



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

FRANCISCO HIAGO DE SIQUEIRA GOMES

**QUANTIFICAÇÃO DE RISCO DE *PIPING* EM BARRAGENS DE TERRA VIA
ABORDAGENS PROBABILÍSTICA E *FUZZY***

FORTALEZA

2019

FRANCISCO HIAGO DE SIQUEIRA GOMES

QUANTIFICAÇÃO DE RISCO DE *PIPING* EM BARRAGENS DE TERRA VIA
ABORDAGENS PROBABILÍSTICA E *FUZZY*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

Coorientadora: Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G614q Gomes, Francisco Hiago de Siqueira Gomes.
Quantificação de risco de piping em barragens de terra via abordagens probabilística e fuzzy / Francisco Hiago de Siqueira Gomes Gomes. – 2019.
137 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.
Coorientação: Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira.

1. Risco. 2. Segurança de Barragens. 3. Piping. 4. Weibull. 5. Fuzzy. I. Título.

CDD 624.15

FRANCISCO HIAGO DE SIQUEIRA GOMES

QUANTIFICAÇÃO DE RISCO DE *PIPING* EM BARRAGENS DE TERRA VIA
ABORDAGENS PROBABILÍSTICA E *FUZZY*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 29/03/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira (Coorientadora)
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

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

Prof. Dra. Marcia Maria dos Anjos Mascarenha (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

A Deus.

Aos meus pais, a minha noiva, a toda minha
família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus, pela proteção e orientação nos momentos difíceis. A Ele devo tudo o que sou e o que construí até hoje, proporcionando-me conhecer pessoas maravilhosas e vivenciar alegrias imensuráveis.

Aos meus pais, Francisco Apoliano Gomes e Mariana de Siqueira Gomes, agradeço pela sua dedicação, doação e abnegação, sempre visando me proporcionar a melhor educação e exemplo de caráter. Buscarei seguir e valorizar seus ensinamentos por toda a minha vida.

Aos meus irmãos, José Jalis e Mayana Lara, agradeço pelos momentos que vivenciamos juntos durante a vida e por sempre torcerem e se preocuparem comigo, cada um à sua maneira.

À minha querida noiva, Alana Santos, agradeço pelo apoio constante e palavra encorajadora que me fazem caminhar para frente, superando os obstáculos e desafios, tornando-me alguém que está sempre disposto a melhorar.

Aos meus avôs Demerval e Assis e minhas avós Otacília, Marli e Anete, sou grato pelo apoio e força que me deram, especialmente nos momentos mais difíceis da minha vida. O exemplo de vida de cada um está gravado em meu coração.

À minha tia e madrinha, Gilvana Aguiar, e minha prima, Ana Beatriz Aguiar, agradeço pelo teto, pelo tempo, pela paciência, pelos ensinamentos e pelos bons momentos que vivenciei enquanto morei e convivi com vocês na sua casa.

Aos meus grandes amigos de infância, Marcos Paulo Aguiar e Raul Dourado, agradeço pela amizade, parceria, irmandade e por todos os momentos que vivemos e ainda viveremos.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou agradeço pelo convívio, apoio e amizade. Sempre lembrarei dos grandes momentos que compartilhamos nos almoços e encontros da Geotecnia.

Aos docentes do mestrado, os professores Alfran Sampaio, Anderson Borghetti e Francisco Chagas, agradeço pela dedicação, pelos conhecimentos doados e pela imensa contribuição em minha formação.

Aos professores participantes da banca examinadora, Marcia Maria dos Anjos Mascarenha e Francisco Chagas da Silva Filho, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao meu orientador, professor Silvrano Adonias Dantas Neto, agradeço pelas aulas ministradas, pelas conversas, orientações, paciência e, acima tudo, pelo exemplo de comprometimento com a ciência e com a disseminação do conhecimento adquirido.

A minha coorientadora, professora Vanda Tereza Costa Malveira, a quem considero como amiga e mentora, agradeço pela amizade, pelo esforço, pela disponibilidade, pela dedicação, pelo companheirismo e pelo exemplo pessoal e profissional.

À Universidade Federal do Ceará agradeço por conceder a licença do software MATLAB para o desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Não há um ramo da matemática, por mais abstrato que seja, que não possa ser aplicado algum dia aos fenômenos do mundo real.”

Nikolai Lobachevski

RESUMO

O desenvolvimento de *piping* tem se constituído, em todo o mundo, como um dos principais tipos de falhas em barragens de terra, podendo levar estas estruturas ao colapso, caso não sejam tomadas medidas preventivas. No âmbito da legislação de segurança de barragens no Brasil, as barragens devem ser classificadas por categorias de risco a partir de inspeções, onde a ocorrência de *piping* é um dos critérios analisados, cujos resultados dependem da experiência dos técnicos sobre a identificação e ponderação das anomalias presentes no barramento, sendo, portanto, um processo altamente subjetivo e que leva em si um grau de incertezas significativo. Este trabalho tem por objetivo propor duas metodologias para a quantificação do risco de *piping* em barragens de terra, uma obtida por meio de uma abordagem probabilística, utilizando o modelo de confiabilidade da distribuição de Weibull, e outra por meio de uma abordagem *fuzzy*. As metodologias foram desenvolvidas visando calcular o risco de ocorrência de *piping* de forma que as incoerências e imprecisões (incertezas) na obtenção dos parâmetros sejam amenizadas. A abordagem probabilística leva em consideração critérios geotécnicos, hidrológicos e o tempo, excluindo da análise a situação de deterioração estrutural da barragem, dado que possuiu incertezas inerentes a obtenção, sujeito a subjetividade na avaliação do técnico responsável pela inspeção em campo. Em contrapartida, no modelo *fuzzy*, que considera a deterioração estrutural da barragem, as incertezas são aspectos relevantes na análise. No controlador Mamdani desenvolvido, a subjetividade está inserida em todos os níveis, sendo os conjuntos *fuzzy*, que constituem as variáveis linguísticas do modelo (idade da barragem, susceptibilidade dos solos ao *piping*, percentual de acumulação do reservatório e nível de deterioração da barragem), responsáveis pela diluição da subjetividade e das outras incertezas inerentes a cada critério considerado no modelo. Para o desenvolvimento do modelo foram utilizadas as barragens Cipoada, Itaúna, Jaburu I, Martinópolis e Quandá, situadas no estado do Ceará, no Brasil. Os resultados obtidos com os modelos baseados nas duas metodologias viabilizam a hierarquização das prioridades de intervenção, permitem o acompanhamento da evolução do risco de *piping* em cada barragem e embasam a proposição de um protocolo de intervenção adequado para os diferentes níveis de risco de *piping* calculados.

Palavras-chave: Risco. Segurança de Barragens. *Piping*. Confiabilidade. Weibull. *Fuzzy*.

ABSTRACT

Piping has been constituted, around the world, as one of the main types of faults in earth dams, that can take them to collapse, if no preventive measures are taken. In the dam safety brazilian legislation, dams should be classified by risk categories, whit piping occurrence is one of the critereas of classification, performed by means of a field inspection, whose results depends on the technicians expertise to identify and measure the anomalies manifested, being, therefore, a subjective process which carries a significant degree of uncertainty. That work aims to propose two quantitative methodologies for definition of piping risk in earth dams, one produced by a probabilistic approach and other produced by a fuzzy approach. The methodologies were developed to calculate the risk of piping occurrence allowing the attenuation of the inconsistencies and inaccuracies (uncertainties) in the parameters acquisition. The probabilistic approach is based on geotechnical, hydrological and time criteria, excluding from the analysis the structural deterioration of the dam, data with inherent uncertainties of acquisition, leaning to have a subjective evaluation by the technician responsible for the field inspection. In contrast, in the fuzzy model, which considers the structural deterioration of the dam, the uncertainties are relevant aspects in the analysis. In the Mamdani controller developed, subjectivity is inserted in all levels, with fuzzy sets, which integrate the linguistic variables of the model (age of the dam, susceptibility of soils to the piping occurrence, percentage of accumulation of water in the reservoir and level of deterioration of the dam), being responsible for the dilution of subjectivity and the other inherent uncertainties in each criteria considered in the model. For the model development were used the Cipoada dam, the Itaúna dam, the Jaburu I dam, the Martinopole dam and the Quandu dam, all located in Ceara state, Brazil. The results obtained allow the hierarchization of the intervention priorities, the monitoring of the piping risk evolution and support the proposition of an appropriate intervention protocol for the different levels of calculated piping risk.

Keywords: Risk. Dam Safety. Piping. Reliability. Weibull. Fuzzy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Ilustração do conceito de risco como um conjunto de três partes.....	22
Figura 2.2	– Apreciação e gestão de risco quanto a sobrevivência de indivíduos.....	26
Figura 2.3	– Estrutura de aceitabilidade do risco.	30
Figura 3.1	– Exemplo de ruptura de barragem por <i>piping</i>	33
Figura 3.2	– Movimentação das partículas no solo: repouso (a) e movimento (b).	34
Figura 3.3	– Início de <i>piping</i> em uma barragem.	36
Figura 3.4	– Continuação da erosão em uma barragem.	36
Figura 3.5	– Progressão da erosão e formação do tubo.	37
Figura 3.6	– Abertura e crescimento da brecha até a ruptura da barragem.	38
Figura 4.1	– Localização das barragens do estudo de caso no estado do Ceará.....	43
Figura 4.2	– Vista aérea barragem Cipoada.	45
Figura 4.3	– Seção máxima da barragem Cipoada.	45
Figura 4.4	– Quantitativo das anomalias relacionadas a <i>piping</i> na barragem Cipoada.	46
Figura 4.5	– Vista aérea da barragem Itaúna.	46
Figura 4.6	– Seção máxima da barragem Itaúna.	47
Figura 4.7	– Quantitativo das anomalias relacionadas a <i>piping</i> na barragem Itaúna.	47
Figura 4.8	– Vista aérea da barragem Jaburu I.	48
Figura 4.9	– Seção máxima da barragem Jaburu I.	48
Figura 4.10	– Quantitativo das anomalias relacionadas a <i>piping</i> na barragem Jaburu I.	49
Figura 4.11	– Vista aérea da barragem Martinópolis.....	49
Figura 4.12	– Seção máxima da barragem Martinópolis.....	50
Figura 4.13	– Quantitativo das anomalias relacionadas a <i>piping</i> na barragem Martinópolis....	50
Figura 4.14	– Vista aérea da barragem Quandá.....	51
Figura 4.15	– Seção máxima da barragem Quandá.....	51
Figura 4.16	– Quantitativo das anomalias relacionadas a <i>piping</i> na barragem Quandá.....	52
Figura 5.1	– Função densidade acumulada (F(t)) de Weibull para diferentes valores de β	58
Figura 5.2	– Taxa de falha de Weibull ($\lambda(t)$) para diferentes valores de β	59
Figura 5.3	– Curva da banheira.	60
Figura 5.4	– Efeito da variação de θ na função densidade de probabilidade de Weibull.	61
Figura 5.5	– Efeito da variação de θ na confiabilidade da distribuição de Weibull.	62
Figura 5.6	– Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Cipoada.....	68
Figura 5.7	– Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Itaúna.	68
Figura 5.8	– Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Jaburu I.	68
Figura 5.9	– Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Martinópolis.	69
Figura 5.10	– Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Quandá.	69
Figura 6.1	– Lógica padrão (bivalente).	75
Figura 6.2	– Lógica não-padrão (multivalente).	76
Figura 6.3	– Contraste entre as perspectivas da lógica clássica e da lógica <i>fuzzy</i>	77
Figura 6.4	– Função de pertinência de um conjunto <i>fuzzy</i> qualquer.....	79
Figura 6.5	– Representação dos conjuntos <i>fuzzy</i> componentes da variável temperatura.	79
Figura 6.6	– Número <i>fuzzy</i> : com um máximo (a) e com um plano de máximos (b).	81
Figura 6.7	– Número <i>fuzzy</i> : triangular (a) e trapezoidal (b).	81
Figura 6.8	– Variável linguística Idade.	83
Figura 6.9	– Representação de um sistema de controle <i>fuzzy</i>	84
Figura 6.10	– Conjunto <i>fuzzy</i> Jovem da variável linguística Idade.	85
Figura 6.11	– Exemplo de regra de inferência <i>fuzzy</i>	86
Figura 6.12	– Controlador <i>fuzzy</i>	86

Figura 6.13 – Métodos de defuzzificação.....	87
Figura 6.14 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para o parâmetro Idade da Barragem.....	88
Figura 6.15 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para o parâmetro Susceptibilidade do Solo ao <i>Piping</i>	90
Figura 6.16 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para o parâmetro Percentual de Acumulação do Reservatório.....	90
Figura 6.17 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para o parâmetro Nível de Deterioração da barragem.....	92
Figura 6.18 – Conjuntos <i>fuzzy</i> adotados para o parâmetro de saída Risco de <i>Piping</i>	93
Figura 6.19 – Operação do controlador <i>fuzzy</i> Mamdani.....	94
Figura 6.20 – Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Cipoada.....	98
Figura 6.21 – Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Itaúna.....	98
Figura 6.22 – Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Jaburu I.....	99
Figura 6.23 – Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Martinópolis.....	99
Figura 6.24 – Evolução do risco de <i>piping</i> na barragem Quandá.....	99
Figura 6.25 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Cipoada.....	104
Figura 6.26 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Itaúna.....	104
Figura 6.27 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Jaburu I.....	105
Figura 6.28 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Martinópolis.....	105
Figura 6.29 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Quandá.....	105
Figura 6.30 – Comparação das metodologias para a barragem Cipoada.....	108
Figura 6.31 – Comparação das metodologias para a barragem Itaúna.....	108
Figura 6.32 – Comparação das metodologias para a barragem Jaburu I.....	108
Figura 6.33 – Comparação das metodologias para a barragem Martinópolis.....	109
Figura 6.34 – Comparação das metodologias para a barragem Quandá.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados utilizados para embasamento e desenvolvimento dos modelos.....	44
Tabela 5.1 – Valores de β para diferentes níveis do reservatório.	64
Tabela 5.2 – Correlação de θ com a susceptibilidade dos solos ao <i>piping</i>	65
Tabela 5.3 – Resumo dos valores dos parâmetros das equações de Weibull.....	67
Tabela 5.4 – Hierarquia anual de prioridade de intervenção e monitoramento.	71
Tabela 5.5 – Protocolo de intervenção em barragens de terra baseado no risco de <i>piping</i>	72
Tabela 6.1 – Pontuação para susceptibilidade ao <i>piping</i> para diferentes tipos de solo.	89
Tabela 6.2 – Pontuação para as anomalias referentes ao nível de deterioração da barragem ..	91
Tabela 6.3 – Sistema de pesos (P) das variáveis de entrada e resposta da inferência.	95
Tabela 6.4 – Controlador Mamdani para Risco de <i>Piping</i>	96
Tabela 6.5 – Resumo dos valores de alimentação das variáveis de entrada.....	97
Tabela 6.6 – Hierarquia anual de prioridade de intervenção e monitoramento.	102
Tabela 6.7 – Protocolo de intervenção em barragens de terra baseado no risco de <i>piping</i>	103
Tabela 6.8 – Hierarquia anual de prioridade de intervenção e monitoramento.	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação da pesquisa	15
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.3	Metodologia para desenvolvimento do trabalho.....	18
1.4	Estrutura do trabalho	19
2	RISCO: DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES.....	21
2.1	Conceito de risco	21
2.2.	Risco geotécnico e segurança de barragens.....	23
2.2.1	<i>Análise de risco de falha em barragens</i>	24
2.2.2	<i>Gestão de risco em barragens</i>	25
2.2.3	<i>Panorama legal do risco em barragens no Brasil</i>	27
2.2.4	<i>Principais anomalias geradoras de risco em barragens de terra</i>	28
2.3	Aceitabilidade do risco	29
3	EROSÃO INTERNA (<i>PIPING</i>) EM BARRAGENS DE TERRA.....	32
3.1	Definição de erosão interna (<i>piping</i>)	32
3.2	Mecanismo de formação do <i>piping</i>	34
3.2.1	<i>Início da erosão</i>	35
3.2.2	<i>Continuação da erosão</i>	36
3.2.3	<i>Progressão da erosão para formação do tubo (pipe)</i>	37
3.2.4	<i>Abertura da brecha</i>	38
3.3	Detecção do <i>piping</i> em barragens e intervenção	39
4	APRESENTAÇÃO DAS ABORDAGENS, VARIÁVEIS E BARRAGENS UTILIZADAS NOS MODELOS DE QUANTIFICAÇÃO DO RISCO DE <i>PIPING</i>	41
4.1	Metodologias de quantificação do risco de ocorrência de <i>piping</i>	41_Toc9176337
4.2	Manifestação de <i>piping</i> nas barragens de terra selecionadas para aplicação dos modelos	42
4.2.1	<i>Barragem Cipoada</i>	45
4.2.2	<i>Barragem Itaúna</i>	46
4.2.3	<i>Barragem Jaburu I</i>	47
4.2.4	<i>Barragem Martinópole</i>	49
4.2.5	<i>Barragem Quandú</i>	50

5	ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA QUANTIFICAÇÃO DO RISCO DE PIPING EM BARRAGENS DE TERRA.....	53
5.1	Introdução a Teoria da Probabilidade e análises de risco probabilísticas	53
5.2	Confiabilidade: conceito e aplicação na Engenharia	54
5.3	Distribuição de probabilidade de Weibull.....	56
5.3.1	<i>Influência do parâmetro de forma (β) no modelo de confiabilidade da distribuição de Weibull</i>	<i>58</i>
5.3.2	<i>Influência do parâmetro de escala (θ) no modelo de confiabilidade da distribuição de Weibull</i>	<i>60</i>
5.4	Metodologia de quantificação de risco de <i>piping</i> em barragens de terra por abordagem probabilística utilizando a distribuição de Weibull.....	62
5.4.1	<i>Definição dos valores de β em relação com o nível do reservatório</i>	<i>63</i>
5.4.2	<i>Definição dos valores de θ em relação à susceptibilidade do solo da barragem ao desenvolvimento de <i>piping</i></i>	<i>64</i>
5.4.3	<i>Determinação dos valores de t_0 e t</i>	<i>65</i>
5.5	Aplicação do modelo de risco de <i>piping</i> com a abordagem probabilística utilizado a distribuição de Weibull.....	66
5.6	Protocolo de intervenção baseado no risco de <i>piping</i>	72
5.7	Conclusões parciais.....	73
6	ABORDAGEM FUZZY PARA QUANTIFICAÇÃO DO RISCO DE PIPING EM BARRAGENS DE TERRA UTILIZANDO UM CONTROLADOR MAMDANI	75
6.1	Fundamentação teórica sobre lógica <i>fuzzy</i>	75
6.1.1	<i>Conjuntos e números fuzzy</i>	<i>78</i>
6.1.2	<i>Variável linguística</i>	<i>82</i>
6.1.3	<i>Sistema de controle fuzzy.....</i>	<i>83</i>
6.2	Quantificação de risco de <i>piping</i> em barragens de terra por abordagem <i>fuzzy</i>	87
6.2.1	<i>Levantamento de dados</i>	<i>87</i>
6.2.2	<i>Definição e fuzzificação dos parâmetros de entrada do modelo</i>	<i>87</i>
6.2.3	<i>Definição e fuzzificação do risco de <i>piping</i></i>	<i>92</i>
6.2.4	<i>Previsão do risco de <i>piping</i> utilizando o operador fuzzy Mamdani</i>	<i>93</i>
6.3	Resultados do risco de <i>piping</i> para controlador Mamdani com 81 regras de inferência	96
6.4	Protocolo de intervenção baseado no risco de <i>piping</i>	102
6.5	Controlador Mamdani com 40 regras de inferência	104
6.6	Comparação entre a abordagem probabilística e a abordagem <i>fuzzy</i> com 81 regras de inferência	107
6.7	Conclusões parciais.....	110

7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	112
7.1	Conclusões	112
7.2	Sugestões para pesquisas futuras	114
	REFERÊNCIAS.....	115
	APÊNDICES	125
	APÊNDICE A – CADASTRO DAS INSPEÇÕES REALIZADAS NAS BARRAGENS UTILIZADAS NAS APLICAÇÕES DOS MODELOS.....	126
	APÊNDICE B – 81 REGRAS DE INFERÊNCIA USADAS NO MODELO DE QUANTIFICAÇÃO DE RISCO DE <i>PIPING</i> EM BARRAGENS DE TERRA .	133
	APÊNDICE C – VISÃO GERAL DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> NO <i>SOFTWARE</i> MATLAB.....	135

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados a motivação e a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho. São apresentados, ainda, o objetivo geral e os objetivos específicos que o trabalho busca atender, bem como a estrutura adotada para a organização da dissertação.

1.1 Motivação da pesquisa

Barragens são obras destinadas à contenção de corpos d'água, podendo ser constituídas por diversos materiais e utilizadas para diferentes finalidades, como: abastecimento, controle de enchentes, mineração, entre outras. Considerando a importância e a dimensão dessas grandes obras hídricas e a necessidade de fiscalização e auxílio aos proprietários, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instaurada pela Lei 12.334, veio salientar a relevância da execução de inspeções de rotina e avaliações de segurança, visando a manutenção e preservação da barragem e de todos os seus usos (Brasil, 2010).

O Brasil conta com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), introduzido pela Lei 12.334/2010, que mantém dados sobre a classificação de risco das barragens exigida no protocolo de segurança instaurado. A natureza qualitativa da classificação originada pela simples aplicação da metodologia descrita na Lei e na sua Resolução Nº 143/2012, do Ministério do Meio Ambiente, pode gerar problemas relacionados à correta apreciação da situação de risco do barramento, tendo em vista a dificuldade de estabelecer uma hierarquia de intervenção através da classificação qualitativa (Brasil, 2010, 2012; Gomes *et al.*, 2016a).

O protocolo instaurado fornece uma avaliação de risco que gera uma classificação qualitativa (alto, médio, baixo) para o mesmo. A análise de risco é baseada em critérios formais, de gestão e infraestrutura. Esse tipo amplo de avaliação de risco, quando inserida na tomada de decisões gerenciais, tanto pode diluir informações importantes como salientar itens de pertinência menor. Os critérios utilizados para hierarquização devem, portanto, facilitar a tomada de decisões sem que haja prejuízo na representação da realidade.

A própria Resolução Nº 143/2012, que define como o risco deve ser apreciado e classificado para aplicação na gestão de segurança de barragens, prevê a utilização, por parte dos proprietários de barragens, de critérios adicionais de avaliação do risco (Brasil, 2012). A

quantificação do risco surge, portanto, como uma alternativa, privilegiada pelo embasamento científico e legal, de suporte ao processo de tomada de decisões, atuando no auxílio a hierarquização dos cenários de risco.

Risco em barragens, entretanto, é um conceito, ou um conjunto de conceitos, que trazem uma infinidade de análises possíveis. Com o objetivo de viabilizar o desenvolvimento de uma ferramenta gerencial baseada no risco é preciso enquadrar o problema a um cenário específico, para que o modelo seja coerente com a realidade que deseja representar. Assim sendo, este trabalho evidencia a utilização do risco de ocorrência de *piping* em barragens de terra como recurso adicional ao protocolo gestão de segurança de barragens.

O *piping* é um processo de erosão interna que ocorre progressivamente nas barragens de terra, iniciado com o carreamento de partículas finas pela água. Tal fenômeno se inicia quando a força de percolação na região onde ocorre a saída da água no barramento (área de jusante) excede a resistência ao arraste das partículas do solo, sendo, portanto, função das condições de fluxo, da estrutura e características granulométricas do solo constituinte do barramento (Kovács, 1981; USBR, 1983; Terzaghi *et al.*, 1996; FEMA, 2011; Adams *et al.*, 2012; Lominé *et al.*, 2013; Liang *et al.*, 2013; Sharif *et al.*, 2015; FEMA, 2015; ICOLD, 2013, 2016).

Historicamente o *piping* se constituiu como uma das principais anomalias geradoras de incidentes e acidentes em barragens de terra (ICOLD, 2013). De acordo com um levantamento divulgado por Foster *et al.* (1998), realizado em um cadastro de 11.192 barragens, o *piping* foi responsável por quase metade das falhas verificadas em barragens de aterro, sendo 46,1% do total de falhas constatadas e 48,7% das falhas ocorridas durante a operação das barragens. Os resultados indicam que cerca de 1 em cada 200 barragens falham devido ao *piping* e 1 em cada 60 barragens experimentaram um incidente relacionado a presença de *piping* (FEMA, 2015). Caldeira (2008) salienta que este tipo de anomalia pode causar grande prejuízo a infraestrutura do barramento, comprometendo a estabilidade, o sistema de drenagem interna (se houver) e a segurança como um todo da obra e da região de jusante.

Neste contexto, a quantificação do risco de *piping* é de fundamental importância, para a classificação e avaliação do desempenho das estruturas dos barramentos, em especial, quando for constatada a necessidade de realização de uma intervenção corretiva nas mesmas. Por outro lado, é importante que esta quantificação do risco de *piping* leve em consideração as incertezas envolvidas em todo o processo de levantamento de informações de campo e dados para modelagem. Normalmente, a incerteza e a imprecisão surgem devido à falta de

conhecimento sobre o fenômeno estudado, à existência de informações incompletas, ou definição dos possíveis limites para os parâmetros de entrada de um certo modelo.

Este trabalho tem por objetivo propor duas metodologias para a avaliação do risco de *piping* em barragens de terra onde os efeitos das incertezas presentes nos parâmetros que governam o fenômeno sejam amenizados. Um dos modelos foi produzido utilizando uma abordagem probabilística enquanto o outro foi desenvolvido por meio de uma abordagem *fuzzy*.

A primeira metodologia se baseia na descrição de confiabilidade por meio da distribuição de probabilidade de Weibull, escolhida por sua capacidade de modelar diferentes cenários por meio da alteração de seus parâmetros de forma e escala (Meyer, 1983; Gnedenko e Ushakov, 1995; Kececioglu, 2002; Ross, 2010; Mengue e Sellitto, 2013; Carnaúba e Sellitto, 2013; Reis, 2017). A correta definição dos parâmetros para aplicação da metodologia configura a tarefa mais importante do processo, tendo em vista sua relevância no resultado da análise. Foram estabelecidas correlações entre os fatores que governam a formação de *piping* e os parâmetros responsáveis por descrever os cenários na distribuição de Weibull. Como parâmetros de entrada do modelo foram consideradas o percentual de preenchimento do reservatório, a susceptibilidade do solo constituinte da barragem ao desenvolvimento de *piping* e o desgaste natural da estrutura. Esse tipo de abordagem exige a segregação de todos os dados que insiram subjetividade, ou outro tipo de incerteza, no modelo.

A segunda metodologia propõe um modelo de quantificação de risco de *piping* utilizando conceitos advindos da lógica *fuzzy*. Os conjuntos *fuzzy* são ferramentas utilizadas para modelagem de fenômenos que envolvem sistemas reais complexos com a presença de parâmetros incertos, e utiliza implicações lógicas para descrever as relações entre os parâmetros de controle e o fenômeno físico analisado (Zadeh, 1965; Zimmermann, 2001, 2010; Talon *et al.*, 2014; Tsakiris e Spiliotis, 2014; Haghghi e Ayati, 2016). O desenvolvimento de modelos utilizando conjuntos *fuzzy* proporciona a diluição das incertezas e imprecisões dos dados de entrada na resposta final, produzindo um modelo mais robusto e coerente (Ganoullis, 1994). Como parâmetros de entrada do modelo foram consideradas a idade da barragem, a susceptibilidade do material constituinte do maciço ao *piping*, o percentual de acumulação de água do reservatório e o nível de deterioração do maciço. Utilizando-se um controlador *fuzzy* do tipo Mamdani foi possível a obtenção do risco de *piping* da barragem como um conjunto *fuzzy*.

Os modelos desenvolvidos surgem como complementos ao processo de classificação do risco dos barramentos exigido pela legislação vigente no Brasil, pois tentam

gerir a influência da subjetividade existente, principalmente, no levantamento de campo dos parâmetros de entrada nas respostas fornecidas. Para aplicação e validação das metodologias foram selecionadas cinco barragens do estado do Ceará, quais sejam: Cipoada, Itaúna, Jaburu I, Martinópolis e Quandú.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Quantificar e avaliar o risco de desenvolvimento de *piping* em barragens de terra através de abordagens probabilística e *fuzzy*, com intuito de usar o risco de *piping* como um indicador de suporte a tomada de decisões referentes a segurança das barragens.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta dissertação, podem ser citados:

- Desenvolver modelos de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra, através de abordagens probabilísticas e *fuzzy*, utilizando informações e dados já disponíveis ou de acesso viável;
- Avaliar o desempenho de cada um dos modelos propostos neste trabalho, verificando as suas adequações na representação dos cenários analisados e suas aplicabilidades no âmbito da gestão de segurança de barragens;
- Propor instrumentos de auxílio a tomada de decisões quanto a segurança de barragens com base nos modelos quantitativos desenvolvidos.

1.3 Metodologia para desenvolvimento do trabalho

Para elaborar os modelos de quantificação de risco em barragens foi preciso, inicialmente entender o conceito de risco e as suas nuances relevantes ao desenvolvimento de uma análise de risco. Para isso, foi realizada revisão na literatura sobre conceito de risco, risco geotécnico, aceitabilidade do risco, legislações que tratam sobre risco e desenvolvimento e aplicação de metodologias de quantificação de risco.

Compreendendo o risco como um conceito muito amplo, que precisa ser restringido para a possibilidade de quantificação, o trabalho foi direcionado à quantificação de

risco de *piping* em barragens de terra. As hipóteses levantadas delimitaram a análise do modelo possibilitando a consideração do *piping* como uma das maiores fontes geradoras de risco para uma barragem de terra. As características e mecanismos da formação e desenvolvimento do *piping* foram pesquisados, entendidos e descritos para obter uma melhor compreensão sobre a anomalia em si e sobre fatores que podem ter influência sobre a mesma.

O primeiro modelo, constituído por uma abordagem probabilística do problema, fornece uma previsão da progressão do risco. Foi utilizada a distribuição de probabilidade de Weibull, cujos parâmetros de forma (β), de escala (θ) e o tempo (t) foram responsáveis por traduzir para o modelo os dados referentes ao maciço, ao reservatório e a idade da barragem, respectivamente, para descrever o risco de *piping*.

Já no segundo modelo, desenvolvido utilizando os conceitos da lógica *fuzzy*, o risco é fruto de uma análise realizada por um sistema especialista, onde, além de consideradas as características do material do maciço, do reservatório e o tempo, também são utilizadas na análise a situação estrutural do maciço da barragem e a experiência do modelador. As características listadas são representadas no modelo na forma de variáveis linguísticas (idade da barragem, susceptibilidade do solo ao *piping*, percentual de acumulação do reservatório e nível de deterioração da barragem) que traduzem, por meio de conjuntos *fuzzy*, os intervalos de valores que cada dado pode assumir, considerando as incertezas pertinentes a obtenção e utilização dos mesmos.

A utilização dos dois modelos para quantificação do risco de *piping* nas barragens selecionadas gerou produtos de aplicabilidade viável no convívio com o risco e na gestão de segurança de barragens. A comparação dos resultados obtidos e das metodologias fornecem um vislumbre de suas possibilidades de emprego por parte dos proprietários de barragens na hierarquização da classificação de risco, destacando os casos mais graves, e nos procedimentos referentes a alocação de verbas e decisões gerenciais.

1.4 Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se estruturada em um total de seis capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral ao tema da dissertação, apresentando o problema abordado, a motivação para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos que se buscam satisfazer e a metodologia empregada.

O Capítulo 2 trata sobre risco. São apresentados, além do conceito de risco, definições e elucidações sobre o tratamento da apreciação do risco desde sua identificação até sua gestão. Neste capítulo também são descritos o panorama legal do risco em barragens no Brasil, as anomalias maiores geradoras de risco em barragens, em especial as de terra, e como é tratada a aceitabilidade do risco.

O Capítulo 3 discorre sobre as características e mecanismos de desenvolvimento da anomalia *piping* em barragens. São apresentados os processos referentes ao início e progressão da anomalia até a ruptura, as dificuldades na detecção do desenvolvimento de *piping* em uma barragem e os empecilhos na definição de uma hierarquia de prioridades de intervenção corretiva.

No Capítulo 4 são elencadas as cinco barragens utilizadas na aplicação das metodologias de quantificação do risco de *piping*. São apresentadas informações relevantes sobre as barragens, suas respectivas localizações geográficas no estado do Ceará e os quantitativos de anomalias relacionadas ao *piping* que cada barragem apresentou no período analisado.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento da metodologia de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra, para suporte a tomada de decisões gerenciais, por meio da aplicação da confiabilidade na distribuição de Weibull. Os conceitos de confiabilidade são, primeiramente, descritos, seguidos pela apresentação do modelo de confiabilidade para a distribuição de Weibull e, por fim, é apresentado o modelo probabilístico de quantificação do risco de *piping* em barragens de terra.

O Capítulo 6 trata sobre o desenvolvimento da metodologia de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra, para suporte a tomada de decisões gerenciais, através de um sistema de controle *fuzzy* do tipo Mamdani. Inicialmente são descritos todos os conceitos referentes ao entendimento necessário da lógica *fuzzy* para, então, apresentar o desenvolvimento do modelo, elaborado no software MATLAB, para quantificação do risco de *piping* em barragens de terra.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões estabelecidas com o desenvolvimento da dissertação, as considerações finais sobre os resultados obtidos e as recomendações para futuras pesquisas.

2 RISCO: DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES

Este capítulo aborda os conceitos e definições necessários ao entendimento do que é risco e de como ele pode ser utilizado como uma ferramenta de gestão na área de segurança de barragens. É apresentado, também, um panorama geral sobre legislações de risco vigentes no Brasil e, em específico, no âmbito da segurança de barragens com a Lei 12.334/2010 e a Resolução Nº 143/2012.

2.1 Conceito de risco

As civilizações e o meio ambiente são ameaçados por muitos perigos. Alguns são perigos naturais seculares como inundações, terremotos, etc., que têm consequências crescentes nas sociedades desenvolvidas. Outros são provocados pelo homem e resultam do progresso tecnológico nas Engenharias Civil, Química e Nuclear. As civilizações humanas tentam se proteger contra esses perigos depois que sua ocorrência mostra consequências ou quando os riscos são considerados elevados (Vrijling *et al.*, 1995).

Longe de um incômodo transitório, Jaeger *et al.* (2001) consideram que o risco é característico da condição humana, como tem sido desde o começo da existência. Apesar de estar continuamente presente, conceituar risco não é uma tarefa simples. A palavra risco está associada a vários significados nas mais diversas esferas da sociedade, onde a percepção pessoal é relevante na construção de uma concepção que identifica o conceito de risco. É consenso, todavia, que risco está ligado a situações as quais não se tem uma definição clara do que pode acontecer (incertezas), e que podem gerar alguma perda (perigo).

A noção de risco, para Kaplan e Garrick (1981), envolve incerteza e algum tipo de perda ou dano que pode ser recebido. Simbolicamente, isso pode ser representado como:

$$\text{RISCO} = \text{INCERTEZA} + \text{PERDA/DANO} \quad (2.1)$$

Jaeger *et al.* (2001) definem risco como uma situação ou evento em que algo de valor humano (incluindo os próprios seres humanos) foi colocado em jogo e onde o resultado é incerto. Vrijling *et al.* (1995) caracterizam risco como parte do julgamento que as pessoas têm quando pensam em atividades que são perigosas em alguns aspectos, como viver ao lado de uma fábrica de produtos químicos, voar ou dirigir uma motocicleta. Tais julgamentos de

cenários adversos improváveis, mas imagináveis, são subjetivos e, em muitos casos, contraditórios aos fatos estatísticos, mas formam a base da aceitação.

Para Melo (2014), devido à polissemia do termo risco, empregado em vários campos de conhecimento, é importante a discussão de que ele pode remeter preliminarmente a duas definições na terminologia presente, as quais devem ser distinguidas. A primeira definição se refere a uma condição com potencial de gerar um dano, ou seja, a uma condição perigosa (com caráter de incerteza). A outra abordagem possível é quando se trata, de modo geral, do processo de identificação de riscos, que representa a determinação do que pode dar errado, por que e como.

Risco pode ser entendido como uma característica capaz de assumir aspectos qualitativos e quantitativos. A conotação qualitativa é percebida quando se assume que o conceito de risco se refere a uma sensação de insegurança relacionada a um determinado cenário. Já a conotação quantitativa é evidenciada quando se analisa o risco em busca de descobrir a possibilidade de algum evento ocorrer e que tipo de consequências ele pode gerar. O risco quantificado é de grande valia em análises de desempenho e situação de sistemas presentes nas mais diversas áreas.

Kaplan e Garrick (1981) afirmam que analisar o risco consiste em responder três perguntas: O que pode acontecer? Qual a probabilidade de isso acontecer? E se acontecer, quais as consequências? Para responder a essas perguntas é necessário estabelecer uma lista de resultados ou cenários possíveis.

O risco, como ilustrado na Figura 2.1, pode ser entendido como um conjunto de três partes: os cenários geradores de risco, as probabilidades de concretização desses cenários e as consequências relativas a cada resultado previsto.

Figura 2.1 – Ilustração do conceito de risco como um conjunto de três partes.



Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2018).

Transportando a ideia ilustrada na Figura 2.1 para aplicação em sistemas de Engenharia, é possível associar o risco, de acordo com Gomes *et al.* (2016b), à incapacidade de os elementos do sistema exercer suas funções com a eficiência requerida, sendo representativo das incertezas relacionadas ao processo de funcionamento do sistema em questão e às influências e consequências agregadas a essas incertezas.

2.2 Risco geotécnico e segurança de barragens

O risco atraiu o interesse da comunidade geotécnica em razão da ocorrência de desastres naturais e em obras de Engenharia. Ao mesmo tempo, também está crescendo o interesse da engenharia em geral sobre o tema, quando exigem aos projetistas a indicação de informações quantitativas a respeito dos riscos relacionados a terremotos, deslizamentos, falhas em geoestruturas etc. (Araújo, 2013).

É notável, a partir de meados do século XX, o aumento da preocupação com análises de risco na geotecnia. No caso especial das barragens, o grande número de acidentes constatados durante o século passado ligou o alerta em relação a imperatividade de avaliar periodicamente a situação das barragens, utilizando o risco como um indicador utilizado no planejamento e gestão (Caldeira, 2008; ICOLD, 2013; ICOLD, 2016).

Para Afonso *et al.* (2015), barragens sempre possuem um risco efetivo de falha, especialmente quando, a jusante, existem pessoas vivendo, propriedades relevantes ou zonas de valor ambiental. Assim, medidas apropriadas devem ser adotadas, no que diz respeito ao projeto, construção e operação de barragens, para garantir que o risco residual associado seja mantido muito baixo durante toda a vida útil das obras.

Segundo Gomes *et al.* (2016a, 2016b), no âmbito geotécnico, onde há ocorrência de desastres originados por falhas, o risco é utilizado como ferramenta de classificação e advertência para defeitos em estruturas geotécnicas, originadas por atuação de mecanismos naturais ou artificiais.

A Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ISSMGE (2004) e a Comissão Internacional de Grandes Barragens – ICOLD (2005) compactuam com o risco sendo definido como a medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso à vida, saúde, propriedade ou o ambiente. Considerando o quadro geral de segurança de barragens, o risco pode ser definido, de acordo com Adamo *et al.* (2017), como

a medida da probabilidade de ocorrência de uma condição adversa e a gravidade das consequências de tal condição.

Devido à convivência constante das barragens com o risco, é evidenciada a importância de criar um sistema que ajude a embasar e fomentar as decisões gerenciais que devem ser tomadas sobre a manutenção e preservação desses empreendimentos. A utilização do risco de falha da estrutura na gestão de segurança de barragens deve abranger, portanto, uma metodologia capaz de quantificá-lo confiavelmente.

2.2.1 Análise de risco de falha em barragens

Uma análise de riscos, como afirma Santos (2006), consiste na utilização de um conjunto de informação disponíveis para estimar os riscos relativos a indivíduos ou a populações, a bens ou ao ambiente, devido a perigos. Para Kaplan e Garrick (1981), o propósito da análise de risco é sempre fornecer insumo para um problema de decisão subjacente que envolve não apenas riscos, mas também outras formas de custos e benefícios.

Para Santos (2006), a análise de riscos incorpora a identificação dos eventos indesejáveis que conduzem à materialização dos riscos, e a análise dos mecanismos pelos quais esses eventos podem acontecer e a estimação da extensão, da amplitude e da probabilidade de concretização dos efeitos dos perigos. O objetivo final das análises de riscos é a determinação das probabilidades das consequências, assim como da sua grandeza. Trata-se de um artifício capaz de permitir tornar os sistemas mais confiáveis. Santos (2006) ainda enfatiza que análises de riscos podem ter um largo campo de aplicação, atravessando todas as fases de desenvolvimento de uma determinada obra

Em relação a barragens, Slunga (2001) afirma que uma análise de risco envolve a desagregação, ou decomposição, do sistema de barragens e fontes de risco em suas partes fundamentais. Conforme afirma ICOLD (2005), o processo de análise de risco envolve a caracterização científica do que é conhecido e o que é incerto sobre o desempenho presente e futuro do sistema de barragens em análise.

Caldeira (2008) apresenta uma divisão da análise de risco em qualitativa e quantitativa. No primeiro tipo se usam formas, descritivas ou escalas de ordenação numérica, para caracterizar a grandeza dos potenciais eventos adversos e suas consequências. Já as análises quantitativas são baseadas em valores probabilísticos.

Para Melo (2014), ambas as análises (qualitativa e quantitativa), de aplicações recentes em barragens, apresentam limitações importantes. Enquanto as qualitativas tendem a

ser subjetivas, as quantitativas ainda se apresentam de aplicação restrita na área de barragens em virtude da dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas no processo.

As análises de risco qualitativas são o primeiro passo na direção de uma correta apreciação do risco. Entretanto, esse tipo de análise dificulta o entendimento dos cenários de risco, tendo em vista que a classificação qualitativa (alto, médio, baixo, grande, pequeno, insignificante) impossibilita a ponderação de prioridades, dentro de um mesmo grupo.

Já as análises quantitativas são caracterizadas pela complementação do conceito trazido na análise qualitativa. A quantificação é uma representação de quão alto, ou quão baixo, é o risco, traduzindo o conceito em parâmetro, permitindo a hierarquização e ponderação de prioridades.

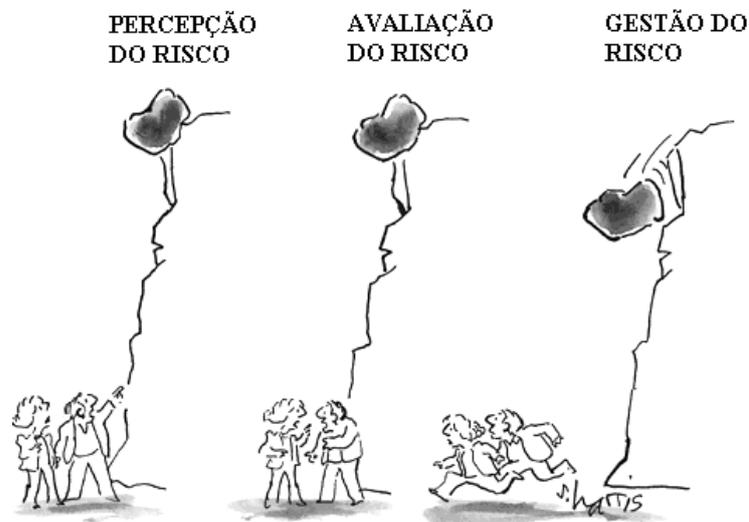
Devido à importância das barragens em diversas áreas, destacando-se no convívio com a seca no semiárido brasileiro, e a grande ocorrência de cenários produtores de risco a essas estruturas é singular que haja compromisso com o desenvolvimento ininterrupto das análises de risco realizadas nas barragens. Um grande avanço foi dado, no Brasil, com a elaboração de normas sobre risco em geral e, no caso especial das barragens, da Lei 12.334/2010, a Lei de Segurança de Barragens (Brasil, 2010).

2.2.2 Gestão de risco em barragens

Os processos de gestão de riscos consistem na aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão, às tarefas de identificação, de avaliação, de mitigação e de controle de riscos. Englobam também a realização de análises custo-benefício das medidas que promovem a redução do risco (Santos, 2006).

A Figura 2.2 ilustra o processo de apreciação e gestão do risco, compreendendo uma análise em três partes: a percepção, a avaliação e, por fim, a gestão do risco. A etapa de percepção compreende a identificação de um risco iminente a sobrevivência de indivíduo, ao bom funcionamento de sistema ou a integridade de algum componente de um processo. Na etapa seguinte, de avaliação, os cenários gerados a partir da identificação do risco são mensurados e analisados para desenvolver uma resposta para atuação direta sobre a fonte geradora de risco ou no controle dos possíveis danos previstos. Essa resposta é colocada em prática na terceira etapa, de gestão do risco.

Figura 2.2 – Apreciação e gestão de risco quanto a sobrevivência de indivíduos.



Fonte: Adaptado de Harris (2018).

A gestão de riscos, segundo Adamo *et al.* (2017), começou a mostrar seu valor como uma ferramenta forte para a avaliação e estimativa de riscos, podendo servir como uma base sólida para a tomada de decisões, especialmente quando se trata de decisões de segurança e otimização da alocação de recursos humanos, tecnológicos ou financeiros.

Os conceitos atuais de gestão de risco, como afirma Melo (2014), têm origem nas fortes demandas da sociedade por responsabilidade e transparência na tomada de decisões de interesse geral da população. No campo da engenharia de barragens, essa preocupação tem se tornado de interesse vital para a comunidade, tendo em vista as consequências de uma ruptura de barragem sobre os interesses da população em geral.

Hoje, a sociedade exige um aumento nos níveis de segurança e confiabilidade de infraestruturas consideradas essenciais. As estratégias globais de gestão de riscos ganharam muita importância nos últimos anos e os esforços realizados para implementá-las já incluem aspectos como sustentabilidade, resiliência e participação pública. Neste contexto, a Análise de risco significou uma mudança de paradigma que permitiu avançar na avaliação e gestão dos riscos de inundação, bem como todos os outros riscos que podem, afinal, afetar as pessoas, o meio ambiente e o desenvolvimento humano (SPANCOLD, 2012).

A gestão de risco em barragens no Brasil é governada pelo protocolo instaurado pela PNSB, instrumentada através do Plano de Segurança da Barragem que determina a periodicidade das vistorias, a qualificação dos responsáveis, entre outras coisas. Seu objetivo é fornecer ao proprietário, responsável pela segurança da barragem, auxílio em relação a

gestão do barramento, através de informações e dados relevantes desde o projeto até a operação do empreendimento.

A integração de análises e avaliações complementares de risco em barragens é um passo importante na busca do desenvolvimento e aprimoramento de um sistema de gestão que seja condizente e coerente com a realidade estrutural dos órgãos gestores e com importância dessas estruturas hídricas para a população, em especial, no convívio com a seca. Esse tipo de aplicação deve, entretanto, ser cientificamente e legalmente estruturada. A próxima seção é dedicada, portanto, a dissertar melhor sobre o panorama legal em relação ao risco em barragens no Brasil.

2.2.3 Panorama legal do risco em barragens no Brasil

No Brasil, a norma brasileira NBR ISO 31000/2009 – Gestão de riscos: princípios e diretrizes, traz os conceitos e orientações que conceituam risco e sua gestão no âmbito legal. É uma visão inicial e generalista do risco como um aspecto pertinente a cada sistema, relação ou cenário. As particularidades de cada situação definem a maneira como o risco deve ser apreciado.

Na esfera da segurança de barragens, no ano de 2010, foi dado um grande avanço em relação a consideração do risco como um indicador de gestão, por meio da Lei de Segurança de Barragens, Lei nº 12.334/2010, que definiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Como parte da PNSB foi criado o Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNISB). De forma simplificada, como afirma Gomes *et al.* (2016a, 2016b), o protocolo do SNISB se inicia com inspeções na infraestrutura de barramentos e, finaliza com intervenções para recuperação, quando é o caso.

As inspeções são realizadas através da aplicação de um *check list* que abrange as anomalias (erosões, fugas d'água, tocas de animais, entre outras) pertinentes a cada componente da barragem. Além de identificar a anomalia, o vistoriador é responsável por definir uma magnitude (insignificante, pequena, média ou grande) para a mesma. Com o relatório da inspeção de campo e a metodologia presente na matriz de risco e dano proposta da Resolução nº 143/2012, é estabelecida uma classificação para o risco (qualitativa), em Baixo, Médio ou Alto (Brasil, 2002).

Para ICOLD (2005), a análise de risco em barragens é um processo estruturado destinado a estimar tanto a probabilidade de falha dos componentes da barragem quanto da

extensão das consequências da falha. Isso implica que o risco qualitativo não é capaz de prover uma avaliação completa e precisa da situação de risco da barragem, tendo em vista que ela não traduz o risco de forma íntegra, impedido a diferenciação entre barragens que possuem a mesma classificação.

Como exemplo da incompletude presente no risco qualitativo, considere que um gestor possui três barragens classificadas com risco alto, porém os recursos disponíveis só lhe permitem intervir em uma. Com esse nível de informação é impossível definir, com um embasamento técnico consistente, que barragem deve receber o insumo para a intervenção.

De acordo com o que afirmam Kaplan e Garrick (1981), o conceito de risco deve ser sempre considerado dentro de um contexto da teoria de decisão. Considerando o cenário descrito, nota-se que o processo de tomada de decisão e, conseqüentemente, todo o aparato de gestão das barragens pode ser comprometido, pois o risco, que deveria atuar como uma ferramenta de suporte às decisões, não é capaz de ser apreciado de forma completa e correta. Não é possível, portanto, estabelecer uma hierarquia clara de intervenção, tornando a decisão tomada com base no risco qualitativo frágil e bastante susceptível a falhas.

É conveniente que, além de coerente, o processo de tomada de decisões gerenciais em barragens seja facilitado, mas ainda precisamente embasado. A própria Resolução nº 143/2012 permite ao fiscalizador adotar critérios complementares, devidamente justificados, para classificar o risco (Brasil, 2012).

A alternativa para tornar o risco um robusto e importante indicador na gestão de segurança de barragens se apresenta através da quantificação (ICOLD, 2005; Santos, 2006; Caldeira, 2008; Melo, 2014). O risco quantificado deve ser capaz de gerenciar as incertezas e imprecisões utilizando uma abordagem matemática capaz de fornecer um valor para o risco, viabilizando a execução de uma hierarquização coerente e clara das prioridades de intervenção.

2.2.4 Principais anomalias geradoras de risco em barragens de terra

Há uma considerável quantidade de tipos e destinações para barragens, assim como há as anomalias características e de maior pertinência a cada tipo. As anomalias que geram o maior número de incidentes e acidentes em barragens de terra são as erosões e os deslizamentos (ICOLD, 2013, 2016). No grupo das erosões estão inseridos os acidentes e incidentes gerados por galgamento da barragem e por erosão interna (*piping*). Já o grupo dos

deslizamentos é composto por falhas devido as nuances do comportamento estático dos taludes e devido a fenômenos sísmicos.

De acordo ICOLD (2013), 94% dos incidentes em barragens de terra ocorrem devido a erosões, baseado no histórico de incidentes registrados em barragens até o ano de 2000. Desses 94%, 46% são associados à erosão interna. Esses dados são importantes para enfatizar a relevância dos mecanismos de erosão à segurança da barragem.

Os mecanismos de desenvolvimento do *piping* bem como outras informações relevantes a elaboração de metodologias e modelos de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra são explanados no próximo capítulo. Antes, porém, é preciso entender sobre aceitabilidade do risco, assunto tratado na próxima seção.

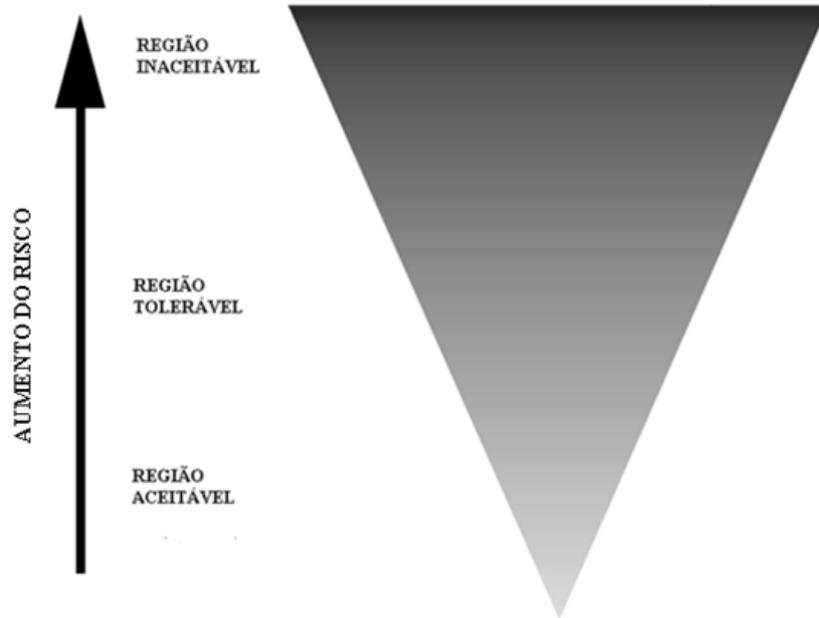
2.3 Aceitabilidade do risco

Para realização de uma correta e coerente avaliação do risco é imperativo que haja o estabelecimento dos níveis de aceitabilidade do risco. Isso implica na definição dos limites que categorizam o risco em aceitável, tolerável ou inaceitável. Esses limites estão diretamente ligados a protocolos de gestão e ao processo de tomada de decisões.

Kalinina *et al.* (2016) afirmam que a avaliação é feita comparando o risco aos limites de risco. Normalmente, dois limites podem ser distinguidos: um limite de aceitabilidade e um limite de tolerância. O limite de aceitabilidade denota um limite de onde surgem ressalvas em relação a aceitação do risco como válido e é sempre menor que o limite de tolerância, responsável por delimitar a região onde assumir o risco não é mais conveniente.

Os limites de aceitabilidade e tolerância são responsáveis por dividir todo o escopo do risco de um sistema em três partes: a parte onde o risco é aceitável, a parte onde é tolerável e a parte onde é inaceitável. A Figura 2.3 ilustra a divisão das regiões de risco através da estrutura de aceitabilidade. No contexto apresentado, como afirma HSE (2001), "tolerável" não significa "aceitável". Refere-se, em vez disso, a uma disposição da sociedade como um todo para conviver com um risco, de modo a garantir certos benefícios e na confiança de que o risco é válido e que está sendo controlado adequadamente. No entanto, isso não implica que o risco seja aceitável para todos, ou seja, que todos concordam, sem reservas, em assumir o risco ou impô-lo.

Figura 2.3 – Estrutura de aceitabilidade do risco.



Fonte: Adaptado de HSE (2001).

Para Santos (2006), risco aceitável é aquele que pode ser aceito pelos indivíduos ou pela sociedade eventualmente afetados, admitindo que não há alterações nos mecanismos de controle do risco. Este risco é considerado insignificante e adequadamente controlado. Já os riscos toleráveis são aqueles que se enquadram dentro de uma gama que a sociedade pode aceitar de forma a assegurar determinados benefícios. É uma gama de riscos que não devem ser vistos como negligenciáveis ou ignoráveis, mas que, pelo contrário, devem ser mantidos sob revisão e reduzidos como for possível. Ocorrem quando o risco está abaixo do limite de aceitabilidade.

Riscos inaceitáveis são relativamente mais fáceis de conceituar e identificar. Pode-se dizer que o risco se torna inaceitável quando não é mais possível, para a sociedade e as pessoas afetadas, conviver com ele sem a execução de uma proeminente intervenção corretiva. Os riscos inaceitáveis ocorrem, portanto, quando o risco não é mais tolerável, ou seja, está abaixo do limite de tolerabilidade.

De acordo com Slunga (2001), a aceitabilidade de riscos é acoplada à avaliação de redução de risco e é uma base para decidir qual risco residual será aceito para a comunidade e estruturas afetadas. Os fatores de segurança recomendados pelos guias gerais de projeto para os trabalhos de engenharia e as informações de apoio e recomendações de analistas de risco e engenheiros fornecem insumos importantes, mas são os tomadores de decisão que finalmente

fazem a escolha. Às vezes há diferenças entre o que é considerado tolerável para estruturas existentes e o que é necessário para novas estruturas.

A utilização do risco como um indicador de gestão traz grandes benefícios, mas possui aspectos onde se sobressaem a experiência e a visão dos responsáveis por apreciá-lo e categorizá-lo. Como afirma HSE (2001), o processo é inerentemente complexo, com uma variedade de entradas. Tem de ser praticável, permitindo o uso de julgamento pelo regulador e a flexibilidade para os detentores dos deveres. Ao mesmo tempo, deve refletir os valores da sociedade em geral sobre os riscos que são inaceitáveis, toleráveis ou aceitáveis.

3 EROSÃO INTERNA (*PIPING*) EM BARRAGENS DE TERRA

Este capítulo apresenta as definições e mecanismos envolvidos no desenvolvimento de erosão interna (*piping*) em barragens de terra. Os conceitos apresentados embasam a elaboração das metodologias de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra, principalmente no que se referem à definição dos parâmetros de entrada do modelo.

3.1 Definição de erosão interna (*piping*)

A erosão interna é uma das principais causas de falhas nas barragens e de incidentes que ameaçam a segurança das barragens. A maioria das falhas por erosões internas ocorrem no primeiro enchimento, uma vez que as fragilidades na barragem ou sua fundação são evidenciadas pelo aumento do nível da água. Esse tipo de anomalia pode ocorrer no maciço, na fundação ou, do maciço para a fundação (USBR, 1983; Foster e Fell, 1999; FEMA, 2011; ICOLD, 2013; FEMA, 2015).

A erosão interna, sendo a causa mais comum de falha em barragens de aterro, pode ocorrer pela elevação dos gradientes hidráulicos, quando o reservatório se encontra nos maiores níveis de operação, aplicando ao maciço de solo a carga hidráulica máxima. As poropressões geradas atuam contra a resistência dos materiais da estrutura da barragem. A erosão interna também pode ocorrer como resultado de defeitos estruturais, como rachaduras e outras zonas instáveis formadas durante a construção, um terremoto ou mesmo durante a condição de operação normal de uma barragem (Fell *et al.*, 2003; Ferdos, 2016).

Quando as partículas do solo dentro de uma barragem de aterro, ou de sua fundação, são transportadas para jusante pelo fluxo de percolação, é caracterizada a erosão interna. O início do processo ocorre quando as forças resistentes à erosão são menores que as forças de percolação que tendem a produzi-la, de tal forma que as partículas do solo são separadas e transportadas com o fluxo de água. A partir do carreamento do material, a anomalia resultante, o tubo erodido, recebe a denominação de *piping* (USBR, 1983; Foster e Fell, 1999; Fell *et al.*, 2003; Berrones e Acosta, 2011; FEMA, 2011; ICOLD, 2013; FEMA, 2015).

A anomalia *piping* é fruto de um processo erosivo de carreamento de material em uma barragem. É um desdobramento de uma erosão interna regressiva, que inicia em jusante e caminha para montante dentro da barragem, caracterizado pela formação de tubos (*pipes*) à medida que o material constituinte da barragem vai sendo carregado pela água, podendo gerar

uma brecha e a consequente ruptura da barragem. A Figura 3.1 exemplifica uma ruptura de barragem devido ao *piping*.



De acordo com Fell *et al.* (2003), muitos proprietários de barragens dependem fortemente da vigilância e do monitoramento das poropressões e infiltrações para alertar sobre possíveis problemas de erosão interna e *piping* em muitas barragens mais antigas que não possuem filtros projetados e construídos para controlar a erosão interna. A erosão interna, segundo Berrones e Acosta (2011), inicia em qualquer ponto da região de jusante da barragem, definida pela ação do fluxo da água, propagando-se regressivamente em direção ao reservatório, aumentando gradativamente o tubo dentro na estrutura até gerar uma brecha que resulta na ruptura da barragem.

Para Ferdos (2016), a susceptibilidade a falhas por erosão interna tem origem na natureza dos processos de formação da mesma, que podem evoluir sob condições específicas e ocorrem de forma oculta dentro do corpo da barragem ou de sua fundação. Isso torna o processo de erosão camuflado até que tenha progredido o suficiente para ser visível como buracos na superfície da estrutura ou detectados por instrumentos de monitoramento de barragens.

Apesar de ser amplamente detectado nos primeiros enchimentos do reservatório, o *piping* pode ocorrer em qualquer estágio da vida útil da barragem. Essa anomalia é, portanto, de grande relevância aos proprietários e gestores de barragens em relação ao gerenciamento e a administração das mesmas (Fell *et al.*, 2003; Caldeira, 2008; ICOLD, 2013, 2016; Ferdos, 2016).

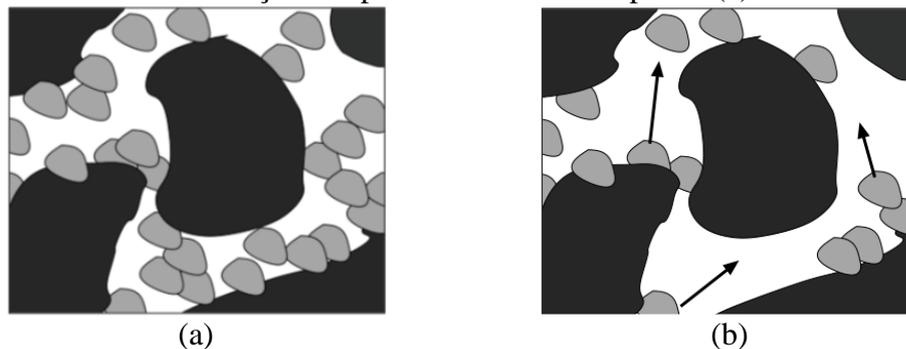
Em barragens de terra o *piping* é uma das principais fontes de risco a segurança dos barramentos. A detecção, monitoramento e correta apreciação dessa anomalia são imprescindíveis, tendo em vista a velocidade e impacto que um acidente gerado por *piping* é capaz de efetuar. Uma forma de melhor compreender e analisar o risco que o *piping* traz a um

barramento é através da quantificação, que possibilita uma melhor e mais ampla apreciação do problema.

3.2 Mecanismo de formação do *piping*

O desenvolvimento da anomalia *piping* em uma barragem de terra está diretamente relacionado à mobilidade das partículas de solo. Alguns aspectos são determinantes em relação a mobilidade. O requisito básico necessário para uma partícula se tornar móvel é que a força de arraste deve ser maior que as forças que seguram a partícula dentro do solo, de modo que o grão possa se desprender de seu material de origem (Kovács, 1981; USBR, 1983; FEMA, 2011; Hunter, 2012). A Figura 3.2 ilustra o desprendimento e movimentação das partículas em uma massa de solo.

Figura 3.2 – Movimentação das partículas no solo: repouso (a) e movimento (b).



Fonte: Rosenbrand (2011).

Como apresentado na Figura 3.2, as partículas menores, e mais finas, apresentam maior vulnerabilidade, ou menor resistência à movimentação. Hunter (2012) afirma que as forças de resistência ao arraste dependem da coesão, do efeito de intertravamento e do peso das partículas do solo. Quando a resistência ao arraste é superada, a partícula se moverá ao longo de um caminho que é predeterminado pela estrutura interna da camada (se o espaço vazio permitir).

A natureza do solo na barragem determina sua vulnerabilidade à erosão (Sherard *et al.*, 1963; Kovács, 1981; Foster e Fell, 1999; ICOLD, 2013). Três classes de solos devem ser distinguidas em relação a sua baixa capacidade de resistir ao processo erosivo: solos não-plásticos, solos plásticos e solos dispersivos.

Solos não plásticos (sem coesão), como siltes e areias, podem entrar em colapso quando saturados sob inundação, não são capazes de manter uma rachadura quando saturados

e são relativamente fáceis de serem erodidos. À medida que sua granulometria aumenta, exigem, progressivamente, mais energia para iniciar a erosão (Sherard *et al.*, 1963; Kovács, 1981; FEMA, 2011). Solos plásticos (coesivos), como argilas, areias argilosas e pedregulhos argilo-arenosos, são geralmente mais resistentes à erosão do que solos sem coesão (Sherard *et al.*, 1963; Kovács, 1981; FEMA, 2011). Dentre os solos plásticos, destacam-se, ainda, os solos dispersivos (argilas), nos quais a química da água causa dispersão (desfloculação) dos flocos de argila, dividindo-os em partículas menores, facilmente erodidas.

O deslocamento das partículas menores e mais finas, que apresentam menor resistência ao movimento, cria zonas de maior porosidade e permeabilidade dentro da massa de solo, causando o aumento do fluxo de água, da força de arraste atuando sobre o solo constituinte do maciço e, conseqüentemente, ampliando a erosão. Pode-se concluir que os solos finos e não coesivos apresentam maior susceptibilidade ao carreamento e, portanto, maior susceptibilidade ao desenvolvimento de *piping*.

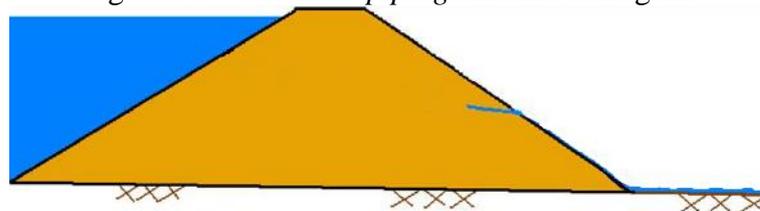
Para um melhor entendimento do processo de formação do *piping*, o processo de desenvolvimento pode ser dividido, segundo Foster e Fell (1999), Fell *et al.* (2003), Wan e Fell (2004), ICOLD (2013), FEMA (2015) e Wang *et al.* (2016), em quatro fases: início, continuação, progressão para formação do tubo (*pipe*) e formação de uma brecha.

3.2.1 Início da erosão

O processo erosivo se inicia a partir de algum evento externo ou aspecto estrutural da barragem que propicie, ou amplifique o arraste das partículas de solo constituintes do maciço. Pode ocorrer devido a falhas no solo, que podem resultar de má compactação e recalques, de fluxos no lado de jusante do núcleo da barragem ou fundação, ou de um fluxo concentrado através do núcleo (Hunter, 2012; FEMA, 2015).

A água, como um material incompressível, infiltra a partir da região a montante, umedece o maciço e começa a buscar caminhos que a conduza a zonas de menor pressão, os chamados caminhos de percolação. No percurso, quando o fluxo apresenta grande velocidade e força de arraste, o solo da barragem é saturado e os finos carreados pelo fluxo. Na saída à jusante, quando a força de percolação é superior a força resistente do material, se inicia a erosão. Essa erosão se desenvolve regressivamente, dirigindo-se de jusante para montante, como apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Início de *piping* em uma barragem.



Fonte: Adaptado de USACE (2014).

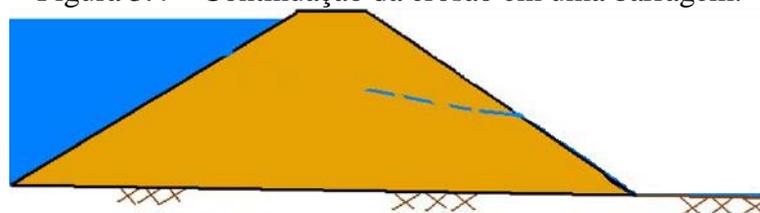
Para Berrones e Acosta (2011), como a infiltração através de uma estrutura de terra não é uniforme, o fenômeno da erosão se acentua onde existe uma concentração de fluxo e velocidade da água. Após o início do processo erosivo, se mantidas as condições favoráveis a seu desenvolvimento, a tendência é o seguimento e ampliação da erosão.

3.2.2 Continuação da erosão

A continuação da erosão é a fase governada pela relação entre a distribuição do tamanho de partícula do solo-base (o núcleo central da barragem) e os materiais filtrantes. Essa interação determinará se a erosão progredirá ou cessará (Fell *et al.*, 2003; Hunter, 2012).

Já Anderson e Ferguson (2015) caracterizam o estágio de continuação da erosão como a porção do mecanismo de *piping* onde o processo erosivo é governado pelo descolamento e transporte das partículas de solo. Ferguson *et al.* (2014) afirmam que a continuação começa imediatamente após o início da erosão e dura o período em que o tubo permanece relativamente pequeno. Neste estágio, a taxa de desenvolvimento e o tamanho da erosão são controlados pela erodibilidade, gradientes e a permeabilidade do material onde a erosão está ocorrendo (Kovács, 1981; Fell *et al.*, 2003; Ferguson *et al.*, 2014; FEMA, 2015). A Figura 3.4 ilustra a continuação do processo erosivo.

Figura 3.4 – Continuação da erosão em uma barragem.



Fonte: Adaptado de USACE (2014).

Em barragens de terra mais antigas, construídas quando não era prática comum a execução de sistemas de drenagem interna (SDI), a evolução da erosão é governada,

prioritariamente, pelas condições de carregamento da barragem e pelo material constituinte do maciço (FEMA, 2011; ICOLD, 2013, 2016). O nível do reservatório fornece as condicionantes hidráulicas para a evolução ou interrupção do processo erosivo. O material do maciço impõe os aspectos relevantes ao prosseguimento da erosão. Vale-se salientar que, nesse estágio, ainda pode ser muito difícil detectar que está se formando *piping* na barragem.

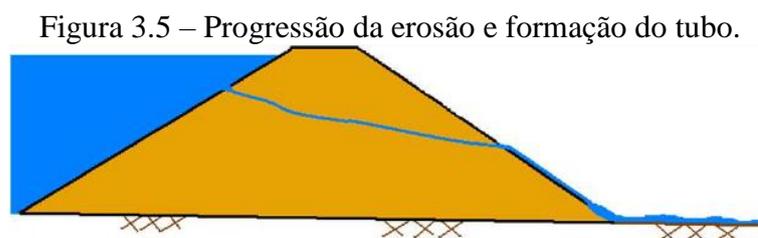
Em relação aos solos que compõem os maciços de barragens de terra é importante salientar que é pertinente aos solos coesivos, devido a plasticidade, uma característica de cicatrização capaz de fechar as paredes das zonas erodidas. Já em solos não coesivos o rearranjo das partículas do solo após o início do carregamento da fração mais fina tende a formação de estruturas de suporte à erosão, possibilitando a origem e ampliação dos tubos (*pipes*).

Com a manutenção das condicionantes que proporcionam a continuação do processo erosivo dentro da barragem, dá-se início a progressão da erosão, unindo os trechos já desgastados, formando os tubos que caracterizam a anomalia *piping*.

3.2.3 Progressão da erosão para formação do tubo (*pipe*)

Quanto ao prosseguimento da erosão, o processo erosivo se estende para montante do ponto de iniciação e uma rede de pequenos tubos se forma no solo ou aterro. Quando esses pequenos tubos se unem e atingem o reservatório ou rio, um tubo maior se forma, caracterizando a anomalia *piping* (ICOLD, 2013; FEMA, 2015).

Para Hunter (2012), a progressão é onde as tensões hidráulicas no solo podem, ou não, levar ao aumento do tubo. Durante esta fase, as poropressões e a infiltração aumentam. Van Beek (2015) salienta que o início do tubo é impulsionado pela concentração de linhas de fluxo perto da saída, enquanto a progressão do tubo é determinada pelos processos dentro e ao redor do tubo. A Figura 3.5 apresenta o estágio de progressão da erosão e formação do tubo, caracterizando o *piping*.



Fonte: USACE (2014).

Diversos fatores determinam o comportamento do tubo. Esses fatores são baseados no tipo de solo, resistência do solo ao arraste, coesão e taxas de infiltração de água. A progressão do tubo pode ser demarcada por zonas a montante que limitam o fluxo de água, e também por zonas de baixa permeabilidade ao longo do aterro (Sherard *et al.*, 1963; Kovács, 1981; USBR, 1983; Foster e Fell, 1999; Fell *et al.*, 2003; Hunter, 2012; FEMA, 2015).

Com a formação do tubo, o fluxo de água tende a se amplificar, a velocidade de passagem da água aumenta gerando uma força de arraste e, conseqüentemente, um maior carreamento de material. A expansão da erosão pode acarretar, em estágios mais avançados, na abertura de uma brecha capaz de levar a barragem ao colapso generalizado.

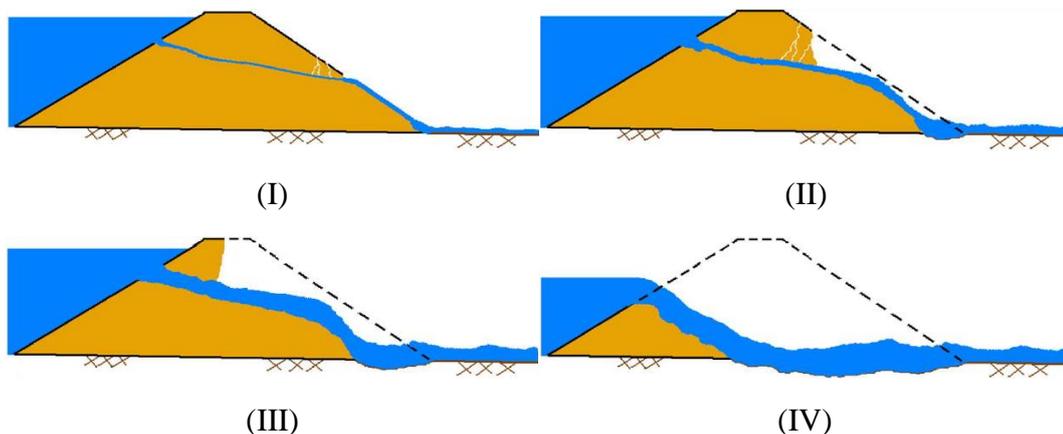
3.2.4 Abertura da brecha

Pimenta Filho (2013) define o a abertura da brecha como o estágio no qual eflui uma vazão descontrolada do reservatório e não se tem mais controle sobre a ruptura. Até esta etapa do *piping*, geralmente todas as intervenções possíveis já devem ter sido efetuadas.

ICOLD (2016) ressalta que uma vez iniciado, o *piping* pode ser interrompido por algum tipo de ação de filtragem, mas se isso não ocorrer, a progressão para a ruptura pode ser rápida, particularmente se o nível da água for maior que o nível crítico de água que gera forças hidráulicas suficiente para iniciar a erosão.

O processo de abertura da brecha é o estágio onde a reversibilidade ou redução da erosão não é mais possível. Os esforços devem ser direcionados a notificação das áreas afetadas por um acidente iminente e gerenciamento dos recursos para minimizar impactos socioeconômicos e ambientais. A Figura 3.6 apresenta o processo de abertura e crescimento da brecha até a ruptura da barragem.

Figura 3.6 – Abertura e crescimento da brecha até a ruptura da barragem.



Fonte: USACE (2014).

A brecha pode se formar a partir de um ou mais mecanismos de desdobramento do *piping* no interior da barragem. Os principais são: proeminente alargamento do tubo; galgamento da barragem devido a um abatimento por recalque da crista; fluxo excessivo no talude de jusante; estabilização do talude de jusante.

Em se tratando de barragens de terra, inclusive as que apresentam filtro, o mecanismo de abertura de brecha mais comum é o alargamento acentuado do tubo (*pipe*). É importante ressaltar que a abertura da brecha pode ser resultado da ação de mais de um mecanismo, dependendo diretamente das condições de contorno, do ambiente e das propriedades do material da barragem. A presença de mais de um mecanismo pode aumentar a velocidade de abertura da brecha e, conseqüentemente, reduzir o tempo disponível para a intervenção dos responsáveis técnicos (Foster e Fell, 1999; Fell et al., 2003; ICOLD, 2013; FEMA, 2015).

Após a abertura da brecha, o reservatório é esvaziado rapidamente trazendo, geralmente, efeitos catastróficos à região a jusante da barragem. Nesse estágio, devem ter sido executadas e esgotadas todas as tentativas de detecção e intervenção por parte dos responsáveis pelo barramento.

3.3 Detecção do *piping* em barragens e intervenção

A PNSB prevê, como um de seus fundamentos, que a segurança da barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros (Brasil, 2010). O instrumento de aplicação desse fundamento é o processo de monitoramento e intervenção através de inspeções periódicas e planejamento de obras de manutenção preventiva e corretiva.

Parte importante do processo de garantia da segurança de uma barragem é a detecção de anomalias geradoras de risco. Como já mencionado anteriormente, o *piping* é a anomalia que gera maior risco de acidentes a barragens de terra. A identificação dessa anomalia não é simples, pois a sua detecção nas vistorias está diretamente ligada à identificação visual de zonas de surgência de água ou de acúmulo de material carreado nas zonas à jusante da barragem.

Sobre o grande índice de incidentes e acidentes em barragens de terra devido a *piping*, Fell *et al.* (2003) afirmam que muitos proprietários de barragens podem ter depositado um excesso de confiança no monitoramento e na vigilância, em vez de realizar trabalhos corretivos, dado o potencial de falhas rápidas e a probabilidade de que alguns dos modos de

iniciação da erosão podem não ser facilmente detectáveis. A detecção pode, no entanto, ser possível uma vez que a erosão tenha progredido, desde que o monitoramento das barragens seja bem projetado e lido com frequência suficiente.

Para que ocorra uma correta análise e gestão do risco, ele precisa ser devidamente identificado e avaliado. As vistorias periódicas nas barragens são a maior fonte de informação sobre os aspectos que podem levar ao comprometimento estrutural e operacional do barramento. Em relação ao risco de desenvolvimento de *piping*, os aspectos relevantes à detecção dessa anomalia são observados no talude de jusante e na região à jusante da barragem.

Com base nos relatórios de vistoria de campo e em dados de monitoramento, os gestores de barragens devem definir a alocação dos recursos destinados a manutenção preventiva, em casos controlados, e a ações corretivas, nos casos mais graves. As intervenções devem ocorrer seguindo uma hierarquização de prioridades baseada na gravidade de suas situações de risco.

Esse processo de tomada de decisão define a interface que divide as boas e más gestões de segurança de barragens. Quanto melhor informada e embasada for a decisão, maior será credibilidade da mesma. A otimização do protocolo deve ser fonte de pesquisa constante por parte dos gestores de barragens, visando sempre buscar a maior eficiência e precisão no monitoramento, alocação de recursos e intervenções.

4 APRESENTAÇÃO DAS ABORDAGENS, VARIÁVEIS E BARRAGENS UTILIZADAS NOS MODELOS DE QUANTIFICAÇÃO DO RISCO DE *PIPING*

Este capítulo apresenta as metodologias de quantificação do risco de ocorrência de *piping* em barragens, com as variáveis consideradas em cada modelo. São indicadas, ainda, as barragens selecionadas para aplicação, calibração e validação dos modelos, fornecendo informações relevantes e seus respectivos históricos de anomalias relacionadas à manifestação de *piping*.

4.1 Metodologias de quantificação do risco de ocorrência de *piping*

Como já mencionado, o *piping* é um estágio avançado de uma anomalia gerada pela da infiltração de água em uma barragem, gerando carreamento de material. Modelos que objetivem quantificar o risco de ocorrência dessa anomalia devem ser representativos dos estágios de desenvolvimento da mesma, bem como abranger os fatores e variáveis relevantes no processo.

Visando atender as demandas exigidas para quantificação do risco de ocorrência de *piping*, foram definidas duas abordagens para elaboração dos modelos quantitativos, que são: abordagem probabilística e abordagem *fuzzy*. Para cada abordagem foi desenvolvida uma metodologia que busca abranger os fatores influentes no desenvolvimento da anomalia, utilizando dados disponíveis ou de acesso viável aos gestores de barragens.

A abordagem probabilística correlaciona os parâmetros da distribuição de probabilidade de Weibull com variáveis condicionantes da manifestação de *piping* em uma barragem, quais sejam, o tempo de operação (idade), o percentual de acumulação do reservatório e a resistência ou susceptibilidade do solo do maciço ao *piping*. O tempo de operação é utilizado como representação do desgaste natural da estrutura. O percentual de acumulação do reservatório é representativo dos gradientes hidráulicos que podem iniciar ou ajudar na progressão do *piping*. A susceptibilidade do solo do maciço ao *piping* retrata a propensão do solo ao carreamento pela água. Nesse modelo não são consideradas as informações das vistorias de campo relacionadas ao nível de deterioração da barragem, tendo em vista a grande quantidade de subjetividade e incertezas inerentes a esses dados. No modelo probabilístico desenvolvido, portanto, o tempo de operação é única variável que visa traduzir o desgaste presente na estrutura.

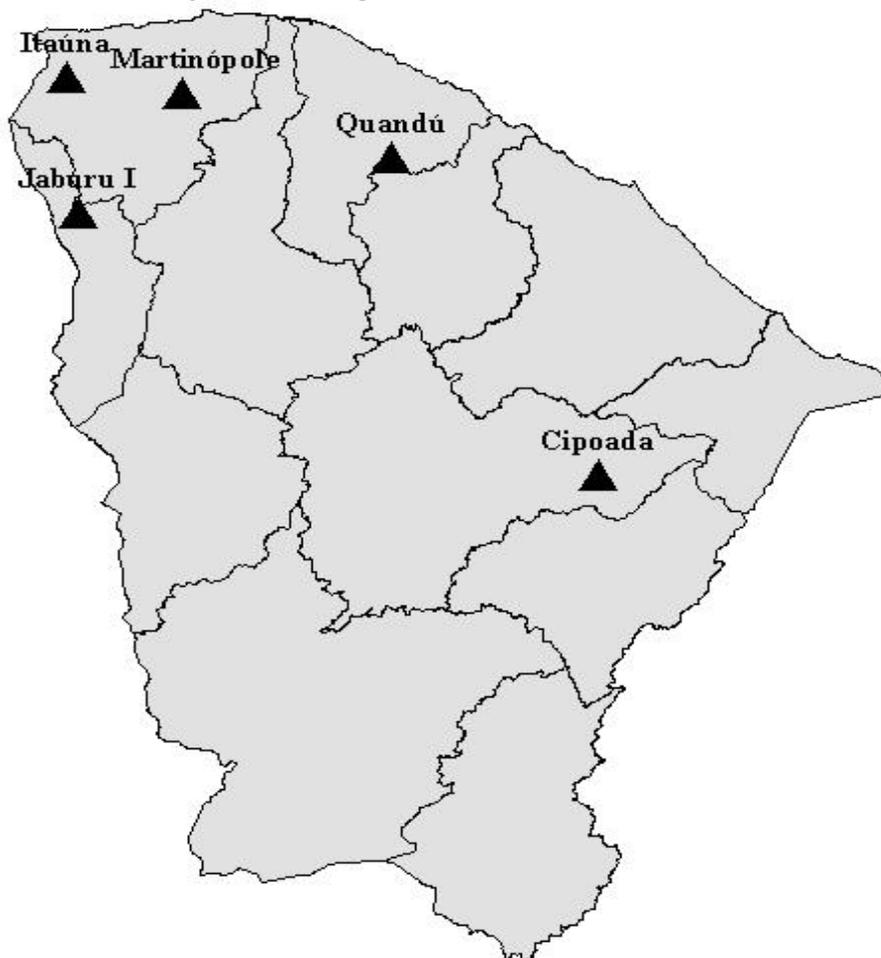
Já na abordagem *fuzzy*, foi desenvolvido um controlador Mamdani para fornecer como resposta o risco de ocorrência de *piping* quantificado. Como variáveis, foram consideradas a idade da barragem, a susceptibilidade do material constituinte do maciço ao *piping*, o percentual de acumulação de água do reservatório e o nível de deterioração do maciço constatado na vistoria em campo. A adição da consideração do estado estrutural da barragem visa traduzir, por meio das anomalias identificadas em inspeções, os danos ao barramento, possivelmente causados pela manifestação de *piping* na estrutura, sendo um complemento a variável que considera o tempo de operação (idade da barragem). Os conjuntos *fuzzy* foram definidos com intuito de abranger todos os cenários possíveis para as variáveis e diluir as imprecisões e incertezas pertinentes aos dados de entrada das mesmas.

4.2 Manifestação de *piping* nas barragens de terra selecionadas para aplicação dos modelos

A quantificação do risco de *piping* em barragens de terra compactua com o desenvolvimento de metodologias de análise de risco mais robustas, que visam fornecer aos gestores e responsáveis pelas decisões os aspectos necessários a correta apreciação do escopo do risco. Qualquer metodologia de quantificação de risco necessita de informações e dados para desenvolvimento e calibração da mesma.

Para aplicação e validação das metodologias propostas, foram selecionadas cinco barragens de terra de diferentes dimensões, idades e localizações no estado do Ceará. São elas: Cipoada, Itaúna, Jaburu I, Martinópole e Quandú, distribuídas geograficamente como ilustrado na Figura 4.1. Nas barragens selecionadas foi realizado um levantamento nos Relatórios de Segurança de Barragens da COGERH, dos anos de 2006 a 2015, das anomalias no talude de jusante e na região à jusante da barragem que podem estar relacionadas à presença de *piping* (Apêndice A).

Figura 4.1 – Localização das barragens do estudo de caso no estado do Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o levantamento realizado, presente no Apêndice A, foi possível observar o panorama das manifestações de anomalias condizentes com ocorrência de *piping* em cada uma das barragens analisadas. As dispersões consideráveis entre as magnitudes das anomalias constatadas valorizam a necessidade de metodologias para o auxílio a tomada de decisões coerentes.

Para o planejamento e desenvolvimento dos modelos quantitativos do risco de *piping*, foram utilizados os dados presentes na Tabela 4.1. A relação de informações listadas são de fácil, e rotineira, obtenção no âmbito do acompanhamento regular da operação de uma barragem, abrangendo aspectos hidrológicos, geotécnicos e físicos.

Tabela 4.1 – Dados utilizados para embasamento e desenvolvimento dos modelos

Barragem	Cipoada			Itaúna			Jaburu I			Martinópolis			Quandú		
Dado	ID	Solo	NR	ID	Solo	NR	ID	Solo	NR	ID	Solo	NR	ID	Solo	NR
2006	-	CL/ML	-	5	SC/CL	68,79%	23	SC/CL	94,51%	22	ML	16,17%	-	SC/CL	-
2007	15		13,35%	6		85,58%	24		84,46%	-		17	80,61%		
2009	17		99,52%	8		98,28%	26		98,01%	25		100%	19		100%
2010	18		62,80%	9		46,98%	27		88,37%	26		50,98%	20		36,31%
2011	19		45,55%	10		89,94%	28		100%	27		64,26%	21		100%
2012	20		15,73%	11		62,95%	29		75,73%	28		27,15%	22		88,84%
2013	21		7,54%	12		35,66%	30		55,70%	29		21,10%	23		52,43%
2014	22		10,24%	13		28,35%	-		-	30		12,37%	24		22,65%
2015	23		2,97%	14		42,31%	32		20,95%	31		13,26%	25		92,44%

Onde: ID é a idade da barragem; Solo se refere ao solo do maciço; NR é o nível do reservatório no dia da vistoria.

Fonte: SRH (2018); FUNCEME (2018).

4.2.1 Barragem Cipoada

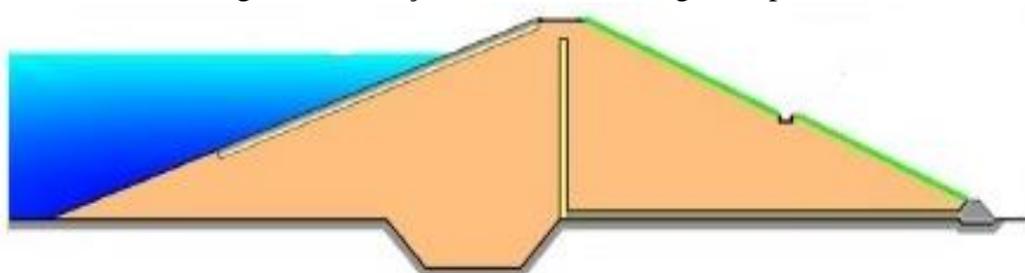
A barragem Cipoada, ilustrada nas Figuras 4.2 e 4.3, situada na região do município de Morada Nova, faz parte do sistema Banabuiú, barrando o Riacho Santa Rosa. É uma barragem de terra homogênea, com constituição predominante de solo CL/ML, concluída no ano de 1992. O maciço, responsável por barrar um reservatório com capacidade de 86.090.000 m³, possui 20,8 m altura e se estende por 1130 m de comprimento.

Figura 4.2 – Vista aérea barragem Cipoada.



Fonte: COGERH (2018a).

Figura 4.3 – Seção máxima da barragem Cipoada.

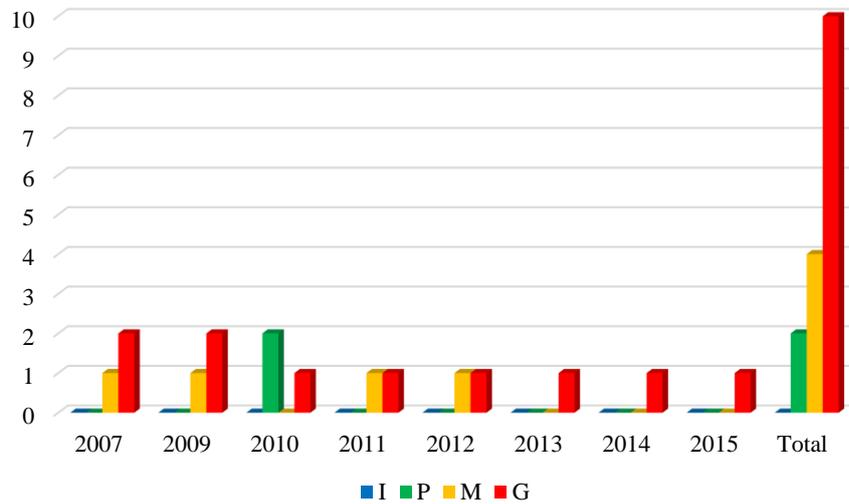


Fonte: COGERH (2015).

Segundo o levantamento realizado nos *check lists* de inspeções efetuadas na barragem Cipoada, apresentado na Figura 4.4, foi constatado um total de 16 anomalias condizentes com a manifestação de *piping* na estrutura, das quais 10 foram de magnitude grande (G), 4 de magnitude média (M), 2 de magnitude pequena (P) e nenhuma anomalia de magnitude insignificante (I). Entre as anomalias de maiores magnitudes, destacam-se erosões, afundamentos e buracos do talude de jusante além de carregamento de material na água dos

drenos. Os anos de 2007 e 2009 apresentaram os piores cenários quanto a possível manifestação de *piping* nessa barragem.

Figura 4.4 – Quantitativo das anomalias relacionadas a *piping* na barragem Cipoada.

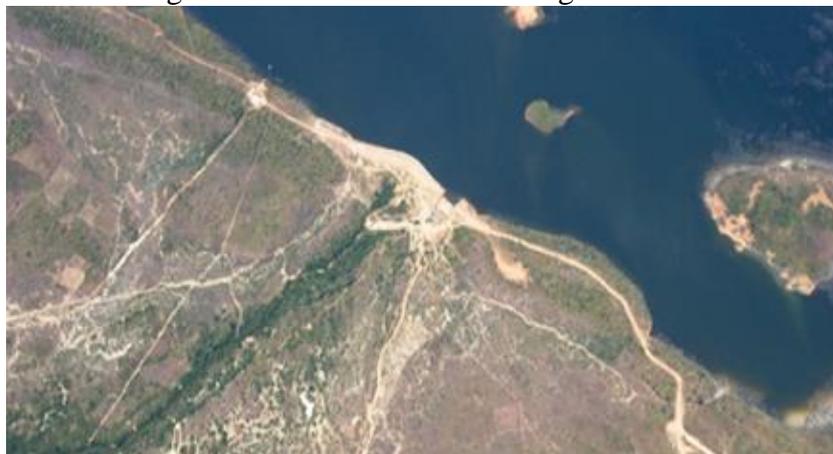


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Barragem Itaúna

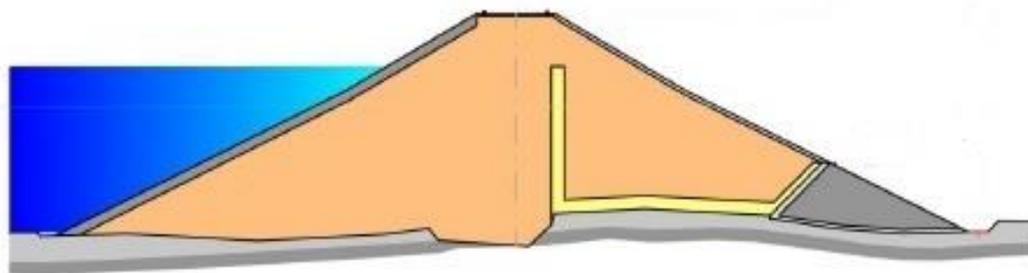
A barragem Itaúna, ilustrada nas Figuras 4.5 e 4.6, situada na região do município de Granja, faz parte do sistema Coreauá, barrando o Riacho Timonha. É uma barragem de terra homogênea, constituída por solo SC/CL, finalizada no ano de 2001. Possui reservatório com capacidade de 77.500.000 m³ barrado por um maciço de 18,0 m altura e 436 m de comprimento.

Figura 4.5 – Vista aérea da barragem Itaúna.



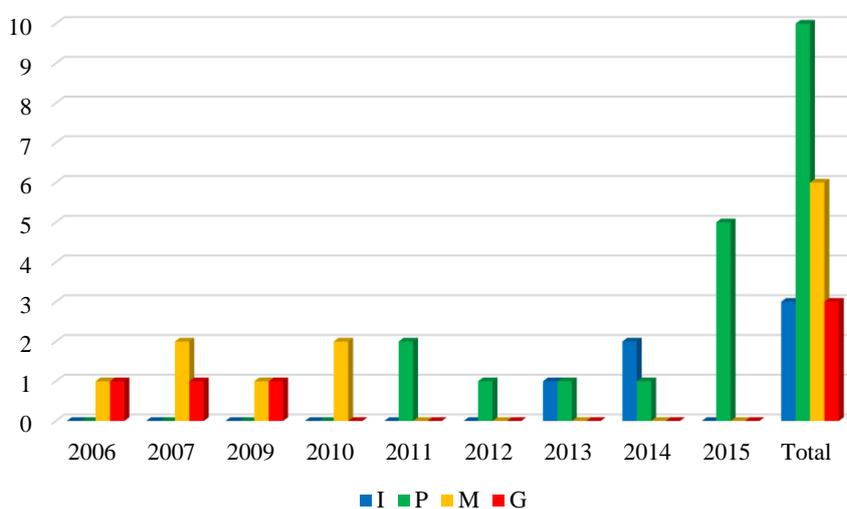
Fonte: COGERH (2018b).

Figura 4.6 – Seção máxima da barragem Itaúna.



Fonte: COGERH (2015).

O levantamento nos *check lists* de inspeções na barragem Itaúna, apresentado na Figura 4.7, foi constatado um total de 22 anomalias condizentes com a manifestação de *piping* na estrutura, das quais 3 foram de magnitude grande (G), 6 de magnitude média (M), 10 de magnitude pequena (P) e 3 anomalias de magnitude insignificante (I). Como anomalias de maior impacto, identificaram-se fugas d'água no talude e na região à jusante da barragem além de escorregamentos no talude de jusante. Os anos de 2006 a 2010 apresentaram os piores cenários quanto a possível manifestação de *piping* nessa barragem.

Figura 4.7 – Quantitativo das anomalias relacionadas a *piping* na barragem Itaúna.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Barragem Jaburu I

Concluída em 1983, a barragem Jaburu I (Figuras 4.8 e 4.9), que barra o rio Jaburu, é uma barragem de terra zoneada com predominância de solo SC/CL em sua constituição. Faz parte do sistema do Parnaíba, localizando-se na área do município de

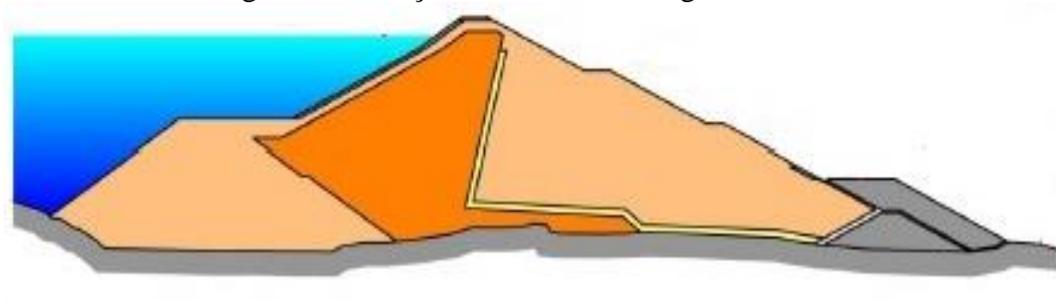
Ubajara. O maciço possui 46,0 m de altura máxima, se estende por 770 m e barra um reservatório com capacidade de 138.127.743 m³.

Figura 4.8 – Vista aérea da barragem Jaburu I.



Fonte: COGERH (2018c).

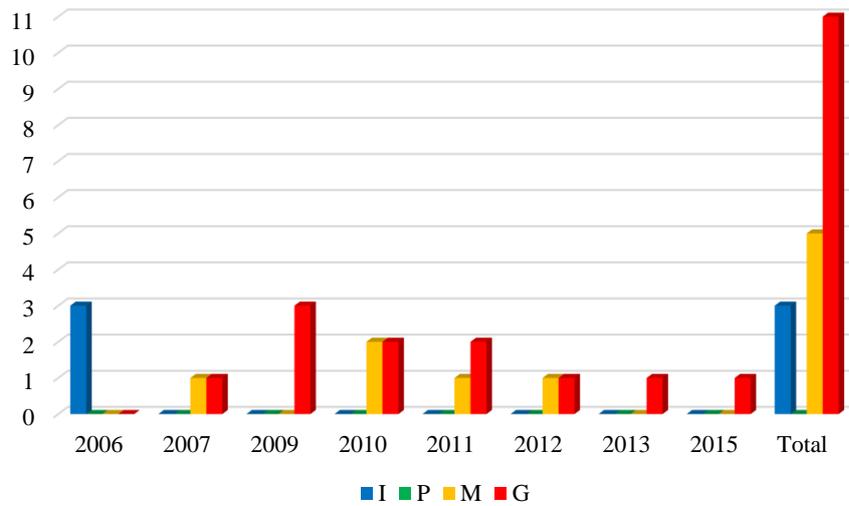
Figura 4.9 – Seção máxima da barragem Jaburu I.



Fonte: COGERH (2015).

O panorama geral das inspeções realizadas na barragem (Figura 4.10) mostra um total de 19 anomalias relacionadas a manifestação de *piping* na mesma, das quais 11 foram de magnitude grande (G), 5 de magnitude média (M), nenhuma de magnitude pequena (P) e 3 anomalias de magnitude insignificante (I). Fugas d'água no talude e na região a jusante, carreamento de material na água dos drenos e erosões nas ombreiras apresentaram grande incidência e magnitudes no período analisado. Os anos de 2009 a 2011 apresentaram os piores cenários quanto a possível manifestação de *piping* nessa barragem.

Figura 4.10 – Quantitativo das anomalias relacionadas a *piping* na barragem Jaburu I.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Barragem Martinópolis

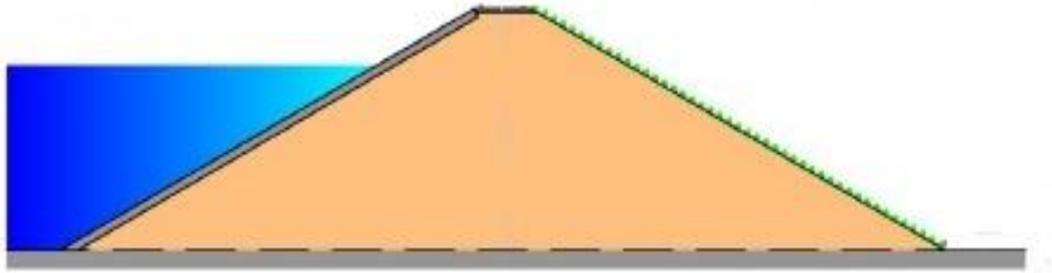
A barragem Martinópolis (Figuras 4.11 e 4.12), concluída em 1984, possui um maciço de terra homogênea com predominância de solo ML. Integra o sistema Coreaú, barrando o Riacho Rima, estando localizada nas dependências do município de Martinópolis. A barragem se estende por 240 m de comprimento e possui altura máxima de 11,0 m. O reservatório tem capacidade total de 23.200.000 m³.

Figura 4.11 – Vista aérea da barragem Martinópolis.



Fonte: COGERH (2018d).

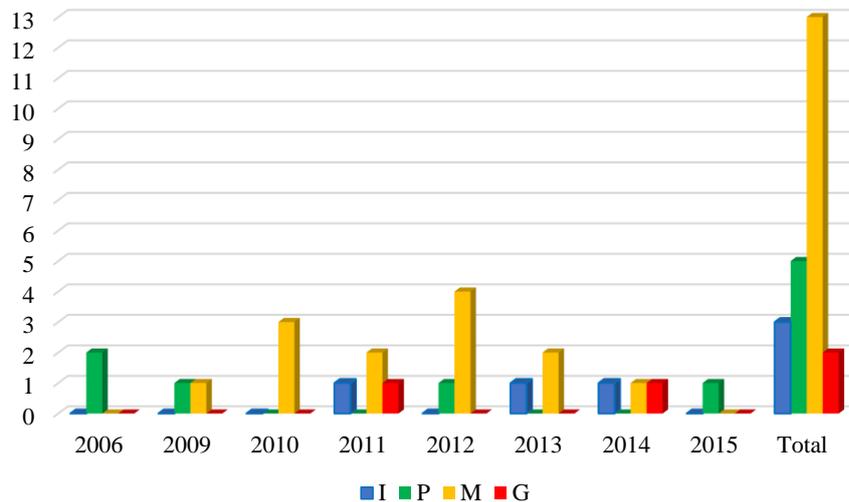
Figura 4.12 – Seção máxima da barragem Martinópolis.



Fonte: COGERH (2015).

De acordo com as inspeções realizadas e documentadas, foram identificadas 23 anomalias relacionadas a manifestação de *piping* na barragem Martinópolis (Figura 4.13), onde 2 foram de magnitude grande (G), 13 de magnitude média (M), 5 de magnitude pequena (P) e 3 anomalias de magnitude insignificante (I). Entre as anomalias de maior impacto, no período analisado, destacam-se erosões nas ombreiras, erosões, escorregamentos, afundamentos e buracos no talude de jusante além de fugas d'água na região à jusante da barragem. Os anos de 2009 a 2012 apresentaram os piores cenários quanto a possível manifestação de *piping* nessa barragem.

Figura 4.13 – Quantitativo das anomalias relacionadas a *piping* na barragem Martinópolis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Barragem Quandú

Com um maciço de terra homogênea predominantemente constituído de solo SC/CL, a barragem Quandú (Figuras 4.14 e 4.15), concluída em 1990, faz parte do sistema do

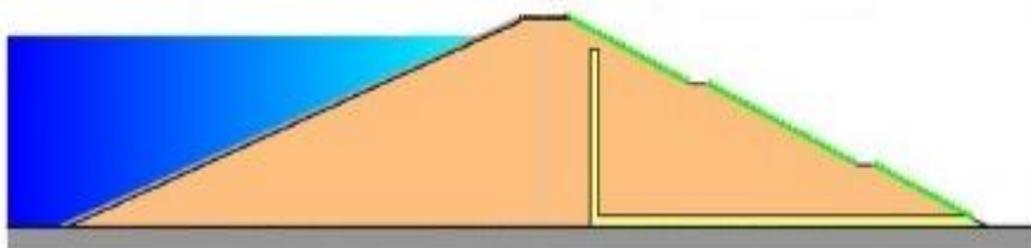
Litoral, barrando o Riacho Quandú. Integra a área do município de Itapipoca, com um reservatório de 4.000.000 m³ de capacidade total e um maciço de 195 m de comprimento e 19,5 m de altura máxima.

Figura 4.14 – Vista aérea da barragem Quandú.



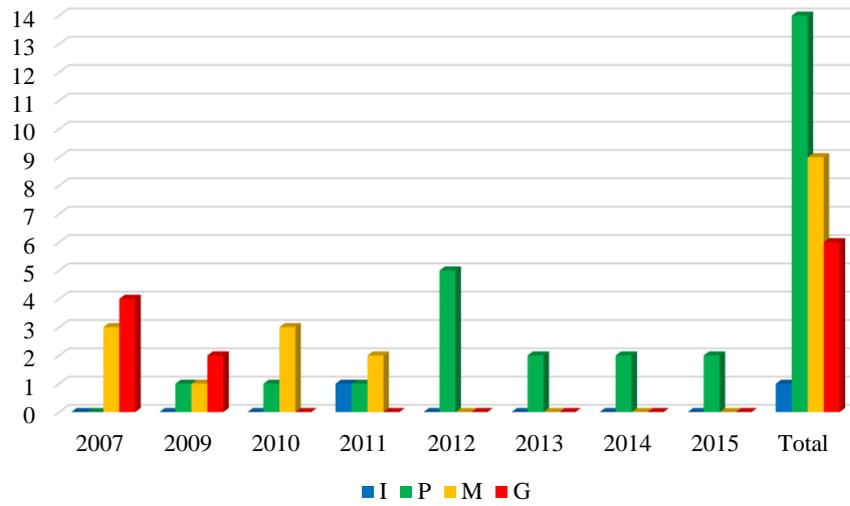
Fonte: COGERH (2018e).

Figura 4.15 – Seção máxima da barragem Quandú.



Fonte: COGERH (2015).

A análise dos dados das inspeções na barragem Quandú permitiram a elaboração do quantitativo de anomalias relacionadas a manifestação de *piping* nessa barragem, apresentado na Figura 4.16. Foram identificadas um total de 30 anomalias, das quais 6 foram de magnitude grande (G), 9 de magnitude média (M), 14 de magnitude pequena (P) e 1 anomalias de magnitude insignificante (I). Erosões nas ombreiras e no talude de jusante, fugas d'água no talude e na região à jusante da barragem foram as anomalias de maior impacto identificadas. Os anos de 2007 e 2009 apresentaram os piores cenários quanto a possível manifestação de *piping* nessa barragem.

Figura 4.16 – Quantitativo das anomalias relacionadas a *piping* na barragem Quandú.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA QUANTIFICAÇÃO DO RISCO DE PIPING EM BARRAGENS DE TERRA

Este capítulo aborda o desenvolvimento da metodologia de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra, para suporte a tomada de decisões gerenciais, por meio de um modelo probabilístico baseado em confiabilidade e na distribuição de probabilidade de Weibull.

5.1 Introdução a Teoria da Probabilidade e análises de risco probabilísticas

A Teoria da Probabilidade, segundo Lopes e Meirelles (2005), apareceu como ramo da Matemática em meados do século XV, embora tenha se iniciado como ciência empírica muito antes desse período. Suas raízes apareceram principalmente nos jogos e apostas.

Nos tempos antigos, o conceito de probabilidade surgiu em problemas de apostas com o ganhar, ou perder, de um jogo. Tudo começou com o famoso médico, matemático e apostador, Gerolamo Cardano (1501-1576), que se tornou professor e presidente de matemática na Universidade de Bolonha, na Itália (Debnath e Basu, 2015).

Segundo Debnath e Basu (2015), após o século XV, a Teoria da Probabilidade recebeu várias importantes contribuições, destacando-se a obra de Pierre Simon Laplace (1749-1827), que foi o primeiro a fazer grandes tentativas de desenvolver a teoria da probabilidade como uma nova abordagem além da teoria dos jogos de azar. Laplace também reconheceu o real significado da análise de resultados de observações ou medições envolvidas em física matemática, astronomia e ciências sociais.

A probabilidade é, essencialmente, uma representação matemática de eventos, fenômenos, ou particularidade aleatórias de um sistema, ou grupo, de dados. O desenvolvimento da Teoria Probabilidade clarificou sua possibilidade de utilização em campos diversos, como na própria Engenharia, onde hoje possui aplicação nas mais variadas áreas, processos e estágios, destacando-se as análises probabilísticas de risco, que contribuem na gestão de obras e sistemas de engenharia, atuando, principalmente, no processo de tomada de decisões (Devore, 2006; Lund, 2008; Evans e Rosenthal, 2009; Ezell *et al.*, 2010; Ross, 2010; Larson e Farber, 2010; Pereira e Lima, 2015; Mafioletti *et al.*, 2016)

Para Lund (2008), a análise de risco probabilística (ARP) atribui valores de probabilidade explícitos a cada consequência potencial de decisões alternativas e,

normalmente, resume o valor geral de cada alternativa, usando o valor das consequências, ou utilidades, esperadas.

Como afirma Ganoulis (1994), o matemático francês Laplace declarou que a abordagem probabilística nada mais é do que a tradução do senso comum em cálculo. As ARP buscam traduzir o risco para uma linguagem compatível com a utilização em processos gerenciais, ou seja, realizam o transporte de conceito para indicador (parâmetro), por meio da quantificação das probabilidades de falha do sistema a que se referem.

5.2 Confiabilidade: conceito e aplicação na Engenharia

Um projeto efetivo e funcional é aquele que permanece operacional e atende aos objetivos sem apresentar falhas durante um tempo pré-determinado de operação. Esta é a visão determinística de um sistema de engenharia, sendo idealística, impraticável e economicamente inviável (Modarres *et al.*, 2017).

A realidade é que existem várias incertezas inseridas nos sistemas e estruturas de engenharia. Segundo Araújo (2013), o julgamento subjetivo provoca o aparecimento de erros sistemáticos, em decorrência das tendenciosidades dos aparelhos de medida, ou de procedimentos experimentais.

Incertezas são mecanismos geradores de risco, pois as falhas nos sistemas geralmente são originadas a partir de incertezas inerentes à operação. A compreensão e aceitação das incertezas como parte componente dos sistemas é determinante na minimização de seus efeitos. Como afirmam Modarres *et al.* (2017), para maximizar a performance de um sistema e a eficiência do uso de insumos, é importante saber com que frequência as falhas podem ocorrer.

A confiabilidade, apresenta-se como uma ferramenta que pode ser usada na definição de um protocolo de previsão de falha. O conceito de confiabilidade está associado à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, sendo, portanto, caracterizada como a probabilidade de que um item executará uma função requerida, em condições estabelecidas, por um determinado período de tempo (Gnedenko e Ushakov, 1995; Carnaúba e Sellitto, 2013; Smith, 2017).

Segundo Mengue e Sellitto (2013), o uso da confiabilidade em manutenção de equipamentos originou-se a partir de análises de falhas em equipamentos eletrônicos de uso militar. Tais sistemas, como destacam Gnedenko e Ushakov (1995), têm um grande número

de componentes que tornam sua confiabilidade muito baixa, apesar de seus componentes serem altamente confiáveis.

No âmbito geotécnico e da segurança de barragens a confiabilidade é definida, segundo Brasil (2002), como a probabilidade de desempenho satisfatório de um dado elemento do empreendimento. Cada material e cada componente da barragem possui um valor de confiabilidade, ou seja, uma probabilidade de executar sua função de forma efetiva e funcional durante um período de tempo.

De forma ampla, o conceito de confiabilidade está relacionado à capacidade de um produto ou sistema manter-se funcional durante o tempo em que esteja operando, podendo ser considerado complementar ao conceito risco. A necessidade de inserção desse conceito para manutenção de equipamentos surgiu, no meio industrial, para suprir as incessantes demandas de subsídio confiáveis e resistentes para o desenvolvimento tecnológico.

Como relata Smith (2017), ao longo da história da engenharia, a melhoria da confiabilidade (também chamada de crescimento da confiabilidade), surgiu como uma consequência natural das análises de falha. Para Modarres *et al.* (2017), quando os mecanismos de falha são conhecidos e devidamente considerados no modelo, na manufatura, na construção, na produção e na operação, seus impactos, ou níveis, de ocorrência podem ser minimizados, ou o sistema pode ser protegido através de cuidadosas análises econômicas e de engenharia.

Quando utilizada na engenharia, a confiabilidade direciona-se à aplicação na concepção e implantação dos projetos. Todo o processo de elaboração do projeto, desde a escolha dos materiais a serem utilizados até o regime de funcionamento, deve considerar e respeitar as condições especificadas para a confiabilidade do sistema, viabilizando sua execução e posterior utilização. Como afirmam Machado e Andrade (2013), a engenharia de confiabilidade garante que um sistema tende a ser confiável quando operado da maneira especificada previamente no projeto.

Risco e confiabilidade possuem uma inerente relação de oposição, uma vez que o risco pode ser representado como o complemento da confiabilidade, na forma da Equação (5.1).

$$\text{RISCO} + \text{CONFIABILIDADE} = 1 \quad (5.1)$$

A incertezas presentes, que engatilham os processos de falha nos sistemas, atuam na redução da confiabilidade e, conseqüentemente, no aumento do risco. Modarres *et al.* (2017) salienta que a maioria dos mecanismos de falha, suas interações e processos de

degradação, em particular, geralmente não são completamente compreendidos. Portanto, a predição de falhas envolve incertezas sendo então inerente a um problema probabilístico. Assim, análises de confiabilidade, seja usando o processo físico de falha, ou o histórico de ocorrências, são um processo probabilístico.

Para que se utilizem as vantagens advindas da análise de confiabilidade é preciso que se insira em seu conceito a probabilidade. Quando associados ao risco, os conceitos de confiabilidade tornam-se uma importante ferramenta de quantificação, se subsidiados por expressões advindas de distribuições de probabilidade.

5.3 Distribuição de probabilidade de Weibull

Segundo Reis (2017), a distribuição de probabilidade de Weibull, proposta por Waloddi Weibull (1939, 1951, 1954), foi desenvolvida inicialmente em estudos de engenharia envolvendo tempo de falha por fadiga de metais. Ross (2010) afirma que a distribuição Weibull é amplamente utilizada na prática de engenharia devido à sua versatilidade, sendo atualmente empregada na modelagem de muitos problemas de engenharia. Para Meyer (1983), a distribuição de Weibull representa um modelo adequado sempre que o sistema for composto de vários componentes e a falha seja essencialmente devida à mais grave imperfeição, ou irregularidade, dentre um grande número de imperfeições do sistema.

De acordo com Carnaúba e Sellitto (2013), a distribuição de Weibull é uma expressão semiempírica muito utilizada em engenharia de manutenção, que modela adequadamente uma ampla variedade de situações, em que unidades apresentam funções de risco distintas.

Segundo Reis (2017), a distribuição Weibull é uma das mais utilizadas na área de confiabilidade. De acordo com Mengue e Selitto (2013), existe um modelo de confiabilidade, descrito por meio de equações que utilizam os parâmetros da distribuição de Weibull, capaz de orientar ações manutenção por meio da avaliação de componentes de um determinado sistema. As equações (5.2) a (5.5) representam o modelo de confiabilidade para a distribuição de Weibull.

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta} \quad (5.2)$$

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\theta} \right) \left(\frac{t - t_0}{\theta} \right)^{\beta-1} \quad (5.3)$$

$$R(t) = e \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (5.4)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (5.5)$$

Em que: β – Parâmetro de forma ou intensidade; θ – Parâmetro de escala, ou vida característica; t – tempo até a falha; t_0 – tempo isento de falha; $f(t)$ – função densidade probabilidade da distribuição de Weibull; $\lambda(t)$ – taxa de falha da distribuição de Weibull; $R(t)$ – função de confiabilidade da distribuição de Weibull, ou, simplesmente, confiabilidade; $F(t)$ – função densidade acumulada da distribuição de Weibull.

O parâmetro de forma, β , é o responsável pelo comportamento das funções descritas nas Equações (5.2) a (5.5). Em outras palavras, o parâmetro β define se o risco será crescente, decrescente ou constante com o tempo, além da intensidade dessa variação.

De acordo com Maciel *et al.* (2013), θ é o parâmetro de escala, também conhecido como vida característica, ou seja, é o tempo em que 63,2% das falhas ocorrem, se o parâmetro t_0 for igual a zero. Se t_0 for diferente de zero, este deverá ser adicionado ao parâmetro de escala (θ) para que o conceito citado seja mantido.

Considerando a equação que relaciona risco e confiabilidade já citada, é coerente e possível reescrevê-la como:

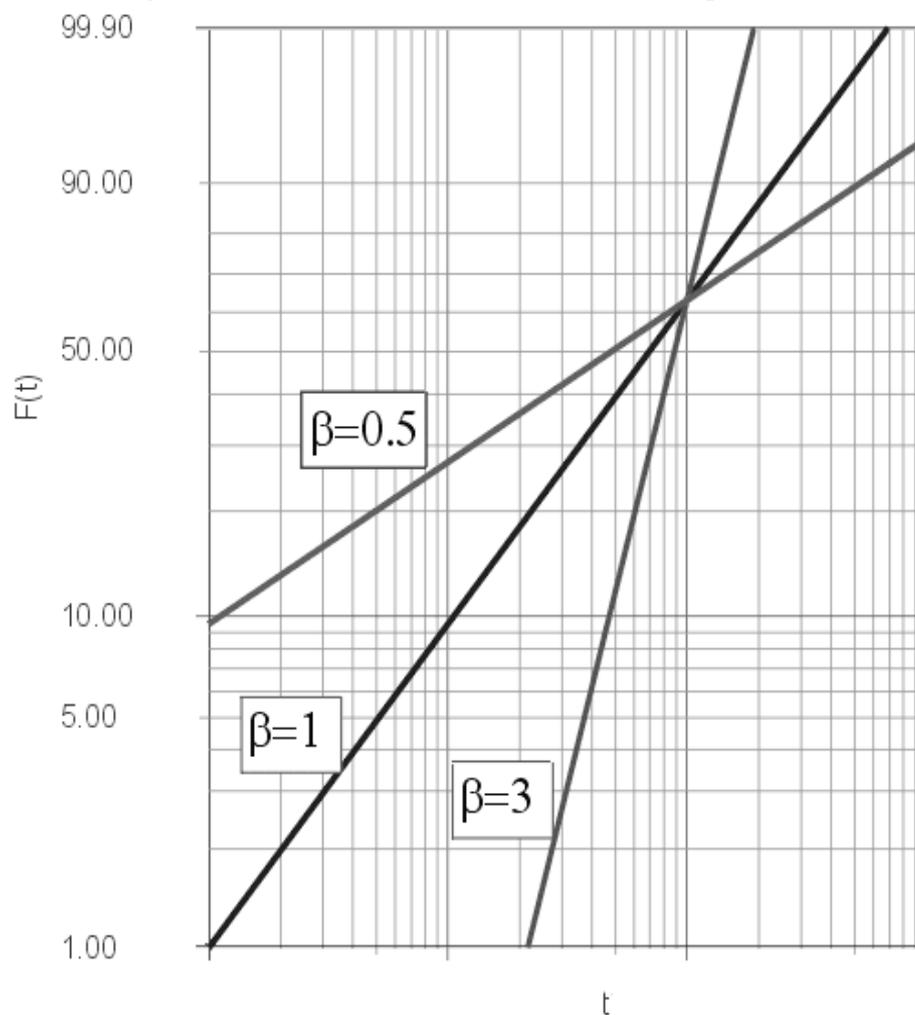
$$\text{RISCO} = 1 - \text{CONFIABILIDADE} \quad (5.6)$$

Observando atentamente a Equação (5.6) é possível notar uma aproximação com a Equação (5.5), tendo em vista que a função de densidade acumulada é calculada como sendo o complemento da função de confiabilidade, descrita na Equação (5.4). O risco pode ser considerado, portanto, como equivalente ao valor obtido através da função de densidade acumulada da distribuição de Weibull.

5.3.1 Influência do parâmetro de forma (β) no modelo de confiabilidade da distribuição de Weibull

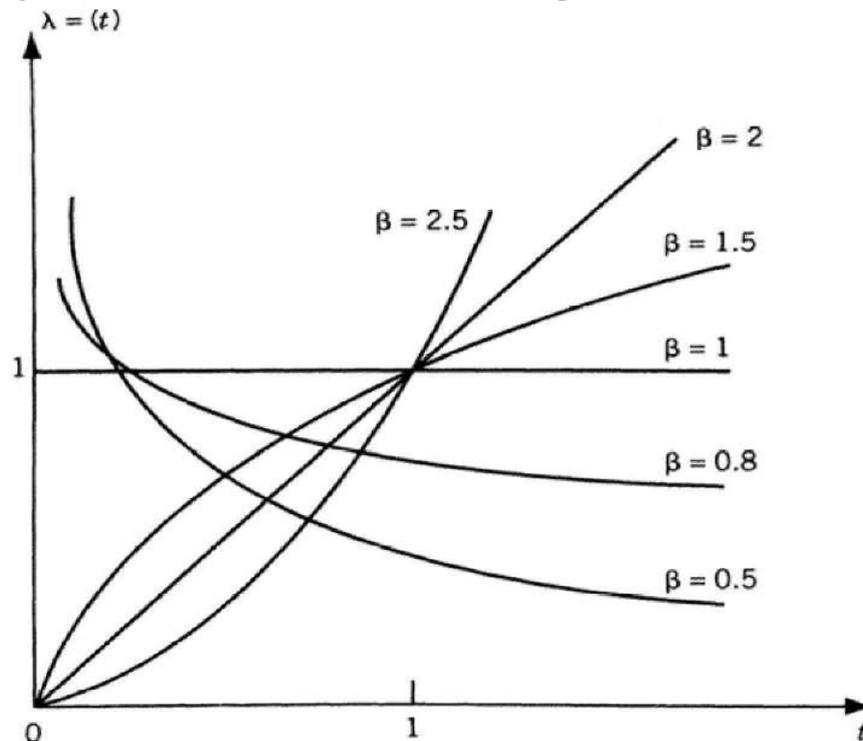
Como afirmam Carnáuba e Sellitto (2013), o tempo transcorrido até a falha e a taxa de falha são influenciadas pelo fator de forma β . Graficamente, a influência de β no comportamento da função densidade acumulada e da taxa de falha são apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

Figura 5.1 – Função densidade acumulada ($F(t)$) de Weibull para diferentes valores de β .



Fonte: ReliaSoft Brasil (2005).

Figura 5.2 – Taxa de falha de Weibull ($\lambda(t)$) para diferentes valores de β .



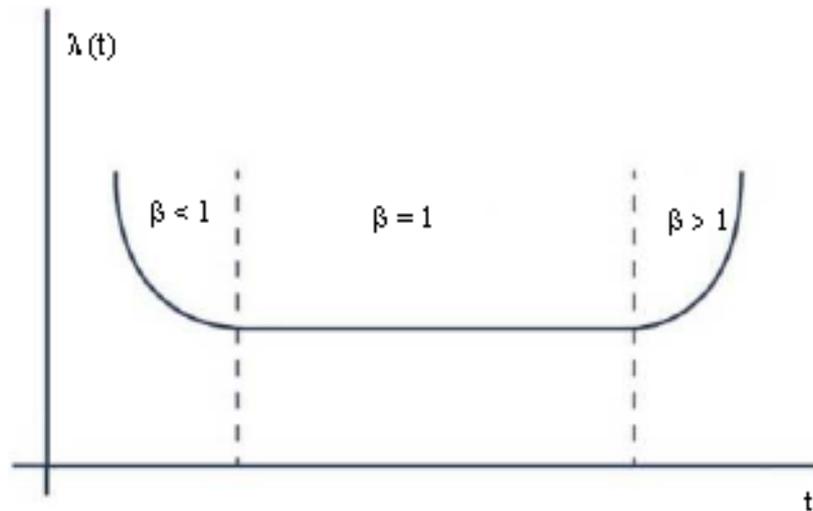
Fonte: Gnedenko e Ushakov (1995).

A correta interpretação das Figuras 5.1 e 5.2 permite algumas conclusões relevantes ao entendimento da influência do parâmetro β no comportamento das funções que descrevem o comportamento de um sistema com o tempo, em especial, a que descreve o risco da distribuição de Weibull. São elas:

- Para valores de $\beta < 1$, a taxa de falha ($\lambda(t)$) se apresenta decrescente com o tempo. Esses valores de β são utilizados para descrever falhas prematuras (falhas advindas de projeto, de má execução ou falhas humanas graves). A função densidade acumulada ($F(t)$) se apresenta crescente, mas com baixas inclinações;
- Para $\beta \cong 1$ (próximos ou iguais a 1) a taxa de falha ($\lambda(t)$) se apresenta aproximadamente constante. Esses valores de β são utilizados para descrever falhas aleatórias (falhas de operação, falhas humanas ou falhas devido a eventos ambientais randômicos). A função densidade acumulada ($F(t)$) se apresenta crescente e com inclinação superior a função para $\beta < 1$;
- Para valores de $\beta > 1$ a taxa de falha ($\lambda(t)$) se apresenta crescente com o tempo. Esses valores de β são utilizados para descrever falhas por desgaste (natural ou por má operação). A função densidade acumulada ($F(t)$) se apresenta crescente, com grandes inclinações, alcançando probabilidades de risco mais altas em menos tempo;

Esses intervalos dos valores de β destacados podem ser associados a vida útil de um sistema definindo a intensidade do desenvolvimento do risco durante a operação em relação a taxa de falha correspondente de cada período. Isso pode ser representado graficamente em uma curva denominada como curva da banheira, ilustrada na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Curva da banheira.



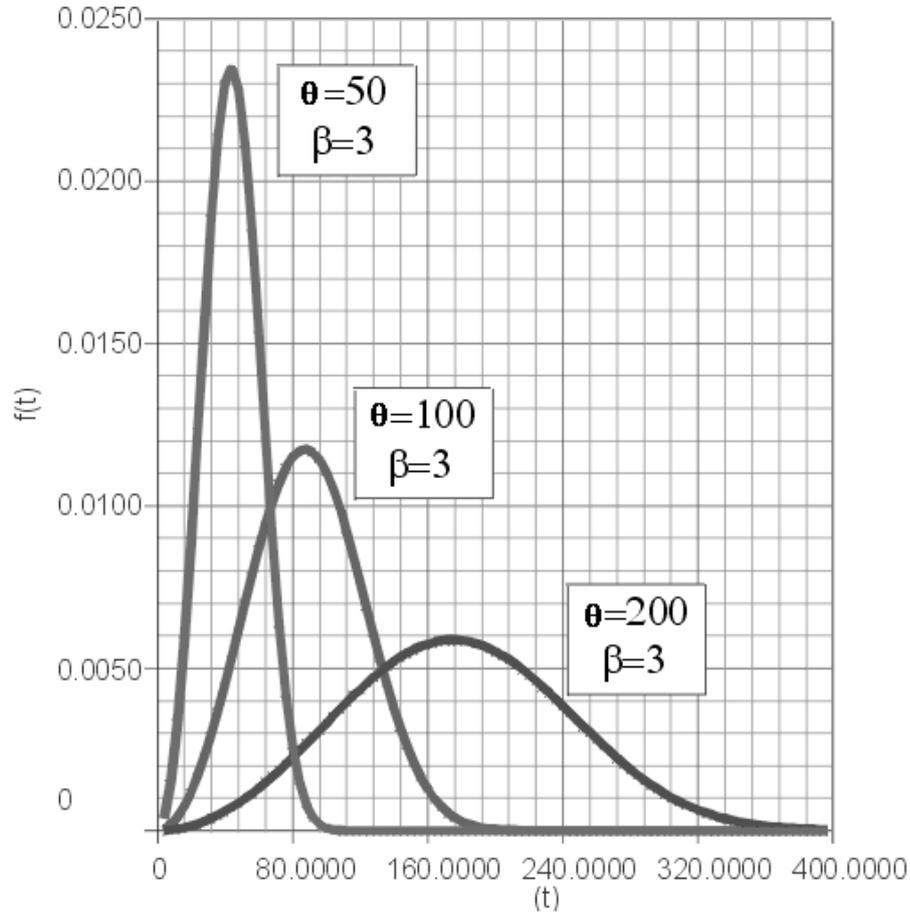
Fonte: Elaborado pelo autor.

O parâmetro de forma β é certamente o de maior relevância no comportamento das funções da distribuição de Weibull. Sua correta definição e adequação ao modelo de quantificação de risco planejado é indispensável para execução de uma análise de risco consistente e aplicável.

5.3.2 Influência do parâmetro de escala (θ) no modelo de confiabilidade da distribuição de Weibull

Uma mudança no parâmetro de escala, θ , como afirma Kececioglu (2002), tem o mesmo efeito na distribuição do que uma mudança na escala da abscissa (tempo, t). Se θ for aumentado, enquanto β e t_0 forem mantidos constantes, a distribuição será alongada para a direita da origem e sua altura diminuirá, mantendo sua forma e localização. Se θ é diminuído, enquanto β e t_0 são mantidos constantes, a distribuição é deslocada para a esquerda, em direção à origem, e sua altura aumenta. Esses efeitos sobre a função de densidade de probabilidade são ilustrados na Figura 5.4.

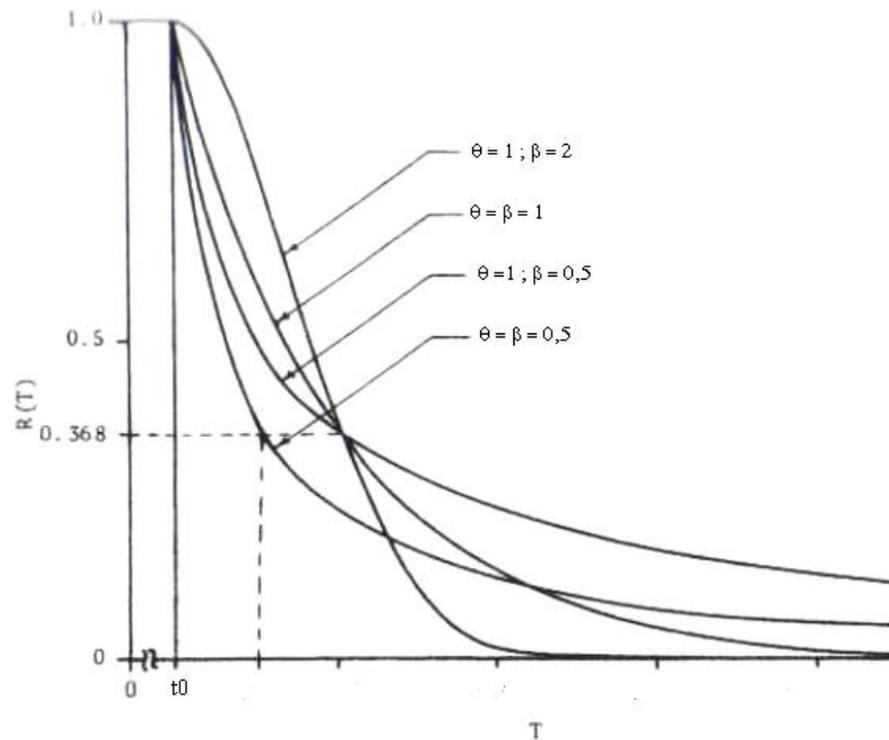
Figura 5.4 – Efeito da variação de θ na função densidade de probabilidade de Weibull.



Fonte: Adaptado de ReliaSoft Brasil (2005).

A Figura 5.5 apresenta o efeito da variação de θ sobre $R(t)$. Como é possível observar, a redução de θ , mantendo β e t_0 constantes, causa um abatimento na curva de confiabilidade, deslocando-a para baixo e para a esquerda. Isso implica na redução do tempo necessário para atingir uma determinada confiabilidade. Em outras palavras, a redução de θ causa uma redução mais brusca da confiabilidade e, conseqüentemente, um aumento mais acentuado do risco.

Figura 5.5 – Efeito da variação de θ na confiabilidade da distribuição de Weibull.



Fonte: Adaptado de Kececioglu (2002).

5.4 Metodologia de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra por abordagem probabilística utilizando a distribuição de Weibull

Para produzir um modelo probabilístico de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra é preciso compreender o fenômeno e suas causas geradoras para realizar corretamente a parametrização. É possível estabelecer correlações entre os fatores que governam a formação de *piping* e os parâmetros responsáveis por descrever os cenários na distribuição de Weibull.

A escolha da distribuição de Weibull está diretamente relacionada a capacidade de moldar a função a diferentes situações alterando seus parâmetros. A correta definição dos parâmetros para aplicação da metodologia configura a tarefa mais importante do processo, tendo em vista sua relevância no resultado final da análise.

Os parâmetros β e θ da distribuição de Weibull, responsáveis por determinar o desenvolvimento da confiabilidade e, conseqüentemente, do risco, podem ser definidos a partir de correspondências com dados acessíveis e pertinentes no dia-a-dia da segurança de barragens. Com base nos Relatórios Anuais de Segurança de Barragens (2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015) da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do

Estado do Ceará (COGERH), na literatura (Meyer, 1983; Gnedenko e Ushakov, 1995; Kececioglu, 2002; Ross, 2010; Mengue e Sellitto, 2013; Carnaúba e Sellitto, 2013; Reis, 2017), na legislação e na experiência adquirida no âmbito de segurança de barragens, foram definidos os fatores a serem relacionados com os parâmetros da distribuição de Weibull. São eles: o percentual de preenchimento do reservatório, relacionado com o parâmetro de forma (β), a susceptibilidade do solo constituinte da barragem ao desenvolvimento de *piping*, relacionado com o parâmetro de escala (θ), e o desgaste natural da estrutura, relacionado com o parâmetro t . Essas correlações permitem a produção de um modelo baseado, especialmente, no tempo de operação da barragem (idade da barragem).

Será utilizada a Equação (5.5) para se obter, como resposta do modelo, o risco de *piping* que pode ser usado no auxílio a tomada de decisões com relação à segurança das barragens. Os parâmetros definidos, e apresentados a seguir, são empregados para calcular a confiabilidade ($R(t)$), permitindo sua utilização na Equação (5.5) para o cálculo do risco de *piping*, representado pela função de densidade acumulada ($F(t)$).

5.4.1 Definição dos valores de β em relação com o nível do reservatório

A anomalia *piping* ocorre devido à formação de tubos no interior da barragem devido à ação carreadora da água sobre as partículas de solo em situação de mobilidade susceptível (ICOLD, 2013, 2016; Van Beek, 2015). A maior intensidade de carreamento ocorre quando são observados os maiores gradientes de saída, coincidente com os períodos onde o reservatório está cheio. O percentual de preenchimento do reservatório (N_R) é considerado, portanto, como de importância proeminente no processo de formação e na progressão do *piping*.

Como o parâmetro de forma (β) é responsável por influenciar a forma da distribuição de probabilidade de Weibull e, conseqüentemente, o risco, pode-se relacionar sua ação na função com a relevância da carga hidráulica disponível no reservatório sobre o desenvolvimento do *piping*. Quando o reservatório está com baixa carga hidráulica, o meio torna-se menos propício ao desenvolvimento ou progressão do *piping*. Os valores de $\beta < 1$ proporcionam um crescimento menos acentuado do risco, sendo compatível com este cenário de reservatório com baixo nível de água. Por outro lado, de acordo com o enchimento do reservatório, o risco de desenvolvimento de *piping* se acentua gradualmente, sendo necessária a elevação dos valores de β até valores superiores a um, para representar esses cenários. A

Tabela 5.1 mostra os valores atribuídos para β , em relação ao percentual de preenchimento do reservatório, para o desenvolvimento do modelo de quantificação do risco de *piping* em barragens de terra. Foram atribuídos valores próximos a unidade, pois, como afirmam Gomes *et al.* (2016a, 2016b), o risco de falha de uma barragem em operação, descrito por um modelo de confiabilidade para a Distribuição de Weibull, aumenta conforme os valores de β se aproximam de 1.

Tabela 5.1 – Valores de β para diferentes níveis do reservatório.

Percentual do Reservatório	β
$N_R \leq 30\%$	0,8
$30\% < N_R < 70\%$	1,0
$N_R \geq 70\%$	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Definição dos valores de θ em relação à susceptibilidade do solo da barragem ao desenvolvimento de *piping*

Considerando as características, já citadas, dos diferentes tipos de solos, pode-se considerar que a susceptibilidade do solo constituinte da barragem ao *piping* está relacionada ao tempo de ocorrência da anomalia, visto que em solos não coesivos a anomalia *piping* se desenvolverá mais rapidamente do que em solos coesivos (Sherard *et al.*, 1963; Kovács, 1981; ICOLD, 2013, 2016). Isso pode ser enquadrado no modelo relacionando a susceptibilidade ao *piping* do solo com o parâmetro de escala θ .

O parâmetro θ da distribuição de Weibull representa o período de tempo necessário para que ocorram um montante considerável de falhas no sistema. É necessário que haja uma compatibilização dos valores de θ com o tempo de operação do sistema analisado, estando seu valor entre t e t_0 .

Nesse trabalho, como forma de inserção das características geotécnicas do material das barragens, os valores de θ foram escolhidos visando o enquadramento com o tipo de solo constituinte do maciço, além do tempo de operação da barragem. A partir de um julgamento crítico dos dados e informações disponíveis, para cada faixa de operação, os valores de θ foram atribuídos de forma a representar o ano, dentro do intervalo de operação considerado, que se espera uma manifestação significativa de falhas nas estruturas. Menores

valores de θ , que expressam reduções mais acentuadas na confiabilidade e consequentes aumentos mais significativos no risco, foram atribuídos aos solos de maior susceptibilidade ao *piping*. Por outro lado, os solos mais resistentes ao carreamento receberam valores de θ maiores, que descrevem um aumento menos proeminente do risco. A Tabela 5.2 apresenta os valores de θ adotados no desenvolvimento do modelo de quantificação do risco de *piping* em barragens de terra. Os períodos de tempo considerados são os mesmos períodos listados no critério Idade da Barragem, disponível na Resolução nº 143, utilizado na classificação do risco associado a uma barragem.

Tabela 5.2 – Correlação de θ com a susceptibilidade dos solos ao *piping*.

Período (anos)	$\theta \rightarrow$ Solo					
	SC	CL	SM	ML	SC/CL	CL/ML
$t \leq 5$	4,0	4,0	3,0	2,0	4,0	3,0
$5 < t \leq 10$	8,0	8,0	7,0	6,0	8,0	7,0
$10 < t \leq 30$	25,0	25,0	20,0	15,0	25,0	20,0
$30 < t \leq 50$	40,0	40,0	35,0	32,0	40,0	36,0
$t > 50$	70,0	70,0	60,0	55,0	70,0	62,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.3 Determinação dos valores de t_0 e t

Os parâmetros t_0 e t caracterizam o tempo de início da falha e o tempo de operação do sistema até a falha generalizada, respectivamente. No modelo de quantificação do risco de *piping* em barragens de terra o parâmetro t_0 será considerado como o tempo, após a conclusão da barragem, onde se inicia a anomalia *piping*. Já o parâmetro t será estabelecido de acordo com o tempo de operação (idade) da barragem para cada ano analisado.

Os Relatórios Anuais de Segurança de Barragens emitidos pela COGERH são a principal fonte oficial de informação sobre anomalias constatadas em vistorias nas barragens (COGERH, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). O relatório mais antigo disponível é referente ao ano de 2006, ou seja, não há como definir com exatidão quando as barragens analisadas começaram a manifestar anomalias que poderiam estar relacionadas ao desenvolvimento de *piping*. A definição do parâmetro t_0 deve visar, portanto, a segurança e a aplicabilidade do modelo. Foram considerados, portanto, para todas as barragens, os valores

de t_0 iguais a um, o que implica a consideração de que todas as barragens manifestaram algum estágio da anomalia *piping* após o primeiro ano de operação.

Os valores do parâmetro t foram estabelecidos de acordo com as idades das barragens (tempo de operação após a conclusão) em cada ano que possui relatório de vistorias disponibilizado eletronicamente. O modelo fornecerá como resposta o risco de *piping* no período de operação da barragem, após o fim de sua construção, em cada ano analisado.

5.5 Aplicação do modelo de risco de *piping* com a abordagem probabilística utilizado a distribuição de Weibull

A modelagem é iniciada com a coleta dos parâmetros. Os tipos de solos das barragens e seus tempos de operação (idades), que atuam na definição do parâmetro θ , foram obtidos junto à Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, por meio do Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará e dos projetos das barragens (SRH, 2018). Já os níveis dos reservatórios (N_R) nos dias das vistorias realizadas, utilizados para definição dos valores de β , foram obtidos no Portal Hidrológico do Ceará (FUNCEME, 2018).

Definidos os valores dos parâmetros referentes ao modelo de confiabilidade da distribuição de probabilidade de Weibull, as Equações (5.4) e (5.5) podem ser alimentadas para gerar a resposta referente ao risco de desenvolvimento de *piping* na barragem utilizando uma abordagem probabilística.

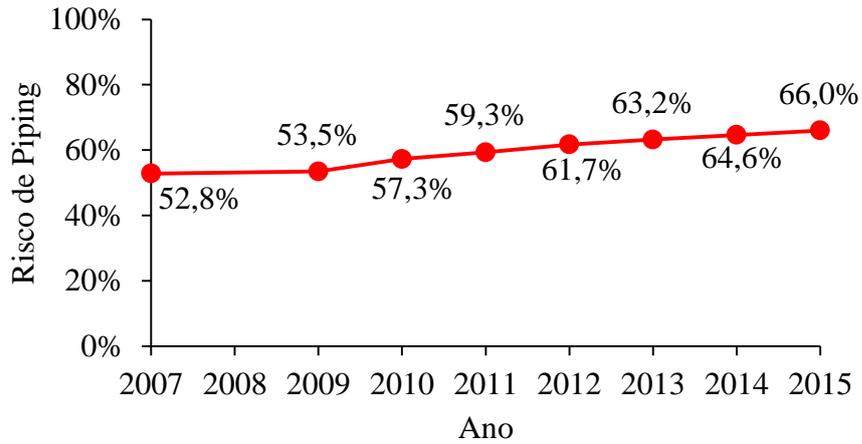
A Tabela 5.3 demonstra um resumo geral do modelo desenvolvido. Entrando com os valores dos parâmetros exibidos na Tabela 5.3 nas equações (5.4) e (5.5), que descrevem a função de confiabilidade ($R(t)$) e o risco do modelo probabilístico proposto ($F(t)$), é possível acompanhar a evolução do risco em cada barragem para o período analisado, presentes nas Figuras 5.6 a 5.10.

Tabela 5.3 – Resumo dos valores dos parâmetros das equações de Weibull

Barragem	Solo	Ano	N _R	β	θ	t	t ₀
Cipoada	CL/ML	2007	13,35%	0,8	20	15	1
		2009	99,52%	1,2	20	17	1
		2010	62,80%	1,0	20	18	1
		2011	45,55%	1,0	20	19	1
		2012	15,73%	0,8	20	20	1
		2013	7,54%	0,8	20	21	1
		2014	10,24%	0,8	20	22	1
		2015	2,97%	0,8	20	23	1
Itaúna	SC/CL	2006	68,79%	1,0	4	5	1
		2007	85,58%	1,2	8	6	1
		2009	98,28%	1,2	8	8	1
		2010	46,98%	1,0	8	9	1
		2011	89,94%	1,2	8	10	1
		2012	62,95%	1,0	25	11	1
		2013	35,66%	1,0	25	12	1
		2014	28,35%	0,8	25	13	1
Jaburu I	SC/CL	2006	94,51%	1,2	25	23	1
		2007	84,46%	1,2	25	24	1
		2009	98,01%	1,2	25	26	1
		2010	88,37%	1,2	25	27	1
		2011	100%	1,2	25	28	1
		2012	75,73%	1,2	25	29	1
		2013	55,70%	1,0	25	30	1
		2015	20,95%	0,8	40	32	1
Martinópolis	ML	2006	16,17%	0,8	15	22	1
		2009	100%	1,2	15	25	1
		2010	50,98%	1,0	15	26	1
		2011	64,26%	1,0	15	27	1
		2012	27,15%	0,8	15	28	1
		2013	21,10%	0,8	15	29	1
		2014	12,37%	0,8	15	30	1
		2015	13,26%	0,8	32	31	1
Quandú	SC/CL	2007	80,61%	1,2	25	17	1
		2009	100%	1,2	25	19	1
		2010	36,31%	1,0	25	20	1
		2011	100%	1,2	25	21	1
		2012	88,84%	1,2	25	22	1
		2013	52,43%	1,0	25	23	1
		2014	22,65%	0,8	25	24	1
		2015	92,44%	1,2	25	25	1

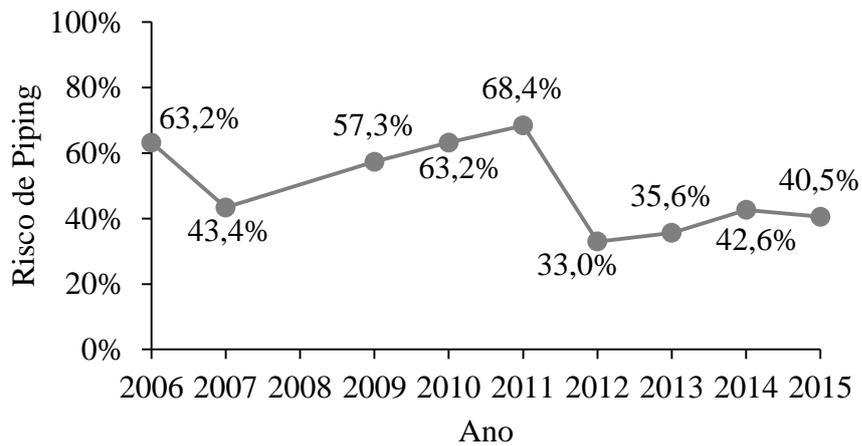
Fonte: COGERH (2006 a 2015); SRH (2018); FUNCEME (2018); Autor (2018)..

Figura 5.6 – Evolução do risco de *piping* na barragem Cipoada.



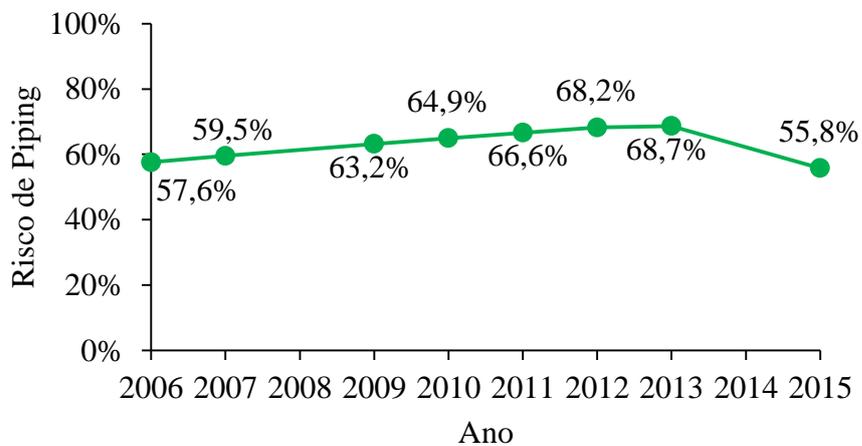
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.7 – Evolução do risco de *piping* na barragem Itaúna.

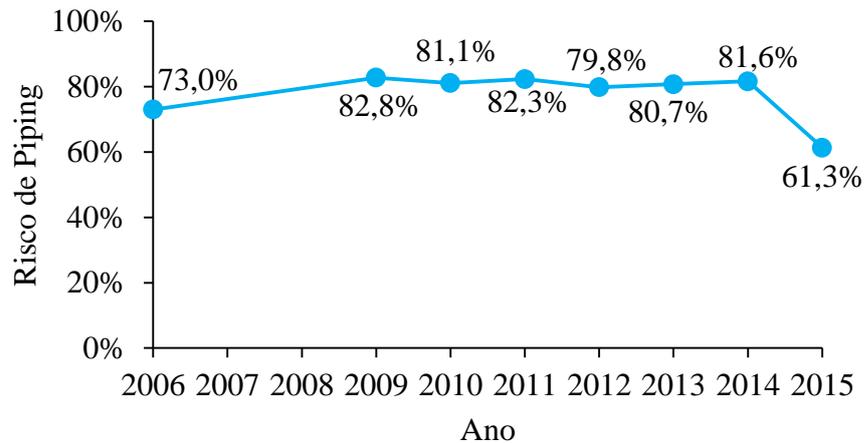


Fonte: Elaborado pelo autor.

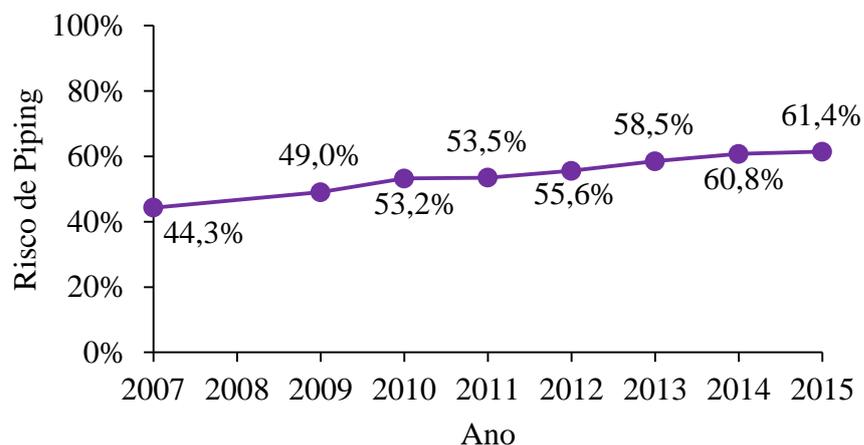
Figura 5.8 – Evolução do risco de *piping* na barragem Jaburu I.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.9 – Evolução do risco de *piping* na barragem Martinópolis.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.10 – Evolução do risco de *piping* na barragem Quandú.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na barragem Cipoada, o risco de *piping* atingiu o maior valor observado para a barragem, de 66,0%, no ano de 2015 (Figura 5.6). Observa-se que, desde a data inicial da análise, o risco apresenta-se em crescimento praticamente constante, sem reduções ou acréscimos proeminentes. Isso pode ser atribuído a sua idade intermediária e a presença de uma parte coesiva em seu solo constituinte (CL/ML). No ano de 2009, com risco de *piping* em 53,5%, foi realizada uma intervenção nessa barragem para recuperação no talude jusante. Mesmo após a execução das ações mitigatórias na barragem, o risco permaneceu em crescimento até o fim do período analisado.

Na barragem Itaúna os maiores valores para o risco de *piping* foram constatados no intervalo 2009 a 2011 (Figura 5.7). O maior valor para o risco de *piping*, de 68,4%, ocorreu no ano de 2011. No intervalo citado, a barragem apresentou condições graves em

relação à manifestação das anomalias ligadas ao *piping*, gerando elevação do risco. Após 2011, com avanço do seu tempo de operação (idade), a barragem Itaúna apresenta uma alteração no valor de θ , passando de 8,0 para 25,0, que associada à redução dos níveis do reservatório nos anos seguintes, proporcionaram uma acentuada diminuição no risco de *piping*.

Em relação à barragem Jaburu I, o maior valor calculado para o risco de desenvolvimento de *piping* foi de 68,7%, que ocorreu no ano de 2013 (Figura 5.8). A manutenção do nível do reservatório em médios e altos percentuais permitiu um crescimento praticamente constante do risco no período analisado. No período de 2013 a 2015, além da redução acentuada no nível do reservatório, houve a mudança de faixa de tempo de operação da barragem Jaburu I, gerando a alteração do valor de θ , de 25,0 para 40,0. Esses fatores podem ser associados à brusca queda no risco de *piping* constatada no ano de 2015 nessa barragem.

Para a barragem Martinópole, observa-se um crescimento no risco de *piping* a partir do ano de 2006, chegando em 2009 ao pico de 82,8% e prosseguindo até 2014 com pequenos acréscimos e reduções relacionadas ao nível do reservatório (Figura 5.9). Houve, em 2015, uma elevação considerável no valor de θ devido ao avanço no tempo de operação da barragem Martinópole, passando de 15,0 para 32,0, que proporcionou a queda sensível no risco de *piping* da barragem, nesse ano. No início de 2013, com o risco de *piping* em 80,7%, destaca-se a realização de uma intervenção para recuperação no talude de jusante da barragem. Após realizada a ação mitigatória, o risco de *piping* apresentou pequeno crescimento, seguido de uma redução.

Observando os resultados obtidos para a barragem Quandú constata-se que o máximo valor do risco de *piping* nessa barragem ocorre em 2015, sendo de 61,4% (Figura 5.10). O risco apresenta desenvolvimento crescente durante todo o período analisado (2007 a 2015). As variações na intensidade do crescimento podem ser atribuídas à grande variação no nível percentual do reservatório em alguns períodos. Sua idade intermediária e seu solo pouco susceptível ao *piping* também contribuem para a resposta obtida.

Uma deficiência do modelo probabilístico proposto, de acordo com os resultados apresentados, é a ausência de consideração do estado físico da estrutura da barragem na análise. O único parâmetro do modelo que possui alguma relação com a representação do nível de deterioração da barragem é o tempo de operação (t) e o mesmo é incapaz de traduzir o efeito mitigatório de ações corretivas realizadas no risco de ocorrência de *piping*. A realização de intervenções corretivas não são, portanto, manifestadas através de reduções nas

projeções do risco de *piping* para os anos posteriores. Na barragem Cipoada, por exemplo, mesmo após a intervenção realizada em 2009, o risco continua a crescer nos anos seguintes. O mesmo se observa na barragem Martinópole que, após a intervenção de 2013, apresentou um crescimento no risco de ocorrência de *piping*, passando de 80,7% para 81,6% em 2014. Essa deficiência direciona a aplicabilidade do modelo para barragens com cenários sem intervenção, onde o mesmo mostrou-se mais eficiente.

Considerando, ainda, o panorama geral de todas as barragens utilizadas neste trabalho é possível estabelecer uma hierarquia de prioridades de monitoramento e intervenção para cada ano com base no risco de *piping* calculado através do modelo probabilístico. A Tabela 5.4 traz a hierarquização anual obtida a partir dos resultados, apresentados nas Figuras 5.6 a 5.10, onde o 1º lugar se refere à barragem em pior situação e o 5º lugar se refere à barragem em melhor situação. No caso de duas barragens com mesmo risco de *piping* no mesmo ano, a prioridade será destinada para a barragem que possuir o solo mais susceptível ao *piping* e, em segundo lugar, a que estiver em operação a mais tempo (maior idade).

Tabela 5.4 – Hierarquia anual de prioridade de intervenção e monitoramento.

Ano	Hierarquia				
	1º	2º	3º	4º	5º
2006	Martinópole	Itaúna	Jaburu I	-	-
	73,0%	63,2%	57,6%	-	-
2007	Jaburu I	Cipoada	Quandú	Itaúna	-
	59,5%	52,8%	44,3%	43,4%	-
2009	Martinópole	Jaburu I	Itaúna	Cipoada	Quandú
	82,8%	63,2%	57,3%	53,5%	49,0%
2010	Martinópole	Jaburu I	Itaúna	Cipoada	Quandú
	81,1%	64,9%	63,2%	57,3%	53,2%
2011	Martinópole	Itaúna	Jaburu I	Cipoada	Quandú
	82,3%	68,4%	66,6%	59,3%	53,5%
2012	Martinópole	Jaburu I	Cipoada	Quandú	Itaúna
	79,8%	68,2%	61,7%	55,6%	33,0%
2013	Martinópole	Jaburu I	Cipoada	Quandú	Itaúna
	80,7%	69,7%	63,2%	58,5%	35,6%
2014	Martinópole	Cipoada	Quandú	Itaúna	-
	81,6%	64,6%	60,8%	42,6%	-
2015	Cipoada	Quandú	Martinópole	Jaburu I	Itaúna
	66,0%	61,4%	61,3%	55,8%	40,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.6 Protocolo de intervenção baseado no risco de piping

Com base na hierarquização apresentada na Tabela 5.4, pode-se realizar um planejamento para realização de intervenções preventivas e corretivas nas barragens, respeitando uma clara ordem de prioridade. É possível definir um protocolo de ações mitigatórias no talude de jusante e na região à jusante da barragem, compatibilizando o risco de *piping* determinado pela aplicação do modelo quantitativo com as ações de manutenção mais frequentes em barragens de aterro (Ana, 2016). Na Tabela 5.5 encontra-se descrito o protocolo de intervenção proposto para os diferentes níveis de risco de *piping* calculados.

Tabela 5.5 – Protocolo de intervenção em barragens de terra baseado no risco de *piping*.

Risco de <i>piping</i>	Ações de intervenção	Local da intervenção
> 30 %	Corte de vegetação excessiva.	Talude de jusante e região a jusante
	Reposição de vegetação (regiões áridas) ou de outro material.	Talude de jusante
	Reparação do sistema de drenagem.	Talude de jusante
	Fechamento de tocas e túneis de animais.	Talude de jusante e região a jusante
	Vedação à passagem ou pastagem de animais.	Talude de jusante e região a jusante
	Reparação dos acessos aos equipamentos e à instrumentação da barragem.	Talude de jusante e região a jusante
> 50 %	Construção de dique para aumentar a altura da água no ponto de saída e diminuir o gradiente hidráulico ao longo do caminho de percolação, reduzindo o potencial de erosão interna.*	Talude de jusante e região a jusante
	A colocação de um filtro de areia, eventualmente carregado com outro material, de forma a evitar a saída de mais material carregado, o que pode originar obstrução regressiva que diminua a velocidade de percolação e o fluxo.*	Talude de jusante e região a jusante
	Recuperação do talude de jusante, e área adjacente, por meio de ações como: reaterro e compactação de regiões erodidas no talude de jusante, selamento dos pontos de fuga d'água, recuperação dos sistemas de drenagem superficial e interna, além de outras definidas por corpo técnico especializado.	Talude de jusante e região a jusante
> 80%	Intervenção imediata para recuperação da estrutura, com ações determinadas por corpo técnico especializado.	Talude de jusante e região a jusante

* Quando manifestados pontos de fuga d'água com acumulação de finos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O nível de intervenção definido por meio do protocolo descrito na Tabela 5.5 é determinado pelo risco de *piping* calculado pelo modelo quantitativo proposto. Os limites de risco de *piping* foram definidos a partir da contemplação do tipo, e magnitude, das anomalias

manifestadas nas barragens (Apêndice A) e do nível de intervenção exigido. Nos resultados presentes na Tabela 5.4, as barragens que apresentaram risco de *piping* entre 30% e 50% manifestavam, em sua maioria, anomalias que poderiam ser mitigadas pelas ações do primeiro grupo do protocolo de intervenção (Tabela 5.5). Da mesma forma, as barragens que apresentaram risco de *piping* entre 50% e 80%, em sua maioria, possuíam anomalias que poderiam ser corrigidas com a execução das ações descritas nos dois primeiros grupos do protocolo proposto. Por fim, o terceiro grupo é representativo de um cenário que deve ser evitado, mas, se ocorrer, necessita de avaliação de corpo técnico especializado para determinar a natureza, a viabilidade e a logística dos procedimentos mitigatórios necessários.

5.7 Conclusões parciais

Neste capítulo verificou-se a consistência do uso da função de Weibull para a quantificação de risco de *piping* em barragens de terra. A proposta de quantificação busca suprir a demanda de complementação requerida na análise de risco qualitativa convencional, funcionando como subsídio para o correto planejamento de monitoramento dos riscos, diminuindo a incidência de casos que possam levar a uma ruptura.

A definição da distribuição de probabilidade deveria abranger o grande campo de oscilação das variáveis pertinentes, já que o intuito da quantificação é reduzir os efeitos de fatores não intrínsecos a avaliação de risco do barramento, como a subjetividade do avaliador. Portanto, a distribuição de Weibull enquadra-se como uma alternativa interessante do ponto de vista da adequação a variabilidade de comportamentos que ela pode apresentar.

A utilização da distribuição de Weibull para quantificação de risco em barragens surge como alternativa para atingir uma representação mais próxima da realidade. É necessário que se busquem formas de expandir essa metodologia e atingir valores mais representativos, pois, quando se estabelece um valor para o risco, ocorre a complementação do conceito e, conseqüentemente, possibilita o desenvolvimento de uma avaliação física, matemática e lógica de cada situação.

Quando bem municiada de informações, a definição dos parâmetros pode ser melhor executada, propiciando uma melhor adequação do modelo na representação do cenário real. A alternativa de ponderar sobre a associação dos parâmetros da distribuição de Weibull com o percentual de preenchimento do reservatório e a susceptibilidade de determinado tipo de solo desenvolver a anomalia é promissora e deve ser melhor estudada e compreendida.

O modelo de confiabilidade para a distribuição de Weibull mostrou-se uma ferramenta que pode trazer grandes benefícios no processo gerencial de tomada de decisões. Apesar do modelo não considerar o nível de deterioração estrutural na análise e, devido a isso, o modelo apresentar uma deficiência na representação de cenários pós-intervenção, sua adaptação à representação do desenvolvimento de *piping* em barragens de terra gera confiança sobre a utilização modelo na gestão e planejamento de manutenção em barragens. É viável, também, sua aplicação em projetos com o intuito de antecipar a evolução do risco de *piping* nos períodos mais críticos da vida útil de uma barragem, como os primeiras anos de operação.

Os resultados encontrados, além de permitir o estabelecimento das prioridades de intervenções nas estruturas, possibilitam uma apreciação mais ampla do desenvolvimento do risco no período em análise. A validação das probabilidades encontradas prova a aplicabilidade e robustez da quantificação de risco de *piping* através da abordagem probabilística utilizando a distribuição de Weibull. Os produtos dessa abordagem alertam sobre a variabilidade de cenários de risco a segurança das barragens e a necessidade do comprometimento dos proprietários com o constante monitoramento e manutenção de suas barragens.

6 ABORDAGEM FUZZY PARA QUANTIFICAÇÃO DO RISCO DE PIPING EM BARRAGENS DE TERRA UTILIZANDO UM CONTROLADOR MAMDANI

Este capítulo aborda o desenvolvimento da metodologia de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra, para suporte a tomada de decisões gerenciais, por meio de um sistema de controle *fuzzy* Mamdani. São inicialmente apresentados os conceitos e definições necessários à compreensão da lógica *fuzzy* e dos sistemas de controle *fuzzy* para depois apresentar o desenvolvimento do modelo propriamente dito, fornecendo resultados e conclusões para a aplicação realizada em cinco barragens de terra.

6.1 Fundamentação teórica sobre lógica *fuzzy*

Os primeiros estudos sobre lógica foram realizados por filósofos gregos, sendo o principal organizador da lógica clássica o grande filósofo Aristóteles (384 – 322 a.C.), com a obra chamada Organon. Muitos estudos foram realizados ao longo do tempo, sucedendo o trabalho deste filósofo (Silva, 2008).

Uma grande contribuição foi dada por George Boole (1848), que apresentou o conceito de lógica associado a resposta binária da verdade (verdadeiro ou falso). Essa forma característica define a chamada lógica clássica, binária, padrão, de Boole ou booleana.

A lógica clássica ou padrão é baseada na bivalência para a resposta de qualquer sistema, problema ou afirmação. Verdadeiro ou falso, certo ou errado, branco ou preto, zero ou um. Um objeto tem uma relação clara e direta de pertencimento ou não pertencimento a determinado conjunto ou classe, como ilustrado na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Lógica padrão (bivalente).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Lofti Zadeh, professor da Universidade da Califórnia, observou que várias situações do cotidiano não se adequavam aos princípios da lógica clássica. Sendo o ser humano inteligente, crítico, perceptivo e possuidor de pensamento cognitivo, a vivência no mundo real é multivalente. A mente humana permite a existência de graus de verdade, ou seja,

admite que há mais situações ou respostas entre o zero e o um ou o branco e o preto. O senso crítico e o pensamento funcionam em escala variável com limites mal definidos, como ilustra a Figura 6.2, sendo multivalente (Zadeh, 1965, 1975; Cox, 1994; Zimmermann, 2010; Haghghi e Ayati, 2016).

Figura 6.2 – Lógica não-padrão (multivalente).



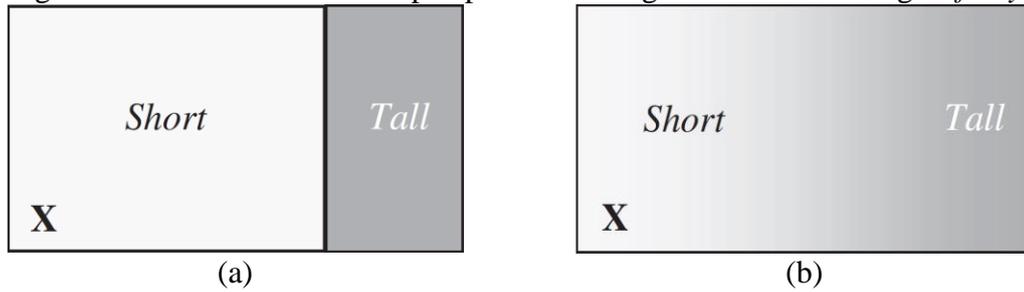
Fonte: Elaborada pelo autor.

Proposta por Lofti Asker Zadeh (1965), a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, ou Teoria dos Conjuntos Nebulosos, que embasa a lógica *fuzzy*, surgiu como um contraponto para problemas ambíguos e incertos onde a Teoria dos Conjuntos Clássica de Boole não se adequa.

De acordo com Haghghi e Ayati (2016), a teoria dos conjuntos *fuzzy* é um método matemático usado para caracterizar e quantificar a incerteza e a imprecisão nas relações funcionais. Esta teoria é muito útil em situações em que há dados insuficientes para caracterizar incertezas por meios e ferramentas estatísticas. Na lógica tradicional, por exemplo, uma afirmação pode ser verdadeira ou falsa e nada no meio. A lógica *fuzzy* tem uma simples ideia básica: as declarações não são apenas verdadeiras ou falsas, a verdade parcial também é aceita.

Quando um problema é vislumbrado a partir da perspectiva *fuzzy* é desfeita a noção clara de limite entre as categorias ou classificações. Como ilustrado na Figura 6.3a, na lógica clássica há um valor que limita a passagem de uma categoria para outra, permitindo uma avaliação clara e direta do que é considerado alto (*tall*) ou baixo (*short*). Já na Figura 6.3b, representando a lógica *fuzzy*, a ausência de um valor limite claro possibilita a interpretação do observador, permitindo a utilização do senso crítico e do pensamento cognitivo.

Figura 6.3 – Contraste entre as perspectivas da lógica clássica e da lógica *fuzzy*.



Fonte: Pedrycz e Gomide (2007).

Através da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, as incertezas são representadas por números *fuzzy*. Um número *fuzzy* N é um conjunto definido no universo dos reais, $N \in \mathbb{R}$. Para cada variável $x \in N$, $\mu_N \in [0,1]$ é chamado de grau de pertinência de x em N . Se $\mu_N(x) = 0$, x é dito não pertencente ao conjunto *fuzzy*, se $\mu_N(x) = 1$, x é dito totalmente pertencente e, se $0 < \mu_N(x) < 1$, x é chamado de membro *fuzzy* (Haghighi e Ayati, 2016).

As funções responsáveis por caracterizar um conjunto *fuzzy* são denominadas funções de pertinência. Funcionam como uma ferramenta que permite estabelecer uma conexão entre conceito e valor, onde cada elemento do conjunto é associado a um grau de pertinência (pertencimento) entre zero e um.

Para Ganoulis (1994) o conceito central da teoria dos conjuntos difusos é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que um elemento pertence a um conjunto. Já Zimmermann (2001) enfatiza que a função de pertinência é o componente crucial de um conjunto *fuzzy*. Portanto, não é de surpreender que as operações com conjuntos *fuzzy* sejam definidas por meio de suas funções de pertinência.

Segundo Pedrycz e Gomide (2007), qualquer função $A: X \rightarrow [0,1]$ pode ser qualificada como uma função de pertinência descrevendo um conjunto *fuzzy*. Na prática, a forma da função de pertinência deve refletir o problema para o qual construímos o conjunto *fuzzy*. Eles devem espelhar nossa percepção do conceito a ser representado e usado na resolução de problemas, o nível de detalhe que pretendemos capturar e o contexto no qual o conjunto *fuzzy* será usado.

Existem, segundo Silva (2015), várias funções de pertinência, como: triangulares, trapezoidais, gaussiana, sino generalizada, sigmoide, forma de Z, forma de S e forma de π . É possível desenvolver, inclusive uma função personalizada para determinada análise. Contudo, de acordo com Ross (2004), as formas mais comuns de funções de pertinência são normalizadas e convexas, salientado, ainda, que elas podem ser simétricas ou assimétricas.

A única condição que uma função de pertinência deve realmente satisfazer, de acordo com Mathworks (2018), é que ela deve variar entre 0 e 1. A função em si pode ser uma curva arbitrária cuja forma podemos definir como uma função que nos convém do ponto de vista da simplicidade, conveniência, velocidade e eficiência.

6.1.1 Conjuntos e números fuzzy

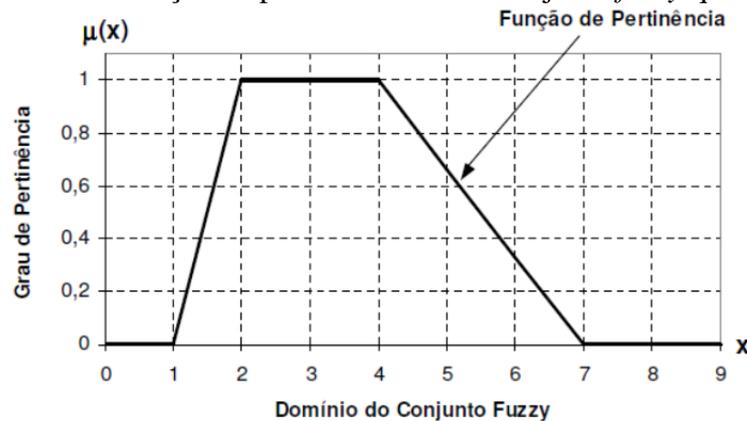
Zadeh (1965) definiu que um conjunto *fuzzy* A em X é caracterizado pela função de pertinência $f_A(x)$ que associa a cada ponto em X um número real no intervalo $[0, 1]$, com o valor de $f_A(x)$ em x representando o “grau de pertencimento” de x em A . Assim, quanto mais próximo for o valor de $f_A(x)$ da unidade, maior será o grau de pertencimento de x em A .

Para Cox (1994) conjuntos *fuzzy* são funções que mapeiam um valor que pode ser membro de um conjunto com um intervalo entre zero e um, indicando seu real grau de pertencimento. O grau zero indica que o valor não pertence ao conjunto e o grau de um indica que o valor é completamente integrante do conjunto. Isso produz uma curva entre os membros do conjunto.

Pedrycz e Gomide (2007) declaram que conceitualmente e algoritmicamente, conjuntos *fuzzy* constituem uma das noções mais fundamentais e influentes em ciência e engenharia. A noção de conjunto *fuzzy* é altamente intuitiva e transparente, pois captura o que realmente se torna uma essência de um modo como o mundo real é percebido e descrito.

Mendel (1995) afirma que um conjunto *fuzzy* F definido em um universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_F(x)$ que assume valores no intervalo $[0, 1]$. Esse conjunto pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico x e seu grau de pertinência: $F = \{(x, \mu_F(x)) \mid x \in U\}$. A Figura 6.4 ilustra uma função de pertinência utilizada para a definição de um conjunto *fuzzy* qualquer.

Figura 6.4 – Função de pertinência de um conjunto *fuzzy* qualquer.

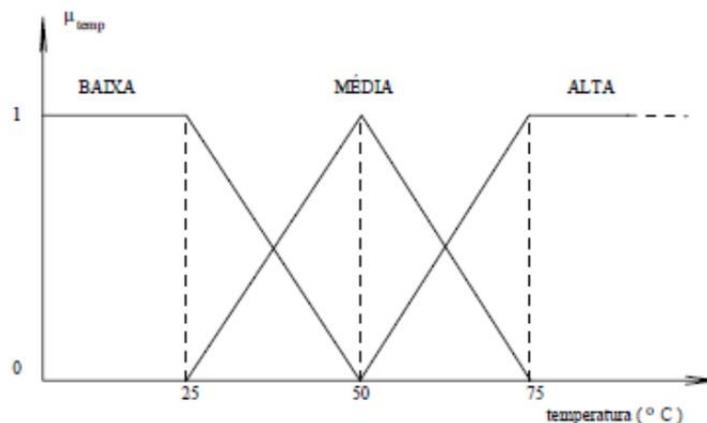


Fonte: Rentería (2006).

Como declara Rentería (2006), uma propriedade importante dos conjuntos *fuzzy* é a sua habilidade de expressar transições graduais de pertinência para não-pertinência. Isto permite a captura, pelo menos de forma grosseira, do sentido de expressões em linguagem natural que são, na maioria das vezes, imprecisas.

O cotidiano é repleto de afirmações vagas. “O dia está relativamente quente.”, “Aquela pessoa é muito alta.”, “Essa negociação é de baixo risco.”. Palavras imprecisas (alto, médio, baixo, jovem, velho, etc.) geram incertezas sobre a afirmação, abrindo margem para a subjetividade na interpretação do ouvinte. Através das funções de pertinência, os conjuntos *fuzzy* representam a atribuição de valores (graus de pertinência) a essas afirmações imprecisas. A Figura 6.5 traz a representação dos conjuntos BAIXA, MÉDIA e ALTA de uma variável temperatura (T).

Figura 6.5 – Representação dos conjuntos *fuzzy* componentes da variável temperatura.



Fonte: Gomide e Gudwin (1994).

Na Figura 6.5 o conjunto *fuzzy* BAIXA é descrito por uma função de pertinência trapezoidal, onde valores de $T \leq 25^\circ\text{C}$ possuem grau de pertinência (μ_{temp}) igual a 1. Quando $T > 25^\circ\text{C}$ o valor de μ_{temp} começa a diminuir, zerando pra $T = 50^\circ\text{C}$. O conjunto *fuzzy* MÉDIA é descrito por uma função triangular, onde $\mu_{\text{temp}} = 1$ corresponde a $T = 50^\circ\text{C}$. Nos intervalos $25^\circ\text{C} \leq T < 50^\circ\text{C}$ e $50^\circ\text{C} < T \leq 75^\circ\text{C}$ a função se comporta de forma crescente e decrescente, respectivamente, zerando nos valores de $T = 25^\circ\text{C}$ e $T = 75^\circ\text{C}$. O conjunto *fuzzy* ALTA é descrito por uma função trapezoidal, onde valores de $T \geq 75^\circ\text{C}$ possuem $\mu_{\text{temp}} = 1$. A função se comporta de forma crescente, iniciando de $T = 50^\circ\text{C}$, no intervalo $50^\circ\text{C} \leq T < 75^\circ\text{C}$.

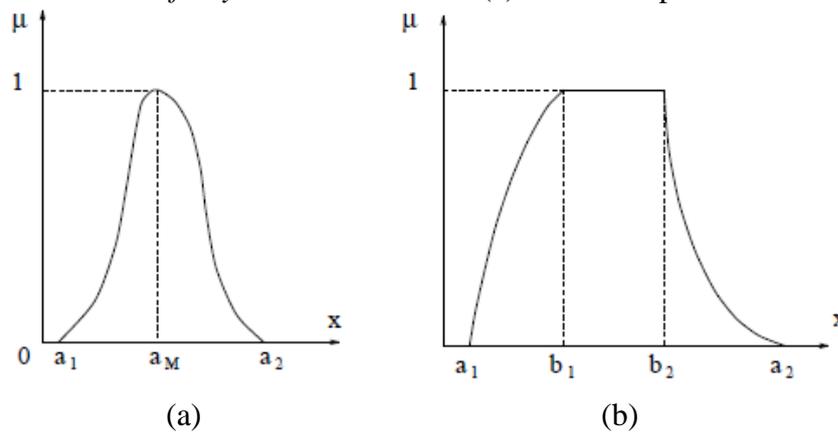
A composição de um conjunto *fuzzy* busca realizar o transporte de uma informação recebida de forma vaga, e não precisa, para uma representação matemática válida, representativa das incertezas e imprecisões inerentes à informação recebida. Os conjuntos *fuzzy* funcionam como uma comunicação entre a linguagem (oral, escrita, etc.) e a representação do modelo matemático em um dado intervalo. Quando este intervalo é pertencente aos números reais, \mathbb{R} , os conjuntos *fuzzy* são denominados números *fuzzy* (Bando, 2002; Rentería, 2006; Pedrycz e Gomide, 2007).

Rentería (2006) afirma que o número *fuzzy* é um caso especial de conjunto *fuzzy* que define um intervalo *fuzzy* nos números reais. Para um número real cujo valor preciso não é conhecido com exatidão, este número é definido através de um intervalo *fuzzy*. De acordo com Rentería (2006), para que um conjunto seja um número *fuzzy*, este deve obedecer às seguintes condições:

- Estar definido nos reais;
- A função de pertinência deve ser contínua;
- O conjunto *fuzzy* deve ser normalizado, ou seja, possuir valor máximo igual a um;
- A função de pertinência, que define o conjunto *fuzzy*, deve ser convexa;

Na Figura 6.6 são ilustrados dois números *fuzzy*, com um máximo (a) e com um plano de máximos (b).

Figura 6.6 – Número *fuzzy*: com um máximo (a) e com um plano de máximos (b).

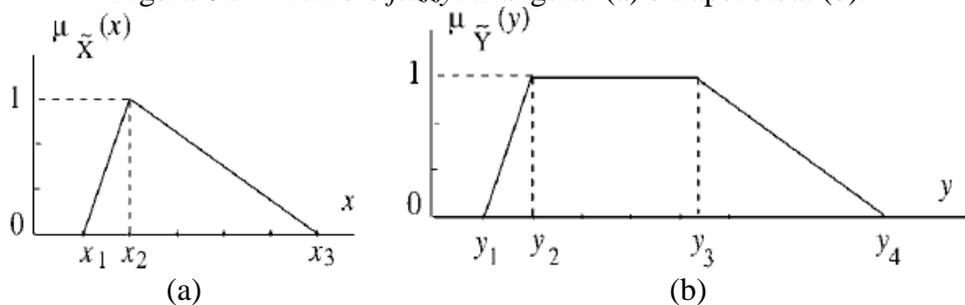


Fonte: Bojadziev e Bojadziev (2007).

Klir e Yuan (1995) declaram que números *fuzzy* e intervalos *fuzzy* devem capturar nossas concepções intuitivas de números ou intervalos aproximados, como números que estão próximos de um dado número real ou números que estão ao redor de um dado número real. Tais conceitos são essenciais para caracterizar estados de variáveis nebulosas e, conseqüentemente, desempenham um papel importante em muitas aplicações, incluindo controle difuso, tomada de decisões, raciocínio aproximado, otimização e estatística com probabilidades imprecisas.

Como são uma forma particular de conjuntos *fuzzy*, os números *fuzzy* também são caracterizados pela função de pertinência que os define, podendo obter várias formas (triangular, trapezoidal, gaussiana, etc.). Por gerarem funções de pertinência com equações mais simples, as formas mais utilizadas de números *fuzzy* são os triangulares e os trapezoidais (Klir e Yuan, 1995; Bando, 2002; Rentería, 2006; Haghghi e Ayati, 2016), apresentadas na Figura 6.7.

Figura 6.7 – Número *fuzzy*: triangular (a) e trapezoidal (b).



Fonte: Ganoulis (1994).

6.1.2 Variável linguística

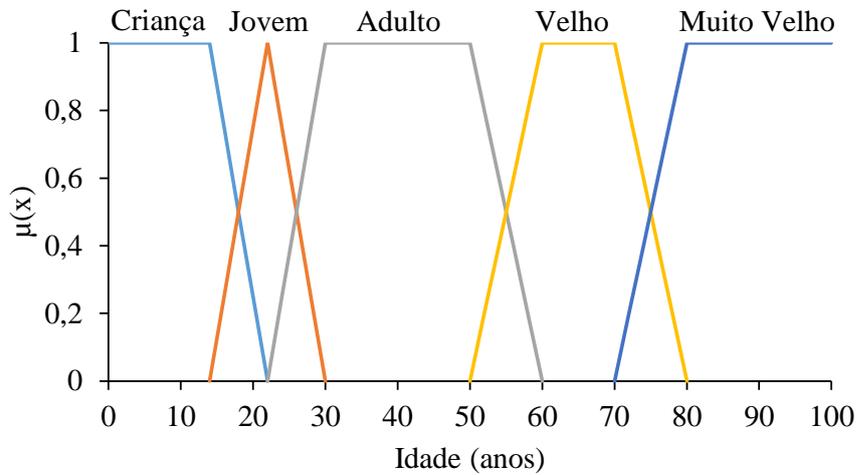
De acordo com Song e Johns (1997), a lógica *fuzzy* está principalmente relacionada à quantificação e raciocínio sobre termos vagos, ou indistintos, que aparecem na linguagem natural. Na lógica *fuzzy*, esses termos nebulosos remetem a variáveis linguísticas (também chamadas de variáveis *fuzzy*). Como declara Gonçalves (2007), os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero), de conectivos lógicos (não, e, ou), de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) e de delimitadores (parênteses).

Zadeh (1975) define variável linguística como uma variável cujos valores são palavras ou sentenças em uma linguagem natural ou artificial. O conceito de variável linguística fornece um meio de caracterização aproximada de fenômenos que são muito complexos ou muito mal definidos para serem passíveis de descrição em termos quantitativos convencionais.

Para Bando (2016), o conceito de variável linguística é muito útil, para lidar com situações que são complexas ou subjetivas. Mas os caminhos matemáticos convencionais não conseguem lidar com expressão linguística naturais de forma eficiente. Portanto, a teoria dos conjuntos *fuzzy* consegue transformar esses termos linguísticos em representações matemáticas.

Para ilustrar o conceito de variável linguística, Bojadziev e Bojadziev (2007) indicam que se considere a palavra idade em uma linguagem natural. Reflete a experiência de um número grande de indivíduos e não pode ser caracterizado com precisão. Empregando conjuntos *fuzzy* (geralmente números *fuzzy*), podemos classificar a idade aproximadamente. Neste caso, a idade pode ser considerada uma variável linguística que assume valores como muito jovens, jovens, de meia-idade, velhas, muito velhas. A Figura 6.8 apresenta um exemplo de representação de uma variável linguística Idade.

Figura 6.8 – Variável linguística Idade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma variável linguística, segundo Cox (1994), encapsula as propriedades de conceitos aproximados, ou imprecisos, de maneira sistemática e computacionalmente útil. Reduz a complexidade aparente de descrever um sistema, combinando uma *tag* semântica com o conceito subjacente. Portanto, uma variável linguística sempre representa um espaço nebuloso (outra maneira de dizer que, quando avaliamos uma variável linguística, criamos um conjunto nebuloso).

A principal função das variáveis linguísticas, como afirma Gonçalves (2007), é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistema analisados através de termos matemáticos convencionais.

Pedrycz e Gomide (2007) ressaltam que a variável linguística é uma noção-chave para construir sistemas *fuzzy* em áreas de aplicação como análise de dados, reconhecimento de padrões, classificação, raciocínio aproximado, controle *fuzzy*, otimização difusa e análise de decisão.

6.1.3 Sistema de controle *fuzzy*

Um modelo *fuzzy* descrito por variáveis linguísticas de entrada passa por um processo de inferência para gerar uma variável de saída, dentro do âmbito de um controlador *fuzzy*. Essa descrição conceitua um sistema de controle *fuzzy*, também denominado de sistema

especialista, pois utiliza do conhecimento e raciocínio de um especialista na composição do processo de inferência (Mamdani e Assilian, 1975; Buckley *et al.*, 1986; Adriaenssens *et al.*, 2004; Medeiros *et al.*, 2016).

A lógica *fuzzy*, como afirmam Mamdani e Assilian (1975), é usada para converter regras de controle heurístico declaradas por um operador humano em uma estratégia de controle automático. Buckley *et al.* (1986) enfatiza que a necessidade de um sistema especialista difuso é evidente quando o raciocínio estatístico convencional e outros métodos de combinação de graus de incerteza são inadequados.

Buckley *et al.* (1986) descreve um sistema especialista baseado em regras *fuzzy* como uma memória de trabalho, uma entrada, uma coleção de regras e uma saída. De acordo com Medeiros *et al.* (2016), uma vez descritos, alguns dos aspectos dos sistemas *fuzzy* podem resumir o sistema de inferência, ou o controlador, em três fases: fuzzificação, inferência e defuzzificação. A Figura 6.9 apresenta uma representação de um sistema de controle *fuzzy*. É possível separar o processo em duas partes: os termos antecedentes e os termos consequentes. Os antecedentes são aqueles termos submetidos ao processo de inferência, enquanto os consequentes são a resposta do sistema ao processo de inferência (Adriaenssens *et al.*, 2004; Simões e Shaw, 2007).

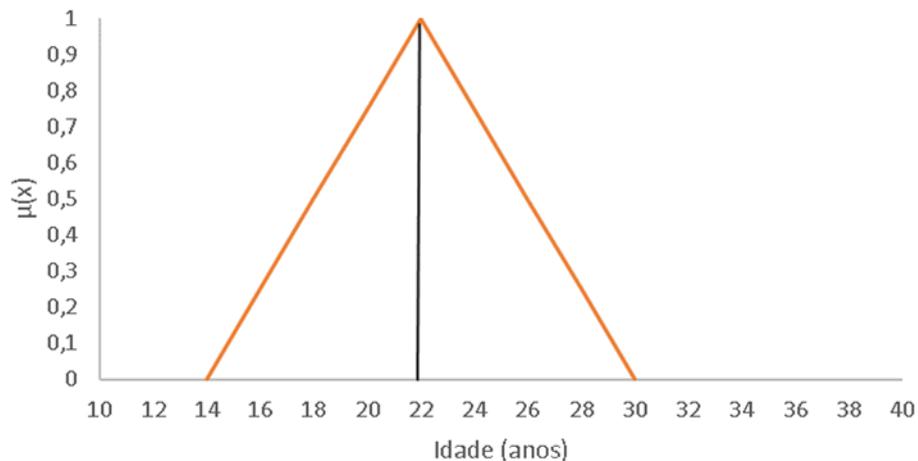


Fonte: Elaborado pelo autor.

A fuzzificação dos dados é o primeiro passo para executar um sistema de controle *fuzzy*. O processo pode ser entendido como o processo de transformar uma informação vaga em um conjunto *fuzzy* por meio de uma função de pertinência. Esse procedimento é realizado a partir do conhecimento de um especialista, que deve julgar a melhor forma de enquadrar dados em variáveis linguísticas representativas do modelo em questão (Ross, 2004; Simões e Shaw, 2007; Cavalcanti *et al.*, 2012; Bando, 2016). A Figura 6.10 apresenta um exemplo do conjunto *fuzzy* Jovem, referente a variável linguística Idade. Como é possível observar, pessoas entre quatorze e trinta anos estão inseridas, com determinados graus de

pertinência, no conjunto *fuzzy* Jovem, caracterizado o aspecto vago presente na descrição de conjuntos fuzzificados. É possível também constatar que pessoas de vinte e dois anos possuem $\mu(x) = 1$ para esse conjunto, ou seja, sem sombra de dúvidas, uma pessoa de 22 anos pode ser classificada como jovem. Já, por exemplo, uma pessoa de 18 anos apresentará um $\mu(x)$ entre 0 e 1 ($0 < \mu(x) < 1$), tendo, portanto, um menor grau de pertencimento ao conjunto *fuzzy* Jovem.

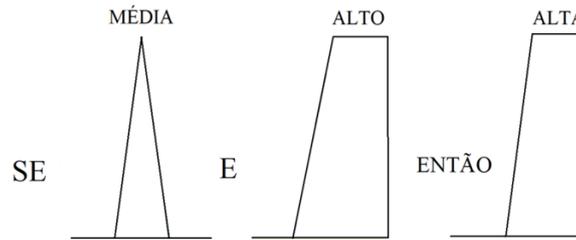
Figura 6.10 – Conjunto *fuzzy* Jovem da variável linguística Idade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

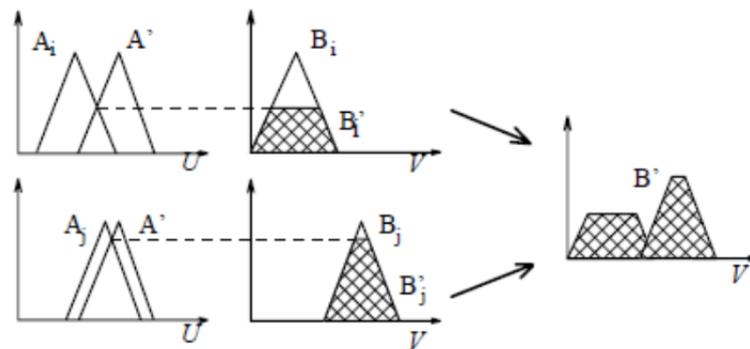
O processo inferencial conecta as variáveis de entrada à variável de saída a partir da ativação das regras de inferência, fornecidas por especialistas e armazenadas em uma base de conhecimento. Para Medeiros *et al.* (2016), na fase de inferência, os valores linguísticos, resultados da fuzzificação (termos antecedentes), são combinados de forma a gerar valores linguísticos de saída (termos consequentes), de acordo com regras de inferência *fuzzy* determinadas. A composição dos valores entrada no sistema gera uma determinada resposta da variável de saída, como apresentado nas Figuras 6.11. A Figura 6.12 ilustra o mecanismo de inferência na forma de um controlador *fuzzy*. Realizado o processo de inferência, o controlador gera a resposta do sistema em uma saída representada por uma variável *fuzzy* que deve ser defuzzificada para um valor discreto.

Figura 6.11 – Exemplo de regra de inferência *fuzzy*.



Fonte: Adaptado de Matos (2018).

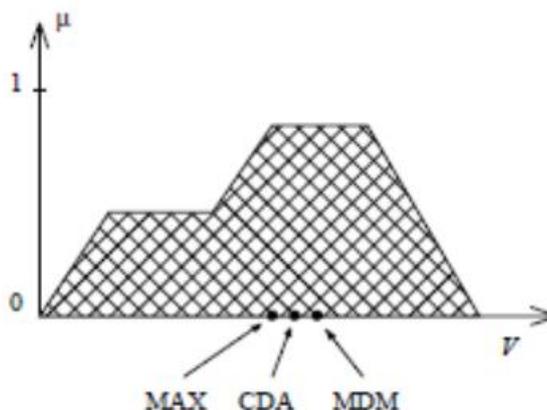
Figura 6.12 – Controlador *fuzzy*.



Fonte: Gomide e Gudwin (1994).

A etapa de defuzzificação consiste em transportar a variável resposta fuzzificada, gerada pelo controlador, para o domínio discreto. A defuzzificação deve ser executada, pois em muitas aplicações práticas é necessária uma ação de controle discreta (Lee, 1990; Gomide e Gudwin, 1994). A escolha da estratégia de defuzzificação não possui regras estabelecidas, porém deve ser realizada objetivando compatibilizar o tipo de resposta discreta esperada com a resposta *fuzzy* fornecida pelo sistema. As estratégias mais comuns para defuzzificação incluem: o critério do máximo (MAX), que escolhe o ponto onde a função inferida tem seu máximo, a média dos máximos (MDM), que representa o valor médio dentre todos pontos de máximo, quando existe mais de um máximo, e o método do centro de área (CDA), que retorna o centróide de área da função inferida (Gomide e Gudwin, 1994; Kaushik *et al.*, 2017; Talon e Curt, 2017; Greenfield, 2018). A Figura 6.13 ilustra os métodos de defuzzificação comentados.

Figura 6.13 – Métodos de defuzzificação.



Fonte: Gomide e Gudwin (1994).

6.2 Quantificação de risco de *piping* em barragens de terra por abordagem *fuzzy*

6.2.1 Levantamento de dados

Para elaboração do modelo de quantificação do risco de *piping* utilizando os conjuntos *fuzzy* é necessário o conhecimento do especialista sobre o fenômeno, de forma que os seus parâmetros governantes possam ser identificados e fuzzificados para considerar as suas incertezas e a sua influência na resposta do modelo. Para tanto, foram utilizados e analisados dados obtidos no Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará, no Portal Hidrológico do Ceará, mantidos, respectivamente, pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (SRH-CE) e pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), além das vistorias realizadas pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) entre os anos de 2006 e 2015 nas barragens Cipoada, Itaúna, Jaburu I, Martinópolis e Quandú, situadas no estado do Ceará (Brasil).

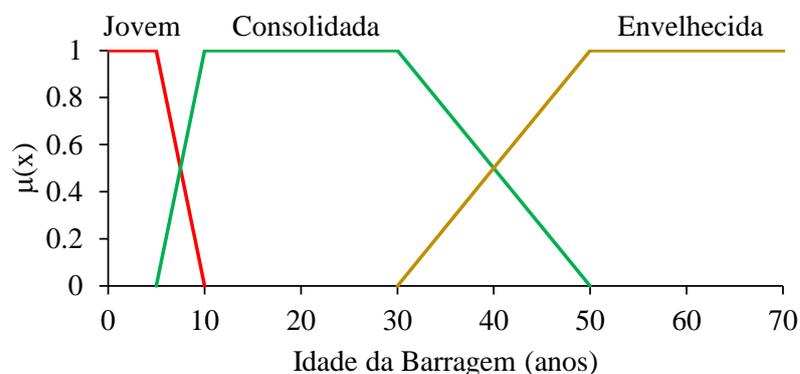
6.2.2. Definição e fuzzificação dos parâmetros de entrada do modelo

Com base nos dados das vistorias de campo, na literatura técnica (Fell *et al.*, 2003; Anderson e Ferguson, 2015; Van Beek, 2015; Wang *et al.*, 2016), na legislação vigente e na vivência do especialista no âmbito de segurança de barragens foram selecionadas os seguintes parâmetros de entrada para o modelo proposto para quantificação do risco de *piping*: idade da barragem (IB), susceptibilidade dos solos ao *piping* (SS), percentual de acumulação do reservatório (PR) e nível de deterioração da barragem (ND).

Cada parâmetro de entrada utilizado no desenvolvimento do modelo de quantificação do risco de *piping* em barragens de terra foi considerado como representado por três conjuntos *fuzzy* constituindo variáveis linguísticas específicas dependendo da natureza do parâmetro fuzzificado. Convém salientar que a montagem de tais conjuntos *fuzzy* é feita a partir da análise das informações das vistorias técnicas feitas nas barragens citadas anteriormente por parte do especialista em segurança da barragem. Trata-se de uma análise ainda subjetiva, razão pela qual, a metodologia proposta para a quantificação do risco é baseada na fuzzificação dos parâmetros de entrada do modelo.

Apesar do *piping* não ser causado pelo envelhecimento dos solos nos aterros ou na fundação da barragem é sabido que a capacidade de uma barragem para resistir a forças erosivas não é constante ao longo do tempo (ICOLD, 2016). O solo é um material de comportamento não elástico, ou seja, os ciclos de carregamento e descarregamento do reservatório podem causar deformações irreversíveis, criando zonas de maior vulnerabilidade ao longo do tempo. Devido a isso e ao embasamento fornecido pela metodologia de classificação de risco das barragens brasileiras, que considera a idade das barragens como fator influente na avaliação, este trabalho utiliza tal parâmetro como entrada do modelo de avaliação de risco de ocorrência de *piping* em barragens de terra. A fuzzificação do parâmetro Idade da Barragem foi feita com base na Resolução N° 143 de 17 de novembro de 2012, do Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2012), que considera que a barragem apresenta uma classificação quanto ao risco mais elevada nos dez primeiros anos, e após 60 anos de operação. Com base nestes critérios foram definidos os conjuntos *fuzzy* Jovem, Consolidada e Envelhecida, apresentados na Figura 6.14.

Figura 6.14 – Conjuntos *fuzzy* para o parâmetro Idade da Barragem



Fonte: Elaborada pelo autor.

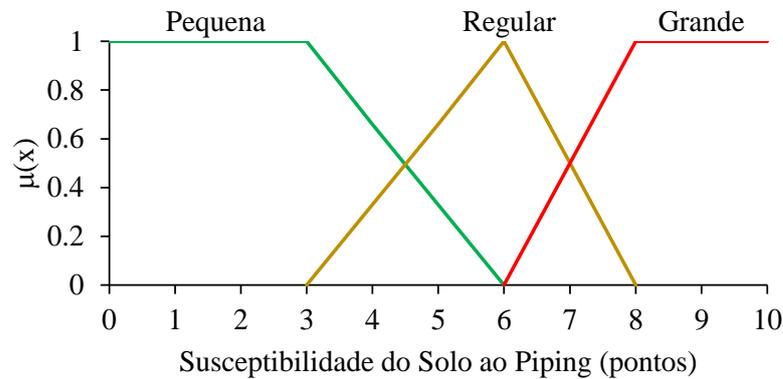
É sabido, que a natureza do solo que constitui a estrutura do barramento é um fator importante na definição da susceptibilidade ao *piping* da estrutura, e conseqüentemente, deve ser considerado como um parâmetro de entrada no modelo de quantificação do risco de *piping* nas barragens (Hunter, 2012; ICOLD, 2013, 2016). De uma forma geral, solos finos não coesivos e de menor peso específico, como os siltes, apresentam menor resistência ao processo de erosão interna pela ação do fluxo d'água na estrutura da barragem, sendo mais susceptíveis, portanto, ao *piping*. Em contrapartida, as argilas apresentam maior resistência ao arraste, e conseqüentemente, menor susceptibilidade ao *piping*, em especial quando presentes em solos bem graduados (Sherard *et al.*, 1963; Kovács, 1981). Neste trabalho, para a definição dos conjuntos *fuzzy* que representam a influência do parâmetro Susceptibilidade do Solo ao *piping*, foi adotada, uma pontuação (Tabela 6.1) para cada tipo de solo identificado como constituinte predominante na estrutura do barramento. De acordo com o critério adotado, quanto maior for a susceptibilidade do solo ao *piping*, maior será a pontuação dada. Conforme com as informações apresentadas na Tabela 6.1, o solo menos susceptível ao *piping* dentre os listados é o solo SC, e o solo mais susceptível é o ML, classificados de acordo com os critérios do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (Das, 2013). Os valores específicos para cada tipo de solo foram atribuídos de acordo com a perspectiva e interpretação do especialista (modelador) sobre as informações disponíveis para essa variável, permitindo a fuzzificação da mesma. A Figura 6.15 mostra a variável linguística composta pelos conjuntos Baixo, Regular e Alta atribuídos ao parâmetro Susceptibilidade do Solo ao *Piping*, definidas de acordo com a pontuação apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Pontuação para susceptibilidade ao *piping* para diferentes tipos de solo.

Solo	SC	CL	SM	ML	SC/SM	SC/ML	CL/SM	CL/ML
Pontuação	1	4	8	10	4,5	5,5	6	7

Fonte: Elaborada pelo autor.

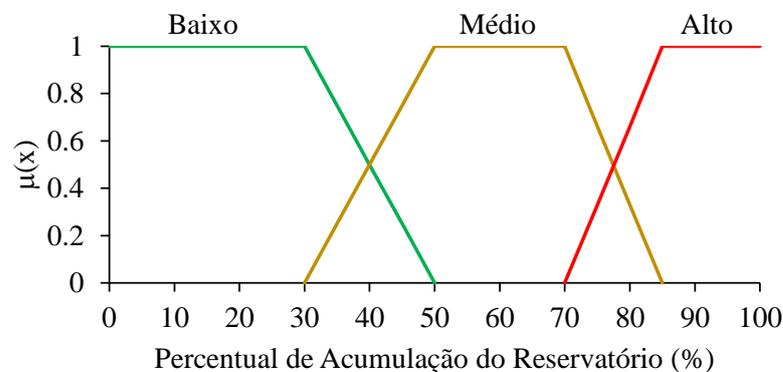
Figura 6.15 – Conjuntos *fuzzy* para o parâmetro Susceptibilidade do Solo ao *Piping*



Fonte: Elaborada pelo autor.

O parâmetro de entrada Percentual de Acumulação do Reservatório foi considerado por ser um indicativo do nível dos gradientes hidráulicos existentes devido ao fluxo de água no interior da estrutura do barramento. Como em regiões semiáridas as barragens são submetidas a ciclos de enchimento e secagem anualmente, gerando uma grande variabilidade no nível reservatórios, foram consideradas para este parâmetro de entrada do modelo de quantificação do risco de *piping* os conjuntos *fuzzy* Baixo, Médio e Alto, definidos pelas funções de pertinência mostradas na Figura 6.16. Espera-se que as condições de fluxo mais severas no interior da barragem ocorram quando da ação da maior carga hidráulica aplicada à estrutura, que se dá em maiores níveis de acumulação, e que correspondem às situações nas quais os riscos de ocorrência de *piping* são mais elevados.

Figura 6.16 – Conjuntos *fuzzy* para o parâmetro Percentual de Acumulação do Reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A avaliação do estado físico da estrutura, buscando identificar situações de deterioração dos seus elementos, ou comprometimento dos dispositivos essenciais ao seu bom funcionamento é um parâmetro importante a ser considerado num modelo cujo objetivo é avaliar o risco de *piping* em uma barragem de terra. Normalmente, este tipo de avaliação está sujeito a um grau elevado de subjetividade, pois depende da experiência do técnico responsável por definir as magnitudes das anomalias presentes na estrutura da barragem durante as inspeções realizadas. Assim sendo, foi adotado como parâmetro de entrada no modelo de previsão do risco de *piping* o Nível de Deterioração da barragem, cuja representação na forma de conjuntos *fuzzy* tem por objetivo minimizar o nível de subjetividade existente no levantamento das anomalias presentes e sua influência na resposta final do modelo proposto.

A determinação do parâmetro Nível de Deterioração é feita de acordo com as anomalias observadas na estrutura do barramento durante as inspeções realizadas. A Tabela 6.2 apresenta a descrição das principais anomalias observadas e a pontuação proposta para expressar a sua relação com a ocorrência de *piping* na barragem (Brasil, 2002). Uma vez determinadas o conjunto de anomalias, os pesos atribuídos às mesmas são somados de forma a se definir o Nível de Deterioração. Para levar em consideração as incertezas existentes nesta estimativa, e com base na soma dos pesos obtidos, para este parâmetro foram adotadas os conjuntos *fuzzy* nível de deterioração baixo, alerta e crítico, apresentados na Figura 6.17.

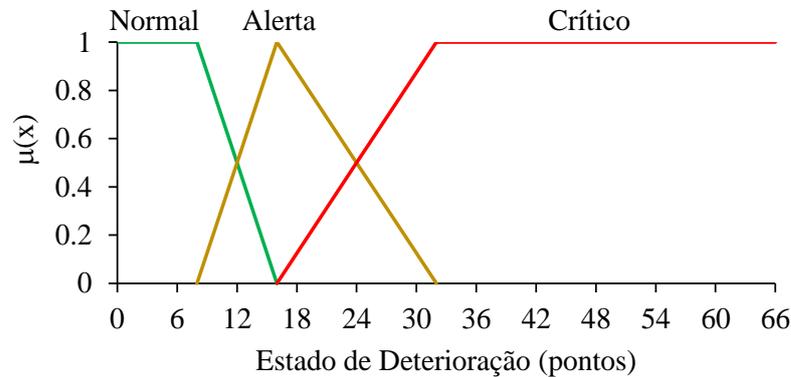
Tabela 6.2 – Pontuação para as anomalias referentes ao nível de deterioração da barragem

Anomalias	Magnitude			
	I	P	M	G
	Pontuação			
Afundamentos e buracos no talude de jusante	0	1	2	3
Árvores e arbustos no talude de jusante				
Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem				
Cavernas e buracos nas ombreiras				
Erosões nas ombreiras	1	2	3	4
Erosões nos encontros das ombreiras				
Erosões no talude de jusante	1	2	4	8
Escorregamentos no talude de jusante				
Carreamento de material na água dos drenos	1	4	8	10
Fuga d'água na região a jusante				
Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante				

Onde: I = insignificante, P = pequeno, M = médio; G = grande.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.17 – Conjuntos *fuzzy* para o parâmetro Nível de Deterioração da barragem.

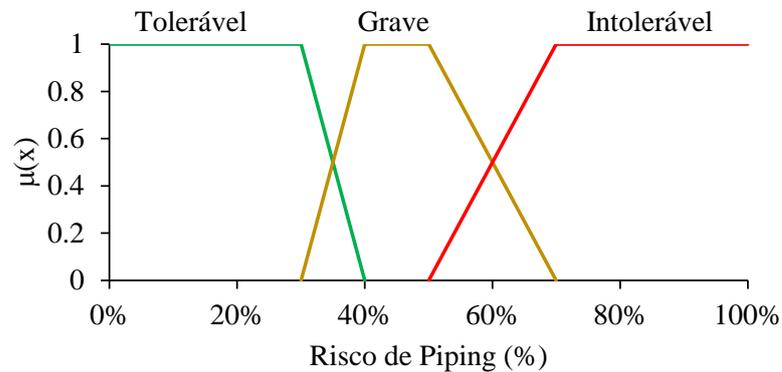


Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2.3 Definição e fuzzificação do risco de piping

A combinação entre cenários formados por combinações dos quatro parâmetros de entrada descritos e apresentados anteriormente define o risco de ocorrência de *piping* expresso em valores que variam de 0 a 100%. No processo de modelagem do risco de *piping* é também necessário realizar a sua fuzzificação, e para tanto, foi estabelecida sua variável linguística, cujos conjuntos *fuzzy* constituintes são Tolerável, Grave e Intolerável, apresentados na Figura 6.18. Tal definição é feita a partir das análises dos dados obtidos nas vistorias das duas barragens utilizadas no presente estudo, que se referem às anomalias presentes e também ao histórico das intervenções realizadas ao longo do tempo. De acordo com os critérios adotados nas definições dos conjuntos *fuzzy*, o risco de *piping* é tolerável quando a estrutura não apresenta risco de ruptura iminente, nem evidências claras da ocorrência de *piping*, possibilitando maior intervalo entre as vistorias. O estado grave engloba os cenários nos quais as barragens apresentam sinais de ocorrência, ou progressão do fenômeno do *piping*, com a identificação da presença de anomalias mais graves, determinando a necessidade de vistorias em menor periodicidade. Já o estado intolerável descreve cenários de risco eminente de ruptura, com anomalias em estágios avançados e com grandes magnitudes, carecendo de monitoramento constante.

Figura 6.18 – Conjuntos *fuzzy* adotados para o parâmetro de saída Risco de *Piping*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

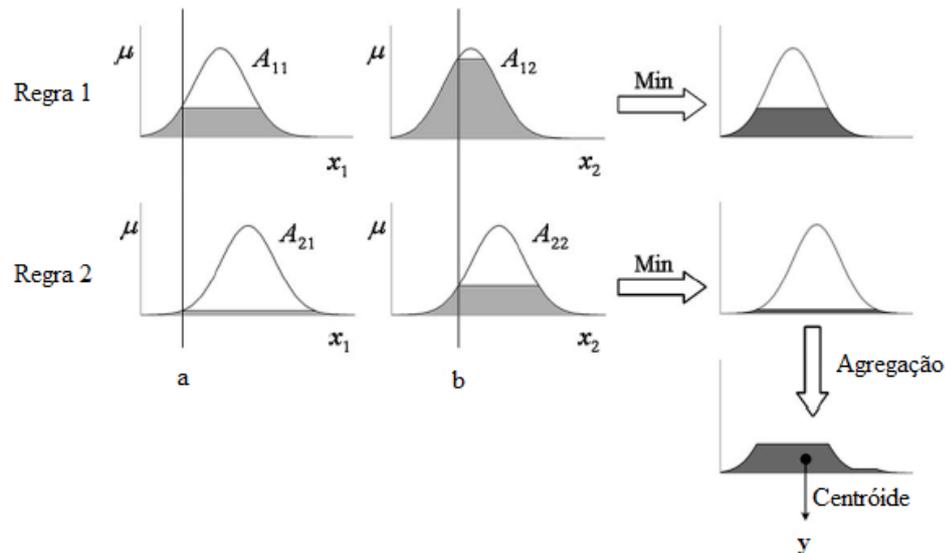
6.2.4 Previsão do risco de piping utilizando o operador fuzzy Mamdani

Um modelo *fuzzy* descrito por variáveis linguísticas de entrada passa por um processo de inferência para gerar uma resposta, dentro do âmbito de um controlador *fuzzy*. O controlador *fuzzy*, também denominado de sistema especialista, utiliza o conhecimento sobre o sistema modelado para estabelecer relações entre as variáveis linguísticas dos parâmetros de entrada e a resposta do modelo, podendo-se citar como exemplo: “SE” a idade da barragem é “envelhecida”, “E” o solo tem susceptibilidade “alta” ao *piping*, “E” o percentual de acumulação do reservatório é “alto”, “E” o nível de deterioração da barragem é “crítico”, “ENTÃO” o risco de *piping* é “intolerável”. O estabelecimento de um conjunto de regras como este, chamadas de regras de inferência, permite que a partir dos valores estimados para cada parâmetro de entrada, se obtenha um novo conjunto *fuzzy*, que após um processo de defuzzificação (Zimmermann, 2010; Kosinski e Rosa, 2013; Silva *et al.*, 2016), fornece o risco de *piping* da barragem, e a incerteza envolvida nesta estimativa, que dependerá no nível de incerteza dos parâmetros de entrada alimentados no sistema.

No controlador *fuzzy* Mamdani, uma vez fuzzificados todos os parâmetros envolvidos, são estabelecidas regras de inferência para diferentes combinações para as variáveis linguísticas representativas dos parâmetros de entrada, utilizando operadores booleanos “E”, ou “OU”, e a correspondente variável linguística para a resposta do modelo, conforme exemplificado anteriormente (Mamdani e Assilian, 1975; Moon *et al.*, 2011; Akgun *et al.*, 2012; Alavi, 2013; Chawla *et al.*, 2018). A Figura 6.19 ilustra a operação de um controlador Mamdani para a previsão de uma resposta “y” de um modelo cujos parâmetros de entrada são

x_1 e x_2 , e considerando apenas duas regras de inferência que representa as relações entre as variáveis linguísticas entre os parâmetros considerados.

Figura 6.19 – Operação do controlador *fuzzy* Mamdani.



Fonte: Adaptado de Bettocchi *et al.* (2007).

No exemplo ilustrado na Figura 6.19, os valores a e b , de x_1 e x_2 , respectivamente, são inseridas no modelo iniciando o processo de ativação das regras de inferência. Nessa etapa, os componentes da parte antecedente (inputs) são associados através de operadores lógicos “E” e “OU”, objetivando compor a parte consequente (resposta) do modelo. O operador “E” é utilizado quando os cenários descritos pelos parâmetros de entrada devem ocorrer simultaneamente para gerar a resposta do modelo. Por outro lado, o operador “OU” deve ser empregado quando os cenários representados pelos parâmetros de entrada não necessitam de ocorrência concomitante para conceber uma determinada resposta.

As sentenças ligadas pelo operador “OU” geralmente fornecem como resposta para o consequente (output) o maior grau de pertinência. Em contrapartida, as sentenças compostas por operadores “E” fornecem como resposta o menor grau de pertinência. Como é possível observar nas Regras 1 e 2, onde o operador “E” associa as variáveis de entrada, os graus de pertinência da variável x_1 [$\mu(a)$] foram menores, nas duas regras, que os graus de pertinência da variável x_2 [$\mu(b)$]. Assim, para a parte consequente são transportados, portanto, os menores valores ativados nos conjuntos A_{11} e A_{21} . Denomina-se essa fase do processo como implicação, onde os graus de pertinência obtidos na ativação das regras delimitam o conjunto de saída representativo da resposta do modelo referente a cada regra.

Encerradas as fases de ativação e implicação, inicia-se a fase de agregação dos conjuntos de saída obtidos com a ativação de cada regra de inferência. Após a agregação realizada, tem-se uma nova função de pertinência para a resposta do modelo, que após passar por um processo de defuzzificação, fornece a resposta para o parâmetro modelado. Um dos métodos de defuzzificação mais comuns é o método do centroide (Kaushik *et al.*, 2017; Talon e Curt, 2017; Greenfield, 2018), cuja resposta do modelo é obtida como sendo o valor correspondente ao centroide da figura geométrica definida pela função de pertinência obtida após o processo de agregação.

Para o desenvolvimento do modelo de quantificação do risco utilizando um controlador Mamdani foram definidas 81 regras de inferência, de forma a abranger todas as combinações de cenários possíveis. Para a determinação destas regras de inferência foi estabelecido um sistema de pesos, para os parâmetros de entrada. A cada parâmetro de entrada foi atribuído um grau de relevância em relação a formação de *piping* na forma de um valor de um peso, conforme mostrado na Tabela 3, a partir da qual é possível se fazer uma definição para o conjunto *fuzzy* do risco de *piping*, considerando a somatória dos pesos que representam os diferentes cenários possíveis, facilitando assim, o estabelecimento de todas as regras de inferência.

Tabela 6.3 – Sistema de pesos (P) das variáveis de entrada e resposta da inferência.

Idade da Barragem (IB)	Conjunto	Jovem	Consolidada	Envelhecida	Σ Pesos	Resposta
	Peso	3	1	2		
Susceptibilidade do Solo ao <i>Piping</i> (SP)	Conjunto	Pequena	Regular	Grande	7-9	Tolerável
	Peso	1	2	3		
Percentual de Acumulação do Reservatório (PR)	Conjunto	Baixo	Médio	Alto	10-14	Grave
	Peso	2	4	6		
Nível de Deterioração da Barragem (ND)	Conjunto	Normal	Alerta	Crítico	15-21	Intolerável
	Peso	3	6	9		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para exemplificar o funcionamento do sistema de pesos presente na Tabela 6.3 considere o seguinte cenário: uma barragem “jovem”, com solo “muito susceptível” ao *piping*, com reservatório “baixo” e estado de “alerta” em relação a deterioração da estrutura. Somando os pesos referentes aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada definidos nesse cenário, obtém-se 14 pontos, que corresponde ao conjunto *fuzzy* “grave” para o risco de *piping*. Isso significa que a combinação dos conjuntos *fuzzy* de entrada descrita ativa uma

regra de inferência que gera como resposta um conjunto *fuzzy* de saída classificado como grave.

6.3 Resultados do risco de piping para controlador Mamdani com 81 regras de inferência

Definidas as variáveis de entrada e saída e a base de conhecimento constando as regras de inferência, o modelo pode ser alimentado com os valores das variáveis de entrada para gerar a resposta referente ao risco de desenvolvimento de *piping* na barragem. A Tabela 6.4 apresenta um resumo geral do modelo construído no software MATLAB. Já a Tabela 6.5 traz um resumo dos valores utilizados para alimentar as variáveis de entrada.. Uma visão geral do modelo no MATLAB é apresentada no Apêndice C.

Tabela 6.4 – Controlador Mamdani para Risco de *Piping*.

Variável	Conjuntos	Função de Pertinência	Domínio da função de pertinência
Idade da Barragem	Jovem	Trapezoidal (trapmf)	[0 0 5 10]
	Consolidada	Trapezoidal (trapmf)	[5 10 30 50]
	Envelhecida	Trapezoidal (trapmf)	[30 50 100 100]
Susceptibilidade do Solo ao <i>Piping</i>	Pouco susceptível	Trapezoidal (trapmf)	[0 0 3 6]
	Susceptível	Triangular (trimf)	[3 6 8]
	Muito susceptível	Trapezoidal (trapmf)	[6 8 10 10]
Percentual de Acumulação do Reservatório	Baixo	Trapezoidal (trapmf)	[0 0 30 50]
	Médio	Trapezoidal (trapmf)	[30 50 70 85]
	Alto	Trapezoidal (trapmf)	[70 85 100 100]
Nível Deterioração da Barragem	Normal	Trapezoidal (trapmf)	[0 0 8 16]
	Alerta	Triangular (trimf)	[8 16 32]
	Crítico	Trapezoidal (trapmf)	[16 32 66 66]
Risco de <i>Piping</i>	Tolerável	Trapezoidal (trapmf)	[0 0 0.3 0.4]
	Grave	Trapezoidal (trapmf)	[0.3 0.4 0.5 0.7]
	Intolerável	Trapezoidal (trapmf)	[0.5 0.7 1 1]

Fonte: Elaborada pelo autor.

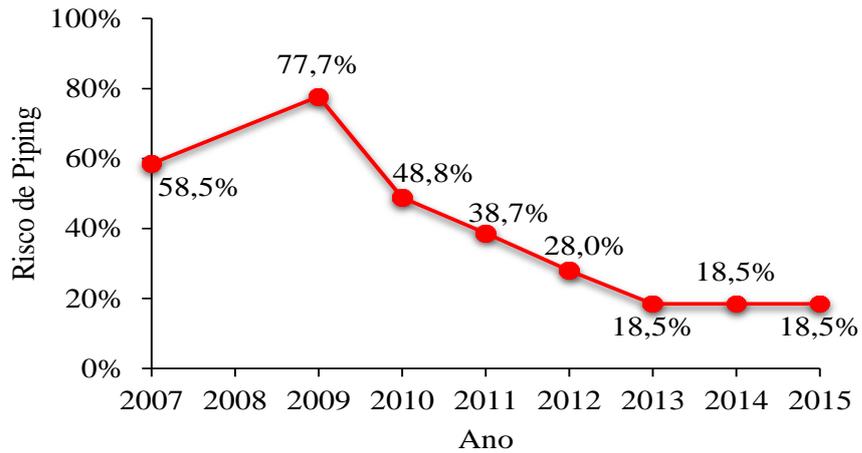
Tabela 6.5 – Resumo dos valores de alimentação das variáveis de entrada.

Ano	Barragem	IB	PR	ND	SP
2006	Itaúna	5	68,79%	14	2,5
	Jaburu I	23	94,51%	3	2,5
	Martinópolis	22	16,17%	4	10
2007	Cipoada	15	13,35%	19	7
	Itaúna	6	85,58%	22	2,5
	Jaburu I	24	84,46%	18	2,5
	Quandú	17	80,61%	36	2,5
2009	Cipoada	17	99,52%	19	7
	Itaúna	8	98,28%	18	2,5
	Jaburu I	26	98,01%	30	2,5
	Martinópolis	25	100,00%	4	10
	Quandú	19	100,00%	15	2,5
2010	Cipoada	18	62,80%	16	7
	Itaúna	9	46,98%	30	2,5
	Jaburu I	27	88,37%	30	2,5
	Martinópolis	26	50,98%	14	10
	Quandú	20	36,31%	9	2,5
2011	Cipoada	19	45,55%	10	7
	Itaúna	10	89,94%	6	2,5
	Jaburu I	28	100,00%	22	2,5
	Martinópolis	27	64,26%	12	10
	Quandú	21	100,00%	7	2,5
2012	Cipoada	20	15,73%	10	7
	Itaúna	11	62,95%	4	2,5
	Jaburu I	29	75,73%	13	2,5
	Martinópolis	28	27,15%	18	10
	Quandú	22	88,84%	10	2,5
2013	Cipoada	21	7,54%	8	7
	Itaúna	12	35,66%	3	2,5
	Jaburu I	30	55,70%	10	2,5
	Martinópolis	29	21,10%	7	10
	Quandú	23	52,43%	2	2,5
2014	Cipoada	22	10,24%	8	7
	Itaúna	13	28,35%	3	2,5
	Martinópolis	30	12,37%	11	10
	Quandú	24	22,65%	2	2,5
2015	Cipoada	23	2,97%	8	7
	Itaúna	14	42,31%	10	2,5
	Jaburu I	32	20,95%	10	2,5
	Martinópolis	31	13,26%	2	10
	Quandú	25	92,44%	4	2,5

Fonte: COGERH (2006 a 2015); SRH (2018); FUNCEME (2018); Autor (2018).

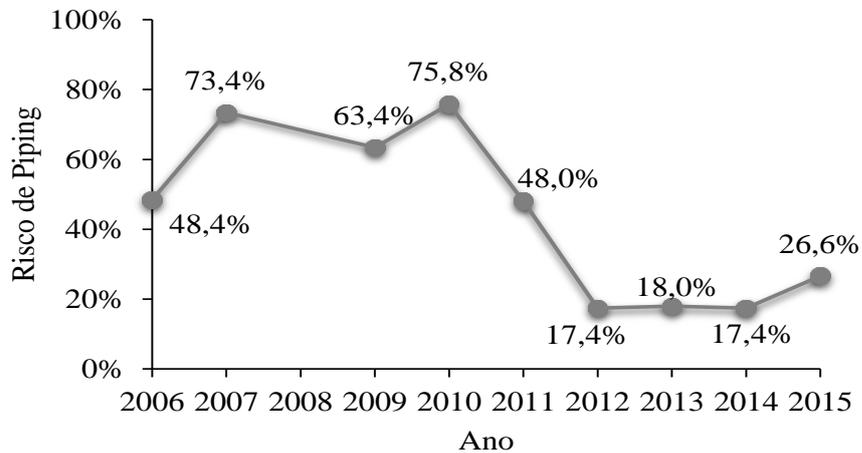
Entrando com os parâmetros presentes na Tabela 6.5 no modelo construído na *toolbox* de lógica *fuzzy*, disponível no *software* MATLAB, e utilizando o controlado Mamdani, descrito e apresentado anteriormente, com metodologia do centróide para defuzzificação, foram obtidos os resultados do risco de *piping*, em cada barragem, para o período analisado, presentes nas Figuras 6.20 a 6.24.

Figura 6.20 – Evolução do risco de *piping* na barragem Cipoada.

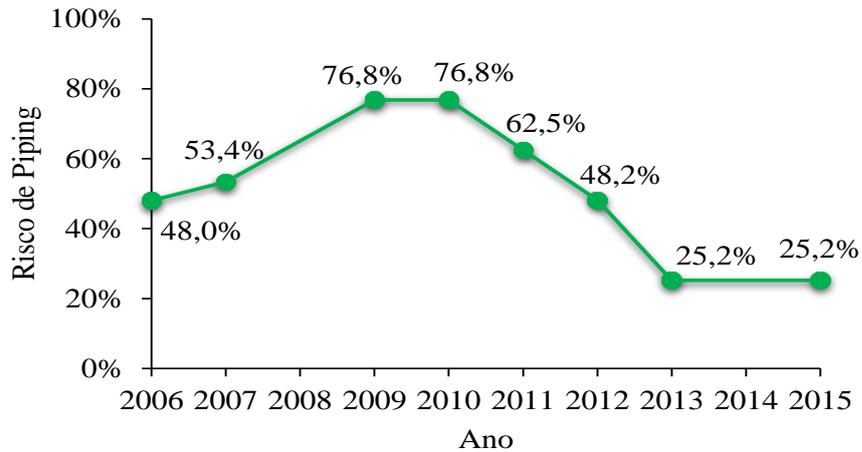


Fonte: Elaborada pelo autor.

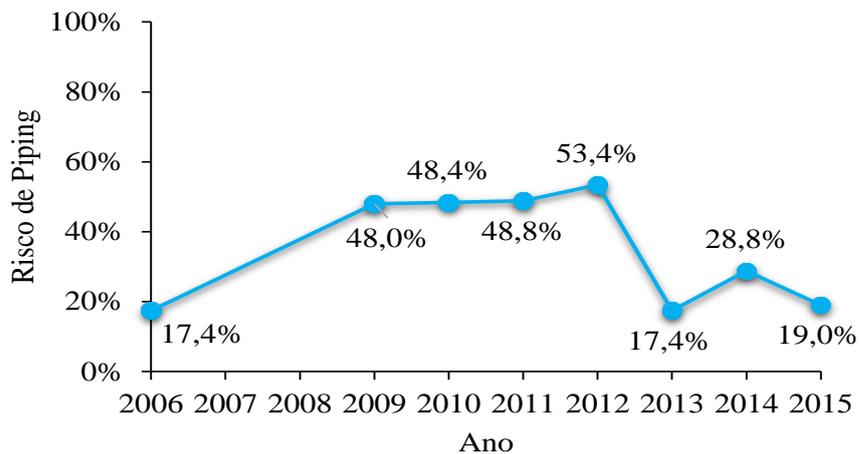
Figura 6.21 – Evolução do risco de *piping* na barragem Itaúna.



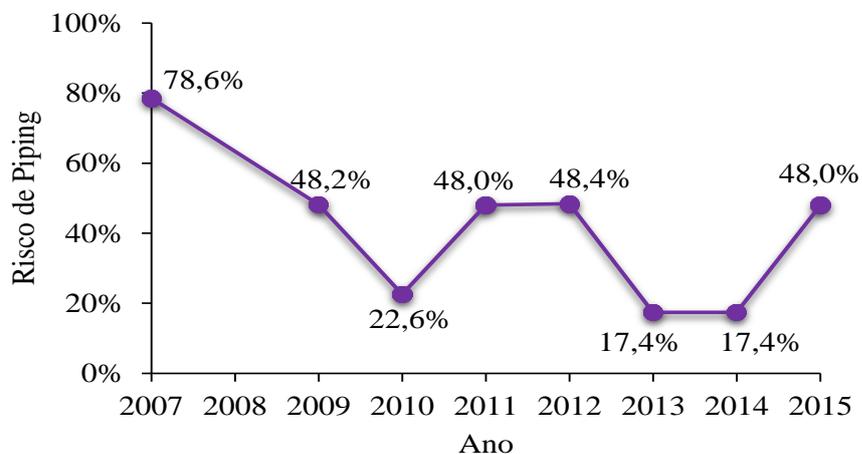
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.22 – Evolução do risco de *piping* na barragem Jaburu I.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.23 – Evolução do risco de *piping* na barragem Martinópolis.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.24 – Evolução do risco de *piping* na barragem Quandú.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na barragem Cipoada, o risco de *piping* atingiu o maior valor, de 77,7%, no ano de 2009 (Figura 6.20). Houve intervenção nessa barragem para recuperação do talude de jusante neste mesmo ano (COGERH, 2009). A intervenção para recuperação estrutural da barragem possui relação direta com a diminuição da pontuação estabelecida para o parâmetro Nível de Deterioração, que, por sua vez, influencia significativamente a redução constatada na resposta do sistema para os anos posteriores. No decorrer do longo período de estiagem que sucedeu o ano de 2009 (CGEE, 2016), a diminuição de acumulação do reservatório, associada à redução da pontuação do parâmetro Nível de Deterioração (Tabela 6.5), devido à ação mitigatória promovida, corroboraram com a atenuação gradual do risco de ocorrência *piping* de ano a ano na barragem Cipoada.

Na barragem Itaúna (Figura 6.21), os maiores valores para o risco de *piping* foram constatados no intervalo 2007-2010. O maior valor, de 75,8%, ocorreu no ano de 2010. Nesse período a barragem apresentou condições graves em relação à variável Nível de Deterioração, gerando elevação do risco nesse período. O baixo volume de chuvas após o ano de 2009 (CGEE, 2016; Tabela 6.5) contribuiu para o recuo das anomalias, em especial a fuga d'água, ocasionando uma conseqüente diminuição no risco de *piping* nos anos seguintes.

Em relação a barragem Jaburu I (Figura 6.22), o maior valor calculado para o risco de desenvolvimento de *piping* foi de 76,8%, referente aos anos de 2009 e 2010. Concomitante em relação as outras barragens, o período onde foi constatado o maior risco coincide com o período de maiores chuvas. Com o início do período de estiagem e a conseqüente ausência de água é possível observar uma diminuição no risco de *piping*.

Para a barragem Martinópole (Figura 6.23), observa-se um crescimento no risco de *piping* a partir do ano de 2006, chegando, em 2012, ao pico de 53,4%. Entre meados de 2012 e o início de 2013 foi realizada uma intervenção na barragem para recuperação no talude de jusante (COGERH, 2013). A intervenção realizada gerou uma intensa redução na pontuação do parâmetro Nível de Deterioração, caindo de 18 para 7 pontos, causando uma diminuição do risco de *piping* nos anos seguintes. A pequena variabilidade constatada nos outros parâmetros para o período pós-intervenção atestam a relevância do Nível de Deterioração para a resposta do modelo e a eficácia das ações mitigatórias realizadas (Tabela 6.5).

Observando os resultados obtidos para a barragem Quandú (Figura 6.24) constata-se que o pico do risco de *piping* nessa barragem foi em 2007, primeiro ano que se tem informações de vistoria (COGERH, 2007). O valor calculado para o risco nesse ano é 78,6%. Esse pico se deve à grave situação física que se encontrava a barragem no momento da

vistoria, influenciando diretamente a variável Nível de Deterioração. A barragem apresentava grandes fugas d'água no talude e na região a jusante, além de erosões no talude e nas ombreiras. Na vistoria seguinte que se tem informação, no ano de 2009, não foram constatadas fugas d'água e houve aparente redução na magnitude das outras anomalias, ocasionando a diminuição acentuada do risco de *piping* nos anos seguintes (COGERH, 2007, 2009). Como não há nos relatórios da COGERH nenhum registro de intervenções realizadas nessa barragem, a melhoria em seu estado físico pode estar relacionada à capacidade de cicatrização do solo da barragem (SC/CL), ou seja, pode ter ocorrido o fechamento dos tubos criados pela erosão interna pelo próprio solo, através de um rearranjo para chegar ao equilíbrio.

É perceptível, a partir da análise dos resultados, a importância do Nível de Deterioração da estrutura no modelo que fornece o risco de ocorrência de *piping*. As ações mitigatórias realizadas nas barragens Cipoadá e Martinópolis se manifestaram nas acentuadas reduções dos riscos de *piping* nos períodos posteriores às respectivas intervenções. Assim sendo, o controlador *fuzzy* desenvolvido, além de utilizar informações de fácil acesso, como o histórico de anomalias das barragens, fornece um produto coerente e robusto, podendo ser utilizado na hierarquização do risco de ocorrência de *piping* nas barragens e no planejamento quanto a necessidade de intervenções nas mesmas, proporcionando uma apreciação ampla e completa tanto dos cenários pré-intervenções como dos cenários pós-intervenções.

Considerando, ainda, o panorama geral de todas as barragens é possível estabelecer uma hierarquia de prioridades de monitoramento e intervenção para cada ano com base no risco de *piping* calculado através do modelo *fuzzy*. A Tabela 6.6 traz a hierarquização anual obtida a partir dos resultados determinados, onde o 1º lugar refere-se a barragem em pior situação e o 5º lugar se refere a barragem em melhor situação. No caso de duas barragens com mesmo risco de *piping* no mesmo ano, a prioridade será maior para a que apresentar maior pontuação na variável Nível de Deterioração e, em segundo lugar, a que estiver em operação a mais tempo (maior idade).

Tabela 6.6 – Hierarquia anual de prioridade de intervenção e monitoramento.

Ano	Hierarquia				
	1º	2º	3º	4º	5º
2006	Itaúna	Jaburu I	Martinópolis	-	-
	48,4%	48,0%	17,4%	-	-
2007	Quandú	Itaúna	Cipoada	Jaburu I	-
	78,6%	73,4%	58,5%	53,4%	-
2009	Cipoada	Jaburu I	Itaúna	Quandú	Martinópolis
	77,7%	76,8%	63,4%	48,2%	48,0%
2010	Jaburu I	Itaúna	Cipoada	Martinópolis	Quandú
	76,8%	75,8%	48,8%	48,4%	22,6%
2011	Jaburu I	Martinópolis	Quandú	Itaúna	Cipoada
	62,5%	48,8%	48,0%	48,0%	38,7%
2012	Martinópolis	Quandú	Jaburu I	Cipoada	Itaúna
	53,4%	48,4%	48,2%	28,0%	17,4%
2013	Jaburu I	Cipoada	Itaúna	Martinópolis	Quandú
	25,2%	18,5%	18,0%	17,4%	17,4%
2014	Martinópolis	Cipoada	Itaúna	Quandú	-
	28,8%	18,5%	17,4%	17,4%	-
2015	Quandú	Itaúna	Jaburu I	Martinópolis	Cipoada
	48,0%	26,6%	25,2%	19,0%	18,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.4 Protocolo de intervenção baseado no risco de *piping*

Com base na hierarquização apresentada na Tabela 6.6, pode-se realizar um planejamento de intervenções preventivas e corretivas nas barragens, respeitando uma clara ordem de prioridade. Um protocolo de ações mitigatórias no talude de jusante e na região à jusante da barragem pode ser definido compatibilizando o risco de *piping* determinado pela aplicação do modelo quantitativo com as ações de manutenção mais frequentes em barragens de aterro (Ana, 2016). Na Tabela 6.7 encontra-se descrito o protocolo de intervenção proposto para os diferentes níveis de risco de *piping* calculados. Os limites foram definidos a partir da contemplação do tipo e magnitude das anomalias manifestadas nas barragens (Apêndice A), do nível de intervenção exigido e considerando os conjuntos *fuzzy* definidos para a variável de saída Risco de *Piping* (Figura 6.18).

Tabela 6.7 – Protocolo de intervenção em barragens de terra baseado no risco de *piping*.

Risco de <i>piping</i>	Ações de intervenção	Local da intervenção
> 35 %	Corte de vegetação excessiva.	Talude de jusante e região a jusante
	Reposição de vegetação (regiões áridas) ou de outro material.	Talude de jusante
	Reparação do sistema de drenagem.	Talude de jusante
	Fechamento de tocas e túneis de animais.	Talude de jusante e região a jusante
	Vedação à passagem ou pastagem de animais.	Talude de jusante e região a jusante
	Reparação dos acessos aos equipamentos e à instrumentação da barragem.	Talude de jusante e região a jusante
> 50 %	Construção de dique para aumentar a altura da água no ponto de saída e diminuir o gradiente hidráulico ao longo do caminho de percolação, reduzindo o potencial de erosão interna.*	Talude de jusante e região a jusante
	A colocação de um filtro de areia, eventualmente carregado com outro material, de forma a evitar a saída de mais material carregado, o que pode originar obstrução regressiva que diminua a velocidade de percolação e o fluxo.*	Talude de jusante e região a jusante
	Recuperação do talude de jusante, e área adjacente, por meio de ações como: reaterro e compactação de regiões erodidas no talude de jusante, selamento dos pontos de fuga d'água, recuperação dos sistemas de drenagem superficial e interna, além de outras definidas por corpo técnico especializado.	Talude de jusante e região a jusante
> 70 %	Intervenção imediata para recuperação da estrutura, com ações determinadas por corpo técnico especializado.	Talude de jusante e região a jusante

Fonte: Elaborado pelo autor.

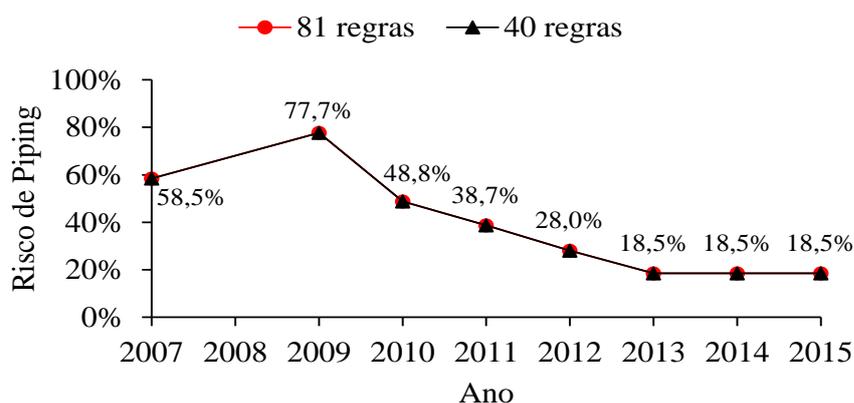
O nível de intervenção definido por meio do protocolo descrito na Tabela 6.7 é determinado pelo risco de *piping* calculado pelo modelo quantitativo. Os limites de risco de *piping* foram definidos a partir da contemplação do tipo, e magnitude, das anomalias manifestadas nas barragens (Apêndice A) e do nível de intervenção exigido. Nos resultados presentes na Tabela 6.6, as barragens que apresentaram risco de *piping* entre 35% e 50% manifestavam, em sua maioria, anomalias que poderiam ser mitigadas pelas ações do primeiro grupo do protocolo de intervenção (Tabela 6.7). Da mesma forma, as barragens que apresentaram risco de *piping* entre 50% e 70%, em sua maioria, possuíam anomalias que poderiam ser corrigidas pelas ações descritas nos dois primeiros grupos do protocolo proposto. Por fim, o terceiro grupo, com risco de *piping* superior a 70%, é representativo de um cenário que deve ser evitado, mas, se ocorrer, necessita de avaliação de corpo técnico especializado para determinar a natureza, a viabilidade e a logística dos procedimentos mitigatórios necessários.

6.5 Controlador Mamdani com 40 regras de inferência

Um dos aspectos que caracterizam um sistema de controle *fuzzy* é o fato de ele ser um sistema especialista, ou seja, o desenvolvimento do modelo e sua consequente resposta dependem diretamente da experiência do modelador que irá alimentar a base de conhecimento com as regras de inferência. Nem sempre o modelador será capaz de abranger todo o domínio de situações possíveis, gerando situações onde não há cobertura das regras de inferência.

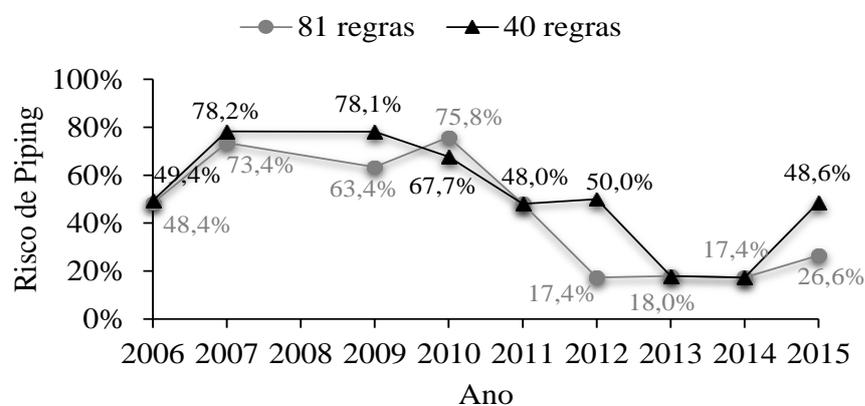
Para elucidar melhor a influência de uma base de regras incompleta sobre a resposta do sistema, mantendo-se os mesmos dados de entrada, foram eliminadas, aleatoriamente, 41 regras de inferência, de um total de 81 regras. As Figuras 6.25 a 6.29 mostram um comparativo entre os dois modelos em relação a evolução do risco de *piping*.

Figura 6.25 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Cipoadá.



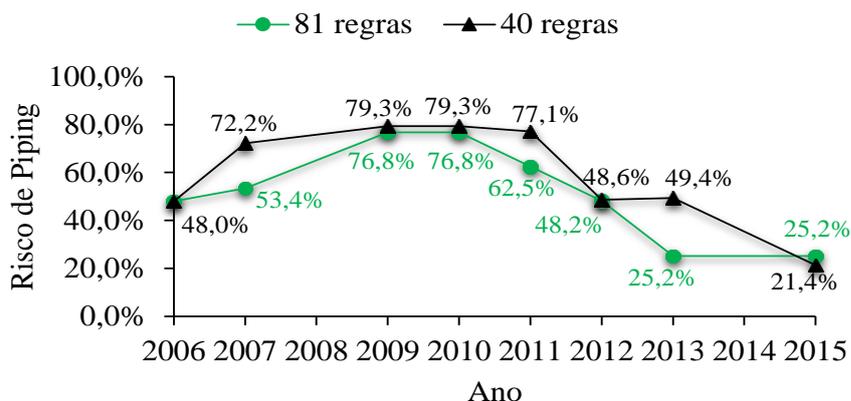
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.26 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Itaúna.



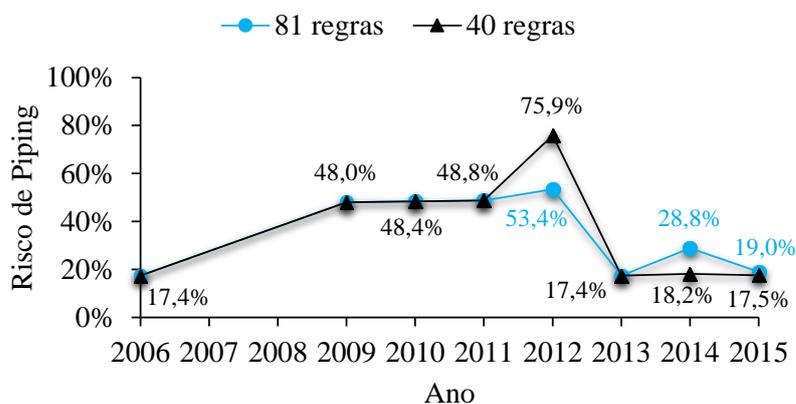
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.27 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Jaburu I.



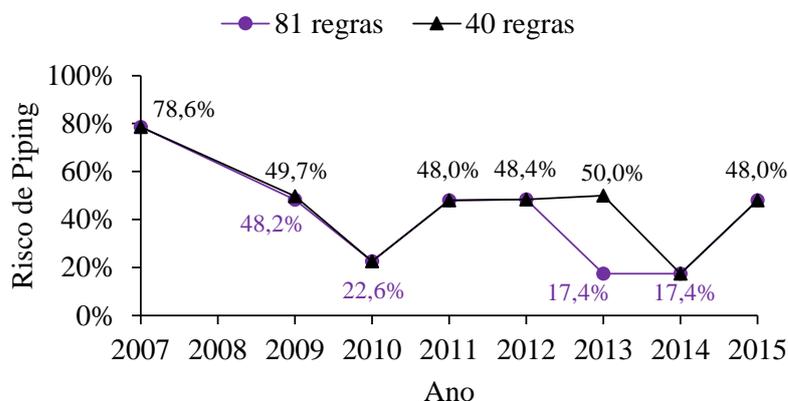
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.28 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Martinópolis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.29 – Comparativo entre sistemas com 81 e 40 regras na barragem Quandá.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que, para algumas barragens, em especial a barragem Cipoada, há poucas e pequenas variações do risco de *piping* calculado em um modelo com 40 regras em relação

ao modelo de 81 regras de inferência. Entretanto, como se pode observar nas barragens Itaúna e Quandú, há pontos de grande divergência entre os valores obtidos nos dois modelos, chegando a uma diferença de quase 300%.

Em relação à hierarquia anual de prioridade de intervenção das barragens, a utilização do modelo com apenas 40 regras de inferência gera alterações sensíveis e não convenientes nos resultados. A Tabela 6.8 traz a hierarquização com base nos valores de risco de *piping* obtidos no modelo com 40 regras de inferência, destacando-se as mudanças na hierarquia.

Tabela 6.8 – Hierarquia anual de prioridade de intervenção e monitoramento.

Ano	Hierarquia				
	1°	2°	3°	4°	5°
2006	Itaúna	Jaburu I	Martinópolis	-	-
	49,4%	48,0%	17,4%	-	-
2007	Quandú	Itaúna	Jaburu I	Cipoada	-
	78,6%	78,2%	72,2%	58,5%	-
2009	Jaburu I	Itaúna	Cipoada	Quandú	Martinópolis
	79,3%	78,1%	77,7%	49,7%	48,0%
2010	Jaburu I	Itaúna	Cipoada	Martinópolis	Quandú
	79,3%	67,7%	48,8%	48,4%	22,6%
2011	Jaburu I	Martinópolis	Quandú	Itaúna	Cipoada
	77,1%	48,8%	48,0%	48,0%	38,7%
2012	Martinópolis	Itaúna	Jaburu I	Quandú	Cipoada
	75,9%	50,0%	48,6%	48,4%	28,0%
2013	Quandú	Jaburu I	Cipoada	Itaúna	Martinópolis
	50,0%	49,4%	18,5%	18,0%	17,4%
2014	Cipoada	Martinópolis	Itaúna	Quandú	-
	18,5%	18,2%	17,4%	17,4%	-
2015	Itaúna	Quandú	Jaburu I	Cipoada	Martinópolis
	48,6%	48,0%	21,4%	18,5%	17,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo com apenas 40 regras na base de conhecimento, como exposto nos resultados obtidos para a barragem Martinópolis, modifica sensivelmente os indicadores que são obtidos na abordagem *fuzzy* para o risco de *piping* em barragens de terra. Como as regras de inferência não abrangem todos os possíveis cenários, a confiança em um modelo com base de conhecimento incompleta é drasticamente reduzida. Tratando-se de obras de engenharia com as dimensões e importância das barragens é aconselhável a utilização de modelos de risco completos, que possam retratar todos os cenários possíveis de falha do sistema.

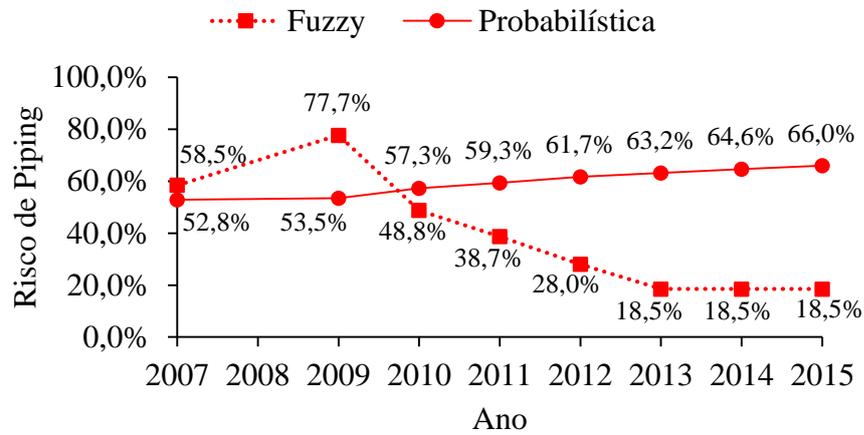
6.6 Comparação entre a abordagem probabilística e a abordagem *fuzzy* com 81 regras de inferência

O objetivo e desafio de qualquer abordagem ou metodologia de quantificação de risco em engenharia é fornecer ao risco um caminho que permita que o seu conceito abstrato seja representado de uma forma mais clara, tornando possível sua apreciação de forma eficiente. O risco é uma característica intrínseca de cada sistema. Com a quantificação se espera transformá-lo em um indicador (parâmetro) que auxilie a gestão do sistema. Neste trabalho foram consideradas duas abordagens para quantificação do risco de *piping* em barragens: a abordagem probabilística e a abordagem *fuzzy*.

Na abordagem probabilística de quantificação de risco de *piping* tenta-se diminuir o efeito da subjetividade, gerador de incertezas, na avaliação através da exclusão dos fatores que a inserem. O modelo probabilístico é um modelo baseado no tempo (idade da barragem), nas características geotécnicas do material do maciço e no comportamento hidrológico da região representado pelo nível do reservatório. Como deficiência dessa abordagem, destaca-se a incapacidade de reproduzir a redução no risco de *piping* após a realização de ações mitigatórias devido a não consideração do estado físico da estrutura com relação à deterioração.

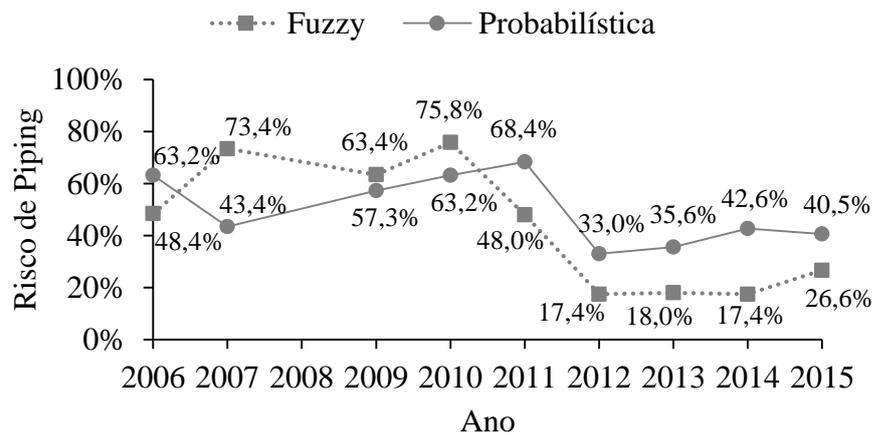
Por outro lado, no modelo *fuzzy* as incertezas são geridas de forma que a subjetividade seja considerada e se torne um dos aspectos relevantes utilizados no desenvolvimento do modelo que serve com ferramenta gerencial. No controlador *fuzzy* do tipo Mamdani desenvolvido para quantificação do risco de *piping*, a experiência do modelador, que insere subjetividade do modelo, está presente em todos os níveis, desde a escolha e fuzzificação das variáveis até a formação da base de conhecimento responsável por gerar as respostas do sistema. Enquanto o modelo probabilístico apresenta dificuldades na representação de determinados cenários, o modelo *fuzzy* permite a utilização de variáveis que abrangem o problema de forma vasta, considerando desde aspectos construtivos e estruturais até aspectos hidrológicos da região analisada. As Figuras 6.30 a 6.34 demonstram um comparativo dos resultados obtidos através da aplicação das duas metodologias em cada uma das barragens analisadas.

Figura 6.30 – Comparação das metodologias para a barragem Cipoada.



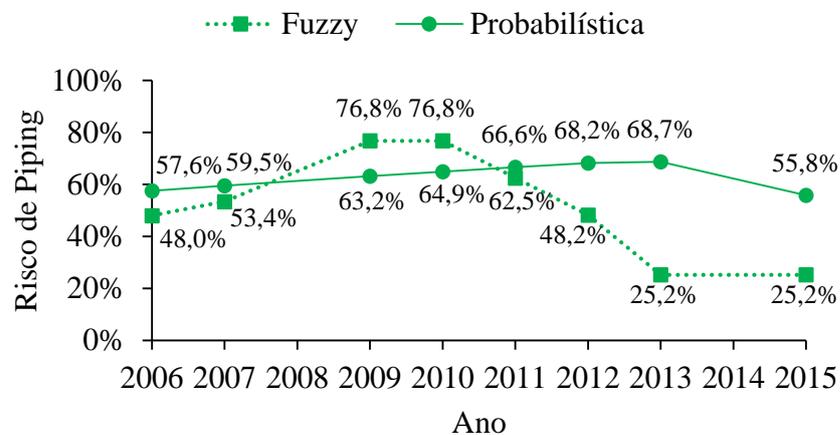
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.31 – Comparação das metodologias para a barragem Itaúna.



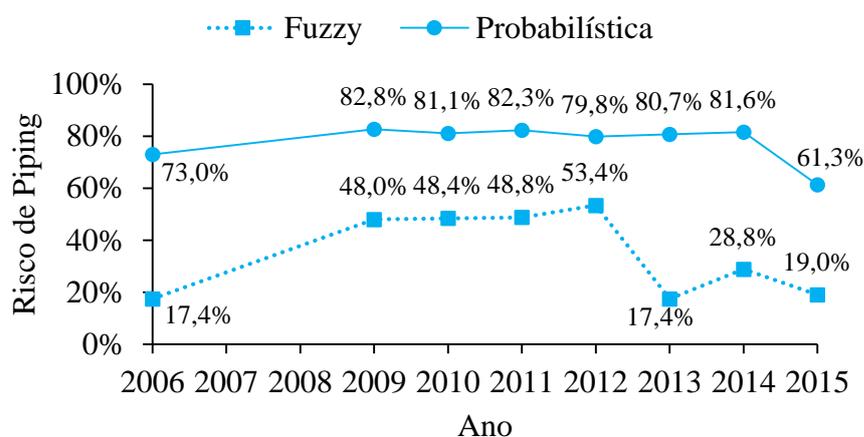
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.32 – Comparação das metodologias para a barragem Jaburu I.



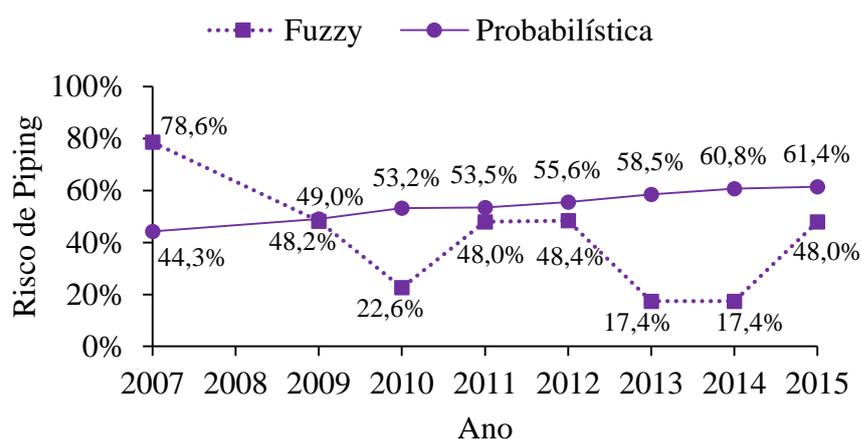
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.33 – Comparação das metodologias para a barragem Martinópolis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.34 – Comparação das metodologias para a barragem Quandú.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na maioria das barragens, nos períodos de maior aporte hídrico, em especial o biênio 2009-2010, é possível constatar valores maiores do risco de *piping* fornecidos através da metodologia elaborada com a abordagem *fuzzy*. Em contrapartida, nos períodos de maior escassez hídrica, a metodologia que fornece os maiores valores de risco de *piping* para a maioria das barragens é a produzida através da abordagem probabilística.

A abordagem probabilística pode ser considerada como de modelagem mais simples, porém com parametrização mais complexa. Já a abordagem *fuzzy* possui uma modelagem um pouco mais complexa, por possuir um número maior de conceitos e aspectos relevantes, mas com parametrização mais simples devido a possibilidade de diluição das imprecisões nos conjuntos *fuzzy* que compõem as variáveis aleatórias.

As duas abordagens configuram-se como ferramentas de suporte a tomada de

decisões gerenciais em relação a segurança das barragens. Adicionam a metodologia de classificação qualitativa de risco descrita na legislação nacional indicadores relacionados a anomalia responsável por grande parte dos acidentes em barragens de terra, o *piping*. Pode-se afirmar que as duas abordagens cumprem o objetivo para qual foram desenvolvidas sendo possível replicá-las e aplicá-las no âmbito administrativo da segurança de barragens.

Tendo em vista, porém, o desenvolvimento, os fatores envolvidos, a consideração dos nível de deterioração e a maior representatividade e adequação à realidade, o modelo desenvolvido através da abordagem *fuzzy* do problema é considerado melhor em relação ao modelo probabilístico. O controlador *fuzzy* desenvolvido, além de utilizar informações de fácil acesso, como o histórico de anomalias das barragens, fornece informações mais robustas que podem ser aproveitadas como indicadores em relação ao risco de *piping* em barragens de terra, proporcionando uma apreciação mais ampla e completa dos cenários analisados. É evidente, no entanto, a necessidade do modelo ser desenvolvido e alimentado por um modelador de experiência compatível com a atividade de segurança de barragens para que seja significativo.

6.7 Conclusões parciais

O modelo *fuzzy* é um modelo especialista baseado em características físicas, geotécnicas, temporais e de carregamento das barragens analisadas. As variáveis consideradas no modelo traduzem a complexidade da análise em um sistema de simples aplicação. As incertezas nos dados são diluídas nos intervalos dos conjuntos *fuzzy* que compõem as variáveis aleatórias.

Desde a seleção das variáveis à produção das regras de inferência e alimentação do sistema para obtenção das respostas, todas as fases foram estudadas minuciosamente para que o modelo fosse fidedigno na representação dos cenários possíveis em cada barragem.

O controlador *fuzzy* Mamdani desenvolvido para quantificação do risco de *piping* em barragens de terra foi elaborado com base em vasta pesquisa e apuração de dados. Um montante de 164 dados de alimentação das variáveis de entrada foi utilizado. Foram obtidas 82 respostas de risco de *piping*, 41 no modelo com 81 regras de inferência e 41 no modelo com 40 regras de inferência. Gerou, ainda, importantes informações que podem ser utilizadas em planejamento e gestão de segurança de barragens de terra.

Os resultados, indicadores e o protocolo de intervenção fornecido são aplicáveis e inseríveis no contexto da administração de barragens por seus proprietários. O risco, como componente de qualquer empreendimento, é reafirmado e o colocado em uma situação de

consideração e aplicabilidade nos processos de planejamento, monitoramento, tomada de decisão e intervenção.

Se alimentado com dados atualizados e corretos, o modelo pode ajudar a produzir previsões baseadas no comportamento apresentado pelo risco em cada barragem. Essas previsões também podem ser inseridas na gestão dos recursos e planejamento de atividades mitigatórias preventivas e corretivas nas barragens.

Por fim, é necessário salientar a facilidade e flexibilidade no manejo dos domínios das variáveis e na base de conhecimento, através da *toolbox* de lógica *fuzzy* do *software* MATLAB. Isso proporciona ao modelo uma adaptabilidade muito interessante em relação a representação de outros cenários não descritos. O modelo *fuzzy* proposto é, portanto, reproduzível, aplicável e adaptável a outras realidades dentro do âmbito geotécnico de segurança de barragens como, até mesmo, em outras esferas externas à engenharia propriamente dita.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento das metodologias de quantificação de risco de *piping* em barragens de terra e seus respectivos resultados. Serão sugeridas, ainda, sugestões para futuras pesquisas que venham a complementar os estudos e resultados apresentados neste trabalho.

7.1 Conclusões

Devido à importância das barragens de terra na gestão dos recursos hídricos e a grande ocorrência de situações geradoras de risco nessas estruturas, é fundamental que haja uma incessante busca por formas de otimizar e validar as análises de risco realizadas. Nesse tipo de barragem, a erosão interna (*piping*) foi identificada como uma das anomalias que, historicamente, gera uma considerável quantidade de incidentes

A proposta de quantificação do risco de ocorrência de *piping* busca suprir a demanda de complementação requerida na análise de risco qualitativa convencional, funcionando como subsídio para o correto planejamento de monitoramento dos riscos, diminuindo a incidência de casos que possam levar a acidentes mais graves. Tendo em vista a convivência constante das barragens com o risco e a importância de criar um sistema que ajude a embasar e fomentar as decisões gerenciais que devem ser tomadas sobre a manutenção e preservação desses empreendimentos, este trabalho propõe duas metodologias de quantificação do risco de *piping* em barragens de terra.

O modelo probabilístico utiliza as equações da distribuição de Weibull que descrevem o modelo de confiabilidade para calcular o risco de *piping*. A associação dos parâmetros das equações com características geotécnicas e de carregamento das barragens analisadas proporcionou a produção de um modelo temporal para determinação e acompanhamento do desenvolvimento do risco de *piping* no período considerado. Os valores de saída do modelo possibilitam a hierarquização e a intervenção torna-se viável e simplificada. O modelo permite, ainda, a utilização na fase de projeto, fornecendo previsões para o risco de *piping* nos primeiros anos de operação das barragens, considerado um dos períodos mais críticos na vida útil desses empreendimentos. O refino na definição dos parâmetros e obtenção dos dados pode gerar indicadores de grande valia no convívio com o risco.

O modelo *fuzzy* é um modelo especialista baseado em características físicas, geotécnicas, temporais e de carregamento das barragens analisadas. As variáveis definidas para o problema traduzem a complexidade da análise em um sistema de simples aplicação. As incertezas nos dados são diluídas nos intervalos dos conjuntos *fuzzy* que compõem as variáveis aleatórias. Os resultados obtidos, além de permitir o vislumbre do desenvolvimento do risco de *piping* no período analisado, fornece a possibilidade de acompanhar a necessidade de intervenção.

A análise das respostas dos dois modelos mostrou que o controlador *fuzzy* de Mamdani desenvolvido apresenta uma melhor adequação na representação do risco de *piping* em barragens de terra, pois a consideração do nível de deterioração da estrutura permite uma tradução mais coerente das situações analisadas, inclusive nos cenários após a realização de intervenções.

Destaca-se, ainda, que os dois modelos permitem a definição de um protocolo de intervenção baseado na compatibilização das ações mitigatórias com os níveis de risco de *piping*. Foram definidos intervalos de risco de *piping* que representassem as anomalias manifestadas e seus respectivos níveis de intervenção exigidos.

As duas abordagens geram informações que atuam no suporte a tomada de decisões quanto a segurança das barragens, pois é fornecida uma complementação à classificação qualitativa do risco, obtida a partir da aplicação da legislação vigente. O risco de *piping* se mostra como um indicador que tem muito a colaborar com os empreendedores de barragens, pois é obtido utilizando dados de acesso viável e rotineiro e possui aplicação em diferentes áreas de planejamento e gestão.

As metodologias permitiram o desenvolvimento de modelos com respostas de aplicação possível no dia-a-dia da gestão de segurança de barragens. Além de alertar para as situações pontuais, fornecem um panorama que pode ser enquadrado, por parte dos proprietários das barragens, no planejamento e alocação de verbas para manutenções e intervenções nas barragens.

A utilização da quantificação de risco em barragens tem muito a colaborar com as análises já realizadas e com o desenvolvimento de novas metodologias de análise, visando sempre atingir uma tomada de decisão mais fácil, mas com embasamento conceitual e numérico.

A consolidação de novas metodologias de avaliação do risco em barragens faz-se necessária tanto para os empreendedores quanto para os dependentes dessas estruturas, principalmente nos locais que convivem com grandes períodos de estiagem. A busca do

aprimoramento das metodologias de quantificação deve manter-se como tema frequente nas discussões relacionadas à segurança de barragens, tendo em vista sua importância para o gerenciamento dos recursos dos proprietários de barragens e para elaboração dos planos e gerenciamento dos danos dado uma possível ruptura.

7.2 Sugestões para pesquisas futuras

Tendo em vista a grande pertinência em abranger os conhecimentos sobre risco em barragens, não só no âmbito do semiárido brasileiro, como também em escala nacional, é preciso que haja prosseguimento nas pesquisas por alternativas de melhorar o processo de avaliação descrito na legislação vigente.

Destacaram-se possibilidades de prosseguimento e aprimoramento da pesquisa realizada e descrita no presente trabalho. Recomendam-se para futuros trabalhos inspirados neste:

- Desenvolver metodologias de quantificação de risco em barragens considerando outras anomalias e outros tipos de barragens, como de rejeitos, de concreto, etc;
- Verificar o comportamento gerado por outros valores dos parâmetros da distribuição de Weibull na abordagem probabilística;
- Inserir outras variáveis relevantes na quantificação do risco de *piping* no modelo *fuzzy*;
- Refinar os intervalos dos conjuntos *fuzzy* das variáveis aleatórias definidas no modelo *fuzzy*;
- Desenvolver novos indicadores, através das abordagens probabilística e *fuzzy*, que auxiliem a gestão de segurança de barragens;
- Desenvolver novos modelos, através da abordagem probabilística, utilizando outras distribuições de probabilidade.

REFERÊNCIAS

- ADAMO, N.; AL-ANSARI, N.; LAUE, J.; KNUTSSON, S.; SISSAKIAN, V. Risk management concepts in dam safety evaluation: Mosul dam as a case study. **Journal of Civil Engineering and Architecture**. v. 11, p. 636-652. 2017.
- ADAMS, B.; XIAO, M.; WRIGHT, A. Erosion mechanisms of organic soil and bioabatement of piping erosion of sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 139, p. 1360-1368. 2012.
- ADRIAENSSENS, V.; DE BAETS, B.; GOETHALS, P.L.M.; DE PAUW, M. Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management. **The Science of the Total Environment**. v. 319, p. 1-12. 2004.
- AFONSO, J. R.; PEDRO, J. O.; CALDEIRA, L. M. M. S. **Revision of the portuguese dam safety**. Second International Dam World Conference. Lisboa. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diretrizes para a elaboração do plano de operação, manutenção e instrumentação de barragens**. ANA, Brasília, 2016.
- AKGUN, A.; SEZER, E. A.; NEFESLIOGLU, H. A.; GOKCEOGLU, C.; PRADHAN, B. An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. **Computers & Geosciences**. v.38, p. 23-34. 2012.
- ALAVI, N. Quality determination of Mozafati dates using Mamdani fuzzy inference system. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. v. 12, p. 137-142. 2013.
- ANDERSON, S.; FERGUSON, K. **Examination of three-dimensional effects of internal erosion (IE) and piping processes in soil**. 2015. Disponível em: < <http://damfailures.org/wp-content/uploads/2017/12/Anderson-Ferguson-3-D-Seepage-USSD-2015-v-1-17-15.pdf>>. Acesso em: 18 de setembro de 2018.
- ARAÚJO, F. R. **Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de taludes da barragem Olho d'Água no estado do Ceará**. 2013. 128f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Universidade Federal do Ceará. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000: Gestão de riscos - princípios e diretrizes**. Rio de Janeiro. 2009.
- BANDO, F. M. **Sistemas fuzzy e aproximação universal**. 2002. 79f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Matemática Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas. 2002.
- _____. **Análise fuzzy de árvore de falhas na gestão de segurança de barragens – Bloco D38 da barragem de Itaipu**. 2016. 148f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. 2016.

BERRONES, R. F.; ACOSTA, N. P. L. **Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures. Soil erosion studies.** Chapter 14. InTech. 2011.

BETTOCCHI, R.; PINELLI, M.; SPINA, P. R.; VENTURINI, M. Artificial Intelligence for the Diagnostics of Gas Turbines— Part II: Neuro-Fuzzy Approach. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.** v. 129, p. 720-729. 2007.

BOJADZIEV, G.; BOJADZIEV, M. **Fuzzy logic for business, finance, and management.** World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2007.

BOOLE, G. **The calculus of logic.** Cambridge and Dublin Mathematical Journal, v 3, p. 183-198. 1848.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens.** Brasília. 2002.

_____. **Lei Federal nº 12.334.** Presidência da República. Brasília: D.O.U. 09.20.2010.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de recursos Hídricos. **Resolução Nº 143.** Brasília: D.O.U. 11.17.2012.

BUCKLEY, J. J.; SILER, W.; TUCKER, D. A fuzzy expert system. **Fuzzy Sets and Systems.** v. 20, p. 1-16. 1986.

CALDEIRA, L. M. M. S. **Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro.** 248f. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico. 2008.

CARNAÚBA, E. R.; SELLITTO, M. A. Análise de confiabilidade e evolução de uma máquina de envase de leite UHT ao longo da curva da banheira. **Revista Liberato.** Novo Hamburgo. v. 14, nº 22, p. 171-185. 2013.

CAVALCANTI, J. H. F.; MELO, H.; SOUTO, C. R.; CAVALCANTI, M. T. **Lógica fuzzy aplicada às engenharias.** João Pessoa – PB. 2012.

CGEE (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS). **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil.** Brasília. 252p. 2016.

CHAWLA, R.; SINGAL, P.; GARG, A. K. A Mamdani fuzzy logic system to enhance solar cell micro-cracks image processing. **3D Research.** v. 34. 2018.

COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2006.** 433p.COGERH, Fortaleza, 2006.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2007/2008.** 334p.COGERH, Fortaleza, 2008.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2009.** 382p.COGERH, Fortaleza, 2009.

_____. **Relatório de Atividades da COGERH – 2007-2010**. 218p.COGERH, Fortaleza, 2010.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2010**. 355p.COGERH, Fortaleza, 2011.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2011**. 365p.COGERH, Fortaleza, 2012.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2012**. 355p.COGERH, Fortaleza, 2013.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2013**. 362p.COGERH, Fortaleza, 2014.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2014**. 428p.COGERH, Fortaleza, 2014.

_____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2015**. 423p.COGERH, Fortaleza, 2015.

_____. **Ficha Técnica dos Açudes – Açude Cipoada**. COGERH, 2018. Disponível em: <<https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicaAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=Cipoada>>. Acesso em: 25 de junho de 2018a.

_____. **Ficha Técnica dos Açudes – Açude Itaúna**. COGERH. Disponível em: <<https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicaAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=Itaúna>>. Acesso em: 25 de junho de 2018b.

_____. **Ficha Técnica dos Açudes – Açude Jaburu I**. COGERH. Disponível em: <[https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicaAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=Jaburu I](https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicaAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=JaburuI)>. Acesso em: 25 de junho de 2018c.

_____. **Ficha Técnica dos Açudes – Açude Martinópolis**. COGERH. Disponível em: <<https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicaAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=Martinópolis>>. Acesso em: 25 de junho de 2018d.

_____. **Ficha Técnica dos Açudes – Açude Quandú**. COGERH. Disponível em: <<https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicaAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=Quandú>>. Acesso em: 25 de junho de 2018e.

COX, E. **The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems**. Cambridge: Academic Press, Inc. 1994.

DAS, B. M. **Fundamentals of Geotechnical Engineering**. • 4th ed. Cengage Learning Engineering. 2013.

DEBNATH, L.; BASU, K. A short history of probability theory and its applications. **International Journal of Mathematical Education**. 2015.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Pioneira Thomson Learning. 2006.

EVANS, M. J.; ROSENTHAL, J. S. **Probability and statistics: the science of uncertainty**. •2nd ed. W. H. Freeman and Company. 2009.

EZELL, B. C.; BENNETT, S. P.; VON WINTERFELDT, D.; SOKOLOWSKI, J.; COLLINS, A. J. Probabilistic risk analysis and terrorism risk. **Risk Analysis**. v. 30, p. 575-589. 2010.

FELL, R.; WAN, C. F.; CYGANIEWICZ, J.; FOSTER, M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 129, p. 307-314. 2003.

FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY). **Filters for embankment dams: Best practices for design and construction**. U.S. Department of Homeland Security. 2011.

_____. **Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion**. Interagency Committee on Dam Safety (ICODS). U.S. Department of Homeland Security. 2015.

FERDOS, F. **Internal erosion phenomena in embankment dams**. Doctoral Thesis - Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology. 2016.

FERGUSON, K.; ANDERSON, S.; SOSSENKINA, E. **Reexamination of the 2004 failure of Big Bay Dam, Mississippi**. 2014. Disponível em: <http://damfailures.org/wp-content/uploads/2017/12/62Ferguson_BigBayDam.pdf>. Acesso em: 21 de setembro de 2018.

FOSTER, M. A.; FELL, R. **A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods**. UNICIV Report N° R-377. The University of New South Wales. Sydney. 1999.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Portal Hidrológico do Ceará**. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br/>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2018.

GANOULIS, J. G. **Risk analysis of water pollution**. New York: VCH Publishers, 1994.

GNEDENKO, B.; USHAKOV, I. **Probabilistic reliability engineering**. John Wiley & Sons, Inc. 1995.

GOMES, F. H. S.; FURTADO, F. A.; MALVEIRA, V. T. C. **Utilização da distribuição de Weibull para quantificação de risco em barragens**. 15° Congresso Nacional de Geotecnia. Porto, Portugal. 2016a.

_____. Avaliação quantitativa de risco em barragens do semiárido utilizando a distribuição de Weibull. **Revista de Fundações e Obras Geotécnicas**. n° 65, p. 58-67. 2016b.

GOMES, F. H. S.; MALVEIRA, V. T. C.; DANTAS NETO, S. A. **Aplicação de uma metodologia de análise quantitativa de risco de *piping* em barragens utilizando a**

distribuição de Weibull. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador. 2018.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *fuzzy*. **SBA Controle & Automação.** v. 4, p. 97-115. 1994.

GONÇALVES, A. P. **Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica.** Instituto Tecnológico da Aeronáutica. 2007.

GREENFIELD, S. Geometric defuzzification revisited. **Information Sciences.** v. 466, p. 220-235. 2018.

HAGHIGHI, A.; AYATI, A.H. Stability analysis of gravity dams under uncertainty using the fuzzy sets theory and a many-objective GA. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems.** v 30, p. 1857-1868. 2016.

HARRIS, S. **Science Cartoons Plus.** S. Harris Risk Cartoons. Disponível em: <<http://www.sciencecartoonsplus.com/gallery/risk/index.php>> Acesso em: 13 de setembro de 2018.

HSE (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE). **Reducing risks, protecting people: HSE's decision-making process.** 2001.

HUNTER, R. P. **Development of transparent soil testing using planar laser induced fluorescence in the study of internal erosion of filters in embankment dams.** Masters Thesis - Master of Science in Engineering Geology, University of Canterbury. 2012.

ICOLD (INTERNACIONAL COMISSION ON LARGE DAMS). **Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications.** Bulletin 130. 2005.

_____. **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment.** Bulletin 120. 2013.

_____. **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance.** Bulletin 164. 2016.

ISSMGE (INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING). **Glossary of Risk Assessment Terms.** Technical Committee on Risk Assessment and Management. 2004.

JAEGER, C. C.; RENN, O.; ROSA E. A.; WEBLER, T. **Risk, uncertainty and rational action.** New York: Earthscan. 2001.

KALININA, A.; SPADA, M.; MARELLI, S.; BURGHER, P.; SUDRET, B. **Uncertainties in the risk assessment of hydropower dams: state-of-the-art and outlook.** Report Ref.: RSUQ-2016-008. 2016.

KAPLAN, S.; GARRICK, B. J. On the quantitative definition of risk. **Risk Analysis**. v. 1, p. 11-27. 1981.

KAUSHIK, A.; VERMA, S.; SINGH, H. J.; CHHABRA, G. Software cost optimization integrating fuzzy system and COA-Cuckoo optimization algorithm. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**. v. 8, p. 1461-1471. 2017.

KECECIOGLU, D. B. **Reliability engineering handbook – Volume 1**. DEStech Publications, Inc. 2002.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. New Jersey: Prentice Hall PTR. 1995.

KOSINSKI, W.; ROSA, A. Defuzzification functionals of ordered fuzzy numbers. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**. v. 21, p.1163-1169. 2013.

KOVÁCS, G. **Developments in water science**. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. 1981.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. • 4. ed. Pearson Practice Hall. São Paulo. 2010.

LEE, C. C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part II. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**. v. 20, n. 2, p. 419-435. 1990.

LIANG, Y.; WANG, J.; LIU, M. Two-flow model for piping erosion based on liquid-solid coupling. **Journal of Central South University**. v. 20, p. 2299-2306. 2013.

LOMINÉ, F.; SCHOLTÈS, L.; SIBILLE, L.; POULLAIN, P. Modeling of fluid–solid interaction in granular media with coupled lattice Boltzmann/discrete element methods: application to piping erosion. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. v. 37, p. 577-596. 2013.

LOPES, C. L.; MEIRELLES, E. **O desenvolvimento da probabilidade e da estatística**. XVIII Encontro Regional de Professores de Matemática. UNICAMP. 2005.

LUND, J. R. A risk analysis of risk analysis. **Journal of Contemporary Water Research & Education**. v. 140, p. 53-60. 2008.

MACHADO, F.; ANDRADE, J. J. O. **Emprego da confiabilidade para o estabelecimento de estratégias de manutenção na indústria metal-mecânica**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, Brasil. 2013.

MACIEL, J.; CARVALHO E.; TAMY, V.; JESUS, J. D. Influência do tamanho do lote no fator de rank para parâmetros de forma na distribuição de Weibull. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 5, p. 124-139. 2013.

MAFIOLETI, T. R.; CHAVES NETO, A.; PATIAS, J.; TEIXEIRA JÚNIOR, L. A. A proposal for probabilistic analysis of stability of earth dams based on first order reliability method. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 8, p. 1-8. 2016.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, p. 1-13. 1975.

MATHWORKS. **Fuzzy logic toolbox: for use with MATLAB**, User's Guide. MathWorks, 528p., 2018.

MATOS, Y. M. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento cisalhante em discontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos utilizando técnicas fuzzy e neuro-fuzzy**. 2018. 212f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Universidade Federal do Ceará. 2018.

MEDEIROS, R. A. O.; WINKELER, B. G. N.; VILLANUEVA, J. M. M.; RODRIGUEZ, Y. P. M.; MACEDO, E. C. T.; MACEDO, H. D. Previsão de demanda a médio prazo aplicada em dados reais do sistema de distribuição: uma comparação entre RNA e Lógica Fuzzy. **Revista Principia**. Divulgação Científica e Tecnológica IFPB. n. 31, p. 77-86. 2016.

MELO, A. V. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT**. 2014. 168f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes - Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais. 2014.

MENDEL, J. M. Fuzzy Logic Systems for Engineering: A tutorial. **Proceedings of the IEEE**. v. 83, p. 345-377. 1995.

MENGUE, D. C.; SELBITTO, M. A. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**. Florianópolis. v. 13, nº 2, p. 759-783. 2013.

MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. • 2. ed. LTC. Rio de Janeiro. 1983.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. P.; KRIVTSOV, V. **Reliability engineering and risk analysis: a practical guide**. • 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton. USA. 2017.

MOON, T.; KIM, Y.; KIM, H.; CHOI, M.; KIM, C. Fuzzy rule-based inference of reasons for high effluent quality in municipal wastewater treatment plant. **Korean Journal of Chemical Engineering**. 2011.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.

PEREIRA, J. C.; LIMA, G. B. A. Probabilistic risk analysis in manufacturing situational operation: application of modelling techniques and causal structure to improve safety performance. **International Journal of Production Management and Engineering**. v. 3, p. 33-42. 2015.

PIMENTA FILHO, M. A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais. 2013.

REIS, T.C.S. **Extensões da distribuição Weibull aplicadas na análise de séries climatológicas**. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional da Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, Brasil. 2017.

RELIASOFT BRASIL. Conceitos de confiabilidade: características da distribuição de Weibull. **Reliability Hotwire**. v. 3. 2005.

RENTERÍA, A. R. **Estimación de probabilidade fuzzy a partir de dados imprecisos**. 2006. 94f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006.

ROSENBRAND, E. **Investigation into quantitative visualisation of suffusion**. Department of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology, The Netherlands. 2011.

ROSS, S. M. **A first course in probability**. • 8th ed. Pearson Prentice Hall. 2010.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. • 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd. 2004.

SANTOS, R. N. C. **Enquadramento das análises de riscos em Geotecnia**. 2006. 281f. Dissertação (Mestrado) - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2006.

SHARIF, Y. A.; ELKHOLY, M.; CHAUDHRY, M. H.; IMRAN, J. Experimental study on the piping erosion process in earthen embankments. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 141. 2015.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F.; CLEVINGER, W. A. **Earth and earth-rock dams – Engineering problems of design and construction**. John Wiley and Sons. New York. 1963.

SILVA, M. A. **Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes em Solo Residual**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2008.

SILVA, A.V. **Avaliação do risco de ruptura em análises de estabilidade de taludes de barragens de terra utilizando números fuzzy**. 2015. 126f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Universidade Federal do Ceará. 2015.

SILVA, A. V.; DANTAS NETO, S. A.; SOUSA FILHO, F. A. A simplified method for risk assessment in slope stability analysis of earth dams using fuzzy numbers. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. v. 21, p. 3607-3624. 2016.

SIMÕES, M.G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo, Blucher: FAPESP, 186 p., 2007.

SLUNGA, E. **Concept and bases of risk analysis for dams: with an example application on Kyrkösjärvi dam**. RESCDAM-project - Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis. Helsinki University of Technology. 2001.

SMITH, D.J. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers**. • 9th ed. Butterworth-Heinemann. United Kingdom. 2017.

SONG, Y-H.; JOHNS, A. T. Applications of fuzzy logic in power systems. **Power Engineering Journal**. 1997.

SPANCOLD (SPANISH NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS). **Risk analysis applied to management of dam safety**. Technical Guide on Operation of Dams and Reservoirs – Volume 1. 2012.

SRH (SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ). **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: < <http://atlas.srh.ce.gov.br/#>>. Acesso em: 17 de agosto de 2018.

TALON, A.; CURT, C.; BOISSIER, D. Performance assessment based on evidence theory and fuzzy logic: application to building and dam performance. **Journal of Computing in Civil Engineering**. p. 124-133. 2014.

TALON, A. CURT, C. Selection of appropriate defuzzification methods: application to the assessment of dam performance. **Expert Systems with Applications**. v. 70, p. 160-174. 2017.

TSAKIRIS, G.; SPILIOTIS, M. Embankment dam break: uncertainty of outflow based on fuzzy representation of breach formation parameters. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**. v. 27, p. 2365-2378. 2014.

USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS). **Using HEC-RAS for dam break studies**. Hydrologic Engineering Center. August 2014.

USBR (UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION). **Dams and public safety: A water resources technical publication**. U.S. Department of Interior. 1983.

VAN BEEK, V. M. **Backward erosion piping: initiation and progression**. PHD Thesis, Technische Universiteit Delft. 2015.

VRIJLING, J. K.; VAN HENGEL, W.; HOUBEN, R. J. A framework for risk evaluation. **Journal of Hazardous Materials**. v. 43, p. 245-261. 1995.

WAN, C. F.; FELL, R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 130, p. 373-380. 2004.

WANG, Y.; GUO, N.; WANG, S.; GU, Y. Detection of internal erosion and piping in embankment dams. **International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development**. 2016.

WEIBULL, W. A. A statistical theory of the strength of material. **Royal Swedish Institute for Engineering Research**. v. 151, p. 1–45. 1939.

_____. A statistical distribution of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**. v. 18, p. 293–297. 1951.

_____. **A statistical Representation of Fatigue Failure in Solids**. [S.I.]. Royal Institute of Technology. 1954.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

_____. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. **Information Sciences**. v. 8, p. 199-249. 1975.

ZIMMERMANN, H. -J. **Fuzzy set theory and its applications**. 4th ed. New York: Springer Science + Business Media, LLC. 2001.

_____. Fuzzy set theory. **WIREs Computational Statistics**. v. 2, p. 317-332, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CADASTRO DAS INSPEÇÕES REALIZADAS NAS BARRAGENS UTILIZADAS NAS APLICAÇÕES DOS MODELOS

APÊNDICE B – 81 REGRAS DE INFERÊNCIA USADAS NO MODELO DE QUANTIFICAÇÃO DE RISCO DE *PIPING* EM BARRAGENS DE TERRA

APÊNDICE C – VISÃO GERAL DO CONTROLADOR *FUZZY* NO *SOFTWARE* MATLAB

**APÊNDICE A – CADASTRO DAS INSPEÇÕES REALIZADAS NAS BARRAGENS
UTILIZADAS NAS APLICAÇÕES DOS MODELOS**

Barragem Cipoada				
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
04/01/2007	Afundamentos e buracos no talude de jusante			G
	Carreamento de material na água dos drenos			M
Cota =		94.46		m
Volume =	11.49	hm ³	13.35	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
02/07/2009	Afundamentos e buracos no talude de jusante			G
	Carreamento de material na água dos drenos			M
Cota =		102.97		m
Volume =	85.67	hm ³	99.52	%
Obs.:	Intervenção realizada para recuperação do talude de jusante.			
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
12/08/2010	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			P
	Carreamento de material na água dos drenos			P
Cota =		100.47		m
Volume =	54.06	hm ³	62.80	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
28/07/2011	Afundamentos e buracos no talude de jusante			M
Cota =		98.98		m
Volume =	39.22	hm ³	45.55	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
21/08/2012	Afundamentos e buracos no talude de jusante			M
Cota =		95.00		m
Volume =	13.54	hm ³	15.73	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
01/08/2013				
Cota =		92.99		m
Volume =	6.50	hm ³	7.54	%

Vistoria	Anomalias:			Magnitude
08/09/2014	Erosões no talude de jusante			G
	Cota =	93.71		m
	Volume =	8.81	10.24	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
21/08/2015	Erosões no talude de jusante			G
	Cota =	91.21		m
	Volume =	2.56	2.97	%
Barragem Itaúna				
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
06/12/2006	Escorregamentos no talude de jusante			M
	Fuga d'água na região a jusante			G
	Cota =	31.12		m
	Volume =	49.92	68.79	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
28/08/2007	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			M
	Fuga d'água na região a jusante			G
	Escorregamentos no talude de jusante			M
	Cota =	31.91		m
	Volume =	62.11	85.58	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
19/08/2009	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			M
	Fuga d'água na região a jusante			G
	Cota =	32.44		m
	Volume =	71.33	98.28	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
15/09/2010	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			M
	Fuga d'água na região a jusante			-
	Erosões no talude de jusante			-
	Escorregamentos no talude de jusante			M
	Cota =	29.86		m
	Volume =	34.10	46.98	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
24/08/2011	Escorregamentos no talude de jusante			P
	Fuga d'água na região a jusante			P
	Cota =	32.10		m
	Volume =	65.28	89.94	%

Vistoria	Anomalias:			Magnitude
09/08/2012	Fuga d'água na região a jusante			P
	Cota =	30.81		m
	Volume =	45.69	62.95	hm ³ %
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
15/08/2013	Erosões no talude de jusante			P
	Fuga d'água na região a jusante			I
	Cota =	29.06		m
	Volume =	25.88	35.66	hm ³ %
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
10/09/2014	Erosões no talude de jusante			P
	Fuga d'água na região a jusante			I
	Árvores e arbustos no talude de jusante			I
	Cota =	28.44		m
	Volume =	20.58	28.35	hm ³ %
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
02/09/2015	Erosões nos encontros das ombreiras			P
	Fuga d'água na região a jusante			P
	Árvores e arbustos no talude de jusante			P
	Erosões no talude de jusante			P
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			P
	Cota =	29.53		m
	Volume =	30.71	42.31	hm ³ %
Barragem Jaburu I				
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
07/08/2006	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			I
	Fuga d'água na região a jusante			I
	Carreamento de material na água dos drenos			I
	Cota =	715.61		m
	Volume =	133.26	94.51	hm ³ %
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
26/09/2007	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			G
	Fuga d'água na região a jusante			M
	Cota =	714.29		m
	Volume =	119.09	84.46	hm ³ %

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante		G
24/09/2009	Fuga d'água na região a jusante		G
	Carreamento de material na água dos drenos		G
Cota =		716.08	m
Volume =	138.19	hm ³	98.01
			%

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante		M
24/08/2010	Carreamento de material na água dos drenos		M
	Fuga d'água na região a jusante		G
	Erosões nas ombreiras		G
Cota =		714.80	m
Volume =	124.60	hm ³	88.37
			%

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante		M
28/07/2011	Fuga d'água na região a jusante		G
	Erosões nas ombreiras		G
Cota =		716.44	m
Volume =	141	hm ³	100
			%

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
	Erosões nas ombreiras		M
13/09/2012	Fuga d'água na região a jusante		G
Cota =		712.98	m
Volume =	106.78	hm ³	75.73
			%

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
06/08/2013	Fuga d'água na região a jusante		G
Cota =		709.50	m
Volume =	78.54	hm ³	55.70
			%

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
15/09/2015	Fuga d'água na região a jusante		G
Cota =		700.77	m
Volume =	29.54	hm ³	20.95
			%

Barragem Martinópolis

Vistoria	Anomalias:		Magnitude
	Erosões no talude de jusante		P
22/08/2006	Escorregamento no talude de jusante		P
Cota =		93.98	m
Volume =	4.01	hm ³	16.17
			%

Vistoria	Anomalias:	Magnitude
18/06/2009	Erosões nas ombreiras	M
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem	P
Cota =	99.04	m
Volume =	24.83 hm ³	100 %
Vistoria	Anomalias:	Magnitude
26/08/2010	Erosões no talude de jusante	M
	Escorregamentos no talude de jusante	M
	Erosões nas ombreiras	-
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem	M
Cota =	96.83	m
Volume =	12.66 hm ³	50.98 %
Vistoria	Anomalias:	Magnitude
23/08/2011	Erosões no talude de jusante	M
	Escorregamentos no talude de jusante	M
	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante	I
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem	G
Cota =	97.50	m
Volume =	15.95 hm ³	64.26 %
Vistoria	Anomalias:	Magnitude
23/11/2012	Erosões no talude de jusante	M
	Fuga d'água na região a jusante	M
	Erosões nos encontros das ombreiras	M
	Afundamentos e buracos no talude de jusante	M
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem	P
Cota =	95.17	m
Volume =	6.74 hm ³	27.15 %
Vistoria	Anomalias:	Magnitude
13/08/2013	Erosões no talude de jusante	M
	Afundamentos e buracos no talude de jusante	M
	Fuga d'água na região a jusante	I
Cota =	94.55	m
Volume =	5.24 hm ³	21.10 %
Obs.:	Intervenção realizada para recuperação do talude de jusante.	
Vistoria	Anomalias:	Magnitude
10/09/2014	Erosões no talude de jusante	G
	Afundamentos e buracos no talude de jusante	M

	Fuga d'água na região a jusante			I
Cota =		93.25		m
Volume =	3.07	hm ³	12.37	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
17/08/2015	Erosões no talude de jusante			P
Cota =		93.42		m
Volume =	3.29	hm ³	13.26	%
Barragem Quandú				
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			G
	Fuga d'água na região a jusante			G
	Erosões nos encontros das ombreiras			M
04/01/2007	Erosões no talude de jusante			M
	Erosões nas ombreiras			M
	Cavernas e buracos nas ombreiras			M
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			M
Cota =		93.23		m
Volume =	0.79	hm ³	23.36	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas no talude de jusante			G
	Fuga d'água na região a jusante			G
30/08/2007	Erosões nos encontros das ombreiras			G
	Erosões nas ombreiras			G
	Erosões no talude de jusante			M
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			M
Cota =		97.35		m
Volume =	2.72	hm ³	80.61	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosões no talude de jusante			G
05/08/2009	Árvores e arbustos no talude de jusante			P
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			M
	Erosões nas ombreiras			G
Cota =		98.51		m
Volume =	3.37	hm ³	100	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosão nos encontros das ombreiras			M
28/07/2010	Árvores e arbustos no talude de jusante			P
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			M
	Erosões nas ombreiras			M

Cota =		94.73		m
Volume =	1.22	hm ³	36.31	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Erosão nos encontros das ombreiras			P
26/07/2011	Árvores e arbustos no talude de jusante			I
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			M
	Erosões nas ombreiras			M
Cota =		98.51		m
Volume =	3.37	hm ³	100	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Fuga d'água na região a jusante			P
	Erosões nos encontros das ombreiras			P
17/07/2012	Erosões nas ombreiras			P
	Árvores e arbustos no talude de jusante			P
	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			P
Cota =		97.57		m
Volume =	2.99	hm ³	88.84	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Árvores e arbustos no talude de jusante			P
29/07/2013	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			P
Cota =		96.03		m
Volume =	1.77	hm ³	52.43	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Árvores e arbustos no talude de jusante			P
11/09/2014	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			P
Cota =		92.93		m
Volume =	0.76	hm ³	22.65	%
Vistoria	Anomalias:			Magnitude
	Árvores e arbustos no talude de jusante			M
18/08/2015	Árvores/arbustos na faixa de 10m do pé da barragem			M
Cota =		97.87		m
Volume =	3.12	hm ³	92.44	%

**APÊNDICE B – 81 REGRAS DE INFERÊNCIA USADAS NO MODELO DE
QUANTIFICAÇÃO DE RISCO DE *PIPING* EM BARRAGENS DE TERRA**

Regra	Idade da Barragem	Susceptibilidade ao <i>Piping</i>	Percentual de Acumulação do Reservatório	Nível de Deterioração da Estrutura	Risco de <i>Piping</i>
1	Jovem	Pequena	Baixo	Normal	Tolerável
2	Jovem	Pequena	Baixo	Alerta	Grave
3	Jovem	Pequena	Baixo	Crítico	Intolerável
4	Jovem	Pequena	Médio	Normal	Grave
5	Jovem	Pequena	Médio	Alerta	Grave
6	Jovem	Pequena	Médio	Crítico	Intolerável
7	Jovem	Pequena	Alto	Normal	Grave
8	Jovem	Pequena	Alto	Alerta	Intolerável
9	Jovem	Pequena	Alto	Crítico	Intolerável
10	Jovem	Regular	Baixo	Normal	Grave
11	Jovem	Regular	Baixo	Alerta	Grave
12	Jovem	Regular	Baixo	Crítico	Intolerável
13	Jovem	Regular	Médio	Normal	Grave
14	Jovem	Regular	Médio	Alerta	Intolerável
15	Jovem	Regular	Médio	Crítico	Intolerável
16	Jovem	Regular	Alto	Normal	Grave
17	Jovem	Regular	Alto	Alerta	Intolerável
18	Jovem	Regular	Alto	Crítico	Intolerável
19	Jovem	Grande	Baixo	Normal	Grave
20	Jovem	Grande	Baixo	Alerta	Grave
21	Jovem	Grande	Baixo	Crítico	Intolerável
22	Jovem	Grande	Médio	Normal	Grave
23	Jovem	Grande	Médio	Alerta	Intolerável
24	Jovem	Grande	Médio	Crítico	Intolerável
25	Jovem	Grande	Alto	Normal	Intolerável
26	Jovem	Grande	Alto	Alerta	Intolerável
27	Jovem	Grande	Alto	Crítico	Intolerável
28	Consolidada	Pequena	Baixo	Normal	Tolerável
29	Consolidada	Pequena	Baixo	Alerta	Grave
30	Consolidada	Pequena	Baixo	Crítico	Grave
31	Consolidada	Pequena	Médio	Normal	Tolerável
32	Consolidada	Pequena	Médio	Alerta	Grave
33	Consolidada	Pequena	Médio	Crítico	Intolerável
34	Consolidada	Pequena	Alto	Normal	Grave
35	Consolidada	Pequena	Alto	Alerta	Grave
36	Consolidada	Pequena	Alto	Crítico	Intolerável
37	Consolidada	Regular	Baixo	Normal	Tolerável

38	Consolidada	Regular	Baixo	Alerta	Grave
39	Consolidada	Regular	Baixo	Crítico	Grave
40	Consolidada	Regular	Médio	Normal	Grave
41	Consolidada	Regular	Médio	Alerta	Grave
42	Consolidada	Regular	Médio	Crítico	Intolerável
43	Consolidada	Regular	Alto	Normal	Grave
44	Consolidada	Regular	Alto	Alerta	Intolerável
45	Consolidada	Regular	Alto	Crítico	Intolerável
46	Consolidada	Grande	Baixo	Normal	Tolerável
47	Consolidada	Grande	Baixo	Alerta	Grave
48	Consolidada	Grande	Baixo	Crítico	Intolerável
49	Consolidada	Grande	Médio	Normal	Grave
50	Consolidada	Grande	Médio	Alerta	Grave
51	Consolidada	Grande	Médio	Crítico	Intolerável
52	Consolidada	Grande	Alto	Normal	Grave
53	Consolidada	Grande	Alto	Alerta	Intolerável
54	Consolidada	Grande	Alto	Crítico	Intolerável
55	Envelhecida	Pequena	Baixo	Normal	Tolerável
56	Envelhecida	Pequena	Baixo	Alerta	Grave
57	Envelhecida	Pequena	Baixo	Crítico	Grave
58	Envelhecida	Pequena	Médio	Normal	Grave
59	Envelhecida	Pequena	Médio	Alerta	Grave
60	Envelhecida	Pequena	Médio	Crítico	Intolerável
61	Envelhecida	Pequena	Alto	Normal	Grave
62	Envelhecida	Pequena	Alto	Alerta	Intolerável
63	Envelhecida	Pequena	Alto	Crítico	Intolerável
64	Envelhecida	Regular	Baixo	Normal	Tolerável
65	Envelhecida	Regular	Baixo	Alerta	Grave
66	Envelhecida	Regular	Baixo	Crítico	Intolerável
67	Envelhecida	Regular	Médio	Normal	Grave
68	Envelhecida	Regular	Médio	Alerta	Grave
69	Envelhecida	Regular	Médio	Crítico	Intolerável
70	Envelhecida	Regular	Alto	Normal	Grave
71	Envelhecida	Regular	Alto	Alerta	Intolerável
72	Envelhecida	Regular	Alto	Crítico	Intolerável
73	Envelhecida	Grande	Baixo	Normal	Grave
74	Envelhecida	Grande	Baixo	Alerta	Grave
75	Envelhecida	Grande	Baixo	Crítico	Intolerável
76	Envelhecida	Grande	Médio	Normal	Grave
77	Envelhecida	Grande	Médio	Alerta	Intolerável
78	Envelhecida	Grande	Médio	Crítico	Intolerável
79	Envelhecida	Grande	Alto	Normal	Grave
80	Envelhecida	Grande	Alto	Alerta	Intolerável
81	Envelhecida	Grande	Alto	Crítico	Intolerável

**APÊNDICE C – VISÃO GERAL DO CONTROLADOR *FUZZY* NO SOFTWARE
MATLAB**

[System]

Name='Risco de *Piping*'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=4

NumOutputs=1

NumRules=81

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='Idade-da-Barragem'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='Jovem': 'trapmf',[0 0 5 10]

MF2='Consolidada': 'trapmf',[5 10 30 50]

MF3='Envelhecida': 'trapmf',[30 50 100 100]

[Input2]

Name='Susceptibilidade-ao-*Piping*'

Range=[0 10]

NumMFs=3

MF1='Pouco-Susceptível':'trapmf',[0 0 3 6]

MF2='Susceptível':'trimf',[3 6 8]

MF3='Muito-Susceptível':'trapmf',[6 8 10 10]

[Input3]

Name='Percentual-do-Reservatório'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='Baixo':'trapmf',[0 0 30 50]

MF2='Médio':'trapmf',[30 50 70 85]

MF3='Alto':'trapmf',[70 85 100 100]

[Input4]

Name='Nível-de-Deterioração'

Range=[0 66]

NumMFs=3

MF1='Normal':'trapmf',[0 0 8 16]

MF2='Alerta':'trimf',[8 16 32]

MF3='Crítico':'trapmf',[16 32 66 66]

[Output1]

Name='Risco-de-Piping'

Range=[0 1]

NumMFs=3

MF1='Aceitável': 'trapmf', [0 0 0.3 0.4]

MF2='Urgencial': 'trapmf', [0.3 0.4 0.5 0.7]

MF3='Emergencial': 'trapmf', [0.5 0.7 1 1]