



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

SANDRA KEILA DE OLIVEIRA BAIMA

**UMA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO CONSTRUTIVISTA PARA
A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE BARRAGENS E
REGIÕES A JUSANTE**

FORTALEZA - CE

2015

SANDRA KEILA DE OLIVEIRA BAIMA

**UMA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO CONSTRUTIVISTA PARA
A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE BARRAGENS E
REGIÕES A JUSANTE**

Tese submetida à Coordenação do curso de pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: Recursos Hídricos,

Orientador: Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos

FORTALEZA - CE

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- B189m Baima, Sandra Keila de Oliveira.
Uma metodologia multicritério construtivista para a avaliação da vulnerabilidade de barragens e regiões a jusante / Sandra Keila de Oliveira Baima. – 2015.
158 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Recursos Hídricos.
Orientação: Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos.
Coorientação: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva.
1. Recursos hídricos. 2. Represas. 3. Vulnerabilidade. I. Título.

SANDRA KEILA DE OLIVEIRA BAIMA

Tese submetida à Coordenação do curso de pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: Recursos Hídricos,

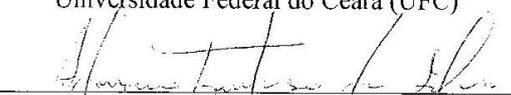
Orientador: Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos

APROVADA EM: 21/01/2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



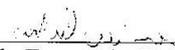
Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva (co-orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Profa. Dra. Vanda Tereza da Costa Malveira
Universidade Estadual do Vale do Acaraú (UVA)



Prof. PhD. Antônio Nunes de Miranda
Examinador Externo (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde, perseverança e força em todos os momentos de minha vida.

Aos professores Nilson Campos e Adriano Frutuoso, quero expressar o meu maior agradecimento, pela orientação e acompanhamento deste trabalho.

Aos professores Vanda Teresa, Francisco Chagas e Antônio Miranda que, no meio dos seus afazeres, encontraram tempo para participar das entrevistas para a estruturação do modelo.

Aos professores Carlos Antônio Bana e Costa, do Instituto Superior Técnico (IST), pelo envio de artigos sobre o seu modelo de decisão e Maria Bernadeth F. A. Silva, da UNICRISTUS, que primeiro me apresentou à Metodologia MACBETH.

Ao professor Francisco de Assis de Souza Filho, sempre atencioso, disponível e acessível.

Ao DNOCS pelas informações imprescindíveis.

Ao Eng^o Marcus Henrique Rangel, com o qual contraí uma dívida inestimável de gratidão.

À amiga professora Flávia Teles, pelo incentivo, troca de experiências e discussões, meus agradecimentos;

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

À UFC e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, pela minha graduação (em engenharia civil), e agora, pelo doutorado em Recursos Hídricos, meu reconhecimento pela qualidade do ensino superior público e gratuito.

RESUMO

A Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), cujo objetivo é estabelecer a linha de base para avaliação e acompanhamento da implementação da referida política, servindo como ferramenta de análise de sua efetividade na redução de acidentes e na melhoria da gestão da segurança das barragens brasileiras. A lei definiu uma série de instrumentos, de gestão da segurança, tornando-os obrigatórios a partir de então. Em atendimento ao art. 7º da referida Lei, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabeleceu, a partir da Resolução CNRH Nº 143 (em 10 de julho de 2012), o sistema de classificação por categoria de risco e de dano potencial associado e volume do reservatório. De acordo com esta Resolução, certas características técnicas da barragem e do vale à jusante, deverão ser pontuadas a fim de classificar as barragens em função do risco e do dano potencial associado. Contudo, este trabalho, propõe um modelo de classificação de barragens em categorias de vulnerabilidade, baseado em uma metodologia multicritério de apoio à decisão – MCDA (Multicriteria Decision Aid) que se caracteriza por adotar uma abordagem construtivista. O método multicritério adotado é o MACBETH, implementado no suporte informático M-MACBETH.

Palavras chave: Barragens, vulnerabilidade, apoio à decisão multicritério, MACBETH.

ABSTRACT

Federal Law No. 12 334, of September 20, 2010, established the National Policy on Safety of Dams (NBSP), whose goal is to establish a baseline for evaluating and monitoring the implementation of the policy, serving as a tool for analyzing your effectiveness in reducing accidents and improving safety management in Brazilian dams. The law defined a series of tools, safety management, making it mandatory thereafter. In compliance with art. 7 of the said Act, the National Water Resources Council established from the CNRH Resolution No. 143 (10 July 2012), the system of classification by risk and potential harm associated and vessel volume. According to this resolution, certain technical characteristics of the dam and the valley downstream, must be scored in order to classify dams according to the risk and potential damage associated. However, this work proposes a model for classifying dams vulnerability categories, based on a multicriteria decision support methodology - MCDA (MultiCriteria Decision Aid) which is characterized by adopting a constructivist approach. The multicriteria method adopted is MACBETH, implemented in the M-MACBETH computer support.

Keywords: Dams, vulnerability, MultiCriteria Decision Aid, MACBETH.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Número de incidentes em função da idade das barragens (REAGAN, 2010).....	32
FIGURA 2 - Causas das rupturas de barragens de concreto e aterro, modificado de Schnitter (1979, apud NRC, 1983).....	35
FIGURA 3 - Causas de ruptura em função da idade Schnitter (1979 apud NRC, 1983).....	35
FIGURA 4 - Fluxograma de aplicação da classificação estabelecida pela Resolução 143/CNRH.....	57
FIGURA 5 - Registro de controle de vazão da estrutura de saída apresentado alto grau de corrosão. ..	62
FIGURA 6 - Erosão generalizada no talude de jusante.....	62
FIGURA 7 - Tipos de problemáticas. Adaptado de Doumpos e Zopounids (2002).....	66
FIGURA 8 - Fases do processo MCDA-C. Fonte: Ensslin, Dutra e Ensslin (2000, p. 81).....	67
FIGURA 9 - Composição da nuvem de elementos primários (BANA E COSTA, 1993, p. 2).....	68
FIGURA 10 - Definição e Significado dos Níveis de Impacto de Referência <i>Bom</i> e <i>Neutro</i> em um Descritor (adaptado de ENSSLIN <i>et al.</i> , 2001, p. 164).....	72
FIGURA 11 - As categorias de diferença de atratividade do método MACBETH, (MATZENAUER, 2003, p. 168).....	78
FIGURA 12 - Matrizes de juízos: (a) consistentes; (b) inconsistentes, SILVA (2012, p. 102).....	79
FIGURA 13 - Limites de variação de uma opção.....	81
FIGURA 14 - Matriz de ordenação dos PVF's.....	82
FIGURA 15 - Matriz de juízos de valor para ponderação dos PVF's.....	82
FIGURA 16 - Barragens construídas pelo DNOCS que se enquadram na Lei 12.334/2010. Fonte: elaboração da autora.	85
FIGURA 17 - Evolução das alturas das barragens construídas. Fonte: elaboração da autora.....	86
FIGURA 18 - Idade das barragens construídas pelo DNOCS. Fonte: elaboração da autora.....	86
Figura 19 – Seção transversal da barragem trairi após o extravazamento (ARAÚJO, 1990).....	87
FIGURA 20 - Árvore de pontos de vista para a vulnerabilidade da barragem. Fonte - elaboração da autora.....	94
FIGURA 21 - Árvore de pontos de vista para a vulnerabilidade à jusante. Fonte - elaboração da autora.	94
FIGURA 22 - Introdução dos critérios e níveis de impacto no software MACBETH.....	95
FIGURA 24 - Tratamento sem resultado das trincas na soleira do vertedouro da Barragem Cocoróba.....	100
FIGURA 23 - Crescimento de vegetação no canal de aproximação do sangradouro da barragem Caldeirão de Parelhas – RN.....	100
FIGURA 25 - Árvores no talude de montante da Barragem Caldeirão de Parelhas- RN.	101
FIGURA 26 - Árvores e sulcos profundo de erosão no talude de jusante da Barragem Caldeirão de Parelhas- RN.....	101
FIGURA 27 - Canaleta quebrada, Barragem Caldeirão de Parelhas- RN.....	101

FIGURA 28 - Degradação do concreto no paramento de jusante da Barragem Jucazinho.	101
FIGURA 29 - Ferragem exposta no teto da torre da tomada d'água da Barragem Itans – RN.	103
FIGURA 30 - Comporta da tomada d'água apresentando corrosão, Barragem Choró –CE.	103
FIGURA 31 - Ferragem exposta dos pilares de sustentação da torre da tomada dágua da Barragem Sabugi – RN.	103
FIGURA 32 - Caixa de jusante com registros e tubulação danificada, Barragem Amanari- CE.	103
FIGURA 33 - Piping, Barragem Joana – CE, ano 2004.....	104
FIGURA 34 - Detalhe da percolação no paramento de jusante junto à ombreira esquerda com material esbranquiçado, Barragem Jucazinho – CE, ano 2004.	104
FIGURA 35 - Trincas no concreto da galeria de inspeção da Barragem Gargalheiras – RN.....	105
FIGURA 36 - Trincas longitudinais no coroamento da Barragem Trussú – CE.	105
FIGURA 37 -Detalhe de fissura na laje do coroamento próximo à ombreira direita, Barragem Jucazinho – PE, 2004.....	105
FIGURA 38 - Marco para medição de recalque inutilizado, Barragem Cocorobó – BA, 2013.	107
FIGURA 39 - Relação Volume Armazenado (hm^3)/ Distância Máxima para jusante (km). Fonte: ANA (2013).	108
FIGURA 40 - Referências de ponderação, Fonte: elaboração da autora.....	111
FIGURA 41 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF ₁ - volume, Fonte - elaboração da autora.....	112
FIGURA 42 - Função de valor para o PVF ₁ - volume, Fonte - elaboração da autora.....	113
FIGURA 43 - Referências globais, detalhe da referência global [FUNDAÇÃO].	114
FIGURA 44 - Ponderação dos pontos de vista fundamentais para o IVB. Fonte - elaboração da autora.	115
FIGURA 45 - Histograma dos coeficientes de ponderação do IVB. Fonte - elaboração da autora.....	115
FIGURA 46 - Ponderação dos PVF's e histograma dos coeficientes de ponderação do IVJ _B	116
FIGURA 47 - Limites de variação permitidos nos pesos de critérios (em vermelho). Fonte: Elaboração da autora.	116
FIGURA 48 - Níveis de performance das barragens em cada PVF do IVB. Fonte: elaboração da autora.....	120
FIGURA 49 - Avaliação global das barragens pelo IVB. Fonte: Elaboração da autora.	120
FIGURA 50 - Resultados globais do modelo IVB, apresentados numa escala termométrica. Fonte: Elaboração da autora.	121
FIGURA 51 -Tabela de pontuações globais e escala termométrica para o IVJ _B	122
FIGURA 52 - Perfil multicritério IVB da barragem Cocorobó.	123
FIGURA 53 - Perfil multicritério IVJ _B da barragem Cocorobó. Fonte: Elaboração da autora.	124
FIGURA 54 - Análise de sensibilidade no peso do PVF ₁₀ – percolação.	125
FIGURA 55 - Análise de sensibilidade no peso do PVF ₆ – projeto.	125

FIGURA 56 - Análise de robustez do modelo, considerando a informação ordinal, MACBETH e cardinal em local e a informação ordinal em global.	127
FIGURA 57 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF1.	131
FIGURA 58 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF2.	131
FIGURA 59 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF3.	132
FIGURA 60 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF4.	132
FIGURA 61 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF5.	133
FIGURA 62 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF6.	133
FIGURA 63 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF7.	134
FIGURA 64 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF8.	134
FIGURA 65 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF9.	135
FIGURA 66 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF10.	135
FIGURA 67 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF11.	136
FIGURA 68 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF12.	136
FIGURA 69 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF13.	137
FIGURA 70 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF14.	137
FIGURA 71 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF15.	138
FIGURA 72 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF16.	138
FIGURA 73 - Perfil multicritério da barragem Cachoeira I.	139
FIGURA 74 - Perfil multicritério da barragem Curimataú.	139
FIGURA 75 - Perfil multicritério da barragem Caldeirão.	139
FIGURA 76 - Perfil multicritério da barragem Vira Beijú.	140
FIGURA 77 - Perfil multicritério da barragem Abóboras.	140
FIGURA 78 - Perfil multicritério da barragem S. Mamede.	141
FIGURA 79 - Perfil multicritério da barragem Escondido.	141
FIGURA 80 - Perfil multicritério da barragem Arcoverde.	141
FIGURA 81 - Perfil multicritério da barragem Japi II.	142
FIGURA 82 - Perfil multicritério da barragem Tremendal.	142
FIGURA 83 - Perfil multicritério da barragem Sta. Inês.	142
FIGURA 84 - Perfil multicritério da barragem Sabugi.	143
Figura 85 - Perfil multicritério da barragem Itans.	143
FIGURA 86 - Análise de sensibilidade do peso do PVF1 - volume.	144
FIGURA 87 - Análise de sensibilidade do peso do PVF2 - tipo.	144
FIGURA 88 - Análise de sensibilidade do peso do PVF3 - período de retorno.	144
FIGURA 89 - Análise de sensibilidade do peso do PVF4 - geologia da fundação.	145
FIGURA 90 - Análise de sensibilidade do peso do PVF5 - idade.	145
FIGURA 91 - Análise de sensibilidade do peso do PVF7 - estruturas extravazoras.	145
FIGURA 92 - Análise de sensibilidade do peso do PVF8 - taludes e paramentos.	146

FIGURA 93 - Análise de sensibilidade do peso do PVF9 - estruturas de adução.	146
FIGURA 94 - Análise de sensibilidade do peso do PVF11 - deformações e recalques.	146
FIGURA 95 - Análise de sensibilidade do peso do PVF12 - inspeções.	147
FIGURA 96 - Análise de sensibilidade do peso do PVF13 - instrumentação.	147
FIGURA 97 - Análise de sensibilidade do peso do PVF14 - perda de vidas.	147
FIGURA 98 - Análise de sensibilidade do peso do PVF15 - impacto sócioeconómico.	148
FIGURA 99 - Análise de sensibilidade do peso do PVF16 - impacto ambiental.	148

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Glossário de alguns vocábulos afins à gestão de risco de barragens.	27
QUADRO 2 - Distribuição da percentagem de barragens e da percentagem de rupturas segundo a altura e tipo da barragem.	29
QUADRO 3 - Frequência anual média de ruptura por tipo de barragem.	30
QUADRO 4 - Causas de ruptura de barragens 1975-2011.....	31
QUADRO 5 - Causas de rupturas de barragens de terra no período 1850- 1950.	33
QUADRO 6 - Idade das barragens quando da ocorrência de ruptura.	33
QUADRO 7 - Incidências das causas de acidentes em barragens de terra e enrocamento.	34
QUADRO 8 - Causas de acidentes e rupturas em barragens de concreto.	36
QUADRO 9 - Regulamentação de segurança em alguns países europeus.	38
QUADRO 10 - Classificação das barragens francesas.	40
QUADRO 11 - Obrigações dos proprietários de acordo com as classes de barragens francesas.	41
QUADRO 12 - Critérios para avaliação de perigo para a vida, a propriedade e o meio ambiente.....	42
QUADRO 13 - Classificação por altura.....	46
QUADRO 14 - Classificação por dano potencial.	46
QUADRO 15 - Categorias de classificação de risco.....	46
QUADRO 16 - Classes de barragens do estado canadense de Québec.	48
QUADRO 17 - Pontuação relativa às alturas (Québec, 2014).....	49
QUADRO 18 - Pontuação relativa ao tipo de barragem (Québec, 2014).	49
QUADRO 19 - Pontuação relativa à capacidade (Québec, 2014).	49
QUADRO 20 - Pontuação relativa ao tipo de fundação (Québec, 2014).....	50
QUADRO 21 - Pontuação relativa à idade das barragens de concreto (Québec, 2014).	50
QUADRO 22 - Pontuação relativa à idade das barragens de terra (Québec, 2014).....	50
QUADRO 23 - Pontuação relativa à sismicidade (Québec, 2014).	50
QUADRO 24 - Pontuação relativa à confiabilidade dos órgãos de descarga (Québec, 2014).....	50
QUADRO 25 - Pontuação relativa às condições da barragem (Québec, 2014).....	51
QUADRO 26 - Pontuação relativa às características da área afetada (Québec, 2014).	51
QUADRO 27 - Classificação de perigo potencial.	53
QUADRO 28 - Classificação de perigo potencial USACE.....	53
QUADRO 29 - Classificação de dano potencial do estado americano de Washington.	54
QUADRO 30 - Dispositivos de aferição e controle da segurança.	56
QUADRO 31 - Discriminação dos descritores e pesos da Resolução 143/CNRH.	58
QUADRO 32 - Matriz categoria de risco.....	60
QUADRO 33 - Matriz de dano potencial associado.	60
QUADRO 34 -Matriz de categoria de risco e dano potencial associado	60

QUADRO 35 - Resultado da aplicação do método da resolução 143 a barragem Cocorobó. Fonte: Elaboração da autora.....	61
QUADRO 36 - Propriedades das famílias de PVF's.	70
QUADRO 37 - Tipo de barragens construídas pelo DNOCS.	85
QUADRO 38 - Relação de barragens do DNOCS com acidentes e incidentes.....	88
QUADRO 39 - Descrição da formação e experiência dos especialistas.	91
QUADRO 40 - EPA's e validação dos PVF's.....	93
QUADRO 41 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF1 – volume.	96
QUADRO 42 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF2 – Tipo.....	96
QUADRO 43 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF3 – Cheia de projeto	97
QUADRO 44 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF4 – geologia da fundação.	97
QUADRO 45 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF5 – idade.	98
QUADRO 46 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF6 – documentação de projeto.	99
QUADRO 47 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF7 – estruturas extravazoras.....	100
QUADRO 48 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF8 – taludes e paramentos.....	101
QUADRO 49 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF9 – estruturas de adução.....	102
QUADRO 50 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF10 – percolação.	104
QUADRO 51 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF11 – estruturas extravazoras.....	105
QUADRO 52 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF12 – inspeções.....	106
QUADRO 53 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF7 – estruturas extravazoras.....	107
QUADRO 54 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF14 – perda de vidas.....	110
QUADRO 55 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF15 – impacto socioeconômico....	110
QUADRO 56 - Relação volume do reservatório vs. distância total para jusante proposta para a metodologia simplificada.	111
QUADRO 57 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF16 – impacto ambiental.	111
QUADRO 58 - Classificação das barragens selecionadas pela Resolução 143. Fonte: Elaboração da Autora.	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMD	Apoio Multicritério a Decisão
ANA	Agência Nacional de Águas
ANCOLD	Australian National Committee on Large Dams
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
CAGEPA	Companhia de Água e Esgoto da Paraíba
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CMP	Cheia Máxima Provável
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DNOS	Departamento Nacional de Obras e Saneamento
DSO	Dam Safety Office
EPA	Elemento Primário de Avaliação
EUA	Estados Unidos da América
FEMA	Federal Emergency Management Agency dos EUA
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
ICODS	Interagency Committee on Dam Safety dos EUA
ICOLD	International Committee on Large Dams
INAG	Instituto de Águas de Portugal
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal
IVB	Índice de Vulnerabilidade de Barragens
IVJ _B	Índice de Vulnerabilidade a Jusante de Barragens
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MCDA	Multicriteria Decision Aid
NRC	National Research Council
NRCS	National Resource and Conservation Service
NOIB	Normas de Observação e Inspeção de Barragens Portuguesas
PAE	Plano de Ação Emergencial
PVF	Ponto de Vista Fundamental
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PNDC	Política Nacional de Defesa Civil

RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SNGB	Seminário Nacional de Grandes Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
USACE	Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation dos EUA
USCOLD	United States Committee on Large Dams

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	O problema.....	19
1.2	Objetivos e abrangência.....	20
1.2.1	Objetivo geral.....	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	Justificativa, Originalidade e Relevância.....	21
1.4	Organização da Tese.....	22
2	CONCEITUAÇÃO E TERMINOLOGIA.....	24
2.1	Os conceitos de segurança, risco e vulnerabilidade.....	24
3	CAUSAS DE RUPTURA DE BARRAGENS.....	29
3.1	Rupturas de barragens de aterro (terra e enrocamento).....	32
3.2	Rupturas de barragens de concreto.....	34
4	CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS BASEADA NO RISCO.....	37
4.1	Finlândia.....	39
4.2	França.....	40
4.3	Noruega.....	41
4.4	Portugal.....	43
4.5	Espanha.....	44
4.6	Suécia.....	45
4.7	África do Sul.....	46
4.8	Austrália.....	47
4.9	Canadá.....	48
4.10	Estados Unidos.....	52
4.11	Brasil.....	55
4.11.1	Método da resolução CNRH nº 143.....	56
5	APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO.....	63
5.1	Elementos fundamentais no processo de tomada de decisão.....	64
5.2	Tipos de Problemática.....	65
5.3	Relações de Preferência.....	66
5.4	Fases da Construção de um Modelo Multicritério de Apoio à Decisão.....	67
5.4.1	Fase de estruturação.....	67

5.4.2	Fase de avaliação	74
5.4.3	Fase de elaboração de recomendações.....	76
5.5	O método MACBETH de apoio à decisão	77
5.5.1	Julgamentos semânticos.....	78
5.5.2	Consistência e inconsistência de julgamentos.....	78
5.5.3	Escala MACBETH de base	80
5.5.4	Determinação dos coeficientes de ponderação.....	81
6	FORMULAÇÃO DO MODELO	84
6.1	Fase de estruturação.....	84
6.1.1	O ambiente decisional.....	84
6.1.2	Atores.....	91
6.1.3	Identificação dos Pontos de Vista Fundamentais (PVF).....	92
6.1.4	Descritores para o cálculo do IVB.....	95
6.1.5	Descritores para o cálculo do IVJ _B	108
6.2	Fase de Avaliação	111
6.2.1	Determinação das Funções de Valor	112
6.2.2	Determinação dos coeficientes de ponderação.....	113
6.2.3	Avaliação Global das Opções.....	118
6.3	Fase de Elaboração de Recomendações.....	124
7	CONCLUSÕES	129
8	BIBLIOGRAFIA	132
	ANEXO A	140
	APENDICE A - MATRIZES JUÍZO DE VALOR E TERMÔMETRO DOS PVF'S	131
	APÊNDICE B - PERFIL MULTICRITÉRIO DAS BARRAGENS	139
	APÊNDICE C - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PESO	144

1 INTRODUÇÃO

A Lei nº 12.334, sancionada em 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens, criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), e definiu:

- (a) as características das barragens que se enquadram na nova política;
- (b) a competência dos órgãos fiscalizadores;
- (c) as responsabilidades do empreendedor da barragem e
- (d) as sanções no caso de descumprimento da lei.

Com a publicação da lei de segurança de barragens, houve uma mudança de paradigma, eliminando-se o vácuo institucional e estabelecendo uma cadeia completa de responsabilidades relacionadas à segurança das barragens construídas no Brasil. A lei esclareceu e reforçou a responsabilidade legal do empreendedor em manter as condições de segurança de sua barragem, bem como definiu o respectivo órgão fiscalizador, em função do uso dado ao barramento. Definiu também, em seu Artigo 6º, sete instrumentos de gestão da segurança, tornando-os obrigatórios a partir de então. São eles:

- I. o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II. o plano de segurança de barragem;
- III. o sistema nacional de informações sobre segurança de barragens (SNISB);
- IV. o sistema nacional de informações sobre o meio ambiente (SINIMA);
- V. o cadastro técnico federal de atividades e instrumentos de defesa ambiental;
- VI. o cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras de recursos ambientais;
- VII. o relatório de segurança de barragens.

O sistema de classificação de barragens, por categoria de risco, por dano potencial associado e por volume, é o primeiro e, de certo modo, o mais importante dos sete instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Deverá ser o dosador das medidas e procedimentos de monitoramento a serem adotados, de forma a tornar mais seguras as barragens, determinando a periodicidade e o conteúdo mínimo das inspeções regulares e especiais, da revisão periódica, e a obrigatoriedade ou não de elaboração do plano de ação de emergência (PAE) da barragem, segundo regulamentos a serem publicados pelas entidades fiscalizadoras da segurança de barragens.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), através da Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, estabeleceu critérios gerais para a classificação, entretanto, cumpre observar que esta é de responsabilidade das entidades fiscalizadoras, seja na esfera federal ou estadual, e que cada uma destas poderá estabelecer critérios específicos ou complementares aos critérios gerais estabelecidos pelo CNRH.

Na esfera federal são 4 as entidades fiscalizadoras de segurança de barragens:

- ANA – Agência Nacional de Águas, responsável pela fiscalização de barragens para acumulação de água, localizadas em rios federais;
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, responsável pela fiscalização de barragens para geração de energia;
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente, responsável pela fiscalização de barragens para fins de disposição de resíduos industriais, exceto os nucleares;
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, responsável pela fiscalização de barragens para contenção de rejeitos.

No ANEXO A são apresentados os órgãos gestores de recursos hídricos das 27 Unidades da Federação, Estados e Distrito Federal, que também são fiscalizadores de segurança das barragens de acumulação de água situadas nos rios sob sua jurisdição, excluídas as que têm a geração de energia hidrelétrica como uso preponderante.

Portanto se um empreendedor é proprietário de barragens, situadas tanto em rios federais como em rios estaduais, estará subordinado tanto ao órgão fiscalizador federal, como aos órgãos estaduais, podendo estes adequar suas classificações tendo como base os critérios gerais da Resolução CNRH nº 143.

1.1 O problema

O sistema de classificação por categoria de risco e de dano potencial associado, estabelecido pela Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, divide as barragens em 5 classes (A, B, C, D e E). As obrigações dos empreendedores de barragens são graduadas e sua periodicidade definida de acordo com a classe da barragem, estas obrigações são: inspeções, relatórios, planos de segurança, planos de ações emergenciais, etc. O não cumprimento destas obrigações pelos empreendedores, implica em autuação e multa pelo órgão fiscalizador, junta-se a isto o fato que para cumprirem estas obrigações os empreendedores deverão alocar recursos e profissionais qualificados, para o controle da segurança e elaboração de estudos considerados

indispensáveis pela autoridade, além dos já escassos recursos demandados para a recuperação e manutenção das obras.

Além disso, a Resolução CNRH nº 143 atua como diretriz para a elaboração das classificações a serem adotadas pelos Estados, o se traduz pela expressão “efeito cascata”.

Ocorre que na prática, como será visto, a aplicação desta classificação (por pesos) têm resultado na ocorrência de um grande número de barragens classificadas na categoria A, cujas obrigações dos empreendedores são maximizadas em termos de quantidade e periodicidade.

Julga-se, portanto, importante explicitar a forma como são atribuídos os pesos empregados neste tipo de classificação, fazendo-se uso de um modelo formal e teoricamente robusto. Frente a esta necessidade, este trabalho propõe o emprego de uma metodologia multicritério que permita levar em conta a multidimensionalidade de aspectos, de natureza quantitativa ou qualitativa, envolvidos. Para tal, a opinião de especialistas, altamente qualificados, entre projetistas, hidráulicos, hidrólogos, geotécnicos, entre outros, deverá ser colhida, sistematizada e levada em consideração.

1.2 Objetivos e abrangência

1.2.1 Objetivo geral

Construir, sob a perspectiva do apoio multicritério a decisão (AMD), um modelo estruturado (consistente, transparente e racional) de avaliação da vulnerabilidade de barragens e região a jusante.

1.2.2 Objetivos específicos

Como pressupostos básicos para alcançar o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar, através de entrevistas com especialistas, os principais critérios que determinam a segurança de uma barragem para auxiliar na formulação do modelo proposto;
- b) Construir um modelo de apoio à decisão, embasado na metodologia MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), cuja finalidade principal é a avaliação da vulnerabilidade de barragens;
- c) Propor um Índice de Vulnerabilidade de Barragens (IVB) e um Índice de Vulnerabilidade a Jusante (IVJ_B), a partir do suporte informático M-MACBETH;
- d) Avaliar os índices propostos através de aplicação prática – estudo de caso.

1.3 Justificativa, Originalidade e Relevância

O Apoio Multicritério à Decisão se constitui em métodos capazes de identificar diversos critérios (objetivos) a serem avaliados, mensurá-los, integrar avaliações individuais e gerar ações de melhoria ou aperfeiçoamento (BORTOLUZZI; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L., 2011).

Nesta tese foi escolhida, como instrumento de intervenção, uma Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão Construtivista – MCDA-C. O diferencial desta metodologia, em relação às metodologias tradicionais de MCDA, é permitir a construção do conhecimento do contexto decisório e dos aspectos considerados relevantes pelo decisor, favorecendo um entendimento maior do contexto decisório, o que possibilita a construção de uma escala global de vulnerabilidade e a geração de ações de aperfeiçoamento.

"Um instrumento é uma ferramenta (muitas vezes computacional) utilizada para operacionalizar determinada técnica ou metodologia" (Mingers e Gill, 1997, p. 430).

"Considera-se como metodologia o conjunto de regras estruturadas, articuladas e sequenciais (passos metodológicos) que orientam (conduzem) uma determinada intervenção ou atividade" (Mingers e Gill, 1997, pp. 429–430 & Ramos, 2002, p. 115).

Para verificar a viabilidade da aplicação desta metodologia ao objetivo desta tese, inicialmente, buscou-se elencar estudos a respeito da mesma temática a fim conhecer suas características e confrontar possíveis similaridades ou divergências com o que se objetiva. A partir desta busca inicial, pode-se constatar que o MACBETH é um MCDA-C que tem sido aplicado, principalmente em Portugal e no Brasil, em vários setores: problemas de priorização, seleção, alocação de recursos, avaliação de desempenho e gestão de conflitos, tanto em contextos públicos como privados.

Especificamente na área de Recursos Hídricos foram encontrados artigos, em sua maioria ligados aos temas planejamento e gestão, como também os trabalhos acadêmicos (teses) de Matzenauer (2003), Fantinatti (2011) e Silva (2012), apenas este último utiliza o MACBETH direcionado à barragens, para o desenvolvimento de um índice de remoção de barragens.

Não foram encontrados trabalhos com ênfase à construção de um modelo multicritério que avalie o risco em barragens, por outro lado, Zuffo (2010) desenvolveu um índice de priorização de risco de barragens (IPRB) com base probabilística e, com base nas dificuldades encontradas, declara:

“Como algumas recomendações sugeridas a fim de aprimorar o presente estudo cita-se a necessidade de melhorar o sistema de atribuição de pesos, ou a probabilidade associada a cada subcritério de avaliação, fazendo-se uso de alguma metodologia multicritério que se mostra bastante adequada para a realização de tal tarefa. Como alguns exemplos, cita-se o AHP, MAUT e MacBeth” (ZUFFO, 2010).

O modelo, proposto nesta Tese, deve trazer uma contribuição científica e original ao tema da classificação de risco de barragens, pois apresenta uma proposta de realizar um processo estruturado de avaliação da vulnerabilidade de barragens e do vale à jusante, por meio de uma metodologia consolidada cientificamente e não apenas através de análises meramente arbitrárias, em outras palavras, análises simplificadas do risco (que substituem o cálculo matemático do risco por pesos ou ponderações intuitivas). No dizer de Keeney (1992):

“Importa notar que é usual ver definir coeficientes de ponderação (“pesos”) com base na noção intuitiva de importância relativa dos critérios. Este tipo de procedimento é incorreto e é considerado na literatura da Análise de Decisão como o “erro crítico mais comum” (KEENEY, 1992).

A abordagem proposta, como se verá, valoriza a importância do julgamento de engenharia e busca sistematizá-lo e traduzi-lo de forma mais transparente.

1.4 Organização da Tese

O trabalho está organizado em oito capítulos. O presente capítulo descreve o problema, define os objetivos desta pesquisa e a forma como está organizado o texto.

O capítulo 2 apresenta a terminologia relacionada ao risco e a segurança, considerada essencial ao entendimento desta Tese, pois permite a normalização da linguagem utilizada.

O capítulo 3 apresenta estatísticas relacionadas às principais causas de rupturas das barragens de aterro e concreto que auxiliarão no desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho através do conhecimento das vulnerabilidades associadas a cada obra.

O capítulo 4 apresenta aspectos da legislação e regulação de vários países, com ênfase à classificação de risco adotada.

O capítulo 5 apresenta os princípios e conceitos fundamentais necessários para o entendimento dos Métodos Multicritério. O capítulo é composto pela descrição do processo decisório, de suas fases, dos elementos que envolvem a estruturação do processo decisório e do método multicritério MACBETH, utilizado para atingir o objetivo proposto.

O capítulo 6 constitui o núcleo essencial do presente trabalho. Apresenta a concepção de um modelo de apoio à decisão, embasado na metodologia MACBETH

(Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), cuja finalidade principal é o desenvolvimento de dois índices para a avaliação da vulnerabilidade, o IVB e o IVJ_B.

O capítulo 7 apresenta a discussão dos resultados e principais contribuições.

O capítulo 8 apresenta o aporte bibliográfico utilizado na fundamentação teórica necessária à construção da tese.

2 CONCEITUAÇÃO E TERMINOLOGIA

“A imprecisão linguística conduz ao entendimento impreciso de eventos ou quantidades.”

Vieira (2005)

No estudo e na prática de análises ligadas ao *risco* e à *segurança*, uma dificuldade comum é encontrada no nível de definições básicas. Frequentemente se experimentam confusões, que surgem de interpretações variadas de termos, por este motivo considerou-se pertinente introduzir neste capítulo o significado dos conceitos utilizados no presente trabalho, tal como foram adotados em sua forma comum e aperfeiçoados pelos organismos nacionais e internacionais.

2.1 Os conceitos de segurança, risco e vulnerabilidade

O vocábulo segurança encerra aspectos positivos e facilidade de aceitação pelo público em geral, significa: “condição do que está seguro” “afastamento de todo o tipo de perigo”, “confiança” (BAPTISTA, 2009).

Para Betâmio Almeida (2003), na terminologia técnico-científica, segurança é uma das palavras mais associadas ao risco, outra é a incerteza. A primeira designa uma situação que, progressivamente, tem vindo a ser considerada como um direito dos cidadãos. Este “direito” tem, contudo, uma particularidade singular: não pode ser absoluto nem tão pouco garantido. A incerteza acompanha-o, impedindo a garantia total de o mesmo se concretizar. Trata-se de um direito de expectativa no espaço e no tempo, só verificável à “posteriori”.

Segundo Raffery (1994), o risco tem atributos quantificáveis, enquanto a incerteza não os tem. Ao risco estaria sempre associada uma certa função de probabilidade enquanto a incerteza não permitiria essa associação.

O Regulamento de Segurança de Barragens (PORTUGAL, 2007) apresenta as seguintes definições de segurança:

- *Segurança* (da barragem) – a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento relativas a aspectos estruturais, hidráulico-operacionais e ambientais, de modo a evitar a ocorrência de acidentes e incidentes ou minorar as suas consequências ao longo da vida da obra;
- *Segurança ambiental* - a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento relativas à limitação de incidências prejudiciais sobre o ambiente, no

que respeita designadamente à qualidade das águas, ao assoreamento da albufeira, evolução do leito a jusante e alteração dos níveis freáticos, e a aspectos ecológicos, climáticos, paisagísticos, histórico-culturais e arqueológicos;

- *Segurança hidráulico-operacional* a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento hidráulico-operacional dos órgãos de segurança e exploração, incluindo os respectivos equipamentos.

A palavra *risco* encerra aspectos negativos ligados ao seu significado etmológico: “situação que ameaça a existência ou os interesses de uma pessoa ou de uma coisa”, portanto constitui causa de aversão na população em geral e induz resistência à sua utilização por parte do meio técnico científico (BAPTISTA, 2009).

A Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010) não definiu *risco*, entretanto, em seu texto, há várias ocorrências desta palavra nos contextos: *gestão de risco*; *mitigação de risco*, *minimização de risco*, *risco imediato* e *categoria de risco*; estando esta última composição sempre relacionada à classificação das barragens. Por esse motivo, o vocábulo merece, naturalmente, destaque particular.

Segundo Baptista (2009), a palavra *risco* entrou para a terminologia da engenharia de barragens muito antes da aplicação a esta área dos conceitos de gestão de riscos, sendo natural que se encontre, em várias fontes bibliográficas, significados distintos para o *risco*. No entanto, estes significados foram evoluindo com o tempo, assumindo atualmente um consenso, quase generalizado, que traduz *risco* como o produto da probabilidade de ocorrência de ruptura pelas respectivas consequências.

As probabilidades são utilizadas em análises de *risco*, como na engenharia em geral, como uma medida das incertezas, podendo significar: função das incertezas em causa, frequência ou grau de convicção. A interpretação enquanto frequência descreve o número relativo de vezes que se obtém um determinado resultado numa série longa de repetições, em iguais circunstâncias, de uma determinada experimentação e assume, implicitamente, que não se podem estimar probabilidades de eventos únicos ou de estados da natureza (que são constantes e não variáveis aleatórias) (BAPTISTA, 2009).

Na engenharia de barragens é muito difícil uma avaliação rigorosa do *risco* associado à ocorrência de um cenário de acidente, com liberação total ou parcial do volume acumulado no reservatório, quer no que diz respeito à avaliação da probabilidade da sua ocorrência quer quanto às consequências. Assim, o *risco* é geralmente avaliado (quantificado) por métodos simplificados (CIGB (1982); FUSARO (1999); ANDERSEN *et al.* (2001);

KUPERMAN *et al.*(2001); MENESCAL *et al.* (2001); USBR (2001)), ou seja, métodos que não quantificam matematicamente o risco, apenas atribuem pesos intuitivos a um conjunto de parâmetros. Menescal *et al.* (2001) esclarecem:

“Como se pode observar o Potencial de Risco obtido é qualitativo, apesar da representação numérica, pois não foi calculado utilizando procedimentos estatísticos”. MENESCAL *et al.* (2001).

Em Portugal a primeira edição do RSB (1990) introduziu os conceitos de *risco potencial* e *risco efetivo*. Risco potencial é definido como sendo o valor econômico das consequências de um acidente, independente da probabilidade de sua ocorrência, cujas consequências são avaliadas considerando as perdas de vidas e danos nas propriedades. O risco efetivo é definido como o produto do risco potencial e a probabilidade de ocorrência de um acidente associado. A revisão do RSB, no ano de 2007, trouxe alterações nesta terminologia visando a uniformização do significado. *Risco potencial* foi substituído por *danos potenciais* e *risco efetivo* por *risco de acidente ou incidente*.

Em função do aumento da sua popularidade e aplicações em diferentes contextos disciplinares, definições diferentes têm surgido, tornando vulnerabilidade outro termo bastante impreciso.

Pode-se compreender a vulnerabilidade como o grau de susceptibilidade ou de fragilidade de um sistema aos efeitos negativos ao qual é exposto (METZGER *et al.* 2006; SCHOTER *et al.* 2004), isto é, sua resposta ao risco.

A vulnerabilidade pode ser definida como fator de risco interno de um sujeito ou sistema expostos a um perigo, por sua disposição intrínseca ao ser afetado ou ser suscetível a danos (CARDONA, 2003).

Vulnerabilidade é a suscetibilidade à materialização de estados limite ou de consequências, decorrente, no essencial, de fatores intrínsecos do subsistema ou sistema em questão (BAPTISTA, 2009).

A vulnerabilidade pode ser definida como uma condição, pré-existente, no sistema, cujas características e propriedades aumentam o risco de susceptibilidade a um impacto negativo (FUCHS; KUHLCHE; MEYER, 2011).

Em geral, o conceito de vulnerabilidade vai além do conceito de risco, já que inclui uma capacidade de adaptação. Assim, vulnerabilidade refere-se, principalmente, a um conceito dinâmico, em um determinado período de tempo (SCHOLZ; BLUMER; BRAND, 2012).

Segundo Gallopin (2006) é importante definir quais perturbações são o foco do estudo da vulnerabilidade, uma vez que um sistema pode ser vulnerável a um tipo de perturbação, enquanto a outras não apresentar susceptibilidade.

O Quadro 1 apresenta uma compilação dos principais termos, e respectivos significados, necessários à compreensão dos capítulos seguintes.

QUADRO 1 - Glossário de alguns vocábulos afins à gestão de risco de barragens.

Termo/ Expressão	Significado/ Conceitos	Fonte
Acidente	Ocorrência excepcional cuja evolução não controlada é susceptível de originar uma onda de inundação;	Portugal (2007)
Ameaça	Estimativa de ocorrência e magnitude de um evento adverso, expressa em termos de probabilidade estatística de concretização do evento e da provável magnitude de sua manifestação.	PNDC (2007)
Análise de riscos	É o processo conducente à estimativa do risco. Trata-se de uma atividade que exige a compreensão pormenorizada do sistema, subsistemas, e/ou componentes afins e das suas respectivas iterações.	Baptista (2009)
Apreciação de riscos	Ponderação e julgamento do significado do risco.	Baptista (2009)
Avaliação de riscos	Consiste no conjunto das atividades de análise de riscos e de apreciação de riscos.	Baptista (2009)
Causa	Aquilo ou aquele que faz com que uma coisa exista. Aquilo ou aquele que determina um acontecimento. Razão, motivo, origem.	Holanda (2000 apud Menescal et al 2005)
Catástrofe	Ocorrência excepcional que provoca vítimas e danos sociais, materiais e ambientais, ultrapassando a capacidade da comunidade atingida para lhe fazer face. Catástrofe é um acontecimento extraordinário, incontrolado e extremo, que requer uma ação urgente para combatê-lo ou minimizar os seus efeitos desastrosos ou muito perigosos para a população, os bens e propriedades e/ou o ambiente natural ou construído, manifestando-se subitamente ou se desenvolvendo com certa velocidade.	Portugal (2007). Steiger, citado por Milaré e Benjamim (1994)
Confiabilidade	Propriedade de desempenho satisfatório de um dado elemento do empreendimento.	CBDB-NRSP apud Menescal (2005)
Consequências	Perdas e prejuízos resultantes da ocorrência de ruptura, que podem ser tangíveis (visíveis e de alguma forma mensuráveis) ou intangíveis (visíveis, mas não mensuráveis)	Baptista (2009)
Dano	<ul style="list-style-type: none"> • Medida que define a intensidade ou severidade da lesão resultante de um acidente ou evento adverso. • Perda humana, material ou ambiental, física ou funcional, que pode resultar, caso seja perdido o controle sobre o risco. • Intensidade das perdas humanas, materiais ou ambientais, induzidas às pessoas, comunidades, instituições, instalações e/ou ecossistemas, como consequência de um desastre. 	PNDC (2007)
Dano Potencial	Consequências de um acidente, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, as quais podem ser graduadas de acordo com as vidas humanas, bens e ambiente afetados.	Portugal (2007)

QUADRO 1 – (cont.)

Desastre	Resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais.	CASTRO, 1999
Falha	Deficiência com capacidade para comprometer a função atribuída a um determinado componente elementar (ou eventualmente a um subsistema).	Baptista (2009)
Gestão de risco	Desenvolvimento integrado de ações de avaliação de riscos (análise de riscos e apreciação de riscos) e de controle de riscos (decisão, mitigação, prevenção, detecção, planejamento de emergência, revisão e comunicação).	Baptista (2009)
Incidente	Anomalia susceptível de afetar, a curto ou longo prazo, a funcionalidade da obra e que implica a tomada de medidas corretivas;	Portugal (2007)
Risco	Medida da probabilidade e da severidade de uma ocorrência com consequências humanas, socioeconômicas ou ambientais adversas.	Baptista (2009)
Ruptura	Perda de capacidade de uma estrutura para cumprir os requisitos de segurança ou de funcionalidade.	Baptista (2009)
Onda de inundação	Onda de cheia resultante de um acidente que pode provocar perdas de vidas humanas, bens e ambiente.	Portugal (2007)
Perigo	Uma condição, situação ou característica com potencial de causar consequências indesejáveis. As definições de perigo incluem: consequências indesejáveis, efeitos adversos, perdas, acidentes, dano a pessoas, propriedades e meio ambiente.	Menescal (2005)
Segurança	Estado de confiança, individual ou coletivo, baseado no conhecimento e no emprego de normas de proteção e na convicção de que os riscos de desastres foram reduzidos, em virtude de terem sido adotadas medidas minimizadoras	PNDC (2007)

3 CAUSAS DE RUPTURA DE BARRAGENS

As estatísticas, apresentadas neste capítulo, auxiliarão no desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho, através do conhecimento das vulnerabilidades associadas a cada obra.

O Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) discrimina três tipos de barragens:

- barragens de aterro (de terra – TE e de enrocamento – ER);
- barragens de concreto (gravidade – PG, de contrafortes – CB, em arco – VA ou multi arco - MV (M);
- barragens de alvenaria (gravidade PG(M), de contrafortes – CB(M) e multi-arco – MV(M).

Um dos primeiros levantamentos sistemáticos sobre rupturas históricas foi realizado pelo ICOLD (1983), neste estudo foram analisados 108 casos de acidentes, com ruptura de barragens. Com base nesta compilação de registros, Almeida (1983 apud Viseu, 2008) realiza uma análise que distribui as rupturas históricas a partir das características da barragem (Quadro 2).

QUADRO 2 - Distribuição da percentagem de barragens e da percentagem de rupturas segundo a altura e tipo da barragem.

Altura (m)	Distribuição da percentagem de barragens por altura (ICOLD, 1983) ⁽¹⁾			Distribuição da percentagem de rupturas por altura (Almeida, 1983) ⁽²⁾
	Todos os tipos (%)	Concreto e alvenaria (%)	Aterro (%)	Todos os tipos (%)
5 - 15	15,6	13,8	86,2	7
15 - 30	53,4	25,5	74,5	61
30 - 50	19,7	49,6	50,4	17
50 - 100	9,6	63,6	36,4	12
≥ 100	1,7	56,2	43,8	1
desconhecida	-	-	-	2
Total	100	32,6	67,4	100
Tipo	Distribuição da percentagem de barragens por tipo (ICOLD, 1983)		Distribuição da percentagem de rupturas por tipo (Almeida, 1983)	
Aterro	67,4		76	
Concreto e alvenaria	32,6		17 + 7	

FONTE: Almeida (1983, apud Viseu, 2008).

(1) em um universo de 14700 grandes barragens

(2) em um universo de 108 rupturas históricas

A análise do Quadro 2 permite concluir que, no que se refere à distribuição por alturas, em termos absolutos as rupturas predominam na faixa dos 15-30m. Sendo que a esta faixa de alturas corresponde ao maior número de barragens em serviço (cerca de 3/4).

No Boletim 99 (ICOLD, 1995) o mesmo organismo realiza, através de análise estatística, uma compilação mais completa e atualizada sobre rupturas históricas de 169 barragens. Este trabalho tornou possível atualizar e comprovar as conclusões tecidas em 1983, tendo-se comprovado que, em termos absolutos, a maior parte das rupturas envolve barragens de aterro na faixa dos 15-30m de altura.

Além dos estudos publicados pelo ICOLD, outros estudos, que buscam agrupar as ocorrências de ruptura com base em determinadas características (altura, idade, material de construção, etc), têm sido divulgados na bibliografia. Sobre esta temática, podemos citar as compilações realizadas por:

- Hirschbberg *et al.* (1996) *apud* Viseu (2006), ver Quadro 3, com valores de frequências anuais de ruptura para diferentes tipos de barragens;
- Middlebrooks (1952) *apud* Sandroni (2006), que demonstram listas de incidentes em barragens dos EUA;
- Charles e Boden (1985) *apud* Sandroni (2006), listagem de incidentes no Reino Unido;
- Foster *et al.* (1998), compilaram dados de incidentes em grandes barragens no mundo;
- Reagan (2010), relaciona a ocorrência de incidentes à idade das barragens, para 1158 barragens de todos os tipos com idades conhecidas.

Menescal (2009) apresenta um levantamento de 166 acidentes e incidentes ocorridos no Brasil, indicando suas causas, no entanto o levantamento não apresenta as características técnicas (tipo de material de construção, altura, idade, etc) destas obras o que impossibilita a elaboração de estatísticas relacionadas.

QUADRO 3 - Frequência anual média de ruptura por tipo de barragem.

Tipo de barragem	Frequencia anual de ruptura
Terra	$1,9 \times 10^{-4}$
Enrocamento	$1,8 \times 10^{-4}$
Contrafortes	$1,2 \times 10^{-4}$
Concreto gravidade	$1,6 \times 10^{-5}$
Abóbada	$4,5 \times 10^{-5}$

FONTE: Hirschbberg et al (1996 apud Viseu 2008).

Interessante notar, no Quadro 3, que mesmo quando se considera, isoladamente, as barragens de aterro, estas frequências variam, por exemplo as barragens de enrocamento, apresentam frequência anual de ruptura inferiores às barragens de terra, o mesmo acontece para barragens de concreto.

Para Foster et al. (1998), sobre barragens de aterro, um dos fatores que contribuem para estas estatística é o fato de as barragens de enrocamento (por exemplo, terra com enrocamento, enrocamento com núcleo argiloso, enrocamento com face de concreto e enrocamento com núcleo em parede) terem baixa probabilidade de rupturas por todos os modos de *piping*. Nesse tipo de barragem, há alta proporção de casos de acidentes, mas menos prováveis em se progredir para brecha, se comparado às seções com solo a jusante. Isso se deve à estabilidade e à grande capacidade de fluxo de descarga dos materiais de enrocamento.

Dependendo do tipo, uma barragem pode romper por múltiplas causas, adicionalmente, a forma da brecha e tempo de ruptura também variam de acordo com o tipo. Por exemplo, barragens de concreto gravidade tendem a apresentar, durante a ruptura, brechas parciais em uma ou mais seções monolíticas enquanto barragens de concreto em arco tendem a romper subitamente e completamente. Em contraste, as barragens de aterro usualmente não rompem subitamente ou completamente, pois a formação da brecha ocorre através de um processo erosivo (Canadian Dam Association, 2007).

FEMA (2013) apresenta as causas mais comuns de rupturas de barragens entre os anos de 1975 e 2011, Quadro 4.

QUADRO 4 - Causas de ruptura de barragens 1975-2011.

Causas de ruptura	Número de rupturas	Porcentagem de rupturas
Galgamento ou transbordamento	465	70,9%
Piping	94	14,3%
Estrutural	12	1,8%
Humano (relacionado)	4	0,6%
Animais (atividade)	7	1,1 %
Vertedouro	11	1,7%
Erosão/escorregamento/instabilidade	13	2,0%
Desconhecido	32	4,9%
Outros	18	2,7%
Total	656	

FONTE: FEMA (2013).

Supõe-se geralmente que os primeiros anos de vida de uma barragem são os mais perigosos e os dados confirma essa hipótese. Reagan (2010) relacionou 1158 casos de incidentes em barragens, em 84 países, ao período de vida da obra em que ocorreram.

Cerca de 31% dos incidentes de segurança de barragens, analisados por Reagan (2010), ocorreu durante a construção ou os primeiros cinco anos de vida (Figura 1). Entre os tipos de barragens, houve uma variação estatisticamente significativa em certos tipos de barragens, com 18% das barragens de gravidade e 29% de barragens abóbada vivenciando incidentes dentro dos primeiros cinco anos, enquanto 42% das barragens de terra e barragens de enrocamento sofreram incidentes durante a construção ou nos primeiros cinco anos.

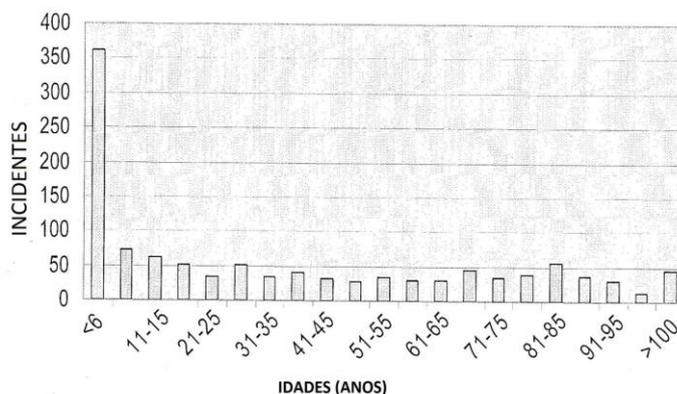


FIGURA 1 - Número de incidentes em função da idade das barragens (REAGAN, 2010).

Na Figura 1, os dois períodos de cinco anos com o maior número de incidentes após os primeiros cinco anos de funcionamento foram 6 a 10 anos de idade, com 72 incidentes e 11 a 15 anos de idade, com 61 ocorrências. No entanto, o terceiro mais alto foi de 81 a 85 anos de idade, com 55 ocorrências. No extremo, 46 incidentes ocorreram em barragens com mais de 100 anos (REAGAN, 2010).

É possível perceber, na literatura consultada que, para além do tipo, a altura e a idade das barragens são as principais características técnicas adotadas para estabelecer relações ou estatísticas referentes a rupturas. São inexpressíveis, ou apenas complementares, os registros que relacionem, por exemplo, estas ocorrências ao comprimento (extensão medida pelo coroamento).

3.1 Rupturas de barragens de aterro (terra e enrocamento)

De acordo com os Boletins 99 (ICOLD, 1995) e 109 (ICOLD, 1997) do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) as principais causas de rupturas de barragens de terra são:

- a) Erosões por transbordamento ou galgamento, causado por capacidade inadequada de vertedouros, ou pelo não funcionamento de seus órgãos de controle;

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

Estudos conduzidos por Middlebrooks (1952 *apud* ECYWA, 2007) sobre as causas do rompimento de 220 barragens de terra, no período compreendido de 1850 a 1950, resumem as causas observadas e sua frequência de ocorrência (Quadro 5).

QUADRO 5 - Causas de rupturas de barragens de terra no período 1850- 1950.

Causa	Mecanismo	% do total
Transbordamento	cheia	30%
– Piping/ erosão interna pelo aterro ou fundação	Percolação, piping e erosão interna	25%
– Vazamento de canalização		13%
– Dano/ ruptura de membrana de montante/ pavimentação de talude		5%
Instabilidade de taludes do maciço	vários	15%
Diversos	vários	12%

FONTE: Middlebrooks (1952).

A probabilidade de ruptura das barragens de aterro pode variar ao longo da vida útil da estrutura, sendo mais elevada durante o seu primeiro enchimento. Cerca de metade das rupturas de barragens ocorreram neste período (Baecher e Chistian, 2000, *apud* Caldeira, 2008). As restantes verificaram-se, de uma forma mais ou menos distribuída, ao longo de toda a fase de exploração da estrutura.

Das rupturas catalogadas por Middlebrooks é interessante notar que 50% ocorreram durante os primeiros 5 anos de operação e que 19% romperam após o primeiro enchimento (Quadro 6).

QUADRO 6 - Idade das barragens quando da ocorrência de ruptura.

Idade	Causa da Ruptura				Total
	Transbordamento	Vazamento de canalização	Percolação	Escorregamento	
0 - 1	9	23	16	29	19 %
1 - 5	17	50	34	24	31 %
5 -10	9	9	13	12	11 %
10 - 20	30	9	13	12	16 %
20 - 50	32	9	24	23	22 %
50 -100	3	0	0	0	1 %

FONTE: Middlebrooks (1952).

No Quadro 7 (SANDRONI, 2006) estão indicadas as incidências constatadas em quatro diferentes estudos. Alguns aspectos interessantes se manifestam de imediato:

- a percolação é responsável por 38 a 55% dos acidentes;
- os galgamentos ocupam o segundo lugar, respondendo por 24 a 42% dos acidentes;
- percolação e galgamento juntos são responsáveis por 70 a 80% dos acidentes;
- há acidentes difíceis de enquadrar (note-se o modo "outros" colocado junto com erosão).

QUADRO 7 - Incidências das causas de acidentes em barragens de terra e enrocamento.

Causa		Justin (1932) – 100 acidentes	Middlebrooks (1952) – 220 acidentes	Blind (1983) 267 acidentes	Charles & Boden (1985) 100 acidentes
Percolação		48%	38 %	39%	55 %
Instabilidade		5%	15 %	10%	14 %
Erosão	Galgamento	39%	30 %	42%	24 %
	outros	8 %	17 %	9%	7 %

FONTE: SANDRONI (2006).

Historicamente, segundo Fell et al. (2000, apud Caldeira, 2008), a erosão interna é responsável por 47% das rupturas de todas as barragens de aterro e por 54% das barragens construídas após 1950.

As frequências mais elevadas de rupturas por *piping* através do corpo do aterro ocorreram em barragens com perfis com controle pouco eficiente da percolação, salientando-se as barragens de terra homogêneas (com uma frequência de ruptura cerca de 5 vezes superior ao valor médio apresentado pelo conjunto de todas as barragens). Constatou-se, igualmente, a existência de um grande número de incidentes em barragens de terra e enrocamento, com núcleo central, os quais não progrediram para a ruptura.

3.2 Rupturas de barragens de concreto

Na literatura da especialidade, os dados e estatísticas referentes a rupturas de barragens de concreto são mais escassos e reportam-se, em geral, a três tipos principais: gravidade, arco e contrafortes. Para as barragens de concreto compactado a rolo CCR, cujo desenvolvimento de tecnologias construtivas só se deu, mundialmente a partir da década de 60, não existem estatísticas relevantes.

Estatísticas elaboradas por Schnitter (1979, apud NRC, 1983), para barragens maiores que 15m de altura, mostram que a maioria das rupturas de barragens de concreto, ocorridas entre os anos de 1900-1975, tiveram como causa problemas nas fundações, Figura 2.

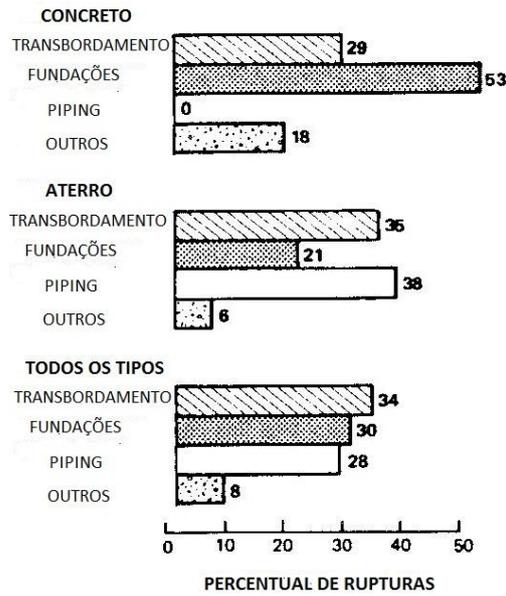


FIGURA 2 - Causas das rupturas de barragens de concreto e aterro, modificado de Schnitter (1979, apud NRC, 1983).

A Figura 3 mostra a incidência das causas de ruptura em função da idade, para barragens de terra e concreto com alturas maiores que 15m, verifica-se que, para ambos os tipos, as rupturas devidas à fundação ocorrem relativamente cedo, enquanto que as rupturas devido a outras causas podem levar mais tempo para se materializar.

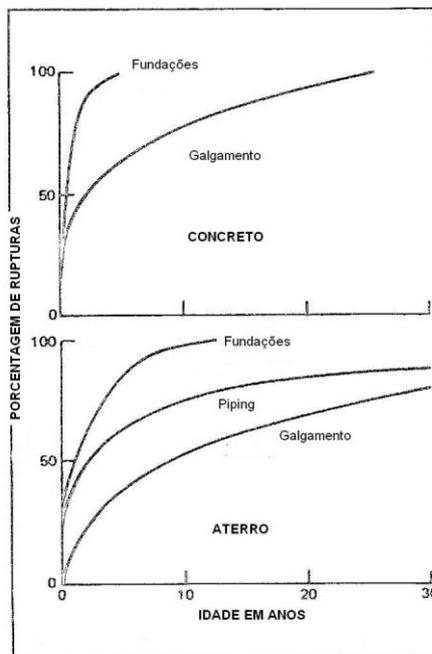


FIGURA 3 - Causas de ruptura em função da idade, Schnitter (1979 apud NRC, 1983).

O Quadro 8, compilado em NRC (1983) a partir de *Lessons from Dam Incidents, USA* (ASCE/ USCOLD 1975), apresenta as principais causas de rupturas e acidentes verificados nos principais tipos de barragens de concreto.

QUADRO 8 - Causas de acidentes e rupturas em barragens de concreto.

	BARRAGENS DE CONCRETO						TOTAL		
	Arco		Contrafortes		Gravidade		R	A	R&A
	R	A	R	A	R	A			
Transbordamento	2	1			3	2	6	3	9
Erosão por fluxo	1		1		1		3		3
Fundações (infiltração, piping)	1	1	1		2	5	5	6	11
Escorregamento							2		2
Deformação		2	2					2	2
Deterioração		3		2		1		6	6
Falha na construção					2		2		2
Falha das comportas					1	2	1		3
TOTAL	4	7	7	2	11	10	19	19	38

FONTE: NRC (1983)

A- Acidentes

R- Rupturas

No Brasil a técnica do concreto compactado à rolo (CCR) se generalizou a partir dos anos 80. A primeira barragem brasileira totalmente construída de CCR, e também a primeira barragem de CCR em arco construída no mundo, foi a barragem de Saco de Nova Olinda, localizada na Paraíba, concluída em 1986 (ANDRIOLO, 1998). Por esta ser uma tecnologia relativamente recente, ainda não existe um número significativo de informações capazes de gerar estatísticas relacionadas a ruptura deste tipo de barragem.

4 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS BASEADA NO RISCO

Para fins de aplicações de legislações e regulamentos, as barragens são geralmente classificadas em função de suas dimensões (“*dam size classification system*”, na terminologia anglo-saxônica), entretanto a classificação das barragens também poderá ser baseada no risco (“*dam hazard classification system*”, na terminologia anglo-saxônica) e levar em conta os seguintes fatores:

- fatores relativos à ruptura da barragem, tais como ocorrências excepcionais (cheias, terremotos, escorregamentos, etc), vulnerabilidade da barragem (projeto, construção, operação e manutenção) e eficácia do controle de segurança (inspeções, testes e monitoramento);
- fatores relativos ao dano potencial, associado a geração e propagação de onda de cheia no vale à jusante, bem como à ocupação do vale na zona atingida e eficiência dos programas de proteção civil em situações de emergência.

As classificações baseadas no risco são apropriadas para graduar o nível das exigências quanto ao controle de segurança e medidas de proteção civil a serem impostas pelas regulamentações de segurança de barragens. Esta graduação, deve ter como objetivo principal o de garantir um baixo risco a pessoas e propriedades e evitar medidas de segurança injustificáveis para barragens que apresentem baixo risco.

A área afetada pela onda de cheia deve cobrir a região onde a altura e velocidade da onda sejam tais, que ponham em perigo vidas e propriedades. Os limites dessa área podem ser definidos baseados na utilização de modelos de simulação do processo de propagação de cheias induzidas pela ruptura de barragens, tais como: modelos hidrodinâmicos (unidimensionais e bidimensionais), modelos simplificados (analíticos ou baseados em equações empíricas de previsão) (VISEU, 2008) ou através de abordagens que utilizam mapas de inundação simplificados, para o caso de pequenas barragens (ECYWA, 2007). Estas áreas podem ainda ser divididas em zonas, com base na identificação das zonas onde a cheia tem características mais destrutivas, com diferentes medidas e responsabilidades, em caso de acidente. (PORTUGAL, 2007).

DSO-99-06 (USB, 1999) apresenta uma metodologia para a estimativa do número de fatalidades resultantes da ruptura de barragens. Segundo o mesmo, o fator preponderante para a classificação em função do perigo deve ser a probabilidade de perda de vidas humanas, esta probabilidade é influenciada por três fatores: taxa de ocupação humana na área afetada, nível de aviso fornecido à população exposta e severidade da cheia. A

ocupação pode ser caracterizada de forma direta, pelo número de pessoas, ou indireta, pelo número de residências e infraestruturas (hotéis, escolas, rodovias, indústrias, etc).

De um modo geral, no Quadro 9, há uma tendência de que a regulamentação de alguns países europeus adotem 3 classes de perigo (alta, significante e baixa), embora também se adotem, com menor frequência, 2, 4 ou mais classes. Os critérios para a adoção das classes refletem, entre outras coisas, diferentes características, experiência e cultura de cada país.

A consulta à legislação internacional permitiu constatar que, as classificações baseadas nas dimensões das barragens são utilizadas para definir o escopo e âmbito de aplicação das legislações podendo, posteriormente, serem complementadas pela classificação por perigo.

QUADRO 9 - Regulamentação de segurança em alguns países europeus.

País	Regulamentação quanto ao controle de segurança	Medidas de Proteção Civil	
		Classificação de Perigo	Análise Dam –Break e plano de emergência
Austria	$H \geq 15\text{m}$ ou $V \geq 500.000 \text{ m}^3$	-	(3)
Finlândia	Todas	3 classes	(3)
França	$H \geq 20\text{m}$ ⁽¹⁾	-	$H \geq 20\text{m}$ e $V \geq 15.000.000 \text{ m}^3$
Alemanha	$H \geq 5\text{m}$ e $V \geq 100.000 \text{ m}^3$ ⁽¹⁾ .	-	(4)
Itália	$H \geq 15\text{m}$ ou $V \geq 1.000.000 \text{ m}^3$ ⁽²⁾	-	(5)
Holanda	-	-	-
Noruega	Todas	5 classes	Para as classes 2, 3 e 4
Portugal	$H \geq 15\text{m}$ ou $V \geq 100.000 \text{ m}^3$ ^{(1),(2)}	3 classes	(3)
Romênia	Legislação específica de acordo com as classes de dimensão.	-	$H \geq 10\text{m}$ e $V \geq 10.000.000 \text{ m}^3$
Eslovênia	$H \geq 15\text{m}$ ou $H \geq 10\text{m}$ e $V \geq 1.000.000 \text{ m}^3$	-	(3)
Espanha	$H \geq 15\text{m}$ ou $10 \leq H < 15\text{m}$ e $V \geq 1.000.000 \text{ m}^3$	3 classes	classes A e B
Suécia	Todas	4 classes	(3)
Suíça	$H \geq 10\text{m}$ ou $H \geq 5\text{m}$ e $V \geq 50.000 \text{ m}^3$ ou ⁽¹⁾	-	$V \geq 2.000.000 \text{ m}^3$ ou (3)
Reino Unido	$V \geq 25.000 \text{ m}^3$	-	(3)

FONTE: Modificado de ICOLD Euroclub 2008.

H – altura

V – volume

(1) outro critério

(2) regras simplificadas para pequenas barragens

(3) Barragens “muito grandes” ou de risco “alto”

(4) requerimentos e normas legais não prevêm a elaboração de planos

(5) barragens sujeitas a legislação

A seguir são apresentados alguns esquemas regulatórios, com foco na classificação do perigo quanto às consequências de inundações à jusante.

4.1 Finlândia

Na Finlândia, segundo relatório do ICOLD EuroClub (2013), a legislação de segurança abrange todas as barragens, independentemente de sua altura. Isto inclui as barragens de cursos de água, aterros, barragens de rejeitos de inundação e barragens de resíduos que são usadas para acumular líquidos ou sólidos que são nocivos ou perigosos à saúde ou ao meio ambiente.

A primeira Lei de Segurança de Barragens e Decreto foram promulgadas em 1984. Em 1985 foram publicadas as primeiras orientações para a concepção, construção, operação e fiscalização de barragens (Código de Prática de Segurança de Barragem). O enquadramento legal da segurança de barragens foi reformado e a nova Lei de Segurança de Barragens (*Dam Safety Act 494/2009*) foi promulgada em 2009 e o novo Decreto do governo (*Government Decree on Dam Safety 319/2010*), em 2010. Além disso, o novo Guia Dam Safety foi publicado em 2012, pelo *Häme Centre for Economic Development, Transport and the Environment*, e também será traduzido para o inglês e sueco.

O Guia Dam Safety explica e descreve em detalhes o conteúdo da Lei de Segurança de Barragens e o Decreto do governo sobre Segurança de Barragens. O guia contém recomendações sobre como atender as exigências da legislação de segurança de barragens e dá algumas orientações gerais, por exemplo sobre planejamento, projeto, construção, operação, inspeção e manutenção de uma barragem.

As Barragens são classificadas pelo tipo de perigo que representam, se ocorrer um acidente:

- Classe 1 barragem, que no caso de acidente, causa perigo para a vida e a saúde humana (perda de vidas ou ferimentos graves) ou perigo considerável para o meio ambiente ou bens (destruição).
- Classe 2 barragem, que em caso de acidente, pode causar perigo para a saúde, mas não perigo para a vida, e perigo para o ambiente ou bens (danos).
- Classe 3 barragem, que em caso de acidente, pode provocar apenas perigo (danos temporários) ao ambiente.

A classificação barragem em classe 1 é sempre confirmada com base em uma análise de risco de ruptura da barragem.

A autoridade de segurança de barragens decide sobre a classificação de uma barragem com base na documentação fornecida pelo proprietário da barragem. A classificação não é necessária se a autoridade de segurança de barragens considera que a barragem não causa qualquer perigo. Todas as barragens, incluindo barragens não classificadas, têm que ser mantidas em condições seguras. O proprietário da barragem é sempre responsável pela barragem.

4.2 França

Na França, segundo relatório do ICOLD European Club (2013), o Ministério da Ecologia, da Energia, do Desenvolvimento Sustentável e do Mar (MEEDDM) tem a responsabilidade pela segurança de barragens. A legislação é composta pelos decretos ministeriais: Decree on hydraulic structures safety (11/12/2007), Details on owners' obligations (29/02/2008), Risk analysis (Etudes de Dangers - EDD) (12/06/2008), Incident declaration (EISH) (21/05/2010) e Certification for engineering offices (18/02/2010 e 7/04/2011). Estes decretos fixam as prescrições com respeito à segurança e seguridade das obras hidráulicas, definem detalhadamente as obrigações dos proprietários e os eventuais prazos para eles atenderem, por exemplo, à obrigação de auscultação (só para certas obras), de emitir relatórios, de fornecer documentos e de organizar inspeções técnicas periódicas.

O decreto de 2007 classifica as barragens em 4 classes de acordo com suas dimensões, conforme o Quadro 10.

QUADRO 10 - Classificação das barragens francesas (French Ministry of Ecology, 2007).

Classe	Características Geométricas
A	$H \geq 20\text{m}$
B	Obra não classificada em A, para a qual $H^2 * \sqrt{V} \geq 200$ e $H \geq 10\text{m}$
C	Obra não classificada em A ou B, para a qual $H^2 * \sqrt{V} \geq 20$ e $H \geq 5\text{m}$
D	Obra não classificada em A, B ou C, para a qual $H \geq 2\text{m}$

Onde:

- H é a altura da obra em metros, definida como a maior altura medida verticalmente entre o coroamento da obra e o terreno natural a jusante;
- V é o volume acumulado em milhões de m^3 e definido como o volume armazenado pela barragem na cota normal. No caso dos diques de canais, o volume considerado é aquele do "bief" entre duas eclusas ou duas obras com comportas.

Os planos de emergência são obrigatórios para barragens com $H \geq 20$ m e $V \geq 15.000.000\text{m}^3$.

As obrigações dos proprietários de barragens são graduadas de acordo com a classe da barragem, Quadro 11.

QUADRO 11 - Obrigações dos proprietários de acordo com as classes de barragens francesas.

Classe da Barragem	A	B	C	D
Visitas técnicas	≤ 1 ano	≤ 2 anos	≤ 5 anos	≤ 10 anos
Relatório de operação	1 ano	≤ 5 anos	≤ 5 anos	não
Manuais de instruções de vigilância; de inundação	Sim	Sim	Sim	-
Relatório de monitoramento	2 anos	≤ 5 anos	≤ 5 anos	não
Avaliação de segurança deca anual, incluindo exame técnico in loco	10 anos	não	não	não
Análise de Risco	sim	sim	não	não

FONTE: Mériaux et al (2013).

4.3 Noruega

Segundo o relatório do ICOLD European Club (2013), os primeiros regulamentos para a segurança de barragens na Noruega foram emitidos em 1981, com foco em requisitos técnicos para construção de barragens. Na década de 1990, foram introduzidos requisitos de controle interno, classificação e qualificações para os proprietários de barragens. Em 2001, o quadro jurídico para a segurança de barragens foi revisado e três novos regulamentos foram emitidos com base legal na Lei de Recursos Hídricos.

Em janeiro de 2010, foi emitido um novo regulamento sobre segurança de barragens e outras estruturas hidráulicas, com base legal na Lei de Recursos Hídricos. Este regulamento substitui os regulamentos anteriores emitidos em 2001, bem como os requisitos para proteção de barragens contra a guerra e as ações terroristas que tinham uma base legal na Lei de Energia e na Lei de Defesa Civil. Todas as exigências relativas à segurança de barragens foram, assim, reunidas em um único regulamento, o regulamento de segurança de barragens de 2010. Existem requisitos para qualificações (de proprietário de barragem, pessoal, consultores e empreiteiros), organização dos proprietários de barragens (presença e responsabilidade do pessoal-chave), de classificação, de projeto, construção e operação. Além da regulamentação de segurança de barragens de 2010, existem várias orientações técnicas sobre segurança de barragens.

A Lei de Recursos Hídricos é aprovada pelo parlamento norueguês, enquanto a regulamentação de segurança da barragem é aprovada por Decreto Real. Ao Ministério do

Petróleo e Energia é dada a responsabilidade pela publicação da regulamentação, enquanto o Diretório Noruegues de Recursos Hídricos e Energia (NVE) têm a autoridade executiva para administrar a regulação. O NVE também é responsável por desenvolver diretrizes, que se estendem as exigências do regulamento, e por supervisionar as barragens e os proprietários de barragens.

As barragens são classificadas, de acordo com as consequências de uma eventual ruptura, em cinco classes de acordo com conseqüências em caso de falha, e as exigências são dadas de acordo com a classe conseqüência. Assim, apenas alguns requisitos são obrigatórios para barragens na classe de mais baixa conseqüência (classe 0), enquanto a maioria dos requisitos e também as exigências mais severas são obrigatórios para barragens na classe de mais alta conseqüência (classe 4). Barragens com volume do reservatório <10.000 m³ e altura da barragem <2 m são automaticamente colocados em conseqüência classe 0 (conseqüências menores), o Quadro 12 apresenta os critérios para as classes 1 a 4.

O proprietário da barragem é responsável por propor uma classe para cada barragem, e o NVE é responsável por controlar a documentação classificação e aprovar a classe. O proprietário da barragem tem que avaliar as conseqüências diretas para a vida, a propriedade e o meio ambiente, bem como quaisquer efeitos secundários da ruptura da barragem.

QUADRO 12 - Critérios para avaliação de perigo para a vida, a propriedade e o meio ambiente.

Critérios para avaliação de perigo para a vida, a propriedade e o meio ambiente			
Classe	Quantidade de casas	Infraestruturas	Propriedades/ ambiente
4	>150		
3	21 - 150	Rodoviária / ferroviária com tráfego pesado, outras infra-estruturas de elevada importância para a vida e saúde	Grandes danos a valores ambientais / propriedades muito importantes
2	1 - 20	Rodoviária / ferroviária com tráfego médio, outras infra-estruturas de elevada importância para a vida e saúde	Grandes danos a valores ambientais / propriedades importantes
1	< 1	Rodoviária / ferroviária com tráfego baixo, outras infra-estruturas de elevada importância para a vida e saúde	Grandes danos a valores ambientais / propriedades.

FONTE: ICOLD European Club (2013, p. 15).

Para as barragens de classes 2 a 4 é obrigatória a apresentação de planos de ações emergenciais baseados em estudos de “*dambreak*”.

4.4 Portugal

O primeiro documento legal português a tratar de segurança de barragens data de 1968. Atualmente, o principal documento vinculativo sobre segurança de barragens é o Regulamento Português para a Segurança de Barragens (RSB), emitido primeiramente em forma de Decreto-Lei, em 1990, e posteriormente revisto e re-emitido em 2007.

Esse regulamento define critérios para o controle de segurança e estipula medidas de proteção civil para a população localizada a jusante de uma barragem. Esse mesmo decreto criou a Comissão de Segurança de Barragens (CSB), na qual estão presentes entidades e órgãos responsáveis pela regulamentação e controle de barragens, quais sejam:

- Instituto Nacional da Água (INAG), que é a autoridade que aprova projetos, supervisiona operação e construção de barragens;
- LNEC, que conduz pesquisas e estudos particulares para a autoridade e proprietários; e
- Serviço Nacional de Bombeiros e Proteção Civil (SNBPC), ao qual compete o planejamento de emergência e a coordenação das ações de socorro.

O regulamento se aplica:

- a todas as barragens de altura superior a 15m, medida desde a parte mais baixa da fundação até o coroamento;
- a barragens de altura inferior a 15m cujos reservatórios possuem capacidade maior que 100.000 m³;
- a outras barragens com risco potencial elevado ou significativo.

Para as barragens menores, que não se enquadram no regulamento, existe o “Regulamento para Pequenas Barragens”.

O RSB publicado em outubro de 2007, pelo Decreto-Lei nº. 344/2007, define que as barragens devem agrupar-se em função dos danos potenciais a elas associados, sendo consideradas três classes de barragens definidas em função da ocupação humana, dos bens e do ambiente existentes:

- a) Classe I: residentes em número igual ou superior a 25;
- b) Classe II: residentes em número inferior a 25, ou infra-estruturas e instalações importantes, ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis, ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas;
- c) Classe III: as barragens restantes.

O RSB determina ainda que, para as barragens classe I, é obrigatória a apresentação do planejamento de emergência contendo, entre outros, o mapa de inundação com a delimitação de “zonas de auto-salvamento” (ZAS). Estas zonas são definidas pela zona do vale, imediatamente a jusante da barragem, na qual se considera não haver tempo suficiente para uma adequada intervenção dos serviços e agentes de proteção civil em caso de acidente e que é definida pela distância à barragem que corresponde a um tempo de chegada da onda de inundação igual a meia hora, com o mínimo de 5 km.

A zonas de auto-salvamento, deverão ser dotadas de sistemas de aviso (sirenes, por exemplo) acionados a partir da barragem.

4.5 Espanha

Na Espanha, segundo relatório do ICOLD European Club (2013), em 16 de janeiro de 2008, foi aprovado o “Real Decreto 9/2008” (RD2008), que modifica o “Reglamento del Dominio Público Hidráulico”, aprovado pelo “Real Decreto 849/1986”, de 11 de abril de 1986. O novo RD2008 inclui um novo título, o VII, que trata de segurança de barragens, reservatórios e açudes. Esse capítulo estabelece como principal objetivo a unificação, em uma mesma norma, dos critérios de segurança a serem aplicados para todas as barragens, independentemente no local onde se encontra e quem seja o seu titular, assim como delimita as competências das administrações em matéria de segurança.

Cabe a “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” (1994), as diretrizes para a classificação das barragens, em função do potencial de risco que podem originar em sua ruptura ou funcionamento incorreto, em uma das seguintes categorias:

- Categoria A (Risco maior): sua ruptura pode afetar gravemente os núcleos urbanos (mais de 5 residências), serviços essenciais ou provocar danos materiais ou danos ao meio ambiente muito importantes;
- Categoria B (Risco intermediário): sua ruptura pode ocasionar danos materiais e ao meio ambiente importantes ou afetar um número reduzido de residências (1 a 5);
- Categoria C (Risco reduzido): sua ruptura pode ocasionar danos materiais de pouca importância e algumas perdas acidentais de vidas humanas.

As barragens, classificadas nas categorias A e B, devem desenvolver e implantar Plano de Emergência, que devem ser apresentados de acordo com alguns períodos:

- Barragens do tipo A – 2 anos depois de aprovada a classificação;
- Barragens do tipo B – 4 anos depois de aprovada a classificação.

4.6 Suécia

Segundo o relatório do ICOLD European Club (2013), a Suécia não possui lei específica sobre segurança de barragens. Em vez disso, vários estatutos diferentes são aplicáveis a barragens e as questões de segurança de barragens. Os regulamentos mais importantes são o Código Ambiental e a Lei de Proteção Civil.

O Código Ambiental aplica-se a todas as barragens, independentemente do tamanho, finalidade e consequências em caso de falha.

O objetivo da Lei de Proteção Civil é dar proteção, contra acidentes, para a vida e a saúde das pessoas, bem como para a propriedade e o meio ambiente em todo o país, levando em consideração as circunstâncias locais. Barragens e outras instalações em que um acidente pode resultar em sérios danos a pessoas ou ao meio ambiente são classificadas como atividades perigosas, com exigências especiais sobre a preparação para emergências.

Os requisitos de segurança de barragens e de gestão de segurança de barragens são definidos em função das consequências de uma falha da barragem, expressas em classes de consequência:

Classe 1A e 1B - uma falha poderia levar à perda de vidas humanas ou grandes danos às instalações sociais importantes, a perda de importantes valores ambientais ou danos econômicos. Categoria 1A refere-se a barragens com uma alta probabilidade de perda de muitas vidas, danos muito graves, etc

Classe 2 - uma falha poderia levar a danos consideráveis às instalações sociais importantes e valores ambientais, ou prejuízos econômicos consideráveis, mas não a perda de vidas humanas.

Classe 3 - a falha da represa não iria levar a danos como descrito anteriormente.

De acordo com a lei de proteção Civil, os planos de ações emergenciais devem ser obrigatórios para barragens de alta consequencia.

4.7 África do Sul

Na África do Sul segundo o *Dam Safety Office* (DSO) do *Department of Water Affairs and Forestry*, as *Dam Safety Regulations* (DSR), foram reeditadas em 2012 e regulamentam a seção 123 do *National Water Act* de 1998. Somente barragens com risco, ou seja, barragens com altura máxima acima de 5m e com volume armazenado acima de 50 mil m³, ou outras barragens declaradas como de risco, estão sujeitas às DSR.

A missão do DSO é promover a segurança de barragens novas e existentes com a segurança adequada de forma a reduzir os danos potenciais para o público, prejuízos às propriedades e qualidade do meio ambiente. A classificação das barragens, em categorias de risco (que podem ser mudadas), é uma das atribuições do DSO e afeta os níveis de controle da segurança relacionados às fases de projeto, construção, início da operação, operação, manutenção, alteração e descomissionamento da barragem.

A associação da classificação por altura, Quadro 13, e a da classificação por dano potencial, Quadro 14, resulta em três categorias de risco, Quadro 15.

QUADRO 13 - Classificação por altura.

Classe de altura	Altura máxima (m)
Pequena	$H < 12m$
Média	$12 \leq H < 30$
Grande	$H \geq 30$

FONTE: REPUBLICA DA ÁFICA DO SUL (2012).

QUADRO 14 - Classificação por dano potencial.

Classe de dano potencial	Perda de vidas	Perdas econômicas	Efeitos ambientais adversos
baixo	nenhuma	mínima	baixa
significante	Não mais que 10 vidas	significante	significante
alto	Mais que 10 vidas	alta	severa

FONTE: REPUBLICA DA ÁFICA DO SUL (2012).

QUADRO 15 - Categorias de classificação de risco.

Classe de altura	Classe de dano potencial		
	baixo	significante	alto
pequena	categoria I	categoria II	categoria II
média	categoria II	categoria II	categoria III
grande	categoria III	categoria III	categoria III

FONTE: REPUBLICA DA ÁFICA DO SUL (2012).

Outras de suas atribuições são: (a) desenvolver, implementar e administrar a legislação e as políticas de segurança barragens; (b) gerenciar o programa de segurança de

barragem; (c) obrigar/apoiar o atendimento da legislação de segurança de barragens pelos proprietários; (d) efetuar análise técnica dos relatórios de avaliação de segurança de barragem e das várias solicitações de licença para construção de novas barragens e reforma e ampliação das existentes. Isto inclui a análise técnica dos relatórios de projeto, desenhos, acompanhamento da construção e relatórios de conclusão, manuais de operação e manutenção e planos de ações emergenciais; (e) auditar e monitorar o progresso feito com programa de segurança de barragem.

4.8 Austrália

A Austrália, como uma união federativa de estados e territórios, trata a segurança de barragem como uma matéria estadual. Isso significa que as regulamentações relevantes podem ser encontradas em nível estadual.

Em Queensland, segundo Queensland Government (2012), as barragens de acumulação de água são reguladas pelo *Water Act 2000* (WA), que substituiu o *Water Resources Act 1989*, e pelo *Water Supply (Safety and Reliability) Act 2008*. Nos termos da Lei, o executivo-chefe do *Department of Environment and Resource Management* (DERM) é responsável pela regulação das barragens atribuíveis em Queensland.

Segundo o WA, uma barragem é incluída no mesmo, se uma avaliação de impacto de ruptura demonstrar que existe uma população a jusante em risco. A Parte 6 do WA solicita que, sejam conduzidas avaliações de impacto de ruptura para barragens que possuam alturas maiores que 8m que tenham capacidade de armazenamento maior do que 500.000 m³, ou ainda, que tenham mais de 8m de altura e tenha capacidade de armazenamento de no mínimo 250.000 m³ e uma bacia de drenagem maior do que três vezes a máxima superfície do espelho d'água no nível de máxima acumulação.

As avaliações de impacto de ruptura são avaliações de segurança da barragem desenvolvidas e certificadas por profissionais de engenharia devidamente registrados, de acordo com as orientações indicadas pelo *Guidelines for Failure Impact Assessment of Water Dams*, elaborado pelo *Department of Energy and Water Supply*. O objetivo da avaliação do impacto de ruptura é determinar a população em risco no caso de ruptura da barragem, assim sendo:

- barragens que têm populações em risco de menos do que 2 pessoas não recebem índice de impacto de ruptura;
- barragens que têm uma população em risco entre 2 e 100 recebem o índice de categoria 1, e ;

- barragens que têm população em risco de mais de 100 pessoas são colocadas na categoria 2.

O proprietário deve custear a preparação e a certificação da avaliação de impacto de ruptura.

4.9 Canadá

No Canadá, segundo a *Canadian Dam Association* (CDA), o gerenciamento de recursos hídricos é de responsabilidade das províncias. Merecem especial destaque aspectos da segurança de barragens da província de Quebec, regida pelo *Dam Safety Act* (DSA), de 2000, e as *Dam Safety Regulations* (DSR), de 2002. Segundo o *Centre d'Expertise Hydrique*, essas regulamentações foram emendadas, em 12 de dezembro de 2008, com alguns ajustes.

As barragens são divididas em dois grupos: alta capacidade e baixa capacidade.

São considerados barragens de alta capacidade:

- barragens de 1,0 metro ou mais de altura, tendo uma capacidade maior do que 1.000.000 m³;
- barragens de 2,5 metros ou mais de altura com uma capacidade superior a 30.000 m³;
- barragens de 7,5 metros ou mais de altura, independentemente da capacidade;
- independentemente da sua altura, barragens associadas ou anexas a uma barragem já classificada, por suas dimensões, como de alta capacidade.

Cada barragem deve ser classificada em função do grau de risco que representa para pessoas e bens, medido através da multiplicação do valor numérico de sua vulnerabilidade (*V*) pelo valor numérico das potenciais consequências de uma falha da barragem (*C*), para a qual "*P*" é o valor atribuído na fórmula " $P = V \times C$ ".

QUADRO 16 - Classes de barragens do estado canadense de Québec.

"P" valor	Classe
$P \geq 120$	A
$70 \leq P < 120$	B
$25 \leq P < 70$	C
$P < 25$	D

FONTE: Québec (2014).

As barragens poderão ainda enquadrar-se em uma quinta classe "E", quando as consequências de uma falha forem muito baixas e $P < 70$.

O valor numérico da vulnerabilidade de uma barragem é medido multiplicando-se a média aritmética dos parâmetros físicos constantes (altura, tipo, capacidade e tipo de

fundação), Quadros 17 a 20, pela média aritmética dos parâmetros variáveis (idade, sismicidade, confiabilidade das estruturas de descarga e condições de conservação), Quadros 21 a 25.

O valor numérico das consequências é definido em função das características de ocupação do vale à jusante, Quadro 26.

QUADRO 17 - Pontuação relativa às alturas (Québec, 2014).

Altura (m)	Pontos
≤ 5	1
10	2
20	3,5
30	4,5
40	5
50	5,8
100	8
160 ou mais	10

QUADRO 18 - Pontuação relativa ao tipo de barragem (Québec, 2014).

Tipo de barragem	Pontos
Concreto em arco	1
Concreto em contrafortes	3
Concreto gravidade	2
Concreto-aterro	3
Barreira de estacas de concreto ou prancha de aço a montante de barragem de terra	6
Terra	10
Estacas de madeira ou aço preenchidas com terra	10
Barragem vertedouro de concreto- soleira livre	7
Enrocamento com face de concreto ou núcleo de terra	3
Enrocamento com vertedor livre	8
Enrocamento vertedor	4
Estacas pranchas de aço	7
Estacas de madeira ou aço preenchidas com rocha	6
Contrafortes de madeira	8
Contrafortes de madeira escorados	9

QUADRO 19 - Pontuação relativa à capacidade (Québec, 2014).

Capacidade (10⁶ m³)	pontos
≤1	1
50	3
1.000	5
2.000	6,5
5.000	8
6.000	10

QUADRO 20 - Pontuação relativa ao tipo de fundação (Québec, 2014).

Tipo de fundação	pontos
Rocha tratada	1
Rocha	2
Till ⁽¹⁾ tratado	3
Till	4
Argila tratada	6
Argila	7
Aluvião tratado	8
Aluvião ou depósitos desconhecidos	10

(1) Till é um material de origem glacial consiste de uma mistura de partículas de tamanho variável, com uma certa porcentagem de finos.

A pontuação, para idades intermediárias, àquelas constantes nos Quadros 21 e 22, deve ser determinada considerando que variam linearmente com os valores das idades.

QUADRO 21 - Pontuação relativa à idade das barragens de concreto (Québec, 2014).

Idade (anos)	pontos
0	1
5	1,5
10	2
20	3
40	7
50	9
55 ou mais	10

QUADRO 22 - Pontuação relativa à idade das barragens de terra (Québec, 2014).

Idade (anos)	pontos
0	8
5	7,5
10	6,5
15	5
20	4
25	3
30	2,5
40	2
50	1,5
60 ou mais	1

QUADRO 23 - Pontuação relativa à sismicidade (Québec, 2014).

Zona sísmica	pontos
1	1
2	1
3	2
4	6
5	8

QUADRO 24 - Pontuação relativa à confiabilidade dos órgãos de descarga (Québec, 2014)

Confiabilidade	Pontos
satisfatória	1
aceitável	5
Insatisfatória ou indeterminada	10

QUADRO 25 - Pontuação relativa às condições da barragem (Québec, 2014).

	condição	pontos
A barragem não mostra evidência de qualquer deficiência ou tem o mínimo de deterioração, considerado normal ou de nenhuma conseqüência.	muito boa	1
A barragem mostra evidências de deterioração apenas leves ou deficiências que não afetam o bom funcionamento dos seus componentes.	boa	3
A barragem mostra evidências de deterioração exigindo reparos, sem no entanto pôr em perigo imediato a estrutura; uma barragem neste estado necessita de manutenção e reparação no futuro imediato ou próximo, sem os quais a barragem iria se tornar cada vez mais vulnerável. A barragem também pode mostrar evidência de deficiências que não afetam a sua segurança imediata, mas que requerem um acompanhamento atento.	aceitável	5
A barragem mostra evidências de deterioração única ou múltipla grave que pode afetar a sua estabilidade ou fazer certas partes inoperável, ou a barragem mostra evidência de deficiências graves susceptíveis de pôr em perigo a sua segurança ou a condição de a barragem não pode ser verificada.	Ruim ou indeterminada	10

QUADRO 26 - Pontuação relativa às características da área afetada (Québec, 2014).

Características da área afetada	Categoria de conseqüências	pontos
Área desabitada ou Área contendo infra-estruturas ou serviços mínimos, tais como: – uma segunda barragem na categoria de conseqüências muito baixa; – uma estrada de acesso; – fazendas; – uma instalação comercial sem acomodações.	Muito baixa	1
Área habitada ocasionalmente contendo menos de 10 casas ou residências sazonais ou Área contendo uma instalação comercial que fornece alojamento para menos do que 25 pessoas ou que tenha menos de 10 unidades de alojamento (ou seja, 10 casas de campo, 10 parques de campismo, 10 quartos de motel) ou Área contendo infra-estruturas ou serviços limitados, como: – uma segunda barragem na categoria de baixa conseqüência; – uma estrada local.	baixa	2
Área permanentemente habitada contendo menos de 10 residências ou ocasionalmente habitadas e contendo 10 ou mais casas ou residências sazonais ou Área que contém uma instalação comercial sazonal que oferece acomodação para 25 ou mais pessoas ou que contém 10 ou mais unidades de alojamento ou que opera durante todo o ano e oferece acomodação para menos de 25 pessoas ou com menos de 10 unidades de alojamento ou Área contendo infra-estruturas ou serviços moderados, como: – uma segunda barragem na categoria conseqüência moderada; – uma via de acesso;	moderada	3

<ul style="list-style-type: none"> – uma linha de trem (local ou regional); – uma empresa com menos de 50 trabalhadores; – a principal entrada da água a montante ou a jusante da barragem que abastece um município. 		
<p>Área permanentemente habitada contendo 10 ou mais residências e menos de 1.000 moradores</p> <p style="text-align: center;">ou</p> <p>Área que contém um estabelecimento comercial que opera durante todo o ano e oferece acomodação para 25 ou mais pessoas, ou tem 10 ou mais unidades de alojamento</p> <p style="text-align: center;">ou</p> <p>Área contendo infra-estruturas ou serviços significativos, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> – uma segunda barragem na categoria Alta Consequência; – uma estrada regional – uma linha de trem (transcontinental ou transfronteiriça); – uma escola; – uma empresa que detém 50 a 499 trabalhadores 	Alta	5
<p>Área permanentemente habitada por uma população de mais de 1.000 e menos do que 10.000</p> <p style="text-align: center;">ou</p> <p>Área contendo grandes infra-estruturas ou serviços, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> – uma segunda barragem na categoria Consequência Muito Alta – uma estrada autoestrada ou nacional – uma empresa que tem 500 ou mais empregados – um parque industrial – um local de armazenamento de substâncias perigosas 	Muito alta	8
<p>Área permanentemente habitada por uma população de 10.000 ou mais</p> <p style="text-align: center;">ou</p> <p>Área contendo infra-estruturas ou serviços substanciais tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> – uma segunda barragem na categoria Consequência grave; – um hospital; – um grande complexo industrial; – um grande local de armazenamento de substâncias perigosas. 	Grave	10

4.10 Estados Unidos

Nos Estados Unidos um documento disciplinador importante para a classificação de barragens de acordo com o impacto potencial de uma ruptura é o *Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams*, elaborado pelo *Interagency Committee on Dam Safety (ICODS)*, editado pela *Federal Emergency Management Agency (FEMA)* em 2004.

Este documento apresenta os resultados de um estudo desenvolvido por um grupo de trabalho designado para compilar diferentes métodos de classificação de barragens por categoria de dano potencial associado, identificar ambiguidades de terminologia e propor um sistema novo. Após analisar os sistemas utilizados em diversos estados e instituições federais dos EUA e no Canadá, o grupo conclui pela adoção de simplesmente três níveis (baixo, significativo e elevado), Quadro 27, com base na consideração de aspectos de perda de vidas humanas, econômicos, ambientais e sociais.

QUADRO 27 - Classificação de perigo potencial.

Classificação de Risco Potencial (Hazard Potential Classification)	Perda de vidas humanas	Perdas econômicas, ambientais, e sociais
Baixo	Não esperado	Baixa ou limitada a particulares
Significante	Não esperado	sim
Elevado	Provável ou mais esperado	sim

FONTE: FEMA, 2004.

As principais conclusões do trabalho são:

- o sistema de classificação de dano potencial associado de barragens proposto é claro, simples, conciso e adaptável;
- o sistema não reflete a situação atual da obra, somente as consequências incrementais de um possível evento adverso;
- o sistema proposto deve ser adotado em substituição a sistemas numéricos e alfabéticos, pois é necessário eliminar confusões e educar o público sobre a importância da segurança de barragens;
- o cenário utilizado para a estimativa de perda de vidas humanas deve ser razoável e realista, e não inventado, devendo ser excluídos os usuários eventuais nas áreas de montante e jusante;
- esse deve ser o sistema utilizado pelas diferentes agências reguladoras;
- a classificação deve ser baseada no cenário de acidente (razoável, justificável e consistente) com as piores consequências possíveis;
- as categoriais de dano potencial servirão para definir os critérios de projeto.

Outras agências federais americanas, nomeadamente: FERC, USBR, NRCS e USACE, também adotam uma classificação baseada em três níveis, entretanto a base para a classificação pode diferir. O Quadro 28 mostra a classificação de perigo potencial USACE.

QUADRO 28 - Classificação de perigo potencial USACE.

	Classificação de Perigo Potencial		
	Baixa	Significante	Alta
Perda de vidas diretas	Não esperado (área rural sem estruturas permanentes ou habitações humanas)	Incerto (área rural com poucas residências permanentes, temporárias ou desenvolvimento industrial)	Certo (um ou mais agrupamentos residenciais, comerciais ou industriais)
Perdas devido a descontinuidade de serviços e atividades	Não há interrupção de serviços – reparos superficiais e rápidos.	Interrupção de serviços essenciais e acesso.	Interrupção de serviços críticos e acessos
Perda de propriedades	Terras particulares (agricultura), equipamentos e construções isoladas.	Maiores perdas particulares e públicas.	Extensivas perdas particulares e públicas.
Perdas ambientais	mínimas	Maiores, com necessidade de mitigação	Custo extensivo de mitigação ou impossíveis de mitigar.

FONTE: USACE (1997).

Cerca de 80% dos Estados americanos complementam, em suas legislações, a classificação de barragens pelas suas dimensões (*dam size classification system*) com a classificação por perigo potencial (*hazard potential classification system*). Na maioria destes estados a classificação por perigo potencial é baseada em 3 níveis, conforme recomendação de FEMA (2004).

O sistema de classificação de risco a jusante adotado no Estado de Washington é mostrado no Quadro 29. O sistema é similar a outros comumente adotados por programas de segurança de barragens de vários estados americanos e possui similaridades com o sistema de classificação de dano potencial nacional descrito em *Recommend Guidelines for Safety Inspection of Dams* (USACE, 1979) e *Dowstream Hazard Classification Guidelines* (USBR, 1988).

QUADRO 29 - Classificação de dano potencial do estado americano de Washington.

Dano potencial a jusante	Classificação de dano a jusante	População em risco	Perdas econômicas (descrição genérica)	Danos ambientais
Baixo	3	0	Mínima. Não há estruturas habitadas. Desenvolvimento da agricultura é Limitado.	Água sem materiais deletérios
Significante	2	1 a 6	Apreciável. 1 ou 2 estruturas habitadas. Notável agricultura ou locais de trabalho. estrada secundária e / ou linhas de trem.	Degradação limitada da qualidade da água
Alto	1C	7 a 30	Maior. 3 a 10 estruturas habitadas. área suburbana de baixa densidade com alguma indústria e trabalho locais. Estradas e linhas ferroviárias primárias.	Degradação severa da qualidade da água com efeitos a longo prazo sobre a vida
Alto	1B	31 a 300	Extrema. 11-100 estruturas habitada. Área suburbana de média densidade ou urbana com indústria associada, propriedade e recursos de transporte.	
Alto	1A	Mais que 300	Extremo. Mais de 100 estruturas habitadas. Área suburbana altamente desenvolvida/densamente povoada ou área urbana.	

FONTE: ECYWA (2007).

4.11 Brasil

No Brasil a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei Federal Nº 12.334/2010, objetiva garantir a observância de padrões de segurança das barragens, através da fiscalização do poder público sobre o empreendedor, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, à população potencialmente afetada. A lei 12.334/2010 se aplica a barragens:

- i. com altura do maciço, contada do nível mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m;
- ii. com capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- iii. com reservatórios que contenham resíduos perigosos;
- iv. com categoria de dano potencial associado, médio ou alto - todas as barragens serão classificadas pelo órgão fiscalizador, segundo critérios estabelecidos pela Resolução CNRH nº 143/2012.

Observa-se que os principais critérios de enquadramento da barragem são suas dimensões - altura e volume, porém barragens menores que forem classificadas, pelo órgão fiscalizador, com dano potencial médio ou alto, também se enquadram.

O processo de regulamentação da Lei inclui ainda algumas resoluções complementares que estabelecem a obrigatoriedade de dispositivos de aferição e controle da segurança pelo órgão fiscalizador. O descumprimento, por parte do empreendedor, de algum destes dispositivos implica em infração.

a) Resolução ANA nº 742, de 17 de outubro de 2011

Estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das Inspeções Regulares de Segurança de Barragem, conforme art. 9º da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010.

b) Resolução ANA nº 91, de 2 de abril de 2012

Estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem (Anexo I) e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem.

c) Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012

Estabelece critérios gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco, Dano Potencial Associado e pelo volume do reservatório.

d) Resolução CNRH nº 144, de 10 de julho de 2012

Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de

Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

A classificação, de que trata a Resolução ANA nº 91, é de responsabilidade do órgão fiscalizador e divide as barragens em 6 classes. A aplicação dos dispositivos de aferição e controle da segurança depende da classificação da barragem, Quadro 30.

QUADRO 30 - Dispositivos de aferição e controle da segurança estabelecidos pela Resolução ANA nº 91.

	Classe da Barragem				
	A	B	C	D	E
Inspeção Periódica (check list e relatório)	semestral	semestral	anual	anual	bianual
Plano de Segurança	sim	sim	sim	sim	sim
Plano de Ações Emergenciais	sim	não	não	não	não
Revisão periódica de segurança	A cada 5 anos	A cada 5 anos	A cada 7 anos	A cada 10 anos	A cada 10 anos

4.11.1 Método da resolução CNRH nº 143

No Brasil as barragens serão classificadas pelos órgãos fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos na Resolução CNRH nº 143, esta constitui, portanto a base para a análise de segurança da barragem e para fixar níveis apropriados de monitoramento, inspeção e planos de segurança.

Os critérios avaliados são divididos em quatro grupos: características técnicas, estado de conservação, plano de segurança e dano potencial, Figura 4, a cada um dos critérios, também chamados, no âmbito da avaliação de risco, de descritores, são atribuídos valores constantes no Quadro 31.

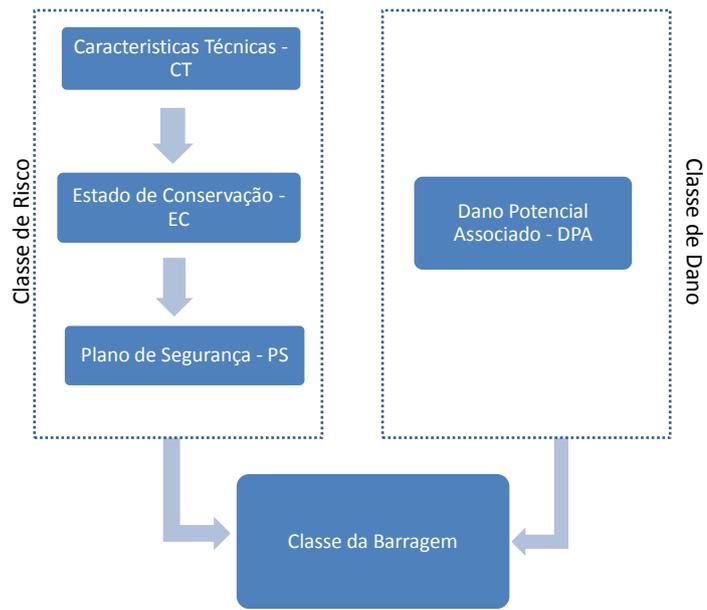


FIGURA 4 - Fluxograma de aplicação da classificação estabelecida pela Resolução 143/CNRH.

No total o método utiliza 21 descritores, cujos valores são somados para a definição da classe de risco e da classe de dano.

$$classe\ de\ risco = \sum_{1}^{6} CT + \sum_{7}^{12} EC + \sum_{13}^{17} PS$$

$$classe\ de\ dano = \sum_{18}^{21} DPA$$

QUADRO 31 - Discriminação dos descritores e pesos da Resolução 143/CNRH.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS						ESTADO DE CONSERVAÇÃO					
Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de Fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)	Confiabilidade das estruturas extravasoras (g)	Confiabilidade das estruturas de adução (h)	Percolação (i)	Deformações e recalques (j)	Deterioração dos taludes / paramentos (k)	Eclusa (l)
$H \leq 15m$ (0)	$L \leq 200m$ (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	Entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)	Estruturas civis e hidroeletrônicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletrônicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)
$15m < H < 30m$ (1)	$L > 200m$ (3)	Alvenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	Entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)	Estruturas civis e hidroeletrônicas 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. (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implementação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. (1)	Estruturas civis e hidroeletrônicas bem mantidas e funcionando (1)
$30m \leq H \leq 60m$ (2)		Terra homogênea / enrocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	Entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão 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. (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)
$H > 60m$ (3)			Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)		Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)
			Solo residual / aluvião (5)								

PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM					DANO POTENCIAL ASSOCIADO			
Existência de documentação de projeto (m)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem (n)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e monitoramento (o)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (p)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (q)	Volume total do reservatório (r)	Potencial de perda de vidas humanas (s)	Impacto ambiental (t)	Impacto sócio econômico (u)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)	Pequeno <= 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)	Médio 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
Projeto básico ou parte do projeto executivo/ "como construído" (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)		Não emite os relatórios (5)	Grande 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)		ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
Anteprojeto ou Projeto conceitual (6)		Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)			Muito grande > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)		
Inexiste documentação de projeto (8)								

A partir dos valores resultantes destes somatórios classifica-se a barragem quanto à sua categoria de risco e dano potencial associado, Quadros 32 e 33.

QUADRO 32 - Matriz categoria de risco, Resolução CNRH n° 143.

Categoria de Risco	CRI
Alto	≥ 60 ou $EC^* \geq 8$
Médio	35 a 60
Baixo	≤ 35

(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

QUADRO 33 - Matriz de dano potencial associado, Resolução CNRH n° 143.

Dano Potencial Associado	DPA
Alto	≥ 16
Médio	10 a 16
Baixo	≤ 10

O resultado combinado é traduzido na matriz de classificação, apresentada no Quadro 34.

QUADRO 34 - Matriz de categoria de risco e dano potencial associado, Resolução ANA n° 91.

Classe da Barragem		Classe de dano potencial associado		
		Alto	Médio	Baixo
Classe de Risco	Alto	A	B	C
	Médio	A	C	D
	Baixo	A	C	E

O Quadro 35 apresenta a aplicação do método à barragem Cocorobó. Esta barragem pertence ao DNOCS e, como é situada em um rio federal, é fiscalizada pela ANA.

QUADRO 35 - Resultado da aplicação do método da resolução 143 a barragem Cocorobó. Fonte: Elaboração da autora.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

	Classificação	Fonte	Valor	Comentário
Altura (m)	33,5	DNOCS	2	Altura máxima acima do TN (28,85 relativamente ao talvegue)
Comprimento (m)	1.320	DNOCS	3	barragem principal - 643m, barragem auxiliar - 677m
Tipo de Barragem	Terra Homogênea	DNOCS	3	
Tipo de Fundação	Xisto medianamente a pouco alterado	DNOCS	3	fundação xisto medianamente a pouco alterado, no leito do rio o mesmo é recoberto por um pacote aluvionar.
Idade (anos)	46	DNOCS	1	concluída em 1967
TR Vazão de Projeto (anos)	sem informação	DNOCS	10	

CT 22

ESTADO DE CONSERVAÇÃO

	Classificação	Fonte	valor	Comentário
Confiabilidade das estruturas extravazoras	Soleira livre com estrutura vertente de concreto em perfil creager na forma de arco, com muros laterais, canal de fuga e bacia de dissipação.	DNOCS 2013*	4	Trincas na soleira e vegetação de médio porte no canal de restituição. Rachadura no concreto e ferragem exposta no muro lateral do canal de acesso do vertedouro
Confiabilidade das estruturas de adução	Tomada d'água tipo direta com torre de comando, passarela, comportas planas e galeria tubular dupla envelopada, válvulas borboletas e registros de jusante.	DNOCS 2013*	6	Estrutura de saída - concreto danificado, válvulas borboletas e registro apresentando alto grau de corrosão, presença de vegetação e entulhos dentro da caixa de registros
Percolação	Áreas úmidas sem tratamento.	DNOCS 2013*	5	Há muitos anos, existe uma percolação no encontro com a ombreira, só visível quando o nível do reservatório está alto. Não há carreamento de material.
Deformações e recalques	Não existe	DNOCS 2013*	0	
Deterioração dos taludes		DNOCS 2013*	7	Erosão generalizada no talude de jusante provocada por escoamento de água pluvial, mau funcionamento da drenagem, falta de proteção, canaletas quebradas.
Eclusa	não existe	DNOCS 2013*	0	

*Foi realizada inspeção em setembro de 2013

EC 22

PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM

	Classificação	Fonte	valor	Comentário
Documentação de projeto	Possui alguns Relatórios (hidrológico, dimensionamento hidráulico e estrutural) e Projeto como construído	DNOCS	2	
Estrutura organizacional	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem	DNOCS	0	Portaria 312 DG / CRH 25/07/2013
Procedimentos segurança	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção	DNOCS	3	instrumentação defeituosa e desativada há muitos anos
Regra operacional dos dispositivos de descarga	Soleira livre	DNOCS	0	
Relatórios de inspeção e segurança	Emite regularmente os relatórios	DNOCS	0	

PS 5

DANO POTENCIAL ASSOCIADO

	Classificação	Fonte	valor	Comentário
Volume (hm ³)	245,38	DNOCS	5	sem barragens em cascata (considerando só as barragens reguladas pela ANA)
Potencial perda de vidas	existente	ANA	12	casas muito dispersas, 2 urbanizações, 1 rodovia (BR 235) 4 transversais locais, 1 instalação de lazer.
Impacto ambiental	significativo	ANA	3	
Impacto sócio-econômico	alto	ANA	8	Há um aglomerado urbano cerca de 5 km a jusante da barragem

DPA 28

CLASSIFICAÇÃO CNRH

Categoria de risco	médio	35 a 60	49	Classe da Barragem A
Dano potencial associado	alto	DPA >=16	28	



FIGURA 5 - Registro de controle de vazão da estrutura de saída apresentado alto grau de corrosão.



FIGURA 6 - Erosão generalizada no talude de jusante.

5 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

Este capítulo apresenta os princípios e conceitos fundamentais necessários para o entendimento dos Métodos Multicritério. É apresentada uma descrição do processo decisório, suas fases, elementos que envolvem a estruturação do processo decisório e método multicritério utilizado para atingir o objetivo proposto.

Por *decisão* entende-se, em geral, qualquer processo de que resulte uma escolha cuja implementação, possa conduzir à obtenção de determinado(s) objetivo(s), definido(s) à custa de um ou vários critérios (ROCHA, 2011, p 16).

Neste sentido, Roy e Bouyssou (1993) definem *processo de decisão* (ou processo de tomada de decisão) como um mecanismo interativo de aprendizagem resultante do desenvolvimento e evolução das confrontações e interações entre os diferentes intervenientes, regulado por mecanismos próprios do domínio do problema em causa.

Quanto aos propósitos do processo de decisão, Winterfeldt e Edwards (1986) resumem-nos em cinco:

1. identificação de opções ou reformulação de opções já existentes;
2. definição de objetivos a serem alcançados. Segundo Roy (1985), este ponto é particularmente difícil devido ao conflito de objetivos, dentro de um sistema/ contexto, e das relações que nele existem;
3. fornecimento de uma linguagem comum para comunicação e consenso de opiniões;
4. especificação de critérios/ atributos e quantificação de variáveis subjetivas;
5. desenvolvimento de índices de valores relevantes.

Os Métodos Multicritério desenvolveram-se, basicamente, sob os preceitos de duas Escolas: 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 Multicritério de Apoio à Decisão, denominados MCDA (*Multicriteria Decision Aid*), e caracteriza-se por adotar o paradigma científico do construtivismo.

Para John Mingers (em Mingers e Gill, 1997, pp. 407–440, 429) e John Brocklesby (1997) um paradigma é uma forma particular de encarar a realidade, baseada num conjunto de assunções filosóficas que definem a natureza de ações futuras.

O paradigma científico do racionalismo se caracteriza por ter uma *visão objetivista* do problema, partindo do pressuposto de que é possível observar a realidade

(eventos) com imparcialidade total. Na visão objetivista, o conhecimento é originado, fundamentalmente, a partir do objeto (ROY,1987).

O paradigma científico do construtivismo se caracteriza por ter uma *visão construtivista* do problema, ou seja, o conhecimento é originado a partir de uma interação entre o objeto e o sujeito (ROY,1987). 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 iterativo.

Neste trabalho será adotada uma Metodologia Multicritério em Apoio à Decisão – MCDA (*Multicrititéria Decision Aid*) que se caracteriza por adotar o paradigma científico do construtivismo, por se tratar de uma metodologia que busca estruturar o contexto decisional, desenvolvendo modelos nos quais os decisores (ou atores) possam basear suas decisões, a partir do que eles acreditam ser o mais adequado (ENSSLIN, MONTIBELLER & NORONHA, 2001).

“[...] a Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão recorre a um conjunto de ferramentas e métodos matemáticos utilizados para facilitar a avaliação de opções (ou ações potenciais) em cada um dos critérios e a ponderação relativa destes e, depois, para fazer a síntese das avaliações parciais nos critérios.” (BELTON e STEWART 2002, apud SILVA, 2012, p 91).

5.1 Elementos fundamentais no processo de tomada de decisão

Para evoluir com a modelagem do processo de tomada de decisão, é preciso conhecer os componentes fundamentais do processo.

O processo de decisão pode ser condicionado por *atores*, quer de forma direta, pelo fato de intervirem no processo de decisão, quer de forma indireta, pelo fato das suas opiniões serem tidas em conta por aqueles que intervêm diretamente no processo de decisão (ROCHA, 2011). Os atores são identificados como *decisores* e *facilitadores*.

Os *decisores* são aqueles a quem foi formalmente ou moralmente delegado o poder de decisão, podendo intervir na construção e na utilização do modelo como ferramenta de avaliação (FERNANDES, 1996).

O papel do *facilitador* é esclarecer o processo de avaliação e/ou negociação inerente à tomada de decisões e construir um modelo que considere os pontos de vistas dos atores e seus juízos de valor (BANA E COSTA, 1992).

Uma *ação* é um termo genérico usado para designar o que constitui o objeto de decisão, ou para o que a tomada de decisão é dirigida (ROY, 2000 apud ROCHA, 2011, p. 19). Neste trabalho, os termos *ação* e *alternativa* serão utilizados como sinônimos.

As ações de um problema de decisão serão analisadas e avaliadas de acordo com o ponto de vista e preferências do decisor. Isso é matematicamente formalizado pela noção de *critério*. O termo critério pode ser definido como uma ferramenta que permite comparar alternativas de acordo com um particular eixo de significância, ou um ponto de vista (ROY, 1985 apud AZEVEDO, 2001, p. 9).

“Mais precisamente, um critério é uma função de valor real sobre um conjunto de alternativas, tal que apareça significativamente para comparar duas alternativas “*a*” e “*b*” de acordo com um ponto de vista particular sobre uma base única entre dois números $g(a)$ e $g(b)$.” ROY (1985, apud Azevedo 2001, p. 9).

Portanto o critério constitui a base para a avaliação e é o parâmetro como qual se pode representar a preferência entre alternativas.

5.2 Tipos de Problemática

Durante a estruturação do processo decisório, é primordial compreender o tipo de problemática em que a decisão está inserida. O tipo de problemática, Figura 7, vai direcionar a escolha do método multicritério a ser utilizado.

Roy (1996) descreve quatro tipos de problemáticas:

Problemática de seleção ($P\alpha$) – nesta problemática seleciona-se a melhor alternativa ou subconjunto de alternativas, ou seja, procura-se encontrar um subconjunto A' , dentro do conjunto A (conjunto de ações potenciais ou alternativas). Os elementos de A são comparados entre si de modo a eliminar o maior número de opções possíveis, e como resultado obtém-se a alternativa ou o subconjunto selecionado.

Problemática de classificação ($P\beta$) – sua função é alocar cada ação conforme uma classe ou categoria. As alternativas são classificadas de acordo com normas estabelecidas e o resultado do processo está na organização ou triagem das ações.

Problemática de hierarquia ($P\gamma$) – tem como objetivo ordenar as ações; para isso, busca-se definir um subconjunto de A conforme uma hierarquia. Em outras palavras, consiste em estabelecer uma ordem para cada ação contida nesse subconjunto.

Problemática descritiva ($P\delta$) – tem por finalidade descrever e relatar as consequências das ações do conjunto A . As ações são organizadas com todas as informações necessárias para que o decisor possa compreender melhor as características de cada ação.

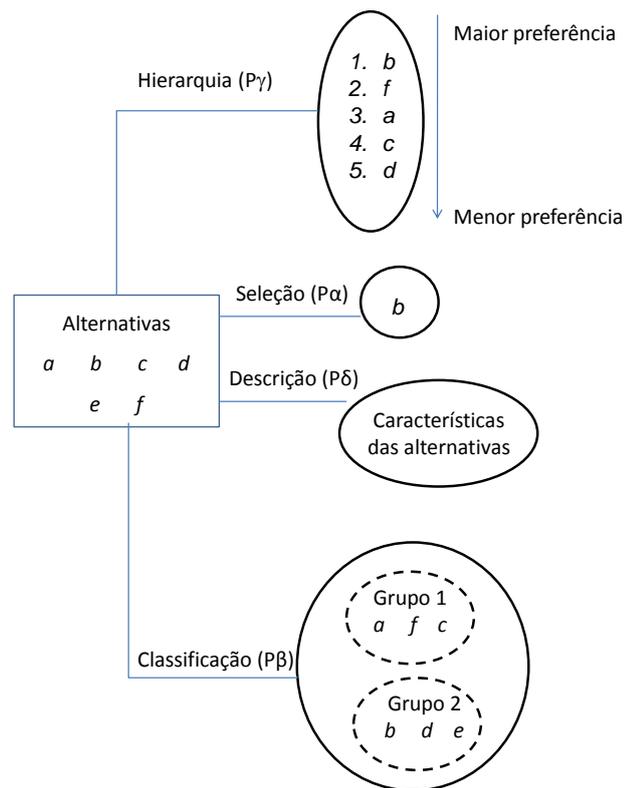


FIGURA 7 - Tipos de problemáticas. Adaptado de Doumpos e Zopounids (2002).

5.3 Relações de Preferência

O termo *preferência* é usualmente designado quando as comparações entre alternativas são feitas por via de relações binárias. Roy (1996) diz que uma relação binária está associada a duas ações e descreve a presença ou ausência de determinada propriedade.

Roy (1996) admite quatro situações fundamentais de preferência na comparação entre duas ações:

- *indiferença* (aIb): corresponde à existência de razões que justifiquem uma indiferença entre as ações a e b . Nesta situação o decisor não consegue manifestar uma preferência, ainda que ligeira, sobre qualquer uma das ações;
- *preferência estrita* (aPb): corresponde à existência de razões que justificam uma preferência significativa a favor da ação a ;
- *preferência fraca* (aQb): corresponde a uma hesitação entre I e P ; não existem razões que justifiquem uma preferência significativa a favor da ação a . Contudo, há razões claras para não existir indiferença, havendo preferência, ainda que fraca, a favor de a ;
- *incomparabilidade* (aRb): corresponde à ausência de razões que justifiquem alguma das situações anteriores.

5.4 Fases da Construção de um Modelo Multicritério de Apoio à Decisão

A construção de um modelo multicritério de apoio à decisão requer uma sequência de fases a serem exploradas. Na visão de Bana e Costa (1993) esta construção evolui passando por três fases principais e cada fase se desdobra em etapas.

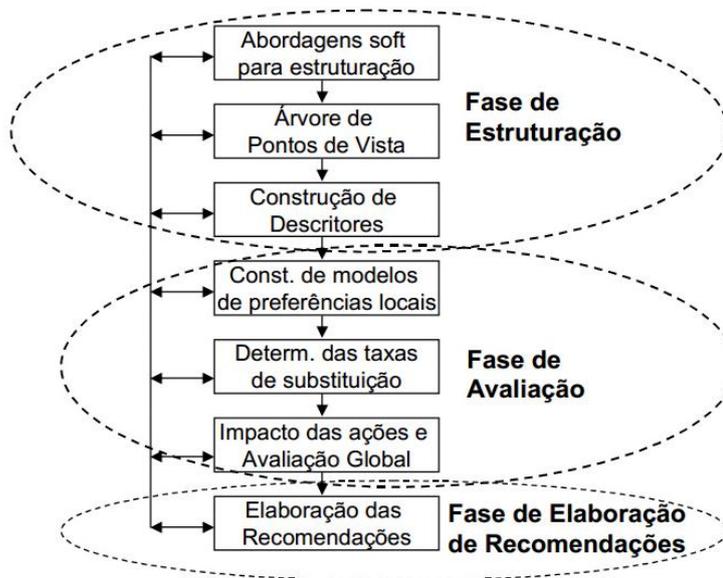


FIGURA 8 - Fases do processo MCDA-C. Fonte: Ensslin, Dutra e Ensslin (2000, p. 81).

5.4.1 Fase de estruturação

Woolley e Pidd (1991, apud Bana e Costa, 1993) referem que o termo “estruturação” é muitas vezes usado no sentido de “formulação” na literatura da investigação operacional, das abordagens sistêmicas e das ciências sociais. Para Bana e Costa (1993) a estruturação é a resposta operacional à problemática da formulação.

Na visão de Bana e Costa (1993) a atividade da estruturação passa pela caracterização da situação problemática em questão, pela identificação e geração de diferentes tipos de *elementos primários de avaliação* (EPA's), apresentados na Figura 9, e pelo estabelecimento das relações estruturais entre eles, pela diferenciação das suas funções no processo de avaliação e por uma descrição tão completa e rigorosa quanto possível deste todo.

“ O trabalho de estruturação visa a construção de um modelo (mais, ou menos) formalizado, capaz de ser aceite pelos atores como um esquema de representação e organização dos *elementos primários de avaliação*, e que possa servir de base à aprendizagem, à investigação, à comunicação e à discussão interativa com e entre atores” (BANA E COSTA, 1993, p. 8).

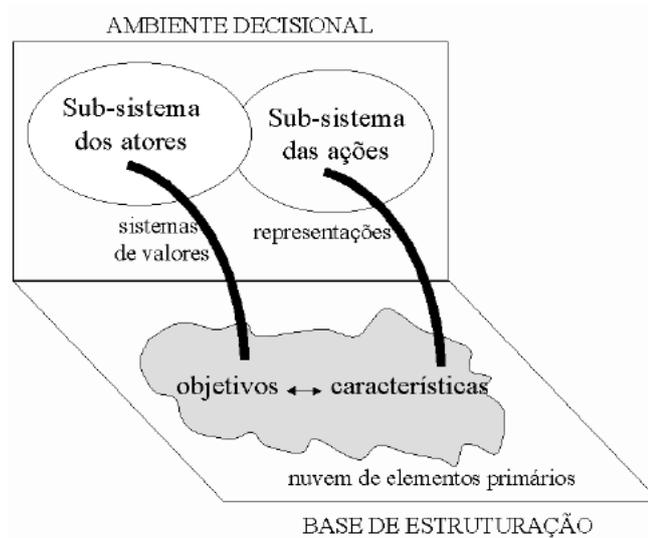


FIGURA 9 - Composição da nuvem de elementos primários (BANA E COSTA, 1993, p. 2).

Para Keeney (1992, apud Matzenauer, 2003, p. 153), os elementos primários de avaliação (EPA's) são aspectos considerados relevantes pelos decisores para a tomada de decisão. Podem ainda ser constituídos de objetivos, metas, valores dos decisores, alternativas e opções (BANA E COSTA, 1992; ENSSLIN et al., 2001).

Noronha (2003), apresenta cinco dos principais métodos utilizados para auxiliar grupos na obtenção dos EPA's, são eles: *Brainstorming*, *Ideawriting*, *Delphi*, *Nominal Group Technique* e Mapas Cognitivos.

Entre estes métodos, talvez o mais conhecido seja o *brainstorming* (tempestade cerebral, em tradução literal) (OSBORN, 1993), o método consiste em fazer reuniões em grupo com os decisores e, em uma primeira fase, incentivá-los a expor verbalmente os aspectos que são considerados por eles ao analisar o contexto decisório (nesta fase o que se quer é o máximo de ideias), posteriormente estes aspectos (ideias) são julgados (se são bons ou não), apurados e organizados resultando em uma lista definitiva.

5.4.1.1 Estruturação por Pontos de Vista

Na literatura, encontram-se propostas diferentes de conduzir o trabalho de estruturação, diferenciáveis segundo o ângulo escolhido para apreciá-las. Existem duas abordagens principais, bem distintas: ou elas se focam fundamentalmente sobre os *objetivos dos atores* ou sobre as *características das ações*. Bana e Costa (1993) esclarece que não partilha destas abordagens, por considerar que as mesmas são complementares e não

excludentes, e defende uma abordagem de estruturação de *pontos de vista* que corresponde à uma junção das características das ações e objetivos dos atores.

[...] “um ponto de vista representa todo o aspecto da decisão real apercebido como importante para a construção de um modelo de avaliação de ações existentes ou a criar. Um tal aspecto, que decorre do sistema de valores e ou da estratégia de intervenção de um ator no processo de decisão, agrupa elementos primários que interferem de forma indissociável na formação das preferências desse ator.” (Bana e Costa, 1993, p.24).

Neste trabalho, será seguida a abordagem de estruturação por pontos de vistas.

Os pontos de vista (PV) se dividem em Fundamental (PVF) e Elementar (PVE).

Ter-se-á um PVF quando este for um fim em si mesmo, ou seja, quando o decisor afirmar que o ponto de vista é importante porque reflete um valor fundamental, dando origem ao que se tornará um *critério*.

Segundo Bana e Costa (1992, p.16) cada ponto de vista, candidato à *PVF*, deve obedecer às seguintes propriedades:

- *Consensualidade*: todos os valores representados pelo ponto de vista são realmente importantes;
- *Operacionalidade*: é possível construir uma escala de preferência local associada aos níveis de impacto deste ponto de vista, assim como um indicador de impacto associado ao PV;
- *Inteligibilidade*: quando atuar como uma ferramenta que permita a elaboração das preferências dos atores, quanto como um instrumento que sirva de base à comunicação, à argumentação e à confrontação de valores e convicções entre estes mesmos atores;
- *Isolabilidade (independência)*: quando for possível avaliar as ações segundo este PVF considerando todos os demais constantes, ou seja, considera-se que há independência preferencial, e somente esta independência é exigida entre os PVF's.

Aqueles pontos de vista que não foram considerados fundamentais, mas que são meios para se alcançar PVF's, são chamados pontos de vista elementares PVE. Muitas vezes diversos PVE's formam um PVF, ou seja, o PVF representa um fim comum para o qual contribuem diversos valores mais elementares.

Um conjunto de PVF's pode ser chamado de família de PVF's, e respeitar as propriedades apresentadas no Quadro 36.

QUADRO 36 - Propriedades das famílias de PVF's.

Propriedades de base de uma família de PVF	consensualidade
	inteligibilidade
	concisão
Propriedades lógicas de uma família de PVF	exaustividade
	coesão e monotonicidade
	não redundância ou minimalidade

FONTE: Bana e Costa (1992).

Uma família de PVF's, da mesma forma que os próprios PVF's, deve ser inteligível e consensual, como já descrito anteriormente. Além disso, é requerida uma terceira propriedade: a *concisão*. Devido a limitação cognitiva natural do ser humano, é tarefa do facilitador manter o número de pontos de vista fundamentais o mais baixo possível, de forma que se mantenha o entendimento dos decisores a respeito do problema. Por outro lado, segundo Bana e Costa (1992), também deve-se cuidar para que o número de PVF's não seja muito pequeno, a fim de se evitar a conquista da consensualidade.

A *exaustividade* de uma família de PVF's é alcançada quando todos os elementos primários de avaliação, julgados importantes ao processo de tomada de decisão, estão sendo considerados no modelo de avaliação das ações.

Bana e Costa (1992) afirma que uma família de PVF's deve garantir a *coesão* entre o papel de cada um dos PVF's envolvidos na formação dos julgamentos de valor locais, e o papel destes mesmos PVF's na elaboração das preferências globais dos decisores. Isto significa dizer que não é possível dissociar a formação destes julgamentos, tanto locais quanto globais, no contexto decisional. A característica de coesão da família de PVF's é essencialmente avaliada pela propriedade de monotonicidade.

A *monotonicidade* pode ser explicada através de um exemplo simples, porém elucidativo. Sejam duas ações potenciais a e b ; considere que a é indiferente a b (aIb) em todos os pontos de vista fundamentais (isto equivale a dizer que as ações são equivalentes) à exceção do ponto PVF_k ; agora, se para o ponto de vista fundamental k a ação a for considerada mais atrativa que a ação b (aPb), a família de pontos de vistas fundamentais só será monotônica se a ação a for considerada globalmente mais atrativa que a ação b .

A última característica importante para que se tenha uma família de pontos de vista fundamentais é a *não redundância*, isto significa dizer que não pode haver a mesma informação em dois deles. A redundância leva a *double counting*, tendo como consequência a sobrevalorização de alguns PVF quando da agregação das avaliações locais, afirmam Bana e Costa e Beinat (2011).

5.4.1.2 Transição de ponto de vista fundamental para critério de avaliação

Na abordagem aqui apresentada os aspectos, considerados relevantes pelos decisores ao avaliarem as ações potenciais, serão chamados de pontos de vista fundamentais até serem operacionalizados, quando então passarão a ser chamados de critérios de avaliação. A transição de PVF's para critérios ocorre quando eles se tornam operacionais, ou seja, mensuráveis. Isto acontece quando se constrói descritores e funções de valor para os pontos de vista fundamentais (ENSSLIN et al., 2001).

5.4.1.3 Descritores

Para que os PVF's sejam operacionais, conforme exposto anteriormente, associa-se a cada PVF um *descriptor de impactos*.

De acordo com Bana e Costa e Beinat (2011), descriptor é um conjunto constituído por níveis de impacto plausíveis N_1, N_2, \dots, N_n . Tal conjunto uma vez elaborado deve possibilitar sua representação em uma *escala de preferência local* (ou seja, deve ser dotado de uma estrutura de pré ordenamento estabelecendo assim uma ordem dos níveis de impacto classificados por sua *atratividade*). Segundo Bana e Costa e Beinat (2011), os descritores devem:

- Medir (quantitativamente ou qualitativamente) em que medida o PVF é satisfeito;
- Descrever o mais objetivamente possível os impactos das ações no PVF. Quanto mais objetivamente os impactos são descritos, mais bem compreendido e, portanto, mais bem aceito será o modelo de avaliação;
- Estabelecer um domínio de plausibilidade para os impactos, definido por eliminação de níveis de impacto (ou ações que não admissíveis ou estão fora do contexto);
- Verificar a *independência ordinal* do PVF correspondente. Se for detectada alguma dependência, é necessário reestruturar a família de PVF.

Bana e Costa (1992, p.126) classifica os descritores como:

- *Quantitativos*, descritos adequadamente por números, ou *qualitativos*, identificados apenas por adjetivos ou qualidades;

- *Discretos*, formados por um número finito de variáveis, ou *contínuos*, descritos por uma função matemática contínua, resultando em um número infinito de variáveis;
- *Diretos ou naturais*, quando dispensam a elaboração de um conceito, por possuírem interpretação comum entre os atores (por exemplo, tempo de experiência de um determinado candidato à vaga, onde o tempo é medido em anos);
- *Indiretos ou proxy*, quando não descrevem diretamente o ponto de vista, mas pode torná-lo operacional (por exemplo, a cultura geral de um candidato, medida em função da quantidade de periódicos lidos em determinado espaço de tempo);
- *Construídos*, quando caracterizam o significado de um ponto de vista, baseado na combinação de estados dos elementos primários de avaliação.

Os descritores construídos devem ser elaborados de forma tal que não permitam a ocorrência da ambiguidade do descritor. É inadequado, portanto, a utilização de descritores do tipo “muito bom” ou ‘bom’, pois podem ser interpretados de forma diferenciada por cada um dos atores envolvidos.

De acordo com Ensslin et al. (2001), depois de construir os descritores, devem ser definidos, em cada um deles, dois níveis de impacto de referência: o nível “*Bom*” e o nível “*Neutro*”. A partir da definição dos níveis de impacto “*Bom*” e “*Neutro*”, fica mais claro, no processo de apoio a tomada de decisão, identificar quais as ações são mais atrativas (aquelas que têm a performance acima do nível *Neutro*) e quais ações são menos atrativas (com desempenho abaixo do nível *Neutro*). O nível *Bom* demarca as ações cuja performance, fica acima das expectativas dos decisores. A Figura 10, apresentada a seguir, auxilia na visualização da definição dos níveis de referência *Bom* e *Neutro* em um descritor.

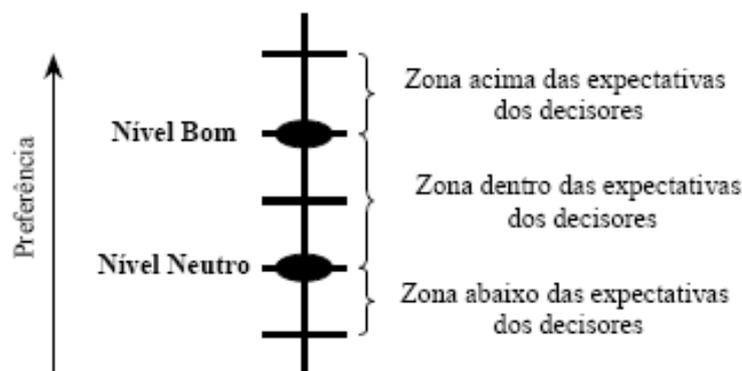


FIGURA 10 - Definição e Significado dos Níveis de Impacto de Referência *Bom* e *Neutro* em um Descritor (adaptado de ENSSLIN *et al.*, 2001, p. 164).

5.4.1.4 Escalas

Segundo Azevedo (2001, p.59), para a operacionalização dos descritores, é necessária a adoção de um tipo de escala que venha a representar com maior precisão possível as preferências do decisor. Constituem-se tipos de escalas:

- *Escalas nominais ou classificatórias* – quando números ou símbolos são usados para identificar os grupos a que vários objetos pertencem. Neste tipo de escala, a operação de escalonamento consiste em efetuar uma partição de determinada classe em um conjunto de subclasses mutuamente exclusivas;
- *Escalas ordinais* – quando os elementos em uma categoria, de dada escala, não sejam apenas diferentes dos elementos em outras categorias da mesma escala, mas guardem certo tipo de relação entre eles. Tais relações podem ser indicadas pelo símbolo > que, de modo geral, significa “maior do que”. Em relação a escalas particulares, > pode indicar “preferível a”, “mais alto do que”, etc. Seu significado específico depende da natureza da ação que define a escala;
- *Escala de intervalos* – quando a escala tem todas as características de uma escala ordinal e se conhecem as distancias entre dois números quaisquer da escala, para que então se obtenha uma mensuração consideravelmente mais forte que a ordinal, por exemplo, escalas de medida de temperatura, onde a unidade de medida e o ponto zero são arbitrários, todavia, ambas as escalas contêm a mesma quantidade e a mesma natureza de informações;
- *Escala de razão* – tal qual a escala de intervalos, mas com um verdadeiro ponto zero como origem. Isto decorre do fato de que a razão de dois pontos quaisquer da escala é independente da unidade de mensuração, por exemplo, a massa de um corpo medida em gramas e/ou libras;
- *Escala cardinal* – adota-se, para a construção de uma escala cardinal de preferências, a noção de *diferença de atratividade* abordada em Bana e Costa e Vasnick (1995).

5.4.2 Fase de avaliação

A fase de avaliação passa pela construção de uma *função de valor cardinal* associada a cada descritor e, depois, pela determinação dos respectivos coeficientes de ponderação.

5.4.2.1 Funções de valor

O termo *função de valor cardinal* representa aquela função de valor que pode ser usada para ordenar diferenças de intensidade de preferências entre pares de alternativas ou, mais simplesmente, a diferença de preferências entre as alternativas DYER E SARIN (1979, apud AZEVEDO, 2001, p. 62).

Seja A um conjunto (finito) de opções. Medir ordinalmente a atratividade das opções a, b, c, \dots, z de A consiste em associar a cada a, b, c, \dots, z um valor numérico através de uma função v , tal que satisfaça as condições de preferência estrita (1) e de indiferença (2):

$$\forall a, b \in A: [a \text{ e mais atrativa do que } b \text{ (aPb)}] \Leftrightarrow v(a) > v(b) \quad (1)$$

$$\forall a, b \in A: [a \text{ e } b \text{ são igualmente atrativas (aIb)}] \Leftrightarrow v(a) = v(b) \quad (2)$$

A função $v: A \rightarrow \mathbb{R}: a \rightarrow v(a)$ pode ser construída solicitando a um avaliador (um indivíduo ou um grupo) informação ordinal sobre a atratividade relativa das opções de A . Isto é, pedindo a esse avaliador que ordene as opções por ordem decrescente de atratividade. Se esta ordenação for feita separadamente para cada um dos múltiplos critérios, o Teorema de Arrow (Arrow, 1951, apud, Bana e Costa, 2013) mostra que a agregação de várias ordenações implica sempre alguma forma de arbitrariedade (exceto se as opções forem todas indiferentes). Isto pode ser evitado usando informação mais rica sobre a atratividade das opções, solicitando ao avaliador informação cardinal, isto é, que associe a cada opção a, b, c, \dots, z um valor numérico $v(a)$ tal que satisfaça, não somente as condições (1) e (2), mas também a condição adicional (3):

$$\forall a, b, c \text{ e } d \in A \text{ com } a \text{ mais atrativo que } b \text{ e } c \text{ mais atrativo que } d: \text{ o quociente } \frac{v(a)-v(b)}{v(c)-v(d)} \text{ mede a diferença de atratividade entre } a \text{ e } b \text{ quando a diferença na atratividade entre } c \text{ e } d \text{ é tomada como unidade de medida.} \quad (3)$$

Esta nova escala numérica $v: A \rightarrow \mathbb{R}: a \rightarrow v(a)$ pode ser definida posicionando as opções de A sobre um eixo vertical de tal forma que:

- 1) $\forall a, b \in A: a$ é posicionado acima de b se e somente se a é mais atrativa do que b (*informação de valor ordinal*)

- 2) as distâncias relativas entre as opções no eixo vertical reflitam as diferenças relativas de atratividade entre elas (*informação de valor cardinal*).

Uma função v que satisfaça as condições (1), (2) e (3) é uma função de valor que representa numericamente, numa escala de intervalos, os julgamentos dos decisores sobre as diferenças de atratividade.

Para a construção das funções de valor, existem diferentes metodologias: as técnicas numéricas (Pontuação Direta e Método da Bissecção) e as técnicas não numéricas (Julgamento Semântico).

Segundo Ensslin *et al.* (2001), nos métodos de julgamento semântico, a função de valor é obtida mediante comparações par-a-par da diferença de atratividade entre as ações potenciais. Essas comparações são feitas, solicitando aos decisores que expressem qualitativamente, por meio de uma escala ordinal semântica (com palavras), a intensidade de preferência de uma ação sobre a outra.

Um desses métodos é o MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Technique), desenvolvido por Bana e Costa e Vansnick (1995) e implementado através do software M-MACBETH. Neste trabalho, a tarefa de construção das funções de valor será feita através deste método.

5.4.2.2 Método de agregação

Na fase de avaliação, objetivando transformar unidades de atratividade local (medida nos critérios) em unidades de atratividade global, utiliza-se um método de agregação, que pode ter várias formas. Neste trabalho, será utilizado um procedimento de *agregação aditiva* (BANA E COSTA, 2008 apud SILVA, 1012, p. 99), na forma de uma soma ponderada, onde a avaliação global da ação a segundo é expressa por:

$$V(a) = p_1 v_1(a) + p_2 v_2(a) + \dots + p_n v_n(a) \quad \text{Eq. 5.1}$$

ou de forma genérica:

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j v_j(a) \quad \text{Eq. 5.2}$$

Com:

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1 \quad \text{e} \quad 0 < p_j < 1 \quad \text{para } j=1, \dots, n \quad \text{Eq. 5.3}$$

onde:

$V(a)$ é o valor global da ação a ;

p_j é o coeficiente de ponderação ("peso" em linguagem comum) do critério (ou PVF) j ;

$v_j(a)$ é uma função-critério cardinal (valor parcial da ação a segundo o critério j);

n é o número de critérios de avaliação.

Este modelo traduz em uma representação numérica os juízos de valor dos atores envolvidos, ao nível local de cada PVF $_j$, pela construção de uma função de valor v_j que permite traduzir numericamente a atratividade de cada ação a segundo o PVF $_j$, sendo que, no modelo construído neste trabalho, ao nível *bom* de impacto (a^+) é sempre atribuída a pontuação de 100 e ao nível *neutro* (a^0) a pontuação de 0 e, portanto, pela Equação 5.1 do modelo, o perfil "Neutro em todos os PVF" terá a pontuação global de 0 e o perfil "Bom em todos os PVF" valerá 100 pontos globais.

$$\left. \begin{array}{l} v_j(a^+) = 100 \\ v_j(a^0) = 0 \end{array} \right\} \text{para } j=1, \dots, n \quad \text{Eq. 5.4}$$

5.4.3 Fase de elaboração de recomendações

Na construção de um modelo multicritério, evidencia-se a dificuldade de obter valores precisos para a multiplicidade de parâmetros utilizados. Essa dificuldade advém da presença de arbitrariedade, incertezas ou informações incompletas fornecidas pelos decisores. Adicionalmente, em situações que envolvem múltiplos decisores, é frequente a ocorrência de divergências de opinião ou de preferência entre os mesmos. Objetivando obter resultados que conduzam a recomendações confiáveis acerca da situação da decisão em pauta, faz-se necessário realizar *análises de sensibilidade* das respostas do modelo.

A análise de sensibilidade é o exame da robustez das respostas do modelo frente à variação de seus parâmetros (GOODWIN e WRIGHT, 1991, apud MATZENAUER, 2003, p. 181). Além disso, ela fornece maiores subsídios para as recomendações do facilitador quanto aos caminhos a serem seguidos pelos decisores.

De acordo com Ensslin *et al.* (2001), usualmente, esta análise consiste em alterar os valores dos parâmetros e observar o que acontece com o resultado final, na avaliação das alternativas do modelo. Esta fase é importante na aplicação de qualquer modelo, porque

contribui para superar a falta de precisão na determinação dos valores dos parâmetros, gerando conhecimentos sobre o problema e aumentando a confiança nos resultados obtidos.

A análise de sensibilidade proporciona a oportunidade de gerar ações de aperfeiçoamento, podendo aprimorar as ações potenciais e dar maior robustez ao processo decisório.

Além da análise de sensibilidade clássica, é muito interessante analisar a “robustez” dos resultados da aplicação do modelo, ou seja, analisar que conclusões robustas se podem extrair do modelo para níveis variados de escassez, imprecisão ou incerteza na informação.

Na análise de robustez, procura-se encontrar conclusões que sejam válidas independentemente do valor que se escolha para os parâmetros, de entre as combinações aceitáveis: são as conclusões ditas robustas (DIAS, 2000). A análise baseia-se no conceito de *dominância aditiva* (Bana e Costa, 1992).

” Diz-se que uma opção *domina* outra opção se for pelo menos tão atrativa quanto a outra em todos os critérios e se for mais atrativa do que outra em pelo menos um dos critérios (situação de “dominância”). Enquanto que, uma opção *domina aditivamente* outra opção se, para um determinado conjunto de restrições na informação, resultar sempre globalmente mais atrativa do que a outra opção da aplicação do modelo aditivo (situação de “dominância aditiva”)” (Bana e Costa, 1992).

É importante lembrar que, ao adotar-se uma postura construtivista, a análise de sensibilidade não significa o final do processo de Apoio à Decisão, pois este não tem um ponto final demarcado previamente, à medida que a geração de conhecimentos proporcionada é evolutiva, dinâmica e contínua (MATZENAUER, 2003, p. 182).

5.5 O método MACBETH de apoio à decisão

O MACBETH *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* (medir a atratividade por uma técnica de avaliação baseada em categorias) foi desenvolvido por Bana e Costa e Vansnick (1995). É um método baseado no paradigma científico do construtivismo e pode ser definido como uma abordagem interativa de medição cardinal de julgamentos com a finalidade de facilitar a medição dos graus de atratividade em processos decisórios.

5.5.1 Julgamentos semânticos

Usando julgamentos semânticos, o MACBETH evita que os decisores tenham que fazer estimativas quantitativas sobre as diferenças de atratividade. Desta forma, são usadas categorias semânticas de preferências para expressar as diferenças. Estas categorias permitem a passagem de um valor semântico para um valor cardinal. Em suma, os decisores são questionados do seguinte modo: “A diferença de atratividade entre os níveis de impacto N_i e N_j é: ‘nula’, ‘muito fraca’, ‘fraca’, ‘moderada’, ‘forte’, ‘muito forte’ ou ‘extrema’?”. Na Figura 6 são representadas as categorias de diferença de atratividade.

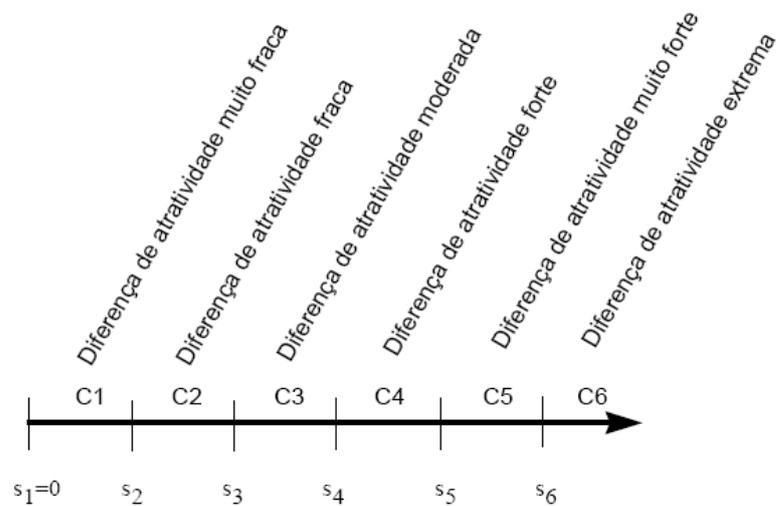


FIGURA 11 - As categorias de diferença de atratividade do método MACBETH, (MATZENAUER, 2003, p. 168).

5.5.2 Consistência e inconsistência de julgamentos

Na metodologia MACBETH, para se construir tanto uma função de valor, quanto os coeficientes de ponderação, é necessário que os julgamentos de diferença de atratividade sejam consistentes entre si. Teoricamente, é inconsistente um decisor julgar que um par de ações (a, b) , com $a \mathbf{P} b$, dando uma diferença de atratividade forte à categoria e, em seguida, afirmar que $b \mathbf{P} c$ com uma diferença de atratividade moderada, e ainda assim achar que a diferença entre (a, c) é menor do que as diferenças entre a e b e entre c e d .

No caso de inconsistência, não é possível a representação numérica dos julgamentos através de uma escala cardinal (BANA e COSTA & VANSNICK, 1995, apud SILVA, 2012, p. 102).

Neste contexto, segundo Silva (2012, p. 102), para cada descritor, é preenchida uma matriz de juízos de valor em que o elemento $a_{ij} = 0$, se $i > j$; sendo i, j os índices que indicam a linha e coluna, respectivamente, em que o elemento se encontra na matriz. Assim para cada par de níveis de impacto (N_i, N_j) de um dado descritor, é requerido aos decisores que expressem qualitativamente a diferença de atratividade entre N_i e N_j , utilizando em suas respostas uma (ou mais) das sete categorias semânticas do MACBETH.

À medida que os juízos qualitativos vão sendo emitidos, pelos decisores, são introduzidos no *software* M-MACBETH (BANA e COSTA, De CORTE e VANSNICK, 2005) e este verifica automaticamente a consistência de todos os juízos até então formulados por programação linear (BANA e COSTA *et al*, 2011; BANA e COSTA, De CORTE e VANSNICK, 2010; BANA e COSTA *et al*, 2005).

No exemplo apresentado por Silva (2012, p.102), supõe-se que em um dado *PVF*, existam quatro níveis de impactos N_1, N_2, N_3 e N_4 e quando do processo de determinação da função de valor, o decisor tenha emitido os seguintes juízos: N_1 moderadamente mais atrativo do que N_2 , N_1 moderadamente ou fortemente mais atrativo do que N_3 , N_1 fortemente mais atrativo do que N_4 . Esses três juízos são consistentes, conforme se pode observar na Figura 12(a).

Entretanto, se os decisores respondessem em seus próximos julgamentos que N_2 era muito fortemente mais atrativo do que N_3 , o M-MACBETH acusaria uma inconsistência, como mostra a Figura 12(b).

	N1	N2	N3	N4		N1	N2	N3	N4
N1	nula	moderada	mod-fort	forte	N1	nula	moderada	↑ mod-fort	forte
N2		nula	?	?	N2		nula	↓ mt. forte	?
N3		?	nula	?	N3			nula	?
N4		?	?	nula	N4		?	?	nula
Julgamentos consistentes					Julgamentos inconsistentes				

FIGURA 12 - Matrizes de juízos: (a) consistentes; (b) inconsistentes, SILVA (2012, p. 102).

A partir de uma matriz de julgamentos consistentes, o M-MACBETH propõe uma pontuação para cada opção. Estas pontuações formam a escala numérica MACBETH de base, obtida por programação linear (BANA e COSTA, DE CORTE e VANSNICK, 2012).

5.5.3 Escala MACBETH de base

O M-MACBETH apresenta uma escala de pontuação, obtida através de transformação linear, que é uma escala numérica de intervalos, ancorada em dois níveis de referência BOM e NEUTRO, previamente definidos, atribuindo-lhes as pontuações 100 e 0, respectivamente (BANA E COSTA *et al* 2013). Em resumo, após se ter preenchido a matriz de juízos MACBETH e a mesma ter sido validada pelo decisor, a função de valor é apresentada no M-MACBETH ancorada em $v_j(bom) = 100$ e $v_j(neutro) = 0$.

Seja A um conjunto finito de $n > 2$ opções, em que a opção a^+ é tão ou mais atrativa que qualquer outra opção e a opção a^- é tão ou menos atrativa que qualquer outra opção. Designe-se por C_k , $k=0, \dots, 6$, às categorias MACBETH de diferença de atratividade – “nula” (C_0), “muito fraca” (C_1), “fraca” (C_2), “moderada” (C_3), “forte” (C_4), “muito forte” (C_5) e “extrema” (C_6).

Considere o caso mais simples de ausência de hesitação nos julgamentos, isto é, quando cada par de opções é associado a uma e somente a uma categoria C_k , $k=0, \dots, 6$, i.e., $(a,b) \in C_k$ ($k=0, \dots, 6$). A correspondente escala MACBETH de base pode ser obtida através da resolução do seguinte problema de programação linear LP-MACBETH, em que $v(a)$ representa a pontuação resultante para a opção a :

LP-MACBETH (simplificado):

Min $[v(a^+) - v(a^-)]$ (Minimizar a maior diferença de pontuação entre duas opções é minimizar a soma de todas as diferenças de pontuação, o que contribui para que os julgamentos de cada categoria sejam tão próximos uns dos outros quanto possível.)

Sujeito a:

1. $v(a^-) = 0$ (pontuação arbitrária)
2. $\forall (a,b) \in C_0: v(a) - v(b) = 0$
3. $\forall (a,b) \in C_k$ com $k \in \{1,2,3,4,5,6\}: v(a) - v(b) \geq k$
4. $\forall (a,b) \in C_k$ e $\forall (c,d) \in C_{k'}$ com $k, k' \in \{1,2,3,4,5,6\}$ e $k > k'$:
 $[v(a) - v(b)] - [v(c) - v(d)] \geq k - k'$.

Quando não existe solução possível para este problema, o conjunto de julgamentos é inconsistente, isto é, é impossível associar um valor numérico a cada julgamento.

Os intervalos de cada função de valor construída, para cada *PVF*, podem ser ajustados mediante a discussão com os decisores (BANA e COSTA, De CORTE e VANSNICK, 2005). Para assegurar que eventuais ajustamentos não violam relações de ordem entre julgamentos emitidos, o M-MACBETH mostra o intervalo, Figura 13, dentro do qual a pontuação de cada opção pode ser modificada mantendo fixas as pontuações de todas as outras opções (para mais detalhes, ver Bana e Costa et al., 2005).

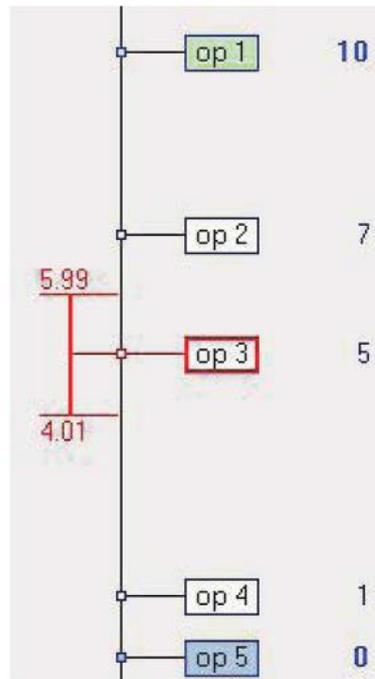


FIGURA 13 - Limites de variação de uma opção.

5.5.4 Determinação dos coeficientes de ponderação

Uma vez construídas as funções de valor de todos os *PVF*, isto é, os critérios considerados no modelo, para dar continuidade ao processo de apoio à decisão é necessário se obter informações intercritérios, dando início à fase de determinação de coeficientes de ponderação (pesos) dos critérios.

Existem diversos métodos de ponderação propostos na literatura, como os métodos *Trade-off*, *Swing Weights* e comparação par-a-par, utilizado pela metodologia MACBETH (BEINAT, 1995).

Na metodologia MACBETH, o processo de determinação dos pesos, que refletem a importância do ponto de vista na análise total do problema, consiste de duas etapas principais: uma ordenação prévia dos pontos de vista fundamentais e a geração de uma escala, que, normalizada, vai fornecer os pesos entre os pontos de vista fundamentais.

Dentro de uma família de PVF's, estes devem ser ordenados em função de sua importância, segundo juízos de valor expressos pelo decisor. A ordenação dos pontos de vista é feita pelo decisor, através da seguinte pergunta: *Estando os pontos de vista fundamentais PVFi e PVFj, ambos no nível neutro, seria mais atrativo passar para o nível bom no ponto de vista fundamental PVFi ou no PVFj, mantendo um nível constante em todos os demais PVF's?*

Esta comparação é feita com todos os PVF's, de maneira que seja possível preencher uma matriz de ordenação de pontos de vista, Figura 14. Feito isso, torna-se possível ordenar todos os PVF's em ordem decrescente de atratividade.

	PVF ₁	PVF ₂	PVF _{n-1}	PVF _n
PVF ₁	—	X _{1,2}		X _{1,n-1}	X _{1,n}
PVF ₂	X _{2,1}	—		X _{1,n-1}	X _{2,n}
⋮	⋮	⋮	—	⋮	⋮
PVF _{n-1}	X _{n-1,1}	X _{n-1,2}		—	X _{n-1,1}
PVF _n	X _{n,1}	X _{n,2}		X _{n,n-1}	—

FIGURA 14 - Matriz de ordenação dos PVF's.

A segunda etapa do processo inicia-se com a construção de uma matriz de juízos de valor, onde os pontos de vista fundamentais estarão ordenados em uma sequência decrescente de atratividade, ou seja, o ponto de vista fundamental considerado mais importante na etapa anterior ficará, em linha, acima dos demais e em coluna, mais à esquerda. Objetiva-se com isto, possibilitar o uso de uma matriz triangular superior para os julgamentos de diferença de atratividade, para que com a ordenação da matriz, torne-se fácil a realização do teste de inconsistência semântica (os julgamentos de diferença de atratividade não podem decrescer em linha da esquerda para a direita, e em coluna não podem aumentar de cima para baixo).

A fim de evitar a perda de informações, introduz-se na matriz de juízos de valor uma alternativa fictícia A0, que possui nível neutro em todos os pontos de vista. A inclusão dessa alternativa fictícia faz-se necessária para que haja a possibilidade de se estabelecer a diferença de atratividade, entre uma alternativa que esteja no nível bom no ponto de vista fundamental menos importante e no neutro em todos os demais e uma alternativa que esteja no nível neutro em todos os pontos de vista. Forma-se então a matriz para ponderação dos PVF's, expressa na Figura 15.

	PVF ₁	PVF ₃	PVF ₂	PVF ₂	A0
PVF ₁		X _{1,3}	X _{1,4}	X _{1,2}	X _{1,A0}
PVF ₃			X _{3,4}	X _{3,2}	X _{2,A0}
PVF ₄				X _{4,2}	X _{4,A0}
PVF ₂					X _{2,A0}
A ₀					

FIGURA 15 - Matriz de juízos de valor para ponderação dos PVF's.

A forma de questionamento, proposta por Bana e Costa e Vansnick (1994), ao decisor para se preencher a matriz de juízos de valor é a seguinte: *Uma vez que passar do nível neutro para o nível bom no PVFi foi considerado mais atrativo do que no PVFj, mantendo todos os demais constantes, esta diferença de atratividade é fraca, forte, ...?*

Uma vez preenchida e verificada a consistência semântica da matriz de juízos de valor para as informações inter-PVF, o M-MACBETH calcula uma escala que depois de normalizada fornece os valores dos pesos para todos os PVF's. Para se ter a normalização, basta dividir o valor obtido para cada PVF pelo somatório dos valores que formam a escala MACBETH (BANA E COSTA & VANSNICK, 1995). Ou seja, aplicar-se a fórmula abaixo:

$$p_j = \frac{v(PVF_j)}{\sum_{j=1}^n v(PVF_j)} \quad \text{Eq. 5.5}$$

Estes pesos são representados no software M-MACBETH, sob a forma de um histograma. Ao decisor é, então, facultativo alterar os valores dos pesos, dentro dos limites estabelecidos pelo M-MACBETH. No entanto, ao se alterar um dos limites para um dos PVF, todos os valores de pesos para os demais PVF também são alterados, de modo a manter soma igual a 1 (ou 100%).

6 FORMULAÇÃO DO MODELO

Neste estudo, a metodologia MACBETH foi utilizada para construir dois índices multicritério. O primeiro, designado por Índice de Vulnerabilidade de Barragens (IVB), visa mensurar o quanto as estruturas do barramento estão vulneráveis a uma possível ruptura, considerando os critérios de projeto, desempenho estrutural, situação das deteriorações existentes e dados de monitoramento, em outras palavras, este índice busca revelar a fragilidade da barragem enquanto sistema ou conjunto. O segundo índice, designado por Índice de Vulnerabilidade a Jusante de Barragens (IVJ_B), visa mensurar as consequências de uma ruptura em termos de vidas humanas, perdas socioeconômicas e ambientais.

A designação de índices de vulnerabilidade, ao invés de índices de risco, provém do fato do conceito de risco estar intimamente ligado ao conceito de probabilidade, e ainda de sua associação imediata a situações de eminência de desastres.

O processo de construção do modelo requereu a passagem por diversas fases, que são descritas nas seções que se seguem.

6.1 Fase de estruturação

A fase de estruturação procura identificar e organizar os fatores relevantes a respeito do contexto decisional e se subdivide em: (i) caracterização do contexto (apresentar o ambiente onde o problema está inserido, identificando também os atores e suas percepções atuais e pretendidas); (ii) árvore de ponto de vistas ou construção da estrutura hierárquica (consiste em identificar os critérios a serem avaliados); (iii) construção dos descritores (a construção das escalas ordinais de mensuração).

6.1.1 O ambiente decisional

O DNOCS é atualmente o segundo maior empreendedor de barragens no Brasil, e o primeiro, se considerarmos apenas as barragens de usos múltiplos. Apesar das águas acumuladas em seus reservatórios serem fonte de abastecimento humano para inúmeros municípios, servindo também para irrigação e piscicultura, o órgão não possui fontes de arrecadação própria, dependendo do orçamento destinado anualmente pela Lei Orçamentária Anual (LOA), lei elaborada pelo Poder Executivo que estabelece as despesas e as receitas que serão realizadas ano a ano. Se tal fato limita até mesmo ações essenciais de recuperação, o que dirá, ações ligadas ao acompanhamento e manutenção da segurança.

O presente estudo foi desenvolvido a partir das características das barragens construídas pelo DNOCS, por considerar que as demandas geradas pela classificação imposta têm impacto financeiro substancial sobre os já escassos recursos deste órgão para a manutenção e recuperação de suas 317 barragens. Deste total, 222 barragens se enquadram na Lei 12.334/10 pelos critérios de altura e volume, Figura 16.

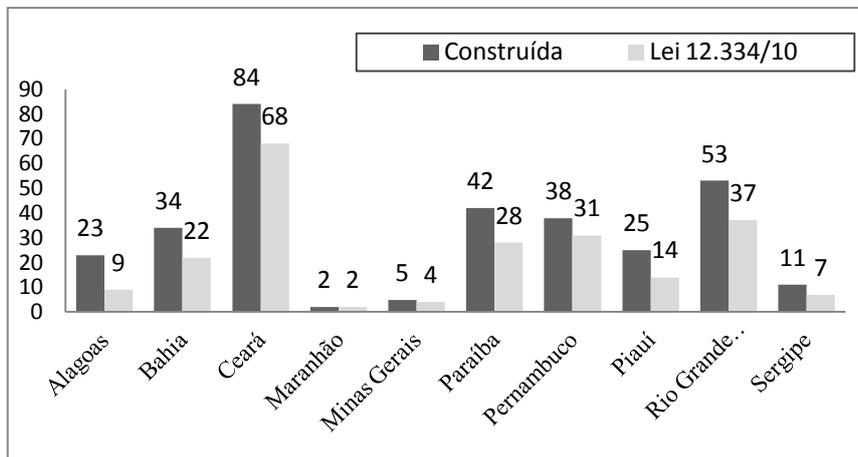


FIGURA 16 - Barragens construídas pelo DNOCS que se enquadram na Lei 12.334/2010. Fonte: elaboração da autora.

Entre as barragens construídas, há uma predominância quase absoluta de barragens de terra, como mostra o Quadro 37. São barragens de terra, homogêneas ou zonadas, sendo estatisticamente irrelevantes as executadas em blocos de pedra, concreto ciclópico ou em concreto.

QUADRO 37 - Tipo de barragens construídas pelo DNOCS.

Material	Percentual
Terra homogênea ou zonada	87,7%
Terra - enrocamento	0,6%
Enrocamento	1,0%
Alvenaria de pedra	5,8 %
Concreto	3,5 %
Terra - concreto	1,4 %

FONTE: Elaboração da autora.

Na Figura 17, observa-se a evolução das alturas das barragens construídas pelo DNOCS e também a predominância das barragens com altura entre 10 e 30 m. A barragem de Jucazinho, construída em CCR, com 63 m de altura é a mais alta, seguida pela barragem do Castanhão, mista de terra e concreto, com 60 m e pela barragem Banabuiú, de terra zoneada, com 57 m de altura.

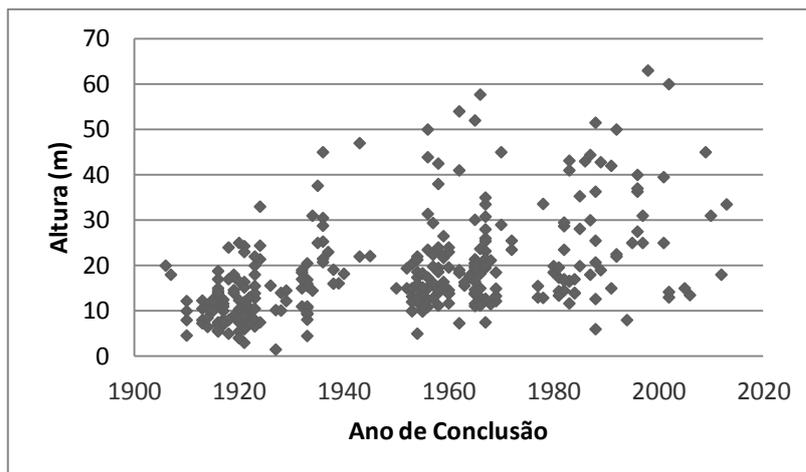


FIGURA 17 - Evolução das alturas das barragens construídas. Fonte: elaboração da autora.

No histograma da Figura 18, observa-se que muitas das barragens, construídas pelo DNOCS, já atingiram um razoável período da respectiva vida útil, podendo exigir intervenções de reabilitação ou de reforço.

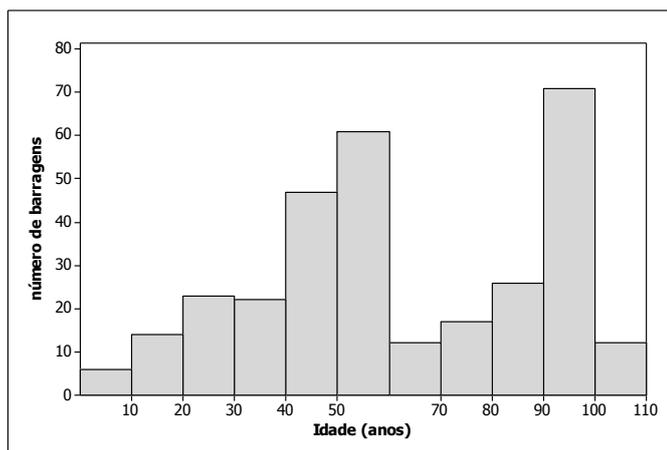


FIGURA 18 - Idade das barragens construídas pelo DNOCS. Fonte: elaboração da autora.

O Quadro 38 apresenta, com base em Menescal (2009), Araújo (1990), Miranda (2011) e em levantamentos realizados pela autora, relatos de acidentes e incidentes ocorridos em barragens construídas pelo DNOCS.

Entre os casos de galgamento, registrados pelo DNOCS, estão as barragens de Orós, Trairi e Santa Cruz. A barragem de Orós estava em construção quando foi galgada por uma cheia em 25 de março de 1960, resultante de chuvas de mais de 635 milímetros precipitados em menos de uma semana.

Como consequência do galgamento de 30 centímetros sobre a crista, no dia 26, uma brecha de 200m de comprimento por 35m de altura se formou, descarregando uma cheia cujo pico estimado chegou a 9.600 m³/s. Cerca de 90% do reservatório foi esvaziado.

A evacuação de mais de 100.000 pessoas no vale do Jaguaribe havia se iniciado no dia 22 de março por forças do exército. Após o galgamento da barragem, alertas foram transmitidos via rádio a todas as áreas em perigo. Panfletos foram distribuídos anunciando a catástrofe, já que muitas pessoas não queriam deixar seus lares. A cidade de Jaguaribe, 75 quilômetros a jusante, foi atingida em aproximadamente 12 horas depois do início da ruptura. O número de vítimas atribuído a esse acidente varia significativamente, embora algumas fontes apresentem números da ordem de 1.000 mortos.

Existem registrados, pelo DNOCS, dois casos de deslizamento de maciços de terra durante a construção: Cocorobó e Açú. Em ambos os casos a ruptura se deu segundo superfície de ruptura bem definida e os maciços eram compostos por solos argilosos de plasticidade alta e compressibilidade relativamente elevada, oriundos de jazidas aluvionares nas quais as argilas se encontravam praticamente saturadas.

As barragens do DNOCS registraram também um caso de deslizamento superficial, o da barragem de Banabuiú, na qual a capa superficial de rip-rap deslizou em um trecho no qual a compactação do solo sob o rip-rap, próximo à face externa do maciço, foi deficiente.

Segundo Sandroni (2006) o desastre da Barragem Ema, no Ceará, por entubamento em 1940, cerca de 8 anos após a construção, pode ser creditado à ausência de qualquer elemento drenante no maciço homogêneo de terra que a compunha provavelmente agravado por compactação deficiente. O talude de jusante, muito íngreme (1:1,5 - V:H), pode ter agravado a situação e o revestimento de pedras rejuntadas na face de montante não deve ter tido nenhuma eficiência como proteção contra a percolação excessiva.

A barragem Trairi sofreu transbordamento no ano de 1981, não houve ruptura completa do maciço, no entanto o talude de jusante sofreu intensa erosão, como mostra a Figura 19.

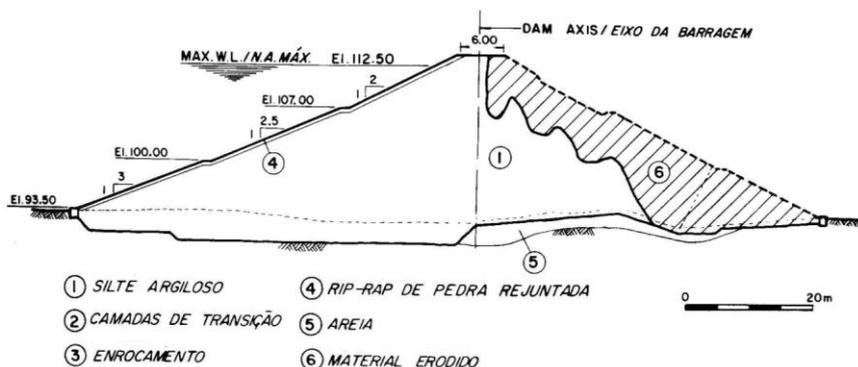


Figura 19 – Seção transversal da barragem Trairi após o extravazamento (ARAÚJO, 1990).

QUADRO 38 - Relação de barragens do DNOCS com acidentes e incidentes.

	Barragem/ Açude	UF	Tipo	Acidente/ Incidente	Causa provável	Fase
1	Orós (1960)	CE	TE	Galgamento e conseqüente ruptura	Atraso no cronograma associado a cheia acima da média histórica para o período	Construção
2	Armando Ribeiro Gonçalves Açú (1981)	RN	TE	Escorregamento do talude de montante, na parte central, provocando desmoronamento de grandes proporções, da ordem de 1,5 milhão de m ³	poro-pressão no período de construção	Final de Construção
3	Engenheiro Ávidos Piranhas (1963)	PB	TE c/ cortina central de concreto armado.	Recalques e movimentos que provocaram a abertura de algumas juntas	Sangria com lâmina máxima d'água de 0,30m	Operação
4	Arrojado Lisboa Banabuiú (1961)	CE	TE c/ núcleo impermeável, transições de montante e jusante, esta recoberta com enrocamento.	Escorregamento superficial do rip-rap do talude de montante	Rebaixamento rápido do nível d'água para dar vazão à cheia	Construção
5	Eugênio Gudim Acarape do Meio (1912)	CE	PG(M)	As águas da barragem de desvio transbordaram e romperam uma das ombreiras	Intensas precipitações.	Construção
6	Trairí (1981)	RN	TE	Transbordamento por sobre o maciço com lâmina máxima de 1,1m durante 5h	Precipitações intensas e arrombamento do açude Santa Cruz, à montante	Operação
7	Santa Cruz (1981)	RN	TE	Ruptura do maciço devido ao seu transbordamento	Rompimento de seis pequenos açudes á montante liberando um volume estimado de 5.000.000 m ³ .	Operação
8	Epitácio Pessoa Boqueirão de Cabaceiras (1956)	PB	TE	Pouco tempo depois de sua conclusão, a barragem recebeu grande volume de água (320 milhões de m ³), após o que, o reservatório foi esvaziado. Seguiu-se a este fato o aparecimento de trincas no maciço da barragem, junto á ombreira direita, e de recalque da crista junto à margem esquerda.	Os trabalhos de recuperação não estão descritos na documentação técnica disponível.	Operação
9	Cocorobó (1967)	BA	TE	Escorregamento de parte do talude de montante, com cerca de 45.000m ³ de terra deslocados numa extensão aproximada de 100m.	Poros-pressão no período de construção	Final de construção
10	Caldeirão (1956)	PI	TE	Depressões no talude de montante. Fuga d'água com carreamento de material, cinco surgências com altos valores.	Piping através da fundação. Fundações em arenito e folhelhos extratificados.	Operação (dez anos após primeiro enchimento)

11	Carão	CE	TE	Quando do primeiro enchimento observou-se uma vazão elevada pela fundação (aluvionar). observaram-se "olhos d'água ("borbulhamentos" ou "boils").	Como medidas de controle de percolação foram construídos um tapete a montante e uma trincheira parcialmente penetrante (cerca de 5 metros para uma profundidade total média de aluvião de 10 metros).	Primeiro Enchimento
12	Barreiras (1974)	PI	TE	Fenda longitudinal no talude de jusante, aproximadamente 2m abaixo do coroamento; abatimentos no rip-rap de montante; levantamento do revestimento em pedra rejuntada das banquetas e ressurgência no pé de jusante, próximo à tomada d'água e no dreno de pé.		Operação
13	Sta Maria (1924)	CE	TE	Arrombamento	Cheia superior à capacidade do sangradouro	
14	Patos (1924)	CE	TE	Arrombamento	Cheia superior à capacidade do sangradouro	
15	Ema (1940)	CE	TE	Piping e deslizamento do talude de jusante - ruptura total.	Ausência de elementos drenantes no maciço homogêneo..	Operação (8 anos)
16	General Sampaio (1940)	CE	TE	Percolação pelo túnel da tomada d'água com carreamento de material do maciço	Caminho preferencial de percolação no contato do maciço com a estrutura da tomada d'água não interceptado pelo sistema interno de drenagem	Operação
17	Caxitoré (1961)	CE	TE	Trinca transversal no contato do maciço com a ombreira esquerda quando o maciço estava com 15m de altura.	Dificuldade de compactação devido á inclinação elevada da ombreira	Construção
18	São Mateus (1981)	CE	TE	Erosões de grandes dimensões	Deficiência do sistema de drenagem associado a fortes chuvas	Operação após 5 anos
19	Farias de Souza (1986)	CE	TE	Surgência à jusante numa extensão de 120m por três de largura		Primeiro enchimento (parcial)
20	Roberto Costa Trussú (1997)	CE	TE	Trincas longitudinais sobre o coroamento		Primeiro enchimento (parcial)
21	Joana (2004)	PI	TE	Fuga d'água com carreamento de partículas nas proximidades da tomada d'água. E surgência localizada nas proximidades do encontro do maciço com a ombreira esquerda.	Vazamento na tubulação da tomada d'água. Foram realizadas injeções, mas até o presente o problema não foi resolvido.	Operação

FONTE: Compilado a partir de Araújo (1990), Menescal (2009) e Miranda (2011).

22	Piaus (2009)	PI	TE	Trincas transversais profundas junto às ombreiras, após o primeiro enchimento parcial do reservatório.	Vale muito estreito; fundação, no vale do rio, mais compressível que as ombreiras; alta velocidade de construção (50% do maciço em 4 meses e 80% em 7 meses), material do aterro compactado no ramo seco (média de 1% abaixo da umidade ótima) e solo com índice de plasticidade inferior a 15%.	Primeiro enchimento (parcial)
23	Jucazinho (2014)	PE	CCR	Fissura na laje do coroamento próxima à ombreira direita, sinais de percolação no paramento de jusante próximo à ombreira esquerda, deteriorações no concreto do paramento de jusante, vazamento no teto da galeria, manchas esbranquiçadas em diversos pontos do paramento de jusante e sangradouro, bacia amortecedora apresentando laje danificada com ferragens retorcidas.		Operação

FONTE: Compilado a partir de Araújo (1990), Menescal (2009) e Miranda (2011).

6.1.2 Atores

Os atores incluídos neste estudo são os engenheiros especialistas em barragens, atuando como decisores, e a autora do trabalho em pauta, cujo papel foi de facilitadora, esclarecendo o grupo sobre o procedimento proposto, confrontando os pontos de vistas expressos pelos decisores e modelando seus julgamentos.

O critério de seleção dos decisores, Quadro 39, foi baseado na experiência e no conhecimento que demonstravam, relativamente ao projeto, construção e atividades de consultoria, assim como sua disponibilidade para participar no questionário inicial e nas entrevistas.

A ideia inicial era contar com a participação de um número maior de decisores, especialistas conceituados a nível nacional atuando em outros Estados, para tanto, alguns questionários foram enviados via e-mail e logo percebeu-se uma série de dificuldades, a principal delas foi a ausência de resposta, seguida pela dubiedade de interpretação de alguns questionamentos e finalmente a impossibilidade de entrevistas presenciais nas demais fases do processo de alimentação de juízos de valor e verificação de sua consistência no software M-MACBETH.

QUADRO 39 - Descrição da formação e experiência dos especialistas.

Especialista 1	Engenheiro Civil, pós doutorado em Geotecnia, professor universitário, com extensa produção técnica, experiência de 22 anos no serviço público atuando no acompanhamento, projeto e construção de barragens pelo DNOCS.
Especialista 2	Engenheiro Civil, PhD em Mecânica dos Solos, professor universitário, consultor em segurança de barragens do Ministério da Integração Nacional, com extensa produção técnica e experiência em projetos e consultoria.
Especialista 3	Engenheira Civil, com mestrado e doutorado em recursos hídricos, professora universitária, engenheira do DNOCS de 1984 a 2011 atuando no acompanhamento de projeto e construção de barragens, com extensa produção técnica.
Especialista 4	Engenheiro Civil, doutorado em recursos hídricos, professor universitário, elaborou estudos hidrológicos em mais de 50 reservatórios do Nordeste, atua como membro do Painel de Segurança de Barragens desde 1992, possui livros publicados e extensa produção técnica.

A etapa de estruturação do modelo foi construída a partir da informação e perspectivas recolhidas em entrevistas iniciais com os atores, e não a partir de conferências de decisão como pressupõe Thomaz (2005). Isto aconteceu uma vez que foi decidido, restringir a contribuição das conferências de decisão no desenvolvimento do modelo, devido aos constrangimentos de tempo e disponibilidade que os atores apresentavam.

Com base nesse argumento, foram realizadas entrevistas iniciais, individualmente, com os especialistas 1, 2 e 3. Nestas entrevistas, de cerca de uma hora de duração, foi aplicado um questionário aos decisores, onde se colocaram diversas perguntas, com o propósito de avaliar a importância, ou não, dos critérios pré-definidos pela Resolução 143 e sobre os níveis utilizados para estabelecer as pontuações para a classificação das barragens, ou seja, a Resolução 143 serviu como base de estruturação e forneceu os elementos primários de avaliação (EPA's) para a definição dos pontos de vistas fundamentais (PVF's) e de seus níveis de impacto.

Para cada um dos elementos primários de avaliação (EPA's) foram feitas as seguintes perguntas:

- É fundamental? sim ou não.
- É redundante? sim ou não.
- Mantém relação de dependência com outro descritor? sim ou não.
- Quanto aos níveis atribuídos. são adequados ? sim ou não.
- Faria alguma alteração nos níveis? sim ou não.
- Sugestão:

Como as perguntas colocadas eram abertas à discussão, sempre que surgiram novas questões, novas perguntas eram colocadas.

6.1.3 Identificação dos Pontos de Vista Fundamentais (PVF)

A informação, recolhida através dos questionários, permitiu iniciar a estruturação do modelo, possibilitando, entre outras coisas, que a partir dos critérios pré-definidos pela Resolução 143 fossem verificados quais destes atenderiam as propriedades que devem ter os PVF's, como visto no Capítulo 5 em 5.4.1.1, ou seja, que os mesmos foram validados.

Após esta validação (Quadro 40), alguns critérios pré-definidos foram eliminados e outros ajustados ou agrupados, resultando, por fim, na consideração de treze PVF's para o cálculo do IVB e três PVF's para o cálculo do IVJ_B, com os quais se iniciou a construção do modelo multicritério no software M-MACBETH versão 2.3.0, agrupando-os nas áreas de interesse estabelecidas. O software agrupa os PVF's em vários níveis, de acordo com as áreas de interesse, e apresenta-os em forma de árvore.

QUADRO 40 - EPA's e validação dos PVF's.

Elemento Primário de Avaliação (EPA)	Validação	Ponto de Vista Fundamental
Risco		IVB
EPA 1 - Altura	Mantém relação de dependência com o EPA18	-
EPA – 2 Comprimento	Não fundamental	-
EPA 3 - Tipo de barragem quanto ao material de construção	Fundamental	PVF2
EPA 4 - Tipo de Fundação	Fundamental	PVF4
EPA – 5 Idade da Barragem	Fundamental	PVF5
EPA 6 - Vazão de Projeto	Fundamental	PVF3
EPA 7 - Confiabilidade das estruturas extravasoras	Fundamental	PVF7
EPA 8 - Confiabilidade das estruturas de adução	Fundamental	PVF9
EPA 9 - Percolação	Fundamental	PVF10
EPA 10 - Deformações e recalques	Fundamental	PVF11
EPA 11 - Deterioração dos taludes / paramentos	Fundamental	PVF8
EPA 12 - Eclusa	Não Fundamental	-
EPA 13 - Existência de documentação de projeto	Fundamental	PVF6
EPA 14 - Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem.	Mantém relação de dependência com o EPA 15 e 17. Podem ser agrupados	-
EPA 15 - Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e monitoramento	Mantém relação de dependência com o EPA 14 e 17. Podem ser agrupados.	PVF 12 e PVF 13
EPA 16 - Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem	Pode ser incorporado ao PVF7.	-
EPA 17 - Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação	Mantém relação de dependência com o EPA 14 e 15. Podem ser agrupados.	-
Dano associado		IVJ_B
EPA 18 - Volume total do reservatório	Fundamental	PVF1 (do IVB)
EPA 19 - Potencial de perda de vidas humanas	Mantém relação de dependência com o EPA18	PVF14
EPA 20 - Impacto ambiental	Mantém relação de dependência com o EPA18	PVF15
EPA 21 - Impacto sócio econômico	Mantém relação de dependência com o EPA18	PVF16

FONTE: Elaboração da autora.

A árvore para a o cálculo do IVB é a apresentada na Figura 20, em que estão presentes as quatro áreas de interesses (projeto, manutenção e operação, comportamento estrutural e monitoramento) e os treze PVF's que serão tomados como critérios de avaliação. Note-se que o software M-MACBETH distingue dois tipos de nós, os “nós critérios” (assinalados em vermelho nas Figuras 20 e 21) que correspondem aos PVF e os “nós não critérios”.

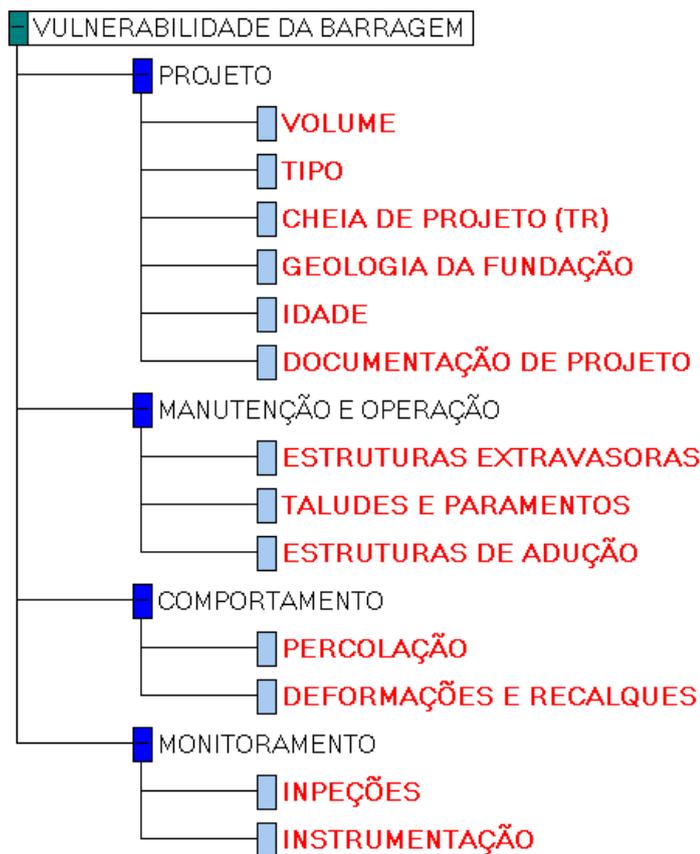


FIGURA 20 - Árvore de pontos de vista para a vulnerabilidade da barragem. Fonte - elaboração da autora.

A árvore para a o cálculo do IVJ_B é a apresentada na Figura 21, em que estão presentes os PVF's considerados.

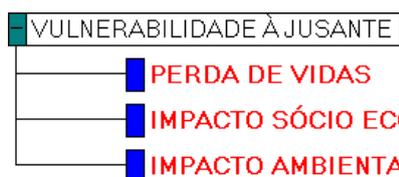


FIGURA 21 - Árvore de pontos de vista para a vulnerabilidade à jusante. Fonte - elaboração da autora.

6.1.4 Descritores para o cálculo do IVB

Completada a etapa de identificação dos *PVF*'s pelos especialistas, deve-se então torná-los operacionais, portanto a próxima etapa é descrever, da forma mais objetiva possível, os plausíveis níveis de impactos a eles associados.

Para cada PVF foi definido, com base nos níveis pré existentes e nas modificações propostas pelos especialistas durante a aplicação do questionário, um conjunto de níveis de impacto, em ordem decrescente. Os impactos nos PVF foram descritos qualitativamente e, para cada um deles, foram ancorados dois níveis de referência como já referido.

Segundo Silva (2012), dependendo do contexto do problema de decisão, os níveis de referência, *bom* e *neutro*, podem ter outra designação mais apropriada. Assim neste trabalho, em particular, uma vez que se pretende aferir a vulnerabilidade e as consequências da ruptura de barragens, usaram-se os níveis *crítico* e *neutro*, como níveis de referência, respectivamente, por ser mais intuitivo para o grupo de especialistas. Sob tal entendimento, o nível *crítico* corresponde ao nível a partir do qual, a barragem se encontra no "limiar de vulnerabilidade" no respectivo PVF e o nível neutro corresponde ao nível de vulnerabilidade "minimamente satisfatório".

Os descritores de impacto dos pontos de vista fundamentais, indicados e descritos nos Quadros 41 a 57, foram introduzidos no M-MACBETH, tal como se indica na Figura 22. Na aplicação do software representada naquela figura, quando se selecionaram os níveis de referência, estes passaram a apresentar a cor verde para o nível crítico e a cor azul para o nível neutro.

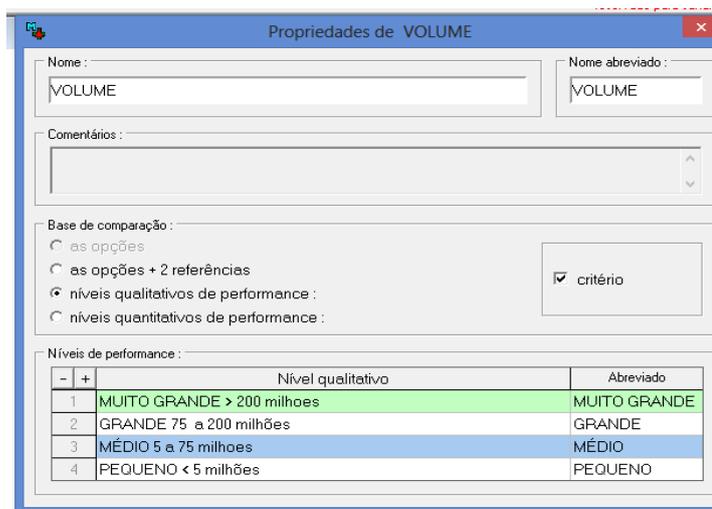


FIGURA 22 - Introdução dos critérios e níveis de impacto no software MACBETH.

6.1.4.1 Volume (PVF₁)

Muito embora o volume se trate de um critério quantitativo, foram mantidas quatro classes discretas de impactos para este descritor, tal como pré-estabelecidos pela Resolução 143, já que estas foram consideradas adequadas pelos especialistas e não foram sugeridas alterações.

QUADRO 41 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF1 – volume.

PVF1 - Volume	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	MUITO GRANDE: ≥ 200 milhões de m ³
N3	GRANDE: 75 a 200 milhões de m ³ ;
N2	MÉDIO: 5 a 75 milhões de m ³ ;
N1	PEQUENO: ≤ 5 milhões de m ³

6.1.4.2 Tipo de Barragem (PVF₂)

O tipo de barragem, quanto ao material de construção, trata-se de um critério qualitativo. Os especialistas sugeriram alterações nos níveis de impacto deste descritor por considerar que as barragens de enrocamento apresentam comportamento distinto das barragens de terra, desta forma foi incluído um nível de impacto independente para as barragens de enrocamento.

QUADRO 42 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF2 – Tipo.

PVF2 - Tipo	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	Terra (Homogênea ou Zoneada)
N3	Enrocamento (núcleo argiloso ou face de concreto)
N2	Alvenaria de pedra, concreto ciclópico e concreto rolado CCR
N1	Concreto Convencional (gravidade, arco, contrafortes)

6.1.4.3 Cheia de projeto (PVF₃)

A operacionalização deste descritor teve como parâmetro de comparação o período de retorno (TR) utilizado para o cálculo da cheia de projeto. Em linhas gerais, quanto menor o período de retorno, maior a possibilidade de galgamento, sob tal entendimento, o especialista 4 não sugeriu alterações nos níveis de impacto deste descritor e definiu os níveis crítico e neutro.

QUADRO 43 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF3 – Cheia de projeto

PVF3 - Cheia de Projeto	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	TR < 500 anos, desconhecida, não confiável
N3	TR = 500 anos
N2	Milenar
N1	Cheia máxima provável ou decamilenar

6.1.4.4 Geologia da Fundação (PVF₄)

A avaliação deste descritor é qualitativa, designadamente em função da qualidade do terreno de fundação e das eventuais intervenções. A escolha do nível N5, correspondente ao solo residual/ aluvião, como nível crítico, encontra justificativa em alguns trabalhos, entre eles o de FOSTER *et al.* (1998), segundo o qual o fator geologia da fundação é crítico quando o solo é do tipo aluvial, pois apresenta os maiores percentuais de casos de ruptura e acidentes de *piping* pela fundação, representando 56% dos solos da amostra de barragens pesquisadas nos seguintes países: EUA, Índia, Canadá, Austrália e Nova Zelândia.

Os especialistas não sugeriram alterações nos níveis de impacto deste descritor.

QUADRO 44 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF4 – geologia da fundação.

PVF4 – Geologia da fundação	
Níveis de Impacto	Descritor
N5	MEDIOGRES: Solo residual / aluvião
N4	REGULAR: Rocha alterada mole/ saprolito/ solo compacto
N3	SATISFATÓRIA: Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento
N2	BOAS: Rocha alterada dura com tratamento
N1	MUITO BOA: Rocha sã

6.1.4.5 Idade (PVF₅)

Tal como os outros descritores (volume e altura), apesar de quantitativo, a idade foi tratada de forma discreta. Os especialistas sugeriram alterações, nos níveis de impacto, por terem percebido os seguintes aspectos:

- i. a probabilidade de ruptura pode variar ao longo da vida útil das barragens, sendo maior nos cinco primeiros anos de operação, após os quais, verifica-se que os períodos subsequentes, quando comparados entre si, não apresentam variações significativas ou que justifiquem a adoção de critérios de segurança tão rigorosos quanto os dos primeiros anos de operação e;

- ii. os processos, mecanismos e as patologias apresentadas por barragens de terra em função do envelhecimento são bem distintos daqueles apresentados por barragens de concreto, senão vejamos, o concreto da barragem, em contato com a água do reservatório, entre outras patologias pode apresentar fissuras originadas de vibrações, solicitações cíclicas (fadiga) e alterações químicas (lixiviação, expansão e reação álcali-agregado), a evolução destas patologias está diretamente relacionadas à idade da barragem.

Pelo exposto, os especialistas sugeriram que fossem assumidos níveis de impacto em função do tipo de barragem.

QUADRO 45 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF5 – idade.

Níveis de Impacto	PVF5 – Idade	
	Barragens de Terra	Barragens de Concreto
N4	< 5 anos	< 5 anos ou > 60
N3	Entre 5 e 15 anos ou maior que 60	Entre 30 e 60 anos
N2	Entre 15 e 30 anos	Entre 15 e 30 anos
N1	Maior que 30 anos	Entre 5 e 15 anos

6.1.4.6 Documentação de projeto (PVF₆)

Este descritor é relativo à concepção estrutural e à execução da barragem. Sua operacionalização teve como parâmetro de comparação a documentação de projeto. Sua avaliação é qualitativa, em função do grau de detalhamento da documentação de que se dispõe.

A documentação de projeto, além de possibilitar a consulta aos desenhos “como construído”, permite a análise dos critérios de projeto e das especificações de obras civis. Permite, também, resgatar os perfis de sondagens, seções geológicas e relatório de tratamento de fundações, bem como a hidrologia do projeto, incluindo a série de vazões adotada, o cálculo da estimativa da cheia de projeto e os estudos sedimentológicos.

Cabe registrar que em barragens antigas é comum o extravio de documentos de projeto e de registros de construção, principalmente quando acontece de o proprietário atual da barragem não ter participado daquelas etapas do empreendimento.

QUADRO 46 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF6 – documentação de projeto.

PVF6 – Documentação de projeto	
Níveis de Impacto	Descritor
N5	Inexiste documentação de projeto.
N4	Anteprojeto ou Projeto conceitual.
N3	Projeto básico ou parte do projeto executivo/ "como construído".
N2	Projeto executivo ou "como construído".
N1	Projeto executivo e "como construído".

6.1.4.7 Estruturas extravasoras (PVF₇)

As estruturas extravasoras constituem órgãos hidráulicos de segurança. A operação e manutenção destas estruturas foram avaliadas em função do grau de deterioração e instruções de operação. Os especialistas sugeriram alterações por terem percebido os seguintes aspectos:

- i. Nos vertedores com soleira livre são importantes os cuidados em relação à desobstrução e a limpeza dos canais de aproximação e restituição da soleira, que quando obstruídos podem reduzir a capacidade de vazão. Também é bastante comum a ocorrência de erosões de diversos tipos e intensidades no canal de restituição podendo levar ao descalçamento e colapso da estrutura vertente. Fontenelle et al. (2007) relatam dois casos onde essas erosões atingiram níveis extremos, necessitando de intervenções emergenciais.
- i. Nos vertedouros com comportas há maior risco, em função da menor borda livre e a possibilidade de galgamento devido a falhas mecânicas e operacionais das comportas.

No que se refere ao risco dos vertedores com comportas, Zuffo (2010) salienta que chuvas excepcionais, que causam grandes enchentes, podem interromper o suprimento de energia elétrica, a transmissão, o funcionamento de computadores e, ainda, causar pânico. Existem dois pontos-chaves para se avaliar este risco: a probabilidade da onda de cheia passar pela barragem quando todas as comportas estiverem fechadas e a qualidade da manutenção, do treinamento dos operadores, das medidas de emergência, da comunicação, do acesso à estrutura, etc.

As comportas podem não funcionar ou funcionar mal, em consequência, por exemplo, de: i) obstrução ou encravamento; ii) manutenção deficiente dos equipamentos de manobra das comportas (em particular, do seu sistema de alimentação em corrente); iii)

inexistência de sistema alternativo do fornecimento da corrente ou grupos de emergência e iv) desajustamento das leis de manobra (VISEU, 2008, p.52).

Pelo exposto, os níveis de impacto relativos às estruturas extravasoras foram divididos em função do tipo. As Figuras 23 e 24 visam ilustrar, através de situações reais, este descritor.

QUADRO 47 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF7 – estruturas extravasoras.

Níveis de Impacto	PVF7 - Estruturas extravasoras	
	Com Comportas	Soleira Livre
N4	INSATISFATÓRIA: Equipamentos Hidromecânicos deteriorados ou com equipamentos de manobra não operacionais.	INSATISFATÓRIA: Canais obstruídos ou com processo erosivo intenso com risco imediato à estrutura vertente..
N3	DEFICIENTE: Equipamentos Hidromecânicos com deterioração localizada ou com equipamentos de manobra funcionais, mas com problemas operacionais.	DEFICIENTE: Canais parcialmente obstruídos com erosões moderadas cuja evolução pode por em risco à estrutura vertente. Estrutura vertente com deteriorações (rachaduras, ferragem exposta).
N2	REGULAR: Equipamentos Hidromecânicos em boas condições e equipamentos de manobra operacionais em condições normais, mas não em condições excepcionais, ou não possuem regras de operação e manobra dos dispositivos de controle (comportas).	REGULAR: Canais ou vertedouro com erosões mínimas ou obstruções localizadas porem sem riscos a estrutura vertente Estrutura vertente com sinais de desgaste.
N1	SATISFATÓRIA: Equipamentos Hidromecânicos em boas condições e equipamentos de manobra em pleno funcionamento. Possuem regras de operação e manobra dos dispositivos de controle (comportas).	SATISFATÓRIA: Canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro desobstruídos e sem erosões. Estrutura vertente bem conservada.



FIGURA 23 - Crescimento de vegetação no canal de aproximação do sangradouro da barragem Caldeirão de Parelhas – RN.



FIGURA 24 - Tratamento sem resultado das trincas na soleira do vertedouro da Barragem Cocorobó-BA.

6.1.4.8 Taludes e paramentos (PVF₈)

O estado de conservação dos taludes e paramentos, em princípio não representa maior ameaça à integridade da obra, salvo se houver completo descaso e ele ocorrer de forma intensa e generalizada. As Figuras 25 a 28 visam ilustrar situações reais deste descritor.

QUADRO 48 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF8 – taludes e paramentos.

PVF8 – Taludes e paramentos		
Níveis de Impacto	Barragens de Terra	Barragens de Concreto
N4	INSATISFATÓRIA: Sulcos profundos de erosão ou crescimento de árvores, com potencial de comprometimento da segurança, drenagem inexistente ou totalmente comprometida.	INSATISFATÓRIA ocorrência generalizada de abrasão, desagregação do concreto, lixiviação.
N3	DEFICIENTE: Erosões superficiais, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva, drenagem parcialmente comprometida ou obstruída.	DEFICIENTE ocorrência significativa de abrasão, desagregação do concreto, lixiviação.
N2	REGULAR: Falhas na proteção dos taludes e paramentos, arbustos de pequena extensão e impacto nulo, drenagem com obstruções ou comprometimento localizado.	REGULAR ocorrência localizada de abrasão, desagregação do concreto, lixiviação.
N1	SATISFATÓRIA Inexistente	SATISFATÓRIA



FIGURA 25 - Árvores no talude de montante da Barragem Caldeirão de Parelhas- RN.



FIGURA 26 - Árvores e sulcos profundo de erosão no talude de jusante da Barragem Caldeirão de Parelhas..



FIGURA 27 - Canaleta quebrada, Barragem Caldeirão de Parelhas- RN.



FIGURA 28 - Degradação do concreto no paramento de jusante da Barragem Jucazinho -PE.

6.1.4.9 Estruturas de adução (PVF₉)

As estruturas de adução constituem órgãos hidráulicos de exploração, entretanto, como relatado por Silveira (2011), não é comum, em barragens brasileiras, a existência de descarregadores de fundo para rebaixamento emergencial dos reservatórios e, portanto, as estruturas de adução acabam por acumular também este papel, muito embora este rebaixamento seja lento.

O relatório do professor Milton Kanji, sobre o rompimento da Barragem Camará (pertencente à CAGEPA), exemplifica bem a importância das estruturas de adução em situações emergenciais:

“A não tomada de atitude e decisão de rebaixar o reservatório permitiu o prosseguimento e agravamento do mecanismo de erosão interna (“piping”) instalado, o que finalmente conduziu à ruptura da barragem pela sua fundação. Caso a decisão tivesse sido tomada em 17 de maio de 2004, acatando a recomendação de rebaixamento, os cálculos hidráulicos demonstram (Ref.1, Anexo 1) que em 30 dias o NA da represa teria se rebaixado à elevação 421m, e se tomada em 21 de maio, no mesmo período teria se rebaixado à elevação 429m. Portanto, não teria ocorrido a ruptura da barragem” (KANJI, 2004).

As atividades de manutenção destes equipamentos hidromecânicos, e das estruturas civis que os abrigam (torre de tomada d’água, caixa de jusante, etc), representam um aspecto essencial para evitar deteriorações e, portanto, sua avaliação é qualitativa, em função do grau de comprometimento da funcionalidade.

QUADRO 49 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF₉ – estruturas de adução.

PVF ₉ – Estruturas de adução	
Níveis de Impacto	Descritor
N3	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução ou impossibilidade de controle da vazão (emperrados ou inacessíveis) e sem manutenção.
N2	Estruturas civis ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, mas, sem redução ou impossibilidade de controle da vazão (Ex. corrosão, limpeza, lubrificação, dificuldade de acesso)
N1	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos, sem problemas identificados e em condições adequadas de manutenção e funcionamento



FIGURA 29 - Ferragem exposta no teto da torre da tomada d'água da Barragem Itans – RN.



FIGURA 30 - Comporta da tomada d'água apresentando corrosão, Barragem Choró –CE.



FIGURA 31 - Ferragem exposta dos pilares de sustentação da torre da tomada d'água da Barragem Sabugi – RN.



FIGURA 32 - Caixa de jusante com registros e tubulação danificada, Barragem Amanari- CE.

6.1.4.10 Percolação (PVF₁₀)

Nas barragens de aterro a percolação, pelo corpo do aterro ou fundação, pode dar origem ao fenômeno do piping, que é uma das causas mais frequentes de rupturas. Sua evolução deve ser monitorada por medidores apropriados, a fim de que sejam adotadas providências para o controle e estabilização em tempo hábil. Nas barragens de concreto, as infiltrações, associadas à existência de juntas e fissuras, podem conduzir a deterioração do concreto, pela lixiviação do cimento ou mesmo serem indicativos de fissuração excessiva.

A avaliação deste descritor é qualitativa, em função da intensidade e tratamento dado ao problema.

QUADRO 50 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF10 – percolação.

PVF10 - Percolação	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	Surgência nas áreas de jusante, taludes, ombreiras ou paramentos, com carreamento de material ou com vazão crescente.
N3	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou monitoramento.
N2	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas.
N1	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem.

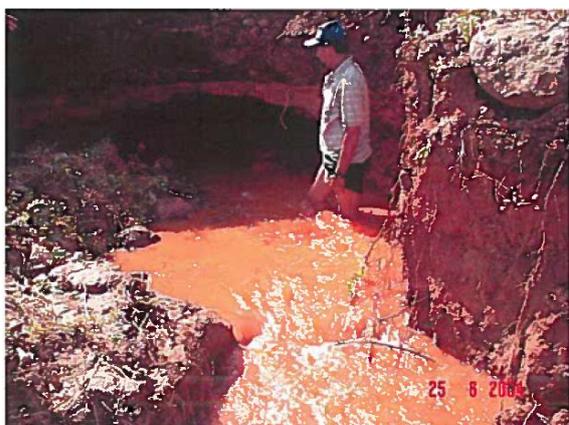


FIGURA 33 - Piping, Barragem Joana – PI, ano 2004.



FIGURA 34 - Detalhe da percolação no paramento de jusante junto à ombreira esquerda com material esbranquiçado, Barragem Jucazinho – PE..

6.1.4.11 Deformações e recalques (PVF_{11})

A ocorrência de deformações e recalques se materializa através do surgimento de trincas, fissuras, afundamentos e escorregamentos. Estas patologias, quando não tratadas e controladas, podem comprometer a segurança estrutural (SANDRONI, 2006).

Para Sandroni (2006), o aparecimento de trincas ou fissuras, internas e externas, é um evento comum em barragens de terra: "*Hoje em dia está estabelecido que a ocorrência de fissuras em maciço de terra, mesmo nos bem compactados, é um evento freqüente. Nos projetos de barragens de terra sempre se deve considerar como provável a sua presença*".

Existem diversos casos divulgados de trincamentos em barragens brasileiras, tanto em barragens de terra quanto em barragens de concreto, não se tendo, porém registrado nenhum desastre a eles associado diretamente. Entre as barragens do DNOCS, que apresentaram este tipo de problema, podemos destacar: Barreiras, Boqueirão das Cabaceiras e

Caxitoré (PESSOA, 1964), Trussú (OLIVEIRA e SILVA FILHO, 2011), Pias (MIRANDA et al., 2011) e Jucazinho.

Já quanto aos escorregamentos, nos maciços de terra, são muito poucos os relatos no Brasil, um dos casos mais divulgados foi o da barragem Açú, como já apresentado no Quadro 39. Os escorregamentos podem ser superficiais ou profundos, podendo ocorrer no maciço ou ombreiras, durante a construção ou operação da barragem, sendo nesta última mais preocupante, pois frequentemente o reservatório encontra-se cheio.

QUADRO 51 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF11 – estruturas extravazoras.

PVF11 – Deformações e recalques	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança
N3	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento
N2	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo
N1	Inexistente



FIGURA 35 - Trincas no concreto da galeria de inspeção da Barragem Gargalheiras – RN.



FIGURA 36 - Trincas longitudinais no coroamento da Barragem Trussú – CE.



FIGURA 37 - Detalhe de fissura na laje do coroamento próximo à ombreira direita, Barragem Jucazinho – PE, 2004.

6.1.4.12 Inspeções (PVF₁₂)

Chama-se monitoramento de uma barragem ao conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global. Para FERC (2003) os programas de monitoramento são compostos por:

Inspeções visuais - proveem informação qualitativa, através de vistorias periódicas de campo;

Instrumentação - provê informação quantitativa detalhada através dos processos de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos a partir dos instrumentos de medida instalados no corpo ou na fundação da barragem.

Pelo exposto a avaliação do monitoramento será realizada segundo dois critérios qualitativos (inspeções e instrumentação).

No que se refere ao primeiro critério, inspeções, a Resolução 742/2011 determina que as inspeções de segurança regulares de barragens deverão ser efetuadas por equipe de segurança de barragens, composta por profissionais treinados e capacitados, e terão como produtos finais a ficha de inspeção, o relatório de inspeção e o extrato da inspeção, a ser cadastrado em site específico. Portanto os critérios pré-definidos: equipe, inspeções e relatórios; mantêm relação de dependência e foram reunidos em um só descritor.

Os níveis de impacto foram definidos, em função do cumprimento do que determina a legislação.

QUADRO 52 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF12 – inspeções.

PVF12 - Inspeções	
Níveis de Impacto	Descritor
N3	NÃO ATENDE - Não realiza inspeções, não possui equipe ou possui equipe não qualificada.
N2	ATENDE PARCIALMENTE - Realiza inspeções por equipe qualificada em formulário próprio sem periodicidade OU realiza inspeções com periodicidade mas não emite os relatórios e não cadastra extrato.
N1	ATENDE COMPLETAMENTE Realiza inspeções com periodicidade, formulários, relatórios e extrato.

6.1.4.13 Instrumentação (PVF₁₃)

No que se refere ao segundo critério, instrumentação, no Brasil esta prática só ganhou particular impulso a partir de 1950, época em que se passou a construir um grande número de usinas hidrelétricas, empregando-se estruturas cada vez maiores e situadas em locais com grande diversidade e complexidade o que exigiu projetos mais elaborados e a concepção de planos de instrumentação objetivando a supervisão das condições de segurança. Desta forma, é comum não se encontrar instrumentação em barragens antigas ou pequenas barragens, outras vezes a instrumentação, mesmo existente, encontra-se em mau estado ou inoperante.

Os níveis de impacto foram definidos, em função das leituras realizadas.

QUADRO 53 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF7 – estruturas extravazoras.

PVF13 - Instrumentação	
Níveis de Impacto	Descritor
N3	Não possui instrumentação ou instrumentação inoperante.
N2	Possui instrumentação, mas não realiza leituras periódicas ou as leituras são deficientes.
N1	Possui instrumentação e realiza leituras periódicas.



FIGURA 38 - Marco para medição de recalque inutilizado, Barragem Cocorobó – BA, 2013.

6.1.5 Descritores para o cálculo do IVJ_B

Para Hartford (1999) o termo consequência, refere-se ao impacto total ocorrido como resultado de um perigo concretizado. Neste sentido, para a construção de um Índice de Vulnerabilidade à Jusante de Barragens (IVJ_B) que permita uma avaliação qualitativa das consequências de uma cheia induzida, torna-se necessário o conhecimento da situação de ocupação do vale à jusante, em termos de estimativa do número de edificações, inventário de infraestruturas e tipo de ocupação. No entanto, para a implementação destas estimativas, uma questão importante é o limite da distância atingida ao longo do vale.

O DSO da África do Sul preconiza, em seu formulário para a classificação de barragens, que esta distância seja no mínimo de 1km para cada metro de altura da barragem. Quanto o cálculo da largura desta faixa admite-se, para o primeiro km à jusante, a água atinja uma altura de 2/3 da altura máxima da parede acima do leito do rio e, para o resto da distância a jusante, meia altura máxima da parede.

No entanto, como barragens de mesma altura podem acumular volumes muito distintos, neste trabalho as distâncias potencialmente afetadas à jusante foram estimadas com base na metodologia proposta pelo LNEC, apresentada no Workshop de Classificação de Barragens (ANA, 2013), Figura 39.

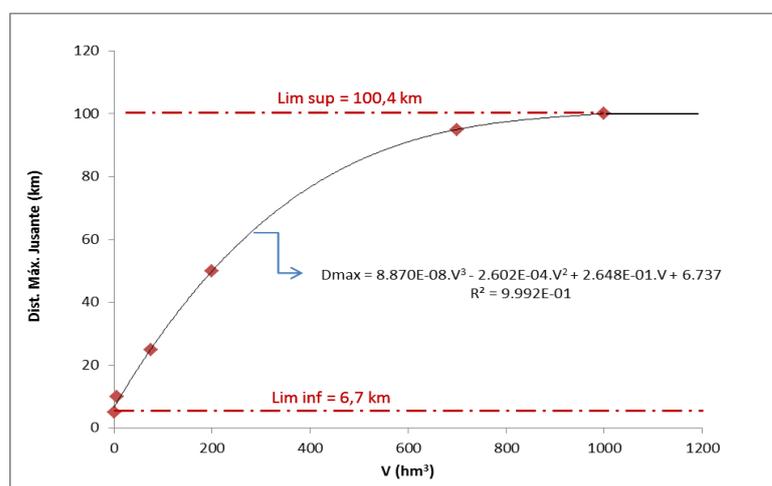


FIGURA 39 - Relação Volume Armazenado (hm^3)/ Distância Máxima para jusante (km). Fonte: ANA (2013).

Como, mesmo de forma simplificada, a definição da área afetada demanda uma gama de informações hidrológicas, topográficas e análises de geoprocessamento que dependendo da extensão podem tornar-se complexas, optou-se neste trabalho por utilizar simplesmente a fotointerpretação das imagens obtidas através do *Google Earth* para a

identificação de residências, infraestruturas e atividades produtivas, em áreas próximas ao leito do rio ao longo da extensão calculada. A opção, por esta simplificação, encontra respaldo em Viseu (2008).

"...o grau de aprofundamento da caracterização da ocupação nos vales a jusante de barragens para a determinação do grau de risco pode ser relativamente pobre. Com efeito, a consulta das diferentes legislações de segurança em vigor em diferentes países permite concluir que a caracterização exaustiva da ocupação não influi diretamente na classificação do seu grau de risco" VISEU (2008).

Para o cálculo do IVJ_B serão operacionalizados três descritores como detalhado a seguir.

6.1.5.1 Perda de vidas (PVF_{14})

A operacionalização deste descritor seguiu a tendência das legislações consultadas, segundo as quais, os níveis de impacto aparecem relacionados unicamente à população residente, seja em termos de casas ou residências ou simplesmente em função da densidade populacional.

Ainda sobre este tema, Martins (2000) propõe que a avaliação do risco de uma barragem seja dependente da determinação das edificações fixas a jusante. Este critério não contabiliza, dentro do número de vítimas em caso de acidente, as pessoas em atividades de lazer e outros indivíduos "não permanentes".

Segundo Viseu (2008), no que diz respeito à densidade populacional, constitui prática usual considerarem-se as seguintes subdivisões:

- zonas de ocupação densa (que corresponde às áreas urbanas);
- zonas de ocupação média (que corresponde a aglomerados populacionais);
- zonas de ocupação esparsa (que corresponde a edificações isoladas ou a núcleos de povoamento dispersos).

Segundo a legislação de barragens espanhola (PENAS, 1997) considera-se como um aglomerado populacional um conjunto de pelo menos 10 edificações, formando ruas, praças e outras vias urbanas. O número de edificações poderá ser inferior a 10, desde que o número de pessoas supere 50. Devem-se incluir no aglomerado, as edificações, que embora isoladas, distem menos de 200m dos limites exteriores do conjunto.

QUADRO 54 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF14 – perda de vidas.

PVF14 – Perda de Vidas	
Níveis de Impacto	Descritor
N3	Regiões com ALTA densidade populacional – áreas urbanas
N2	Regiões com densidade populacional MÉDIA ou aglomerados populacionais.
N1	Regiões com densidade populacional ESPARSA - casas dispersas.

6.1.5.2 Impacto socioeconômico (PVF₁₅)

A operacionalização deste descritor visa mensurar os impactos sociais que mais prejudicaram a população, através da estimativa dos setores mais atingidos pelo desequilíbrio econômico, dos itens afetados relativos a infraestruturas (rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, etc) e dos impactos de descontinuidade de seus sistemas produtivos (indústria, comércio, agricultura e pecuária) e meios de subsistência.

QUADRO 55 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF15 – impacto socioeconômico.

PVF15 -	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	ALTO: Infraestruturas importantes e/ou atividades produtivas Ex: Rodovias federais, agricultura irrigada, pecuária, indústrias.
N3	MÉDIO: Infraestruturas de médio porte e/ou atividades produtivas Ex: Rodovias estaduais, plantações, pequenas fábricas, criadouros de animais.
N2	BAIXO: Infraestruturas e atividades produtivas são mínimas. Ex: estradas não pavimentadas, agricultura e pecuária de subsistência.
N1	INEXISTENTE

6.1.5.3 Impacto ambiental (PVF₁₆)

Quanto às consequências ambientais, Kuperman et al. (2001) sugerem que sejam apreciados os itens: destruição da camada vegetal e do habitat, remoção do solo de cobertura (raspagem), deposição de sedimentos (assoreamento), destruição da vida animal. No entanto, devido à dificuldade de prever a ordem de grandeza destes impactos, o descritor foi operacionalizado em função da distância estimada à jusante para a zona potencialmente afetada.

Para a operacionalização deste descritor, para cada uma das classes de volume (PVF₁) foram calculadas classes de extensão correspondentes utilizando a metodologia apresentada em ANA (2013), sendo obtidos os valores constantes no Quadro 56.

QUADRO 56 - Relação volume do reservatório vs. distância total para jusante proposta para a metodologia simplificada.

Volume armazenado (hm ³)	Distância total para jusante (km)
≤ 5	0 – 10
5 – 75	10 – 25
75 – 200	25 – 50
≥ 200	50 to 100

A extensão inundada foi tomada como descritor indireto dos impactos no PVF₁₆.

QUADRO 57 - Níveis de impacto e níveis crítico e neutro do PVF₁₆ – impacto ambiental.

PVF ₁₆ - Impacto ambiental	
Níveis de Impacto	Descritor
N4	MUITO ALTO: extensão maior que 50 ou áreas de conservação ambiental.
N3	ALTO: extensão entre 25-50 km.
N2	MÉDIO: extensão entre 10-25 km.
N1	BAIXO: extensão até 10 km.

Ao final desta etapa teremos obtido as referências de ponderação para cada descritor. A Figura 40 apresenta estas referências, para o cálculo do IVB, no software MACBETH.

Referências de ponderação											
VOLUME	TIPO	TR	FUNDAÇÃO	IDADE	PROJETO	VERTEDOR	TALUDES	ADUÇÃO	PERCOLAÇÃO	RECALQUES	IN
MUITO GRANDE	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	<5	INEXISTENTE	INSATISFATORIA	INSATISFATORIA	INSATISFATORIA	INACEITAVEL	INACEITAVEL	NÃO
GRANDE	ENROCAMENTO	TR=500	REGULAR	5 - 15 ou >60	ANTEPROJETO	DEFICIENTE	DEFICIENTE	REGULAR	REGULAR	REGULAR	PARC
MÉDIO	PEDRA CCR	1000	SATISFATORIA	15-30	PE ou parte PE	REGULAR	REGULAR	SATISFATORIA	ACEITAVEL	ACEITAVEL	A
PEQUENO	CONCRETO	CM_{Pou}10000	BOAS	30-60	PE ou AS BUILT	SATISFATORIA	SATISFATORIA		SATISFATORIO	SATISFATORIO	
			MUITO BOA		PE e AS BUILT						

INSPEÇÕES	INSTRUMENTAÇÃO
NÃO ATENDE	INEXISTENTE
PARCIALMENTE	REGULAR
ATENDE	SATISFATÓRIO

FIGURA 40 - Referências de ponderação, Fonte: elaboração da autora.

6.2 Fase de Avaliação

O processo de determinação das funções de valor e dos coeficientes de ponderação envolveu os especialistas 3 e 4. A alternativa seria realizar uma conferência de decisão com todos os especialistas, mas tal não foi possível.

6.2.1 Determinação das Funções de Valor

Considere o PVF_1 – volume. Inicialmente foi pedindo ao Especialista 4 para julgar qualitativamente as diferenças de atratividade entre os vários níveis de seu descritor de desempenho. O Especialista primeiro julgou a diferença entre o nível mais crítico N4 e o nível menos crítico N1, de acordo com o modo de questionamento a seguir: Dado que N4 é mais crítico que N1, que diferença de atratividade você sente entre N4 e N1: "muito fraca", "fraca", "moderada", "forte", "muito forte" ou "extrema"? Em outras palavras, qual o impacto de passar de N1 para N4? O Especialista considerou esta diferença como sendo extrema (ver matriz de julgamentos na Figura 41). O Especialista foi em seguida questionado sobre a diferença entre o segundo nível mais crítico N2 e o nível menos crítico N4, que foi considerado como sendo “muito forte”. O processo continuou até completar a matriz de julgamentos.

À medida que se completava a matriz de julgamentos, o software foi testando a compatibilidade da informação introduzida, caso ocorresse alguma inconsistência, uma mensagem de aviso era emitida com as sugestões das possíveis formas de resolver o problema. Se inseguro sobre esta diferença de atratividade, foi permitido ao Especialista escolher várias categorias sucessivas.

	MUITO GRANDE	GRANDE	MÉDIO	PEQUENO	Escala actual
MUITO GRANDE	nula	forte	mt. forte	extrema	100
GRANDE		nula	mod-fort	mt. forte	43
MÉDIO			nula	fraca	0
PEQUENO				nula	-28

extrema
mt. forte
forte
moderada
fraca
mt. fraca
nula

Julgamentos consistentes

FIGURA 41 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF_1 - volume, Fonte - elaboração da autora.

O questionamento MACBETH foi realizado para cada par de níveis de impactos, possibilitando a construção de matrizes de juízos de valor (ou de julgamentos absolutos de diferença de atratividade) para cada um dos pontos de vista fundamentais. O preenchimento destas matrizes de juízos de valor, dezessete no total, requereram esforços cognitivos distintos, em função da complexidade dos níveis de impactos considerados. No entanto, na maioria dos casos não ocorreu nenhum tipo de inconsistência. No Apêndice A são apresentadas as restantes quinze matrizes de julgamentos MACBETH.

O *software* M-MACBETH propiciou a geração de escalas de pontuações (escalas de valor cardinais ou de preferências locais), que foram posteriormente validadas pelo especialista 4,

colocando-lhe perguntas do tipo: “Concorda que a diferença de atratividade entre o primeiro e o segundo nível é menor do que a diferença entre o segundo e o terceiro nível, no PVF volume?”.

A apresentação das escalas obtidas em forma de termômetro, Figura 42, foi fundamental no processo de validação das mesmas, pois as informações gráficas são de mais rápida interpretação do que as informações numéricas em forma tabular.

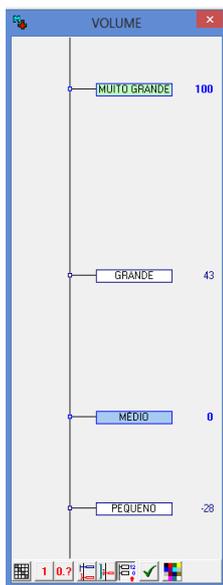


FIGURA 42 - Função de valor para o PVF1- volume, Fonte - elaboração da autora.

Completada a etapa de avaliações locais, a próxima seção apresenta o trabalho desenvolvido para a determinação dos pesos dos critérios.

6.2.2 Determinação dos coeficientes de ponderação

Para que seja possível uma avaliação global, um passo ainda necessita ser dado, a obtenção de informações inter-critérios, ou seja, os pesos que vão possibilitar agregar as avaliações locais.

A determinação de coeficientes de ponderação (pesos), envolve duas etapas: primeiramente, realizou-se a ordenação dos critérios que estavam sendo analisados, para em seguida, a partir de uma matriz de juízos de valor, gerar uma escala que normalizada forneceu os pesos entre estes critérios, utilizando-se os níveis crítico e neutro dos descritores para os julgamentos.

Para o cálculo do IVB, foram definidas catorze barragens hipotéticas, referências globais, com base nos níveis de referência. Treze delas foram definidas ao nível “crítico” em um só PVF (uma em cada qual) e ao nível “neutro” em cada um dos restantes e a décima quarta ao nível “neutro” em todos os PVF. A Figura 43 exemplifica este procedimento para

mais pares de linhas e colunas e, portanto, mais complexidade na identificação do julgamento que devia ser introduzido em determinada célula da matriz.

	[FUNDAÇÃO]	[PERCOLAÇÃO]	[RECALQUES]	[VERTEDOR]	[ADUÇÃO]	[TALUDES]	[INSTRUMENTAÇÃO]	[TR]	[VOLUME]	[TIPO]	[INSPEÇÕES]	[IDADE]	[PROJETO]	[todo neutro]	Escala actual	
[FUNDAÇÃO]	nula	nula	mt. fraca	mt. fraca	frac-mod	frac-mod	moderada	moderada	moderada	moderada	forte	mt. forte	mt. forte	extrema	11.92	extrema
[PERCOLAÇÃO]	nula	nula	mt. fraca	mt. fraca	frac-mod	frac-mod	moderada	moderada	moderada	moderada	forte	mt. forte	mt. forte	extrema	11.92	mt. forte
[RECALQUES]			nula	nula	moderada	moderada	moderada	mod-fort	mod-fort	moderada	moderada	fort-mfort	fort-mfort	mfort-extr	11.81	moderada
[VERTEDOR]			nula	nula	moderada	moderada	mod-fort	mod-fort	mod-fort	mod-fort	mod-fort	mt. forte	mt. forte	mfort-extr	11.81	fraca
[ADUÇÃO]					nula	fraca	fraca	fraca	fraca	moderada	moderada	forte	forte	forte	9.18	mt. fraca
[TALUDES]						nula	mt. fraca	mt. fraca	frac-mod	moderada	moderada	forte	forte	forte	8.23	nula
[INSTRUMENTAÇÃO]							nula	mt. fraca	fraca	fraca	fraca	forte	forte	mod-fort	7.70	
[TR]								nula	mt. fraca	fraca	fraca	moderada	moderada	mod-fort	7.38	
[VOLUME]									nula	fraca	fraca	moderada	moderada	mod-fort	6.75	
[TIPO]										nula	mt. fraca	moderada	moderada	moderada	5.70	
[INSPEÇÕES]											nula	moderada	moderada	moderada	5.38	
[IDADE]												nula	mt. fraca	fraca	1.16	
[PROJETO]													nula	fraca	1.06	
[todo neutro]														nula	0.00	

Julgamentos consistentes

FIGURA 44 - Ponderação dos pontos de vista fundamentais para o IVB. Fonte - elaboração da autora.

Ao ser finalizado o preenchimento da matriz de juízos de ponderação, o *software* M-MACBETH gerou os coeficientes de ponderação para o IVB e IVJ_B, Figuras 45 e 46 respectivamente.

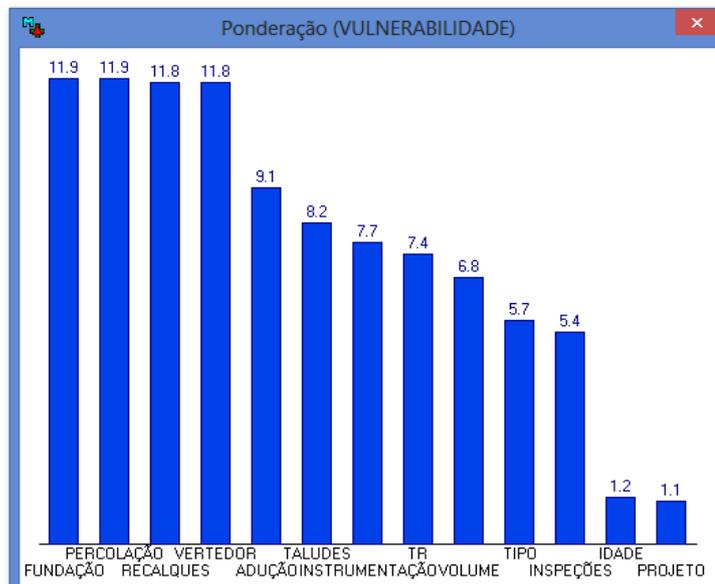


FIGURA 45 - Histograma dos coeficientes de ponderação do IVB. Fonte - elaboração da autora.

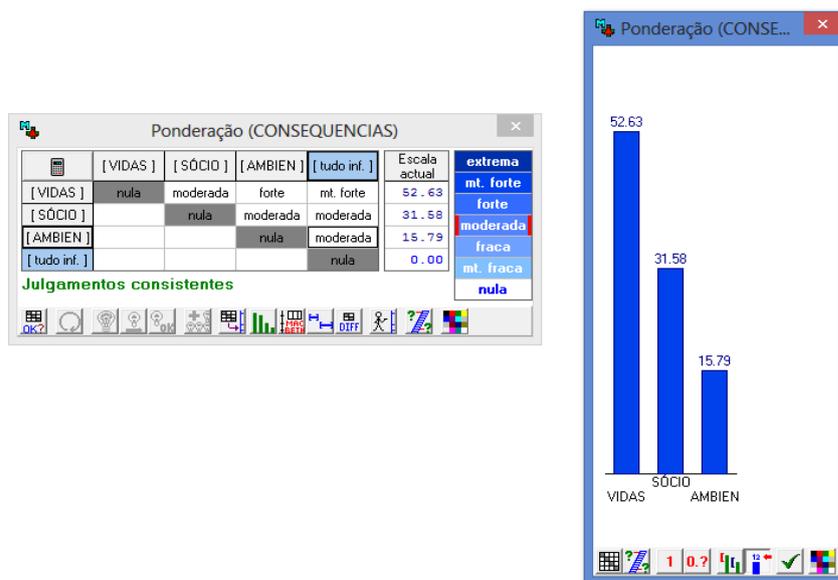


FIGURA 46 - Ponderação dos PVF's e histograma dos coeficientes de ponderação do IVJ_B.

Neste ponto, a facilitadora deixou claro que os pesos apresentados pelo MACBETH eram passíveis de alterações em seus valores, dentro dos limites estabelecidos pelo software (Figura 47), no entanto, as alterações dos pesos dos critérios levam a ligeiras alterações dos índices de vulnerabilidade das barragens, por esta razão, a especialista 3 decidiu aceitar os valores numéricos resultantes.

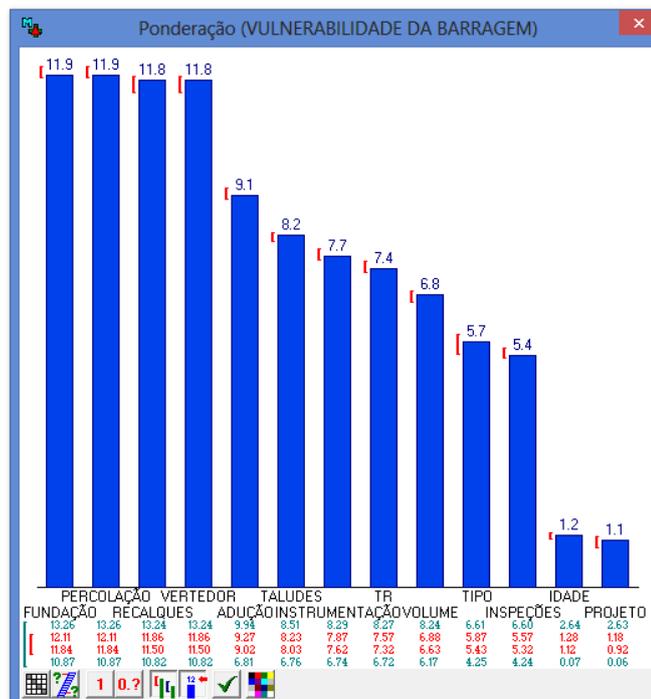


FIGURA 47 - Limites de variação permitidos nos pesos de critérios (em vermelho). Fonte: Elaboração da autora.

As Tabelas 1 e 2 resumem os valores parciais correspondentes aos vários níveis de impacto de cada um dos pontos de vistas fundamentais, dados pela função de valor, bem como os coeficientes de ponderação para o cálculo do IVB e do IVJ_B, respectivamente.

TABELA 1 - Funções de valor e coeficientes de ponderação para o IVB. Fonte: Elaboração da Autora.

Ponto de Vista Fundamental		Níveis de Impacto					Coeficiente de Ponderação
		1	2	3	4	5	
PVF1	Volume	-28	0	43	100		6,8
PVF2	Tipo	-60	0	60	100		5,7
PVF3	Cheia de Projeto (TR)	-42,86	0	42,86	100		7,4
PVF4	Geologia da Fundação	-33,33	0	33,33	66,67	100	11,9
PVF5	Idade	-42,86	0	42,86	100		1,2
PVF6	Documentação de Projeto	-50	0	50	100	133,33	1,1
PVF7	Estruturas Extravazoras	-114,29	0	57,14	100		11,8
PVF8	Taludes e Paramentos	-57,14	0	57,14	100		8,2
PVF9	Estruturas de Adução	-75	0	100			9,1
PVF10	Percolação	-80	0	60	100		11,9
PVF11	Deformação e recalques	-66,67	0	50	100		11,8
PVF12	Inspeção	-166,67	0	100			5,4
PVF13	Instrumentação	-100	0	100			7,7
Total							100

TABELA 2 - Funções de valor e coeficientes de ponderação para o IVJ_B. Fonte: Elaboração da Autora.

Ponto de Vista Fundamental		Níveis de Impacto				Coeficiente de Ponderação
		1	2	3	4	
PVF14	Perda de Vidas	0	100	200		52,6
PVF15	Impacto Sócio Económico	-100	0	100	200	31,6
PVF16	Impacto Ambiental	0	30	60	100	15,8
Total						100

Concluídas as etapas de determinação das funções de valor e dos coeficientes de ponderação resta proceder a avaliação da vulnerabilidade de cada barragem. De posse dos valores constantes nas Tabelas 1 e 2, a determinação dos valores globais de uma barragem, ou seja, cálculo do IVB e IVJ_B, é dada pela Equação 5.1

6.2.3 Avaliação Global das Opções

Objetivando-se validar o modelo aqui proposto, realizou-se uma análise da avaliação global das opções (barragens). Os critérios de seleção das situações reais, que ilustram a aplicação do método, tiveram em conta a utilização de casos de barragens que fizessem parte da experiência profissional da autora, procurando por um lado, compartilhar o desenvolvimento da tese com sua atividade profissional e por outro lado, utilizar exemplos que já conhecesse de modo aprofundado, viabilizando assim a realização de várias aplicações.

Como para a implementação do método faz-se essencial a realização de vistorias, bem como o levantamento de informações relativas ao projeto, estes foram fatores limitantes ao número de barragens consideradas pela autora. Estes dois fatores levaram à escolha de barragens cujas vistorias encontram-se documentadas através de check-lists, relatórios e documentação fotográfica, no entanto, a maior dificuldade encontrada para a aplicação do modelo proposto, residiu na escassez de informações sobre o projeto das barragens.

Em vista às limitações, ora apresentadas, foram selecionadas 15 barragens. Este número foi considerado suficiente, visto se tratar de um trabalho essencialmente acadêmico que não pretende ser exaustivo e sim reproduzível. O Quadro 58 mostra as barragens selecionadas e os resultados da classificação destas barragens pela Resolução 143.

Para a fase de avaliação do método proposto, cujo objetivo é a avaliação global da vulnerabilidade da barragem através dos IVB e IVJ_B, inicialmente foram definidas as opções (barragens) e, a partir das informações disponíveis, foram preenchidos os níveis de performance, em cada PVF (Figura 47).

QUADRO 58 - Classificação das barragens selecionadas pela Resolução 143. Fonte: Elaboração da Autora.

	Nome	Estado/ Município	Rio barrado	Tipo	Volume (Hm ³)	Altura (m)	RISCO				DANO		Classe	
							Pontuação				Classificação	Pontuação		Classificação
							CT	EC	PS	Total				
1	Cocorobó	Euclides da Cunha/BA	Vaza Baris	BTH	245,38	33,5	22	22	5	49	médio	28	alto	A
2	Cachoeira I	Sertania/PE	Riacho Grande	BTH	5,95	21,5	26	18	11	55	médio	21	alto	A
3	Curimataú	Barra de Sta Rosa/ PB	Rio Poleiros	BTH	5,98	15,18	26	11	11	48	médio	25	alto	A
4	Caldeirão de Parelhas	Parelhas/ RN	Riacho dos Quintos e Caldeirão	BTH	10,19	20	26	17	7	50	médio	21	alto	A
5	Vira Beiju	Petrolina/PE	Riacho Pau Ferro	BT	11,8	15	26	15	16	57	médio	17	alto	A
6	Santa Luzia	PB/ Santa Luzia	Riacho Quipauá	BTH	11,96	15,5	26	15	11	52	médio	25	alto	A
7	Abóbora	Parnamirim/PE	São Domingos	BT	14,35	10,5	25	15	16	56	médio	21	alto	A
8	São Mamede	PB/ São Mamede	Rio Serra Branca e Rio Sabugi	BTH	15,79	14,93	26	22	11	59	médio	25	alto	A
9	Escondido I	Belém do Brejo da Cruz/PB	Riacho dos Porcos	BTH	16,58	12,46	21	18	7	46	médio	25	alto	A
10	Arcoverde	Arcoverde/PE	Mororó	BTZ	16,8	30,8	27	8	16	51	médio	21	alto	A
11	Japi II	São José do Campestre/RN	Rio Jacú	BTH	20,65	20,55	27	11	7	45	médio	21	alto	A
12	Tremendal	Tremendal/BA	Ribeirão da Ressaca	BTH	23,75	32	24	18	5	47	médio	21	alto	A
13	Santa Inês	PB/ Conceição	Riacho Sta. Inês (Rio Federal)	BTH	26,11	28,1	23	9	11	43	médio	21	alto	A
14	Sabugi	RN/ S. João do Sabugi	Rio Sabugi	BT	65,33	20,5	22	11	5	38	médio	21	alto	A
15	Itans	RN/Caicó	Rio Barra Nova	BTZ	81,75	25	26	11	11	48	médio	26	alto	A

Opções	VOLUME	TIPO	TR	FUNDAÇÃO	IDADE	PROJETO	VERTEDOR	TALUDES	ADUÇÃO	PERCOLAÇÃO	RECALQUES	INSPEÇÕES	INSTRUMENTAÇÃO	
Cocorobó	MUITO GRANDE	TERRA	± TR<500	SATISFATÓRIA	>30	PE ou AS BUILT	DEFICIENTE	INSATISFATORIA	REGULAR	REGULAR	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE
Cachoeira I	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	DEFICIENTE	REGULAR	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Curimataú	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	REGULAR	REGULAR	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Caldeirão	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	PB ou parte PE	DEFICIENTE	INSATISFATORIA	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Vira Beijú	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	DEFICIENTE	DEFICIENTE	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	PARCIALMENTE	INEXISTENTE	
Sta Luzia	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	REGULAR	DEFICIENTE	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Abóboras	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	DEFICIENTE	DEFICIENTE	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	PARCIALMENTE	INEXISTENTE	
S. Mamede	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	REGULAR	DEFICIENTE	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	REGULAR	ATENDE	INEXISTENTE	
Escondido	MÉDIO	TERRA	TR<500	MUITO BOA	>30	PB ou parte PE	DEFICIENTE	DEFICIENTE	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Arcoverde	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	INSATISFATORIA	REGULAR	REGULAR	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	PARCIALMENTE	INEXISTENTE	
Japi II	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	PB ou parte PE	REGULAR	REGULAR	REGULAR	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Tremendal	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	PB ou parte PE	DEFICIENTE	DEFICIENTE	REGULAR	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Sta. Inês	MÉDIO	TERRA	TR<500	REGULAR	15-30	INEXISTENTE	DEFICIENTE	DEFICIENTE	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Sabugi	MÉDIO	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	PE ou AS BUILT	REGULAR	DEFICIENTE	REGULAR	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	
Itans	GRANDE	TERRA	TR<500	MEDIOCRE	>30	INEXISTENTE	REGULAR	REGULAR	INSATISFATÓRIA	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	ATENDE	INEXISTENTE	

FIGURA 48 - Níveis de performance das barragens em cada PVF do IVB. Fonte: elaboração da autora.

Opções	Global	VOLUME	TIPO	TR	FUNDAÇÃO	IDADE	PROJETO	VERTEDOR	TALUDES	ADUÇÃO	PERCOLAÇÃO	RECALQUES
[todo crítico]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Vira Beijú	36.79	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	57.14	57.14	100.00	-80.00	-66.67
Abóboras	36.79	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	57.14	57.14	100.00	-80.00	-66.67
Cocorobó	36.27	100.00	100.00	100.00	33.33	-42.86	0.00	57.14	100.00	0.00	60.00	-66.67
S. Mamede	34.82	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	0.00	57.14	100.00	-80.00	50.00
Caldeirão	30.39	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	50.00	57.14	100.00	100.00	-80.00	-66.67
Arcoverde	28.07	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	100.00	0.00	0.00	-80.00	-66.67
Sta. Inês	24.34	0.00	100.00	100.00	66.67	0.00	133.33	57.14	57.14	100.00	-80.00	-66.67
Cachoeira I	23.11	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	57.14	0.00	100.00	-80.00	-66.67
Sta Luzia	21.05	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	0.00	57.14	100.00	-80.00	-66.67
Itans	19.29	43.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	0.00	0.00	100.00	-80.00	-66.67
Tremendal	17.78	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	50.00	57.14	57.14	0.00	-80.00	-66.67
Curimataú	16.37	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	133.33	0.00	0.00	100.00	-80.00	-66.67
Escondido	11.01	0.00	100.00	100.00	-33.33	-42.86	50.00	57.14	57.14	100.00	-80.00	-66.67
Sabugi	10.48	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	0.00	0.00	57.14	0.00	-80.00	-66.67
Japi II	6.35	0.00	100.00	100.00	100.00	-42.86	50.00	0.00	0.00	0.00	-80.00	-66.67
[todo neutro]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesos :		0.0680	0.0570	0.0740	0.1190	0.0120	0.0110	0.1180	0.0820	0.0910	0.1190	0.1180

FIGURA 49 - Avaliação global das barragens pelo IVB. Fonte: Elaboração da autora.

A Figura 48 mostra a atribuição dos níveis de performances das barragens, no software, segundo cada PVF, observa-se que são barragens de terra em sua maioria de médio porte, com idade superior a 30 anos, informações de projeto desconhecidas ou incompletas, desempenho estrutural satisfatório e condições de operação e manutenção deficientes, todas as barragens possuem o nível crítico nos PVF₂ (tipo), PVF₃ (período de retorno) e PVF₁₃ (instrumentação).

A Figura 49, além de apresentar a avaliação global de cada barragem em ordem decrescente de vulnerabilidade (coluna amarela), inclui as pontuações parciais de cada uma das barragens e os coeficientes de ponderação (linha dos pesos).

O gráfico tipo termômetro (Figura 50) possibilita uma visualização das distâncias de cada barragem às suas referências, os perfis “crítico” e “neutro”, determinadas pelos respectivos valores do IVB.

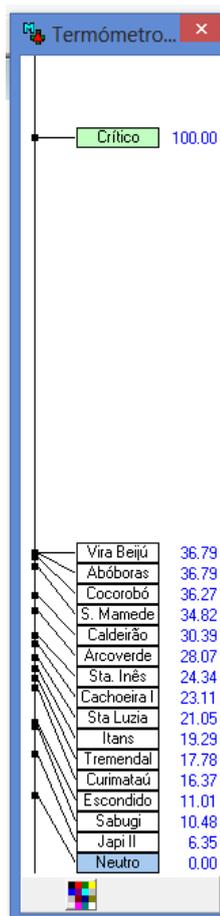


FIGURA 50 - Resultados globais do modelo IVB, apresentados numa escala termométrica. Fonte: Elaboração da autora.

A análise do posicionamento destas barragens (Figura 50), não evidencia barragens situadas acima do nível crítico (limiar de vulnerabilidade), esse fato já era esperado,

pois, mesmo não se podendo comparar diretamente os resultados com aqueles resultantes da aplicação da Resolução 143, constantes no Quadro 58, na percepção dos especialistas, apesar das más condições de conservação e manutenção, nenhuma das barragens apresenta anomalia que represente condição de criticidade, assim, não se pode afirmar que a definição do perfil crítico tenha sido demasiado exigente. Por outro lado, nenhuma barragem apresenta pontuação negativa, abaixo no nível neutro (minimamente aceitável), esta última situação seria ideal, portanto, o posicionamento, entre o nível crítico e o neutro, sugere que a vulnerabilidade deve ser reduzida o tanto quanto possível ao nível neutro.

A Figura 51 apresenta a tabela de pontuações globais e escala termométrica para o IVJ_B, pode-se constatar a existência de oito barragens acima do nível crítico, ou seja, estas podem ocasionar consequências à jusante acima do limiar de vulnerabilidade. Apesar da atribuição das performances dos descritores, que compõe o IVJ_B, não ter sido baseada em estudos aprofundados para a delimitação da área atingida, o que fugiria ao escopo deste trabalho, acredita-se que, as fotointerpretações das áreas à jusante foram suficientes para caracterizar a densidade da ocupação à jusante e principais infraestruturas.

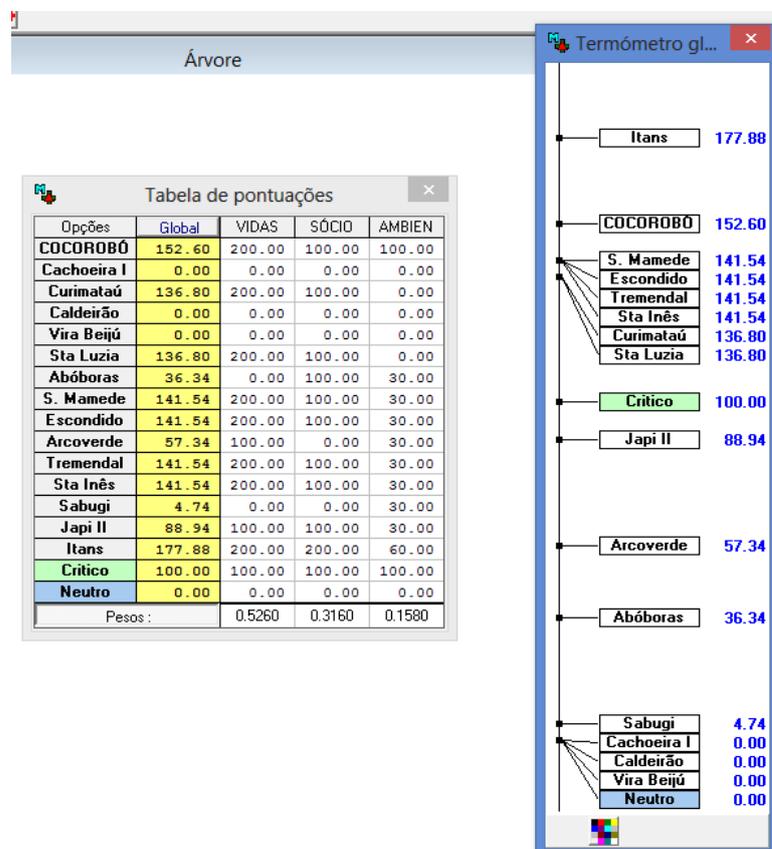


FIGURA 51 -Tabela de pontuações globais e escala termométrica para o IVJ_B.

Em termos gerais, os resultados apresentados corroboram para a validação do modelo, visto estarem em consonância com o *status quo* das barragens apresentadas. Embora a intenção desta análise seja verificar a validade e robustez do modelo construído, não se pode deixar de destacar a ausência de conflitos entre os resultados analíticos, gerados pelo modelo multicritério, e os intuitivos, respaldados em julgamentos de valor dos especialistas.

O M-MACBETH permite ainda visualizar, individualmente, o perfil multicritério das pontuações de uma barragem, tal como apresentado nas Figuras 52 e 53 para a barragem Cocorobó, que tem $IVB=36,27$ e $IVJ_B=152,6$. Note-se que o software adota como padrão as pontuações parciais negativas (barras vermelhas) e positivas (barras verdes). Vale ressaltar que por se estar trabalhando com vulnerabilidade, as barras vermelhas devem ser interpretadas como correspondendo a pontos de vista em que a barragem não é vulnerável. Portanto a barragem Cocorobó encontra-se em condições satisfatórias nos seguintes pontos de vista do IVB: PVF₅, PVF₁₁ e PVF₁₂. Quanto ao IVJ_B a barragem não apresenta condições satisfatórias (barras vermelhas) em nenhum PVF.

A análise destes perfis é importante, pois determina quais pontos de vistas irão proporcionar um benefício maior, caso a barragem passe por serviços de recuperação e manutenção. De posse destas informações, podem-se elaborar recomendações que venham a minimizar a vulnerabilidade das estruturas. O perfil das demais barragens está apresentado no Apêndice B.

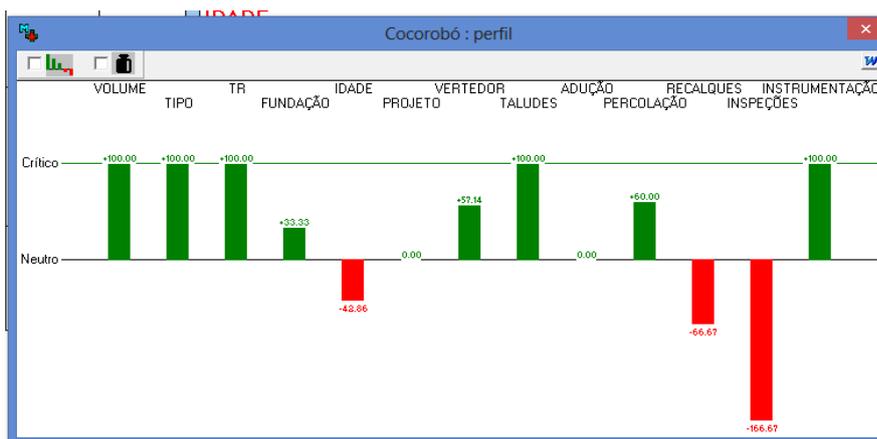


FIGURA 52 - Perfil multicritério IVB da barragem Cocorobó.

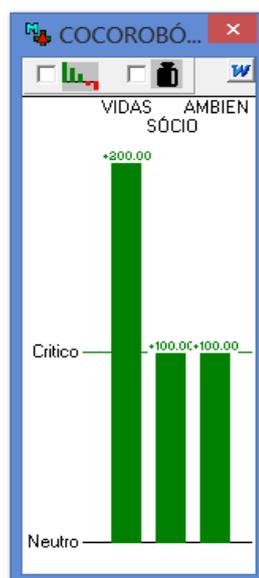


FIGURA 53 - Perfil multicritério IVJ_B da barragem Cocorobó. Fonte: Elaboração da autora.

6.3 Fase de Elaboração de Recomendações

No desenvolvimento da metodologia MACBETH é desejável realizar as análises de sensibilidade e robustez juntamente com os decisores, para que estes possam avaliar as alterações do modelo quando ocorrem mudanças nos pesos dos critérios, ou nas ponderações dos níveis, e avaliar os resultados do modelo perante vários níveis de imprecisão ou incerteza na informação, respectivamente (Bana e Costa et al., 2002). Com a informação que resulta destas análises, os decisores podem sugerir alterações na formulação do modelo.

No entanto, neste estudo, as análises de sensibilidade e robustez efetuadas nos resultados não foram realizadas juntamente com os atores envolvidos no mesmo.

Avaliar a sensibilidade do modelo significa observar o que acontece aos resultados quando se altera qualquer um dos pesos dos critérios ou a pontuação de um nível de impacto, mantendo as relações de proporcionalidade entre os restantes.

Analisando a sensibilidade do peso nos PVF₁₀ (percolação) e PVF₆ (projeto) (escolheram-se estes critérios, respectivamente, porque são os que contribuem com uma maior e menor ponderação no cálculo do IVB), os gráficos resultantes são os seguintes:

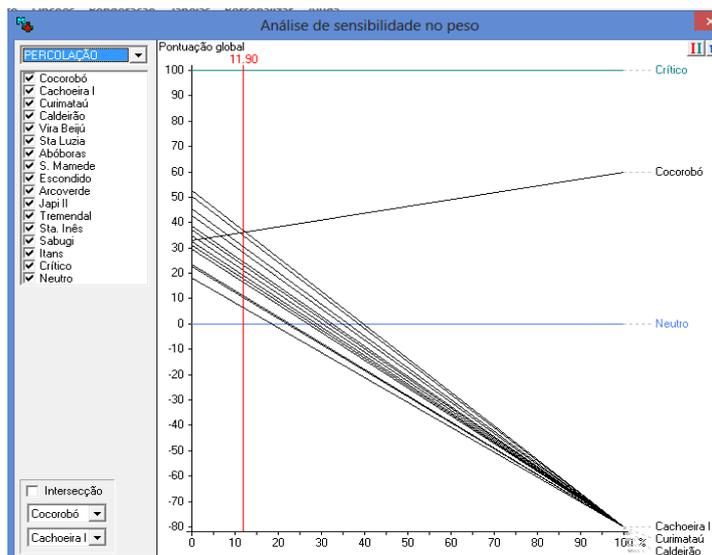


FIGURA 54 - Análise de sensibilidade no peso do PVF10 – percolação.

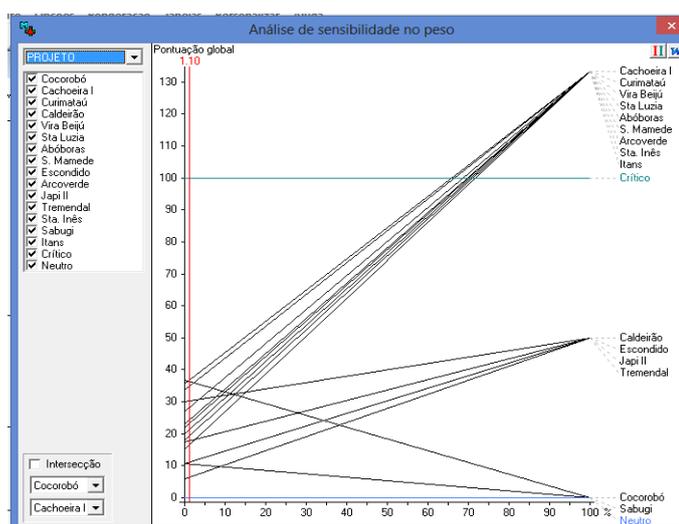


FIGURA 55 - Análise de sensibilidade no peso do PVF6 – projeto.

Nas figuras anteriores observam-se em vermelho os pesos atuais dos critérios, que resultaram do modelo de avaliação multicritério, e cada linha do gráfico mostra como a pontuação global (eixo vertical) de uma barragem varia quando o peso (eixo horizontal) varia entre 0 e 100 %. Por exemplo, na Figura 54, quando o peso do PVF₁₀ (percolação) aumenta, deslocamento da linha vertical vermelha para a direita, a barragem Cocorobó aumenta sua pontuação global enquanto as demais barragens diminuem.

Foram realizadas análises de sensibilidade para todos os outros PVF, verificou-se que é necessário que ocorram mudanças nos coeficientes de ponderação bem acima dos limites indicados para que ocorram alterações significativas nos valores numéricos resultantes

da avaliação global. Nesta perspectiva, o modelo aqui proposto é considerado válido. O Apêndice C contém os gráficos das análises de sensibilidade realizadas.

Para aumentar o nível de confiabilidade dos resultados foi realizada uma análise de robustez para o IVB, cujo objetivo é analisar se é robusta a conclusão anterior de que todas as quinze barragens analisadas possuem vulnerabilidade global inferior ao nível crítico de vulnerabilidade. Será este um resultado particular devido aos valores atribuídos aos coeficientes de ponderação, ou será, que essa conclusão é robusta quaisquer que fossem os coeficientes de ponderação que respeitassem a respectiva ordenação?

Para analisar a robustez do modelo é necessário, explicar como se analisa a mesma no software M-MACBETH. O símbolo ▲ indica que, quanto ao IVB, a barragem da linha, **a**, domina a barragem da coluna, **b**, o símbolo ⊕ indica que a barragem da linha domina aditivamente a barragem da coluna (i.e, pelo modelo aditivo resulta sempre um valor de IVB maior para **a** do que para **b**) e o símbolo ? indica que existe uma situação de incomparabilidade (i.e, para certos valores dos pesos, sempre respeitando a ordenação definida, resultam valores de IVB favoráveis a uma opção e noutros à outra).

A informação que se pode seleccionar, ou não, na avaliação da robustez do modelo, está organizada em seções e categorias. No primeiro caso distingue-se entre informação *global* (informação de ponderação entre os critérios) e *local* (informação específica de cada critério), e no segundo caso em *ordinal* (refere-se somente à ordenação), *MACBETH* (inclui os julgamentos semânticos de diferenças de atratividade, que indicam a intensidade da preferência) e *cardinal* (refere-se a uma escala de pontuações específica, validada pelo decisor) (Bana e Costa, et al., 2005).

A análise de robustez realizada no M-MACBETH é apresentada na Figura 56.

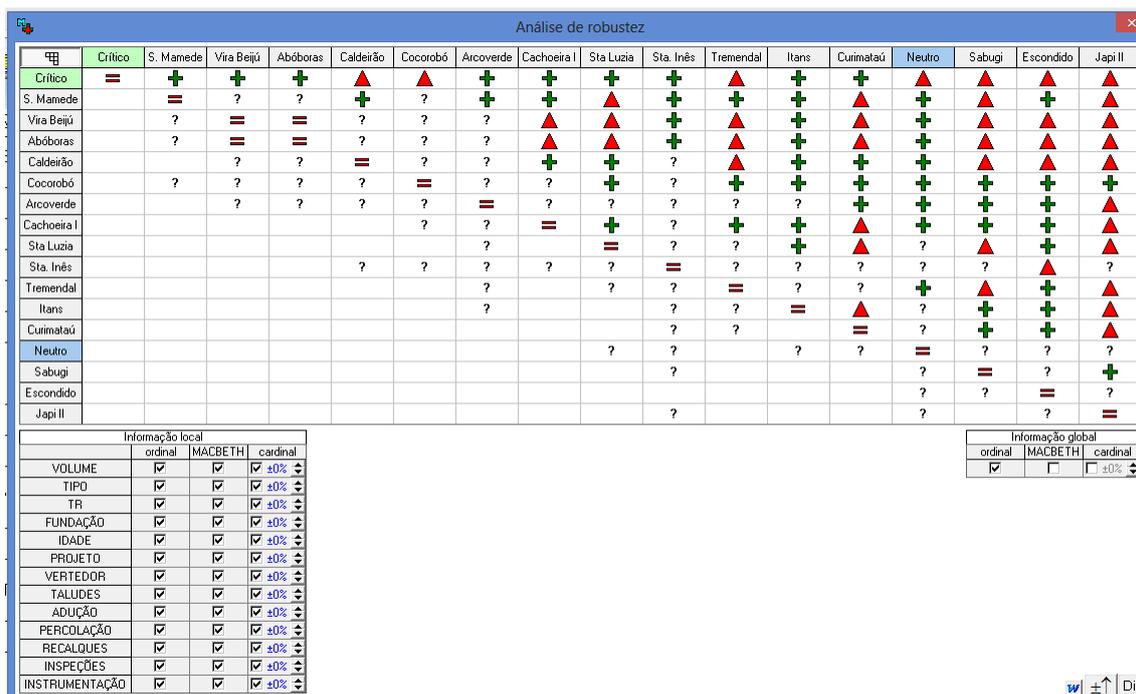


FIGURA 56 - Análise de robustez do modelo, considerando a informação ordinal, MACBETH e cardinal em local e a informação ordinal em global.

A comparação mais importante é a de cada uma das barragens, com o perfil neutro. Observando-se a Figura 56 verifica-se que é robusto que as barragens S. Mamede, Vira Beijú, Abóboras, Caldeirão, Cocorobó, Arcoverde e Tremendal possuem IVB acima no nível neutro, qualquer que sejam os pesos dos critérios (respeitando a ordenação definida, Figura 44), quanto às barragens Sta. Luzia, Sta. Inês, Itans, Curimataú, Sabugi, Escondido e Japi II, o modelo não permite concluir que o IVB das mesmas seja maior que o nível neutro, quando os pesos forem alterados (respeitando a ordenação definida, Figura 44).

Uma vez analisados os resultados fornecidos pelo modelo construído, e realizadas as análises de robustez e sensibilidade, foi possível então partir para a última etapa do processo de tomada de decisão: a elaboração das recomendações. Nesta fase, foram propostas as seguintes recomendações:

- Quanto ao IVB, o posicionamento de barragens situadas entre o nível neutro e nível crítico, no gráfico termométrico, não representa que estas barragens estejam em condições satisfatórias, visto que a situação ideal seria o posicionamento abaixo do nível neutro. As barragens situadas nesta zona devem passar por ações de redução da vulnerabilidade de forma que não evoluam para o nível crítico;

- A redução da vulnerabilidade da barragem IVB, considerando as características imutáveis (de projeto) desde conjunto de barragens, pode ser atingida, sobretudo, através de obras de recuperação para a melhoria das condições de operação e manutenção, visto que para a implantação de instrumentação, tendo em conta a idade das barragens, haveria de se realizar análises de custo-benefício.
- Considerando que, historicamente, a ocorrência de níveis críticos, nos PVF₇, PVF₉ e PVF₁₀, independentemente de outros fatores, pode ocasionar a ruptura de uma barragem, é válido recomendar que, independente do valor global do IVB, níveis críticos nestes descritores sejam entendidos como IVB=100.
- Quanto ao IVJ_B, observa-se barragens entre o nível crítico e o neutro, e também acima do nível crítico, para as barragens situadas acima do nível crítico recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados para a definição, em função dos cenários possíveis de desastre, dos limites da área afetada como também da estimativa da população atingida.
- Já para a redução da vulnerabilidade a jusante IVJ_B, considerando que é constituída por características essencialmente imutáveis ligadas à sua localização geográfica, pode-se recomendar a obrigatoriedade da adoção de medidas de aviso e alerta da população para a mitigação da vulnerabilidade.

E assim, dá-se por terminada a aplicação deste processo de apoio à decisão a casos reais de barragens.

7 CONCLUSÕES

Esta tese de doutorado pretendeu desenvolver e testar um modelo multicritério para a avaliação da vulnerabilidade de barragens, mais transparente e menos arbitrário, e que resolvesse o problema das ferramentas de classificação de risco já construídas, qual seja, a forma implícita e intuitiva de atribuição de pesos para a quantificação da performance das barragens.

O modelo multicritério desenvolvido baseou-se na metodologia sócio-técnica MACBETH, sendo esta uma abordagem que se baseia nas preferências do decisor na construção do modelo quantitativo. Esta metodologia fez uso da árvore de pontos de vista, na estruturação do problema (construído a partir das respostas dos atores a um questionário realizado), que levou à identificação dos critérios e dos respectivos descritores de impacto, depois os restantes passos de construção do modelo (determinação das funções de valor, pesos dos critérios e avaliação das barragens).

A metodologia MACBETH foi compreendida e apoiada pelos atores envolvidos no estudo, no entanto, alguns passos da metodologia necessitaram ser alterados, uma vez que os atores não tinham tempo nem disponibilidade para participar de conferências de decisão. As limitações decorrentes foram evidenciadas principalmente, na descrição verbal dos níveis de impacto e na ordenação preferencial dos critérios, contudo, não prejudicaram o bom desenvolvimento do modelo, tal como foi confirmado na avaliação das barragens selecionadas.

Na fase de estruturação, a seleção dos PVF's, a partir dos elementos primários de avaliação proporcionou, sobretudo, a explicitação de algumas relações de dependência que poderiam afetar diretamente os resultados globais do modelo.

No desenvolvimento do modelo, quando da construção dos descritores de impacto de alguns critérios, houve dificuldade em descrever de forma mais clara e inequívoca os respectivos níveis de impacto. Isto aconteceu por diversas razões, entre elas a necessidade de respeitar a generalidade do modelo, por dificuldade em obter informação, ou simplesmente por inexistência da mesma. Entre os critérios mais problemáticos incluem-se o PVF₄ (geologia da fundação), PVF₁₁ (deformações e recalques) e PVF₈ (taludes e paramentos), pois a impossibilidade de criar descritores mais precisos conduziu a algumas incertezas na atribuição dos níveis de impacto destes critérios.

Embora não seja inteiramente correto afirmar que os PVF₃ (cheia de projeto - TR) e PVF₄ (geologia da fundação) mantêm relação de dependência com o PVF₆ (documentação

de projeto), os dois primeiros tiveram seus níveis de impacto diretamente influenciados, pelo fato de não existirem ou não terem sido localizados os projetos de algumas barragens e tais informações não serem comumente disponibilizadas através das fichas técnicas das barragens.

A aplicação do IVB ao conjunto de 15 barragens selecionadas permitiu concluir que, nenhuma se encontra acima do limiar de vulnerabilidade estabelecido, ou mesmo apresenta pontuação preocupante (próxima a atingir o nível crítico). Estes resultados, embora não possam ser diretamente comparados numericamente, guardam semelhança com àqueles obtidos no Quadro 58, segundo o qual todas as barragens avaliadas pela Resolução 143, apresentaram classificação de risco média. Este fato indica que o número de descritores utilizados na Resolução 143 poderá ser otimizado, se forem considerados em sua reformulação que os mesmos devem obedecer as propriedades dos PVF's (consensualidade, operacionalidade, inteligibilidade e isolabilidade).

Quanto ao IVJ_B sua estruturação foi mais simples, devido ao menor número de PVF's associados, bem como ao suporte proporcionado pelas legislações consultadas (Capítulo 4) para o estabelecimento dos níveis de impacto dos critérios.

Os resultados da aplicação do IVJ_B, ao conjunto de 15 barragens, evidenciaram 8 barragens acima do nível crítico e 7 barragens entre o crítico e o neutro. Não se pode comparar diretamente estes resultados com os de dano potencial constantes no Quadro 58, entretanto, com base na tendência das legislações consultadas e no sentimento evidenciado pelos especialistas, os resultados do modelo sugerem que o cálculo do dano potencial pela Resolução 143 encontra-se sobrevalorizado. Este fato se deve, sobretudo, à relação de dependência existente entre o EPA₁₈-volume e os demais EPA's para o cálculo do dano, e ainda devido aos níveis de impacto destes EPA's, por exemplo, os níveis estabelecidos para o EPA₁₉- perda de vidas consideram também pessoas eventualmente transitando na região de jusante, e não estabelece níveis de impacto baseados na densidade populacional, o EPA₂₀ - impacto ambiental é dicotômico (2 níveis de performance) e seus níveis são notadamente imprecisos.

Sugere-se que em trabalhos futuros o modelo seja estruturado a partir de conferências de decisão (com maior número de especialistas) e testado em barragens mais novas e de todos os tipos (terra, concreto e enrocamento), assim poderá se alcançar um aperfeiçoamento da descrição verbal dos níveis dos descritores, pois, estas foram limitações deste trabalho, entretanto, uma vez que os resultados do modelo foram condizentes com a realidade, considera-se que as limitações encontradas não prejudicaram o bom

desenvolvimento da metodologia aplicada. Dessa forma, é possível concluir que os objetivos propostos nesta tese foram atingidos.

Finalmente, destaca-se a contribuição desta tese na área acadêmica, uma vez que reúne duas áreas de conhecimento: a segurança de barragens e a metodologia multicritério. Essa experiência mostrou que esta junção é possível e gera a contribuição do conhecimento científico e técnico, constituindo uma inovação na literatura da segurança de barragens.

8 BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, A. B. (2003) “A gestão do risco em sistemas hídricos: Conceitos e metodologias aplicadas a vales com barragens”, in Actas do 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, APRH, Cabo Verde, 3, pp. 647-661.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Resolução nº 91/2012**. 2012. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2012/91-2012.pdf>> Acesso em: 21/04/2013.

ANA. **Relatório de Segurança de Barragens** 2011. Brasília-DF, 2012.

ANA. **Classificação da Barragem Cocorobó**. Ofício 1380/2013/SER-ANA, Brasília-DF, 2013.

ANA. **Workshop de Classificação de Barragens**. Brasília, 2013. Disponível em: www.ana.gov.br.

ANDERSEN, G. R., CHOUINARD, L. e., HOVER, W. H. e COX, C. W. Risk Indexing Tool to Assist in Prioritizing Improvements to Embankment Dam Inventories. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, abril, pg. 325-334, 2001.

ARAÚJO, J. A. de A. (coord.). **Barragens no Nordeste do Brasil: experiência do DNOCS em barragens na região Semi-Árida**. Fortaleza, DNOCS, 1990, 328p.

AZEVEDO, J. **Aplicações da metodologia multicritério de apoio à decisão na seleção de centros de usinagem para uma central de usinagem**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Produção, Florianópolis-SC, 2001.

ANDRIOLO, F. R. **The use of roller compacted concrete**. São Paulo, Oficina de Textos, 1998.

BAPTISTA, M. L. P. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. Tese de Doutorado, LNEC. Lisboa, Portugal, 2009.

BANA E COSTA, C. A; MEZA, L. A. & OLIVEIRA. M. D. O método MACBETH e aplicação no Brasil. **Engvista**, v. 15, n. 1, p. 3-27, abril, 2013.

BANA E COSTA, C. A; DE CORTE, J. M & VANSNICK, J. C. MACBETH. *In: International Journal of Information Technology & Decision Making*, v.11, n.2. World Scientific Publishing Company, 2012.

BANA E COSTA, C. A; BEINAT, E. **Estruturação de Modelos de Análise Multicritério de Problemas de Decisão Pública**. *In: S. Costa, P. Nijkamp, T.P. Dentinho (eds.), Compêndio de economia regional*. V.II: Métodos e técnicas de análise regional, cap. 20, 2011.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. & DE CORTE, J. M. **MACBETH. Measuring Attractiveness y a Categorical Based Evaluation Technique**. *In: Cochran JJ (ed.). Wiley encyclopedia in operational research and management science*. New York: Wiley; 2010. p. 2945–50.

BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J. M. & VANSNICK, J. C. **On the mathematical foundations of Macbeth**. In: FIGUEIRA, J., GRECO, S. & EHRGOTT, M. (eds.) *Multiple Criteria Decision Analysis: state of the art surveys*. Kluwer Academic Publishers, 2005.

BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J. M. & VANSNICK, J. C. **M-MACBETH versão 1.1: Manual do usuário [Online]**. 2005. Disponível em: <http://www.m-macbeth.com>.

BANA E COSTA, C. A. e BEINAT, E. **Model-structuring in public decision-aiding**. London School of Economics and Political Science: Department of Operational Research. 2005.

BANA E COSTA, C. A. e CHAGAS, M. P. A career choice problem: An example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments. **European Journal of Operational Research**, Vol.153, pp. 323-331, 2004.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH. In: **Investigação Operacional**. v.1 15, junho, 1995, p. 15 -35.

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

BANA E COSTA, C. A. **Processos de apoio à tomada de decisão: atores e ações; estruturação e avaliação**. Publicação do CESUR, n° 618, Lisboa, 1993. Disponível em: <http://web.ist.utl.pt/carlosbana/portugues.htm>. Acesso em 13/05/2014.

BEINAT, E. **Multiattribute value functions for environmental management**. Amsterdam: Vrije Universiteit, 248 p.,1995.

BORTOLUZZI, S. C. **Avaliação de desempenho econômico-financeiro da empresa Marel Indústria de Móveis S.A.:** a contribuição da metodologia multicritério de apoio à decisão construtivista (MCDA-C). 2009. 262f. Dissertação (Mestrado em Contabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Contabilidade, UFSC, Florianópolis, 2009.

BORTOLUZZI, S. C.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Avaliação de desempenho multicritério como apoio à gestão de empresas: Aplicação em uma empresa de serviços. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 3, p. 633-650, 2011.

BRASIL. Lei n° 12.334/2010, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: www.in.gov.br.

CARDONA, O. D. **La necesidad de pensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo**. Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgo CEDERI, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2003.

CARRIQUIRIBORDE, I. R. La estructura de vulnerabilidad y el escenario de un gran desastre. **Investigaciones Geográficas** (Mx) [On-line] 2012, (Sin mes) : [Data de consulta: 5 / octubre / 2014] Disponível em:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56923353007>> ISSN 0188-4611.

CALDEIRA, L. M. M. S. **Análises de riscos em geotecnia**. LNEC. Lisboa, Portugal, 2008.

CAMPOS, V. R **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos de saneamento**. Tese de Doutorado, USP-EESC, São Carlos, 2011.

CANADIAN DAM ASSOCIATION. **Technical Bulletin 8: Geotechnical Considerations for Dam Safety**. 2007.

CIGB (Comissão Internacional de Grandes Barragens). **Automated observation for the safety control of dams**. Boletim 41, 1982.

CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos). **Resolução nº 143/2012**. Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012.

DAM SAFETY ACT 494/2009. Disponível em:
<http://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2009/en20090494.pdf> .

DIAS L. M. C. **Informação imprecisa e os modelos multicritério de apoio à decisão**. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, Faculdade de Economia, 2000.

DOUMPOS, M.; ZOPOUNIDIS, C. **Multicriteria decision aid classification methods**. Springer, 2002.

ECYWA (Washington State Department of Ecology). **Dam break inundation analysis and downstream hazard classification**. Water Resources Program, Dam Safety Office, Olympia, WA, 2007. This report is available on the Department of Ecology Web site at: <http://www.ecy.wa.gov/biblio/9255e.html>.

ELY Centre (Häme Centre for Economic Development, Transport and the Environment). **Dam Safety Guide**. 2012. Disponível em: http://www.environment.fi/en-US/Waters_and_sea/Use_of_water_resources/Dams_and_dam_safety/Dam_Safety_Guide.

ENSSLIN, L.; DUTRA, A.; ENSSLIN, S. R. MCDA: A constructivist approach the management of human resources at a governmental agency. **International Transactions in Operational Research**, n. 7, p. 79-100, 2000.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G. N.; NORONHA, S. M. **Apoio à Decisão – Metodologia para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. Florianópolis, Insular, 2001.

FANTINATTI, P. A. P. **Abordagem MCDA como ferramenta de mudança de paradigma no planejamento dos recursos hídricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Área de Concentração em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

FEMA (Federal Emergency Management Agency). **Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification Systems for Dams**. FEMA 333, 2004.

FEMA (Federal Emergency Management Agency). **Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures**. First Edition, 2013.

FERC (Federal Energy Regulatory Commission). **Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects**. Chapter IX – Instrumentation and Monitoring, 2003.

Disponível em <https://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap9.pdf>. Acesso em 30/07/2014.

FERNANDES, C. H. **Priorização de projetos hidrelétricos sob a ótica social – um estudo de caso utilizando a análise custo benefício e uma metodologia multicritério de apoio à decisão – MACBETH**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1996. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta97/fernandes>. Acesso em 28 mai 2014.

FONTENELLE, A. de S. **Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do Nordeste brasileiro - estudo de caso: barragens do Estado do Ceará**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2007.

FONTENELLE, A. de S.; SOUZA, V. A. D.; OLIVEIRA, Y. C.; SALES, C. A. T. **Estabilização e melhoria da segurança de vertedouros de barragens do Estado do Ceará (Pacajús e Rosário)**. Comitê Brasileiro de Barragens, XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém – PA, 03 a 07 de junho de 2007.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents**. UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália, 1998.

FRENCH MINISTRY OF ECOLOGY. Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement. 2007.

FRENCH MINISTRY OF ECOLOGY. Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu. 2008.

FUCHS, S.; KUHLCHE, C.; MEYER, V. Editorial for the special issue: vulnerability to natural hazards—the challenge of integration. **Natural Hazards**, v. 58, n. 2, p. 609-619, 2011.

FUSARO, T. C. **Um Programa de Segurança de Barragens no Setor Elétrico Privatizado**. XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais Volume II, pág. 45-56, Belo Horizonte - MG. 1999.

GALLOPÍN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. **Global environmental change**, v. 16, n. 3, p. 293-303, 2006.

GOVERNMENT DECREE ON DAM SAFETY (319/2010). Disponível em: <http://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2010/en20100319.pdf>.

ICOLD. **Deterioration of dams and reservoirs**, dec./1983.

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

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

ICOLD EUROPEAN CLUB. **Dam Legislation Report**, March 2013.

ICOLD EUROPEAN CLUB. **Damage Potencial (Harzard) and Risk Classification of Dams**, 2008.

KANJI, M. A. **Parecer técnico sobre as causas de ruptura da Barragem Camará.** 2004. Disponível em: <http://www.prpb.mp.br/news/1docs/Camara/>. Acesso em 30/09/2014.

KEENEY, R. L. **Value-Focused-Thinking: a path to creative decision making.** Cambridge: Havard University Press, 1992.

KUPERMAN, S. C.; RE, G.; FERREIRA, W. V. F.; TUNG, W. S.; VASCONCELOS, S. E.; ZÚÑIGA, J. E. V. RABELLO, M. **Análise de risco e metodologia de tomada de decisões para barragens: evolução do sistema empregado pela Sabesp.** XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - Anais. Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2001, v.02, p. 535-548.

LAFITTE, R. Classes of risk for dams. **Hydropower and dams** – Issue six, pp 59-66, 1996.

MARTINS, R. **Legislação sobre segurança de barragens a nível mundial.** Jornada Técnica "Legislação sobre segurança de barragens", NATO PO-FLOODRISK, LNEC, Lisboa, 2000.

MATZENAUER, H. B. **Uma metodologia multicritério construtivista de avaliação de alternativas para o planejamento de recursos hídricos de bacias hidrográficas.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2003.

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

MENESCAL, R. A. (Org.). **A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil.** Brasília, PROÁGUA, 2ª edição, 314 p., 2005.

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.

MÉRIAUX, P.; ROYET, P.; MERCKLE, S. Dams and dikes: prevention first. **Journée Scientifique de l'OSRG2** « Signes précurseurs et prédiction: entre mythe et réalité scientifique » ENSM Nancy, 21 mars 2013. Disponível em: <http://www.ineris.fr/centredoc/osr2g2013-pme-dams-and-dikes-prevention-first-1365496687.pdf>.

METZGER, M. J.; M. D. A ROUNSEVELL; L. ACOSTA-MICHLIK; R. LEEMANS; D. SCHOTER. The vulnerability of ecosystem services to land use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 1, p. 69-85, 2006.

MILARÉ, E. e BENJAMIM, H. **Estudo prévio de Impacto Ambiental.** Teoria, prática e legislação. Ed. Revista dos Tribunais. Coleção de Direito Ambiental, 1.v, 1994.

MINGERS, J., BROCKLESBY, J. Multimethodology: Towards a Framework for Mixing Methodologies, Omega, **International Journal of Management Science**, 25, 5 (pp. 489–509), 1997.

MINGERS, J., GILL, A. (Eds.) **Multimethodology: The Theory and Practice of Combining Management Science Methodologies**. John Wiley & Sons, Chichester, 1997.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Política Nacional de Defesa Civil**, Brasília, 2007.

MIRANDA, A. N.; MALVEIRA, V. T. C.; JARDIM, W. F. **Correção de trincas transversais na barragem Piaus**. XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

NORONHA, S. M. **Heurística para decisões em grupo utilizando modelos multicritério de apoio à decisão – uma abordagem construtivista**. Tese de Doutorado, EPS/UFSC, Florianópolis, 2003.

NRC (National Research Council). **Safety of existing dams**. National Academy Press, Washington, D. C., 1983.

NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat). Disponível em: <http://www.nve.no/>. Acesso em: 12 dez. 2013.

OSBORN, A. F. **Applied imagination**. 3th ed. Buffalo: Creative Education Foundation, 1993.

OLIVEIRA, S. K. F; SILVA FILHO, F. C. **Avaliação das condições de segurança da Barragem Trussú**. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

PENAS, J. **Potential downstream risk assessment in Spanish dam safety legislation**. Dams and safety management in downstream valleys, A. A. Balkema, Rotterdam, pp 79-87, 1997.

PESSOA, J. C. C. Acidentes em barragens. II SNGB, **Revista Sanevia**, Ano 18, No. 26, Rio de Janeiro, 1964.

PORTUGAL. **Decreto-Lei 344/2007**. Diário da República, 1ª série – No. 198 – 15 de outubro de 2007.

QUÉBEC. **Dam Safety Regulations**. Editeur Officiel du Québec, 2014. Disponível em: <http://www.cehq.gouv.qc.ca>.

QUÉBEC. **Dam Safety Act**. Editeur Officiel du Québec, 2014. Disponível em: <http://www.cehq.gouv.qc.ca>.

QUEENSLAND GOVERNMENT. **Guidelines for Failure Impact Assessment of Water Dams**. State of Queensland, Department of Energy and Water Supply, 2012.

RAFTERY, J. **Risk Analysis in Project Management**. E & FN SPON, London, U.K, 1994.

RAMOS, I. A. J. **Avaliação ambiental estratégica multicritério**. Tese de Doutorado em Planejamento Regional e Urbano, Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, 2002.

REGAN, P. J. **Dams & Civil Structures: An Examination od Dams Failures vs. Age of Dams**. 2010. Disponível em: <http://www.hydropworld.com/articles/hr/print/volume-29/issue-4/articles/dams--civil-structures.html>. Acesso em 31/07/2014.

REPUBLICA DA ÁFRICA DO SUL. **Dam Safety Regulations R.139**. 2012. Disponível em: <http://www.dwaf.gov.za>.

ROCHA, M. C. S. P. **Métodos de classificação multicritério com classes parcialmente ordenadas**. Tese de Doutorado, Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

ROY, B. **Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision**. Editions Economica, Paris, 1985.

ROY, B. Meaning and validity of interactive procedures as tools for decision making. **European Journal of Operational Research**, 31, 297-303, 1987.

ROY B., BOUYSSOU D. **Aide multicritère à la décision: Methodes et cas**. Editions Economica, Paris, 1993.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

SANDRONI, S. S. **Acidentes em obras de barramento**. Notas para o curso de geotecnia das barragens, 2006.

SCHOLZ, R. W.; BLUMER, Y. B.; BRAND, F. S. Risk, vulnerability, robustness, and resilience from a decision-theoretic perspective. **Journal of Risk Research**, v. 15, n. 3, p. 313-330, 2012.

SCHRÖTER D., M.J. METZGER, W. CRAMER, R. LEEMANS 2004. **Vulnerability assessment – analysing the human-environment system in the face of global environmental change**. Environmental Science Section Bulletin, Kalmar University, Sweden, 2, 11-17, 2004.

SILVA, M. B. F. A. **Formulação de um modelo de remoção de barragens sob um enfoque multicritério**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2012.

SILVEIRA, J. F. A. Segurança e controle de riscos na realização de operação de barragens. XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/13-106/DOCUMENTOS-XXVIII-SEMINARIO-NACIONA>. Acesso em: 30/09/2014.

THOMAZ, J. P. C. F. **Apoio à tomada de decisão na avaliação do desempenho de pessoas: contributos para o processo de decisão militar em tempo de paz**. Tese de Doutorado, Universidade de Lisboa, IST, Lisboa, 2005.

USACE (U.S. Army Corps of Engineers). **Recommended Guidelines for the Safety Inspection of Dams**. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, Washington D.C., 1979.

USACE. (U.S. Army Corps of Engineers). **Engineering and Design Dam Safety Assurance Program (ER 1110-2-1155)**, 1997. Retrieved January 12, 2011, from <http://140.194.76.129/publications/eng-regs/er1110-2-1155/entire.pdf>.

USBR. **Downstream Hazard Classification Guidelines**. ACER Technical Memorandum No. 11, Bureau of Reclamation, Denver, CO, December, 1988.

USBR. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure DSO-99-06**. Sedimentation & River Hydraulics, Dam Safety Office, September 1999.

USBR. **Risk based profiling system**. Technical manual, 2001.

VIEIRA, V. P. P. B. **Análise de Risco em Recursos Hídricos**. ABRH, Porto Alegre, 2005.

WISEU, M. T. F. **Segurança nos vales a jusante de barragens**. Tese de Doutorado, LNEC, Lisboa, 2008.

ZUFFO, M. S. R. **Análise de risco em barragens: um índice de priorização**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 291p. 2010.

WINTERFELDT D. V., EDWARDS W. **Decision Analysis and Behavioral Research**. New York, Cambridge University Press, 1986.

ANEXO A

UF	Nome do órgão	Emite outorga de uso dos RH	Faz Licenciamento Ambiental
AC	Instituto de Meio Ambiente do Acre (IMAC)	X	X
AL	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL)	X	X
AM	Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM)	X	X
AP	Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Amapá (SEMA/AP)	X	X
BA	Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA)	X	X
CE	Secretaria de Recursos Hídricos (SRH/CE)	X	
DF	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA)	X	
ES	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA)	X	X
GO	Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH/GO)	X	X
MA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA/MA)	X	X
MG	Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenv. Sustentável (SEMAD/MG)	X	X
MT	Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA/MT)	X	X
MS	Instituto de Meio Ambiente do Estado do Mato Grosso do Sul (IMASUL)	X	X
PA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará	X	X
PB	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA)	X	
	Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos, do Meio Ambiente e da Ciência e Tecnologia do Estado da Paraíba (SERHMACT/PB)	X	X
PE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE/PE)	X	
PI	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí (SEMAR/PI)	X	X
PR	Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ)	X	
RJ	Instituto Estadual do Ambiente (INEA/RJ)	X	X
RN	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH/RN)	X	X
RS	Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA/RS)	X	X
RO	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM/RO)	X	X
RR	Fundação Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Roraima (FEMARH/RO)	X	X
SC	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDS/SC)	X	
SE	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH/SE)	X	X
SP	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP)	X	
TO	Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS)	X	X

APENDICE A - MATRIZES JUÍZO DE VALOR E TERMÔMETRO DOS PVF'S

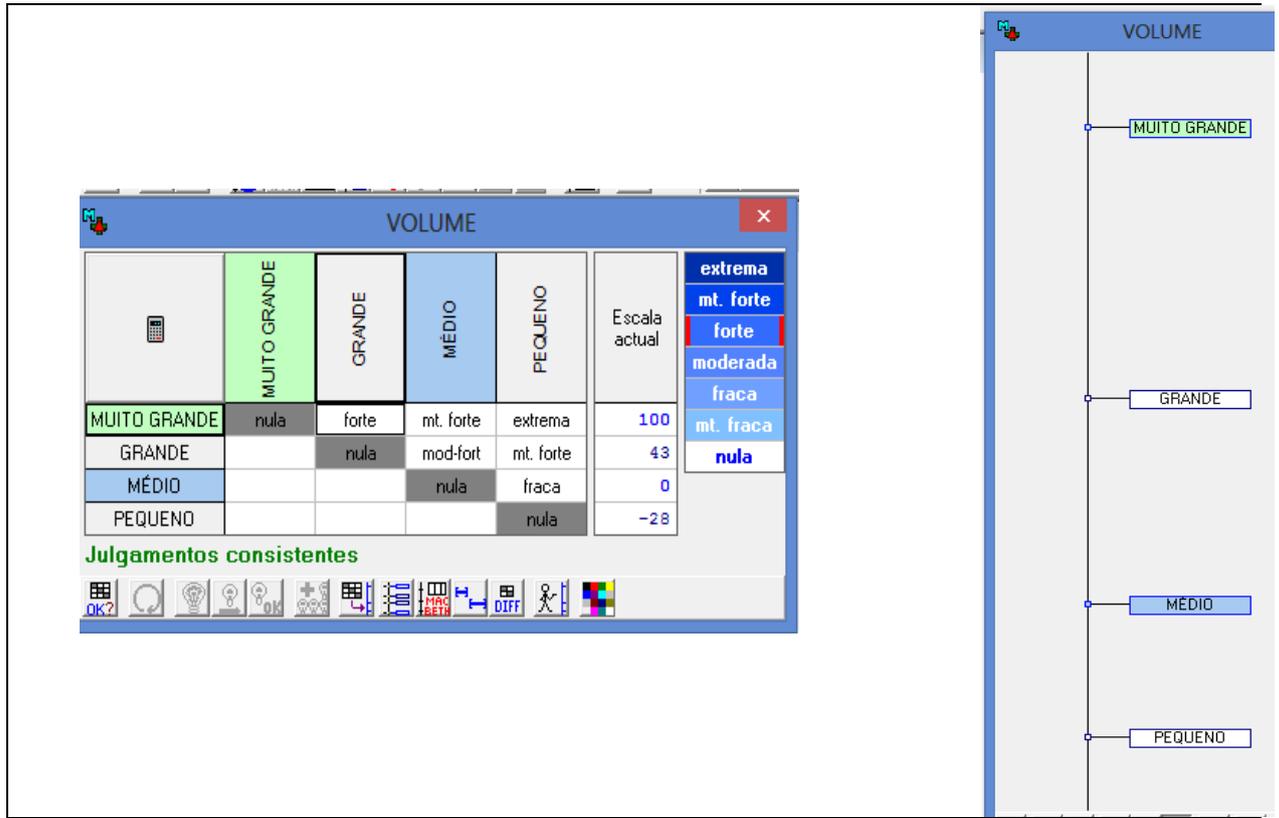


FIGURA 57 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF1.

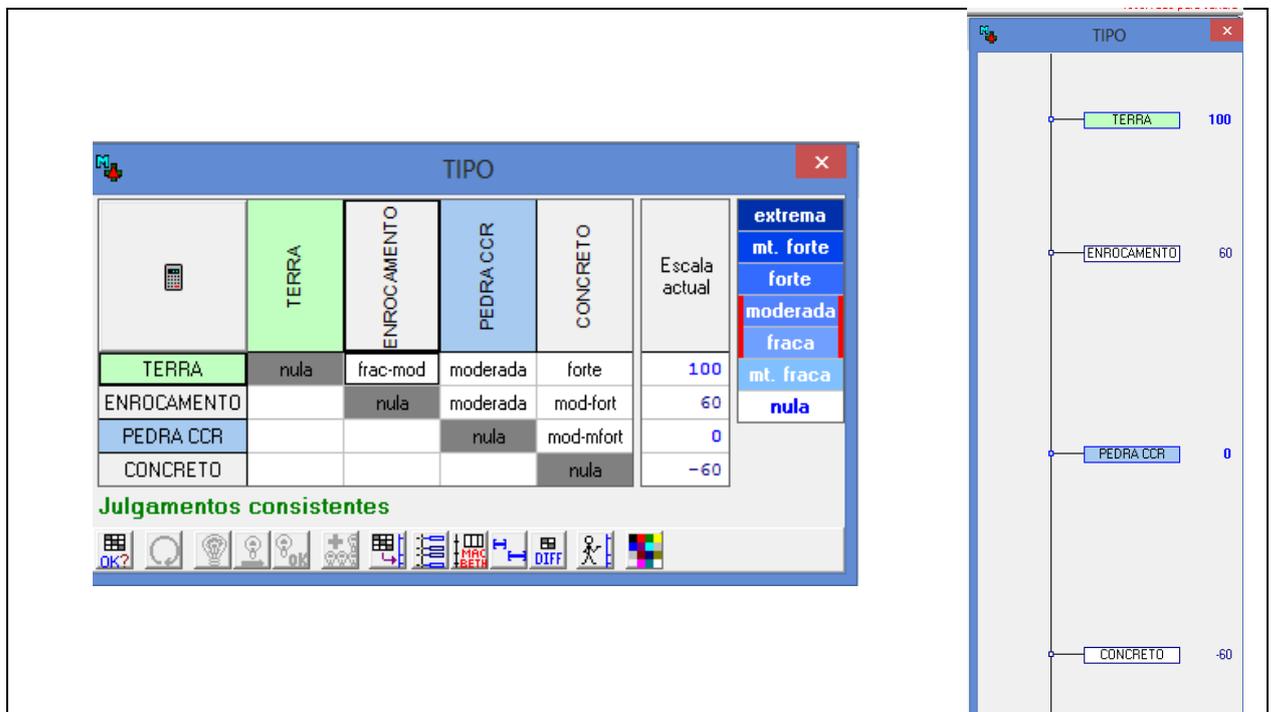


FIGURA 58 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF2.

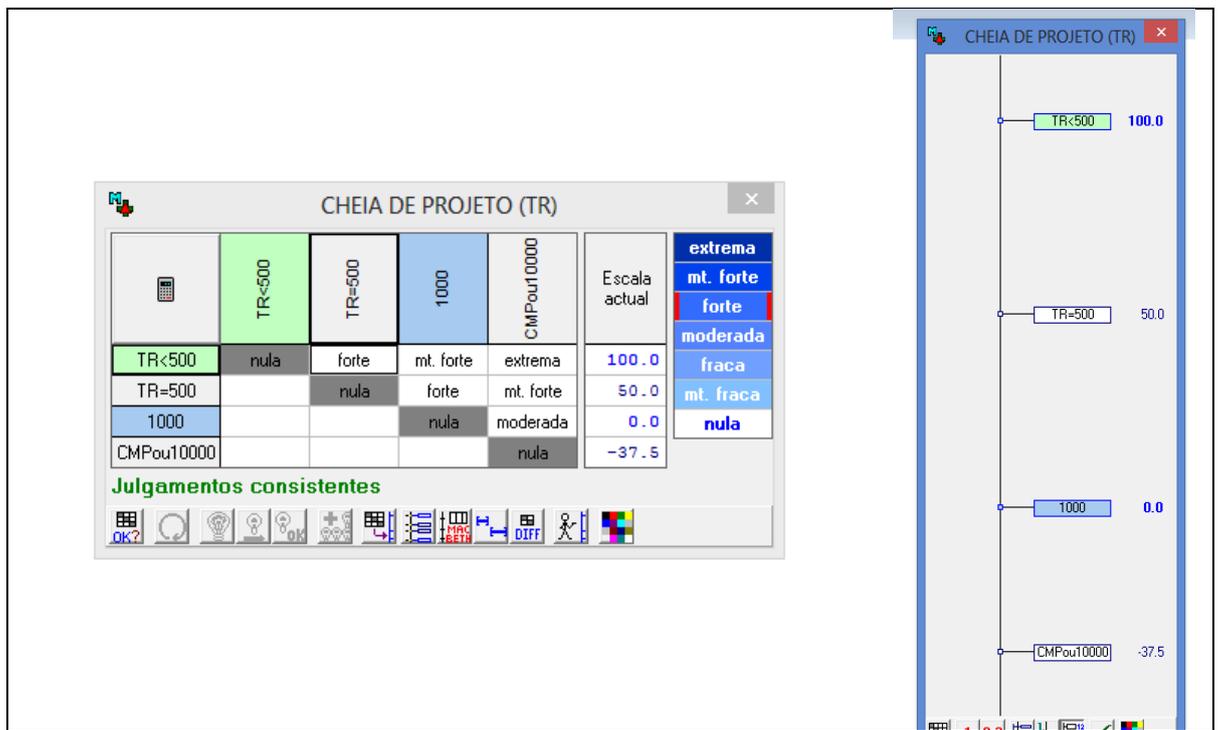


FIGURA 59 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF3.

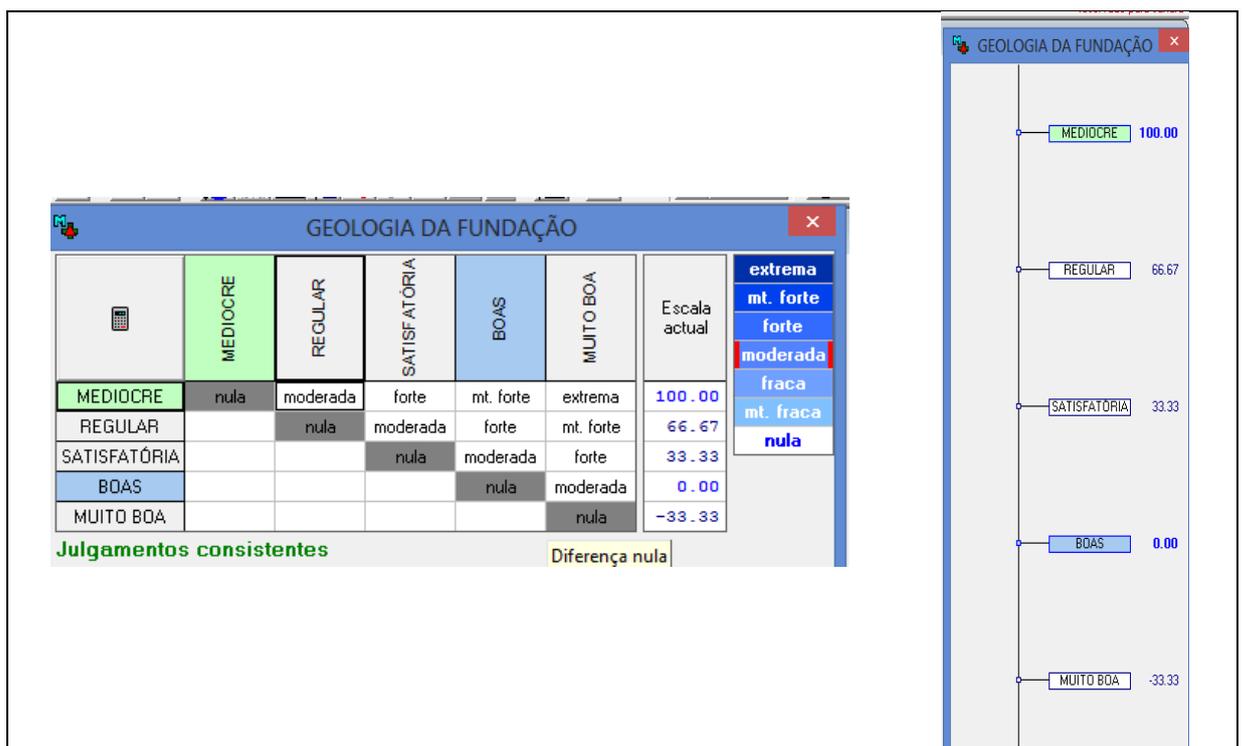


FIGURA 60 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF4.

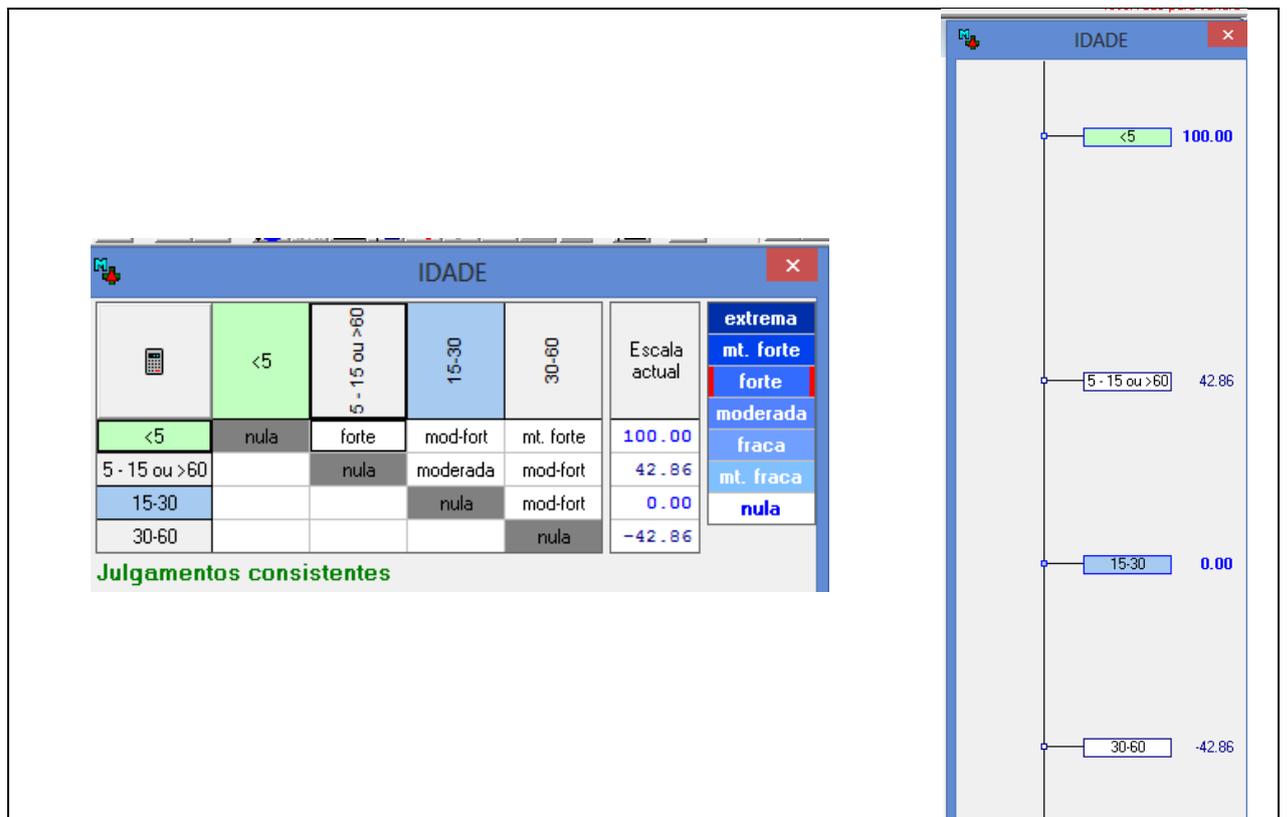


FIGURA 61 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF5.

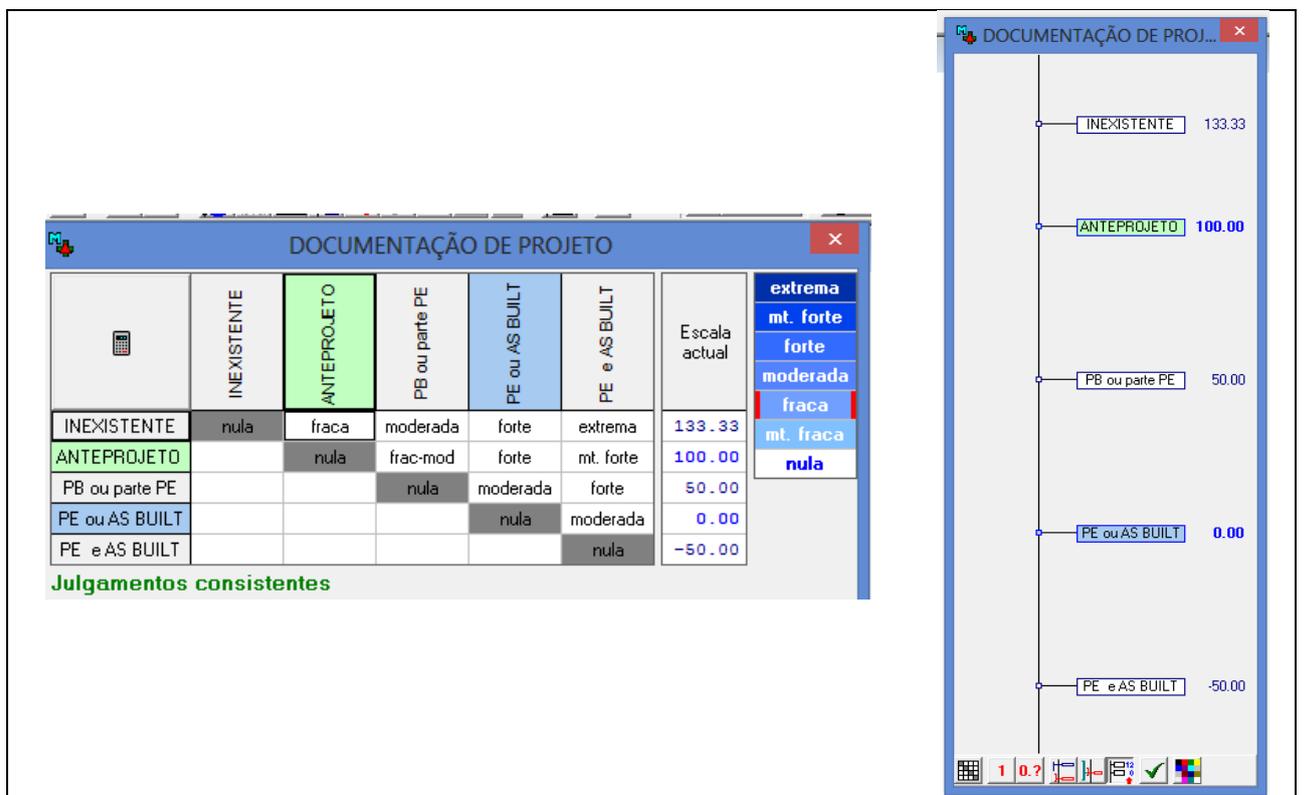


FIGURA 62 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF6.

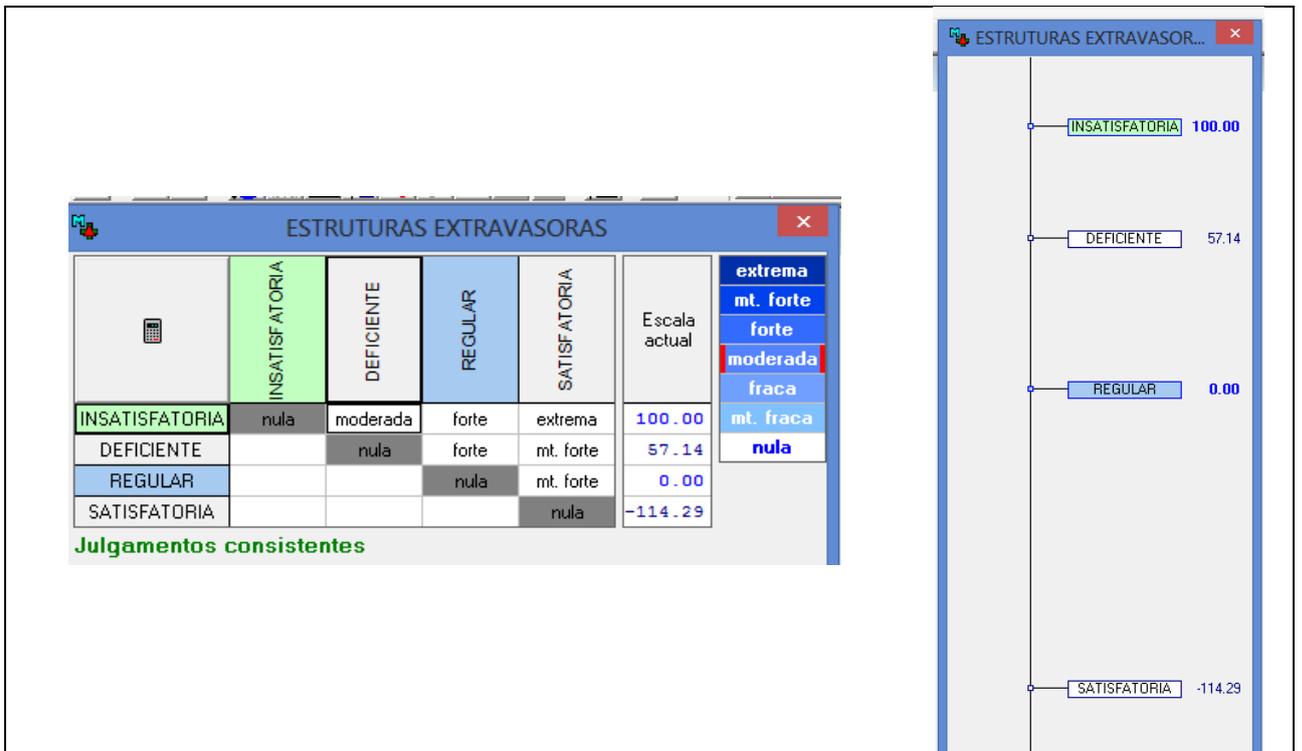


FIGURA 63 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF7.

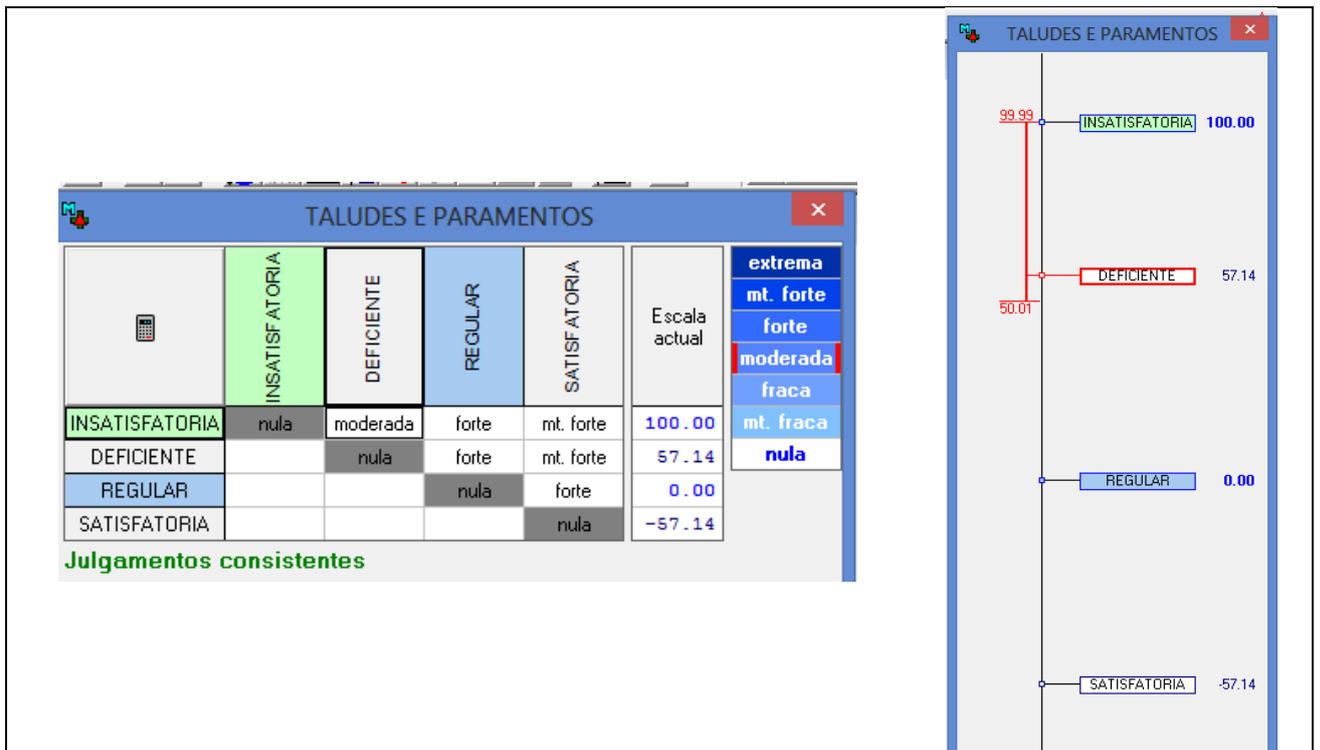


FIGURA 64 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF8.

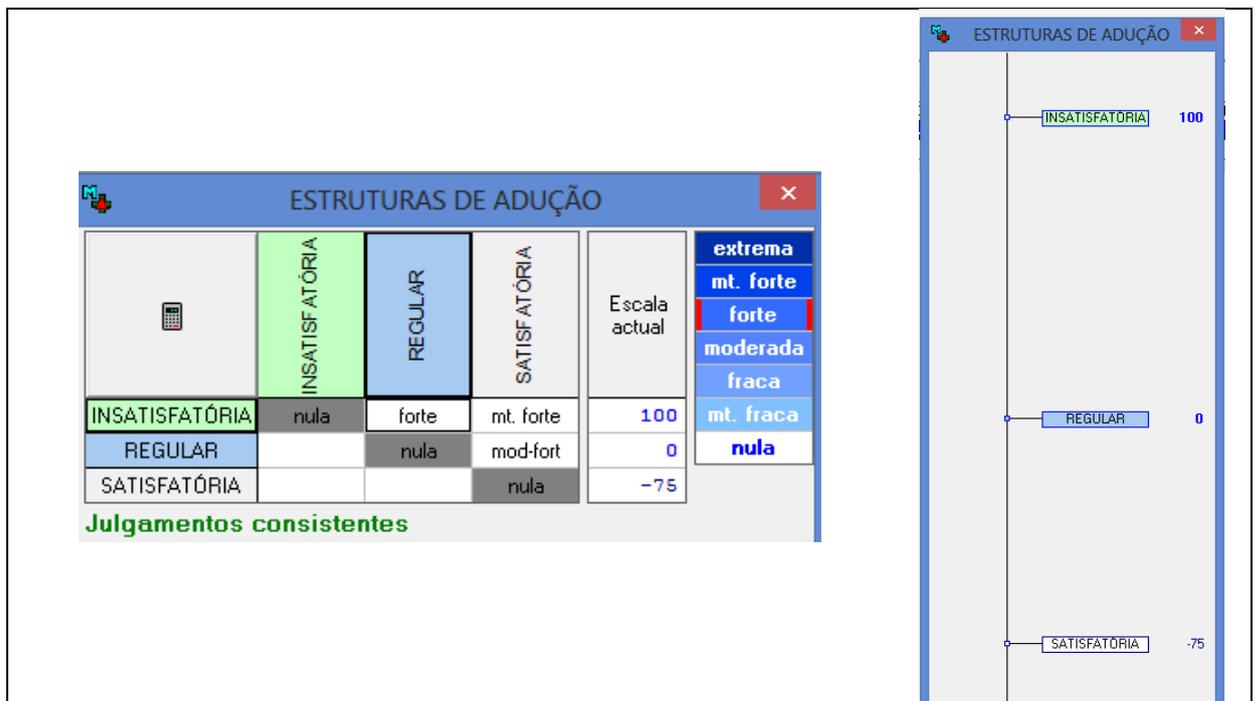


FIGURA 65 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF9.

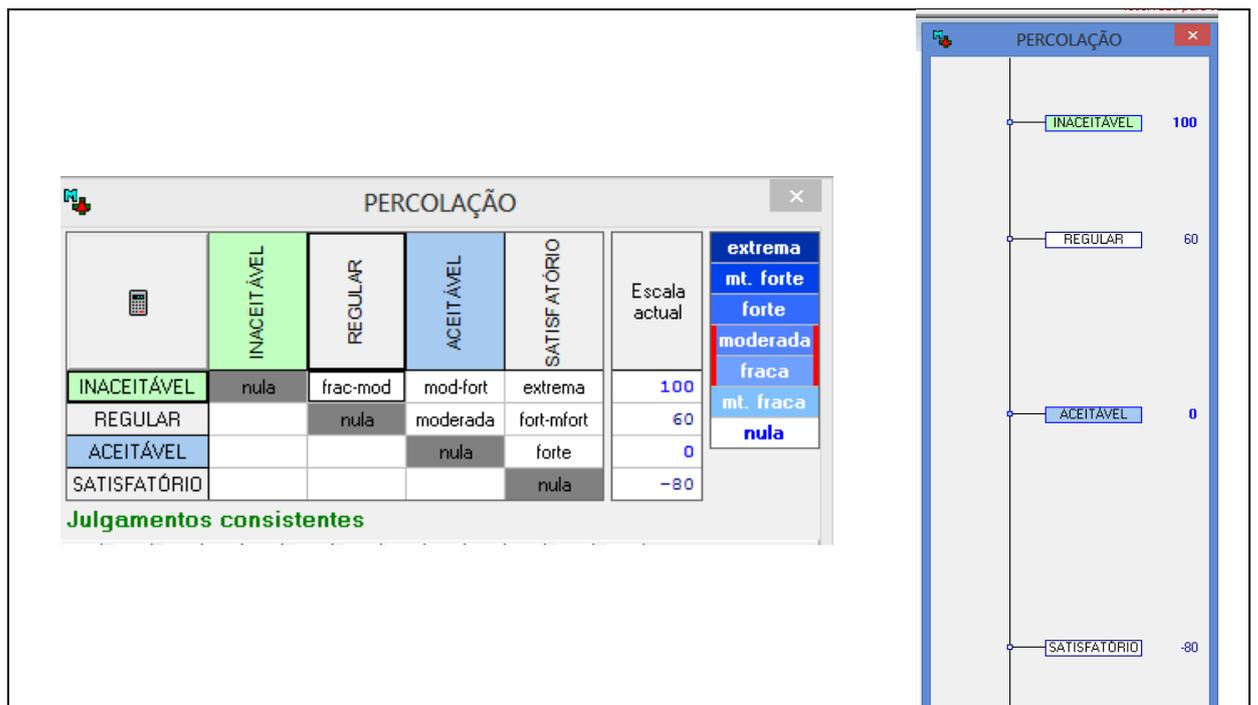


FIGURA 66 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF10.

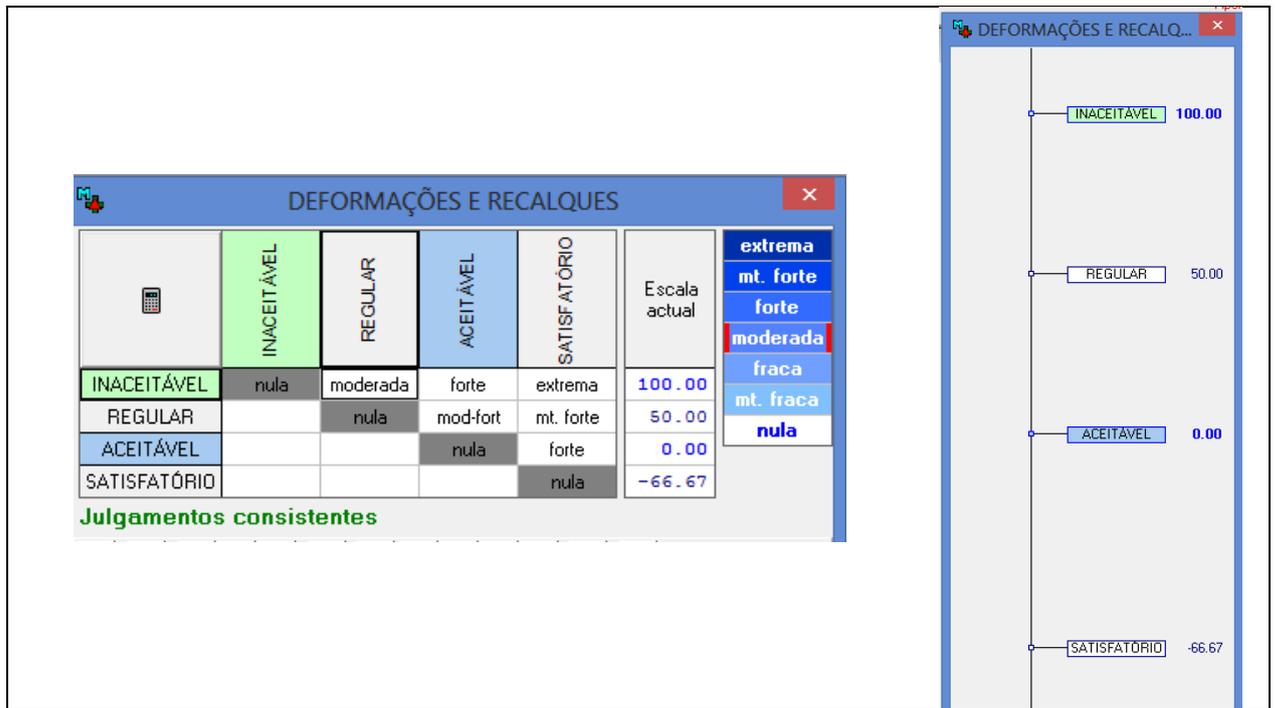


FIGURA 67 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF11.

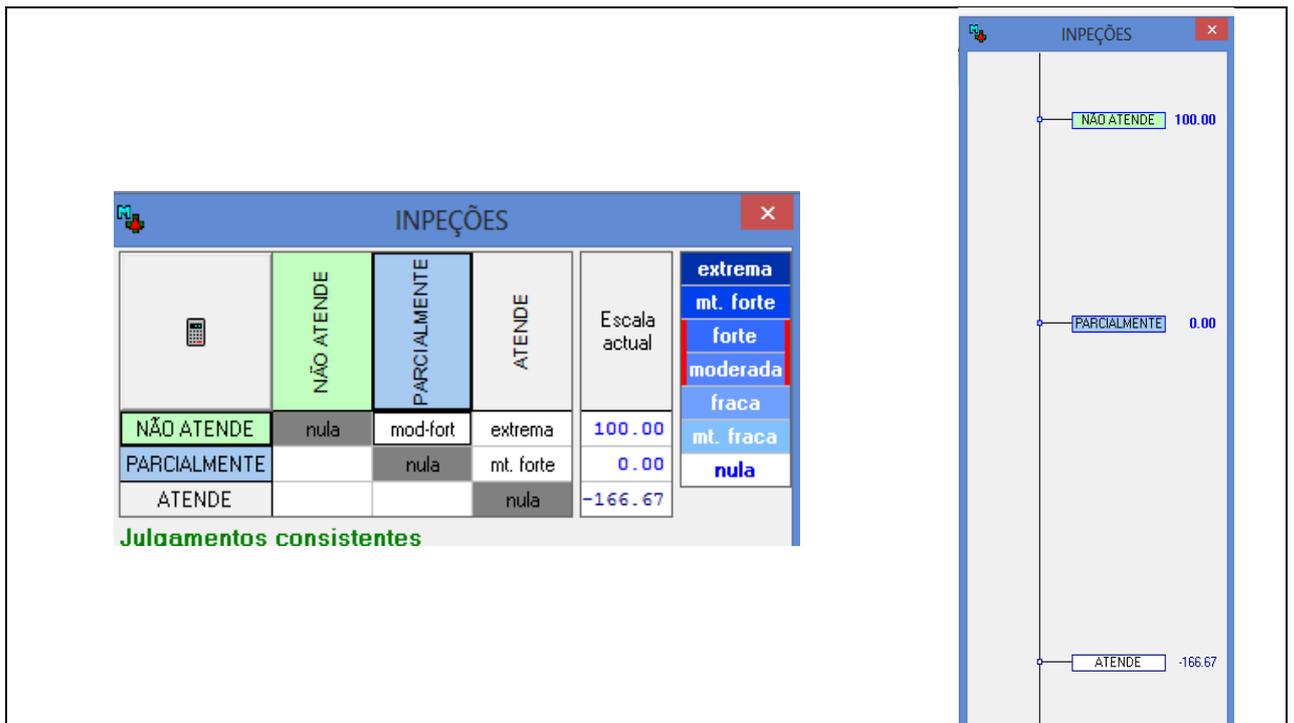


FIGURA 68 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF12.



FIGURA 69 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF13.



FIGURA 70 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF14.



FIGURA 71 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF15.



FIGURA 72 - Matriz de juízos de valor e função de valor para o PVF16.

APÊNDICE B - PERFIL MULTICRITÉRIO DAS BARRAGENS

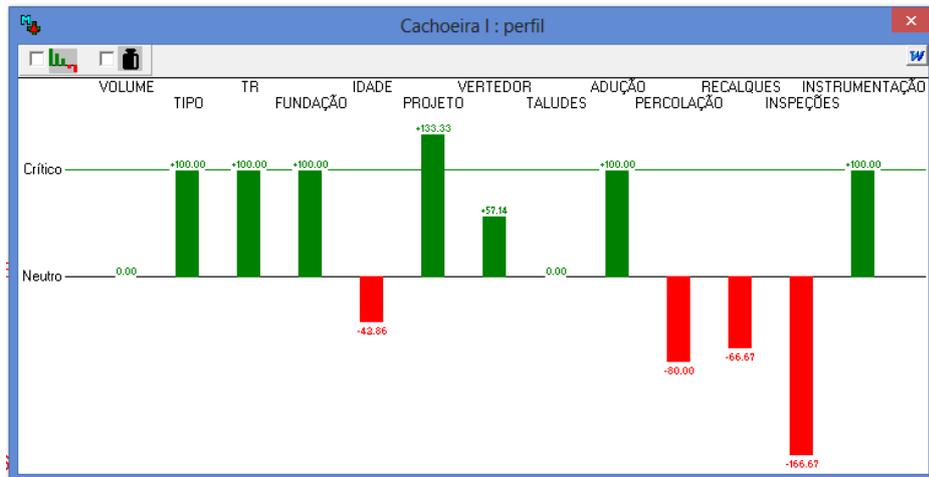


FIGURA 73 - Perfil multicritério da barragem Cacheira I.



FIGURA 74 - Perfil multicritério da barragem Curimataú.

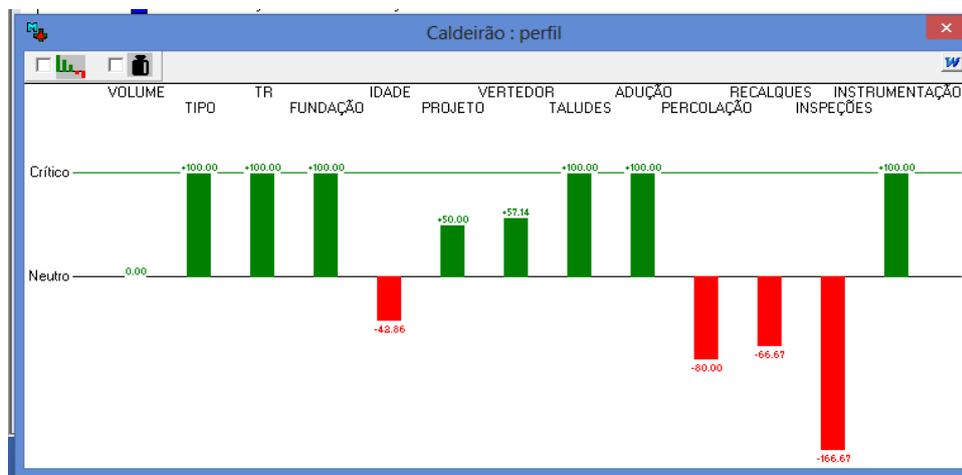


FIGURA 75 - Perfil multicritério da barragem Caldeirão.

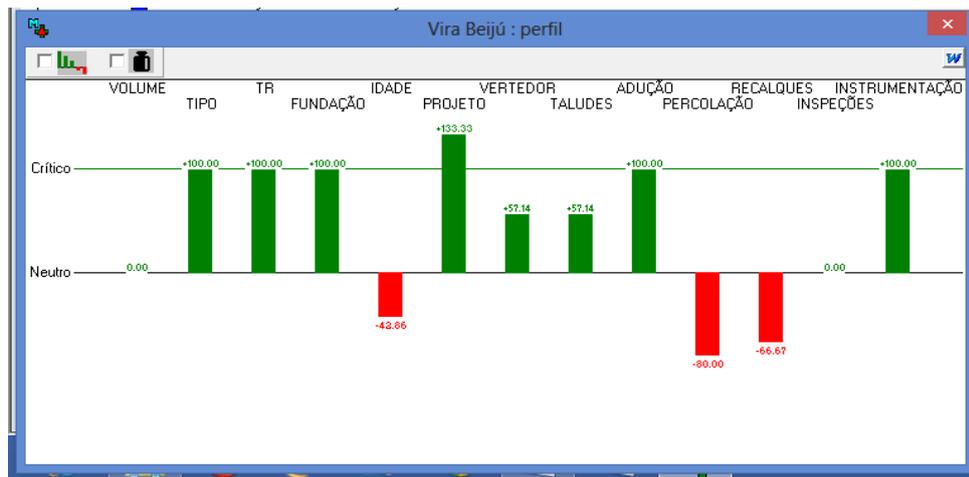
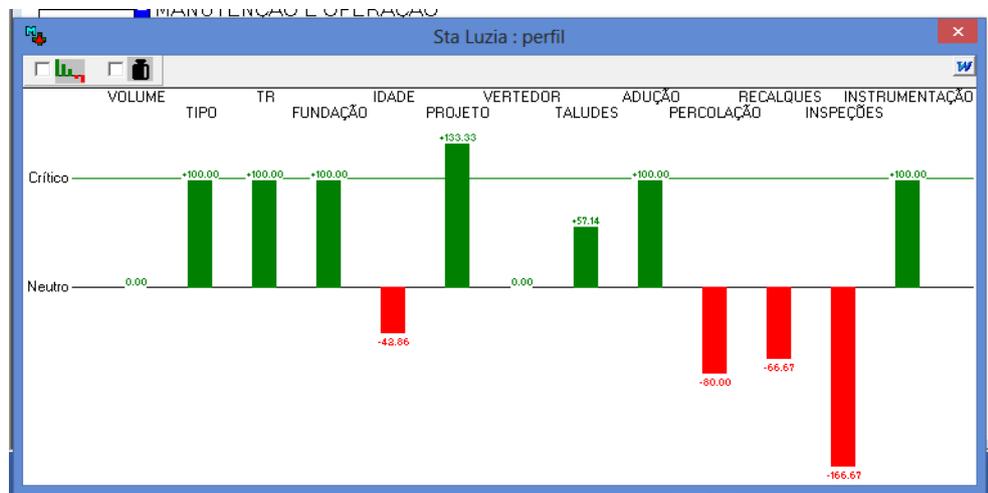


FIGURA 76 - Perfil multicritério da barragem Vira Beijú.



Perfil multicritério da barragem Sta. Luzia.

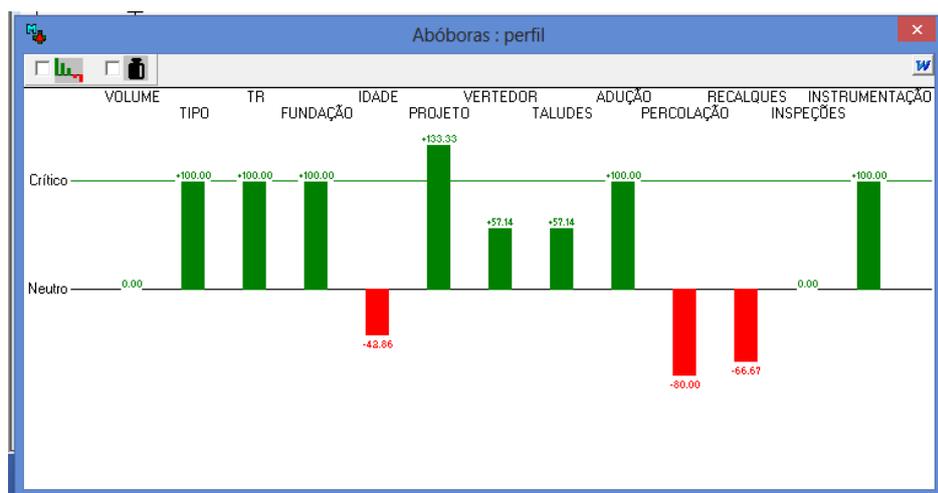


FIGURA 77 - Perfil multicritério da barragem Abóboras.

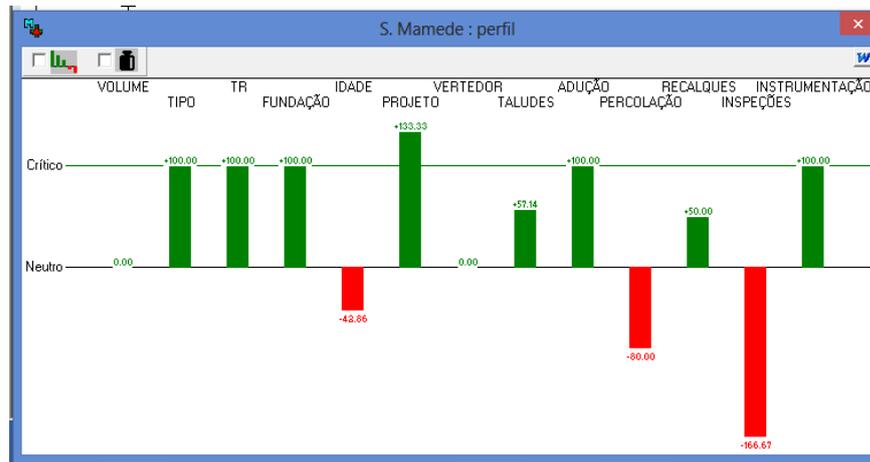


FIGURA 78 - Perfil multicritério da barragem S. Mamede.



FIGURA 79 - Perfil multicritério da barragem Escondido.

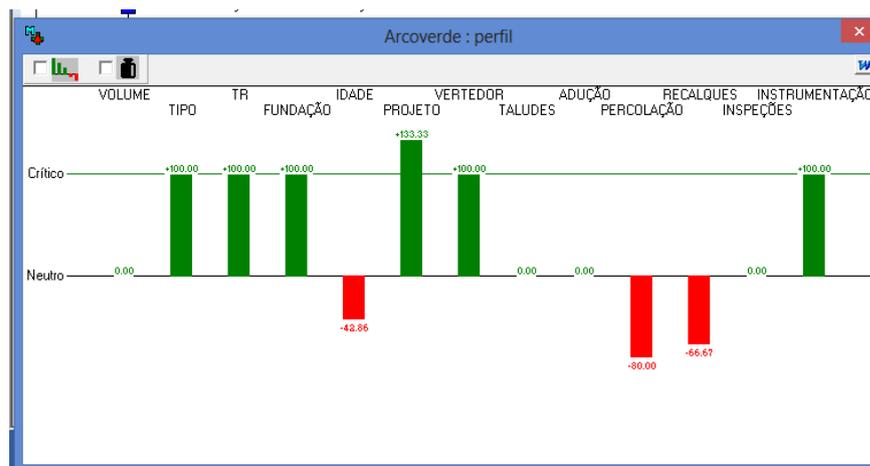


FIGURA 80 - Perfil multicritério da barragem Arcoverde.



FIGURA 81 - Perfil multicritério da barragem Japi II.

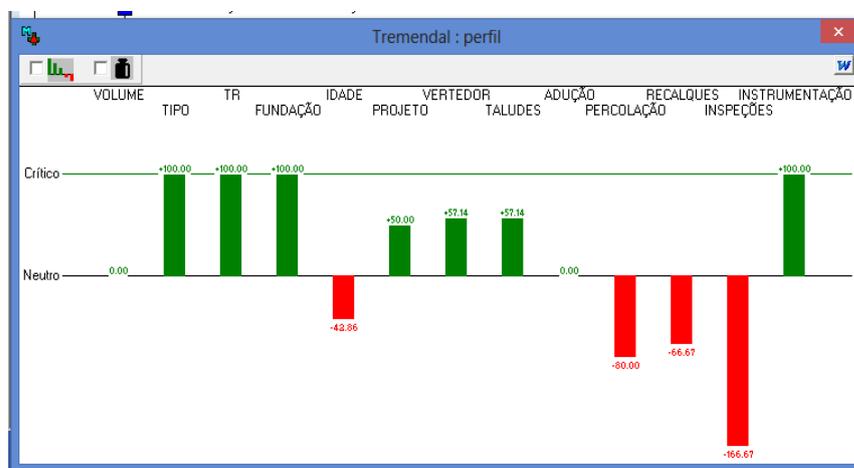


FIGURA 82 - Perfil multicritério da barragem Tremendal.

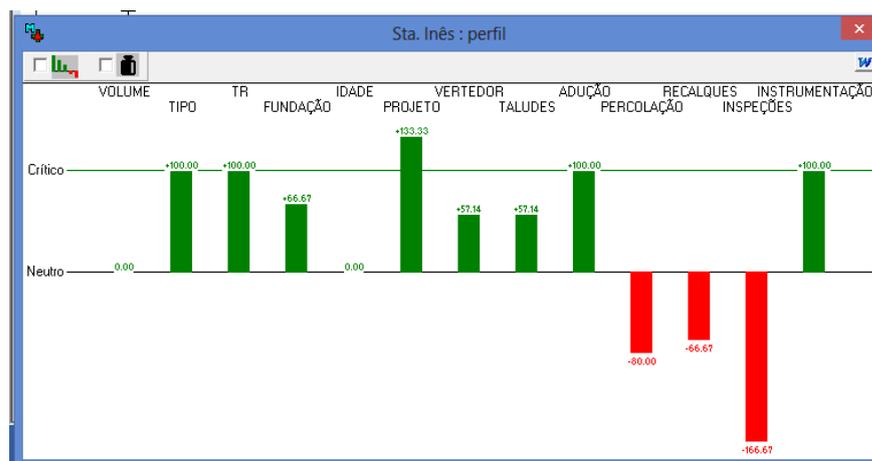


FIGURA 83 - Perfil multicritério da barragem Sta. Inês.

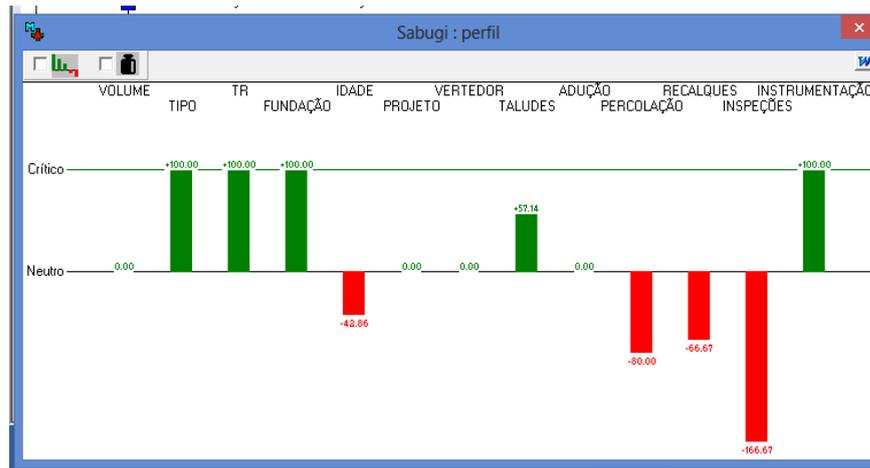


FIGURA 84 - Perfil multicritério da barragem Sabugi.



Figura 85 - Perfil multicritério da barragem Itans.

APÊNDICE C - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PESO

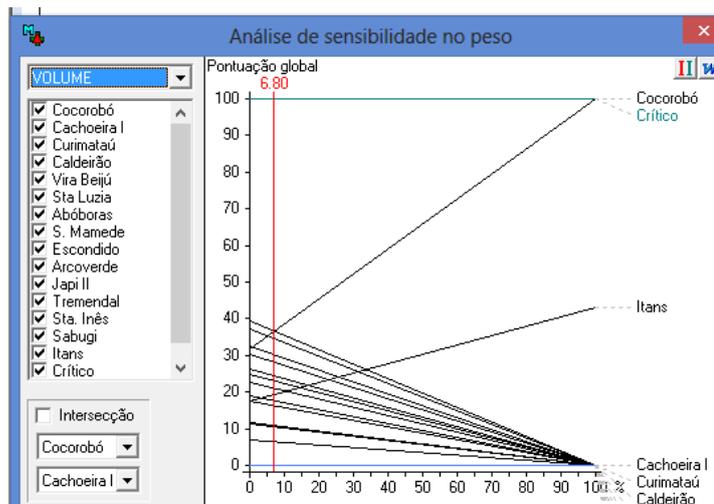


FIGURA 86 - Análise de sensibilidade do peso do PVF1 - volume.

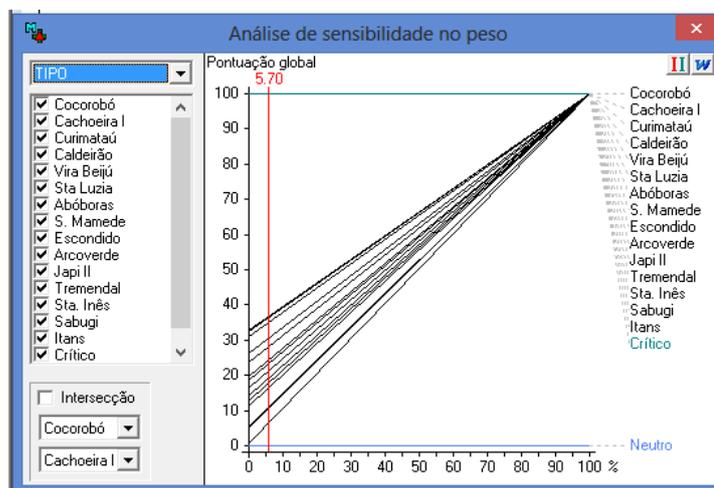


FIGURA 87 - Análise de sensibilidade do peso do PVF2 -tipo.

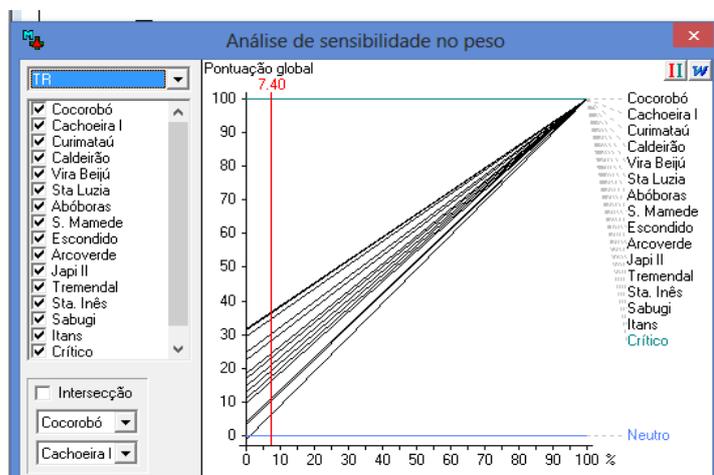


FIGURA 88 - Análise de sensibilidade do peso do PVF3 - período de retorno.

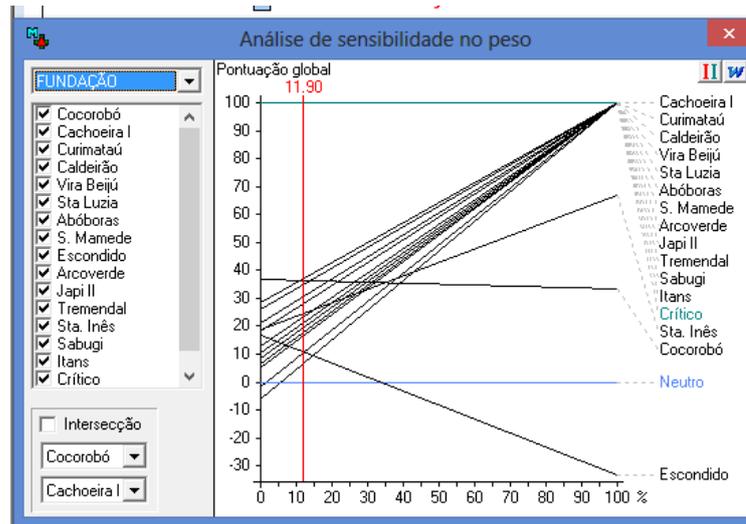


FIGURA 89 - Análise de sensibilidade do peso do PVF4 - geologia da fundação.

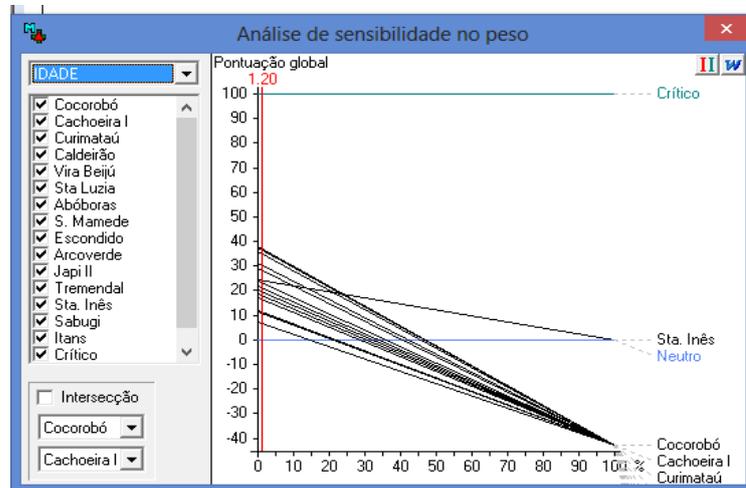


FIGURA 90 - Análise de sensibilidade do peso do PVF5 - idade.

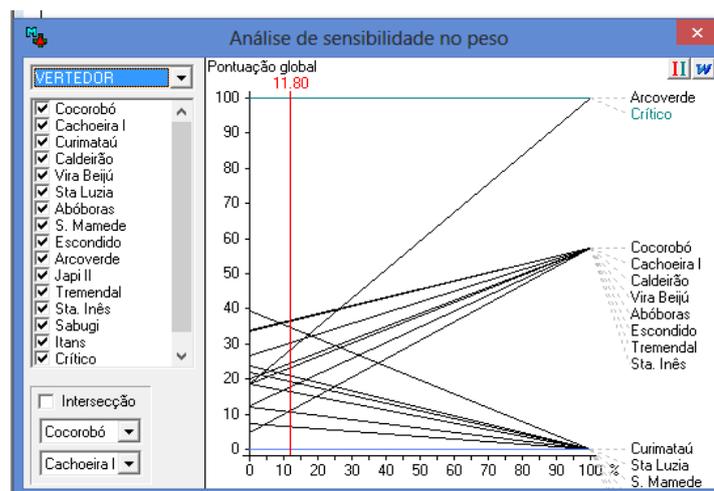


FIGURA 91 - Análise de sensibilidade do peso do PVF7 - estruturas extravazoras.

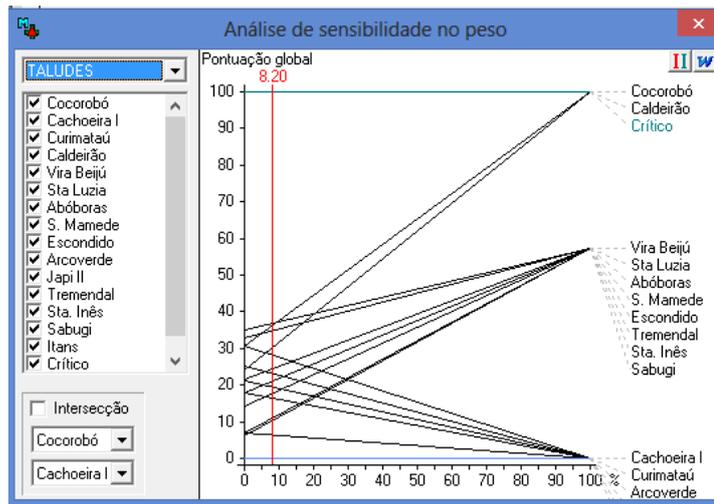


FIGURA 92 - Análise de sensibilidade do peso do PVF8 - taludes e paramentos.

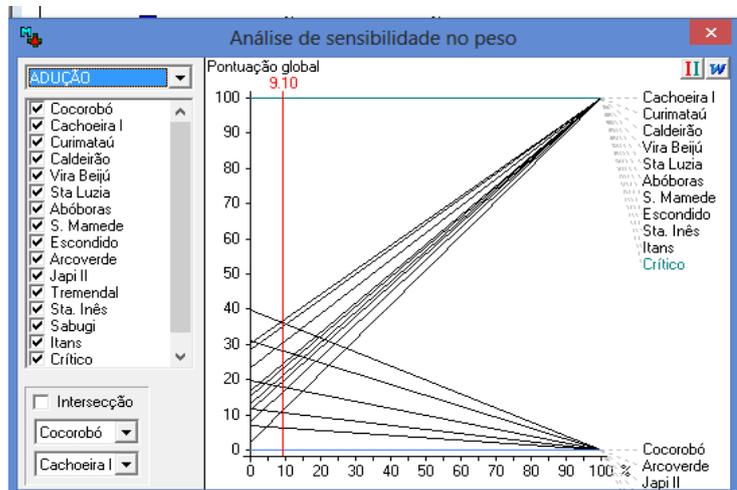


FIGURA 93 - Análise de sensibilidade do peso do PVF9 - estruturas de adução.

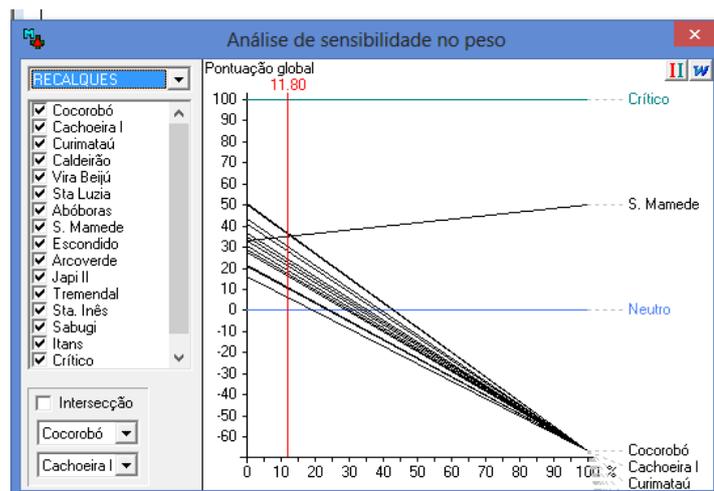


FIGURA 94 - Análise de sensibilidade do peso do PVF11 - deformações e recalques.

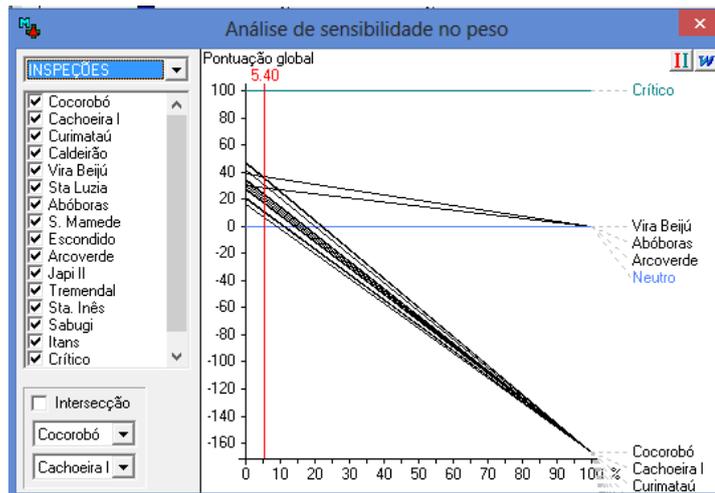


FIGURA 95 - Análise de sensibilidade do peso do PVF12 - inspeções.

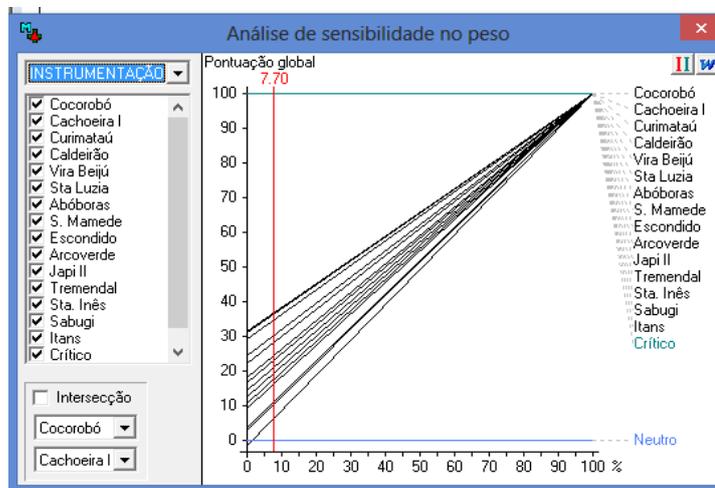


FIGURA 96 - Análise de sensibilidade do peso do PVF13 - instrumentação.

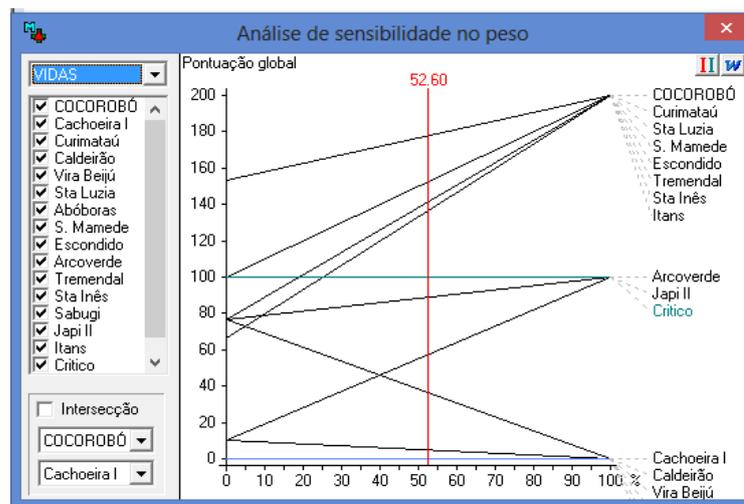


FIGURA 97 - Análise de sensibilidade do peso do PVF14 - perda de vidas.

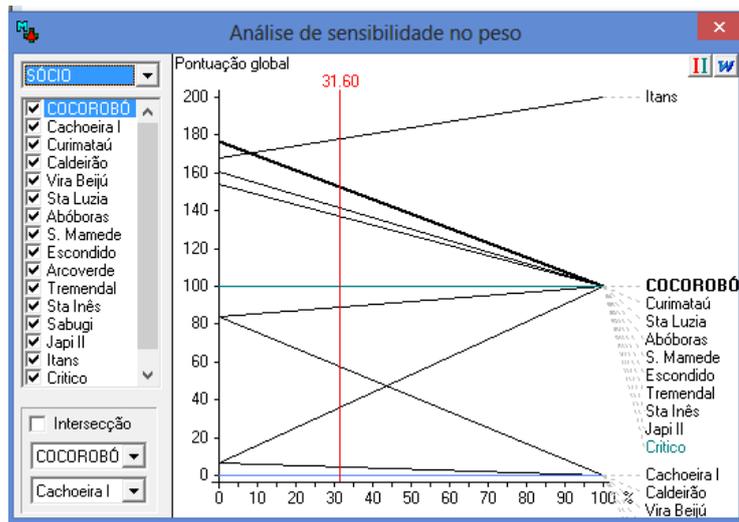


FIGURA 98 - Análise de sensibilidade do peso do PVF15 - impacto sócioeconômico.

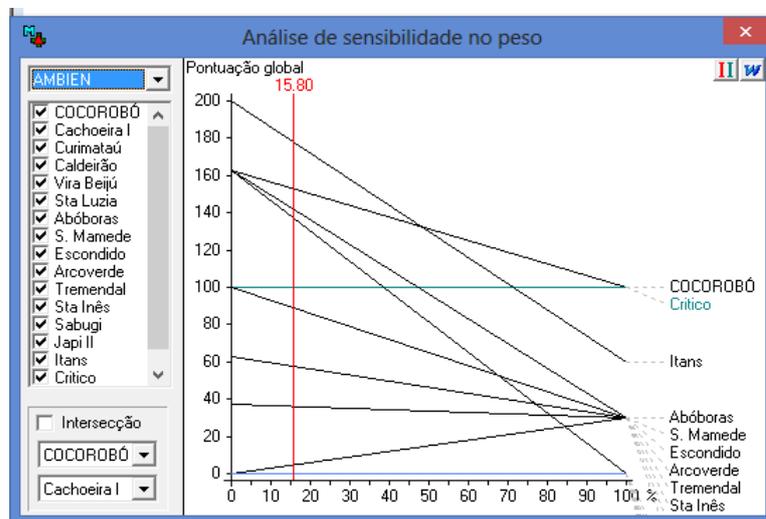


FIGURA 99 - Análise de sensibilidade do peso do PVF16 - impacto ambiental.