (20-10)=10**
2. Nível 3 – Nível 2 : (40-20)=20
3. Nível 4 – Nível 3 : (60-40)=20
4. Nível 5 – Nível 4 : (80-60)=20
5. Nível 6 – Nível 5 : (100-80)=20

Neste critério, o decisor considerou que não há preferência estrita entre os níveis 1 e 2 devido não haver diferença estrita entre eles. Nas demais comparações

do critério a preferência estrita foi percebida. Então, o limiar de preferência variou entre  $10 < p_1 < 20$ , onde o decisor optou pelo valor  $p_1 = 15$ .

Já para o critério  $g_3$  (Tipo de barragem), em todas as comparações par a par foram verificadas diferenças estritas. Então, o limiar de preferência variou entre  $0 < p_3 < 20$ , onde o decisor optou pelo valor  $p_3 = 15$ .

1. Nível 2 – Nível 1 :  $(30-10)=20$
2. Nível 3 – Nível 2 :  $(50-30)=20$
3. Nível 4 – Nível 3 :  $(70-50)=20$
4. Nível 4 – Nível 3 :  $(100-70)=30$

Os limiares de preferência de todos os critérios estão apresentados no Quadro 3.10:

Quadro 3.10 – Limiares discriminatórios – Método proposto

| <b>Critérios</b> | <b>Diferença estrita não percebida</b>    | <b>Intervalo para limiar de preferência</b> | <b>Limiar de preferência (<math>p_j</math>)</b> | <b>Limiar de Indiferença (<math>q_j</math>)</b> |
|------------------|---|---|---|---|
| $g_1$            | Nível 1 e 2                               | $10 < p_1 < 20$                             | 15  | 0   |
| $g_2$            | Nível 4 e 5<br>Nível 5 e 6<br>Nível 6 e 7 | $10 < p_2 < 20$                             | 15  | 0   |
| $g_3$            |   | $0 < p_3 < 20$                              | 15  | 0   |
| $g_4$            |   | $0 < p_4 < 20$                              | 15  | 0   |
| $g_5$            | Nível 1 e 2                               | $10 < p_5 < 20$                             | 15  | 0   |
| $g_6$            |   | $0 < p_6 < 30$                              | 25  | 0   |
| $g_7$            |   | $0 < p_7 < 20$                              | 15  | 0   |
| $g_8$            |   | $0 < p_8 < 30$                              | 25  | 0   |
| $g_9$            |   | $0 < p_9 < 20$                              | 15  | 0   |
| $g_{10}$         |   | $0 < p_{10} < 30$                           | 25  | 0   |
| $g_{11}$         |   | $0 < p_{11} < 30$                           | 25  | 0   |
| $g_{12}$         |   | $0 < p_{12} < 30$                           | 25  | 0   |
| $g_{13}$         |   | $0 < p_{13} < 20$                           | 15  | 0   |
| $g_{14}$         |   | $0 < p_{14} < 30$                           | 25  | 0   |
| $g_{15}$         |   | $0 < p_{15} < 20$                           | 15  | 0   |

### 3.3 FASE DE AVALIAÇÃO DAS BARRAGENS

Para a fase de avaliação das barragens, foram levantadas todas as informações de enquadramento das barragens que estão sob responsabilidade de gestão da SEPLAN.

Em primeiro momento foram levantadas as informações de projeto, dados da estrutura organizacional, manuais e relatórios de inspeções.

A segunda parte correspondeu de uma pesquisa *in loco* nas barragens visando verificar as características técnicas e as condições atuais dos parâmetros definidos pelos decisores como influenciadores para classificação de risco.

Para obtenção dos dados, foram realizadas visitas nas barragens com equipamentos de medição:

- Trena para a medição dos elementos do maciço: altura, comprimento e largura do coroamento.
- GPS;

Foram utilizadas imagens de satélite e software QGIS para a verificação do comprimento e da área dos reservatórios.

Por fim, os dados levantados das barragens foram utilizados para gerar as classificações de risco na forma padrão e utilizando o software ELECTRE TRI.

### 3.4 APLICAÇÃO DO MODELO ELECTRE TRI NA ANÁLISE DE RISCO DE BARRAGENS

Com os dados mensurados, inseriram-se as informações dos métodos Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH, Resolução CNRH n° 143 e o método proposto pelo estudo no ELECTRE TRI gerando a classificação de cada barragem analisada nas classes de risco.

Para a obtenção das classificações utilizou-se o *software* ELECTRI TRI versão 2.0a, desenvolvido pela LAMSADE – *Laboratoire D'Analyse et Modélisation de Systèmes Pour l'aide à la Décision*, da *Dauphine University*, Paris – França.

As etapas para gerar as classificações utilizando o *software* ELECTRI TRI versão 2.0a estão descritas a seguir:

- 1- A introdução dos critérios e seus respectivos pesos;
- 2- Definição dos perfis que compõem as fronteiras das categorias. Nos métodos que apresentam três categorias (alto risco, risco moderado e baixo risco) foram inseridos dois perfis; Para as quatro categorias de risco, três perfis; E para o método proposto pelo estudo, foi inserido três perfis, devido ao método possuir uma quarta categoria.

- 3- Realiza-se a introdução dos níveis de todos os critérios e seus respectivos valores;
- 4- Inserir os valores dos limiares de indiferença ( $q_j$ ), preferência ( $p_j$ ) e, se necessário, veto ( $v_j$ );
- 5- Alternativas foram inseridas nas categorias definidas;
- 6- Como o software classifica as alternativas de classificação em Otimista (menos exigente) e pessimista (mais exigente), deve se escolher qual é opção que melhor se adéqua a pesquisa, neste caso, como se trata de um estudo de análise de risco, atribuição foi pessimista.
- 7- Obteve-se o nível de corte  $\lambda$  ( $\lambda$  deve estar no intervalo de 0,5 e 1,0), que indica quantos dos critérios têm de ser cumpridos, a fim de atribuir uma alternativa para uma categoria específica. O nível de corte para os métodos da ICOLD, USACE, COGERH e Resolução CNRH n° 143 e método proposto pelo estudo variaram dentro deste intervalo.
- 8- Por fim, o software calculou os índices de credibilidade que expressa para qual extensão ( $\sigma(A, b_h)$  "A supera  $b_h$ ") e ( $\sigma(b_h, A)$  " $b_h$  supera A") de acordo com o índice global de concordância  $C(A, b_n)$  e para os índices de discordância  $d(A, b_h)$  (ARAÚJO, 2014).

O método foi aplicado em quatro barragens:

- Projeto Manuel Alves em Dianópolis – TO;
- Barragens do Projeto Rio Formoso: Taboca, Calumbi I e Calumbi II.

## 4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS

As classificações de risco foram realizadas nas quatro barragens utilizando os métodos Índice Global de Risco Modificado, USACE, COGERH, Resolução CNRH nº 143 e o novo método proposto pelo estudo.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados correspondentes a cada método.

#### 4.1.1 Índice Global de Risco Modificado

A classificação padrão das barragens utilizando o método Índice Global de Risco Modificado está apresentada no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Classificação de risco padrão Índice Global de Risco Modificado

| Descritores   |  | Barragens                             |                                       |                                       |                                       |
|---|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|   |  | Projeto Manuel Alves                  | Calumbi I                             | Calumbi II                            | Taboca                                |
| CLASSE ASSOCIADA A FATORES EXTERNOS OU AMBIENTAIS (E) | Sismicidade                              | Muito baixa (2)                       | Muito baixa (2)                       | Muito baixa (2)                       | Muito baixa (2)                       |
|   | Escorregamento de taludes                | Média (5)                             | Elevada (6)                           | Elevada (3)                           | Elevada (6)                           |
|   | Cheias superiores à do projeto           | Baixa (barragens de aterro) (2)       | Média (barragens de aterro) (4)       | Média (barragens de aterro) (4)       | Média (barragens de aterro) (4)       |
|   | Gestão do reservatório                   | Muito boa (1)                         | Medíocre (5)                          | Medíocre (5)                          | Medíocre (5)                          |
|   | Ações agressivas                         | Fracas (2)                            | Médias (3)                            | Médias (3)                            | Médias (3)                            |
| CLASSE ASSOCIADA À CONFIABILIDADE DA OBRA (F)         | Dimensionamento estrutural               | Adequado (1)                          | Adequado (1)                          | Adequado (1)                          | Adequado (1)                          |
|   | Fundações                                | Boas (2)                              | Boas (2)                              | Boas (2)                              | Inaceitável (6)                       |
|   | Órgãos de descarga                       | Elevada confiabilidade (1)            | Não confiáveis (5)                    | Não confiáveis (5)                    | Não confiáveis (5)                    |
|   | Manutenção                               | Boa (2)                               | Medíocre (5)                          | Medíocre (5)                          | Medíocre (5)                          |
| FATORES HUMANOS E ECONÔMICOS (R)                      | Volume do reservatório (m <sup>3</sup> ) | 10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup> (4) |
|   | Instalações a jusante                    | Elevada (5)                           | Média (3)                             | Elevada (5)                           | Média (3)                             |
| <b>Índice global de risco (<math>\alpha_g</math>)</b> |  | 22                                    | 40                                    | 39                                    | 44                                    |
| <b>Classificação de risco</b>                         |  | <b>Classe B</b>                       | <b>Classe A</b>                       | <b>Classe B</b>                       | <b>Classe A</b>                       |

As barragens Calumbi I e Taboca foram classificadas como Classe A por possuírem descritores que atingiram o valor 6, possuindo alto risco ou risco inaceitável e carecendo de intervenção imediata do responsável.

Um dos problemas das barragens do Projeto Rio Formoso corresponde à falta de uma equipe de gestão especializada na conservação da barragem. Em consequência dessa falta de técnicos que realizem serviços de manutenção, correção e inspeção, as barragens apresentam inúmeras anomalias.

O descritor Perigos de escorregamentos de taludes no reservatório ( $\alpha 2$ ), que corresponde à movimentação de massa dos taludes do maciço, provocados pelas ações das ondas na camada de rip-rap e escorregamentos do solo dos taludes. Situação encontrada nos maciços das barragens do Calumbi I e Taboca e agravada pela falta de manutenção ao longo do tempo de utilização. A Figura 4.1 apresenta o talude a montante da barragem Taboca.

Figura 4.1 - Escorregamentos no talude a jusante da barragem Taboca.



A barragem Taboca apresenta sinais de fuga de água jusante localizada onde, segundo o Técnico responsável por dar apoio ao projeto de irrigação, consistia no leito do rio Calumbi. Essa infiltração está a aproximadamente 21 m da cota da crista, localizada na fundação da barragem. Conforme pode se observar na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Surgência a jusante da barragem Taboca.



Constatou-se que as estruturas extravasoras e comportas das barragens não apresentam boas condições.

A barragem do Calumbi I rompeu-se em 1985, e se intensificaram os problemas estruturais reduzindo-se a operacionalização em 60% da capacidade, como margem de segurança (JORNAL TOCANTINS, 2014).

Já as barragens do Projeto Manuel Alves e Calumbi II foram classificadas como classe B. Com o índice global de risco ( $\alpha_g$ ) superior a 20 e índice parcial R maior a três. São barragens que apresentam controle das anomalias, mas que apresentam riscos à jusante.

A barragem do Projeto Manuel Alves se encontra em boas condições devido aos procedimentos de manutenção tomados pela equipe responsável pela gestão da barragem.

A gestão da barragem foi realizada pela SEAGRO (Secretaria Estadual de Agricultura e Abastecimento - TO) em parceria com a CMT Engenharia até o fim do ano de 2016. No entanto, atualmente, somente a SEPLAN faz essa gestão. Pelas condições da barragem e procedimentos adotados visando sua manutenção classifica-se a gestão como boa, pois atende as demandas regulatórias cobradas pela ANA.

A barragem possui os projetos básico, executivo e manuais de utilização. E suas estruturas estão funcionando em boas condições.

A Figura 4.3 apresenta a classificação de risco gerada pelo software ELECTRI TRI versão 2.0a:

Figura 4.3 - Classificação do Índice Global de Risco Modificado com ELECTRE TRI.

| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_TAB</b>     | <b>Alto Risco</b>      | <b>Risco Moderado</b> |
| <b>B_CAL_II</b>  | <b>Alto Risco</b>      | <b>Risco Moderado</b> |
| <b>B_CAL_I</b>   | <b>Alto Risco</b>      | <b>Risco Moderado</b> |
| <b>B_MA</b>      | <b>Risco Moderado</b>  | <b>Baixo Risco</b>    |

Cutting Level: 0.76

A única discordância entre a classificação do Índice Global de Risco Modificado padrão e o ELECTRE TRI ocorreu com a barragem Calumbi II. Considerando a natureza desta barragem e sua semelhança com as barragens Calumbi I e Taboca verifica-se que a classificação gerada pelo ELECTRE TRI mostra-se mais satisfatória.

No entanto, umas funções a serem observadas no ELECTRE TRI é o nível de credibilidade, nomeadamente chamado nível de corte ( $\lambda$ ), que a classificação proporciona. O software ELECTRI TRI versão 2.0a já vem com o nível de 0,76 em sua configuração. Como pode-se observar no canto inferior esquerdo da Figura 4.3.

Quanto mais próximo de 1 for o nível de corte, maior é a credibilidade, no entanto, maiores são as chances de ocorrer divergências e incomparabilidades (R).

Desta forma, como pode se observar na Figura 4.4, a classificação realizada utilizando o nível de corte de 0,76 gerou incomparabilidades (R) para todas as alternativas, necessitando de uma nova classificação com um nível de corte menor permitindo as comparações par a par entre os critérios e os perfis definidos.

Figura 4.4 - Matriz de comparação  $\lambda=0,76$ .

|          | b2 | b1 |
|----------|----|----|
| B_Manuel | >  | R  |
| B_Cal I  | R  | <  |
| B_Cal II | R  | <  |
| B_Taboca | R  | <  |

A eliminação das incomparabilidades (R) só foi possível com o valor de nível de corte de  $\lambda=0,636$ . Conforme pode se observar na Figura 4.5:

Figura 4.5 - Matriz de comparação  $\lambda=0,636$ .

|          | b2 | b1 |
|----------|----|----|
| B_Manuel | >  | I  |
| B_Cal I  | >  | <  |
| B_Cal II | >  | <  |
| B_Taboca | <  | <  |

Com o novo nível de corte definido, gerou-se uma nova comparação par a par entre os critérios com os perfis definidos das barragens. A nova classificação de risco está apresentada na Figura 4.6. Verifica-se que os resultados da classificação são os mesmos para as atribuições pessimista e otimista, isso mostra que a classificação esta coerente.

Figura 4.6 - Classificação de risco Índice Global de Risco Modificado com  $\lambda=0,636$ .

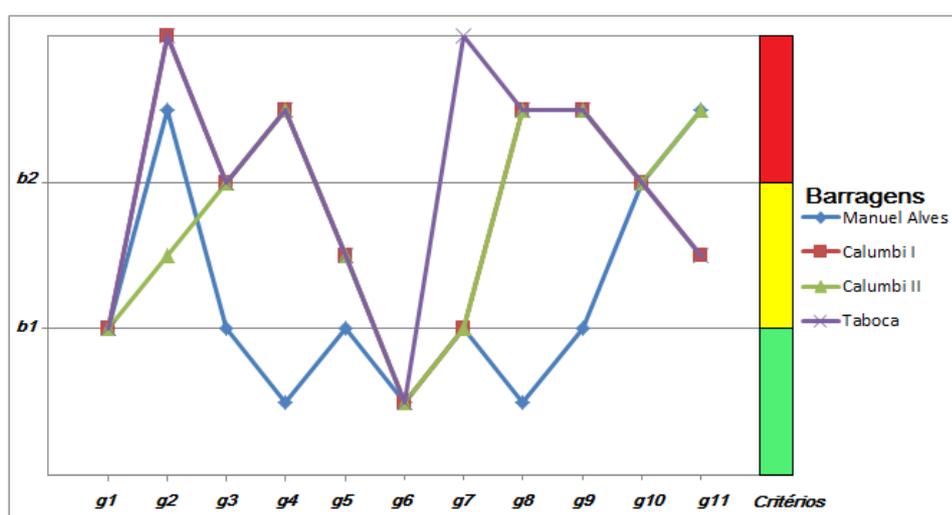
| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B Manuel</b>  | <b>Baixo Risco</b>     | <b>Baixo Risco</b>    |
| <b>B_Cal I</b>   | <b>Risco Moderado</b>  | <b>Risco Moderado</b> |
| <b>B_Cal II</b>  | <b>Risco Moderado</b>  | <b>Risco Moderado</b> |
| <b>B_Taboca</b>  | <b>Alto Risco</b>      | <b>Alto Risco</b>     |

Cutting Level: 0.636

Percebe-se que ocorreu variação nas classificações, onde somente a Barragem Taboca manteve-se em alto risco. As demais barragens rebaixaram um nível na classificação.

A Figura 4.7 proporciona uma melhor compreensão da classificação a partir da visualização das performances de cada uma das barragens em função dos valores das fronteiras  $b_1$  e  $b_2$ . Como pode se observar a barragem do Projeto Manuel Alves apresenta menores valores na maioria dos critérios o que a credencia como baixo risco. Já as barragens do Projeto Formoso apresentam valores mais altos nos critérios credenciado as como alto risco.

Figura 4.7 - Visualização dos desempenhos das barragens.



Com a redução do valor do nível de corte ( $\lambda$ ) diminui-se a ocorrência de incomparabilidades, tornando a classificação menos exigente com as incertezas e aumentando-se as ocorrências de indiferença.

#### 4.1.2 Metodologia de Classificação de risco da USACE

Segundo Fontenelle (2008), o método do USACE determina um valor índice de acordo com a importância da barragem para ser ponderado com outro valor referente à importância do local a ser recuperado, com o intuito de formar um *ranking* de priorização de barragens do proprietário.

O método idealizado por Andersen et al. (1999) não apresenta um índice de classificação. Com base nisto, utilizou-se o Quadro 2.2 - Classificação do Índice de

condição que está apresentado no item 2.4.2 deste estudo, e que foi idealizado também pela USACE, para a realização da classificação de barragens.

A classificação padrão das barragens utilizando o método do USACE está apresentada no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 – Classificação de risco padrão do método do USACE

| Parâmetros  | Barragens                          |                                    |                                    |                                    |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|   | Projeto Manuel Alves               | Calumbi I                          | Calumbi II                         | Taboca                             |
| Altura da Barragem                                | 10 a 30 (3)                        | 10 a 30 (3)                        | 10 a 30 (3)                        | 11 a 30 (3)                        |
| Largura do Coroamento                             | 6 a 15 (3)                         |
| Tipo de Barragem                                  | Terra (10)                         | Terra (10)                         | Terra (10)                         | Terra (10)                         |
| Tipo de Fundação.                                 | Rocha (1)                          | Solo argiloso (4)                  | Solo argiloso (4)                  | Solo argiloso (4)                  |
| Capacidade de armazenamento                       | 50 a 1.000 (4)                     |
| Tipo de Sistema de Filtração                      | Drenos horizontais e Verticais (1) | Sem controle drenagem interna (10) | Sem controle drenagem interna (10) | Sem controle drenagem interna (10) |
| <b>Constantes físicas (A)</b>                     | <b>3,667</b>                       | <b>5,667</b>                       | <b>5,667</b>                       | <b>5,667</b>                       |
| Idade da Barragem                                 | 5 – 15 (7)                         | 10 a 30 (3)                        | 10 a 30 (3)                        | 11 a 30 (3)                        |
| Altura Hidráulica máxima atingida no reservatório | >95% (1)                           | >95% (1)                           | >95% (1)                           | >95% (1)                           |
| Sismicidade                                       | < 4 (1)                            | < 4 (1)                            | < 4 (1)                            | < 4 (1)                            |
| Confiabilidade do vertedouro                      | Satisfatório (1)                   | Satisfatório (1)                   | Satisfatório (1)                   | Satisfatório (1)                   |
| Continuidade do Monitoramento da barragem         | Mudanças diárias (1)               | Presença inconstante (10)          | Presença inconstante (10)          | Presença inconstante (10)          |
| Altura Normal do reservatório                     | >75% (10)                          | <50% (3)                           | <50% (3)                           | <50% (3)                           |
| <b>Parâmetros das variáveis (B)</b>               | <b>3,500</b>                       | <b>3,167</b>                       | <b>3,167</b>                       | <b>3,167</b>                       |
| Danos a propriedades e perdas de vidas (C)        | Importante (5)                     | Significante (3)                   | Importante (5)                     | Significante (3)                   |
| <b>Escore global (S)</b>                          | <b>0,44</b>                        | <b>0,36</b>                        | <b>0,48</b>                        | <b>0,36</b>                        |
| <b>Índice de condição (100-S)</b>                 | <b>Razoável (Zona 2)</b>           | <b>Razoável (Zona 2)</b>           | <b>Marginal (Zona 2)</b>           | <b>Razoável (Zona 2)</b>           |

Este método tem como finalidade principal estabelecer prioridades para avaliação de segurança e atividades de manutenção e medidas de emergência em barragens.

Como as classes de riscos direcionam-se à segurança das áreas a jusante da barragem verifica-se que o escore Danos a propriedades e perdas de vidas (C) tem maior influência no resultado final. Assim, barragens com projetos bem planejados, executados e inspecionados, mas que possuem um número alto de

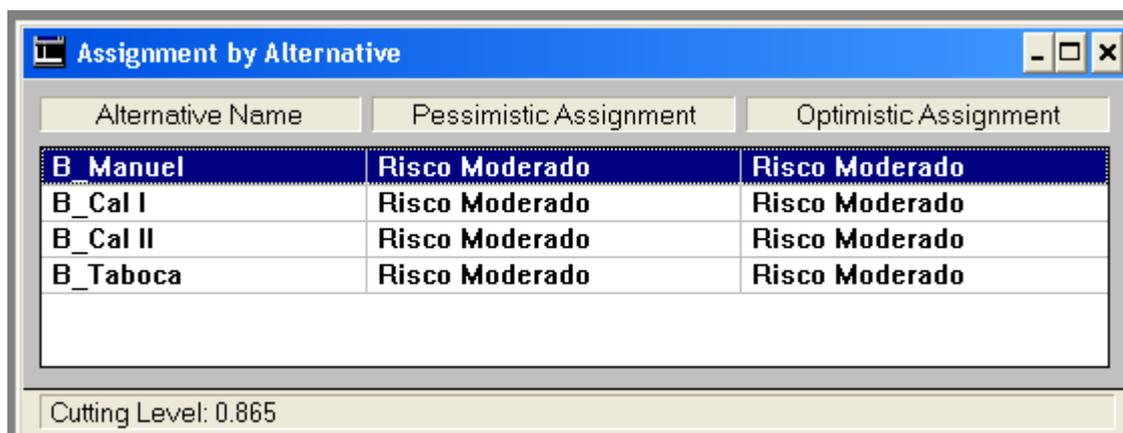
habitantes à jusante receberão escores globais altos, como é caso da barragem do Projeto Manuel Alves.

Quando as barragens não apresentam projetos e possui população a jusante, a tendência é que o Índice de Condição aumente, conseqüentemente se apresentará em uma classe de risco maior. Como é o caso da barragem Calumbi II.

Segundo Fontenelle (2007), uma deficiência da metodologia do USACE cabe ao fato desta não considerar o estado de conservação da barragem, desprezando parâmetros importantes como a percolação, deformação e deterioração. O que explica a classificação razoável das barragens Calumbi I e Taboca que possuem anomalias visíveis.

Na Figura 4.8 verifica-se que a classificação de risco das barragens gerada pelo software ELECTRI TRI versão 2.0a apresenta classificações semelhantes à proposta pelo método.

Figura 4.8 - Classificação de risco do USACE com ELECTRE TRI.



| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_Manuel</b>  | <b>Risco Moderado</b>  | <b>Risco Moderado</b> |
| B_Cal I          | Risco Moderado         | Risco Moderado        |
| B_Cal II         | Risco Moderado         | Risco Moderado        |
| B_Taboca         | Risco Moderado         | Risco Moderado        |

Cutting Level: 0.865

Diferente do método de Índice Global de Risco Modificado, o método do USACE apresentou um nível de corte maior.

#### 4.1.3 Potencial de risco – Metodologia COGERH

O objetivo principal deste modelo é fornecer uma classificação de barragens, essencialmente quanto à segurança estrutural. Sendo indicado para organizações que administram um número alto de barragens. Caso da COGERH que o adotou, em razão de promover a hierarquização destas estruturas para direcionar e alocar recursos necessários à sua manutenção.

A classificação padrão das barragens utilizando o método do USACE está apresentada no Quadro 4.3:

Quadro 4.3 – Classificação de risco padrão do método da COGERH

| Descritores                                      | Barragens   |  |  |  |
|--|---|--|--|--|
|  | Projeto Manuel Alves                                    | Calumbi I  | Calumbi II   | Taboca   |
| <b>Dimensão da barragem</b>                      | Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)                  | Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)                                     | Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)                                     | Altura > 50m e Comprimento > 500m (10)                                     |
| <b>Vol. total do reservatório</b>                | Médio até 200 hm <sup>3</sup> (5)                       | Médio até 200 hm <sup>3</sup> (5)  | Médio até 200 hm <sup>3</sup> (5)  | Médio até 200 hm <sup>3</sup> (5)  |
| <b>Tipo de barragem</b>                          | Terra (10)  | Terra (10)   | Terra (10)   | Terra (10)   |
| <b>Tipo de fundação</b>                          | Rocha alterada Sapolito (4)                             | Solo residual / Aluvião até 4m (5)   | Solo residual / Aluvião até 4m (5)   | Solo residual / Aluvião até 4m (5)   |
| <b>Vazão de projeto</b>                          | Decamilenar (1)   | Inferior a 500 anos ou desconhecida (10)                                   | Inferior a 500 anos ou desconhecida (10)                                   | Inferior a 500 anos ou desconhecida (10)                                   |
| <b>ΣPericulosidade</b>                           | 30  | 40   | 40   | 40   |
| <b>Tempo de operação</b>                         | de 10 a 30 anos (1)                                     | > 30 anos (0)  | > 30 anos (0)  | > 30 anos (0)  |
| <b>Existência de projeto (as built)</b>          | Existem as built Projetos e Avaliação do Desempenho (1) | Só projeto básico (5)  | Só projeto básico (5)  | Só projeto básico (5)  |
| <b>Confiabilidade das estruturas vertedouras</b> | Muito satisfatória (2)                                  | Não satisfatória (10)  | Não satisfatória (10)  | Não satisfatória (10)  |
| <b>Tomada de água</b>                            | Satisfatória Controle a montante (1)                    | Deficiente (5)   | Deficiente (5)   | Deficiente (5)   |
| <b>Percolação</b>                                | Totalmente controlada pelo sistema de drenagem (1)      | Sinais de umedecimento nas áreas jus., taludes ou ombreiras (4)            | Sinais de umedecimento nas áreas jus., taludes ou ombreiras (4)            | Surgência de água em taludes, ombreiras e área de jusante (10)             |
| <b>Deformação/afundamentos assentamentos</b>     | Inexistente (0)   | Ondulações pronunciadas, fissuras (6)                                      | Ondulações pronunciadas, fissuras (6)                                      | Ondulações pronunciadas, fissuras (6)                                      |
| <b>Deterioração dos taludes/paramentos</b>       | Inexistente (1)   | Depressão no riprap, escorreg., sulcos profundos de erosão, vegetação (10) | Depressão no riprap, escorreg., sulcos profundos de erosão, vegetação (10) | Depressão no riprap, escorreg., sulcos profundos de erosão, vegetação (10) |
| <b>ΣVulnerabilidade</b>                          | 7   | 40   | 40   | 46   |
| <b>Vol. útil</b>                                 | baixo <200 (1)  | baixo <200 (1)   | baixo <200 (1)   | baixo <200 (1)   |
| <b>População a jusante</b>                       | pequena (1,0)   | pequena (1,0)  | pequena (1,0)  | pequena (1,0)  |
| <b>Custo da barragem</b>                         | elevado (1,5)   | médio (1,2)  | médio (1,2)  | elevado (1,5)  |
| <b>Σ Importância</b>                             | 3,5   | 3,2  | 3,2  | 3,5  |
| Potencial de Risco (PR)                          | 21,58   | 42,67  | 42,67  | 50,17  |
| <b>Classificação de risco</b>                    | <b>Normal</b>   | <b>Médio</b>   | <b>Médio</b>   | <b>Médio</b>   |

O método prevê que descritores de Vulnerabilidade que apresentarem pontuações iguais a 10, necessitam de intervenção na barragem. Situação encontrada nas barragens do projeto Rio Formoso que estão com os taludes deteriorados em decorrência do grande número de árvores que cresceram e de falhas na camada de rip-rap, especialmente, na barragem Taboca, que também apresentou surgência a jusante do maciço.

A barragem do Projeto Manuel Alves apresenta Potencial de Risco normal, resultado das ações de manutenção da equipe gestora e pela execução correta do projeto.

Comparando as classificações geradas pelo método padrão mostrada no Quadro 4.3 e a classificação utilizando o ELECTRE TRI apresentada na Figura 4.9, verificou-se que apenas a barragem do Projeto Rio Manuel Alves apresentou diferentes classes de risco, devido ao descritor **Importância** apresentar maior peso e significância, apresentando maior influência nos métodos.

Figura 4.9 - Classificação de risco da COGERH com ELECTRE TRI.

| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_Manuel</b>  | <b>Médio</b>           | <b>Médio</b>          |
| B_Cal I          | Médio                  | Médio                 |
| B_Cal II         | Médio                  | Médio                 |
| B_Taboca         | Médio                  | Médio                 |

Cutting Level: 0.628

#### 4.1.4 Resolução CNRH n° 143

A Resolução n° 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos apresenta os critérios avaliados na matriz de classificação de barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos.

Quadro 4.4 – Classificação de risco padrão do método da Resolução CNRH n° 143

| Critérios                        |   | Barragens  |   |   |   |
|----------------------------------|---|--|---|---|---|
|                                  |   | Projeto Manuel Alves                                 | Calumbi I   | Calumbi II  | Taboca  |
| CARACTERÍSTICAS<br>TÉCNICAS - CT | Altura (a)  | 30m ≤ H ≤ 60m (2)                                    | H ≤ 15m (0)   | H ≤ 15m (0)   | H ≤ 15m (0)   |
|                                  | Comprimento (b)                                       | L > 200m (3)   | L > 200m (3)  | L > 200m (3)  | L > 200m (3)  |
|                                  | Tipo de barragem quanto ao material de construção (c) | Terra homogênea /enrocamento / terra enrocamento (3) | Terra homogênea /enrocamento / terra enrocamento (3)      | Terra homogênea /enrocamento / terra enrocamento (3)      | Terra homogênea /enrocamento / terra enrocamento (3)      |
|                                  | Tipo de Fundação (d)                                  | Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto (4)  | Solo residual / aluvião (5)                               | Solo residual / aluvião (5)                               | Solo residual / aluvião (5)                               |
|                                  | Idade da Barragem (e)                                 | Entre 10 e 30 anos (2)                               | Entre 30 e 50 anos (1)                                    | Entre 30 e 50 anos (1)                                    | Entre 30 e 50 anos (1)                                    |
|                                  | Vazão de Projeto (f)                                  | CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)       | TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10) | TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10) | TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10) |
| Σ CT                             |   | 19   | 22  | 22  | 22  |

| Critérios                |  | Barragens   |   |   |   |
|--------------------------|--|---|---|---|---|
|                          |  | Projeto Manuel Alves  | Calumbi I   | Calumbi II  | Taboca  |
| ESTADO DE<br>CONSERVAÇÃO | Confiabilidade das estruturas extravasoras (g) | Estruturas civis em pleno funcionamento (0)                               | Estruturas civis comprometidas com problemas identificados (10)   | Estruturas civis comprometidas com problemas identificados (10)   | Estruturas civis comprometidas com problemas identificados (10)   |
|                          | Confiabilidade das estruturas de adução (h)    | Estruturas civis e dispositivos hidroelétricos em condições adequadas (0) | Estruturas civis comprometidas com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)       | Estruturas civis comprometidas com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)       | Estruturas civis comprometidas com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)       |
|                          | Percolação (i)                                 | Percolação totalmente controlada (0)                                      | Umidade ou surgência nas áreas de jusante (3)   | Umidade ou surgência nas áreas de jusante (3)   | Surgência nas áreas de jusante, (8)   |
|                          | Deformações e recalques (j)                    | Inexistente (0)   | Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável (5)   | Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)  | Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável (5)   |
|                          | Deterioração dos taludes / paramentos (k)      | Inexistente (0)   | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7) | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7) | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7) |
|                          | Eclusa (l)                                     | Não possui eclusa (0)   | Não possui eclusa (0)   | Não possui eclusa (0)   | Não possui eclusa (0)   |
| Σ EC                     |  | 0   | 31  | 27  | 36  |

| Critérios                           |  | Barragens   |  |  |  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|--|
|                                     |  | Projeto Manuel Alves  | Calumbi I  | Calumbi II   | Taboca   |
| PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS | <i>Existência de documentação de projeto (m)</i>                               | Projeto executivo e "como construído" (0)                     | Inexiste documentação de projeto (8)                                     | Inexiste documentação de projeto (8)                                     | Inexiste documentação de projeto (8)                                     |
|                                     | <i>Estrutura organizacional (n)</i>  | Possui estrutura organizacional (0)                           | Não possui estrutura organizacional (8)                                  | Não possui estrutura organizacional (8)                                  | Não possui estrutura organizacional (8)                                  |
|                                     | <i>Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e monitoramento (o)</i> | Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0) | Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6) | Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6) | Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6) |
|                                     | <i>Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (p)</i>          | Sim ou vertedouro tipo soleira livre (0)                      | Não (6)  | Não (6)  | Não (6)  |
|                                     | <i>Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (q)</i>     | Emite regularmente os relatórios (0)                          | Não emite os relatórios (5)  | Não emite os relatórios (5)  | Não emite os relatórios (5)  |
| $\Sigma$ EC                         |  | 0   | 33   | 33   | 33   |
| <b>Matriz categoria de risco</b>    |  | <b>17</b>   | <b>86</b>  | <b>82</b>  | <b>91</b>  |
| <b>Classificação de Risco</b>       |  | <b>Baixo</b>  | <b>Alto</b>  | <b>Alto</b>  | <b>Alto</b>  |

Quadro 4.5 – Classificação de Dano Potencial Associado do método da Resolução CNRH n° 143

| Critérios                      |  | Barragens                              |  |  |  |
|--------------------------------|--|--|--|--|--|
|                                |  | Projeto Manuel Alves                   | Calumbi I                              | Calumbi II                             | Taboca                                 |
| DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA | <b>Volume total (r)</b>                        | Grande 75 milhões a 200 milhões m3 (3) | Grande 75 milhões a 200 milhões m3 (3) | Grande 75 milhões a 200 milhões m3 (3) | Grande 75 milhões a 200 milhões m3 (3) |
|                                | <b>Potencial de perda de vidas humanas (s)</b> | EXISTENTE (12)                         | FREQUENTE (8)                          | EXISTENTE (12)                         | FREQUENTE (8)                          |
|                                | <b>Impacto ambiental (t)</b>                   | SIGNIFICATIVO (3)                      | SIGNIFICATIVO (3)                      | SIGNIFICATIVO (3)                      | SIGNIFICATIVO (3)                      |
|                                | <b>Impacto sócio econômico (u)</b>             | ALTO (8)                               | ALTO (8)                               | ALTO (8)                               | ALTO (8)                               |
| $\Sigma$ DPA                   |  | 26                                     | 22                                     | 26                                     | 22                                     |
| <b>Classificação de Dano</b>   |  | <b>A</b>                               | <b>A</b>                               | <b>A</b>                               | <b>A</b>                               |

Com base no Quadro 2.6 que apresenta a Matriz de categoria de risco e dano potencial associado, as classificações para todas as barragens foram para classe A.

Verificou-se que apesar da barragem do projeto Manuel Alves ter apresentado classificação de risco baixo, ela apresentou DPA alto, o que proporciona seu enquadramento, dentro da matriz, na classe A, resultando em ações maior precaução.

Na Figura 4.10 verifica-se que a classificação de risco das barragens gerada pelo software ELECTRI TRI versão 2.0a apresenta discordância para a Barragem Manuel Alves.

Figura 4.10 - Classificação de risco da Resolução CNRH n° 143 com ELECTRE TRI.

| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_Manuel</b>  | <b>Baixo Risco</b>     | <b>Baixo Risco</b>    |
| <b>B_Cal I</b>   | <b>Alto Risco</b>      | <b>Alto Risco</b>     |
| <b>B_Cal II</b>  | <b>Alto Risco</b>      | <b>Alto Risco</b>     |
| <b>B_Taboca</b>  | <b>Alto Risco</b>      | <b>Alto Risco</b>     |

Cutting Level: 0.719

Diferente da Matriz de classificação, os resultados utilizando o ELECTRE TRI refletem apenas a classificação de risco. O que leva a entender que o método necessita de adequações.

Desta forma, dividindo os parâmetros de classificação de risco ( $g_1, g_2, \dots, g_{17}$ ) e DPA ( $g_{18}, g_{19}, g_{20}$  e  $g_{21}$ ) da Resolução CNRH n° 143 em dois modelos separados para o ELECTRE TRI, verificou-se que os resultados obtidos são semelhantes à classificação padrão. Conforme pode-se observar nas Figuras 4.11 e 4.12:

Figura 4.11 - Classificação de risco apenas com parâmetros da Classificação de risco com o ELECTRE TRI.

| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_Manuel</b>  | <b>Baixo Risco</b>     | <b>Baixo Risco</b>    |
| B_Cal I          | Alto Risco             | Alto Risco            |
| B_Cal II         | Alto Risco             | Alto Risco            |
| B_Taboca         | Alto Risco             | Alto Risco            |

Cutting Level: 0.753

Figura 4.12 - Classificação de risco apenas com parâmetros do DPA com o ELECTRE TRI.

| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_Manuel</b>  | <b>Alto Risco</b>      | <b>Alto Risco</b>     |
| B_Cal I          | Alto Risco             | Alto Risco            |
| B_Cal II         | Alto Risco             | Alto Risco            |
| B_Taboca         | Alto Risco             | Alto Risco            |

Cutting Level: 0.831

Utilizando as classificações obtidas nas Figuras 4.11 e 4.12 na Matriz de categoria de risco e DPA apresentada no Quadro 2.6, obtêm-se as classificações para todas as barragens, também na Classe A, tal qual como a classificação padrão do método da Resolução CNRH n° 143.

Os níveis de corte também subiram, dando maior confiabilidade para a classificação.

#### 4.1.5 Modelo proposto pelo estudo

O modelo proposto pelo estudo busca mesclar os parâmetros mais relevantes para a classificação de risco com base no conhecimento técnico do decisor. Esses parâmetros estão apresentados no Quadro 4.6:

Quadro 4.6 – Parâmetros de Classificação pelo modelo proposto pelo estudo

| Critérios   | Barragem   |  |  |  |
|---|--|--|--|--|
|   | Projeto Manuel Alves   | Calumbi I  | Calumbi II   | Taboca   |
| <b>Ações da natureza</b>                          | Fracas (20)  | Fracas (20)  | Fracas (20)  | Fracas (20)  |
| <b>Dimensão do barramento</b>                     | 15m < H ≤ 30m e 200m < L ≤ 1500m (80)  | H ≤ 15m e L > 1500m (50)   | H ≤ 15m e L > 1500m (50)   | 15m < H ≤ 30m e L > 1500m (90)   |
| <b>Tipo de barragem</b>                           | Terra Homogênea (70)   | Terra Homogênea sem sistema de filtração ou vertedouro de soleira livre (100)  | Terra Homogênea sem sistema de filtração ou vertedouro de soleira livre (100)  | Terra Homogênea sem sistema de filtração ou vertedouro de soleira livre (100)  |
| <b>Tipo de fundação</b>                           | Rocha alterada saprolito (30)  | Desconhecido (80)  | Desconhecido (80)  | Desconhecido (80)  |
| <b>Idade da barragem</b>                          | 5 < idade ≤ 15 (60)  | 30 < idade ≤ 50 (20)   | 31 < idade ≤ 50 (20)   | 32 < idade ≤ 50 (20)   |
| <b>Vazão de Projeto</b>                           | Decamilar (10)   | Desconhecida (100)   | Desconhecida (100)   | Desconhecida (100)   |
| <b>Volume total do reservatório</b>               | Muito grande (> 200 milhões m <sup>3</sup> ) (100)   | Grande (75 milhões a 200 milhões m <sup>3</sup> ) (60)   | Grande (75 milhões a 200 milhões m <sup>3</sup> ) (60)   | Grande (75 milhões a 200 milhões m <sup>3</sup> ) (60)   |
| <b>Confiabilidade das Estruturas Extravasoras</b> | Estruturas civis em pleno funcionamento (0)  | Estruturas civis comprometidas e sem medidas corretivas (100)  | Estruturas civis comprometidas parcialmente obstruídos (70)  | Estruturas civis comprometidas e sem medidas corretivas (100)  |
| <b>Confiabilidade das Estruturas de Adução</b>    | Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas (0)                            | Estruturas civis comprometidas com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas (60)                                       | Estruturas civis comprometidas com ações corretivas em implantação (40)  | Estruturas civis comprometidas com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas (60)                                       |
| <b>Percolação</b>                                 | Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)  | Umidade ou surgência nas áreas de jusante (30)   | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos (30)   | Surgência nas áreas de jusante (100)   |
| <b>Deformações e Recalques</b>                    | Inexistente (0)  | Abatimentos de impacto (60)  | Abatimentos de impacto (60)  | A abatimentos ou escorregamentos expressivos (100)   |
| <b>Deterioração dos Taludes / Paramentos</b>      | Inexistente (0)  | Erosões superficiais gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (60)  | Erosões superficiais gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (60)  | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, comprometimento a segurança (100)  |
| <b>Projetos</b>                                   | Projeto executivo (0)  | Não há documentação de projeto (100)   | Não há documentação de projeto (100)   | Não há documentação de projeto (100)   |
| <b>Gestão do reservatório</b>                     | Possui estrutura organizacional que realiza a instrumentação, inspeção e relatórios com periodicidade (10) | Não possui estrutura organizacional ou responsável técnico pela segurança da barragem e não realiza a instrumentação da barragem (100) | Não possui estrutura organizacional ou responsável técnico pela segurança da barragem e não realiza a instrumentação da barragem (100) | Não possui estrutura organizacional ou responsável técnico pela segurança da barragem e não realiza a instrumentação da barragem (100) |
| <b>Impactos a jusante</b>                         | ALTO (70)  | ALTO (70)  | ALTO (70)  | ALTO (70)  |

A classificação das barragens obtida com os dados do Quadro 4.6 inseridos no ELECTRE TRI está apresentada na Figura 4.13:

Figura 4.13 - Classificação de risco do método proposto com ELECTRE TRI.

| Alternative Name | Pessimistic Assignment | Optimistic Assignment |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>B_Manuel</b>  | <b>Risco Baixo</b>     | <b>Risco Baixo</b>    |
| <b>B_Tab</b>     | <b>Risco Extremo</b>   | <b>Risco Extremo</b>  |
| <b>B_Cal II</b>  | <b>Risco Alto</b>      | <b>Risco Alto</b>     |
| <b>B_Cal I</b>   | <b>Risco Alto</b>      | <b>Risco Alto</b>     |

Cutting Level: 0.556

O nível de corte da classificação apresentou-se baixo (ou seja, mais próximo de 0,5) devido à barragem do projeto Manuel Alves não apresentar comparabilidades par a par em valores maiores. Excluiu-se esta alternativa do modelo, permanecendo somente as barragens Calumbi I, Calumbi II e Taboca, e verificou-se que o nível de corte subiu para  $\lambda = 0,791$ .

Conforme classificação obtida pelo método proposto pelo estudo, verifica-se que a barragem Taboca do Projeto Rio Formoso necessita de intervenção urgente, devido o resultado apresentar nível de risco extremo.

Essa situação é resultado da falta de ações que visassem à manutenção da barragem ao longo do tempo de utilização. Que se trata de barragens com grandes extensões dos barramentos, gerando grandes custos de manutenção.

A barragem Taboca reflete uma condição encontrada em inúmeras barragens brasileiras, resultado da falta de gerenciamento por interesse dos empreendedores e gestores. Essa situação pode se agravar em barragens de acumulação de resíduos industriais ou minerais, que servem, em sua grande maioria, apenas para depósito, e não geram “lucro”, motivo pelo qual, não são conservadas com vista para a garantir a segurança da estrutura.

Outra questão que contribuiu com esse cenário está relacionada à recente legislação em segurança de barragens, com a instituição da Lei nº 12.334 em 2010. Anteriormente, as ações em segurança eram estabelecidas pelas próprias empresas

ou entidades que possuíam um grande número de barragens em seu poder, caso da SABESP, COGERH e CEMIG.

Ainda assim, com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e com a criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), estabelecidos pela Lei nº 12.334, apenas 4% das barragens brasileiras foram fiscalizadas até o ano de 2015. O que mostra que o sistema necessita de maior abrangência para atingir um número maior dessas construções.

O Quadro 4.7 apresenta todas as classificações das barragens realizadas com os métodos estudados:

Quadro 4.7 – Classificações de risco das barragens para os métodos analisados

| Método                            | Forma de classificação | Barragem     |           |            |          |
|-----------------------------------|------------------------|--------------|-----------|------------|----------|
|                                   |                        | Manuel Alves | Calumbi I | Calumbi II | Taboca   |
| Índice Global de Risco Modificado | Padrão                 | Classe B     | Classe A  | Classe B   | Classe A |
|                                   | ELETRE TRI             | Baixo        | Moderado  | Moderado   | Alto     |
| USACE                             | Padrão                 | Zona 2       | Zona 2    | Zona 2     | Zona 2   |
|                                   | ELETRE TRI             | Moderado     | Moderado  | Moderado   | Moderado |
| COGERH                            | Padrão                 | Normal       | Médio     | Médio      | Médio    |
|                                   | ELETRE TRI             | Moderado     | Moderado  | Moderado   | Moderado |
| Resolução CNRH nº 143             | Padrão                 | Alto         | Alto      | Alto       | Alto     |
|                                   | ELETRE TRI             | Baixo        | Alto      | Alto       | Alto     |
| Método Proposto no Estudo         | ELETRE TRI             | Baixo        | Alto      | Alto       | Extremo  |

Analisando o comparativo entre as diferentes classificações realizadas com os diferentes métodos, constatou-se que apesar de ocorrer divergências nas classificações, o ELECTRE TRI é aplicável para a realização de classificações de risco em barragens, se posicionado como uma importante ferramenta para ações de gerenciamento de riscos.

Tendo em vista que, comparado ao método da Resolução CNRH nº 143, utilizada atualmente para a realização de classificações pelos órgãos de fiscalização no Brasil, ocorreram duas divergências nas classificações devido aos parâmetros do

grupo Estado de Conservação apresentar maiores pesos. Desta forma, justifica-se a barragem Taboca apresentar risco extremo, tendo em vista que recebeu notas altas nesses critérios, situação inversa da barragem do Projeto Rio Manuel Alves que devido apresentar bom estado de conservação apresentou baixo risco.

O método ELECTRE TRI possibilita que as classificações de riscos sejam construídas com base em julgamentos de decisores ou de um único decisor que possua experiência e conhecimento técnico, situação adotada neste estudo.

No entanto, essa dependência de análises subjetivas de especialistas pode ser mal conduzida apresentando distorções quando o decisor não apresentar domínio e conhecimento apropriado sobre um determinado tema que se deseja classificar.

Desta forma, a quantidade de informações requeridas para a classificação pode ser muito grande, visando suprir possíveis dúvidas que se surgem e corrigir interpretações equivocadas e imprecisas.

O método ELECTRE TRI também permite a manipulação dos dados inseridos a partir de ajustes, o que pode possibilitar ao decisor a condução da classificação para um resultado desejável ou próximo ao ensejado. Essa flexibilidade se apresenta na definição dos pesos dos critérios podem ser alterados, e conseqüentemente, incidirem no produto final.

## 5. CONCLUSÃO

A legislação instituída no Brasil, por meio da Lei Federal Nº 12.334/2010, apesar de ser estruturada em estudos técnicos abrangentes e alicerçada em métodos conceituados, já é alvo imposição por mudanças que venham oferecer maior segurança às populações e biomas que vivem a jusante.

Neste contexto, o estudo apresentado nesta dissertação utiliza um método de Auxílio Multicritério à Decisão com o propósito de apresentar um modelo de classificação de risco em barragens paralelo aos já existentes, visando contribuir com os processos de gerenciamento de riscos.

É importante ressaltar que o método de classificação de risco em barragens faz parte de um processo mais amplo de gerenciamento dessas obras. Ele integra a primeira fase do processo, correspondente a avaliação de riscos.

Com a avaliação torna-se possível realizar a apreciação de risco que é atividade que busca definir a tolerância risco aceitável de uma barragem. Com essas informações torna-se possível tomar decisões que visem melhorias e soluções visando à segurança das áreas a jusante.

Devido a grande complexidade dessas construções, o processo de gestão é indispensável para garantir que as incertezas sejam adequadamente estimadas. Desta forma, ferramentas para a prevenção de acidentes que auxiliem essas ações podem ser apropriadas para a evolução das políticas ligadas ao setor de barragens.

O emprego do método de Auxílio Multicritério à Decisão e o método de classificação ELECTRE TRI mostrou-se eficaz para alcançar resultados positivos na classificação de risco em barragens.

Uma das maiores dificuldades do método corresponde à interação entre o facilitador com o decisor para elencar os critérios de preferências. Ainda que esses critérios possam ser interpretados, é complicado apontar diretamente valores que representem um claro entendimento global que esses valores têm para o resultado do modelo.

A quantidade de critérios também pode interferir na qualidade da classificação. Quanto maior o número de critérios avaliados, maior será a probabilidade de obter um nível de corte mais baixo, ou seja, mais distante de 1, gerando menor credibilidade na classificação.

Uma vantagem apresentada pelo ELECTRE TRI é possibilidade de flexibilidade a partir da escolha dos critérios para montagem da metodologia de classificação de risco das barragens, que podem variar de acordo com as características locais de uma região, destinação de uso do reservatório ou para adequar aos valores peculiares de empresas que gerenciam essas estruturas.

Com isso, conclui-se que o ELECTRE TRI atingiu seu objetivo geral, gerando com sucesso, classificação de risco em barragens.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. Relatório de Segurança de Barragens (RSB) 2015. Brasília: ANA, 2012. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Seguranca/RelatorioSegurancaBarragens\\_2015.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Seguranca/RelatorioSegurancaBarragens_2015.pdf)>. Acesso em: 8 de setembro 2016.

ANA - Agência Nacional de Águas. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, 2. Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem / Agência Nacional das Águas. Brasília: ANA, 2016.

ANA - Agência Nacional de Águas. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, 3. Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem. Brasília: ANA, 2016.

ABNT NBR ISO 31000 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Gestão de Riscos - Princípios e Diretrizes, 2009.

ABNT NBR 15421 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

AGUIAR, D. P. O. Contribuição ao estudo do Índice de Segurança de Barragens – ISB. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP. 2014.

ALVES, K. C. C. L. F.; VIOLA, M. R.; SOUZA, P. A.; GIONGO, M.; MELLO, C. R. Avaliação temporal dos conflitos de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Formoso, Tocantins. Pesquisa Florestal Brasileira. Brazilian Journal of Forestry Research. Colombo, v. 35, n. 83, p. 271-283, jul./set. 2015.

ALVES, H. R. O Rompimento de Barragens no Brasil e no Mundo: Desastres Mistos ou Tecnológicos?. DOM TOTAL, 18 dez. 2015.

ALMEIDA, A. B. A Gestão do Risco em Sistemas Hídricos: Conceitos e Metodologias Aplicadas a Vales com Barragens. In: IV Actas do Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 06., 2003, Cabo Verde. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) – Anais eletrônicos, 2003.

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.

ANDRIOLO, F. R. – Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto. São Paulo: Editora Loyola, 1993. Capítulo 14, p. 437-465.

ARAÚJO, C. C.; Filgueira, H. J. A.; Silva, T. C. O Risco e a Segurança de Barragens: o Caso das Barragens dos Reservatórios para Abastecimento de Água para a Grande de João Pessoa, PB. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília, DF. ISSN 2318-0358. Novembro, 2015.

ARAÚJO, P. F. de Avaliação de Riscos em Edificações com Redes de Distribuição Interna de Gases Combustíveis Utilizando o ELECTRE TRI. . Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área de Produção, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2015.

BAIMA, S. K. O. Uma Metodologia Multicritério Construtivista Para a Avaliação da Vulnerabilidade de Barragens e Regiões a Jusante. Tese. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Fortaleza – CE. 2015.

BALBI, D. A. F. Metodologias Para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens: Estudo de Caso: Barragem de Peti - MG. Dissertação. Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BANA e COSTA, C. A. Structuration, Construction et Exploitation d'un Modèle Multicritèred'Aide à la Décision. Tese de Doutorado em Engenharia de Sistemas. Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, 1992.

BARAN, L. R. Proposta de um Modelo Multicritério Para Determinação da Criticidade na Gestão da Manutenção Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Mestrado em Engenharia de Produção. Ponta Grossa, PR. 2015.

BELTON, V.; STEWART, T. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers, Boston. 2002.

BRASIL. Lei nº 12.334/2010, de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF. 2010.

BRASIL. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Informativo sobre a Estiagem no Nordeste - nº 76. 30/01/2015. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/Informativo%20estiagem%20%20NE%20n%2076.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/Informativo%20estiagem%20%20NE%20n%2076.pdf)> Acesso em: 08 de setembro de 2016.

BRASIL. Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012 – MMA/CNRH – Ministério do Meio Ambiente / Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF. 16p. 2012.

BRASIL. Senado Federal. Comissão Temporária da Política Nacional de Segurança de Barragens (CTPNSB): Relatório Final. Brasília, DF. 2016.

BUENO, B. S. & VILAR, O. M. Mecânica dos solos. São Carlos, Universidade de São Paulo, 1984. 131p.

CARVALHO, B. E. F. C. Avaliação de Desempenho da Prestação de Serviços de Abastecimento de Água independente da perspectiva, se Usuário ou Prestador? Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF. 2013.

CIGB - COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. As barragens e a Água do Mundo: um Livro Educativo que Explica como as Barragens Ajudam a Administrar a Água do Mundo. Paris, França: VFC. CIGB/ ICOLD, 2008.

CMB - COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS. Estudo de Caso da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil): relatório final – anexos. Comissão Mundial de Barragens. Rio de Janeiro: LIMA/COPPE/UFRJ, 2000.

CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens. Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. 1º Relatório de Progresso. Lisboa, Portugal, 13 p. 2005.

COLLE, G. A. Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens Segundo a Segurança. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Curitiba, PR. 2008.

COSTA, H. G.; MANSUR, A. F. U.; FREITAS, A. L. P.; CARVALHO, R. A. ELECTRE TRI Aplicado a Avaliação da Satisfação de Consumidores. Revista Produção, v. 17, n. 2, p. 230-245, Maio/Ago. 2007.

DO NASCIMENTO, Luiz Fernando. Modelo Multicritério de Apoio à Decisão para Classificação de Risco em Operações com Aeronaves Embarcadas. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área de Produção, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2012.

DUARTE, M. D. O. Modelos de Decisão Multicritério e de Portfólio com Aplicação na Construção de Políticas Energéticas Sustentáveis. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2011.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Inventário Estadual de Barragens do ano de 2015. Belo Horizonte: Feam, 2015. 27 p.

FEMA - Federal Emergency Management Agency. “Model State Dam Safety Program”, FEMA 316, Washington, DC. 2007.

FEMA - Federal Emergency Management Agency. “Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management”, FEMA P-1025, Washington, DC. 2015.

FERC - Federal Energy Regulatory Commission. Risk-Informed Decision Making Guidelines. Chapter 3. Risk Assessment Version 4.1. Washington, DC. 2016.

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.

FUSARO, T. C. Metodologia de Classificação de Barragens Baseada no Risco. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens (SNGB), CBDB, Salvador, BA. 2003.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério. Atlas, São Paulo, Brasil. 2012.

HRADILEK, P. J. Avaliação de Pequenas Barragens. 2 ed. Brasília: Bureau of Reclamation. 2002. 74p. (Manual de Irrigação, v.6).

HSE (2001). Health and Safety Executive, "Reducing Risks, Protecting People," Her Majesty's Stationery Office, London, UK, 2001.

ICOLD. Dam failures statistical analysis. International Commission on Large Dams (ICOLD). Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99, Paris: Commission Internationale des Grands Barrages.

WORLD ENERGY COUNCIL. Hydropower. World Energy Resources. 2016.

JANNUZZI, P.M.; MIRANDA, W. L. ; SILVA, D. S. G. Análise Multicritério e Tomada de Decisão em Políticas Públicas: Aspectos Metodológicos, Aplicativo Operacional e Aplicações." *Informática Pública*, P. 69 – 87. 2009.

JANSEN, R. B. Dam and Public Safety. USA: Water Resources Technical Publication. Denver: U. S. Department of the Interior, 1980, 332 p.

JORNAL TOCANTINS. Problemas limitam produção. 2014. Disponível em: <http://www.jornaldotocantins.com.br/editorias/noticias/economia/problemas-limitam-produ%C3%A7%C3%A3o-1.481049>. Acesso em: Abril de 2017.

KOCHEN, R. Barragens de Rejeitos e a Tragédia em Mariana (MG). *Revista Fundações & Obras Geotécnicas*. Ano 6 nº 65. Fevereiro, 2016.

KREUZER, H. The Use of Risk Analysis to Support Dam Safety Decisions and Management. Question 76. 20th ICOLD Congress, Beijing. 2000.

LAURINDO, V. S.; COSTA, H. G.; GUTIÉRREZ, R. H. ABC/ELECTRE TRI: Integração do ELECTRE TRI à Classificação ABC de Itens em Estoque. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável. Gramado, RS. 2005.

LIMA, M. T. A.; OLIVEIRA, E. C. B.; ALENCAR, L. H. Modelo de Apoio à Decisão para Priorização de Projetos em uma Empresa de Saneamento. *Revista Production*, v. 24, n. 2, p. 351-363. 2014.

LIMA, T.; VIANNA, D.; MARTINS, C.; COSTA, S.; MEZA, E. Utilizando o AHP para definição dos pesos de restrições fracas na resolução de problemas de programa. XI CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO. 2015.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. *Sinapse Múltipla*, 5 (1), jun 1-14, 2016.

MASCARENHAS, F. C. B. Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens. Tese de doutorado em engenharia civil. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 291 p, 1990.

MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2003. Editora Rima, São Carlos - SP, 2004.

MELO, A. V. Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: Estudo de caso de barragens da Cemig GT". 166 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – UFMG, Belo Horizonte, MG. 2014.

MELO, A. V.; FUSARO, T. C. Avaliação de Métodos de Análise de Riscos Aplicados a Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu, PR. 2015.

MELLO, F. M. A História das Barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta Anos do Comitê Brasileiro de Barragens [editor, Corrado Piasentin]. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E.G.; LETA, F.R. e PESSOLANI, R. B. V. Conceitos Básicos do Apoio Multicritério à Decisão e Sua Aplicação no Projeto Aerodesign. Engevista, v. 5, n. 8, p. 22-35, 2003.

MENDES, J. M. Sociologia do risco: uma breve introdução e algumas lições. Coimbra: [s.n.]. 110 p. ISBN 978-989-26-1065-8. 2015.

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 Semiárido. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – Ce. 2001.

MENESCAL, R. A. Gestão da segurança de barragens no Brasil - Proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2009.

MORAES, G. Sistema de Gestão de Riscos: Estudo de Análise de Riscos. Rio de Janeiro: Gerenciamento Verde Editora e Livraria Virtual, 2013. Volume 2.

NEVES, E. M.; CALDEIRA, L.; PINHEIRO, A. N. Projeto, Construção e Observação de Pequenas Barragens de Aterro. IST - Instituto Superior Técnico. Portugal. 2015.

OLIVEIRA, M. L. Desenvolvimento de Método Para Avaliação de Desempenho de Sistemas de Abastecimento de Água: Aplicação ao Caso da Ride-DF e Entorno. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Brasília – DF. 2015.

OLIVEIRA, H. V. B.; VAZ, L. F.; CARNEIRO, C. D. R. Avaliação de Risco Geológico em Barragens. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Volume 3 - Número 1. ISSN 2237-4590. Julho, 2014.

PACHECO, G. C. Avaliação dos Riscos à Segurança em Estádios de Futebol Profissional Por Meio da Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão – Construtivista. Universidade Federal de Santa Catarina. DISSERTAÇÃO (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis, 2013.

PEYRAS, L.; GERVAIS, R.; SERRE, D.; CHOUINARD, L.; DIAB, Y.; TOURMENT, R. (2011). Condition evaluation of water retaining structures by a functional approach.

Comparative practices in Canada and France. *European Journal of Civil and Environmental Engineering*, 15, 335-356.

PERINI, D. S. Estudo dos Processos Envolvidos na Análise de Riscos de Barragens de Terra. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF. 2009.

PoEMAS. Antes Fosse Mais Leve a Carga: Avaliação dos Aspectos Econômicos, Políticos e Sociais do Desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). Mimeo. 2015.

PIERRE, L. F. Avaliação da Segurança de Pequenas Barragens em Operação. In: XXV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Anais. Volume II. Salvador. 2003. p.260-268.

REVISTA GRANDES CONSTRUÇÕES. Construção, infraestrutura, concessões e sustentabilidade. Nº 40 - Agosto/2013.

RODRIGUEZ, D. S. S.; COSTA, H. G.; CARMO, L. F. R. R. S. Métodos de Auxílio Multicritério à Decisão Aplicados a Problemas de PCP: Mapeamento da Produção em Periódicos Publicados no Brasil. revista *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 20, n. 1, p. 134-146, 2013.

ROY, B.; BOYSSOU, D. Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas. *Economica*, Paris, França, 626p. 1993.

SAATY, T. L. Método de análise hierárquica. Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron Books, 1991.

SANTANA, A.C.; BENTES, E. S.; HOMMA, A. K. O.; OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, C. M. Influência da Barragem de Tucuruí no Desempenho da Pesca Artesanal, Estado do Pará. *Revista de Economia e Sociologia Rural*. Vol. 52 nº 2. Brasília, Apr./June, 2014.

SIMÕES, R. G. Aplicação do ELECTRE TRI na Classificação de Fornecedores de Indústria Automotiva. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Volta Redonda, RJ, 89p. (2013).

SZAJUBOK, N. K.; MOTA, C. M. M.; ALMEIDA, A. T. Uso do Método Multicritério ELECTRE TRI Para Classificação de Estoques na Construção Civil. *Revista Pesquisa Operacional*, v.26, n.3, p.625-648, 2006.

TEODORO, R. S. Metodologia de Avaliação de Sistemas Municipais de Meio Ambiente: Aplicação a Ride-DF e Entorno. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Brasília – DF. 2015.

TOCANTINS. Perfil do Agronegócio Tocantinense Versão Final (P6). Secretaria do Planejamento e Orçamento. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/279142>> Acesso em: 8 de setembro 2016.

VALENCIO, N.F.L.S. & GONÇALVES, J. C. A Convivência com os Riscos Relacionados às Barragens no Semi-árido Nordeste: Conflitos Entre Representações e Práticas Sociais. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 8 n 1, Salvador-BA. Maio de 2006.

VALERIUS, M. B. Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Universidade de Brasília. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF. 2014.

VIANNA, L. F. V. Metodologias de Análise de Risco Aplicadas em Planos de Ação de Emergência de Barragens: Auxílio ao Processo de Tomada de Decisão. Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes. Belo Horizonte, MG. 2015.

YU, W. ELECTRE TRI - Aspects Methodologiques et Guide d'Utilisation. Document du LAMSADE. Paris: Université de Paris-Dauphine, 1992.

ZHANG, L. M.; XU. Y.; Analysis of earth dam failures - A database approach. First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk. Shanghai, Tongji University, China, 2007.

ZUFFO, M. S. R. Análise de Risco em Barragens: Um Índice de Priorização. Tese de doutorado ligado ao DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDRICOS. 2010.

ŽVANUT, P.; TURK, M. R.; KRYŽANOWSKI, A. Procedure For Dam Safety Risk Analysis And Evaluation Of Parameters For Large Slovenian Hydropower Dams. 16 Posvetovanje SLOCOLD. He Brežice in Drugi Aktualni Projekti v Zvezi s Pregradami. Brežice, 12. maj 2016.

---

## APÊNDICE I

Obtenção dos pesos dos critérios - Metodologia do USACE.

- Para obtenção dos pesos dos critérios é necessário realizar adequação na Equação de obtenção do Escore global (S):

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

- Substitui a vulnerabilidade pelos parâmetros constantes físicas (A) e variáveis (B):

$$S = \frac{(A + B) + 3C}{50}$$

**Onde:**

*Vulnerabilidade (V);*

*Constantes físicas (A);*

*Parâmetros variáveis (B);*

*Danos a propriedades e perdas de vidas (C).*

- Substitui os parâmetros de constantes físicas (A) e variáveis (B) pelos parâmetros individuais correspondentes:

$$S = \frac{\left(\frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6}{6} + \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6}{6}\right) + 3C}{50}$$

- Como os valores das constantes físicas (A) e variáveis (B) são obtidas a partir da média aritméticas dos escores, divide-se cada constante pelo número total deles:

$$S = \frac{\left(\frac{A_1}{6} + \frac{A_2}{6} + \frac{A_3}{6} + \frac{A_4}{6} + \frac{A_5}{6} + \frac{A_6}{6} + \frac{B_1}{6} + \frac{B_2}{6} + \frac{B_3}{6} + \frac{B_4}{6} + \frac{B_5}{6} + \frac{B_6}{6}\right) + 3C}{50}$$

- Substitui o valor de cada parâmetro pelo escore máximo atingido por ele:

$$S = \frac{\left(\frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{8}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6} + \frac{10}{6}\right) + 3 \times 10}{50}$$

- Divide-se o valor de cada parâmetro pelo escore máximo atingido por ele:

$$S = \frac{(1,67 + 1,67 + 1,67 + 1,67 + 1,67 + 1,67 + 1,33 + 1,67 + 1,67 + 1,67 + 1,67 + 1,67) + 30}{50}$$

## APÊNDICE II

Obtenção dos pesos dos critérios - Metodologia do USACE

- Substitui os valores máximos de *Importância (I)*, *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)*.

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

- Substitui os parâmetros de constantes *Importância (I)*, *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)* pelos parâmetros individuais correspondentes:

$$PR = \frac{(p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9 + v_{10} + v_{11} + v_{12})}{2} \times \left( \frac{i_{13} + i_{14} + i_{15}}{3} \right)$$

- Substitui os parâmetros de constantes *Importância (I)*, *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)* pelos parâmetros individuais correspondentes dividido pelos denominadores:

$$PR = \left( \frac{p_1}{2} + \frac{p_2}{2} + \frac{p_3}{2} + \frac{p_4}{2} + \frac{p_5}{2} + \frac{v_6}{2} + \frac{v_7}{2} + \frac{v_8}{2} + \frac{v_9}{2} + \frac{v_{10}}{2} + \frac{v_{11}}{2} + \frac{v_{12}}{2} \right) \times \left( \frac{i_{13}}{3} + \frac{i_{14}}{3} + \frac{i_{15}}{3} \right)$$

- Substitui o valor de cada parâmetro pelo valor máximo atingido por ele:

$$PR = \left( \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{3}{2} + \frac{7}{2} + \frac{10}{2} + \frac{5}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + \frac{10}{2} \right) \times \left( \frac{2}{3} + \frac{2,5}{3} + \frac{1,5}{3} \right)$$

- Verificou-se que o elemento *Importância (I)* apresenta 2 vezes o valor dos elementos *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)*:

$$i = \left( \frac{i_{13} + i_{14} + i_{15}}{3} \right) \rightarrow i = \left( \frac{2}{3} + \frac{2,5}{3} + \frac{1,5}{3} \right) \rightarrow i = 2$$

- Verificou-se o peso de cada dos parâmetros *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)*. E calculou-se o seu somatório:

$$P + V = (5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 1,5 + 3,5 + 5 + 2,5 + 5 + 5 + 5) \rightarrow P + V = 52,5$$

- Multiplicou-se o somatório do valor dos elementos *Periculosidade (P)* e *Vulnerabilidade (V)* por 2 para obter o valor parâmetro *Importância (I)*. Em seguida dividiu-se o valor obtido pela porcentagem correspondente a cada valor:

$$PR = 52,5 \times (0,67 + 0,83 + 0,5)$$

$$i_{13}=35; i_{14}=43,75; i_{15}=26,25$$

### APÊNDICE III

| Matriz de Prioridades (M1)                 |          |             |             |              |              |             |              |             |              |              |             |             |              |              |              |             |                 |
|--|----------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
|  |          | $g_1$       | $g_2$       | $g_3$        | $g_4$        | $g_5$       | $g_6$        | $g_7$       | $g_8$        | $g_9$        | $g_{10}$    | $g_{11}$    | $g_{12}$     | $g_{13}$     | $g_{14}$     | $g_{15}$    | $\lambda_{max}$ |
| Ações da Natureza                          | $g_1$    | 1           | 1/9         | 1/5          | 1/7          | 1           | 1/7          | 1/9         | 1/7          | 1/7          | 1/9         | 1/9         | 1/7          | 1/3          | 1/3          | 1/9         | 0,19            |
| Dimensões da barragem                      | $g_2$    | 9           | 1           | 5            | 3            | 9           | 3            | 1           | 3            | 3            | 1           | 1           | 3            | 7            | 7            | 1           | 2,79            |
| Tipo de barragem                           | $g_3$    | 5           | 1/5         | 1            | 1/3          | 5           | 1/3          | 1/5         | 1/3          | 1/3          | 1/5         | 1/5         | 1/3          | 3            | 3            | 1/5         | 0,58            |
| Tipo de fundação                           | $g_4$    | 7           | 1/3         | 3            | 1            | 7           | 1            | 1/3         | 1            | 1            | 1/3         | 1/3         | 1            | 5            | 5            | 1/3         | 1,20            |
| Idade da barragem                          | $g_5$    | 1           | 1/9         | 1/5          | 1/7          | 1           | 1/7          | 1/9         | 1/7          | 1/7          | 1/9         | 1/9         | 1/7          | 1/3          | 1/3          | 1/9         | 0,19            |
| Vazão de Projeto                           | $g_6$    | 7           | 1/3         | 3            | 1            | 7           | 1            | 1/3         | 1            | 1            | 1/3         | 1/3         | 1            | 5            | 5            | 1/3         | 1,20            |
| Volume total do reservatório               | $g_7$    | 9           | 1           | 5            | 3            | 9           | 3            | 1           | 3            | 3            | 1           | 1           | 3            | 7            | 7            | 1           | 2,79            |
| Confiabilidade das Estruturas Extravasoras | $g_8$    | 7           | 1/3         | 3            | 1            | 7           | 1            | 1/3         | 1            | 1            | 1/3         | 1/3         | 1            | 5            | 5            | 1/3         | 1,20            |
| Confiabilidade das Estruturas de Adução    | $g_9$    | 7           | 1/3         | 3            | 1            | 7           | 1            | 1/3         | 1            | 1            | 1/3         | 1/3         | 1            | 5            | 5            | 1/3         | 1,20            |
| Percolação                                 | $g_{10}$ | 9           | 1           | 5            | 3            | 9           | 3            | 1           | 3            | 3            | 1           | 1           | 3            | 7            | 7            | 1           | 2,79            |
| Deformações e Recalques                    | $g_{11}$ | 9           | 1           | 5            | 3            | 9           | 3            | 1           | 3            | 3            | 1           | 1           | 3            | 7            | 7            | 1           | 2,79            |
| Deterioração dos Taludes / Paramentos      | $g_{12}$ | 7           | 1/3         | 3            | 1            | 7           | 1            | 1/3         | 1            | 1            | 1/3         | 1/3         | 1            | 5            | 5            | 1/3         | 1,20            |
| Projetos                                   | $g_{13}$ | 3           | 1/7         | 1/3          | 1/5          | 3           | 1/5          | 1/7         | 1/5          | 1/5          | 1/7         | 1/7         | 1/5          | 1            | 1            | 1/7         | 0,33            |
| Gestão da Barragem                         | $g_{14}$ | 3           | 1/7         | 1/3          | 1/5          | 3           | 1/5          | 1/7         | 1/5          | 1/5          | 1/7         | 1/7         | 1/5          | 1            | 1            | 1/7         | 0,33            |
| Impactos a jusante                         | $g_{15}$ | 9           | 1           | 5            | 3            | 9           | 3            | 1           | 3            | 3            | 1           | 1           | 3            | 7            | 7            | 1           | 2,79            |
| <b>SOMA:</b>                               |          | <b>93,0</b> | <b>7,37</b> | <b>42,07</b> | <b>21,02</b> | <b>93,0</b> | <b>21,02</b> | <b>7,37</b> | <b>21,02</b> | <b>21,02</b> | <b>7,37</b> | <b>7,37</b> | <b>21,02</b> | <b>65,67</b> | <b>65,67</b> | <b>7,37</b> | <b>21,57</b>    |

| Matriz Normalizada (M2)                      |     | g <sub>1</sub> | g <sub>2</sub> | g <sub>3</sub> | g <sub>4</sub> | g <sub>5</sub> | g <sub>6</sub> | g <sub>7</sub> | g <sub>8</sub> | g <sub>9</sub> | g <sub>10</sub> | g <sub>11</sub> | g <sub>12</sub> | g <sub>13</sub> | g <sub>14</sub> | g <sub>15</sub> | $\lambda_{max}$ | Autovetor Normalizado | Autovetor Normalizado |
|--|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Ações da Natureza                            | g1  | 0,011          | 0,015          | 0,005          | 0,007          | 0,011          | 0,007          | 0,015          | 0,007          | 0,007          | 0,015           | 0,015           | 0,007           | 0,005           | 0,005           | 0,015           | 0,00885         | 1%                    | 0,0090                |
| Dimensões da barragem                        | g2  | 0,097          | 0,136          | 0,119          | 0,143          | 0,097          | 0,143          | 0,136          | 0,143          | 0,143          | 0,136           | 0,136           | 0,143           | 0,107           | 0,107           | 0,136           | 0,12659         | 13%                   | 0,1293                |
| Tipo de barragem                             | g3  | 0,054          | 0,027          | 0,024          | 0,016          | 0,054          | 0,016          | 0,027          | 0,016          | 0,016          | 0,027           | 0,027           | 0,016           | 0,046           | 0,046           | 0,027           | 0,02640         | 3%                    | 0,0270                |
| Tipo de fundação                             | g4  | 0,075          | 0,045          | 0,071          | 0,048          | 0,075          | 0,048          | 0,045          | 0,048          | 0,048          | 0,045           | 0,045           | 0,048           | 0,076           | 0,076           | 0,045           | 0,05439         | 6%                    | 0,0556                |
| Idade  | g5  | 0,011          | 0,015          | 0,005          | 0,007          | 0,011          | 0,007          | 0,015          | 0,007          | 0,007          | 0,015           | 0,015           | 0,007           | 0,005           | 0,005           | 0,015           | 0,00885         | 1%                    | 0,0090                |
| Vazão  | g6  | 0,075          | 0,045          | 0,071          | 0,048          | 0,075          | 0,048          | 0,045          | 0,048          | 0,048          | 0,045           | 0,045           | 0,048           | 0,076           | 0,076           | 0,045           | 0,05439         | 6%                    | 0,0556                |
| Volume                                       | g7  | 0,097          | 0,136          | 0,119          | 0,143          | 0,097          | 0,143          | 0,136          | 0,143          | 0,143          | 0,136           | 0,136           | 0,143           | 0,107           | 0,107           | 0,136           | 0,12659         | 13%                   | 0,1293                |
| Confiabilidade e das Estruturas Extravasoras | g8  | 0,075          | 0,045          | 0,071          | 0,048          | 0,075          | 0,048          | 0,045          | 0,048          | 0,048          | 0,045           | 0,045           | 0,048           | 0,076           | 0,076           | 0,045           | 0,05439         | 6%                    | 0,0556                |
| Confiabilidade e das Estruturas de Adução    | g9  | 0,075          | 0,045          | 0,071          | 0,048          | 0,075          | 0,048          | 0,045          | 0,048          | 0,048          | 0,045           | 0,045           | 0,048           | 0,076           | 0,076           | 0,045           | 0,05439         | 6%                    | 0,0556                |
| Percolação                                   | g10 | 0,097          | 0,136          | 0,119          | 0,143          | 0,097          | 0,143          | 0,136          | 0,143          | 0,143          | 0,136           | 0,136           | 0,143           | 0,107           | 0,107           | 0,136           | 0,12659         | 13%                   | 0,1293                |
| Deformações e Recalques                      | g11 | 0,097          | 0,136          | 0,119          | 0,143          | 0,097          | 0,143          | 0,136          | 0,143          | 0,143          | 0,136           | 0,136           | 0,143           | 0,107           | 0,107           | 0,136           | 0,12659         | 13%                   | 0,1293                |
| Deterioração dos Taludes / Paramentos        | g12 | 0,075          | 0,045          | 0,071          | 0,048          | 0,075          | 0,048          | 0,045          | 0,048          | 0,048          | 0,045           | 0,045           | 0,048           | 0,076           | 0,076           | 0,045           | 0,05439         | 6%                    | 0,0556                |
| Projetos                                     | g13 | 0,032          | 0,019          | 0,008          | 0,010          | 0,032          | 0,010          | 0,019          | 0,010          | 0,010          | 0,019           | 0,019           | 0,010           | 0,015           | 0,015           | 0,019           | 0,01493         | 2%                    | 0,0152                |
| Gestão da Barragem                           | g14 | 0,032          | 0,019          | 0,008          | 0,010          | 0,032          | 0,010          | 0,019          | 0,010          | 0,010          | 0,019           | 0,019           | 0,010           | 0,015           | 0,015           | 0,019           | 0,01493         | 2%                    | 0,0152                |
| Impactos a jusante                           | g15 | 0,097          | 0,136          | 0,119          | 0,143          | 0,097          | 0,143          | 0,136          | 0,143          | 0,143          | 0,136           | 0,136           | 0,143           | 0,107           | 0,107           | 0,136           | 0,12659         | 13%                   | 0,1293                |
|  |     |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 | <b>0,9788</b>   | <b>100%</b>           | <b>100%</b>           |

**Razão de Consistência**

|  |  |        |
|--|--|--------|
| <b>Autovalor (<math>\lambda_{\max}</math>)</b> |  | 15,43  |
| <b>IC</b>                                      |  | 0,0305 |
| <b>Razão de consistência</b>                   |  | 2%     |

## ANEXO I

Quadro 0.1 - Classificação Unificada. Fonte: Bueno e Vilar (1984).

| DIVISÕES PRINCIPAIS |  | SUBGRUPO  | SÍM BOLO   | TRABALHABILIDADE COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO | PERMEABILIDADE QUANDO COMPACTADO | RESISTÊNCIA COMPACTADA E SATURADA | COMPRESSIBILIDADE COMPACTADA E SATURADA | $\gamma_{d,max.}$ para $w_{ot}$ . (Proctor Normal) g/cm <sup>3</sup> | VALOR COMO FUNDAÇÃO                 | CARACTERÍSTICAS DE DRENAGEM           |
|---------------------|--|---|--|--|----------------------------------|-----------------------------------|---|--|-------------------------------------|---------------------------------------|
| SOLOS GRANULARES    | PEDREGULHOS E SOLOS PEDREGULHOSOS        | Pedregulhos: mistura areia pedregulho bem graduada; pouco ou nenhum fino                                    | GW   | Excelente                                    | Permeável                        | Excelente                         | Desprezível                             | De 2,00 a 2,20   | Boa a excelente                     | Excelente                             |
|                     |  | Pedregulhos: mistura areia pedregulho mal graduada; pouco ou nenhum fino                                    | GP   | Boa  | Muito desprezível                | Boa                               | Desprezível                             | De 1,80 a 2,00   |                                     | Excelente                             |
|                     |  | Pedregulhos siltosos: mistura pedregulhos - areia - silte   | GM   | Boa  | Semipermeável a Impermeável      | Boa                               | Desprezível                             | De 1,92 a 2,20   |                                     | Regular a má                          |
|                     |  | Pedregulhos argilosos: mistura pedregulhos - areia - argila   | GC   | Boa  | Impermeável                      | Regular a Boa                     | Muito pequena                           | De 1,84 a 2,10   |                                     | Má                                    |
|                     | AREIAS E SOLOS ARENOSOS                  | Areias, ou areias pedregulhosas bem graduadas; pouco ou nenhum fino   | SW   | Excelente                                    | Permeável                        | Excelente                         | Desprezível                             | De 1,76 a 2,10   |                                     | Má a boa – depende do peso específico |
|                     |  | Areias, ou areias pedregulhosas mal graduadas; pouco ou nenhum fino   | SP   | Regular                                      | Permeável                        | Boa                               | Muito pequena                           | De 1,60 a 1,92   | Excelente                           |                                       |
|                     |  | Areias siltosas; misturas areias - siltes   | SM   | Regular                                      | Semipermeável a impermeável      | Boa                               | Pequena                                 | De 1,76 a 2,00   | Regular a má                        |                                       |
|                     |  | Areias argilosas; misturas areias - argilas   | SC   | Boa  | Impermeável                      | Regular a Boa                     | Pequena                                 | De 1,68 a 2,00   | Má a boa                            |                                       |
| SOLOS FINOS         | SILTES E ARGILAS COM LL < 50%            | Siltes inorgânicos, pó de pedra, areias finas siltosas ou argilosas; siltes argilosos de baixa plasticidade | ML   | Regular                                      | Semipermeável a impermeável      | Regular                           | Média                                   | De 1,52 a 1,92   | Muito má; susceptível de liquefação | Regular a má                          |
|                     |  | Argilas inorgânicas baixa – média plasticidade; argilas arenosas; siltes argilosos; argilas magras          | CL   | Regular a Boa                                | Impermeável                      | Regular                           | Média                                   | De 1,52 a 1,92   | Má a boa                            | Má                                    |
|                     |  | Siltes orgânicos: argilas siltosas de baixa plasticidade  | OL   | Regular                                      | Semipermeável a impermeável      | Baixa                             | Média                                   | De 1,28 a 1,60   | Má                                  | Má                                    |
|                     | SILTES E ARGILAS COM LL > 50%            | Siltes inorgânicos, solos micáceos ou diatomáceos de alta compressibilidade                                 | MH   | Má   | Semipermeável a impermeável      | Baixa a regular                   | Alta                                    | De 1,12 a 1,52   | Má                                  | Regular a má                          |
|                     |  | Argilas inorgânicas de alta plasticidade; argilas gordas  | CH   | Má   | Impermeável                      | Baixa                             | Alta                                    | De 1,20 a 1,68   | Regular a má                        | Má                                    |
|                     |  | Argilas orgânicas de média a alta plasticidade; siltes orgânicos  | OH   | Má   | Impermeável                      | Baixa                             | Alta                                    | De 1,10 a 1,60   | Muito má                            | Má                                    |
| SOLOS ORGÂNICOS     | Turfa e outros solos altamente orgânicos | Pt  | Compactação extremamente difícil; não utilizados como aterro; devem ser removidos das fundações; recalques excessivos; resistência baixa |  |                                  |                                   |   |  |                                     |                                       |