

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RICARDO SUZIN MARINI

**AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE PROJETOS DE OBRAS DE
MANUTENÇÃO NO PÉ E NA OMBREIRA DE BARRAGENS
HIDRÁULICAS**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RICARDO SUZIN MARINI

**AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE PROJETOS DE OBRAS DE
MANUTENÇÃO NO PÉ E NA OMBREIRA DE BARRAGENS
HIDRÁULICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
aprovação na unidade curricular TCC22010
do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, D. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Suzin Marini, Ricardo
AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE PROJETOS DE OBRAS DE MANUTENÇÃO
NO PÉ E NA OMBREIRA DE BARRAGENS HIDRÁULICAS / Ricardo
Suzin Marini; orientação de Everthon Taghori
Sica. - Florianópolis, SC, 2023.
143 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. Barragens. 2. Manutenção. 3. Hidrelétricas. 4.
Metodologias multicritério. 5. Risco. I. Taghori Sica,
Everthon. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III.
AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE PROJETOS DE OBRAS DE
MANUTENÇÃO NO PÉ E NA OMBREIRA DE BARRAGENS HIDRÁULICAS.

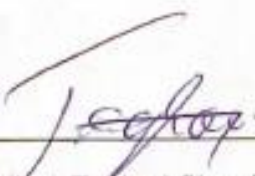
**AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE PROJETOS DE OBRAS DE
MANUTENÇÃO NO PÉ E NA OMBREIRA DE BARRAGENS HIDRÁULICAS**

RICARDO SUZIN MARINI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de dezembro de 2023.

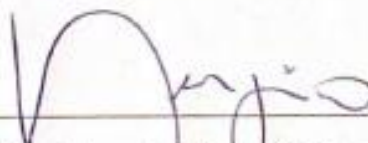
Banca Examinadora:



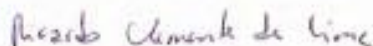
Prof. Everthon Taghori Sica, D. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Daniel Tenfen, D. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Sérgio Luciano Ávila, D. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Ricardo Clemente de Lima, M. Sc.
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por toda a dedicação, amor e carinho. O apoio e os ensinamentos de vocês foram essenciais para que eu me tornasse o que sou hoje. Amo vocês!

À minha irmã, Maria Clara, por ter alegrado nossas vidas desde que chegou. Sua amizade e amor são muito preciosos para mim. Te amo demais!

À minha namorada Carla por todos esses 13 anos de amor e companheirismo. Compartilhar os sonhos e desafios com você é o que me alegra. Obrigado por tanto, por toda sua dedicação e confiança em mim, mesmo quando os desafios pareciam impossíveis. As nossas conquistas fazem tudo valer a pena. Você é tudo para mim!

Ao Lilo, nosso gatinho maravilhoso que completou nossa família. Obrigado pelo apoio emocional e por nos mostrar o amor mais genuíno. Te amo tourinho!

À minha sogra, dona Nelcinha, que sempre se fez presente e nos auxiliou sempre que necessário, obrigado!

À minha avó Marisa que dedicou sua vida ao cuidado dos filhos e netos, sinto falta de brincar de esconde-esconde e pega-pega contigo, obrigado!

Ao meu avô Luizinho que tinha uma bondade extraordinária, saudades de gritar gól e ver um voleizinho com o senhor!

Aos meus avós, Jandir e Leni e todos meus familiares.

Aos meus amigos e companheiros de universidade no IFSC, em especial ao Vinicius Machado.

Aos meus supervisores de estágio, por todos seus ensinamentos que me tornaram uma pessoa e profissional melhor.

A todos os professores que tive durante minha trajetória de aprendizado, obrigado por sua dedicação numa profissão tão nobre. Ao meu orientador, prof. Sica, obrigado por todo o apoio e por ter acreditado em mim.

Por fim, ao Instituto Federal de Santa Catarina. Me sinto privilegiado por ter estudado em uma instituição de excelência, pública e gratuita.

RESUMO

A matriz energética brasileira está em crescimento com a inserção de novas fontes renováveis de energia. No entanto, as fontes energéticas de origem hídrica ainda compõem a maior parcela da geração do país e a maioria está em operação há décadas. Nos últimos tempos, as mudanças climáticas vêm afetando o planeta de várias maneiras, inclusive com a maior imprevisibilidade pluviométrica e fluviométrica, aumentando assim a intensidade e frequência desses eventos extremos, o que amplia as probabilidades de galgamento e, em último caso, de rompimento de barragens. Em virtude disso, espera-se um aumento de obras de recuperação e modernização desse tipo de estrutura. Consequentemente as tomadas de decisão acerca do tema serão cada vez mais frequentes, por esse motivo é proposto um modelo multicriterial para avaliação econômica de obras de manutenção em barragens, por meio de um estudo de caso de uma obra a jusante de uma barragem, com aplicação da avaliação benchmarking, por meio da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Direct Rating*. Com o estudo foi possível detectar ótimo desempenho dos critérios remoção de blocos soltos – desmonte à frio e diária parada devido operação do vertedouro, em contrapartida, obteve-se os piores desempenhos nos critérios pessoal administrativo e remoção de blocos soltos.

Palavras-chave: Barragens. Manutenção. Hidrelétricas. Metodologias multicritério. Risco.

ABSTRACT

Brazil's energy matrix is growing with the addition of new renewable energy sources. However, water-based energy sources still make up the largest share of the country's generation and most have been in operation for decades. In recent times, climate change has been affecting the planet in various ways, including greater unpredictability of rainfall and water levels, thus increasing the intensity and frequency of these extreme events, which increases the likelihood of overtopping and, ultimately, dam failure. As a result, it is expected that there will be an increase in rehabilitation and modernization work on this type of structure. This is why a multi-criteria model is proposed for economical evaluating maintenance works on dams, by means of a case study of a work downstream of a dam, with benchmarking applied by means of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), Analytic Hierarchy Process (AHP) and Direct Rating. With the study, it was possible to detect excellent performance in the criteria removal of loose blocks with non-explosive rock breaking methods and daily downtime due to spillway operation; on the other hand, the worst performances were obtained in the criteria administrative staff and removal of loose blocks.

Keywords: Dams. Maintenance. Hydroelectric. Multicriteria methodologies. Risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema Interligado Nacional Transmissão	24
Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica.....	25
Figura 3 - Localização de barragens de Hidrelétricas, de Irrigação e Defesa contra inundações.....	28
Figura 4 - Tipos de seções de barragens de terra.....	31
Figura 5 - Proteção do talude a jusante	32
Figura 6 - Barragem de Concreto de Gravidade	33
Figura 7 - Distribuição das tensões horizontais efetivas no final da construção e no nível máximo da água	35
Figura 8 - Sequência de eventos que contribuíram para a falha do vertedouro-2.....	41
Figura 9 - Fluxograma de gestão de riscos de engenharia de rochas.....	44
Figura 10 - Exemplo de avaliação de modo de falha potencial (PFMA).....	46
Figura 11 - Modelo de risco em cascata da falha do vertedouro-2 da barragem de Toddbrook.....	47
Figura 12 - Gráfico F-N	48
Figura 13 - Árvore de ponto de vista exemplo.....	52
Figura 14 - Exemplo de comportamentos	55
Figura 15 - Perfil de impacto exemplo.....	60
Figura 16 - Escala ordinal critério 1 - exemplo	61
Figura 17 – Regiões Hidrográficas Brasileiras	62
Figura 18 - Árvore de Pontos de Vista de avaliação de obra de manutenção em barragens.....	65
Figura 19 – Descritores relacionados ao PVF mobilização e montagem do canteiro de obras	66
Figura 20 - Escala ordinal do critério Fornecimento	67
Figura 21 - Comportamento econômico do critério Fornecimento.....	67
Figura 22 - Escala ordinal do critério Implantação dos acessos internos.....	68
Figura 23 - Comportamento econômico do critério Implantação dos acessos internos	69
Figura 24 - Escala ordinal do critério Implantação do canteiro de obras.....	70
Figura 25 - Comportamento econômico do critério Implantação do canteiro de obras.....	71
Figura 26 - Escala ordinal do critério Mobilização de equipamentos e pessoal	72
Figura 27 - Comportamento econômico do critério Mobilização de equipamentos e pessoal.....	72

Figura 28 - Descritores relacionados ao PVF administração local	73
Figura 29 - Descritores relacionados ao PVF remoção de blocos.....	74
Figura 30 - PVE's relacionados ao PVF laje de reforço no pé do vertedouro e ombreiras	76
Figura 31 - Descritores relacionados ao PVE limpeza e preparo da fundação	76
Figura 32 - Descritores relacionados ao PVE laje de reforço ombreira direita	78
Figura 33 - Descritores relacionados ao PVF serviços extraordinários	80
Figura 34 - Descritores relacionados ao PVF desmobilização	82
Figura 35 - Descritores relacionados ao PVF contratação de terceiros	83
Figura 36 - Descritores relacionados ao PVE laje de reforço ombreira direita	84
Figura 37 - Descritores relacionados ao PVE resgate de peixes	85
Figura 38 - Descritores relacionados ao PVE gestão de projetos	86
Figura 39 - Descritores relacionados ao PVE técnicos de HSE	88
Figura 40 - Descritores relacionados ao PVE técnicos(as) de O&M	89
Figura 41 - Descritores relacionados ao PVE acompanhamento técnico de obra.....	90
Figura 42 - Trade-offs para avaliação da execução de manutenção em barragens.....	92
Figura 43 - Trade-offs dos PVEs do PVF 4	93
Figura 44 - Trade-offs dos PVEs do PVF 7	94
Figura 45 - Trade-offs do PVF 1.....	95
Figura 46 - Trade-offs do PVF 2.....	95
Figura 47 - Trade-offs do PVF 3.....	96
Figura 48 - Trade-offs do PVF 4 – PVE 1.....	96
Figura 49 - Trade-offs do PVF 4 – PVE 2.....	97
Figura 50 - Trade-offs do PVF 5.....	97
Figura 51 - Trade-offs do PVF 6.....	98
Figura 52 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 1.....	98
Figura 53 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 2.....	99
Figura 54 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 3.....	99
Figura 55 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 4.....	100
Figura 56 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 5.....	100
Figura 57 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 6.....	101
Figura 58 - Trade-offs finais	102
Figura 59 - Perfil de impacto – PVF 1 e PVF 2.....	103
Figura 60 - Perfil de impacto - PVF 4	104

Figura 61 - Perfil de impacto - PVF 3, PVF 5 e PVF 6	105
Figura 62 - Perfil de impacto - PVF 7 - parte 1	106
Figura 63 - Perfil de impacto - PVF 7 - parte 2	106
Figura 64 - Escala ordinal do critério Pessoal administrativo	118
Figura 65 - Comportamento econômico do critério Pessoal administrativo	118
Figura 66 - Escala ordinal do critério Construção do Escritório	118
Figura 67 - Comportamento econômico do critério Construção do Escritório	119
Figura 68 - Escala ordinal do critério remoção de blocos soltos	119
Figura 69 - Comportamento econômico do critério remoção de blocos soltos	120
Figura 70 - Escala ordinal do critério remoção de blocos soltos – desmonte à frio	120
Figura 71 - Comportamento econômico do critério remoção de blocos soltos – desmonte à frio	121
Figura 72 - Escala ordinal do critério limpeza rigorosa e preparo da fundação para concreto	121
Figura 73 - Comportamento econômico do critério limpeza rigorosa e preparo da fundação para concreto	122
Figura 74 - Escala ordinal do critério concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados	122
Figura 75 - Comportamento econômico do critério concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados	123
Figura 76 - Escala ordinal do critério forma plana convencional	123
Figura 77 - Comportamento econômico do critério forma plana convencional	124
Figura 78 - Escala ordinal do critério beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50	124
Figura 79 - Comportamento econômico do critério beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50	125
Figura 80 - Escala ordinal do critério fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50	125
Figura 81 - Comportamento econômico do critério fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50	126
Figura 82 - Escala ordinal do critério concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de veda-junta	126
Figura 83 - Comportamento econômico do critério concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de veda-junta	127
Figura 84 - Escala ordinal do critério ensecamento extraordinário da bacia de dissipação	127
Figura 85 - Comportamento econômico do critério ensecamento extraordinário da bacia de dissipação	128

Figura 86 - Escala ordinal do critério diária parada devido operação do vertedouro.....	128
Figura 87 - Comportamento econômico do critério diária parada devido operação do vertedouro	129
Figura 88 - Escala ordinal do critério desmobilização de colaboradores da obra....	129
Figura 89 - Comportamento econômico do critério desmobilização de colaboradores da obra	130
Figura 90 - Escala ordinal do critério desmobilização de materiais e equipamentos da obra	130
Figura 91 - Comportamento econômico do critério desmobilização de materiais e equipamentos da obra	131
Figura 92 - Escala ordinal do critério mudanças necessárias no projeto	131
Figura 93 - Comportamento econômico do critério mudanças necessárias no projeto	132
Figura 94 - Escala ordinal do critério viagens do projetista	132
Figura 95 - Comportamento econômico do critério viagens do projetista.....	133
Figura 96 - Escala ordinal do critério estudo para resgate da ictiofauna.....	133
Figura 97 - Comportamento econômico do critério estudo para resgate da ictiofauna.....	134
Figura 98 - Escala ordinal do critério resgate da ictiofauna.....	134
Figura 99 - Comportamento econômico do critério resgate da ictiofauna	135
Figura 100 - Escala ordinal do critério consultoria sobre a execução do projeto	135
Figura 101 - Comportamento econômico do critério consultoria sobre a execução do projeto	136
Figura 102 - Escala ordinal do critério monitoramento dos indicadores do projeto .	136
Figura 103 - Comportamento econômico do critério monitoramento dos indicadores do projeto.....	137
Figura 104 - Escala ordinal do critério reuniões de acompanhamento de projeto...	137
Figura 105 - Comportamento econômico do critério reuniões de acompanhamento de projeto	138
Figura 106 - Escala ordinal do critério técnico(a) de segurança.....	138
Figura 107 - Comportamento econômico do critério técnico(a) de segurança	139
Figura 108 - Escala ordinal do critério reuniões de acompanhamento de HSE	139
Figura 109 - Comportamento econômico do critério reuniões de acompanhamento de HSE	140
Figura 110 - Escala ordinal do critério técnico(a) em mecânica.....	140
Figura 111 - Comportamento econômico do critério técnico(a) em mecânica	141
Figura 112 - Escala ordinal do critério técnico(a) eletricista	141

Figura 113 - Comportamento econômico do critério técnico(a) eletricitista.....	142
Figura 114 - Escala ordinal do critério estudo do projeto	142
Figura 115 - Comportamento econômico do critério estudo do projeto	143
Figura 116 - Escala ordinal do critério acompanhamento técnico de obra.....	143
Figura 117 - Comportamento econômico do critério acompanhamento técnico de obra.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandezas monitoradas em barragens de concreto	36
Tabela 2 - Grandezas monitoradas em barragens de terra e enrocamento	37
Tabela 3 - Escala fundamental de Saaty	56
Tabela 4 - Exemplo de matriz de comparação par a par AHP	57
Tabela 5 - Índice de Consistência (tabela Saaty)	58
Tabela 6 - Valores exemplo do PVF Mobilização e montagem do canteiro de obras	63
Tabela 7 - Níveis de impacto dos Descritores	64
Tabela 8 - Matriz de comparação par a par: PVFs	92
Tabela 9 – Direct rating dos PVEs do PVF 4	93
Tabela 10 - Direct rating dos PVEs do PVF 7	94
Tabela 11 - Valor econômico global	103
Tabela 12 - Melhores e piores desempenhos do perfil de impacto	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARP	Tão Baixo Quanto Razoavelmente Praticável (<i>As Low As Reasonably Practicable</i>)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATO	Acompanhamento Técnico de Obra
CCR	Concreto Compactado à Rolo
CMPI6	Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 6</i>)
FMEA	Modo de Falha e Análise de Efeitos (<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>)
HSE	Departamento de Saúde e Segurança (<i>Healthy and Safety Executive</i>)
HSSE	Saúde, Segurança e Meio ambiente (<i>Health Safety Security Environment</i>)
IDF	Intensidade, Duração e Frequência
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
KPI	Indicadores Chaves de Performance (<i>Key Performance Indicators</i>)
MAUT	Teoria de Utilidade Multiatributo
O&M	Operação e Manutenção
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PFMA	Avaliação de Modos de Falhas Potencial (<i>Potential Failure Modes Assesment</i>)
RIDM	Tomada de Decisão Informada sobre o Risco (<i>Risk-Informed Decision Making</i>)
SBA	Abordagem Baseada em Padrões (<i>Standards-based approach</i>)
SEP	Sistema de Potência Elétrica

SIN Sistema Interligado Nacional

UHE Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	20
1.2	Definição do Problema	21
1.3	Objetivo Geral.....	21
1.4	Objetivos Específicos	21
1.5	Estrutura do Trabalho.....	22
2	BARRAGENS	23
2.1	Barragens Hidráulicas	27
2.2	Manutenção em barragens.....	34
2.3	Análise de risco em obras.....	39
3	METODOLOGIAS MULTICRITERIAIS DE APOIO À DECISÃO	51
3.1	Metodologias multicriteriais.....	52
3.1.1	Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT)	53
3.1.2	Método AHP	56
3.1.3	Valoração Direta (Direct Rating)	58
3.2	Avaliação de desempenho por Benchmarking.....	59
4	ESTUDO DE CASO E MODELAGEM PROPOSTA	61
4.1	Estudo de caso.....	61
4.2	Dados de entrada	63
4.3	Modelo multicritério	64
4.3.1	Ponto de vista fundamental mobilização e montagem do canteiro de obras	66
4.3.1.1	<i>Fornecimentos</i>	<i>66</i>
4.3.1.2	<i>Implantação dos acessos internos</i>	<i>68</i>
4.3.1.3	<i>Implantação do Canteiro de obras</i>	<i>69</i>
4.3.1.4	<i>Mobilização de equipamentos e pessoal</i>	<i>71</i>
4.3.2	Ponto de vista fundamental administração local	73
4.3.2.1	<i>Pessoal administrativo</i>	<i>73</i>
4.3.2.2	<i>Construção de Escritório</i>	<i>73</i>
4.3.3	Ponto de vista fundamental remoção de blocos.....	74
4.3.3.1	<i>Remoção de blocos soltos</i>	<i>74</i>
4.3.3.2	<i>Remoção de blocos soltos – Desmonte à frio</i>	<i>75</i>
4.3.4	Ponto de vista fundamental Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreiras	76
4.3.4.1	<i>Ponto de vista elementar Limpeza e preparo da Fundação</i>	<i>76</i>
4.3.4.1.1	<i>Limpeza rigorosa e preparo de fundação para concreto</i>	<i>76</i>
4.3.4.1.2	<i>Concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados</i>	<i>77</i>
4.3.4.2	<i>Ponto de vista elementar Laje de reforço ombreira direita</i>	<i>78</i>
4.3.4.2.1	<i>Forma plana convencional</i>	<i>78</i>
4.3.4.2.2	<i>Beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50</i>	<i>78</i>
4.3.4.2.3	<i>Fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50</i>	<i>79</i>
4.3.4.2.4	<i>Concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de vedajunta</i>	<i>79</i>

4.3.5	Ponto de vista fundamental serviços extraordinários	80
4.3.5.1	<i>Ensecamento extraordinário da bacia de dissipação</i>	81
4.3.5.2	<i>Diária parada devido operação do vertedouro</i>	81
4.3.6	Ponto de vista fundamental desmobilização	82
4.3.6.1	<i>Desmobilização de colaboradores da obra</i>	82
4.3.6.2	<i>Desmobilização de materiais e equipamentos da obra</i>	82
4.3.7	Ponto de vista fundamental contratação de terceiros	83
4.3.7.1	<i>Ponto de vista elementar acompanhamento do projetista</i>	83
4.3.7.1.1	<i>Mudanças necessárias no projeto</i>	84
4.3.7.1.2	<i>Viagens do projetista</i>	84
4.3.7.2	<i>Ponto de vista elementar resgate de peixes</i>	84
4.3.7.2.1	<i>Estudo para resgate da ictiofauna</i>	85
4.3.7.2.2	<i>Resgate da ictiofauna</i>	85
4.3.7.3	<i>Ponto de vista elementar gestão de projetos</i>	86
4.3.7.3.1	<i>Consultoria sobre a execução do projeto</i>	86
4.3.7.3.2	<i>Monitoramento dos indicadores do projeto</i>	87
4.3.7.3.3	<i>Reuniões de acompanhamento do projeto</i>	87
4.3.7.4	<i>Ponto de vista elementar técnicos(as) de HSE</i>	88
4.3.7.4.1	<i>Técnico(a) de segurança</i>	88
4.3.7.4.2	<i>Reuniões de acompanhamento de HSE</i>	89
4.3.7.5	<i>Ponto de vista elementar técnicos(as) de O&M</i>	89
4.3.7.5.1	<i>Técnico(a) em mecânica</i>	89
4.3.7.5.2	<i>Técnico(a) eletricista</i>	90
4.3.7.6	<i>Ponto de vista elementar acompanhamento técnico de obra</i>	90
4.3.7.6.1	<i>Estudo do projeto</i>	91
4.3.7.6.2	<i>Acompanhamento técnico da obra</i>	91
4.3.8	Trade-offs	91
4.3.8.1	<i>Trade-offs para avaliação da execução de manutenção em barragens</i>	92
4.3.8.2	<i>Trade-offs dos PVEs</i>	93
4.3.8.2.1	<i>Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreira direita – PVF 4</i>	93
4.3.8.2.2	<i>Contratação de Terceiros – PVF 7</i>	93
4.3.8.3	<i>Trade-offs dos Critérios</i>	94
4.3.8.4	<i>Trade-offs finais</i>	101
4.3.8.5	<i>Valor econômico global</i>	103
4.3.9	Avaliação multicriterial benchmarking	103
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	110
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A – ESCALAS CARDINAIS E ORDINAIS DOS CRITÉRIOS	118

1 INTRODUÇÃO

A energia renovável é tema recorrente nos congressos internacionais do clima, principalmente com as novas tecnologias de geração de energia elétrica ganhando destaque, especialmente, devido aos avanços nas tecnologias desse tipo de geração, notadamente a eólica e a solar, as quais apresentam uma notável competitividade. Contudo, as hidrelétricas continuam a desempenhar o papel predominante na matriz energética brasileira, como indicado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS, 2023a), além de serem a principal fonte de energia renovável global, conforme destacado pela Associação Internacional de Hidreletricidade (IHA, 2020).

No Brasil, mais de 60% do potencial hidrelétrico nacional, estimado em 172 GW, é atualmente explorado, sendo que cerca de 70% desse potencial está concentrado nas bacias hidrográficas da Amazônia e Tocantins - Araguaia (EPE, 2021). Embora persista um potencial significativo para o desenvolvimento de novas usinas hidrelétricas (UHEs), Carolli *et al.* (2022) ressaltam a importância de considerar a pegada de carbono associada a esses empreendimentos, especialmente devido à fragmentação dos rios, que impacta a migração de peixes e outros organismos, causando danos à vegetação ribeirinha.

Com o intuito de prevenir falhas e rupturas que possam resultar em danos substanciais, é imprescindível que seja realizada a manutenção das barragens atuais. Estas estruturas servem para regularizar o fluxo fluviométrico e, com esse objetivo, geram um represamento de água a montante. Esses reservatórios podem ser utilizados para controle de enchentes, irrigação e geração de energia elétrica (QUARANTA; DAVIS, 2022). As barragens hidrelétricas são classificadas de duas formas: pelo seu reservatório e pelo tipo de material de sua construção. Os reservatórios podem ser de acumulação ou a fio d'água, sendo que o reservatório de acumulação armazena grande quantidade de água e utiliza a diferença entre as cotas montante e jusante do reservatório para geração de energia. Por sua vez, o reservatório a fio d'água busca minimizar a retenção de água, aproveitando a energia cinética da vazão d'água do rio para gerar eletricidade.

A determinação do tipo e forma da barragem dependem de alguns fatores, conforme Baptista e Lara (2014):

- a) “Características geológicas e geotécnicas locais, sabendo-se dos diferentes requisitos em termos de fundações, associados aos diversos tipos de barragens;
 - b) Características topográficas do local de implementação da obra;
 - c) Condições climáticas, que podem implicar em restrições de uso das diferentes técnicas construtivas.
- Assim, as barragens podem ser essencialmente dos seguintes tipos: concreto, terra, enrocamento, mistas, alvenaria, gabiões etc.”

As barragens de concreto se dividem em duas principais categorias: as de gravidade, que resistem às forças externas exclusivamente por motivo de seu próprio peso, e as em arco que apresentam um formato curvo e suportam a pressão da água distribuindo-a horizontalmente, ao longo da estrutura. As barragens de enrocamento são construídas com pedras encaixadas manualmente ou mecanicamente e necessitam, além de um núcleo central de argila para não haver infiltração de água entre as pedras, de um sistema de drenagem eficiente. As barragens de terra, por sua vez, são constituídas de terra compactada e geralmente possuem núcleo de material impermeável com filtro a jusante para drenagem (BAPTISTA; LARA, 2014; SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2018). Assim, as falhas nessas estruturas devem ser estudadas a fim de serem evitadas ao máximo, para que a segurança de barragens seja a prioridade do operador da estrutura.

As falhas em barragens têm o potencial de serem catastróficas, dada a grandeza dessas estruturas e a força intensa da água após um eventual rompimento. Portanto, o monitoramento, os reparos e as reformas necessárias devem ser muito bem planejados e executados com qualidade. Destaca-se que as falhas para rompimento de uma barragem podem ocorrer por variados motivos, alguns exemplos são: o galgamento por eventos extremos; a infiltração ou erosão da fundação; e a fissura e fratura do concreto por sobretensão. As causas operacionais que podem acarretar falhas são: as alterações estruturais; a operação além do escopo definido; desvio de utilidade da estrutura; e monitoramento e manutenções inadequadas (BROWN, 2017).

Dessa forma, é importante ressaltar a necessidade do monitoramento estrutural de uma barragem, que deve ser realizado periodicamente, seguindo o manual ou as instruções do construtor, bem como das manutenções de grande escala, que devem ser meticulosamente planejadas. Ainda, deve ser feita a

instalação de instrumentação para acompanhar o desempenho das estruturas e fundações, de forma que seus resultados possam ser analisados e interpretados para avaliar a segurança da barragem. Aspectos como o sistema de drenagem, o surgimento de água a jusante, trincas e erosões também devem ser inspecionados e analisados com base no estado atual em comparação com o anterior (ELETROBRÁS, 2000).

Nesse contexto, o plano de auscultação é uma ferramenta valiosa, uma vez que engloba os métodos de observação do comportamento da obra de Usinas Hidrelétricas (UHEs) e tem como objetivo principal supervisionar as condições de segurança do empreendimento durante toda a sua vida útil. Além disso, permite a detecção precoce de qualquer anomalia que possa comprometer o desempenho ou ameaçar a estabilidade da estrutura (ELETROBRÁS, 2003). Em virtude da detecção precoce, as manutenções necessárias normalmente são as preditivas, que contribuem para evitar falhas inesperadas. No entanto, quando a falha ocorre as manutenções corretivas são necessárias, podendo ser de emergência ou planejadas (ANA, 2016).

Uma vez que a operação de hidrelétricas pode se estender por várias décadas, é necessário constante vigilância e monitoramento sobre a barragem. Em determinado momento pode ser necessário o reforço ou a modernização da estrutura (BROWN, 2017). Essas necessidades variam dependendo do tipo de estrutura. Por exemplo, para estruturas de concreto, é importante monitorar o seu comportamento térmico. Por sua vez, para barragens de terra, é essencial observar as pressões neutras no interior do aterro. Portanto, a manutenção e o monitoramento adequados são fundamentais para garantir a segurança e diminuir os riscos de falha de uma barragem ao longo de sua vida útil.

A análise de riscos é outro processo fundamental para garantir a segurança e a eficiência de obras em diversos setores, como a construção civil, a indústria e o setor energético. Esse processo envolve a identificação e a avaliação dos riscos envolvidos na realização da obra, assim como a definição de medidas para mitigar ou eliminar esses riscos. BROWN (2017) destaca a importância da análise de riscos em obras de barragens:

“Em virtude de seus tamanhos, sua importância para a sociedade e as consequências potencialmente desastrosas de seu rompimento, é essencial que os riscos associados a grandes barragens sejam avaliados com rigor e gerenciados proativamente em todas as fases de suas vidas, para que o risco social de rompimento de barragens permaneça Tão Baixo Quanto Razoavelmente Praticável (*As Low As Reasonably Practicable*, ALARP).”

1.1 Justificativa

A atenção voltada para a segurança de barragens tem sido um tema proeminente nos últimos anos, especialmente devido à insegurança e rompimentos em determinadas estruturas de barragens de rejeitos, como os eventos ocorridos em Mariana e Brumadinho. Esses incidentes, além de resultarem em perdas sociais significativas, soterraram centenas de pessoas e inundaram comunidades com lama, afetando a moradia de mais de 2 mil indivíduos e causando a devastação de 1640 hectares de vegetação (G1 MINAS GERAIS, 2015).

Em que pese as barragens de rejeitos sejam diferentes das barragens de reservatório de água, as consequências das mudanças climáticas globais podem impactar ambas de forma significativa. No caso das barragens de reservatório as mudanças na quantidade e frequência das chuvas é um fator determinante, tendo em vista que, embora haja incertezas nos modelos climáticos, estudos indicam um aumento na vulnerabilidade dos reservatórios às inundações (KUO; GAN, 2015). Isso reforça a importância de monitorar e gerenciar cuidadosamente os recursos hídricos em um contexto de mudanças climáticas. Nesse contexto, a forma de construção das barragens e suas manutenções ao longo do tempo emergem como pontos centrais de preocupação para a coibição de falhas, sendo o foco deste trabalho.

Tendo em vista que as barragens normalmente suportam longos anos de funcionamento e intempéries, há barragens centenárias em operação. Entretanto, quando foram construídas, suas premissas de execução eram menos rígidas do que as necessárias atualmente. Em virtude disso, surge a preocupação de como o aumento das inundações causadas pelas mudanças climáticas podem afetar a segurança dos reservatórios (CARNEIRO *et al.*, 2022).

Nesse contexto, estudos para atualização das premissas de execução, tais como curvas de IDF (intensidade, duração e frequência) combinados com modelos CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*, modelo numérico de comportamento futuro do clima) demonstraram aumento de risco de falha hidrológica em barragens. Considerando um cenário climático de chuva milenar, observa-se que inundações ocorrem em metade dos cenários futuros. Isso evidencia uma necessidade significativa de investimentos em infraestrutura e manutenções de barragens (CARNEIRO *et al.*, 2022). Portanto, torna-se inegável a importância de estudos de avaliação de obras de manutenção de barragens.

1.2 Definição do Problema

A maior imprevisibilidade de precipitações extremas com a mudança climática e com aumento na frequência e intensidade desses acontecimentos, indica maiores chances de falhas em barragens hidrelétricas e com isso, uma maior necessidade de obras complexas de modernização e de manutenções nessas estruturas. Diante desse contexto, surge a necessidade de desenvolver uma abordagem eficaz para modelar e avaliar as tarefas relacionadas a uma obra de manutenção de uma barragem que será objeto de estudo do presente trabalho, especificamente em seu pé e ombreira direita. Como, então, é possível elaborar uma estratégia que atenda a essa demanda crescente de forma eficiente e segura?

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho visa propor um modelo multicriterial de avaliação econômica por benchmarking de obras de manutenção a jusante de uma barragem hidráulica, utilizando análise multicriterial, por meio da Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT).

1.4 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se levantar:

- a) analisar os tipos de barragem existentes e a manutenção da estrutura;

- b) desenvolver um modelo integrado multicriterial de avaliação de obras em barragens;
- c) realizar um estudo de caso em que será aplicado o modelo integrado multicriterial de avaliação de barragens; e
- d) abordar o desempenho econômico por meio de Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT).

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. Inicia-se pela introdução, onde são apresentados os seguintes tópicos: objetivos; justificativas e a definição do problema. A fundamentação teórica é apresentada no segundo capítulo, onde são definidos os tipos de barragem, as manutenções necessárias e a análise de risco de obras nessas estruturas. O capítulo três explana sobre a descrição da metodologia multicritério utilizada na tese. A estruturação do modelo multicritério de avaliação de obras em barragens é apresentado no quarto capítulo. No quinto capítulo é abordado as conclusões sobre o modelo e considerações importantes sobre o trabalho. E, por último, apresenta-se as referências bibliográficas.

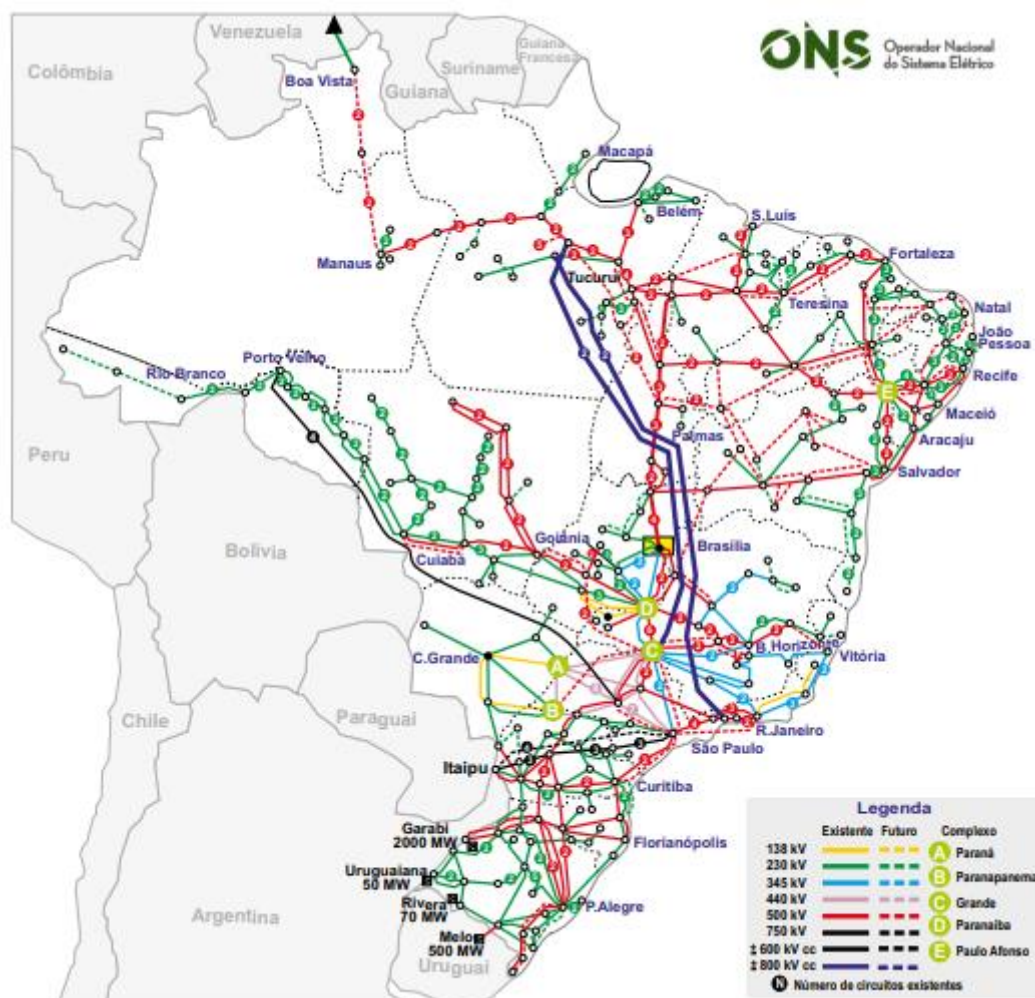
2 BARRAGENS

No âmbito da geração e transmissão de energia elétrica, o Brasil possui o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é o responsável pela maior parte de interligação dessa energia. Esse sistema, também denominado de Sistema de Potência Elétrica (SEP) é regulado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e controlado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Trata-se de um sistema hidro-termo-eólico, com predominância de plantas hidroelétricas e composto de quatro subsistemas, o subsistema Sul, o subsistema Sudeste/Centro-Oeste, o subsistema Nordeste e o subsistema Norte, que é o menos estruturado, por ter vários obstáculos que impedem e dificultam essa maior penetração do sistema (ONS, 2023a).

A rede interligada de transmissão elétrica no Brasil possibilita o transporte de energia de norte a sul, o que representa uma vantagem significativa para a sociedade, uma vez que a interconexão entre os subsistemas permite a transferência de energia elétrica entre diferentes regiões do país. Em virtude disso, quando há excesso de consumo de energia elétrica em um subsistema, outro subsistema é capaz de fornecer a energia necessária às cargas. Isso permite um ganho extraordinário em termos de segurança energética, confiabilidade e economia no atendimento à demanda de eletricidade, explorando a diversidade dos regimes hidrológicos e dos demais recursos energéticos primários disponíveis no Brasil.

O SIN é constituído de linhas de transmissão de 138 a 750 kV CA e de 600 a 800 kV CC, correspondendo aproximadamente 180 mil km de linhas de transmissão acima de 230 kV e 176 GW de geração (Figura 1). Todos os estados brasileiros, com exceção de Roraima – que tem a perspectiva de se integrar ao SIN nos próximos anos – estão conectados ao SIN (ONS, 2023b).

Figura 1 - Sistema Interligado Nacional Transmissão

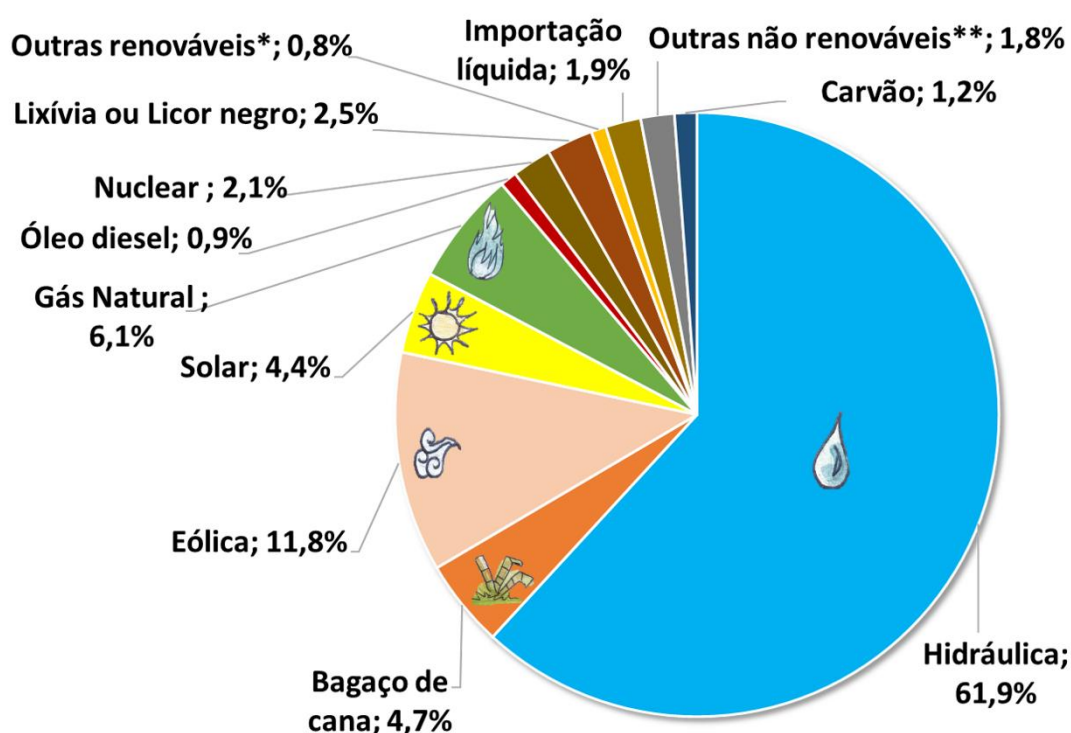


Fonte: ONS, 2023b.

A matriz elétrica brasileira é majoritariamente composta de fontes renováveis e, principalmente, de fonte hidráulica, sendo cerca de 87,5% de produção de energia elétrica por fonte renovável e, deste percentual, 51,4% corresponde às hidrelétricas. Desse modo, as hidrelétricas possuem uma grande responsabilidade na segurança energética e na manutenibilidade da inércia e resiliência eletroenergética. Assim, para ser possível a geração através das hidrelétricas, geralmente é necessária a criação de uma barragem, que também pode ser utilizada para outras demandas socioeconômicas, como o abastecimento de água, irrigação e controle de cheias (MEES, 2020).

A oferta interna de energia elétrica por fontes hidráulicas no ano de 2022, contemplou 61,9% do total da oferta nacional (Figura 2). Desse total, o Brasil possui 92 usinas a fio d'água e 60 usinas com reservatório de acumulação (ANA, 2023a). Os reservatórios à fio d'água geram a energia proveniente somente da vazão do rio, com o mínimo ou nenhuma acumulação. Já, os reservatórios de acumulação são formados em locais com alta queda d'água ou elevado volume de água, nas cabeceiras dos rios e armazenam um volume considerável de água.

Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica



Fonte: EPE (2023).

Os reservatórios a fio d'água são aproveitados quando o volume do reservatório não é o mais importante, pois “as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista” (ELETROBRÁS, 2000). Eletrobrás (2000), complementa que o sistema de adução necessariamente deverá fornecer água o bastante para destinar energia cinética suficiente para a turbina, a fim de que se consiga fornecer a potência para atendimento da demanda máxima. Assim o vertedouro funcionará durante boa parte do tempo, liberando o excesso de água a montante.

A estrutura a fio d'água sem reservatório de regularização tem algumas vantagens sobre os reservatórios de acumulação. Pode-se destacar a dispensa dos

estudos de sazonalidade e regularização de vazões, a facilitação dos estudos e a construção da tomada d'água. No entanto, Gomes (2012) destaca que, para o ONS, as usinas à fio d'água exigem um maior despacho termelétrico para atendimento das demandas sazonais da carga, além de uma maior exigência das usinas com reservatório e menor chance de manobra para controle de cheias.

As barragens de acumulação, por sua vez, reservam água durante os períodos úmidos e garantem fluxo de água para geração nos períodos secos. Essas usinas são as chamadas de “baterias naturais” por armazenarem a energia potencial para utilização futura. Elas são empregadas quando, ao contrário da fio d'água, as vazões de estiada do rio são inferiores “à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto” (ELETROBRÁS, 2000). Desse modo, o lago formado proporcionará a vazão regularizada necessária para geração da energia elétrica.

As condições de proteção ambiental e a necessidade de recomposição do capital natural impõem condicionantes à construção de barragens com elevada capacidade de armazenamento (GOMES, 2012). Por esse motivo as UHEs com reservatórios são preteridas quando comparadas às barragens à fio d'água ao longo das últimas décadas. Conforme análise dos Diagramas Esquemáticos das Usinas Hidrelétricas do SIN de 2001 (ONS, 2002) a 2014 (ONS, 2013), foram construídas 18 usinas com reservatório e 35 a fio d'água. Já, no período de 2014 a 2023 (ONS, 2023c), o número de construções dos dois tipos de usina hidrelétrica diminuiu drasticamente, sendo construídas 4 usinas com reservatório e 11 a fio d'água, sendo que até 2027 a previsão é da construção de apenas mais uma usina a fio d'água. Isso demonstra a maior dificuldade de liberação das construções por parte dos órgãos institucionais.

Além da classificação por usina, com e sem armazenamento ou regularização, há outras decisões a serem tomadas no momento de projeto de construção de uma barragem. Vários são os locais onde as barragens podem ser implantadas, de modo que essas localizações podem ter distintas características topográficas e geotécnicas e, com a análise do terreno, é possível decidir qual o melhor material para a construção da barragem, uma vez que o material

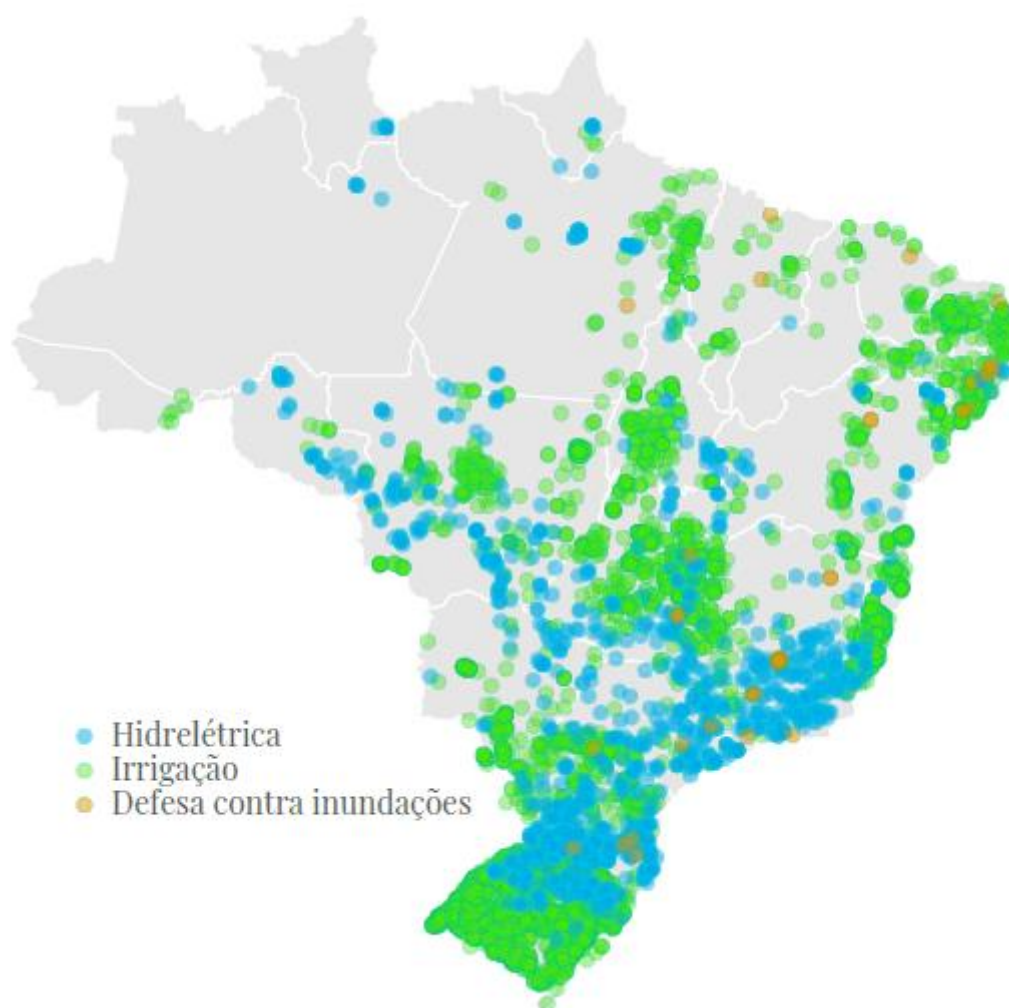
predominante permite a classificação do tipo de obra que será mais bem explorado na sessão 2.1 deste trabalho.

2.1 Barragens Hidráulicas

As barragens são construções transversais ao fluxo dos rios, que represam a água e podem ser construídas para controle de cheias, incluindo sistema de distribuição, irrigação, navegação e para geração de energia elétrica. Essas estruturas podem ser pequenos maciços de terra, para atender atividades de pequenos agricultores, recreação e demandas domésticas e, também, gigantes estruturas de concreto e/ou terra, para fins industriais, abastecimento público e retenção de rejeitos de mineração, como as barragens de Mariana e Brumadinho, assim como para geração de eletricidade (ANA, 2023b).

As barragens desempenham um papel de extrema importância na gestão hídrica nacional, contribuindo para o controle de grandes catástrofes e enchentes. Quando bem construídas e operadas elas retêm a água em situações de muita precipitação a montante e liberam quando a precipitação diminui. Conforme ANA (2023b), 5% das barragens cadastradas no SNISB (Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens) são para produção de energia elétrica, enquanto 38% são para irrigação, 21% para dessedentação animal, 11% para regularização de vazões e 25% para os demais usos. Na Figura 3, pode-se visualizar a quantidade e a localização das barragens de hidrelétricas, para irrigação e regularização do fluxo do rio.

Figura 3 - Localização de barragens de Hidrelétricas, de Irrigação e Defesa contra inundações



Fonte: ANA, 2023b.

Todavia, o rompimento de uma estrutura dessa pode acarretar severos danos a sociedade, além de ser dispendioso, pois com uma possível falha, a água é liberada rapidamente e a correnteza pode arrastar comunidades inteiras a jusante. Como exemplo, pode-se citar o rompimento da barragem Malpasset, na França, em 1959, que era uma barragem de concreto de 66 metros de altura com um reservatório de 55 milhões de m³, 421 pessoas foram mortas por ondas de até 40 metros de altura (HEIDARZADEH; FEIZI, 2022), além dos rompimentos das barragens de rejeitos de Mariana e Brumadinho, ambas operadas pela Vale, que ocorreram, respectivamente, em 2015 e 2019.

Em virtude disso, deve-se seguir requisitos mínimos de segurança para construção de uma barragem. Assim, para a elaboração do projeto, há algumas

etapas necessárias para que seja feito um bom planejamento e, com isto, a execução seja bem-sucedida. Para USACE (2004) as fases do projeto são reconhecimento, viabilidade, engenharia e pré-construção, construção e, com tudo executado, a operação e manutenção (O&M). Ademais, WRP Dam Safety Office (2008), explicita as fases iniciais de planejamento dos projetos de barragens:

“A progressão normal inclui: investigações iniciais de locais potenciais; identificação dos principais componentes do projeto adequados ao(s) local(is); desenvolvimento de planos conceituais; exame de opções e seleção final da configuração do local e do projeto; investigações detalhadas de engenharia e preparação de relatórios de projeto; elaboração de planos de construção preliminares e/ou intermediários; e preparação de planos e especificações finais de construção.”

Dessa forma, para a primeira etapa, deve-se buscar informações sobre as características topográficas, geológicas e geotécnicas do terreno, que são importantíssimas na definição do tipo de barragem que será projetada e construída no local escolhido. Além disso, deve-se considerar o regime hidrológico da região, a intensidade das chuvas, bem como os períodos de chuvas extraordinárias, que necessitam de um estudo aprofundado. Isso permitirá a construção na época mais apropriada e, acima de tudo, a seleção dos materiais mais adequados para garantir a máxima segurança da estrutura. Para Garcia *et al.* (2009) não existem muitas localizações onde uma barragem segura e funcional seja inviável do ponto de vista construtivo, no entanto, existem locais em que o projeto pode se tornar muito dispendioso. Por fim, conclui que, caso uma barragem não puder ser construída dentro dos requisitos de segurança necessários, o projeto não deverá ser executado.

Para projetos hidrelétricos, algumas opções de barragem são mais indicadas, como de enrocamento; de terra, em seção homogênea de solo; e de concreto, convencional ou CCR (concreto compactado a rolo), em seção tipo gravidade (ICOLD, 2023). Para essa escolha, que deve ser realizada com critérios técnicos, prezando pela segurança da barragem e considerando a geologia e topografia do local, o critério definidor é o econômico. Para Garcia *et al.*, (2009), os custos do projeto elevam quando:

- a) é constatada longa distância entre os materiais necessários para a obra e o local da obra;
- b) é necessário proteção contra erosão; e
- c) é necessária uma investigação geotécnica abrangente.

As barragens de terra têm a necessidade de ser construídas em locais cujas topografias sejam suavemente onduladas, o capeamento do solo seja espesso e em áreas, preferencialmente a montante, que consigam fornecer materiais argilosos/arenosos suficientes para a construção do maciço compactado (USACE, 2004). Em virtude da utilização de materiais do local, de pouco beneficiamento e de equipamentos simples para sua construção, o custo é bastante competitivo frente a outros tipos de construção, fazendo com que a adoção deste tipo de estrutura seja bem mais frequente (BAPTISTA; LARA, 2014; GARCIA *et al.*, 2009).

Por sua vez, as barragens com espaldares de rocha e núcleo impermeável são chamadas de barragens de enrocamento. Assim como a barragem de terra, esse modelo utiliza materiais da região e tem um custo mais atrativo, distinguindo-se em: de enrocamento com núcleo de material impermeável, sendo que somente o centro da barragem é feito de outro material; e de enrocamento com face em concreto que tem uma superfície impermeabilizante em concreto a montante (BAPTISTA; LARA, 2014). Tschernutter e Kainrath (2016) afirmam que as barragens de aterro com fino núcleo de concreto armado são soluções alternativas para projetos de barragens com altura limitada. Com vantagem de serem soluções econômicas, seguras e com período de construção curto e que independe do clima.

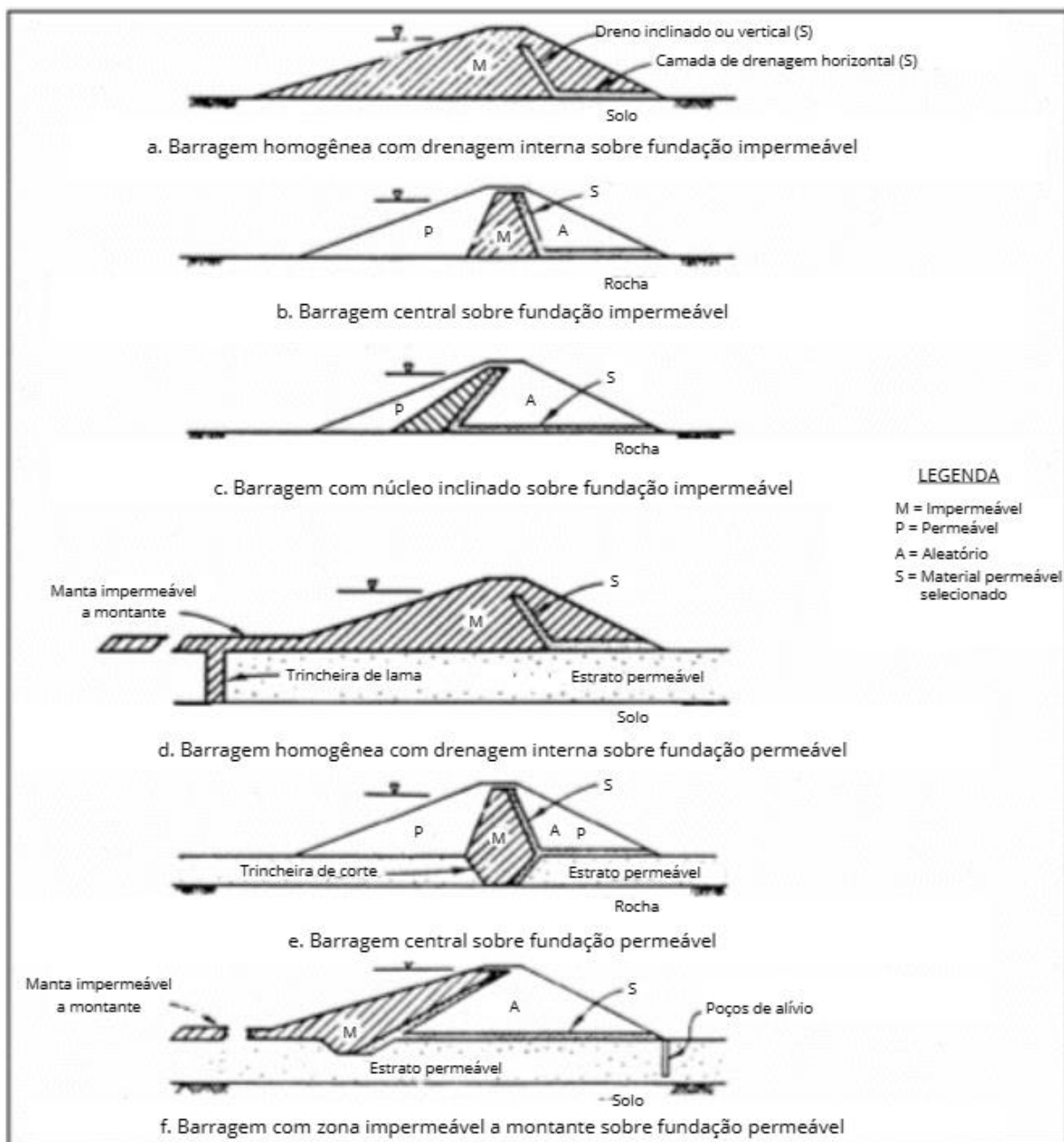
De acordo com Baptista e Lara (2014), o desenvolvimento do projeto da barragem de terra e de enrocamento envolve alguns fatores, quais sejam:

- a) a necessidade de instalação de redes de fluxo com drenos para evitar o acontecimento de percolação na barragem, o que fragiliza a estrutura;
- b) a previsão de uma borda livre, para não ocorrer extravasamento por cima da barragem; e
- c) os taludes da barragem devem ser devidamente protegidos de modo a evitar possíveis erosões.

Há ainda algumas alternativas de projeto para barragens de terra e enrocamento. Nos casos de barragens de terra, quando somente um material impermeável está disponível e a altura da barragem é baixa, pode ser utilizada a

opção ilustrada na Figura 4a. Em casos em que há pouco material impermeável, pode-se construir as barragens de terra com núcleo impermeável, como na Figura 4b e Figura 4c. Por fim, quando se tem a fundação permeável, ilustradas na Figura 4d, Figura 4e e Figura 4f, é necessário ter o controle de infiltração por tubulações na fundação para evitar grandes pressões de elevação.

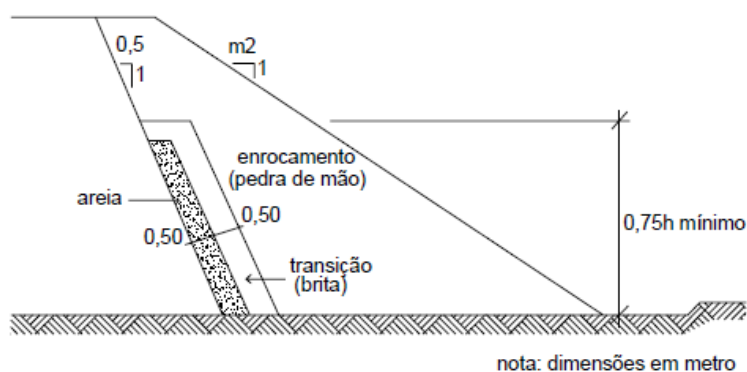
Figura 4 - Tipos de seções de barragens de terra



Fonte: Adaptado de USACE, 2004.

Tratando-se especificamente de barragens de enrocamento convencionais (quando há a construção de um vertedouro separado), a proteção interna do talude a jusante deve ser feita conforme Figura 5, visando evitar a fuga do material impermeável (ELETROBRÁS, 2000).

Figura 5 - Proteção do talude a jusante



DETALHE 4 - PROTEÇÃO INTERNA DO CORPO DA BARRAGEM DE ENROCAMENTO

Fonte: ELETROBRÁS (2000).

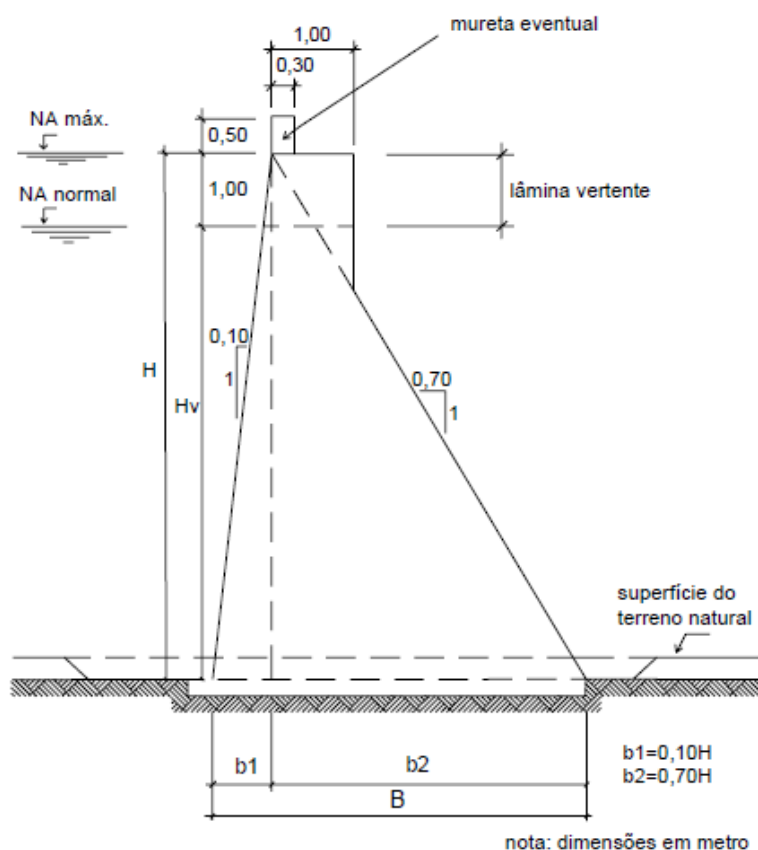
Para barragem de enrocamento vertedoura (quando não há a construção de vertedouro separado) é preciso proteger a crista e o talude a jusante com pedras de diâmetro suficiente para suportar o fluxo de água, ou seja, primeiramente colocar pedras de maior tamanho cuidadosamente e posteriormente colocar pedras menores para reduzir os vazios e compactar bem com rolo compactador de 10 t (ELETROBRÁS, 2000).

Já no que diz respeito às barragens de concreto, estas são recomendadas para construção em “vales estreitos, encaixados, em maciço rochoso pouco fraturado e com boas condições de fundação” (ELETROBRÁS, 2000). Elas são divididas em barragem de gravidade, que se sustenta somente com o próprio peso; de gravidade aliviada, que otimiza a utilização do concreto e economiza uma quantia importante no quesito de volume de concreto; e, por fim, barragens em arco, que apresentam curvatura e reduzem bastante o uso de concreto, exigindo, no entanto, encostas de vale com resistência a tensões elevadas (BAPTISTA; LARA, 2014).

A barragem de concreto de gravidade deve ser construída em blocos e, por esse motivo, deve ser separada por juntas verticais de dilatação que serão

devidamente vedadas para evitar vazamentos. Além disso, a parte do vertedouro da barragem precisará ser rebaixada para se ajustar à altura máxima da lâmina d'água que será escoada. E, deve ser construído um muro na crista da barragem (parte não vertente) para proteção contra ondas (ELETROBRÁS, 2000), conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Barragem de Concreto de Gravidade



BARRAGEM DE CONCRETO

Fonte: ELETROBRÁS (2000).

A preparação da fundação e das ombreiras da barragem envolve a limpeza da área, removendo materiais terrosos e rochas decompostas até encontrar uma rocha adequada e impermeável. A escavação na rocha é preferencialmente feita manualmente, evitando o uso de explosivos. A superfície da rocha deve ser rugosa e plana após a escavação, com a limpeza final sendo realizada com jato de água/ar. Os olhos d'água devem ser drenados, e quaisquer irregularidades na rocha devem ser tratadas com concreto. Em caso de fraturas, uma cortina de injeção de impermeabilização deve ser executada, juntamente com uma cortina de drenagem

para reduzir a subpressão. A concretagem das estruturas será feita com concreto produzido na central do canteiro de obras, seguindo uma especificação técnica que abrange todos os aspectos do processo de fabricação, controle e aplicação do concreto (ELETROBRÁS, 2000). Apesar de serem estruturas que, usualmente, são construídas para durar 50 anos ou mais, as manutenções devem seguir os manuais de fabricante, o monitoramento deve ser constante e os riscos de grande potencial mitigados.

2.2 Manutenção em barragens

A segurança das barragens constitui uma preocupação permanente para as entidades governamentais, tanto por sua importância econômica específica como pelo risco potencial que representa a possibilidade de ruptura ou outro acidente grave, em vidas humanas, considerando impacto ao meio ambiente, prejuízos materiais e os reflexos econômico-financeiros (ELETROBRÁS, 2003). Para uma barragem ser considerada segura, são necessários cuidados desde seu planejamento, construção, em toda sua operação e até mesmo em seu descomissionamento (BROWN, 2017).

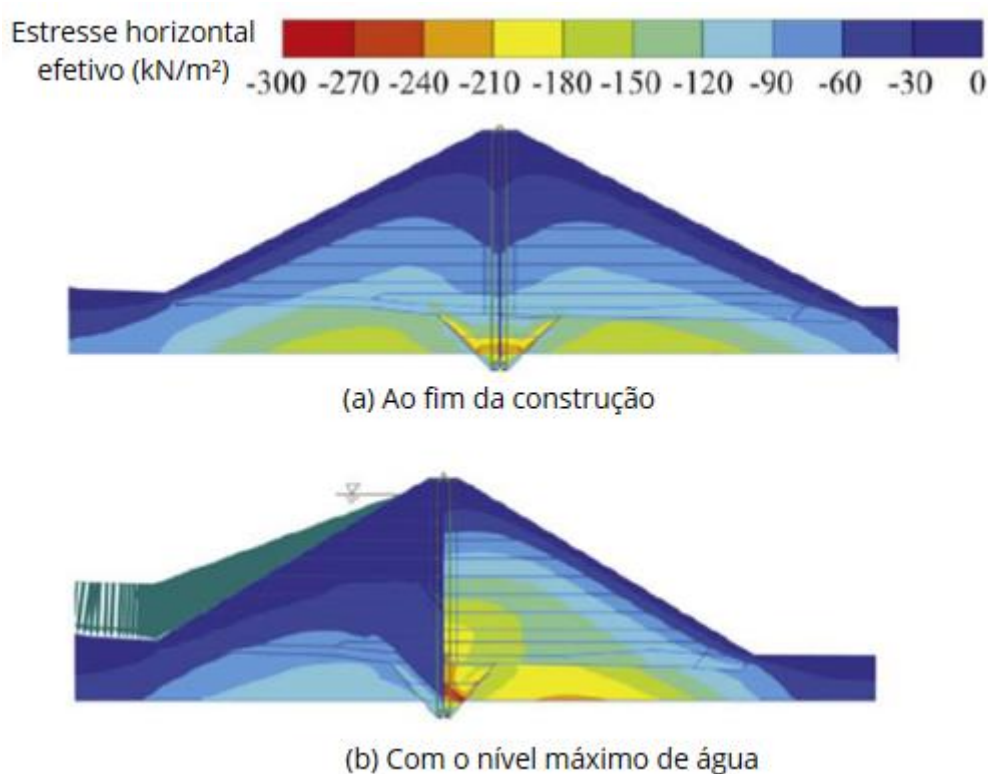
A inspeção da construção é indispensável, uma vez que as verificações envolvem o tratamento e preparação das fundações, adequação da compactação do aterro contra umidade e a conformidade das especificações dos materiais com o projeto (WRP DAM SAFETY OFFICE, 2008). Os testes são essenciais do início ao fim da execução e operação de barragens, para Garcia *et al.* (2009), na fase de construção é necessário testes mensais de densidade e umidade do solo, de dispersão do solo, lote experimental de concreto e testes de compressão.

O momento final de execução e consequente represamento inicial da barragem é crucial para verificação da qualidade da construção. A exemplo disso, Rashidi e Haeri (2017) avaliaram o comportamento da barragem de enrocamento e terra Gavoshan localizada na província de Curdistão, no Irã. Estrutura de 123 metros de altura e comprimento de crista de 650 metros no fim da construção, e obtiveram como resultados um recalque de colapso (rebaixamento da construção devido ao adensamento do solo) de 238 cm no represamento inicial. Ainda, após seis anos de operação da barragem, a medição foi de 270 cm, obtendo-se, portanto, 88% do

recalque no represamento inicial, corroborando com a informação de que o represamento inicial é um momento crítico para a obra.

Destaca-se, ainda, a necessidade de realização de estudos para entendimento das interações entre o corpo da barragem e o núcleo de concreto, considerando, principalmente, a influência do material de construção, a rugosidade do concreto e o projeto da fundação do núcleo de concreto nas forças estruturais da barragem. Esses estudos são cruciais, pois “a tensão horizontal efetiva no corpo da barragem a jusante aumenta significativamente nas zonas adjacentes ao núcleo de concreto devido ao represamento” (TSCHERNUTTER; KAINRATH, 2016), conforme se observa na Figura 7.

Figura 7 - Distribuição das tensões horizontais efetivas no final da construção e no nível máximo da água



Fonte: Adaptado de Tschernutter e Kainrath, 2016.

No monitoramento de barragens, diferentes grandezas são essenciais para garantir a segurança e o desempenho adequado das estruturas. Desse modo, é essencial a medição de subpressões na fundação, deslocamentos na fundação e na própria barragem, tensões internas e vazões de infiltração em todos os tipos de barragens. Contudo, existem medições específicas para cada tipo de construção.

Nesse sentido, para barragens de concreto é importante observar as temperaturas máximas do concreto, devido ao calor de hidratação do cimento, evitando fissuras térmicas (ELETROBRÁS, 2003). Já, para barragens de terra e enrocamento outros aspectos são considerados, como pressão dos poros e tensões e deformações no solo e enrocamento (USACE, 2004).

Conforme mencionado, as grandezas monitoradas dependem de cada tipo de barragem. Para melhor visualização e detalhamento de informação, essas grandezas foram dispostas em tabelas: a Tabela 1 remete a barragens de concreto e a Tabela 2 a barragens de terra e enrocamento:

Tabela 1 - Grandezas monitoradas em barragens de concreto

Grandezas	Tipo de Estrutura			
	Gravidade maciça	Gravidade aliviada ou contrafortes	Arco	CCR
Vazões de Infiltração	X	X	X	X
Subpressões na fundação	X	X	X	X
Recalques na fundação dos “blocos-chave”	X	X	X	X
Tensões		X	X	
Comportamento térmico do concreto	X	X	X	X
Deslocamentos horizontais e verticais da crista	X	X	X	X
Deslocamentos diferenciais entre blocos	X	X	X	X
Deslocamentos diferenciais entre monolitos		X		
Abertura de juntas entre blocos		X	X	
Pressão intersticial entre camadas de concretagem				X

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).

Tabela 2 - Grandezas monitoradas em barragens de terra e enrocamento

Grandezas	Tipo de Estrutura		
	Terra-enrocamento	Enrocamento com face de concreto	Terra com galeria enterrada
Pressões neutras no aterro (poropressões)	X	X	X
Recalques do aterro	X	X	X
Deslocamentos superficiais (plani-altimétricos)	X	X	X
Subpressões na fundação	X		X
Vazões de Percolação	X	X	X
Materiais sólidos carreados pelas águas de percolação	X		X
Pressões totais e poropressões nas interfaces	X		X
Deslocamentos diferenciais da junta perimetral		X	
Deslocamentos entre lajes na região das ombreiras		X	
Tensões internas no concreto		X	
Deflexão da laje de montante		X	
Tensões na interface solo-concreto da galeria			X
Recalques ao longo da galeria			X

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).

Para que essas medições e verificações dispostas nas Tabela 1 e Tabela 2 sejam realizadas, é preciso de um plano de instrumentação, que deve ser parte integrante da elaboração do projeto. USACE (2004) afirma que os dados de projeto, confirmados em testes, são importantíssimos para fornecimento de uma visão real do comportamento da estrutura. Isso porque os dados de projeto estabelecem o desempenho exclusivo da barragem analisada e fornece uma base de comparação com as medições futuras.

O plano de instrumentação inicia com a separação das barragens em blocos ou seções chaves. O primeiro bloco chave de uma barragem de concreto e a

primeira seção chave em uma barragem de enrocamento deve ser o bloco de maior altura ou o de condição peculiar de fundação e os outros escolhidos a partir do primeiro. A quantidade de instrumentos de monitoramento em uma barragem é determinada pelo comprimento, altura, características geológicas da fundação, materiais utilizados e etapas construtivas (ELETROBRÁS, 2003). Não é possível estabelecer regras fixas para a quantidade de instrumentos, pois cada barragem é única.

Diante disso, dados devem ser sempre documentados, pois as mudanças nas barragens ocorrem de forma gradual, sendo que essa fase de deterioração pode durar anos e caso uma avaliação recorrente com dados de medições e comparação entre fotografias, de diferentes períodos, não seja realizada, a estrutura pode estar comprometida e a deriva de ações de contingência em segurança. “Muitas vezes, as preocupações iniciais quanto a infiltrações e quedas são aliviadas ou esquecidas quando a situação continua sem parecer piorar dramaticamente; a familiaridade com um problema gera complacência.” (WRP DAM SAFETY OFFICE, 2008).

Kanji (1990) detalha os porquês de se instrumentar obras geotécnicas:

- a) garantir que a obra esteja adequada ao projeto – com as instrumentações de campo não há o efeito de escala como nos ensaios laboratoriais e com isso é possível a comparação entre o estado real da obra e o projetado;
- b) garantir a segurança da obra do período de construção até seu descomissionamento – há a possibilidade de comportamentos não previstos e os instrumentos são essenciais para a detecção dos problemas com antecedência; e
- c) promover a economia de recursos, pois ao instrumentalizar e atingir à segurança mínima necessária, é possível garantir que o dimensionamento de equipamentos, mão-de-obra e materiais seja adequado.

Alguns dos importantes instrumentos de medição de barragem são os piezômetros, inclinômetros e monumentos de superfície. Os piezômetros, por exemplo, fornecem dados sobre as pressões da água subterrânea no aterro, fundação e ombreiras; os inclinômetros, por sua vez, são utilizados para medir a inclinação da barragem e verificar se há deslocamento do solo; e os monumentos de superfície devem ser colocados na crista da barragem e nas encostas a montante e

jusante para medições do alinhamento vertical e horizontal desses elementos (USACE, 2004).

Ao selecionar os tipos de instrumentos para instalação é essencial considerar alguns requisitos básicos como: a compatibilidade entre a grandeza a ser medida e a precisão do instrumento, ou seja, a sensibilidade; a acurácia do equipamento, que é a aproximação dos valores medidos com o valor real; a precisão, que pode ser expressa através do sinal $\pm$; a robustez para que resista ao transporte e instalação na obra; a durabilidade, uma vez que as barragens duram até centenas de anos, então sua instrumentação também deve ser durável; e, sobretudo, a confiabilidade do instrumento, que corresponde ao grau de certeza de que o equipamento funcionará adequadamente (AFFONSO; SAYÃO, 2004).

Quando observadas mudanças que excedem as permitidas pelos instrumentos de monitoramento, deve-se analisar o risco e a segurança, assim dependendo da urgência deste risco, efetuar o reparo necessário. Pode ser necessário o reforço ou a modernização da estrutura, mas antes, caso necessário, os cuidados paliativos devem ser realizados (BROWN, 2017).

2.3 Análise de risco em obras

É importantíssimo analisar riscos em obras, sejam eles riscos financeiros, riscos de imagem para a companhia, riscos sociais ou riscos ambientais. Quanto mais completa essa análise, mais resguardados os tomadores de decisão da companhia estão, pois otimiza os dispêndios para mitigação de riscos da melhor forma possível. Todavia, é preciso considerar que nenhuma obra possui todos os seus riscos mitigados, pois para que isso ocorra seria necessário um orçamento extremamente elevado. Em virtude disso, a análise de riscos deve ser rigorosamente avaliada e gerenciada proativamente em todas as fases de sua vida útil (BROWN, 2017).

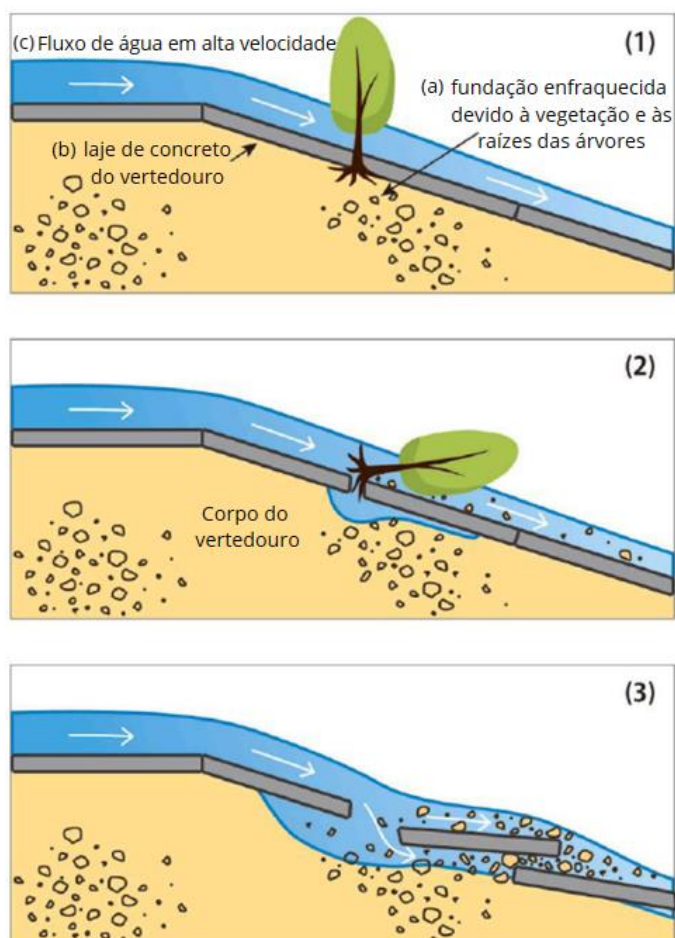
A análise de risco é a parte onde são identificados os potenciais modos de falha, desempenho estrutural e as consequências do risco. É também nesse estágio que se estima a probabilidade dessa ocorrência e a magnitude desses eventos potenciais. A identificação dos modos de ruptura potenciais específicos é

um momento crítico da análise. No caso da segurança de barragens, deve-se analisar a frequência de ocorrência de carregamentos (por exemplo: inundações, precipitações extremas, etc.) que poderiam iniciar uma falha potencial e com isso causar consequências adversas (FERC, 2016).

As falhas para rompimento de uma barragem podem ocorrer por variados motivos, para Heidarzadeh e Feizi (2022) os principais são: problemas técnicos nos elementos das barragens (vertedouros, fundações, taludes, etc.), gestão displicente e desastres naturais, sendo que a maioria inicia com o galgamento após inundações excessivas. Além disso, ao analisar dados de falhas históricas em barragens, é notório que as barragens de aterro são as mais suscetíveis ao rompimento.

Heidarzadeh e Feizi (2022) relataram e analisaram um incidente de quase rompimento da barragem de Toddbrook, na Inglaterra. Em agosto de 2019 quando enchentes castigaram a região da barragem, observou-se que o reservatório estava no nível máximo e houve a falha do vertedouro-2 da barragem, de modo que toda a estrutura esteve próxima do rompimento. O galgamento da barragem só não ocorreu pela rápida contratação de múltiplas bombas para retirar a água do reservatório. Destaca-se que o vertedouro é a estrutura por onde a água que se acumula acima do nível máximo do reservatório é evacuada e, portanto, é uma estrutura que necessita ser bem construída e monitorada. Assim, esse relato constatou que a falha foi causada por três causas primárias, conforme Figura 8: manutenção insuficiente que acarretou o crescimento da vegetação entre as lajes da estrutura (a); deficiências de projeto com lajes de apenas 15 cm (b); e chuvas torrenciais que causaram fluxo de água maior que o normal (c).

Figura 8 - Sequência de eventos que contribuíram para a falha do vertedouro-2



Fonte: Adaptado de Heidarzadeh e Feizi (2022).

Brown (2017) reitera o estudo de Heidarzadeh e Feizi, afirmando que as causas de falha iniciam, muitas vezes, com a precipitação extrema e acrescenta que os problemas técnicos podem ser provenientes de falhas, por exemplo: no talude do reservatório, acarretando falha estrutural; no vertedouro ou erosão excessiva; por infiltração ou erosão da fundação; ou por fissuras e fraturas do concreto por sobretensão. Essas falhas podem ser evitadas por meio de uma análise de risco proativa e em todos os estágios de planejamento, execução de obra e operação. As causas operacionais que podem provocar essas falhas são: as alterações estruturais; a operação além do escopo definido; o desvio de utilidade da estrutura; e o monitoramento e manutenção inadequadas.

As análises de comportamentos futuros para prospecção de risco de falha são fundamentadas com base nas ocorrências passadas. Entretanto, o histórico de informações e dados do passado recente sobre os fenômenos que podem provocar

ou intensificar um processo de degradação para falha em barragens pode estar comprometendo as prospecções devido às mudanças climáticas. Diante disso, existe a preocupação de reanalisar a segurança dessas estruturas, em virtude do aumento de ocorrência de eventos meteorológicos extremos.

O uso da precipitação como variável de decisão na modelagem e elaboração de projeto não é novo, mas uma prática muito utilizada para determinar a confiabilidade dos projetos hidráulicos. No entanto, as abordagens operam sob o pressuposto estacionário, ou seja, que as precipitações do passado têm um padrão de sazonalidade e de previsão (SARHADI *et al.*, 2016). Contudo, isso não é útil, tendo em vista as mudanças climáticas e a proporção de aumento dos eventos naturais extremos no mundo todo. (HUANG *et al.*, 2021).

Carneiro *et al.* (2022) modelaram as precipitações futuras combinando curvas IDF (Intensidade, Duração e Frequência) com modelos CMPI6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, em tradução livre: Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados) que são modelos numéricos de comportamentos futuros de clima do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, em tradução livre: Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) e com modelagem hidrológica, para obtenção do risco de falhas hidrológicas em uma barragem específica no estado do Ceará. Os autores atualizaram as curvas de IDF da barragem e verificaram uma grande variação no cenário base de sua construção. No cenário atualizado, isso indica uma grande probabilidade de ocorrência de falha hidrológica no futuro e demonstra uma necessidade de investimentos em infraestrutura de barragens do mesmo modo que maior aprofundamento sobre a segurança hidráulica frente às mudanças climáticas.

As mudanças climáticas estão afetando de forma considerável os riscos associados à precipitação extrema (O'GORMAN; SCHNEIDER, 2009 e VU; MISHRA, 2019). Essa é uma mudança não estacionária com chances significativas de aumento de risco e consequente diminuição de vida útil de projetos de construção hidráulica (VALDEZ *et al.*, 2010). Portanto, a mudança climática afetará a confiabilidade das estruturas e estudar essas mudanças é essencial para todos os projetos de longa vida útil, em especial para projetos que possam causar elevado impacto social (HUANG *et al.*, 2021).

Segundo FERC (2016), há duas abordagens para avaliação de segurança de barragens:

- a) SBA (*Standards-based approach*, em tradução livre: abordagem baseada em padrões), que é a abordagem tradicional; e
- b) RIDM (*Risk-informed decision making*, em tradução livre: tomada de decisão informada sobre o risco), abordagem aplicada às barragens mais recentemente.

A SBA foi desenvolvida a partir de boas práticas reconhecidas, seguindo teoria básica e evidências empíricas. Nessa abordagem, “a segurança é avaliada seguindo regras estabelecidas para eventos e cargas de projeto, capacidade estrutural, coeficientes de segurança e medidas defensivas de projeto.” (FERC, 2016). No entanto, o SBA não é adequado para avaliar riscos de erosão interna, confiabilidade das comportas do vertedouro, fatores humanos e questões operacionais. Em virtude disso, o RIDM foi introduzido para avaliação de segurança de barragens.

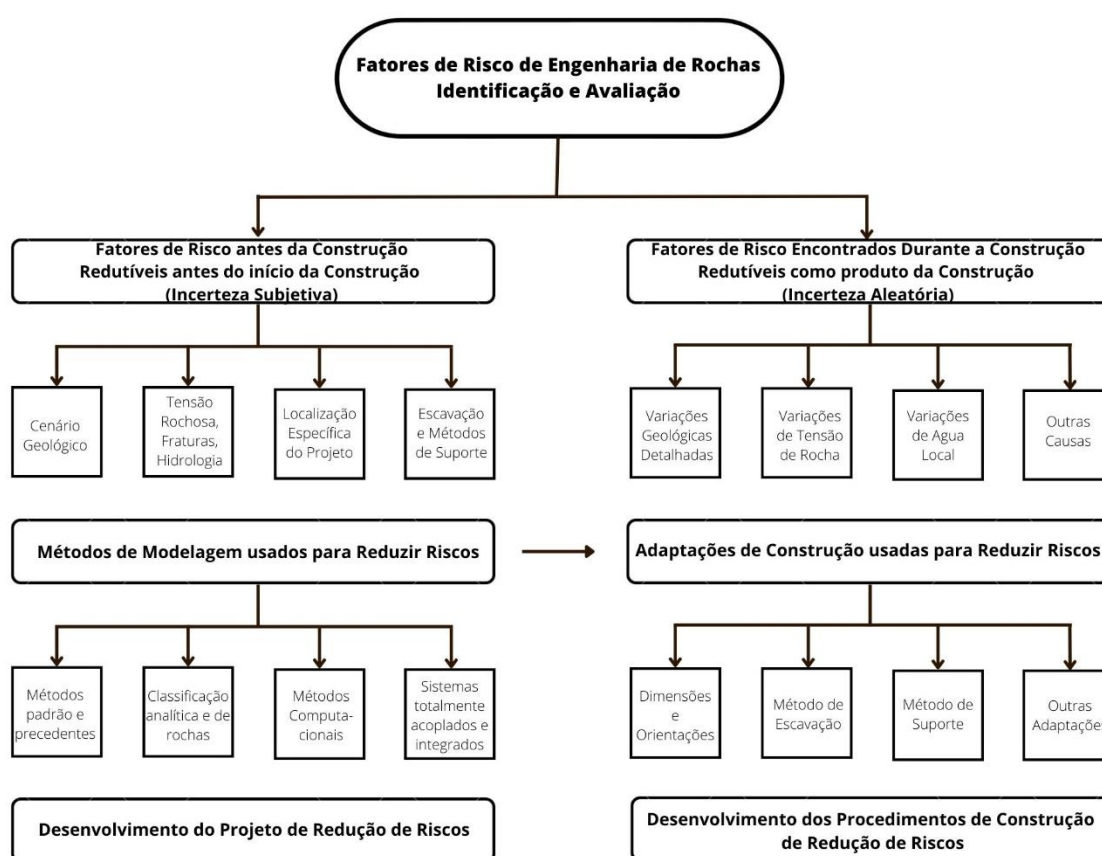
O RIDM é uma abordagem oriunda das indústrias que auxilia a tomada de decisão avaliando a tolerabilidade dos riscos existentes, a adequabilidade das mitigações de risco atuais e a necessidade de novas medidas de redução de risco. Segundo FERC (2016) essa abordagem, que possui como base a análise de risco, traz benefícios para os proprietários, tais como:

- a) aprimora a compreensão da segurança da barragem ao examinar os possíveis mecanismos de falha;
- b) oferece conhecimento sobre as responsabilidades legais associadas à propriedade de barragens, o que é fundamental para o planejamento dos negócios; e
- c) ajuda os proprietários de barragens a antecipar riscos para terceiros e tomar medidas para sua redução, demonstrando a devida diligência.

Empresas proprietárias ou responsáveis pela operação de barragens são confrontadas com algumas tomadas de decisão com relação a estas estruturas, nelas são incluídas decisões sobre a segurança de uma estrutura, ações necessárias para redução de riscos e priorizações de ações para o inventário de estruturas em seu portfólio (FEMA, 2015).

Para avaliar os riscos em barragens uma ferramenta de tratamento bastante utilizada é o fluxograma de gestão de riscos de engenharia de rochas desenvolvido por Hudson e Feng (2015), conforme Figura 9. Esse fluxograma trata os riscos em dois grupos: aqueles identificáveis antes do início da construção e os encontrados durante a construção. No entanto, para as grandes barragens é preciso adicionar outro grupo de risco: os riscos pós-construção, que inclui as etapas do período inicial de enchimento, do tempo de operação, dos reparos, dos reforços e das atualizações das estruturas (BROWN, 2017).

Figura 9 - Fluxograma de gestão de riscos de engenharia de rochas



Fonte: Adaptado de Hudson e Feng (2015).

Destacam-se alguns pontos relevantes apresentados na Figura 9: os fatores de risco antes da construção estão identificados com os testes geológicos, topográficos e hidrológicos preliminares, com a observação atenta da utilização das máquinas corretas para a escavação e demais trabalhos; os fatores de risco encontrados durante a construção dependem da inspeção visual dos trabalhadores, assim algumas variações geológicas e na tensão da rocha são observadas apenas na etapa das detonações e as variações na água podem colocar em risco a

população a jusante; os métodos de modelagem possíveis para a redução de riscos são os métodos que usufruem de teorias e práticas comprovadas e os métodos computacionais que utilizam a simulação para alcançar respostas mais rapidamente; as adaptações de construção para redução de riscos decorrem da necessidade de observar atentamente os riscos durante a construção e em virtude disso adaptar o projeto a realidade; adaptar os equipamentos para a construção, buscando a mitigação dos riscos da obra em si e a maior qualidade de execução da obra.

Com a junção da análise dos fatores de risco antes da construção e os métodos de modelagem para redução de riscos é possível o desenvolvimento do projeto de redução de riscos, essencial para mitigar possíveis riscos antes mesmo do começo da obra. Todavia, o desenvolvimento dos procedimentos de construção de redução de riscos só é possível com o andamento da obra e para isso, deve-se registrar os fatores de risco encontrados durante a construção e analisar a efetividade das adaptações de construção feitas para mitigação dos riscos.

Há técnicas utilizadas para apurar a influência dos fatores citados na Figura 9, que acarretam possível falha da estrutura, como as técnicas de Modo de Falha e Análise de Efeitos (mais conhecida pela sigla FMEA, em inglês: *Failure Mode and Effects Analysis*) e Avaliação de Modos de Falhas Potencial (PFMA, em inglês, *Potential Failure Modes Assesment*) (BROWN, 2017), que são exemplificadas na Figura 10. Na Figura 10, demonstra-se o potencial que uma falha possui, sendo verificado e identificado o perigo que está submetendo à estrutura.

Figura 10 - Exemplo de avaliação de modo de falha potencial (PFMA)

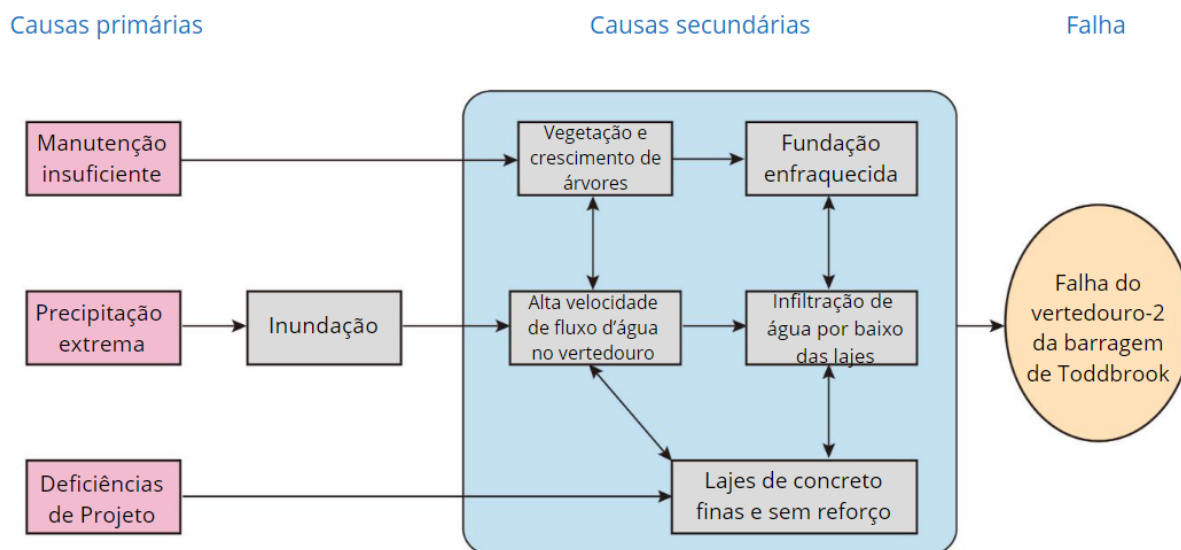


Fonte: Adaptado de Lund, Christman e Yow (2014).

Constata-se que o PFMA possibilita a identificação de diferentes modos pelos quais a barragem pode falhar. Exemplificado na Figura 10, observa-se o desenvolvimento de uma rachadura a partir de tensão na face montante e caso haja negligência e falta de manutenção corretiva a tempo, a pressão de elevação aumenta e com isso a rachadura se propaga, podendo acarretar falhas de tombamento ou deslizamento. Assim, a análise permite a antecipação e prevenção de falhas potenciais, aumentando a segurança e a confiabilidade das estruturas.

Outra técnica que pode ser utilizada é o modelo de risco em cascata, que demonstra a sequência de eventos para uma falha acontecer (HEIDARZADEH; FEIZI, 2022). Como exemplo, tem-se a Figura 11, que demonstra a falha no vertedouro-2 da barragem de Toddbrook.

Figura 11 - Modelo de risco em cascata da falha do vertedouro-2 da barragem de Toddbrook



Fonte: Adaptado de Heidarzadeh e Feizi (2022).

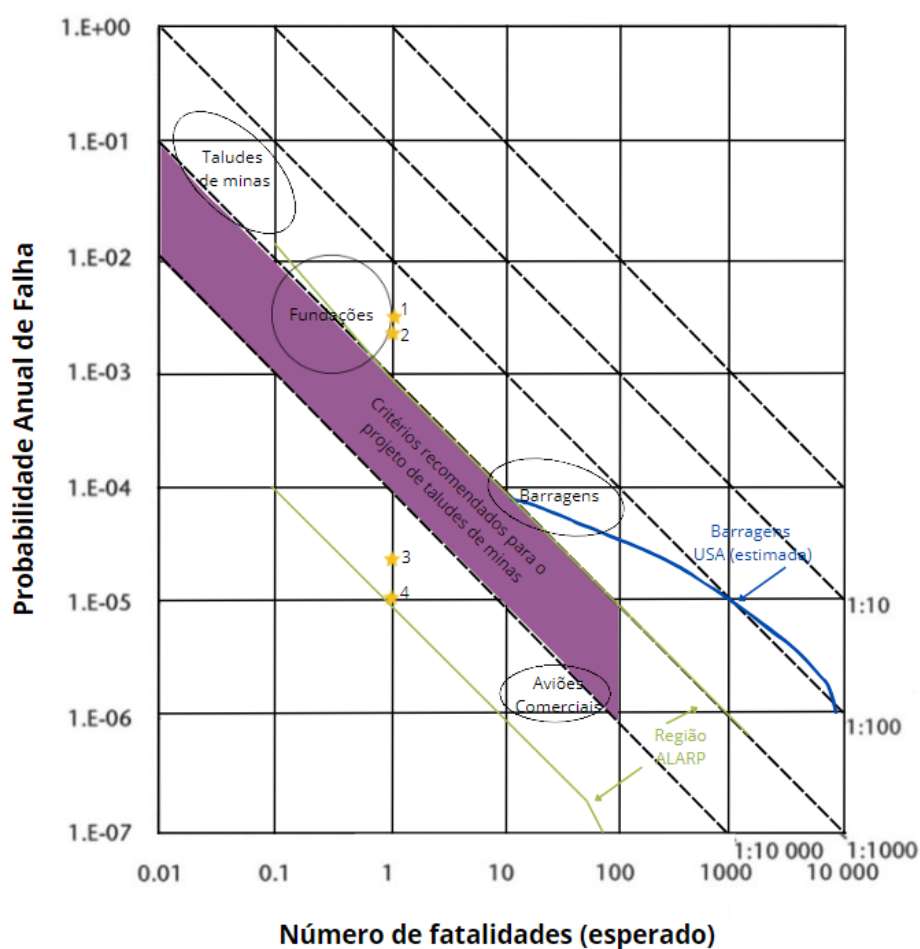
A Figura 11 demonstra a técnica que expõe a sequência de acontecimentos até a falha ocorrer. As causas primárias são um conjunto de consequência de negligência do operador (manutenção insuficiente), eventos naturais (precipitação extrema) e deficiências de projeto. Já, as causas secundárias são reflexos dos primeiros acontecimentos: com as lajes de concreto finas e sem reforço, facilita-se o crescimento da vegetação na junção de duas lajes, com a falta de manutenção a vegetação cresce e as raízes elevam as lajes. Assim, quando a precipitação extrema chega no reservatório a velocidade do fluxo de água é muito forte e como as lajes já estão desgastadas pela falta de zelo do mantenedor, a infiltração de água ocorre, de modo que as lajes cedem e são levadas pela força da água, sobrevivendo a falha do vertedouro-2 de Toddbrook (HEIDARZADEH; FEIZI, 2022).

Para grandes projetos de engenharia o padrão é registrar riscos elencando seus perigos e fatores, com estimativas de frequência de ocorrência e consequências destes incidentes resultantes, em termos de probabilidade anual de falha e número anual associado de fatalidades, respectivamente. Conforme Steffen *et al.*, (2006), instituições como Hong Kong *planning department* (Departamento de Planejamento de Hong Kong), ANCOLD (*Australian National Committee of Large Dams*, em tradução livre: Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens), *United States Bureau of Reclamation* (Agência de Recuperação dos Estados Unidos)

e *United Kingdom Health & Safety executive guidelines* (Manuais Executivos de Saúde e Segurança do Reino Unido) apresentaram critérios de aceitação de riscos ou limites de tolerabilidade para muitas atividades sociais e de engenharia.

A Figura 12 exemplifica o gráfico F-N (probabilidade anual de falha x números de fatalidade esperadas) que demonstra esses riscos em função da frequência de ocorrência e consequência destes incidentes. Para as barragens, observa-se o limite de tolerabilidade de risco individual de 1:10.000 por ano para barragens existentes, conforme critério criado pela ANCOLD e de 1:100.000 para barragens novas (ANCOLD, 2003), os níveis aceitáveis de risco de falha de barragens são pautados no ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*, em tradução livre: Tão Baixo Quanto Razoavelmente Praticável) (BROWN, 2017).

Figura 12 - Gráfico F-N



Fonte: Adaptado de Steffen *et al.* (2006).

Conforme Figura 12 é possível verificar que o número de fatalidades para barragens e aviões comerciais em uma falha é o mesmo, no entanto, as barragens

têm uma probabilidade anual 10^2 vezes maior de falhar do que um avião comercial. Observa-se que a região ALARP está entre as duas linhas verdes, cuja área compreende os riscos toleráveis, mas que exigem gerenciamento e mitigação. À esquerda da área ALARP os riscos são aceitáveis, não necessitando sua redução. Por sua vez, à direita da área ALARP os riscos são inaceitáveis e, portanto, necessitam mitigação (MENDES, 2016).

Outro exemplo de falha em uma grande barragem ocorreu em St. Francis, Califórnia, EUA, que após sua conclusão houve a revisão dos requisitos de abastecimento de água para a cidade de Los Angeles e a barragem foi aumentada em 3 metros, mas após 11 meses de concretagem, decidiu-se erguer mais 3 metros sem alterar a largura da base da barragem. Como não havia galerias de inspeção e os drenos estavam apenas na sua seção central, esta foi a única que ficou intacta após a falha ocorrida. A barragem foi instalada - com conhecimento do setor de engenharia - em duas formações diferentes de rocha ocasionadas pela Falha de San Francisquito. Durante o enchimento do reservatório, fissuras de montante a jusante apareceram na barragem, no entanto, o setor de engenharia as entenderam como problemas menores e injetaram cimento para fechá-las. Após isso vários vazamentos começaram a aparecer na ombreira direita e logo depois grandes rachaduras de tensão foram observadas na ombreira esquerda. O rompimento só não ocorreu na seção central, as seções laterais foram rompidas e cerca de 470 vidas foram perdidas, por não reconhecerem e reduzirem os riscos associados ao local e ao projeto (BROWN, 2017).

Os riscos têm de ser levantados e analisados em toda as fases de planejamento, execução e operação da estrutura. Na pesquisa do local se deve atentar à presença de risco geológico, já para o projeto é preciso avaliar as forças que serão impostas à estrutura, dentre elas a pressão da água e cargas específicas (normais, usuais, incomuns e extremas), na construção, por sua vez, é possível encontrar e mitigar outros riscos. Do ponto de vista da operação a atenção se estende por muitas décadas, considerando que a barragem deve ser mantida sob vigilância, monitorada e reparada conforme necessidade, sendo vital o reforço ou a modernização da estrutura em algum momento da operação. Esses riscos devem ser analisados com métodos baseados em risco e segurança, incluindo modos de falha, árvore de falhas e análises de incerteza, métodos de probabilidade,

confiabilidade e fragilidade e análise de rompimento e consequência ou impacto da barragem (BROWN, 2017).

A atualização ou melhoria de desempenho das barragens pode ser feita de algumas maneiras:

- a) elevando alturas das paredes e parapeitos da barragem;
- b) providenciando a ancoragem de barragens de gravidade ou as bases de barragens em arco com âncoras pós-tensionadas para aumento de resistência ao tombamento a jusante; e
- c) aumentando a largura e/ou profundidade do vertedouro.

As consequências desastrosas do rompimento de barragens fazem com que os riscos associados a essas estruturas sejam estudadas com afincos e rigor, e gerenciados proativamente em todas as fases de vida da estrutura para que o risco permaneça ALARP (BROWN, 2017). Brown (2017) ressalta que:

Para atender às mudanças nos padrões de segurança, diminuir a tolerabilidade ao risco e superar os efeitos das deficiências iniciais de projeto e da deterioração com o tempo, geralmente também é necessário manter, reparar e, muitas vezes, modernizar grandes barragens de concreto, após décadas, ou em alguns casos chegando a um século, de suas vidas operacionais.

3 METODOLOGIAS MULTICRITERIAIS DE APOIO À DECISÃO

As metodologias de apoio à decisão foram criadas na década de 70, “com o intuito de enfrentar situações específicas, nas quais um decisor, atuando com racionalidade, deveria resolver um problema em que vários eram os objetivos a serem alcançados de forma simultânea” (GOMES *et al.*, 2004). Para Clemen e Reilly (2001) as decisões se tornam difíceis por quatro razões: complexidade da decisão; incertezas inerentes a situação; multiplicidade de objetivos; e quando diferentes perspectivas levam a diferentes conclusões. Clemen e Reilly (2001) avaliam que as análises de decisão:

- a) disponibilizam vários métodos para organização de problemas complexos em estruturas que podem ser analisadas;
- b) ajudam a identificar importantes fontes de incerteza e a representá-las de forma sistemática e útil;
- c) auxiliam provendo estruturações e ferramentas para decisões multiobjetivos; e
- d) ajudam com a classificação e resolução de diferentes perspectivas.

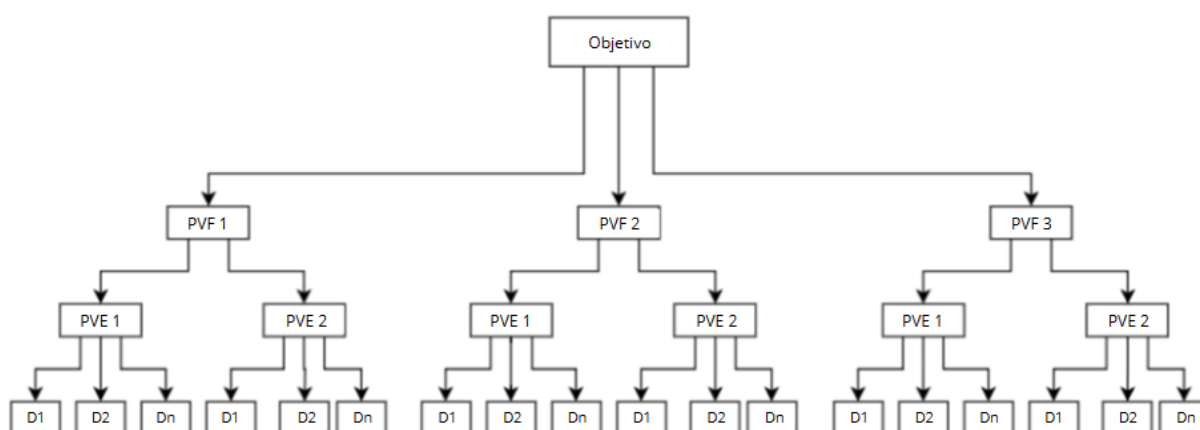
As tomadas de decisão são processos complexos e normalmente consideram aspectos objetivos e subjetivos. Isso envolve a busca pela opção que oferece o melhor desempenho, a melhor avaliação, ou a que melhor se alinha com as expectativas dos envolvidos. A tomada de decisão é, portanto, uma tentativa de resolver o conflito entre objetivos divergentes. Essa presença de objetivos conflitantes impede a existência de uma solução perfeita, em virtude disso, a solução é pautada pela busca da solução que melhor se encaixa entre as pequenas tomadas de decisão de cada ator envolvido (RICETTI FILHO; SICA, 2013).

Para Gomes *et al.* (2004), as metodologias de apoio multicritério à decisão possuem quatro níveis:

- a) detecção do problema a ser resolvido;
- b) definição do problema, com a identificação de grupos interessados, objetivos e descritores utilizados no processo de decisão;
- c) elaboração de um modelo analítico do problema, o qual contabilize a influência de cada um dos parâmetros do problema identificado; e
- d) análise de resultados, após a modelagem e cálculos feitos, deve-se analisar a(s) alternativa(s) em relação aos critérios.

Desse modo, observa-se a necessidade de se estruturar o problema com a interligação de critérios, dimensões de análise como Pontos de Vista Fundamentais (PVFs), os quais devem ser subdivididos em Ponto de Vista Elementares (PVEs), que são subáreas de ramificação da dimensão, que deve ser subdividido em Descritores, que são critérios de avaliação construídos por meio das escalas ordinal e cardinal. Criando assim uma estrutura que pode ser expressa em uma árvore de ponto de vista (Figura 13). Além disso, deve-se modelar os critérios para obtenção de: funções de valor (ou de utilidade) econômica para mensurar os indicadores de critério; e *trade-offs* (taxa marginal de substituição), para avaliar a importância relativa entre as dimensões de análise.

Figura 13 - Árvore de ponto de vista exemplo



Fonte: Adaptado de Novak (2018).

3.1 Metodologias multicriteriais

Os modelos são representações de micromundos e o entendimento e a compreensão do objeto de modelagem para modelos multicritério são cruciais. Para um modelo estar completo “todos os pensamentos sobre o problema, crenças com relação à incerteza, e preferências estão desenvolvidos” (CLEMEN; REILLY, 2001). Neste trabalho serão utilizados os métodos MAUT (*Multiattribute Utility Theory*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e o *Direct Rating*.

3.1.1 Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT)

A MAUT é uma teoria para desenvolvimento da função de valor e é fundamentada “na hipótese de que, em qualquer problema de decisão, existe uma função de valor real $v(\cdot)$ sobre o conjunto de alternativas A que o tomador de decisão deseja examinar, consciente ou inconscientemente” (GOMES *et al.*, 2004). Uma das características da Teoria de Utilidade Multiatributo é a Monotonicidade, ou seja, se v_1 representa uma função de utilidade para o critério salário e v_2 representa uma função utilidade para o critério taxa de falha, dessa forma, tem-se para as alternativas a_n e b_n , respectivamente, que:

$$[a_1 > a_2] \Leftrightarrow [v_1(a_1) > v_1(a_2)] \quad (1)$$

$$[b_1 > b_2] \Leftrightarrow [v_2(b_1) < v_2(b_2)] \quad (2)$$

Onde: a_1 é o salário 1, a_2 é o salário 2, $v_1(a_1)$ é a utilidade do salário 1 e $v_1(a_2)$ é a utilidade do salário 2; e b_1 é a taxa de falha 1, b_2 é a taxa de falha 2, $v_2(b_1)$ é a utilidade da taxa de falha 1 e $v_2(b_2)$ é a utilidade da taxa de falha 2. Em outras palavras: se um salário é maior, a função de utilidade do critério salário será maior; e se uma taxa de falha é maior, a função de utilidade do critério taxa de falha será menor. Temos assim, funções de utilidade crescente para o salário e decrescente para a taxa de falha.

Sendo a uma alternativa viável e A todo o universo de alternativas viáveis. A cada alternativa a de A são associados n índices de valor $X_1(a), \dots, X_n(a)$, onde $X_1, \dots, X_n$, correspondem a n atributos ou critérios considerados na avaliação. Para todas as alternativas viáveis a , é necessária a criação de função em uma unidade comum, ou seja, um índice de preferência ou valor. Uma função de valor v sobre o espaço das consequências de cada alternativa (GOMES, 2004), definidos na equação 3:

$$v_1(x_1, \dots, x_n) = f[v_1(x_1), \dots, v_n(x_n)] \quad (3)$$

Onde $v_i, i = 1, \dots, n$ corresponde a uma função de valor sobre o critério X_i .

Estabelecida a função de valor a ser utilizada, deve-se atribuir para um critério um comportamento específico para suas consequências, ou seja, o valor ou a utilidade do desempenho de uma alternativa em um critério específico pode ter um

comportamento avesso, propenso ou indiferente. Para funções de utilidade crescente, caso o comportamento seja avesso, deslocamentos iguais em x farão a função utilidade crescer a uma taxa menor quanto maior for o $x_{máx}$ ("x" máximo), por outro lado, sendo o comportamento propenso, deslocamentos iguais em x farão a função utilidade crescer a uma taxa maior quanto maior for o $x_{máx}$.

O primeiro passo para obter a função de valor econômico (v_i) por MAUT é normalizar não-proporcionalmente os níveis de impacto do descritor (X_i). Utiliza-se a equação 4 para normalizar um descritor crescente e a equação 5 para normalizar um descritor decrescente:

$$k = \frac{N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)}{\max N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)} \quad (4)$$

$$k = \frac{\max N_{ij}(a_n) - N_{ij}(a_n)}{\max N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)} \quad (5)$$

Onde a_n é a alternativa n e $N_{ij}(a_n)$ é o valor da alternativa no critério analisado.

Desse modo, é criada a Matriz intermediária de Decisão (K). Após isso, deve-se escolher a função de desempenho de um critério, que no caso deste estudo será a equação 6, e avaliar o comportamento da função. Com isso a Matriz de Decisão é criada, ajustando todos os critérios a uma escala comum.

$$v_1(a_n) = \frac{e^{\alpha k} - 1}{e^{\alpha} - 1} \quad (6)$$

Onde o comportamento é:

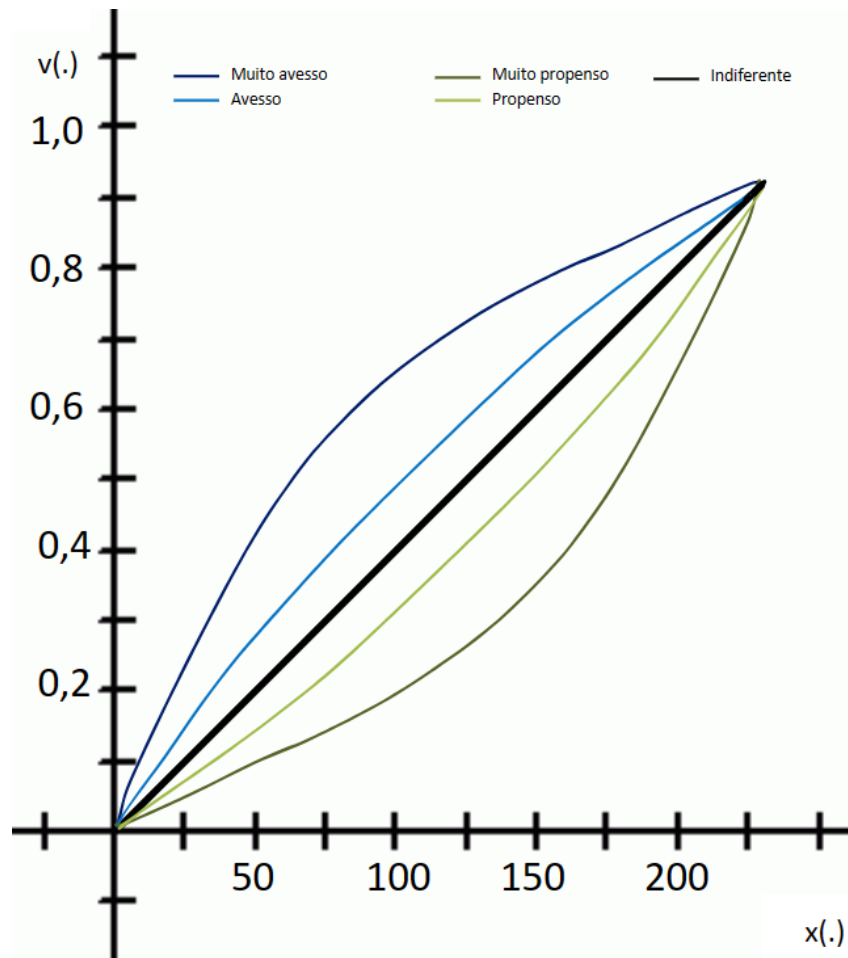
$$Avesso \rightarrow \alpha \in \mathbb{R}_-^*$$

$$Propenso \rightarrow \alpha \in \mathbb{R}_+^*$$

$$Indiferente \rightarrow \alpha = 0$$

A Figura 14 ilustra os comportamentos em escala cardinal:

Figura 14 - Exemplo de comportamentos



Fonte: Elaboração própria

A avaliação precisa considerar a combinação dos diferentes critérios em vez de analisá-los de forma isolada. Em virtude disso, métodos de agregação foram criados, permitindo a comparação entre as alternativas. A função de valor linear (Equação 7) aditiva avalia os desempenhos de alternativas multiatributo, no entanto só deve ser utilizada se os critérios forem mutuamente independentes em relação às preferências.

$$v(a) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(a) \quad (7)$$

Onde $v_j(a)$ é desempenho da alternativa a conforme o j -ésimo critério e w_j é um coeficiente de ponderação ou trade-off do j -ésimo critério (GOMES *et al.*, 2004).

3.1.2 Método AHP

Uma vez obtida a função de valor econômico é necessário a obtenção dos *trade-offs*. O método AHP, criado por Thomas Saaty na década de 70, é utilizado após a hierarquização do problema, visando determinar uma medida global para cada alternativa, de forma compreensível e por meio de associação dos valores dos decisores, priorizando-as ou classificando-as ao final do método (GOMES *et al.*, 2004). O *Analytic Hierarchy Process* objetiva a apresentação dos modelos de modo mais realista.

O método AHP de análise de decisão pode ser utilizado tanto para a construção de função de valor econômico como para a obtenção de *trade-offs*. Neste trabalho seu uso ocorre apenas para a obtenção dos *trade-offs* entre os PVFs.

O AHP utiliza comparações por pares para definir sua preferência entre os critérios comparados. Os julgamentos serão obtidos com a utilização da Escala Fundamental de Saaty:

Tabela 3 - Escala fundamental de Saaty

Intensidade de importância em escala absoluta	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderada importância de uma sobre a outra	Experiência e julgamento moderados de uma atividade sobre outra
5	Importância essencial ou forte	Experiência e julgamento fortes de uma atividade sobre outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorita e sua dominância demonstrada na prática
9	Importância extrema	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de segurança
2,4,6,8	Valores intermediários de julgamento	Quando o meio-termo é necessário

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Essas preferências são expressas em uma matriz de decisão AHP, a qual deve ser preenchida avaliando o elemento da linha 1 com o elemento da coluna 2

até n , e assim sucessivamente até que sejam avaliados par a par todos os elementos da matriz, demonstrando sua preferência por cada um de seus critérios, conforme exemplificada na Tabela 4:

Tabela 4 - Exemplo de matriz de comparação par a par AHP

	Critério 1	Critério 2	Critério n
Critério 1	1	$v_{1,2}$	$v_{1,n}$
Critério 2	$\frac{1}{v_{1,2}}$	1	$v_{2,n}$
Critério n	$\frac{1}{v_{1,n}}$	$\frac{1}{v_{2,n}}$	1

Fonte: Elaboração própria.

Sendo:

$$v_{l,c} = \frac{1}{v_{c,l}} \quad (8)$$

Onde v é o valor de preferência, l é a linha da matriz e c é a coluna.

Após as escolhas das preferências, deve-se calcular os autovetores (Equação 9) de cada critério e normalizar os valores dos autovetores (Equação 10) de modo que a soma das normalizações seja igual a 1. Por fim, para entender se os julgamentos são consistentes, o índice de Razão de Consistência da matriz deve ser calculado, conforme Equação 13:

$$\gamma_j = \sqrt[n]{\prod_c (v_{l,c})} \quad (9)$$

$$\tilde{\gamma}_j^{norma} = \frac{\gamma_j}{\sum_j \gamma_j} \quad (10)$$

$$\vec{\beta}_c = \sum_l v_{l,c} \quad (11)$$

$$\lambda_{max} = \vec{\gamma}_j^{norma} \times \vec{\beta}^T \quad (12)$$

$$RC = \frac{1}{I_c} * \frac{\lambda_{max} - d_m}{d_m - 1} \quad (13)$$

Onde γ_j é o autovetor da linha j, $\vec{\gamma}_j^{norma}$ é o autovetor normalizado, $\vec{\beta}$ é a soma dos elementos da coluna c, λ_{max} é o autovalor máximo da matriz, d_m é a ordem da matriz quadrada e I_c o índice de Consistência, obtido com base na dimensão d_m da matriz, conforme Tabela 5:

Tabela 5 - Índice de Consistência (tabela Saaty)

d_m	1,2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_c	0,00	0,58	0,90	1,12	1,21	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Caso a Razão de Consistência for menor que 10% o índice é satisfatório, caso não, a matriz de concordância deve ser refeita até satisfazer esse limite. De forma que os se obtenha a normalização proporcional da matriz, a fim de que as transforme em porcentagem para obtenção dos *trade-offs*.

3.1.3 Valoração Direta (Direct Rating)

O método da Valoração Direta é um método para a obtenção de *trade-offs*. Neste trabalho ele será utilizado na obtenção dos *trade-offs* das hierarquias mais baixas (PVEs e Critérios). É um método mais direto e de mais fácil compreensão. O decisor deve atribuir “notas” de 0 a 10 para cada PVF (ou descritores ou PVEs) de mesmo nível hierárquico e deste modo, obtém-se o *trade-off*. Como no método AHP, é necessário que as notas ($nota_i$) sejam normalizadas proporcionalmente (conforme Equação 14) e com isso o *trade-off* w_i é obtido.

$$w_i = \frac{nota_i}{\sum_{i=1}^I nota_i} \quad (14)$$

Sendo que:

$$\sum_{i=1}^I w_i = 100\% \quad (15)$$

3.2 Avaliação de desempenho por Benchmarking

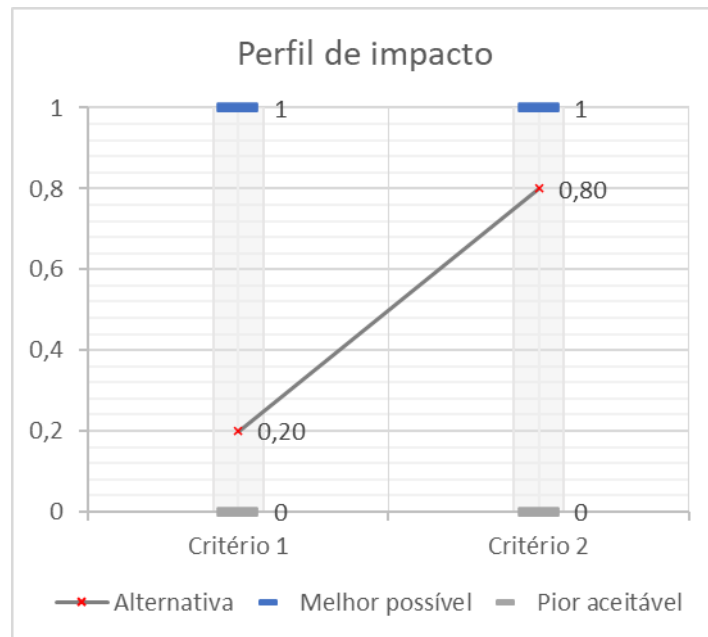
Conforme Braz (2011) o benchmarking é uma ferramenta de melhoria contínua para as organizações que ajuda na identificação de pontos fracos e fortes, bem como na comparação com outras organizações e na melhoria de eficiência. Já para Stapenhurst (2009) o benchmarking é um meio de estabelecer metas e medir o desempenho em relação às práticas, produtos e serviços de sua organização ou de organizações líderes em seus segmentos.

A avaliação é uma das fases das metodologias multicritério de apoio à decisão. Nesta parte do estudo, são definidos níveis de referência para cada descritor. Um conceito interessante para que se torne operacional as noções de bom e ruim é o conceito de nível neutro de impacto, de forma que acima do nível neutro se encontram os impactos positivos e, em contrapartida, abaixo dele se encontram os impactos negativos (BANA E COSTA; SILVA, 1994).

A avaliação de benchmarking, por sua vez, é a definição de valores âncoras (limites), do melhor possível ao pior aceitável. Caso o nível de impacto da alternativa se estabeleça próxima ao melhor possível, tem-se um bom desempenho, caso se estabeleça próxima ao pior aceitável, tem-se um mau desempenho. Para proporcionar uma visualização mais intuitiva dos resultados do benchmarking, utiliza-se os gráficos de perfil de impacto.

O perfil de impacto contribui com a perspectiva do efeito que cada descritor atinge em comparação com o melhor possível e o pior aceitável. Assim, os perfis de impacto são obtidos com as equações 4 (caso crescente) ou 5 (decrecente) e 6 para normalizar não proporcionalmente. A visualização desse resultado demonstra quais os descritores que mais (e menos) impactam nos critérios de decisão, além de elucidar o desempenho dos descritores após o processo de decisão (LIMA *et al.*, 2013). Para exemplificar, apresenta-se a Figura 15.

Figura 15 - Perfil de impacto exemplo



Fonte: Elaboração própria

A interpretação do perfil de impacto (Figura 15) segue da seguinte forma: o Critério 2 tem um bom desempenho, analisando a proximidade da alternativa ao cenário “Melhor possível” (dado de benchmarking obtido no critério), no entanto, o Critério 1 tem um mau desempenho, tendo em vista a proximidade de sua alternativa ao “Pior aceitável”.

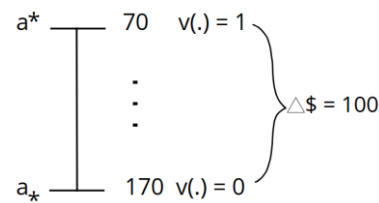
Outro componente importante para a avaliação de benchmarking é o custo utilidade, que representa frações (decimal ou a escolha do avaliador) do valor econômico em cada critério. Para isso a equação 16 é utilizada.

$$C(v_i) = \frac{\max N_{ij}(a_n) - \min N_{ij}(a_n)}{10} \quad (16)$$

Onde $C(v_i)$ é o custo utilidade da alternativa v para o critério i .

Por exemplo, no critério 1, com a escala ordinal da Figura 16, cada fração decimal do $\Delta\$$ representa \$10, ou seja, cada décimo de melhoria no valor econômico desse critério diminuirá em \$10 o custo com a alternativa.

Figura 16 - Escala ordinal critério 1 - exemplo



Fonte: Elaboração própria

4 ESTUDO DE CASO E MODELAGEM PROPOSTA

A avaliação multicriterial envolve a definição de alternativas e critérios, o processo de definição se dará de forma iterativa. Tendo em vista a análise de um problema complexo, será necessário a hierarquização das alternativas, a fim de que sejam decompostos (GOMES, 2004).

4.1 Estudo de caso

A seguir, será passado dados da hidrelétrica de estudo, os nomes da PCH (Pequena Central Hidrelétrica) e da empresa serão mantidos em sigilo por determinação da empresa em que o graduando trabalhou, a localização será mantida em sigilo pela mesma justificativa. A PCH Granjinha (nome fictício), localizada no município de Miragem (MS), rio Tererê, sul da bacia do Paraguai (localização fictícia) ilustrada na Figura 17. A estrutura foi construída em concreto compactado a rolo (CCR), do tipo gravidade. Possui altura de aproximadamente 15 metros, 50 metros de comprimento de crista e necessitou de aproximadamente 2500 m³ de concreto massa para seu erguimento, sendo de operação da empresa Arguenita (nome fictício).

Figura 17 – Regiões Hidrográficas Brasileiras



Fonte: Mendonça (2023).

Granjinha possui duas barragens, a barragem de geração e a barragem de dissipação. Os dois lagos são interconectados por um túnel e é possível passar água de um lago a outro, com fluxo de ambos os lados. A barragem de dissipação possui vertedouro com comportas que é utilizado tanto para ajustar o nível do lago de dissipação como do lago de geração. Já a barragem de geração é de soleira livre, portanto não há um vertedouro separado da barragem. Durante o ano de 2018, houve uma chuva extremamente intensa na região atingindo os lagos da PCH, ocorrendo galgamento na barragem de geração de forma que a água desceu a soleira livre com extrema força. Nesse cenário, o concreto no talude a jusante, mais especificamente o pé e a ombreira direita, não foram capazes de suportar a intensidade e duração do fluxo de água vindo a romperem.

Essa falha pode ter acontecido por variados motivos. As informações iniciais são de que as causas primárias foram as fortes chuvas e a consequente inundação do lago da barragem de geração. Sabe-se que precipitações extremas são os principais motivos de falha em barragens, no entanto, normalmente há outros

causadores de falha. Eventualmente, pode ter ocorrido falta de manutenção na área e com isso, plantas cresceram entre as lajes do pé e da ombreira direita. Outra hipótese é a falta de atenção dada à qualidade da concretagem pelo fato de ser uma área na lateral da barragem (BROWN, 2017; HEIDARZADEH; FEIZI, 2022), ou simplesmente, as premissas utilizadas na época de construção da barragem provavelmente são antigas e não previam a possibilidade de intensa e duradoura chuva na região (CARNEIRO *et al.*, 2022).

A ocorrência da falha ocorreu em região que não afeta a geração de eletricidade e, após análises e estudos feitos, foi constatado que não havia a possibilidade de perturbação de estabilidade da barragem. Em virtude disso, não houve manutenção corretiva emergencial e a partir daquele momento a manutenção corretiva planejada começou a ser elaborada para recompor a confiabilidade para a barragem. Essa é uma grande obra e deve ser tratada com minúcia, portanto, as atividades necessárias para recuperação do pé e da ombreira direita da barragem foram especificadas tecnicamente e a coleta de propostas foi executada.

4.2 Dados de entrada

Os dados de entrada da modelagem de avaliação da obra de manutenção serão as tarefas da obra e o custo de cada tarefa a ser executada. Esses dados foram coletados de propostas reais recebidas pela empresa Arguenita e serão utilizados como base para auxiliar na tomada de decisão. Com a ajuda do especialista da empresa, foi feito uma análise de quais os melhores valores possíveis e os piores aceitáveis para despender em cada tarefa. A Tabela 6 apresenta o PVF Mobilização e montagem do canteiro de obras como exemplo:

Tabela 6 - Valores exemplo do PVF Mobilização e montagem do canteiro de obras

PVF	Mobilização e montagem do canteiro de obras			
PVE				
Critérios	Mobilização de Equipamento e Pessoal	Implantação do Canteiro de obras	Implantação dos Acessos Internos	Fornecimentos
Melhor possível	230	200	200	450
Avaliado	260	250	270	530
Pior aceitável	280	280	300	600

Fonte: Elaboração própria

No exemplo da Tabela 6, conforme conversa com especialista, foi entendido que a implantação do canteiro de obras poderia estar entre os valores de R\$ 200 mil e R\$ 280 mil, R\$ 50 mil abaixo até R\$ 30 mil acima do Avaliado. Isso se deve ao fato que o local de implantação do canteiro ainda não foi definido e na percepção do especialista, caso fosse possível construir o canteiro de obras no local de menor custo esse valor chegaria ao Melhor possível, caso estudos revelassem a possibilidade de utilização do local com o maior custo, esse custo chegaria ao valor de R\$ 280 mil reais.

4.3 Modelo multicritério

O modelo multicriterial foi estruturado para os dados de entrada, conforme a subdivisão de tarefas do projeto de manutenção do pé e da ombreira da barragem da PCH Granjinha. A estrutura utilizada foi a de árvores de ponto de vista pela escola francesa (Figura 18), seguindo árvore da esquerda para a direita, tem-se: o objetivo, os PVFs, os PVEs e os Critérios (descritores).

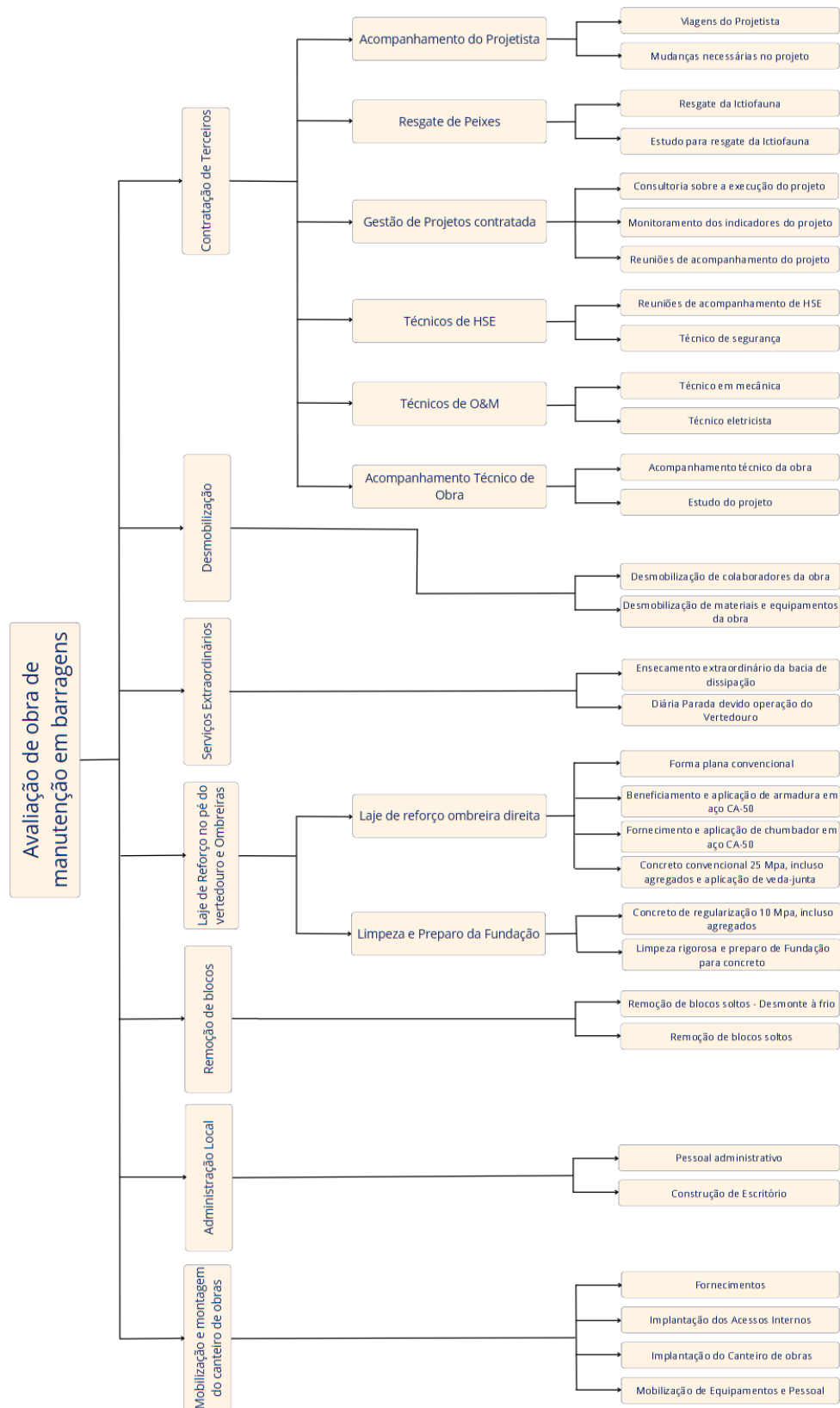
Para obter as funções de valor dos descritores, MAUT é o método escolhido. AHP é o método escolhido para obtenção dos *trade-offs* dos PVFs e *Direct Rating* é o método escolhido para obtenção dos *trade-offs* dos critérios. A modelagem segue a teoria, sendo que todos os níveis de impacto dos elementos podem ser descritos com a Tabela 7.

Tabela 7 - Níveis de impacto dos Descritores

Nível	Quantitativo	Unidade	Tipo
a^*	Benchmarking do critério conforme escala ordinal, para melhor valor possível	Ordem de valor	Contínuo
a_*	Benchmarking do critério conforme escala ordinal, para o pior valor aceitável		Direto

Fonte: Elaboração própria

Figura 18 - Árvore de Pontos de Vista de avaliação de obra de manutenção em barragens



Fonte: Elaboração própria

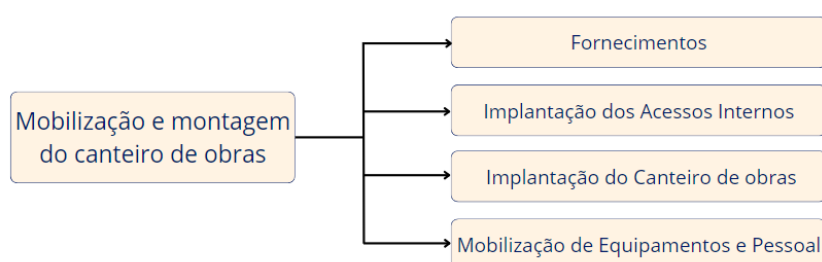
A seguir serão apresentadas as descrições dos PVFs, PVEs e os critérios. Para os critérios, escalas ordinais e cardinais foram desenvolvidas com a modelagem, para não ficar muito repetitivo, apenas as escalas cardinais e ordinais do primeiro PVF serão demonstradas, em sua totalidade, no TCC. As demais escalas estarão anexadas ao trabalho.

4.3.1 Ponto de vista fundamental mobilização e montagem do canteiro de obras

Este PVF abrange as perspectivas fundamentais de mobilização de pessoal e montagem do canteiro de obras inseridos na execução de obra de manutenção da barragem de estudo. Ele é constituído por quatro critérios: mobilização de equipamentos e pessoal, implantação do canteiro de obras, implantação dos acessos internos e fornecimentos.

O PVF, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 19.

Figura 19 – Descritores relacionados ao PVF mobilização e montagem do canteiro de obras



Fonte: Elaboração própria

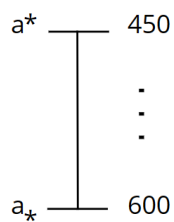
4.3.1.1 Fornecimentos

O fornecimento adequado de materiais desempenha um papel fundamental na execução de obras de manutenção em barragens, sendo uma peça-chave para garantir a segurança, a estabilidade e o desempenho contínuo dessas estruturas críticas. Materiais de alta qualidade, como concreto, aço e sistemas de drenagem, são essenciais para reparar e reforçar as barragens, prevenindo o desgaste natural ao longo do tempo, evitando o risco de vazamentos e, em última instância, protegendo comunidades ribeirinhas e ecossistemas que dependem da integridade dessas obras. Portanto, o fornecimento de materiais é uma parte

essencial do processo de manutenção de barragens, assegurando a sua importância crítica na gestão de recursos hídricos e na segurança pública.

Esse critério representa o custo do fornecimento dos materiais por parte da empresa de construção contratada. Após pesquisas de mercado realizadas e conversas com o especialista da empresa o melhor possível (a^*) é valorado em 450 mil reais e o pior aceitável 600 mil reais (a_*), conforme escala ordinal (Figura 20).

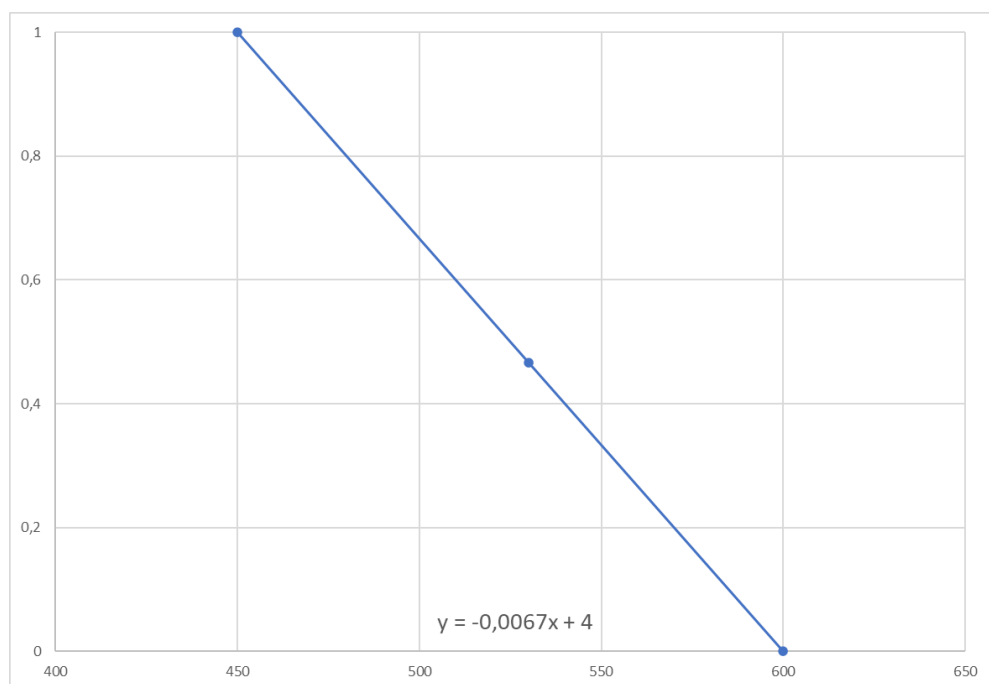
Figura 20 - Escala ordinal do critério Fornecimento



Fonte: Elaboração própria

Atribui-se um comportamento indiferente para o critério fornecimento, pois é uma etapa que faz parte de todo o tipo de obra. Dessa maneira, a escala cardinal, ou seja, a função valor econômico (Figura 21) foi obtida com a aplicação da equação 5 e representa o comportamento econômico do critério.

Figura 21 - Comportamento econômico do critério Fornecimento



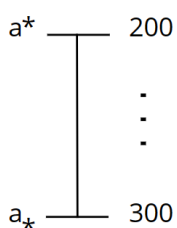
Fonte: Elaboração própria

4.3.1.2 Implantação dos acessos internos

As barragens se localizam, em sua maioria, em lugares de difícil acesso, com estradas de chão, muitas vezes estreitas e de difícil locomoção. As grandes obras de manutenção necessitam de equipamento pesado e elevado contingente de trabalhadores, fazendo com que se aumente a urgência de abertura de novos acessos e/ou melhorias dos já existentes, principalmente com alargamentos e adicional de material antideslizante. Entretanto, a construção desses acessos deve ser planejada e executada de forma cuidadosa, de forma a considerar a integridade da barragem e durabilidade da construção, a fim de evitar riscos adicionais à estrutura e retrabalho. Dessa maneira, a implantação dos acessos em obras de manutenção de barragens é de suma importância para uma boa execução de obras de manutenção de barragens (ANA, 2016).

Esse critério representa o custo da implantação dos acessos internos por parte da empresa de construção contratada. Após pesquisas de mercado realizadas e conversas com o especialista da empresa o melhor possível (a^*) é valorado em 200 mil reais e o pior aceitável 300 mil reais (a_*), conforme escala ordinal (Figura 22).

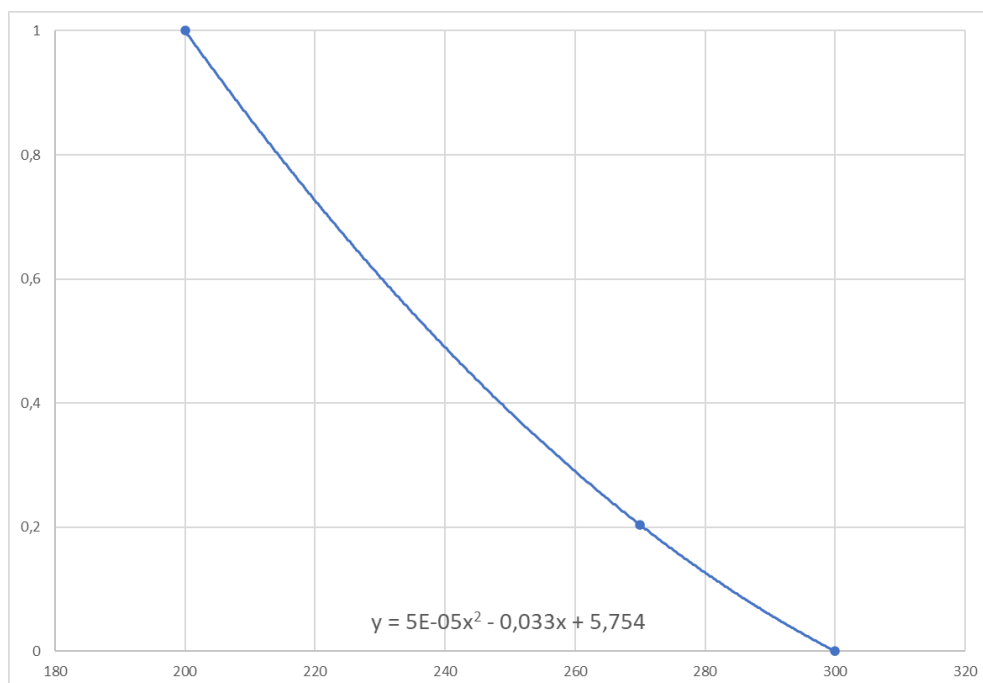
Figura 22 - Escala ordinal do critério Implantação dos acessos internos



Fonte: Elaboração própria

Atribui-se um comportamento propenso para o critério implantação dos acessos internos, pois havia a necessidade de melhorias nos acessos internos de acordo com os profissionais da PCH. Através disso, a escala cardinal, ou seja, a função valor econômico (Figura 23) foi obtida com a aplicação da equação 5 e equação 6 com $\alpha = 1$ e representa o comportamento econômico do critério.

Figura 23 - Comportamento econômico do critério Implantação dos acessos internos



Fonte: Elaboração própria

4.3.1.3 Implantação do Canteiro de obras

O canteiro de obras é imprescindível para a execução de obras de manutenção em barragens, uma vez que sua infraestrutura e operação adequadas asseguram a qualidade das obras. Segundo Pereira (2018b), sua relevância está relacionada a vários aspectos, dentre eles:

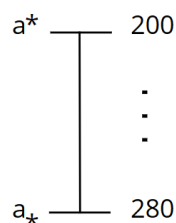
- a) o armazenamento e gerenciamento de materiais, ferramentas e equipamentos, um espaço adequado e bem-organizado a fim de evitar atrasos e gastos desnecessários;
- b) o alojamento e apoio às equipes de trabalho, uma vez que os trabalhadores necessitam de um espaço para descanso e lanche e o canteiro de obras deve garantir o bem-estar das equipes;
- c) a coordenação logística feita em um espaço com maior acomodação, como o canteiro de obras, se torna mais eficaz; e
- d) o armazenamento de documentações e registros da obra são mantidos no canteiro e permitem um acompanhamento adequado do progresso e documentos da obra.

Saurin e Formoso (2006) dividem os principais objetivos do canteiro de obras em alto nível e baixo nível. Sobre os objetivos de alto nível, pode-se destacar

a promoção de operações eficientes e seguras e o fornecimento de boas condições de trabalho aos operários. Já, os de baixo nível buscam diminuir a distância de transporte e evitar obstáculos para movimentação de materiais e equipamentos.

Esse critério representa o custo da implantação do canteiro de obras por parte da empresa de construção contratada. Após pesquisas de mercado realizadas e conversas com o especialista da empresa o melhor possível (a^*) é valorado em 200 mil reais e o pior aceitável 280 mil reais (a_*), conforme escala ordinal (Figura 24).

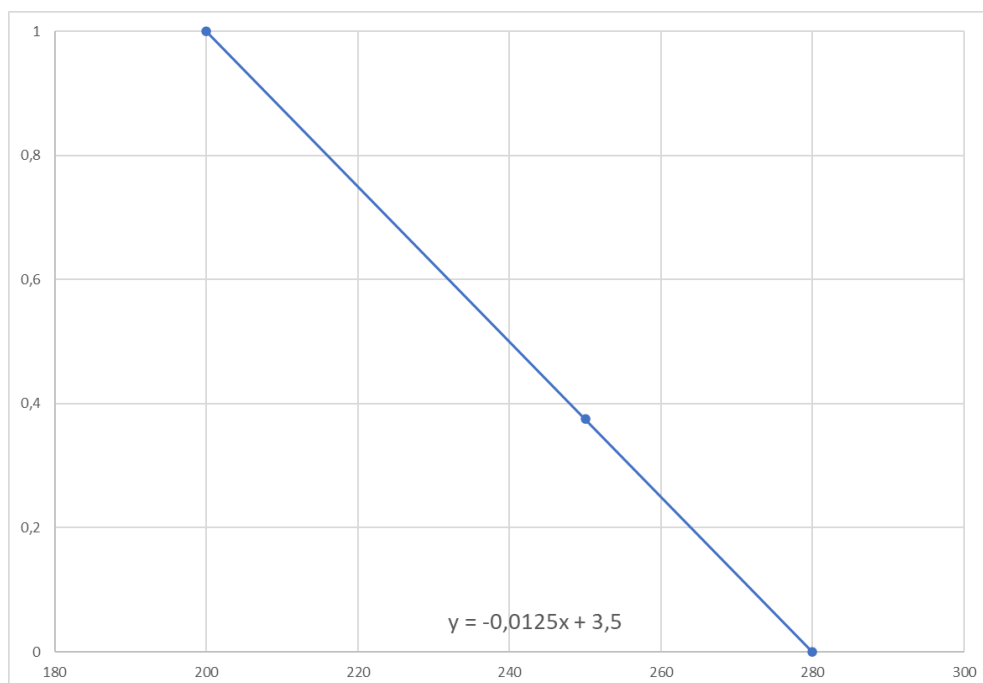
Figura 24 - Escala ordinal do critério Implantação do canteiro de obras



Fonte: Elaboração própria

Atribui-se um comportamento indiferente para o critério implantação do canteiro de obras, pois é uma etapa que faz parte de todas as obras desse tamanho. Desse modo, a escala cardinal, ou seja, a função valor econômico (Figura 25) foi obtida com a aplicação da equação 5 e representa o comportamento econômico do critério.

Figura 25 - Comportamento econômico do critério Implantação do canteiro de obras



Fonte: Elaboração própria

4.3.1.4 Mobilização de equipamentos e pessoal

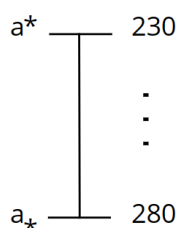
A mobilização de equipamentos e pessoal em uma obra de manutenção de barragens é o passo inicial na execução da obra. Esse processo envolve, além de transporte de recursos até o local da obra, a organização e envio de toda a documentação dos colaboradores e é crucial para o cumprimento do cronograma. Embora pareça simples, há algumas questões que devem ser respondidas para que o planejamento e execução da mobilização de equipamentos e pessoal seja bem-sucedido:

- a) quais profissionais e equipamentos serão necessários para essa execução;
- b) quais especialidades de profissionais e os equipamentos são necessárias;
- c) todos os documentos de segurança e saúde ocupacional estão entregues; e
- d) como os profissionais e equipamentos serão deslocados até o local de obra.

Esse critério representa o custo da mobilização de equipamentos e pessoal por parte da empresa de construção contratada. Após pesquisas de

mercado realizadas e conversas com o especialista da empresa o melhor possível (a^*) é valorado em 230 mil reais e o pior aceitável 280 mil reais (a_*), conforme escala ordinal (Figura 26).

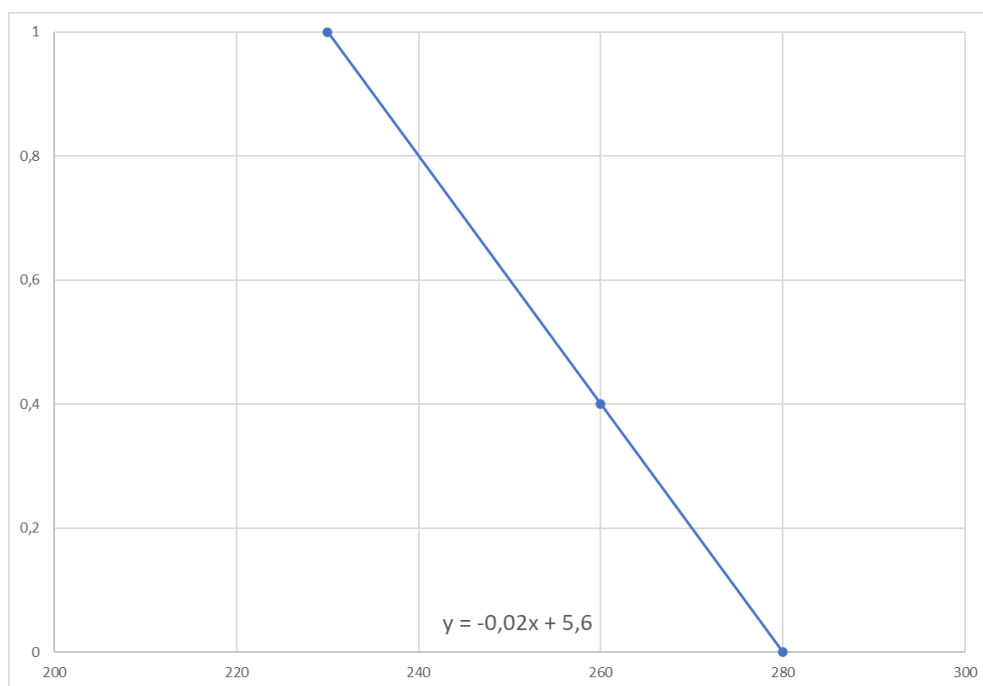
Figura 26 - Escala ordinal do critério Mobilização de equipamentos e pessoal



Fonte: Elaboração própria

Atribui-se um comportamento indiferente para o critério mobilização de equipamentos e pessoal, pois é uma etapa que faz parte de todas as obras. Dessa forma, a escala cardinal, ou seja, a função valor econômico (Figura 27) foi obtida com a aplicação da equação 5 e representa o comportamento econômico do critério.

Figura 27 - Comportamento econômico do critério Mobilização de equipamentos e pessoal



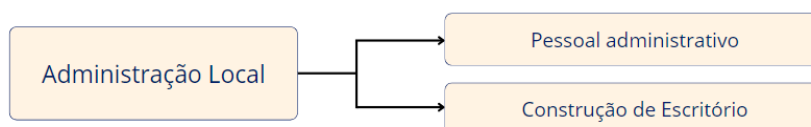
Fonte: Elaboração própria

4.3.2 Ponto de vista fundamental administração local

Este PVF abrange as perspectivas fundamentais de administração local inseridos na execução de obra de manutenção da barragem de estudo. Ele é constituído por dois critérios: pessoal administrativo e construção de escritório

O PVF, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 28.

Figura 28 - Descritores relacionados ao PVF administração local



Fonte: Elaboração própria

4.3.2.1 Pessoal administrativo

O pessoal administrativo no local da obra compreende a direção técnica, pessoal de escritório e de segurança e é essencial para o controle de qualidade, de prazos e de custos da obra (ZENITE, 2020). Portanto, é fundamental para direcionar a construção de forma que atinja os objetivos estabelecidos.

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 2$) para o critério pessoal administrativo, pois com o pessoal administrativo no local da obra, os processos administrativos (compras, decisões técnicas e segurança) fluem melhor.

4.3.2.2 Construção de Escritório

A construção de escritório no local da obra se demonstra de suma importância, uma vez que é onde a estrutura administrativa se encontra. É essencial que haja um bom local para treinamentos, reuniões, utensílios para alimentação e espaços com mobília destinado a trabalho diário com computadores. Deve-se organizar áreas para o departamento de engenharia, manutenção do canteiro de obras e gestão (TCU, 2014). Em virtude disso, o escritório no local de obra é crucial para o cumprimento dos objetivos do projeto.

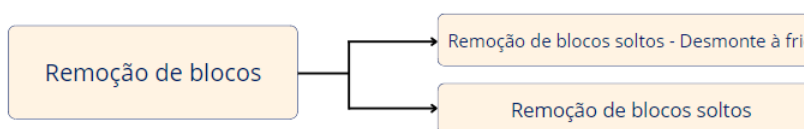
Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1$) para o critério construção do escritório, pois com um local adequado para o pessoal administrativo trabalhar a gestão da obra fica mais fácil de ser conduzida.

4.3.3 Ponto de vista fundamental remoção de blocos

Esse PVF visa abranger as perspectivas fundamentais acerca das questões de remoção de blocos no local de execução de obra de manutenção da barragem de estudo. Ele é constituído por dois critérios: remoção de blocos soltos e remoção de blocos – desmonte à frio.

O PVF, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 29.

Figura 29 - Descritores relacionados ao PVF remoção de blocos



Fonte: Elaboração própria

4.3.3.1 Remoção de blocos soltos

A remoção de blocos soltos é uma tarefa necessária no início da obra, para limpar o local onde o incidente de falha ocorreu e dar segurança aos trabalhadores quanto a quedas de blocos de rocha e/ou concreto. Por conseguinte, pode-se reconstruir o local para devolver segurança para a barragem e consequentemente às comunidades à jusante. Esse trabalho pode ser feito de algumas maneiras, com o uso de ferramentas manuais, equipamentos mecânicos e maquinário de grande porte (ANA, 2016).

Atribui-se um comportamento indiferente para o critério remoção de blocos soltos, pois a remoção de blocos de concreto e pedras soltas é uma necessidade dessa obra.

4.3.3.2 Remoção de blocos soltos – Desmonte à frio

A remoção de blocos soltos com desmonte à frio é uma tarefa que possui semelhança com a remoção de blocos, no entanto, a técnica utilizada é diferente, o que a torna mais onerosa. O desmonte à frio é comumente utilizado para pequenos volumes de rochas e em situações que, por razões técnicas, a utilização de explosivos é descartada. Em virtude de seus custos serem elevados, a primeira alternativa é a de utilização de explosivos quando há essa possibilidade (GERALDI, 2011).

Segundo Geraldi, (2011) a energia do desmonte de rochas com explosivos, além de quebrar e lançar as rochas, propaga ondas de choque pelo maciço rochoso e, com isso, vibrações e pulsos de ar são transmitidos à atmosfera. A desvantagem, contudo, é que esses efeitos podem causar danos às construções próximas, provocando o aumento de pequenas rachaduras e infiltrações em lajes.

Como o objetivo na obra de manutenção aqui destacada é reestabelecer a máxima segurança da barragem, a utilização de explosivos que possam vir a causar mais prejuízos do que benefícios não é indicada. Conforme, Barrere (2018), o desmonte à frio é o desmonte de blocos sem o uso de explosivos e pode ser realizado por várias técnicas, como:

- a) argamassa expansiva, que é uma substância que expande após o contato com a água, exercendo pressão sobre a rocha e causando sua fissuração;
- b) fio diamantado, que é um fio revestido com diamante industrial e usado para serrar a rocha; e
- c) rompedor hidráulico, que é uma ferramenta usada para quebrar rochas e é geralmente anexada a uma escavadeira.

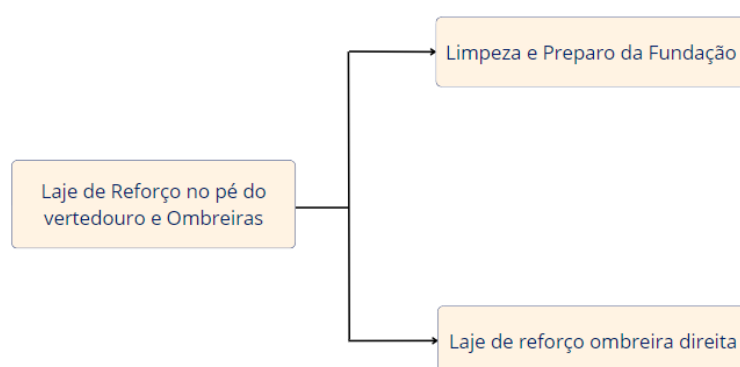
Atribui-se um comportamento indiferente para o critério remoção de blocos soltos – desmonte à frio, pois a remoção de blocos de concreto e pedras soltas é uma necessidade dessa obra e é previsto que haja a necessidade de desmonte à frio.

4.3.4 Ponto de vista fundamental Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreiras

Este PVF abrange as perspectivas fundamentais acerca das questões de reconstrução da laje de reforço no pé do vertedouro e ombreiras da obra de manutenção da barragem de estudo. Ele é constituído por dois PVE's: limpeza e preparo da fundação e laje de reforço ombreira direita.

O PVF, juntamente com seus PVE's estão demonstrados na Figura 30.

Figura 30 - PVE's relacionados ao PVF laje de reforço no pé do vertedouro e ombreiras



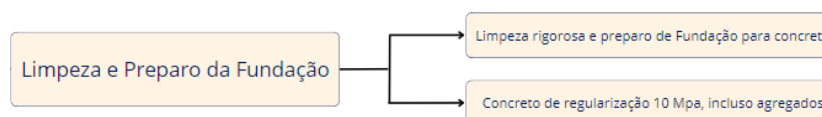
Fonte: Elaboração própria

4.3.4.1 Ponto de vista elementar Limpeza e preparo da Fundação

Este PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões de limpeza e preparo da fundação da obra de manutenção da barragem de estudo. Ele é constituído por dois critérios: limpeza rigorosa e preparo de fundação para concreto; e concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 31.

Figura 31 - Descritores relacionados ao PVE limpeza e preparo da fundação



Fonte: Elaboração própria.

4.3.4.1.1 Limpeza rigorosa e preparo de fundação para concreto

A limpeza rigorosa e preparo de fundação para concreto é uma tarefa importante para a qualidade da obra, visto que vegetação e materiais terrosos diminuem a qualidade da concretagem e posteriormente podem vir a causar fissuras, afetando a durabilidade e confiabilidade da barragem. Além da limpeza, as escavações nas rochas são essenciais e objetivam uma superfície plana e rugosa e a limpeza final deve ser realizada com jato de água/ar. A concretagem é a etapa final e deve seguir a especificação técnica do projeto em todos os aspectos de fabricação, controle e aplicação (ELETROBRÁS, 2000).

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1$) para o critério limpeza rigorosa e preparo da fundação para concreto, pois é um critério que afeta a qualidade da obra de recuperação.

4.3.4.1.2 Concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados

O concreto de regularização não tem função estrutural, uma vez que utiliza uma menor proporção de cimento na mistura (cimento, areia, pedra e água), esse concreto serve para regularização ou proteção mecânica de superfícies. Sua utilização é comum quando houve algum dano a construção anterior que tornou a superfície irregular. Ele previne o contato direto do concreto da fundação com o solo e com isso, evita o enfraquecimento do concreto da fundação e serve para regularização e proteção mecânica das superfícies (PEREIRA, 2018a).

O concreto segue a especificação técnica de projeto e conforme estudos dos projetistas necessita de 10Mpa (Mega Pascal), medida que é utilizada para definir a resistência do concreto a compressão. É necessário realizar o teste da resistência do concreto utilizado na obra objetivando a confiabilidade na execução, portanto, serão retirados corpos de prova cilíndricos padronizados conforme indicado na NBR5738 para verificação de qualidade da obra (APL, 2018).

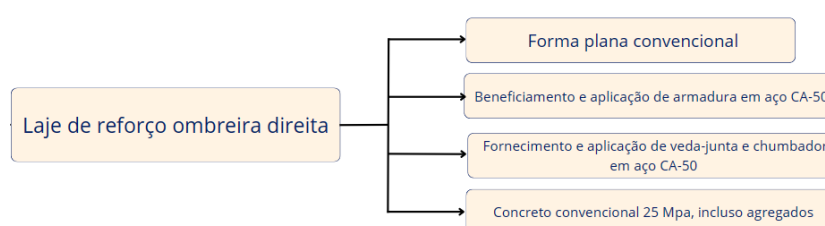
Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 0,5$) para o critério concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados, pois a qualidade do concreto é crucial para a qualidade da obra.

4.3.4.2 Ponto de vista elementar Laje de reforço ombreira direita

Este PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões da execução da laje de reforço e ombreira direita da obra de manutenção da barragem do estudo. Nessa etapa se realizam as tarefas (critérios) para a reconstrução da ombreira direita, que após a falha teve sua finalidade afetada, o que pode ocasionar outras falhas mais graves. Essa reconstrução será realizada com concreto armado, a fim de que a resistência à compressão seja elevada e que suporte bem a quantidade de esforços de tração que a ombreira é submetida. Esse ponto de vista elementar é constituído por quatro critérios: forma plana convencional; beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50; fornecimento e aplicação de veda-junta e chumbador em aço CA-50; e concreto convencional 25 Mpa, incluso agregados.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 32.

Figura 32 - Descritores relacionados ao PVE laje de reforço ombreira direita



Fonte: Elaboração própria

4.3.4.2.1 Forma plana convencional

A forma plana convencional é a estrutura temporária que dá forma ao concreto. Ela deve obedecer à forma geométrica estabelecida no projeto, executadas e posicionadas em conformidade com a especificação técnica (ANA, 2016).

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 0,8$) para o critério forma plana convencional, pois é essencial que a forma seja de qualidade e nas medidas especificadas no projeto para correta aplicação do concreto.

4.3.4.2.2 Beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50

O beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50 é a etapa onde a armadura de aço é preparada e posicionada dentro da forma de modelagem antes do concreto ser despejado. É a armadura de aço que fornece a resistência à tração ao concreto, sendo a medida CA-50 (Concreto Armado – 50) a indicação de que o aço suporta até 500 MPa de tensão até sofrer deformação plástica, tensão acima da tensão de tração que a ombreira direita estará submetida (conforme cálculos dos projetistas) (FURLANETTO, 2020).

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1$) para o critério beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50, porque essa etapa é imprescindível para que atinja a confiabilidade especificada em projeto.

4.3.4.2.3 Fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50

A aplicação de chumbador em aço CA-50 é a tarefa em que a armadura de aço é fixada no local para posteriormente receber o concreto e desempenhar sua função de resistência à tração conforme o desejado.

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 0,5$) para o critério fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50, pois é essencial que a armadura em aço se mantenha bem fixada quando o concreto for despejado.

4.3.4.2.4 Concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de vedajunta

O concreto convencional, ao contrário do de regularização, tem função estrutural e é a última etapa para reconstrução da ombreira direita. Ele é o elemento que dará a resistência à compressão para a construção, sendo essa resistência de 25 Mpa conforme a especificação dos projetistas. Deve-se assegurar que o concreto está conforme a especificação necessária a fim de que a segurança da barragem seja prioridade, ANA (2016) designa etapas para verificação da qualidade de fabricação do concreto:

- a) controlar as pesagens em todas as betonadas;
- b) controlar o tempo de betonada para garantia de homogeneidade da mistura;
- c) determinar a temperatura e consistência do concreto na fabricação e durante o lançamento na obra; e

d) determinar a resistência mecânica de amostras coletadas.

Os cuidados no manuseio do concreto devem continuar no lançamento do concreto na forma e devem ser autorizados pelo supervisor da obra. Para ANA (2016) o controle de qualidade do concreto deve ser certificado pela:

“...realização de ensaios da sua resistência mecânica, bem como, eventualmente, de ensaios para determinação do coeficiente de elasticidade, da tensão de ruptura e da quantidade de ar contido em amostras coletadas durante o lançamento, segundo critérios definidos nas especificações técnicas.”

A aplicação de veda-junta é necessária para garantir a integridade e durabilidade da estrutura, prevenindo a entrada de água e outros materiais indesejados na junta de concreto e protegendo a armadura de aço. (INACIO, 2011)

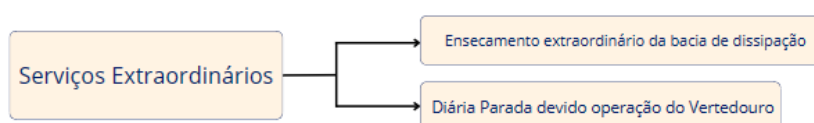
Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 0,5$) para o critério concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de veda-junta, pois a qualidade do concreto é imprescindível para a qualidade da obra e a confiabilidade da estrutura.

4.3.5 Ponto de vista fundamental serviços extraordinários

Este PVF abrange as perspectivas fundamentais acerca das questões de risco de galgamento da barragem durante a obra de manutenção no pé e na ombreira direita da barragem de estudo. Ele é constituído por dois critérios: ensecamento extraordinário da bacia de dissipação e diária parada devido operação do vertedouro.

O PVF, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 33.

Figura 33 - Descritores relacionados ao PVF serviços extraordinários



Fonte: Elaboração própria

4.3.5.1 *Ensecamento extraordinário da bacia de dissipação*

A atividade de ensecar a bacia de dissipação é importante no sentido de preparar a construtora para a possibilidade de galgamento da barragem vertedoura e, além disso, auxiliar os tomadores de decisão com informação quantificada da possível despesa caso haja precipitação extrema e negligência quanto à verificação antecipada dessa possibilidade, bem como a abertura das comportas da barragem de dissipação no tempo certo para baixar o nível dos lagos de dissipação e de geração.

Embora a obra esteja prevista para realização em período seco, as mudanças climáticas estão adicionando uma aleatoriedade nas precipitações, o que faz com que a atenção voltada à previsão climática e operação das comportas deva ser elevada.

Após estudos realizados com a precipitação de região da barragem, da quantidade de galgamentos que aconteceram em anos anteriores no período seco e pesquisas de mercado realizadas e conversas com o especialista da empresa – dado que o melhor possível seria o acontecimento de nenhum galgamento e no pior caso possível haveria a necessidade de ensecar a bacia de dissipação duas vezes.

Atribui-se um comportamento muito avesso ($\alpha = -2,3$) para o critério ensecamento extraordinário da bacia de dissipação, pois o risco de galgamento na época de obra é mínimo.

4.3.5.2 *Diária parada devido operação do vertedouro*

Caso houver a operação do vertedouro no período da obra, a construtora precisará parar seus trabalhos para ensecar o pé da barragem de geração e esse tempo parado será repassado em forma de custo para os mantenedores da barragem.

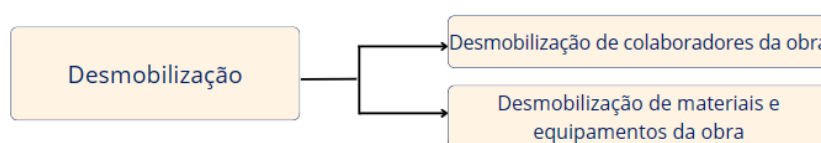
Atribui-se um comportamento muito avesso ($\alpha = -2,8$) para o critério diária parada devido operação do vertedouro, pois o risco de galgamento na época de obra é mínimo e não há qualquer intenção de despendar dinheiro para diárias paradas.

4.3.6 Ponto de vista fundamental desmobilização

Este PVF abrange as perspectivas fundamentais acerca da desmobilização de materiais, equipamentos e pessoal da obra da barragem de estudo. Ele é constituído por dois critérios: retirada de pessoal da obra e retirada de materiais da obra.

O PVF, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 34.

Figura 34 - Descritores relacionados ao PVF desmobilização



Fonte: Elaboração própria

4.3.6.1 Desmobilização de colaboradores da obra

Após o término da obra, os trabalhadores da construtora contratada têm que retornar para seus lares e para sua cidade, sendo que alguns são demitidos e há toda a documentação a ser produzida. Esse critério representa o custo de transporte e pagamento de direitos aos colaboradores da construtora contratada.

Atribui-se um comportamento indiferente para o critério desmobilização de colaboradores da obra, pois é uma atividade que em nada afeta a obra.

4.3.6.2 Desmobilização de materiais e equipamentos da obra

A desmobilização de materiais e equipamentos da obra se refere a remoção de instalações temporárias, como o canteiro de obras e o escritório de administração local. Todos os materiais da obra devem ser retirados, vendidos ou descartados para reciclagem ou em aterros sanitários; os equipamentos de todo tipo de trabalho, do menor ao maior devem ser retirados da obra; o local da obra deve ser limpo; e o “as built” (como construído) deve ser entregue ao cliente.

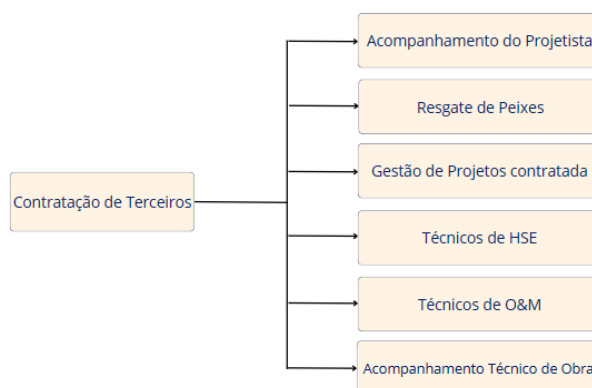
Atribui-se um comportamento indiferente para o critério desmobilização de materiais e equipamentos da obra, pois é uma atividade que em afeta muito pouco a obra.

4.3.7 Ponto de vista fundamental contratação de terceiros

Este PVF abrange as perspectivas fundamentais acerca da contratação de terceiros para auxílio ao cliente da obra da barragem de estudo. Ele é constituído por seis PVE's: acompanhamento do projetista; resgate de peixes; gestão de projetos contratada; técnicos de HSE (*Health and Safety Executive*, em tradução livre: Departamento de Saúde e Segurança); técnicos de O&M e ATO (acompanhamento técnico de obra).

O PVF, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 35.

Figura 35 - Descritores relacionados ao PVF contratação de terceiros



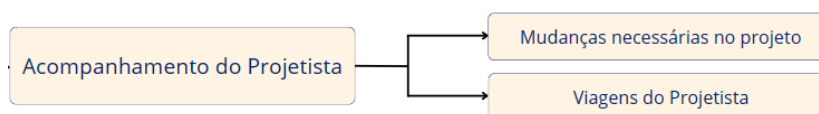
Fonte: Elaboração própria

4.3.7.1 Ponto de vista elementar acompanhamento do projetista

Esse PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões do acompanhamento do projetista na parte de execução da obra de manutenção da barragem de estudo. Nessa etapa pode ser necessário o auxílio da empresa de projeto contratada para mudanças no projeto por algum motivo encontrado na área de execução da obra (ombreira direita e pé da barragem). Esse ponto de vista elementar é constituído por dois critérios: viagens do projetista; e mudanças necessárias no projeto.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 36.

Figura 36 - Descritores relacionados ao PVE laje de reforço ombreira direita



Fonte: Elaboração própria

4.3.7.1.1 Mudanças necessárias no projeto

Os projetos são suscetíveis a mudanças, seja por alteração no escopo do projeto por necessidade do cliente ou descobertas inesperadas durante a construção, problemas financeiros e a falta de mão de obra qualificada para determinado trabalho (SOUZA; HENRIQUE, 2020).

Atribui-se um comportamento avesso ($\alpha = -1,5$) para o critério mudanças necessárias no projeto, pois mudanças no projeto nunca são bem-vindas, apesar de muitas vezes necessárias.

4.3.7.1.2 Viagens do projetista

As alterações essenciais podem apresentar desafios para serem explicadas através de fotografias ou apenas por meio de conversas à distância, tornando necessária a visita técnica do projetista ao local de obra na sua etapa de execução. Por esta razão, existe no contrato do projetista a previsão de visitas a barragem.

Atribui-se um comportamento muito avesso ($\alpha = -2$) para o critério viagens do projetista, pois a viagem do projetista ao local de obra só deve ser liberada se for algo estritamente necessário.

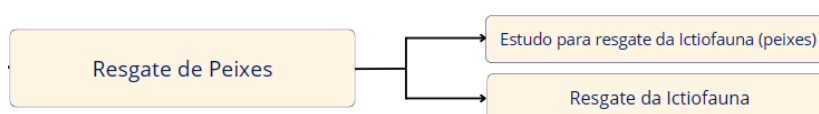
4.3.7.2 Ponto de vista elementar resgate de peixes

Esse PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões de resgate de peixes antes da execução da obra de manutenção da barragem de estudo. Ao pé da barragem, onde será feita a intervenção civil, há um lago que deverá ser secado para a execução da obra. No entanto, com a liberação

ambiental dos órgãos competentes, só é possível começar a obra caso a maior quantidade possível de ictiofauna seja salva, ou seja, retirada do local onde estão e colocada em outro local que seja o mais parecido possível com o (seu habitat natural) local onde estavam. Esse ponto de vista elementar é constituído por dois critérios: o estudo para resgate da ictiofauna; e o resgate da ictiofauna.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 37.

Figura 37 - Descritores relacionados ao PVE resgate de peixes



Fonte: Elaboração própria

4.3.7.2.1 Estudo para resgate da ictiofauna

Os terceiros contratados para esse fim devem analisar primeiramente o tamanho do lago que necessita ser seco para a execução da obra, depois disso é estimado a quantidade de peixes e se verifica qual será o modo de resgate necessário (por exemplo, através do uso de redes ou de bombas hidráulicas). Deve-se prestar atenção também ao transporte e manejo dos animais, uma vez que em alguns casos pode ser necessário avaliações clínicas para tratamento de peixes feridos ou doentes. Por fim, é preciso realizar a reintrodução dos animais no seu habitat natural (JUNHO, 2008).

Atribui-se um comportamento muito propenso ($\alpha = 1,6$) para o critério estudo para resgate da ictiofauna, pois a cultura ambiental e sustentável está bem enraizada na empresa.

4.3.7.2.2 Resgate da ictiofauna

Após o estudo, a equipe técnica é enviada ao local para realizar a atividade de resgate que pode ser feita com a utilização de redes ou de bombas hidráulicas. Pode ser necessário marcação nos animais, identificação de espécies e coletas de dados biológicos, para que após a reintrodução desses no seu habitat natural seja possível acompanhar a continuidade de vida da ictiofauna (JUNHO, 2008).

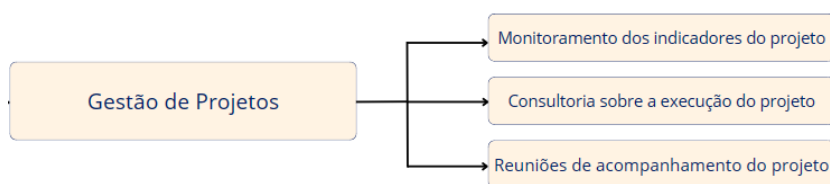
Atribui-se um comportamento muito propenso ($\alpha = 1,6$) para o critério resgate da ictiofauna, pois a cultura ambiental e sustentável está bem enraizada na empresa.

4.3.7.3 Ponto de vista elementar gestão de projetos

Este PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões de gestão de projetos durante a execução da obra de manutenção da barragem de estudo. O operador da barragem conta com profissionais qualificados para isso na empresa. Contudo, em razão da elevada demanda de projetos e o fato de ser um projeto estratégico para a companhia, uma vez que se trata de um projeto de segurança de barragem e, por este motivo, bastante dispendioso, decide-se pela contratação de profissionais terceirizados para a sua gestão específica no local da obra. Esse ponto de vista elementar é constituído por três critérios: monitoramento dos indicadores do projeto; consultoria sobre a execução do projeto; e reuniões de acompanhamento do projeto.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 38.

Figura 38 - Descritores relacionados ao PVE gestão de projetos



Fonte: Elaboração própria

4.3.7.3.1 Consultoria sobre a execução do projeto

A empresa terceirizada de gestão de projeto deve dar suporte aos gestores de projeto da contratante com o conhecimento adquirido de estudos e experiências com outros projetos semelhantes. Ela possui o papel de auxiliar em tomadas de decisão quanto à correção de rumo de prazos e/ou de custos, ajudar na verificação dos caminhos críticos do projeto e transmitir a visão de quem está acompanhando o dia a dia da execução das tarefas.

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1$) para o critério consultoria sobre a execução do projeto, pois o conhecimento da pessoa que está envolvida em tempo integral no projeto é de extrema relevância para as tomadas de decisão sobre os temas do dia a dia.

4.3.7.3.2 Monitoramento dos indicadores do projeto

O monitoramento dos indicadores chaves de performance (KPI, *Key Performance Indicators*) em projetos é imprescindível para que o projeto se desenvolva da maneira desejada. Essa é uma das principais atividades da gestão de projetos contratada. Os indicadores dão suporte para à tomada de decisão ao decorrer do projeto e devem ser utilizados como motivação para as mudanças de rumo necessárias. Os indicadores normalmente são utilizados para medir o prazo, o custo, o retorno sobre o investimento e o esforço dispendido em cada tarefa. Em vista disso, gerenciar e acompanhar a performance do projeto é necessário para o sucesso do projeto.

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 0,5$) para o critério monitoramento dos indicadores do projeto, pois os KPIs são extremamente utilizados na empresa e significam muito na gestão de projetos.

4.3.7.3.3 Reuniões de acompanhamento do projeto

O acompanhamento do projeto ocorre diariamente, e para garantir que todos os participantes estejam bem informados sobre os desenvolvimentos da obra, é essencial a realização de reuniões regulares de acompanhamento, sejam elas reuniões mais simples com a empresa de construção contratada para alinhar as tarefas do dia, reuniões semanais com a contratante para informar o andamento do projeto, ou até mesmo reuniões mais complexas para tomadas de decisão quando o andamento do projeto não está conforme o planejado.

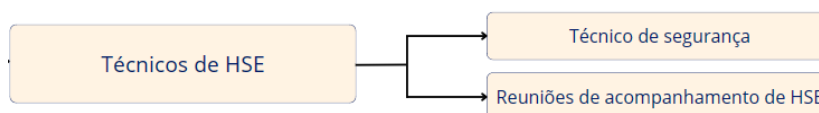
Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 0,75$) para o critério reuniões de acompanhamento de projeto, pois há uma forte necessidade de informações de grandes projetos para a alta cúpula da direção da empresa.

4.3.7.4 Ponto de vista elementar técnicos(as) de HSE

Este PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões de técnicos(as) de HSE contratados(as) para a execução da obra de manutenção da barragem de estudo. O operador da barragem conta com profissionais qualificados para isso na empresa. Contudo, em razão da elevada demanda de saúde e segurança nas usinas de geração de energia elétrica, não há técnicos(as) de HSE suficientes. Em razão disso, decide-se pela contratação de profissionais para a gestão de HSE desse projeto no local da obra. Esse ponto de vista elementar é constituído por dois critérios: técnico de segurança; e reuniões de acompanhamento de HSE.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 39.

Figura 39 - Descritores relacionados ao PVE técnicos de HSE



Fonte: Elaboração própria

4.3.7.4.1 Técnico(a) de segurança

O(A) técnico(a) de segurança é extremamente necessário(a) em uma obra de manutenção de barragens para garantir a saúde e segurança dos colaboradores que estão desempenhando suas funções específicas. Assim, as principais atribuições desse profissional são (CONNECT, 2017):

“identificar as possibilidades de ocorrência de acidentes e analisar meios de preveni-los, implementar programas de treinamento de segurança, orientar e fiscalizar o uso dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e dos Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs)”

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1,5$) para o critério técnico de segurança, pois há uma forte cultura de saúde e segurança na empresa.

4.3.7.4.2 Reuniões de acompanhamento de HSE

As reuniões são necessárias para informar gestores da contratante e da construtora contratada acerca dos perigos da obra. Informações pertinentes sobre quase acidentes, acidentes e desrespeito às regras de saúde e segurança da empresa contratante são compartilhadas nessas reuniões, momento em que são tomadas acerca desse tema.

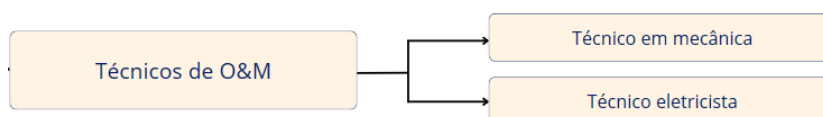
Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1,5$) para o critério reuniões de acompanhamento de HSE, pois há uma forte necessidade de informações acerca de inconformidades de HSE nos projetos da empresa para assim diminuir os riscos a acidentes de colaboradores e terceiros.

4.3.7.5 Ponto de vista elementar técnicos(as) de O&M

Esse PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões de técnicos(as) de O&M contratados para substituição dos técnicos(as) de O&M da empresa contratante que acompanharão a execução da obra de manutenção da barragem de estudo. O operador da barragem conta com profissionais qualificados para isso na empresa. Contudo, em razão da elevada demanda de trabalho de O&M com uma obra de manutenção acontecendo, há a necessidade da contratação de profissionais terceirizados para o acompanhamento das atividades rotineiras da PCH. Esse ponto de vista elementar é constituído por dois critérios: técnico em mecânica; e técnico eletricista.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 40.

Figura 40 - Descritores relacionados ao PVE técnicos(as) de O&M



Fonte: Elaboração própria

4.3.7.5.1 Técnico(a) em mecânica

O(A) técnico(a) de manutenção mecânica terceirizado(a) é necessário para substituir o(a) técnico(a) de manutenção mecânica da empresa operadora da

barragem e auxiliar outros(as) técnicos(as) da contratante nas atividades necessárias de instalação, montagem e testagem de novas máquinas e equipamentos, bem como realização de manutenções preventivas e corretivas e inspeção de máquinas.

Atribui-se um comportamento indiferente para o critério técnico(a) em mecânica, pois contratar técnicos(as) de O&M extras é uma obrigação da empresa contratante quando há execução de grandes projetos.

4.3.7.5.2 Técnico(a) eletricista

O(A) técnico(a) de manutenção elétrica terceirizado(a) é necessário para substituir o(a) técnico(a) de manutenção elétrica da empresa operadora da barragem e auxiliar outros(as) técnicos(as) da contratante nas atividades necessárias de montagem, troca e instalações focadas em manutenção e reparos em dispositivos elétricos, bem como a execução de manutenção elétrica preventiva e corretiva e, por fim, visa encontrar e diagnosticar defeitos.

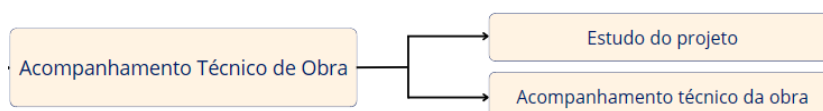
Atribui-se um comportamento indiferente para o critério técnico(a) em eletricista, pois contratar técnicos(as) de O&M extras é uma obrigação da empresa contratante quando há execução de grandes projetos.

4.3.7.6 Ponto de vista elementar acompanhamento técnico de obra

Esse PVE objetiva englobar as perspectivas fundamentais sobre as questões de acompanhamento técnico de obra (ATO) através de engenheiros(as) contratados(as) para acompanhar e analisar a execução da obra de manutenção da barragem de estudo. Esse ponto de vista elementar é constituído por dois critérios: estudo do projeto; e acompanhamento técnico da obra.

O PVE, juntamente com seus critérios estão demonstrados na Figura 41.

Figura 41 - Descritores relacionados ao PVE acompanhamento técnico de obra



Fonte: Elaboração própria

4.3.7.6.1 Estudo do projeto

Para entendimento do que será reparado na obra os profissionais de acompanhamento técnico de obra precisam estudar o projeto e verificar quais são os materiais que deverão ser utilizados em cada tarefa da execução da manutenção corretiva no pé da barragem. Com o conhecimento obtido, poderão auxiliar a empresa contratante posteriormente caso alguma etapa da execução do projeto não seja cumprida da maneira prevista em contrato.

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1$) para o critério estudo do projeto, pois é crucial que haja uma pessoa com conhecimento do projeto para verificação técnica de execução da obra no local da obra.

4.3.7.6.2 Acompanhamento técnico da obra

Os(As) engenheiros(as) contratados(as) para fazer o acompanhamento técnico da obra auxiliam os construtores na execução do reparo e representam formalmente a contratante no local de execução do trabalho. Eles(as) reportam as inconformidades para os gestores de projeto e conversam com a empreiteira contratada para que a qualidade da obra seja a ideal.

Atribui-se um comportamento propenso ($\alpha = 1$) para o critério acompanhamento técnico de obra, pois é crucial que haja uma pessoa para verificação técnica da obra no local da obra.

4.3.8 Trade-offs

Os *trade-offs* (também chamados de taxa marginal de substituição) entre um critério e outro servem como base para a definição de importância relativa de cada item dentro de seu grupo hierárquico conforme estrutura da árvore multicriterial (Figura 18). Ou seja, o decisor pondera sobre a relevância de cada critério em comparação com outro, facilitando a tomada de decisão e diminuindo a subjetividade da decisão. Os *trade-offs* podem ser obtidos por meio do método *direct rating* (avaliação direta) ou por meio do método AHP com a utilização de matriz de comparação par a par.

4.3.8.1 Trade-offs para avaliação da execução de manutenção em barragens

Para a obtenção dos *trade-offs* do sistema como um todo a técnica utilizada foi a AHP. Com as definições do decisor, seguindo a Tabela 3, é formada a Tabela 8:

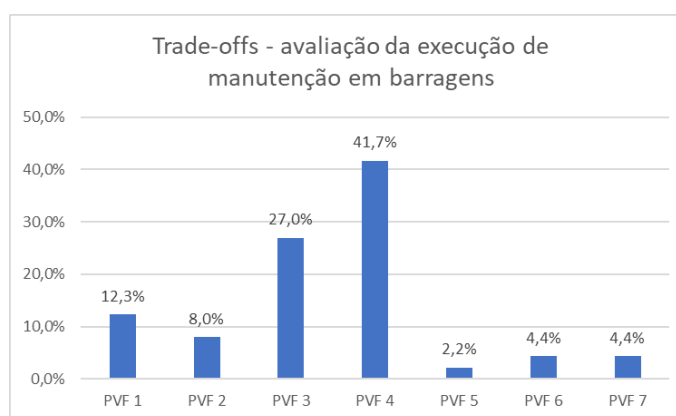
Tabela 8 - Matriz de comparação par a par: PVFs

	PVF	PVF 1	PVF 2	PVF 3	PVF 4	PVF 5	PVF 6	PVF 7
PVF 1	Mobilização e montagem do canteiro de obras	1	3	1/3	1/5	5	3	3
PVF 2	Administração Local	1/3	1	1/5	1/7	5	3	3
PVF 3	Remoção de blocos	3	5	1	1/3	9	7	7
PVF 4	Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreira direita	5	7	3	1	9	7	7
PVF 5	Serviços Extraordinários	1/5	1/5	1/9	1/9	1	1/3	1/3
PVF 6	Desmobilização	1/3	1/3	1/7	1/7	3	1	1
PVF 7	Contratação de Terceiros	1/3	1/3	1/7	1/7	3	1	1

Fonte: Elaboração própria

E após todos os cálculos feitos, conforme Equações 9, 10, 11, 12 e 13 são obtidos os *trade-offs* expressos na Figura 42.

Figura 42 - Trade-offs para avaliação da execução de manutenção em barragens



Fonte: Elaboração própria

Nesse caso, é possível perceber quais são os PVFs mais influenciáveis para o decisor, sendo o PVF Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreira direita (PVF 4) com 41,7% de influência nas decisões, o mais importante para a tomada de decisão.

4.3.8.2 Trade-offs dos PVEs

Para a obtenção dos *trade-offs* dos PVEs a técnica utilizada foi a *direct rating* com notas de 0 a 10.

4.3.8.2.1 Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreira direita – PVF 4

Com as definições do decisor sobre o PVF 4 a Tabela 9 é formada:

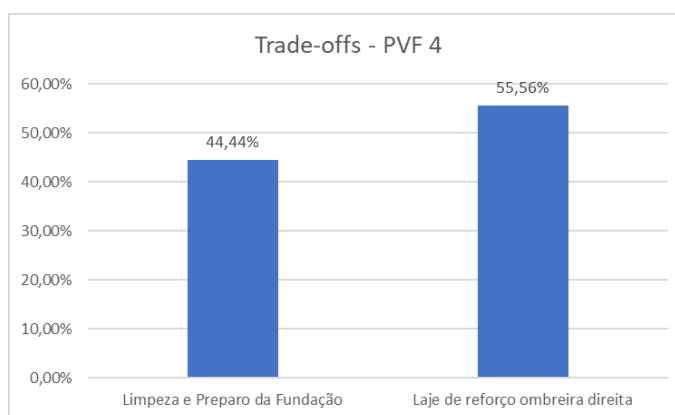
Tabela 9 – Direct rating dos PVEs do PVF 4

PVF	Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreira direita	
PVE	Limpeza e Preparo da Fundação	Laje de reforço ombreira direita
Nota	8	10

Fonte: Elaboração própria

Com a utilização da Equação 14, os *trade-offs* são calculados e expressos na Figura 43.

Figura 43 - Trade-offs dos PVEs do PVF 4



Fonte: Elaboração própria

Nesse caso, é possível perceber que no PVF 4 há um equilíbrio entre os dois PVEs. No entanto a Laje de reforço ombreira direita ainda tem maior importância para a tomada de decisão.

4.3.8.2.2 Contratação de Terceiros – PVF 7

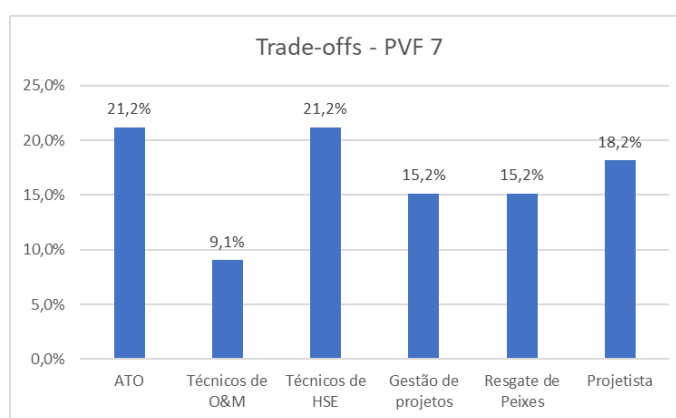
Com as definições do decisor sobre o PVF 7 a Tabela 10 é formada:

Tabela 10 - Direct rating dos PVEs do PVF 7

PVE	Contratação de Terceiros					
Descritor	ATO	Técnicos de O&M	Técnico de HSE	Gestão de Projetos	Resgate de Ictiofauna	Projetista
Nota	7	3	7	5	5	6

Fonte: Elaboração própria

Com a utilização da Equação 14, os *trade-offs* são calculados e expressos na Figura 44.

Figura 44 - Trade-offs dos PVEs do PVF 7

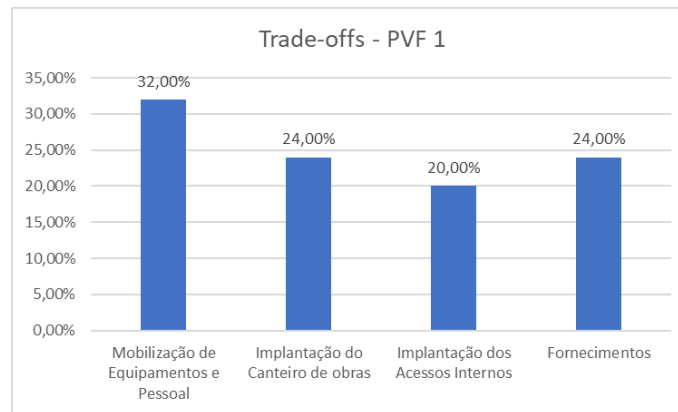
Fonte: Elaboração própria

Nesse caso, é possível perceber que no PVF 7, os dois PVEs mais importantes para a tomada de decisão são o ATO e o Técnicos de HSE, com 21,2% de *trade-off*.

4.3.8.3 Trade-offs dos Critérios

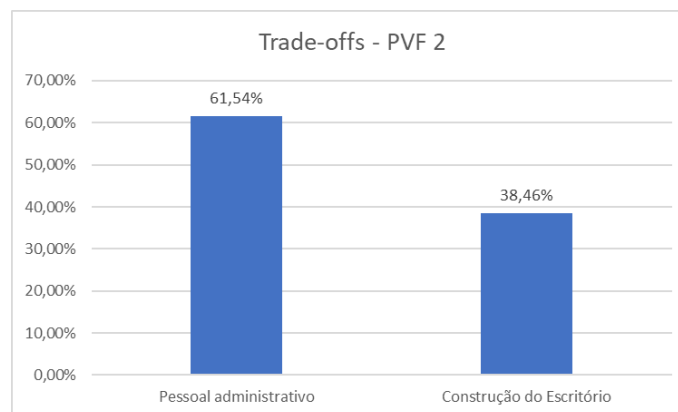
Alguns PVFs não têm PVEs como subcritério, portanto o trade-off foi realizado de forma direta para cada descritor.

A Figura 45 demonstra o PVF 1, no qual se observa a maior relevância do critério mobilização de equipamentos e pessoal.

Figura 45 - Trade-offs do PVF 1

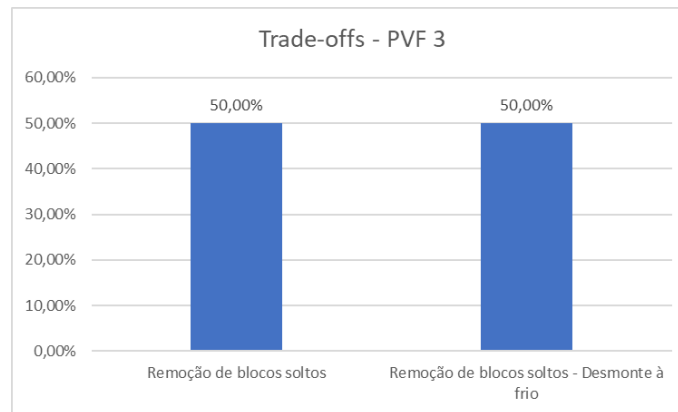
Fonte: Elaboração própria

A Figura 46 demonstra o PVF 2, no qual se observa a maior relevância do critério pessoal administrativo.

Figura 46 - Trade-offs do PVF 2

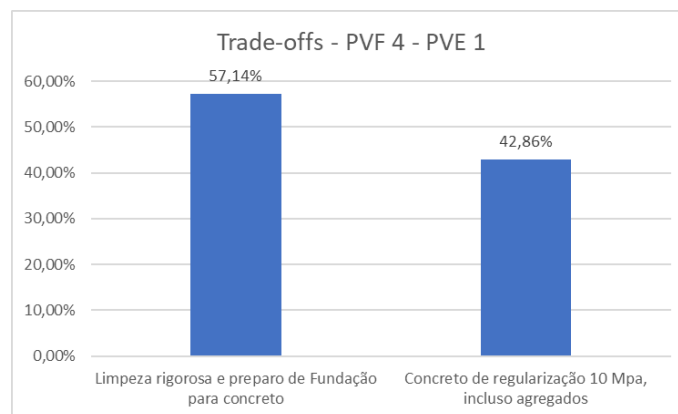
Fonte: Elaboração própria

A Figura 47 demonstra o PVF 3, no qual se observa igual relevância entre os dois critérios.

Figura 47 - Trade-offs do PVF 3

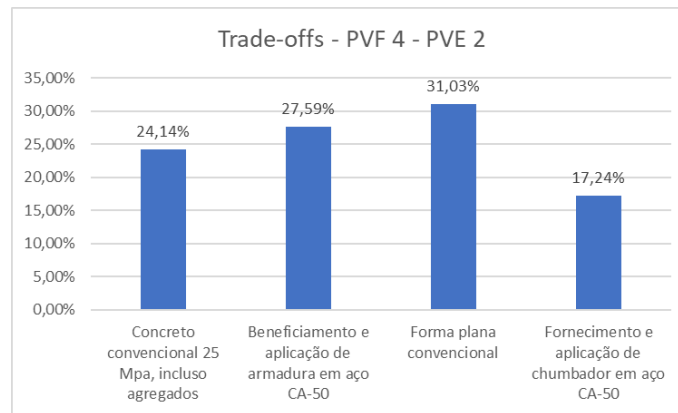
Fonte: Elaboração própria

A Figura 48 demonstra o PVE 1 do PVF 4, no qual se observa a maior relevância do critério limpeza rigorosa e preparo da fundação para concreto.

Figura 48 - Trade-offs do PVF 4 – PVE 1

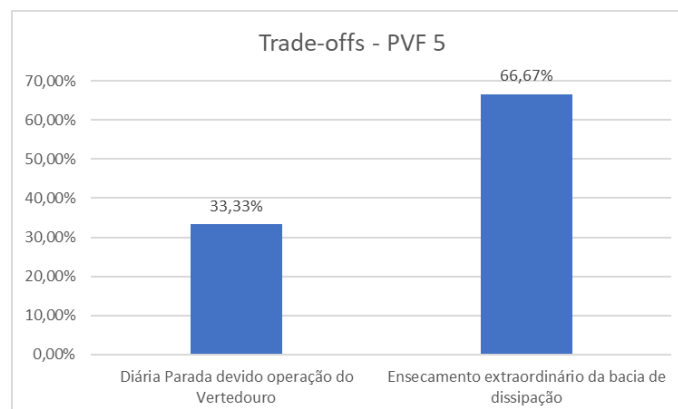
Fonte: Elaboração própria

A Figura 49 demonstra o PVE 2 do PVF 4, no qual se observa a maior relevância do critério forma plana convencional.

Figura 49 - Trade-offs do PVF 4 – PVE 2

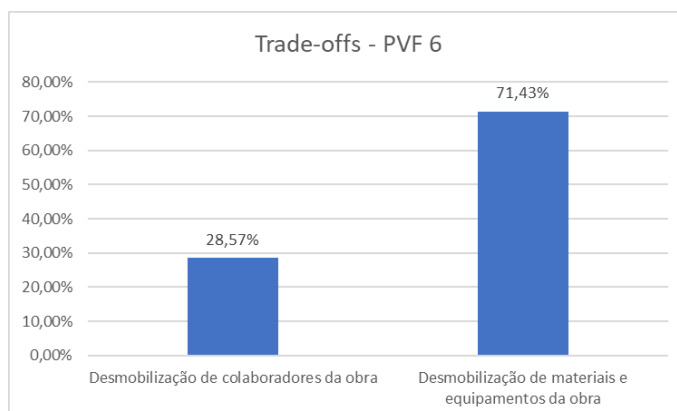
Fonte: Elaboração própria

A Figura 50 demonstra o PVF 5, no qual se observa a maior relevância do critério ensecamento extraordinário da bacia de dissipação.

Figura 50 - Trade-offs do PVF 5

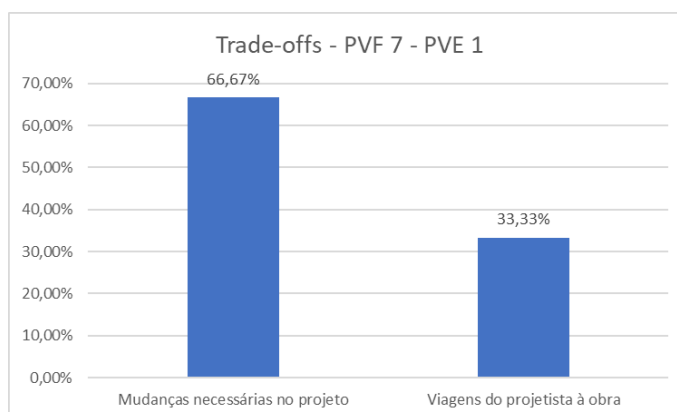
Fonte: Elaboração própria

A Figura 51 demonstra o PVF 6, no qual se observa a maior relevância do critério desmobilização de materiais e equipamentos da obra.

Figura 51 - Trade-offs do PVF 6

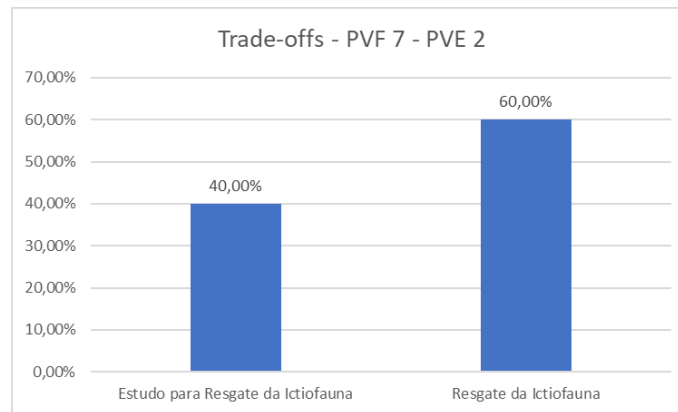
Fonte: Elaboração própria

A Figura 52 demonstra o PVE 1 do PVF 7, no qual se observa maior relevância do critério mudanças necessárias no projeto.

Figura 52 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 1

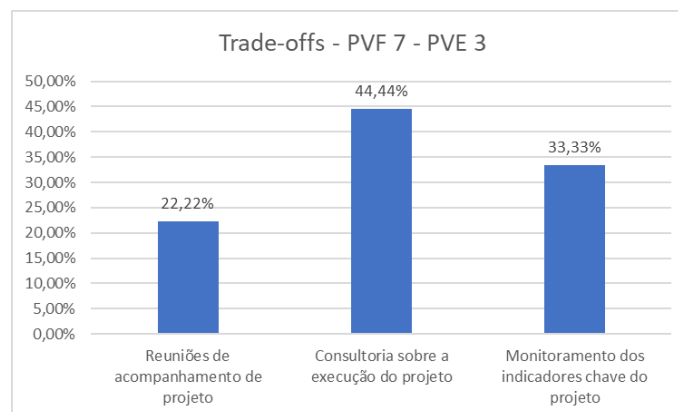
Fonte: Elaboração própria

A Figura 53 demonstra o PVE 2 do PVF 7, no qual se observa a maior relevância do critério resgate da ictiofauna.

Figura 53 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 2

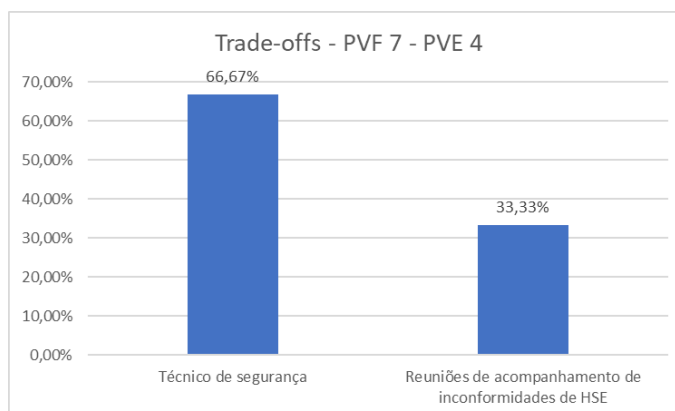
Fonte: Elaboração própria

A Figura 54 demonstra o PVE 3 do PVF 7, no qual se observa maior relevância do critério consultoria sobre a execução do projeto.

Figura 54 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 3

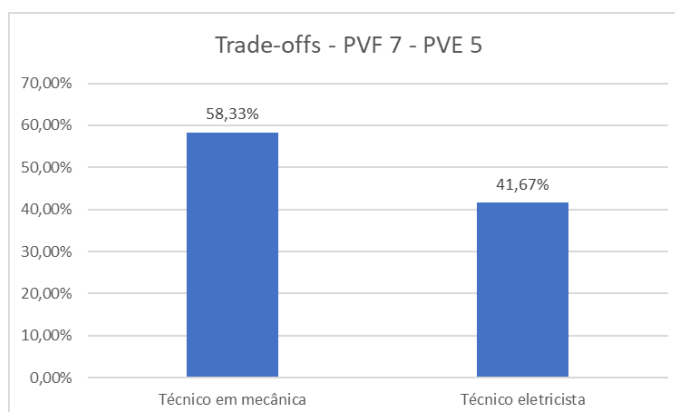
Fonte: Elaboração própria

A Figura 55 demonstra o PVE 4 do PVF 7, no qual se observa a maior relevância do critério técnico de segurança.

Figura 55 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 4

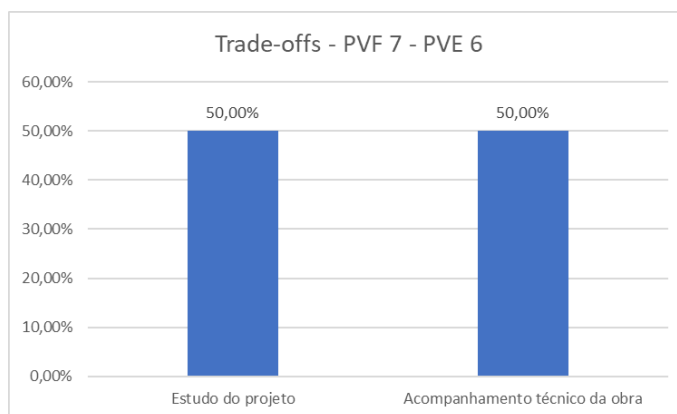
Fonte: Elaboração própria

A Figura 56 demonstra o PVE 5 do PVF 7, no qual se observa a maior relevância do critério técnico em mecânica.

Figura 56 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 5

Fonte: Elaboração própria

A Figura 57 demonstra o PVE 6 do PVF 7, no qual se observa equilíbrio nas relevâncias dos dois critérios.

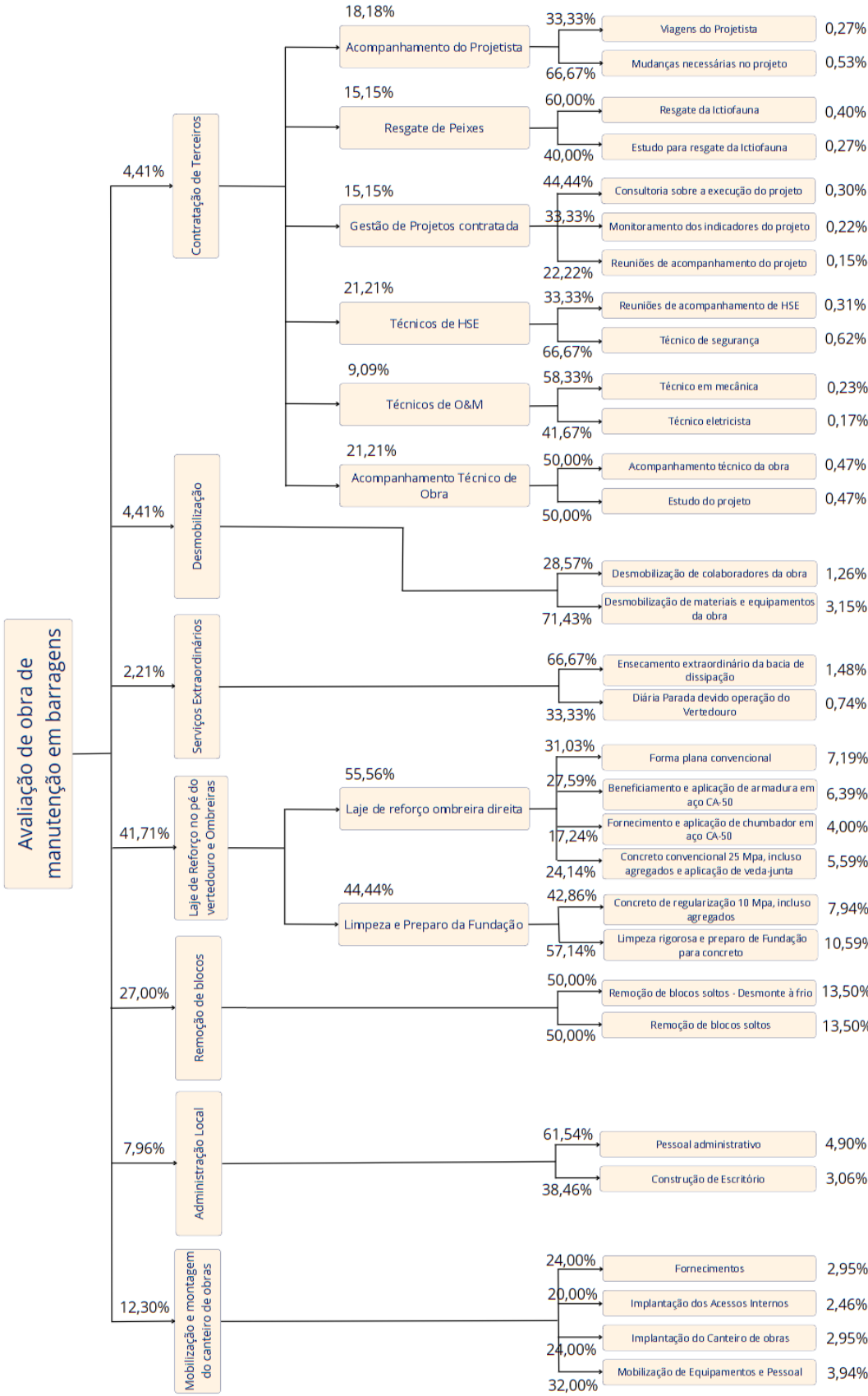
Figura 57 - Trade-offs do PVF 7 – PVE 6

Fonte: Elaboração própria

4.3.8.4 Trade-offs finais

Os trade-offs finais de cada critério refletem a importância de cada um deles para o objetivo do estudo de avaliação de obras de manutenção de barragens. A Figura 58 apresenta todos os trade-offs. Pode-se destacar a maior relevância dada para os critérios remoção de blocos, remoção de blocos – desmonte à frio, limpeza rigorosa e preparo da fundação, concreto de regularização e forma plana convencional, os quais foram avaliados como os pontos centrais da obra, visando a qualidade da obra em busca da segurança da barragem.

Figura 58 - Trade-offs finais



Fonte: Elaboração própria

4.3.8.5 Valor econômico global

O valor econômico global (Tabela 11) é obtido com a Equação 7 e descreve o desempenho das alternativas.

Tabela 11 - Valor econômico global

Alternativas	Valor econômico global
Melhor possível	1,00000
Avaliada	0,52915
Pior aceitável	0,00000

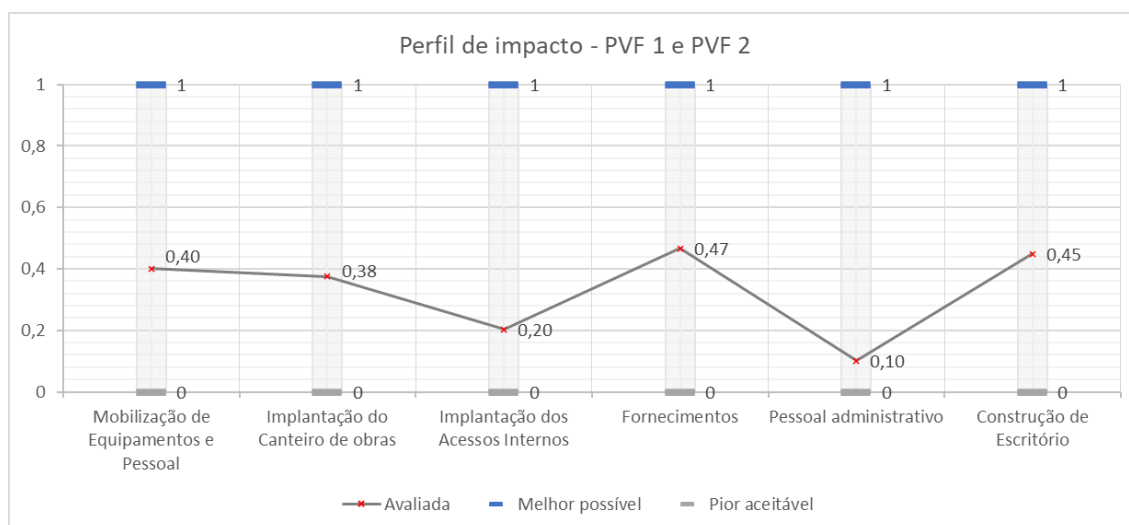
Fonte: Elaboração própria

Esse é o desempenho da alternativa de valor avaliada no estudo de avaliação de obras de barragens, podendo-se dizer, assim, que a utilidade da alternativa é 47,085% menor que o melhor valor possível de custos de obra.

4.3.9 Avaliação multicriterial benchmarking

Os perfis de impacto serão apresentados e seus desempenhos analisados, objetivando o esclarecimento dos descritores que mais (e menos) impactaram no custo da obra. Para obter os perfis de impacto, utilizam-se as equações 5 e 6. Para melhor visualização os perfis de impacto serão separados entre blocos de PVFs. A Figura 59 permite a avaliação do impacto dos descritores do PVF 1 e PVF 2.

Figura 59 - Perfil de impacto – PVF 1 e PVF 2

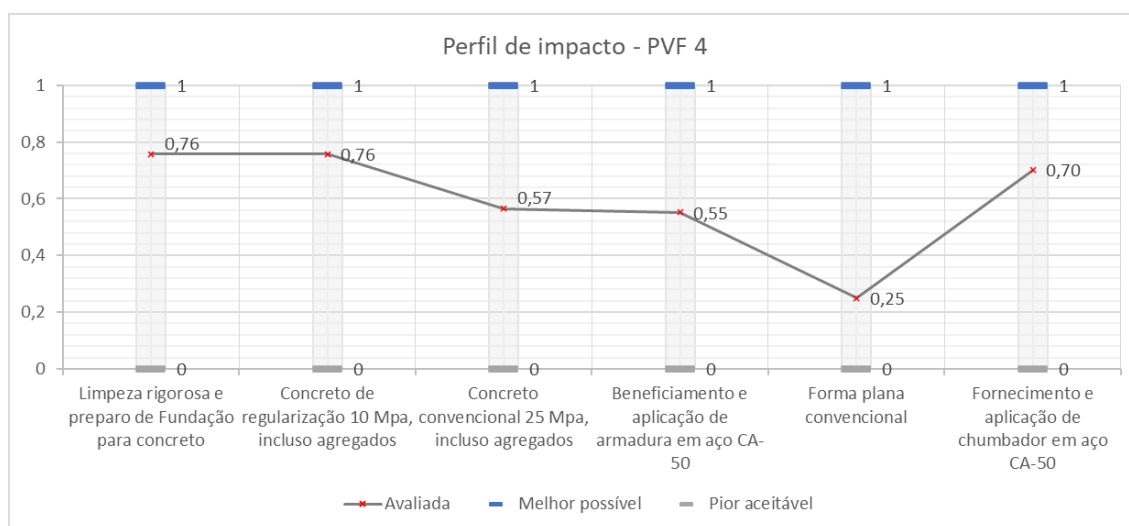


Fonte: Elaboração própria

Para o perfil de impacto dos PVFs 1 e 2 (Figura 59), o critério com melhor desempenho é “Fornecimentos”, no entanto ainda com um desempenho abaixo do valor econômico. Os critérios com o pior desempenho no recorte dos PVFs 1 e 2 são “Implantação dos acessos internos”, no qual se observa uma propensão moderada do decisor e “Pessoal administrativo”, onde o decisor é muito propenso ao critério, diminuindo consideravelmente seu desempenho.

A Figura 60 permite a avaliação do impacto dos descritores do PVF 4.

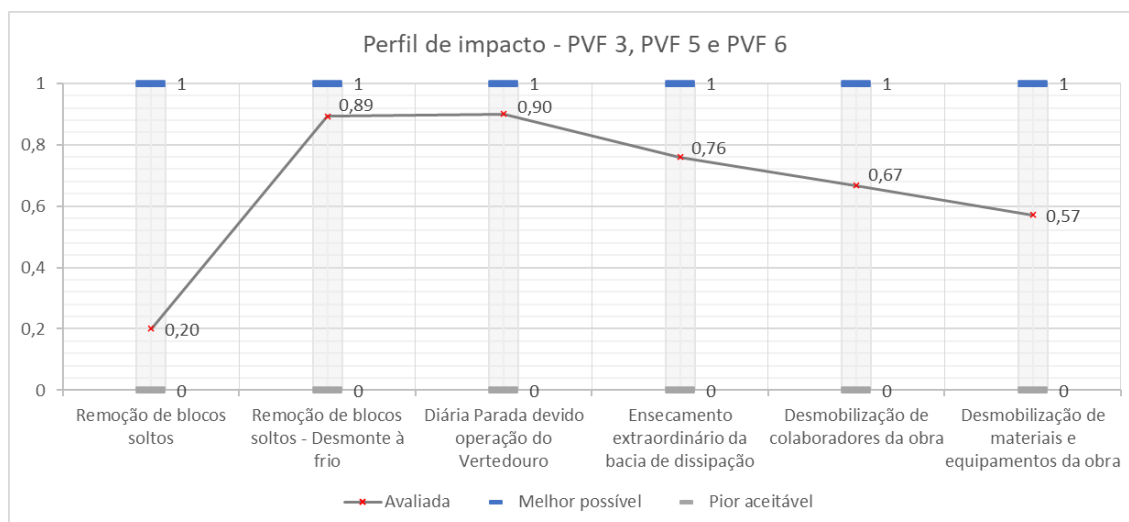
Figura 60 - Perfil de impacto - PVF 4



Fonte: Elaboração própria

Para o perfil de impacto do PVF 4 (Figura 60), os critérios com melhor desempenho são “Limpeza rigorosa e preparo de fundação para concreto” e “Concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados”, sendo que em ambos, apesar da propensão do decisor nos critérios, o custo segue próximo ao Melhor possível. O critério com o pior desempenho no recorte do PVF 4 é o “Forma plana convencional”, critério que com a propensão do decisor leva o desempenho bem abaixo comparado com os outros critérios do PVF 4.

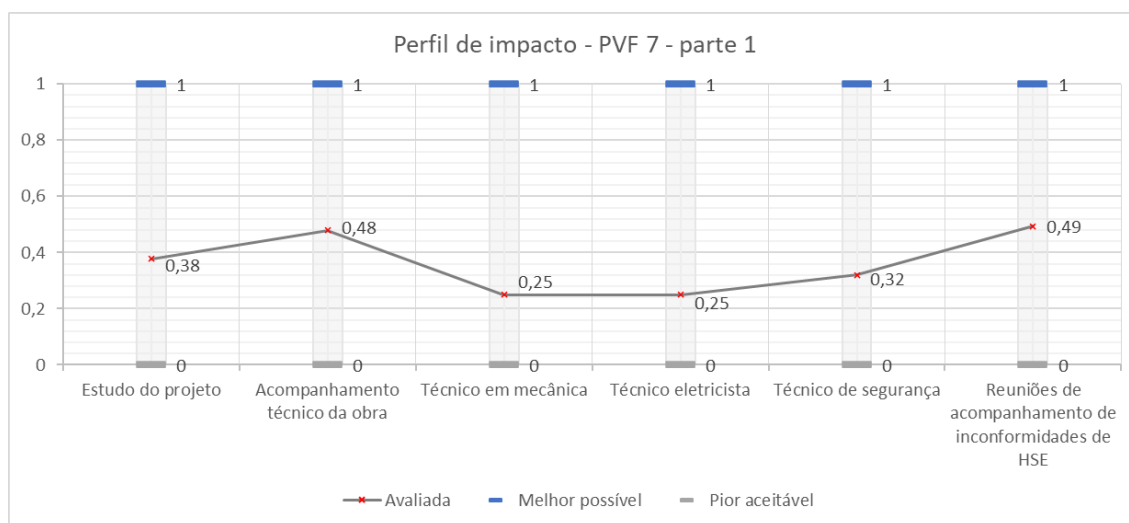
A Figura 61 permite a avaliação do impacto dos descritores dos PVFs 3, 5 e 6.

Figura 61 - Perfil de impacto - PVF 3, PVF 5 e PVF 6

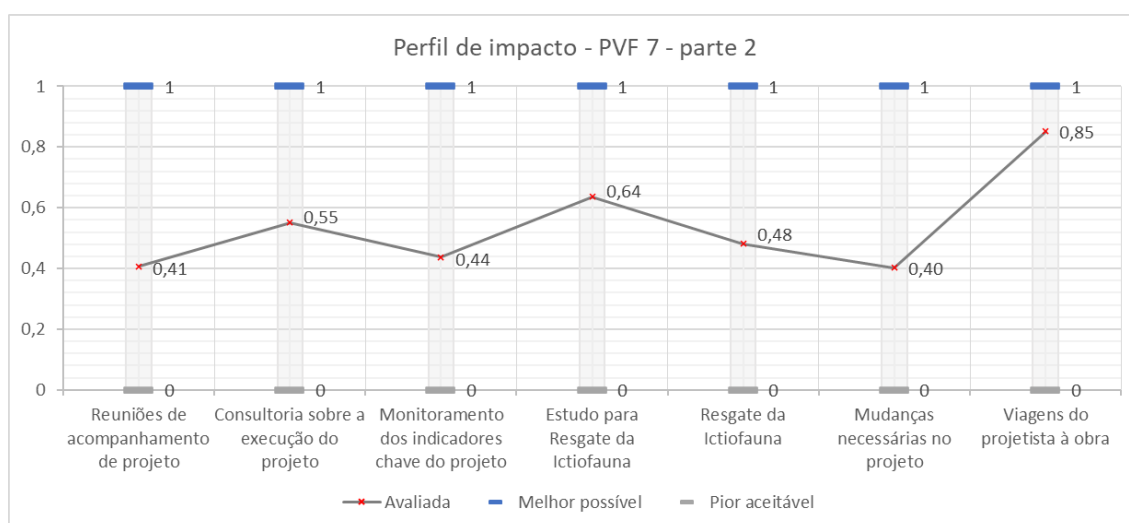
Fonte: Elaboração própria

Para o perfil de impacto dos PVFs 3, 5 e 6 (Figura 61), tem-se uma média de desempenho boa. Os critérios com melhor desempenho são “Diária parada devido operação do vertedouro”, o qual se tem uma aversão muito grande e “Remoção de blocos soltos – Desmonte à frio” que, apesar de o decisor ser indiferente, tem-se uma previsão de um gasto próximo ao Melhor possível. O critério com o pior desempenho no recorte dos PVFs 3, 5 e 6 é o “Remoção de blocos soltos”, onde o decisor é indiferente, mas há uma previsão de custo próximo ao Pior possível.

As Figura 62 e a Figura 63 permitem a avaliação do impacto dos descritores do PVF 7.

Figura 62 - Perfil de impacto - PVF 7 - parte 1

Fonte: Elaboração própria

Figura 63 - Perfil de impacto - PVF 7 - parte 2

Fonte: Elaboração própria

Para o perfil de impacto do PVF 7 (Figura 62 e Figura 63). O critério com melhor desempenho é “Viagens do projetista à obra”, o qual se tem uma aversão muito grande. Os critérios com o pior desempenho no PVF 7 são o “Técnico em mecânica” e o “Técnico eletricista”, em ambos o decisor é indiferente, mas há uma previsão de custo próximo ao Pior possível.

Avaliando a alternativa avaliada por completo, é possível observar que os melhores desempenhos estão nos critérios “Diária parada devido operação do

vertedouro”, “Remoção de blocos soltos – Desmonte à frio” e “Viagens do projetista à obra”. Por outro lado, os piores desempenhos estão nos critérios “Pessoal administrativo”, “Implantação dos acessos internos” e “Remoção de blocos soltos”. Esses desempenhos e seus respectivos custos utilidade (equação 16) estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Melhores e piores desempenhos do perfil de impacto

Critério	Desempenho	Custo utilidade (R\$ mil)
Diária parada devido operação do vertedouro	0,90	36
Remoção de blocos soltos – Desmonte à frio	0,89	28
Viagens do projetista à obra	0,85	6
Remoção de blocos soltos	0,20	5
Implantação dos acessos internos	0,20	10
Pessoal administrativo	0,10	20

Fonte: Elaboração própria

Objetivando a melhoria de desempenho da alternativa avaliada, algumas sugestões podem ser feitas. Para o critério “Pessoal administrativo”, pode-se diminuir o contingente de pessoas trabalhando na obra. O esforço para melhoria de desempenho desse critério é importante, visto que a cada décimo de melhoria, R\$ 20 mil reais serão economizados. Já, para a “Implantação dos acessos internos”, deve-se avaliar a alternativa que encontre o caminho mais curto para o local da obra e, além disso, priorizar a melhoria das estradas já abertas, ao invés da abertura de novos caminhos. Para o critério de “Remoção de blocos soltos” é necessário avaliação minuciosa da necessidade de grande maquinário para o trabalho, pois esses equipamentos têm um aluguel elevado que encarecem a obra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a relevância da geração hidrelétrica para o Brasil, é de suma importância o zelo pela confiabilidade de seus equipamentos e, principalmente, de sua barragem. Em virtude disso, deve-se empenhar grandes esforços para monitoramento periódico, manutenções e modernizações, ambicionando a garantia da segurança com a diminuição dos riscos de falha.

Sabendo que as falhas de rompimento de barragens hidrelétricas frequentemente têm como causa inicial o galgamento por eventos pluviométricos e fluviométricos extremos, é necessário a avaliação do risco que as barragens estão submetidas atualmente.

Em vista disso, o histórico de informações e dados sobre esses fenômenos que podem provocar ou intensificar o processo de degradação de barragens é crucial para a prevenção de desastres. Esses dados permitem melhor entendimento sobre os fatores de risco e a implementação de medidas preventivas eficazes. Entretanto, as mudanças climáticas estão, de certa forma, comprometendo a utilidade desse histórico de dados.

As mudanças climáticas estão alterando os padrões climáticos de maneira imprevisível. Isso sugere que eventos que podem afetar a integridade de barragens, como chuvas fortes, estão se tornando mais frequentes e intensos. Portanto, os dados históricos podem não fornecer uma representação precisa do futuro, pois foram coletados em um clima diferente, onde o efeito recente das mudanças climáticas não era percebido de forma tão cristalina.

Isso não significa o descarte dos dados históricos, porque ainda são úteis e apresentam uma visão valiosa acerca dos fatores que podem levar à falha de barragem. No entanto, devem ser complementados com dados e pesquisas que levem em consideração essa aleatoriedade climática cada vez mais perturbadora. Isso deve incluir a realização de simulações de computador e a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para melhor previsão de futuros eventos climáticos extremos.

Nesse cenário, obras em barragens serão cada vez mais necessárias e importantes. Seus projetos não podem, somente, levar em consideração o que foi projetado anteriormente, uma vez que o processo de degradação da barragem será cada vez mais rápido. Para isso, deve-se analisar a necessidade de a barragem ser reforçada e modernizada, ao invés de somente reparada.

A avaliação multicriterial, por sua vez, ajuda nesse sentido, integrando os objetivos da obra e avaliando-os sob a mesma unidade de medida. A opção pela Teoria de Utilidade Multiatributo, método AHP e Valoração direta se deve ao fato de sua consistência e facilidade de utilização. Essas técnicas, permitem maior poder de decisão, gerando justificativas e clareza quanto ao desempenho da alternativa estudada.

Com isso, após ampla revisão bibliográfica e utilização dos métodos de apoio à decisão, foi possível a construção de um modelo de avaliação multicriterial de desempenho benchmarking, contemplando variados pontos de vista e prezando pela confiabilidade e segurança das barragens. Essas características refletem a importância do modelo como ferramenta de apoio à decisão de obras de manutenção de barragens.

No presente trabalho, foi realizado um estudo de caso acerca do tema de obras de manutenção de barragens, com o objetivo de auxiliar os tomadores de decisão sobre os pontos mais importantes da obra. Após a análise multicriterial, concluiu-se que o ponto de vista fundamental (PVF) “Laje de reforço no pé do vertedouro e Ombreira direita” foi o escolhido como mais importante dentre todos os PVFs da referida análise. Isso porque é a atividade que mais reestabelece a confiabilidade da barragem, fazendo com que haja diminuição significativa de riscos de novas falhas, sendo, portanto, um ponto que merece atenção especial para o desempenho da obra. Por outro lado, o PVF com menor *trade-off*, ou seja, o com menor desempenho na melhoria da confiabilidade da barragem, foi o PVF “Serviços Extraordinários” que tem sua importância no que se refere ao estudo de caso, no entanto, tendo em vista que ele só será utilizado em caso de galgamento da barragem e a obra será feita em período seco, deve-se dispender maiores esforços para a execução dos outros critérios.

Os perfis de impacto, ajudam na percepção de desempenho dos critérios, demonstrando em quais pontos a obra tem maior possibilidade de melhoria e em quais o esforço não dará tanto resultado. Nesse sentido, o critério “Pessoal administrativo” tem a maior capacidade de contribuição, visando a oportunidade e o espaço de melhoria de seu custo, buscando o melhor possível. No entanto, o critério “Diária parada devido operação do vertedouro” já tem um valor próximo ao melhor possível, portanto sua capacidade de contribuição para diminuição do custo da obra é muito baixa.

O custo utilidade auxilia no impacto que cada fração decimal de melhoria no valor econômico do critério dá no sentido de melhoria de desempenho do critério. Nesse aspecto o critério “Diária parada devido operação do vertedouro” tem um bom valor, visto que a cada décimo pode melhorar em 36 mil reais o seu custo, no entanto há pouco espaço para melhoria, como explicitado sobre seu perfil de impacto. Com isso, verifica-se que o critério “Pessoal administrativo” melhora em 20 mil reais e há uma grande margem para melhoria. Com esses conhecimentos, o decisor entende onde deve despender maiores esforços para obter os maiores ganhos de desempenho no custo da obra de manutenção avaliada.

Levando em consideração que o modelo é um espelho das preferências do decisor, os resultados e consequências podem ser diferentes caso outro tomador de decisão aplique suas ideias ao modelo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos, pode-se sugerir que se analise o método de variadas formas para validar ou melhorar o modelo caso necessário. Além disso, é importante a discussão com pessoas envolvidas no setor de obras de barragens sobre a importância dos critérios para com isso melhorar as métricas de modelagem do estudo. Assim, a verificação se o modelo reflete outros tipos de obra com outras necessidades e características é, também, importante.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, Hugo Manoel Marcato; SAYÃO, Alberto S. F. J.. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). PUC Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ANEEL (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. [S.L.]: TDA Comunicação, 2008. 236 p.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022**: informe anual. [S.L.]: Ana, 2023a.

ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**. Brasília: Ana, 2016.

ANA. **Relatório de Segurança de Barragens 2022**. Brasília: Ana, 2023b.

APL, Engenharia. **Resistência do concreto: entenda a importância da realização de testes**. 2018. Disponível em: <https://blog.apl.eng.br/resistencia-do-concreto-entenda-a-importancia-da-realizacao-de-testes/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000**: Gestão de riscos - Diretrizes. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 17 p.

COSTA, Carlos A. Bana e; SILVA, Fernando Nunes da. Concepção de uma “boa” alternativa de ligação ferroviária ao porto de Lisboa: uma aplicação da metodologia multicritério de apoio à decisão e à negociação. **Investigação Operacional**, Lisboa, v. 14, p. 115-131, dez. 1994.

BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 473 p.

BARRERE, Leticia Mara de Souza Almeida. **Aplicações de técnicas de desmonte escultural em maciços rochosos fraturados para melhorias na segurança operacional**. 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

BRAZ, José Miguel Baptista Proença. **O MacBeth como ferramenta MCDA para o Benchmarking de Aeroportos**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2011.

BROWN, E.T. Reducing risks in the investigation, design and construction of large concrete dams. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, Brisbane, v. 9, n. 2, p. 197-209, abr. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.002>. Acesso em: 01 mai. 2023.

CARNEIRO, Brenda Lara Duarte Souza; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CARVALHO, Taís Maria Nunes; RAULINO, João Batista Sousa. Hydrological risk of dam failure under climate change. **Rbrh**, Porto Alegre, mar. 2022. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.272220220017>. Acesso em: 1 abr. 2023.

CAROLLI, Mauro; DE LEANIZ, Carlos Garcia; JONES, Joshua; BELETTI, Barbara; HUDEK, Helena; PUSCHD Martin; PANDAKOV, Pencho; BORGER, Luca; VAN DE BUND, Wouter. Impacts of existing and planned hydropower dams on river fragmentation in the Balkan Region. **Science of the Total Environment**, [S.L.], out. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161940>. Acesso em: 1 abr. 2023.

CLEMEN, Robert. T; REILLY, Terence. **Making hard decisions with Decision Tools**. 2ª Edição. Ed. Hardcover, 2001.

CONECT. **Conheça as funções do técnico de segurança do trabalho**. 2017. Disponível em: <https://conect.online/blog/conheca-as-funcoes-do-tecnico-de-seguranca-do-trabalho/>. Acesso em: 05 nov. 2023.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. [S.L.]: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás, 2003.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. [S.L.]: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás, 2000.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

FERC. **Risk-Informed Decision Making Guidelines**. Washington: Washington State Department Of Ecology, 2016.

FEMA. **Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management**. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2015. 49 p.

FURLANETTO, Pedro. **Quais são as diferenças entre o CA 50 e o CA 60?** 2020. Disponível em: <https://neoipsum.com.br/diferencas-do-ca-50-e-ca-60/>. Acesso em: 05 nov. 2023.

G1 MINAS GERAIS. **Barragem se rompe, e enxurrada de lama destrói distrito de Mariana**. 2015. Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/barragem-de-rejeitos-se-rompe-em-distrito-de-mariana.html>. Acesso em: 16 abr. 2023.

GARCIA, Buddy; SOWARD, Larry R.; SHAW, Bryan W.; VICKERY, Mark R. (org.). **Design and Construction Guidelines for Dams in Texas**. Austin, Texas: Tceq, 2009. 86 p.

GERALDI, José Lúcio Pinheiro. **O ABC das escavações de rocha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 284 p.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; ARAYA, Marcela Cecilia González; CARIGNANO, Claudia.

Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão. São Paulo: Thomson, 2004.

GOMES, R. O. **Estudo do impacto da incorporação de usinas hidrelétricas a fio d'água no Sistema Interligado Nacional.** 2012. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

HEIDARZADEH, Mohammad; FEIZI, Siamak. A cascading risk model for the failure of the concrete spillway of the Toddbrook dam, England during the August 2019 flooding. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], out. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103214>. Acesso em: 29 set 2023.

HUANG, Hefei; CUI, Huijuan; GE, Quansheng. Will a nonstationary change in extreme precipitation affect dam security in China? **Journal Of Hydrology**, [S.L.], dez. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126859>. Acesso em: 29 set 2023.

HUDSON, John A.; FENG, Xia-Ting. **Rock Engineering Risk.** London: CRC Press, 2015. 565 p.

ICOLD. **Technology of Dams.** Disponível em: https://www.icold-cigb.org/GB/dams/technology_of_dams.asp. Acesso em: 08 out. 2023.

INACIO, Diego Ribeiro. **Sistemas de juntas de trabalho em estruturas pré-moldadas de concreto armado e alvenaria convencional:** estudo de caso uemg - frutal. 2011. 42 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

IHA. **Hydropower Status Report:** Sector trends and insights. International Hydropower Association, 2020.

JUNHO, Ricardo Ahouagi Carneiro. **Migrações ascendentes de peixes neotropicais e hidrelétricas:** proteção a jusante de turbinas e vertedouros e sistemas de transposição. 2008. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

KANJI, Milton Assis. Algumas reflexões sobre a instrumentação de barragens. In: SIMPOSIO SOBRE INSTRUMENTACAO GEOTECNICA DE CAMPO, 1990, Rio de Janeiro. **Singeo'90: Anais.** Rio de Janeiro: Abms/Abge, 1990. p. 107-118.

KUO, Chun-Chao; GAN, Thian Yew. Risk of Exceeding Extreme Design Storm Events under Possible Impact of Climate Change. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [S.L.], dez. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001228](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001228). Acesso em: 12 abr. 2023.

LIMA, Mauricio Andrade de; LIMA, Marcus Vinicius Andrade de; LIMA, Carlos Rogério Montenegro de. SINAES e a avaliação dos cursos de graduação: a metodologia mcda-c pode ajudar?. **Revista Gestão Universitária na América Latina - Gual**, Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 61-85, 29 jun. 2013.
[Http://dx.doi.org/10.5007/1983-4535.2013v6n3p61](http://dx.doi.org/10.5007/1983-4535.2013v6n3p61).

LUND, Guy S.; CHRISTMAN, Bill; YOW, Gene. A Risk Assessment with the FERC. **Dams And Extreme Events**: Reducing Risk of Aging Infrastructure under Extreme Loading Conditions, San Francisco, n. 34, p. 1237-1254, abr. 2014.

MEES, Alexandre. **Qualidade da Água em Reservatórios**: unidade 1: reservatórios. [S.L.]: Ana, 2020. 57 p.

MENDES, Daniel Etchegaray. **Aplicação do Modelo FMEA/FMECA ao Gerenciamento de Riscos em Barragens**. 2016. 130 f. Monografia (Especialização) - Curso de Segurança de Barragens., Instituto IDD, Curitiba, 2016.

MENDONÇA, Gustavo Henrique. **Bacia Hidrográfica**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/bacia-hidrografica.htm>. Acesso em: 08 nov. 2023.

NOVAK, Camila. **PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS CONECTADAS À REDE ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO POR UM MODELO MULTICRITERIAL**. 2018. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

ONS. **Diagrama Esquemático das Usinas Hidrelétricas do SIN**. 2013. Disponível em: https://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/dados/dados_relevantes_2013/HTML/02_03_Diagrama_Esquematico_das_Usinas_Hidreletricas_do_SIN.html. Acesso em: 20 maio 2023.

ONS. **Diagrama Esquemático das Usinas Hidrelétricas do SIN**. 2023a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Mapas/Hidroel%C3%A9tricas%202023-2027%20Fevereiro%202023.pdf#search=Diagrama%20esquem%C3%A1tico%202023>. Acesso em: 20 maio 2023.

ONS. **O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 16 abr. 2023c

ONS. **PLANEJAMENTO ANUAL DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA - ANO 2002**: 2a revisão quadrimestral. [S.L.]: ONS, 2002.

ONS. **RELATÓRIO ANUAL 2022**. 2023b. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relatorio_Anual_ONS_2022.pdf. Acesso em: 15 maio 2023.

O'GORMAN, Paul A.; SCHNEIDER, Tapio. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 106, n. 35, p. 14773-14777, set. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0907610106>. Acesso em: 13 out. 2023.

PEREIRA, Caio. **Canteiro de obras**: tipos, elementos e exigências da NR-18. Escola Engenharia, 2018a. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/canteiro-de-obras/>. Acesso em: 03 nov. 2023.

PEREIRA, Caio. **O que é concreto magro?** 2018b. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/concreto-magro/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

PINTO, Amarílio Costa e Carvalho. **Contribuições para o estudo de descomissionamento de barragens**. 2010. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo.

QUARANTA, Emanuele; DAVIES, Peter. Emerging and Innovative Materials for Hydropower Engineering Applications: Turbines, Bearings, Sealing, Dams and Waterways, and Ocean Power. **Engineering: Engineering** 8. [S.L.], out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.025>. Acesso em 2 abr. 2023.

RASHIDI, Mohammad; HAERI, S. Mohsen. Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [S.L.], ago. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003>. Acesso em 24 set. 2023.

RICETTI FILHO, Renato; SICA, Everthon Taghori. Implementação de um modelo multicritério de apoio à decisão dedicado a sistemas híbridos de geração distribuída incorporando variáveis socioambientais. In: **ERIAC**, Foz do Iguaçu, mai. 2013.

SAATY, R. W. THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: what it is and how it is used. **Mathl Modelling**, Pittsburgh, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SARHADI, Ali; BURN, Donald H.; AUSÍN, María Concepción; WIPER, Michael P.. Time-varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian copula. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 2327-2349, mar. 2016. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2015wr018525>.

SAURIN, Tarcisio Abreu; FORMOSO, Carlos Torres. **Planejamento de canteiros de obra e gestão de processos**. Porto Alegre: Antac, 2006. 112 p.

SENTINELLES PETITCODIAC RIVERKEEPER. **Reclaiming Free Flow**: an information guide on removing small abandoned dams. Moncton: Sentinelles Petitcodiac Riverkeeper, 2002. 66 p.

SILVA, R.; MAINIER, F. Descomissionamento de sistemas de produção offshore de petróleo. In: CONGRESSO NACIONAL EM EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 4, 2008,

Rio de Janeiro. **Anais do IV CNEG**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2008. p. 19-39.

SOUZA, Faine Segura de; HENRIQUE, Rosana Maria. Planejamento de obra civil: condicionantes de projeto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S.L.], p. 154-166, 30 jun. 2020. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento.
<http://dx.doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/arquitetura/condicionantes-de-projeto>.

SOUZA, Zulcy de; SANTOS, Afonso Henriques Moreira; BORTONI, Edson da Costa. **Centrais Hidrelétricas Implantação e Comissionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2018. 522 p.

STAPENHURST, Tim. **The Benchmarking Book**: a how-to-guide to best practice for managers and practitioners. Oxford: Butterworth Heinemann, 2009. 454 p.

STEFFEN, O.K.H.; TERBRUGGE, P.J.; WESSELOO, J.; VENTER, J.. A risk consequence approach to openpit slope design. **The Journal Of The South African Institute Of Mining And Metallurgy**. Johannesburg, p. 503-514. jul. 2006.

STEFFEN O.K.H.; TERBRUGGE P.J.; WESSELOO J.; VENTER J. A risk consequence approach to open pit slope design. **Proceedings of the International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining & Civil Engineering**. Cape Town, South Africa. Johannesburg: SAIMM; 2006. p. 81-96.

TCU. **ORIENTAÇÕES PARA ELABORAÇÃO DE PLANILHAS ORÇAMENTÁRIAS DE OBRAS PÚBLICAS**. Brasília: TCU, 2014. 152 p.

TSCHERNUTTER, Peter; KAINRATH, Adrian. Design considerations and behavior of reinforced concrete core dams during construction and impounding. **Water Science And Engineering**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 212-218, jul. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2016.11.006>. Acesso em: 28 set 2023.

UFMG, Jornal. **Brumadinho: entenda os danos ambientais causados pela tragédia**: Lama cobriu área superior a 300 campos de futebol em Brumadinho, diz Ibama. 2019. Disponível em: <https://ufmg.br/comunicacao/noticias/brumadinho-entenda-os-danos-ambientais-causados-pela-tragedia#:~:text=Al%C3%A9m%20da%20perda%20de%20vidas%20e%20dos%20preju%C3%ADzos,hectares%2C%20ou%20seja%2C%20quase%20300%20campos%20de%20futebol..> Acesso em: 16 abr. 2023.

USACE. **General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-fill Dams**. Washington: Department Of The Army, 2004. 130 p.

VALDEZ, B.; SCHORR, M.; QUINTERO, M.; GARCÍA, R.; ROSAS, N.. Effect of climate change on durability of engineering materials in hydraulic infrastructure: an overview. **Corrosion Engineering, Science And Technology**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 34-41, fev. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1179/147842209x12559428167526>. Acesso em: 13 out. 2023.

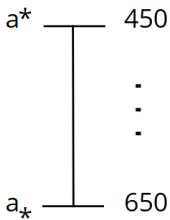
VU, Tue M.; MISHRA, Ashok K.. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 575, p. 999-1010, ago. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.090>. Acesso em: 13 out. 2023.

WRP DAM SAFETY OFFICE. **Dam Safety Guidelines:** part II project planning and approval of dam construction or modification. 2. ed. Washington: Washington State Department Of Ecology, 2008.

ZENITE. **Em contrato de obra, diante da prorrogação do cronograma de execução, é necessário revisar a “administração local”?** 2020. Disponível em: <http://zenite.blog.br/em-contrato-de-obra-diante-da-prorrogacao-do-cronograma-de-execucao-e-necessario-revisar-a-administracao-local/>. Acesso em: 03 nov. 2023.

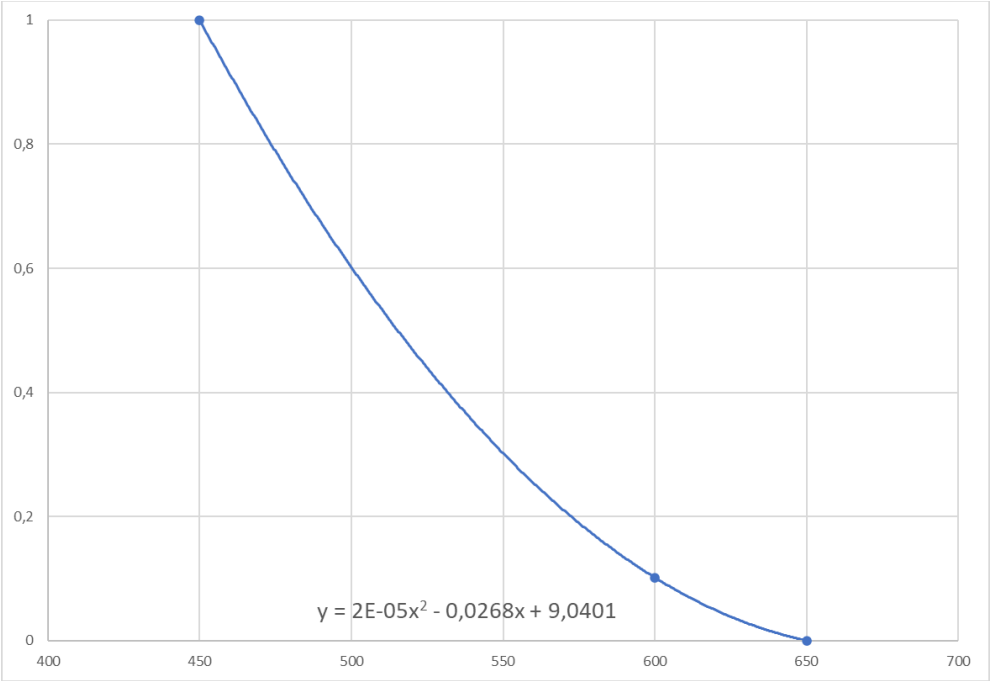
APÊNDICE A – ESCALAS CARDINAIS E ORDINAIS DOS CRITÉRIOS

Figura 64 - Escala ordinal do critério Pessoal administrativo



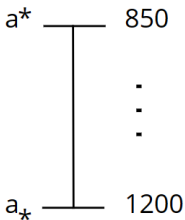
Fonte: Elaboração própria

Figura 65 - Comportamento econômico do critério Pessoal administrativo



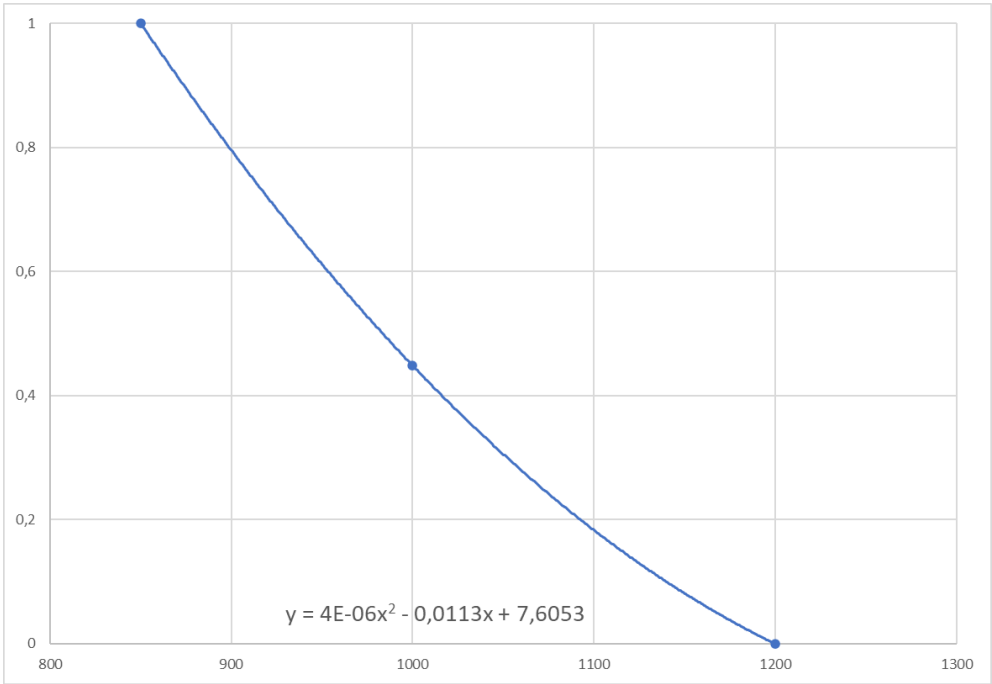
Fonte: Elaboração própria

Figura 66 - Escala ordinal do critério Construção do Escritório



Fonte: Elaboração própria

Figura 67 - Comportamento econômico do critério Construção do Escritório



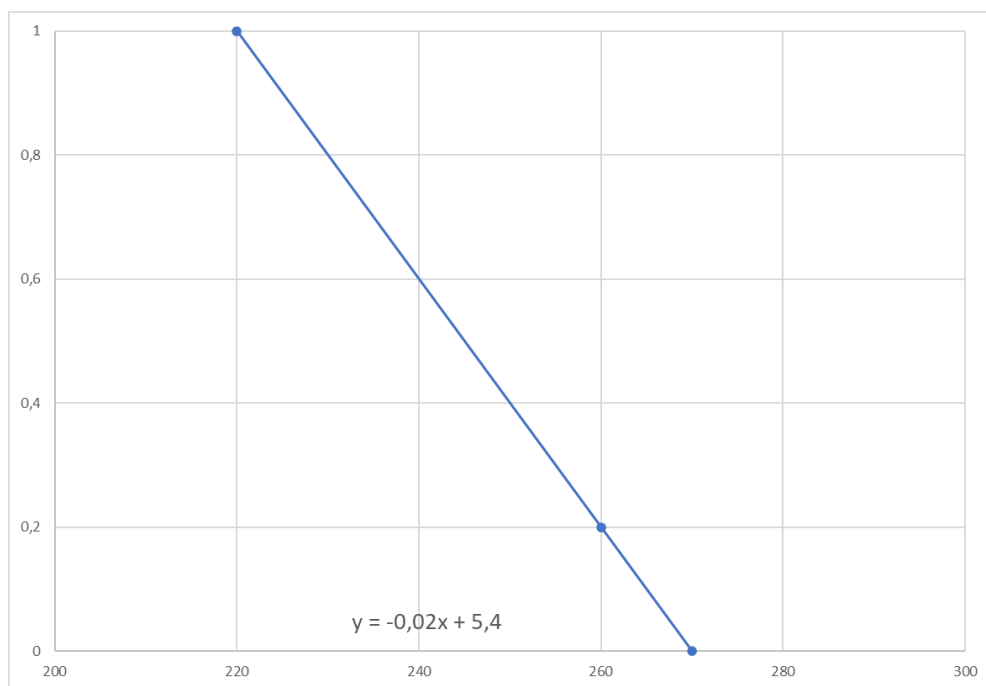
Fonte: Elaboração própria

Figura 68 - Escala ordinal do critério remoção de blocos soltos



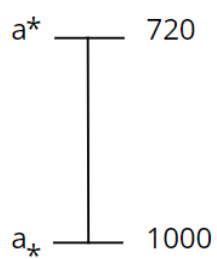
Fonte: Elaboração própria

Figura 69 - Comportamento econômico do critério remoção de blocos soltos



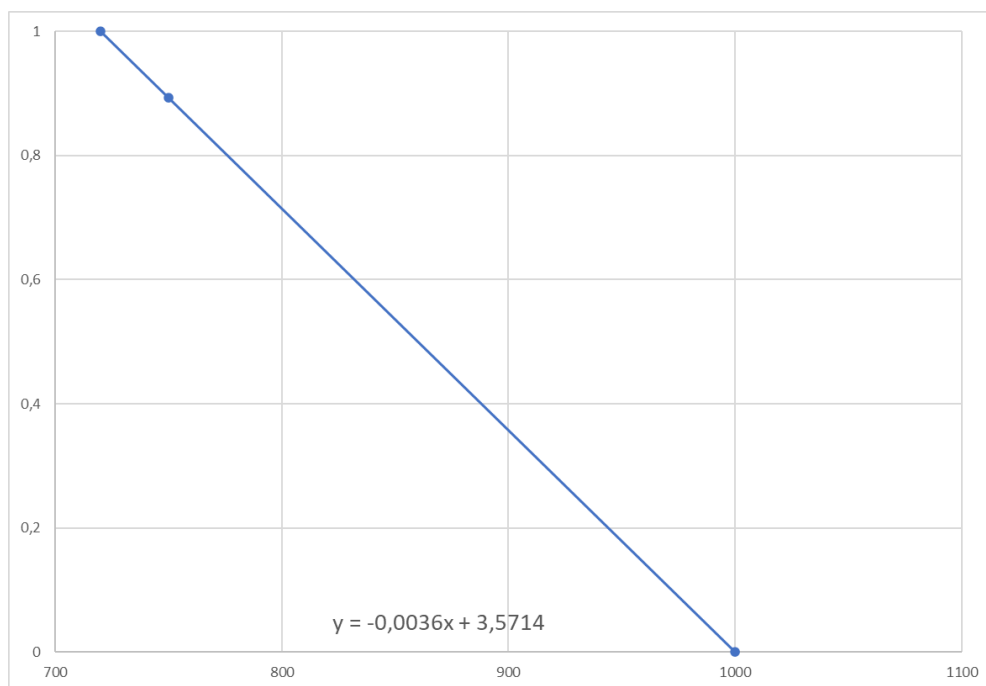
Fonte: Elaboração própria

Figura 70 - Escala ordinal do critério remoção de blocos soltos – desmonte à frio



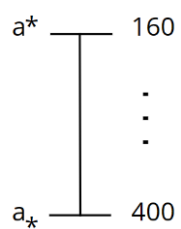
Fonte: Elaboração própria

Figura 71 - Comportamento econômico do critério remoção de blocos soltos – desmonte à frio



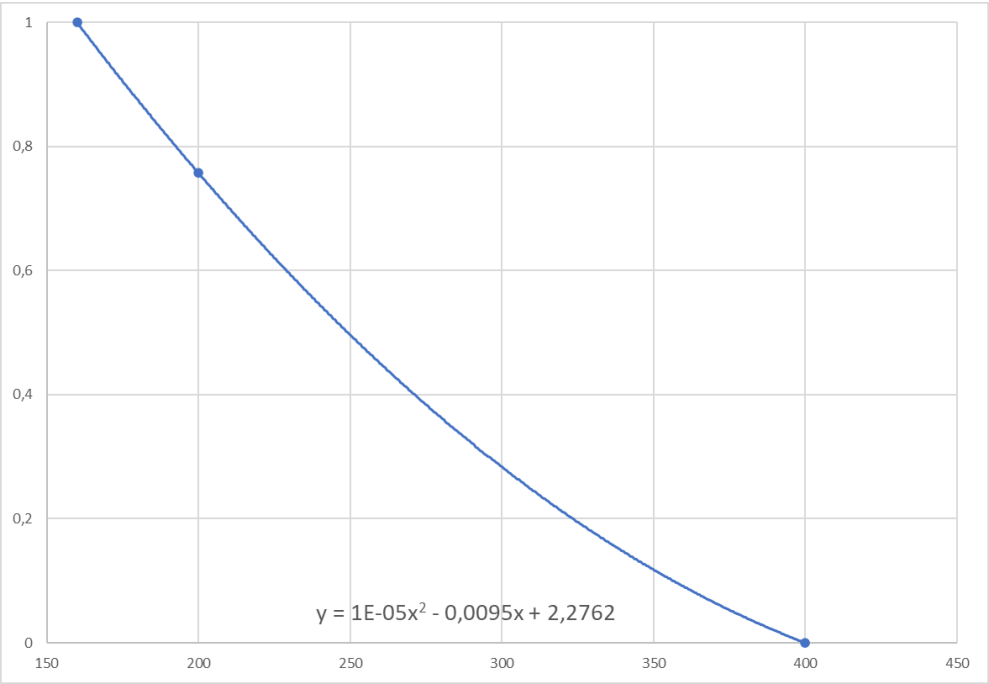
Fonte: Elaboração própria

Figura 72 - Escala ordinal do critério limpeza rigorosa e preparo da fundação para concreto



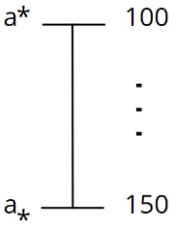
Fonte: Elaboração própria

Figura 73 - Comportamento econômico do critério limpeza rigorosa e preparo da fundação para concreto



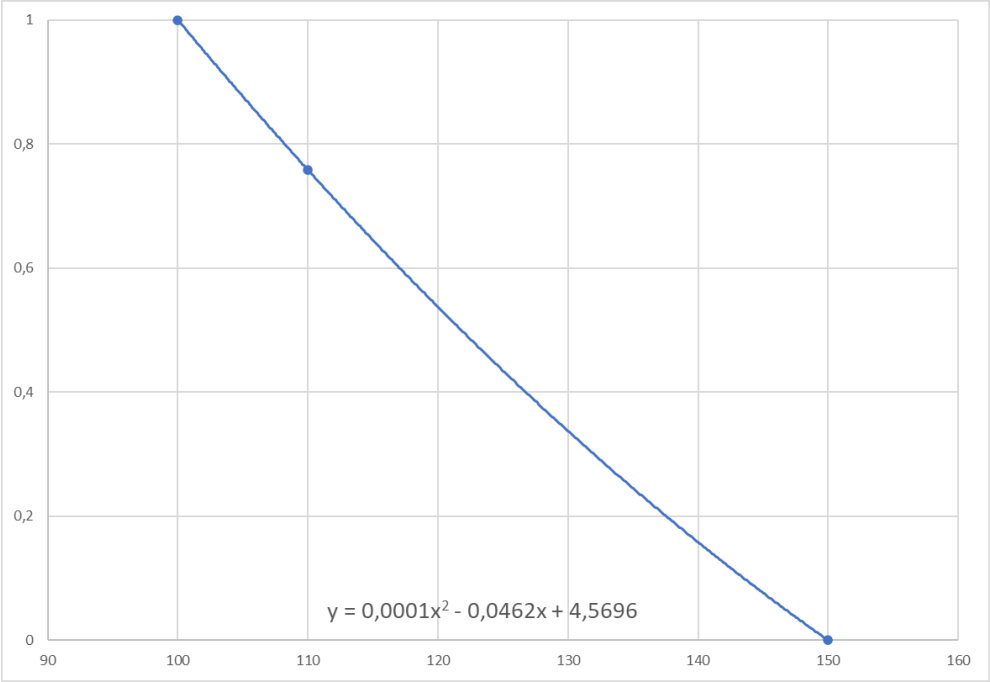
Fonte: Elaboração própria

Figura 74 - Escala ordinal do critério concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados



Fonte: Elaboração própria

Figura 75 - Comportamento econômico do critério concreto de regularização 10 Mpa, incluso agregados



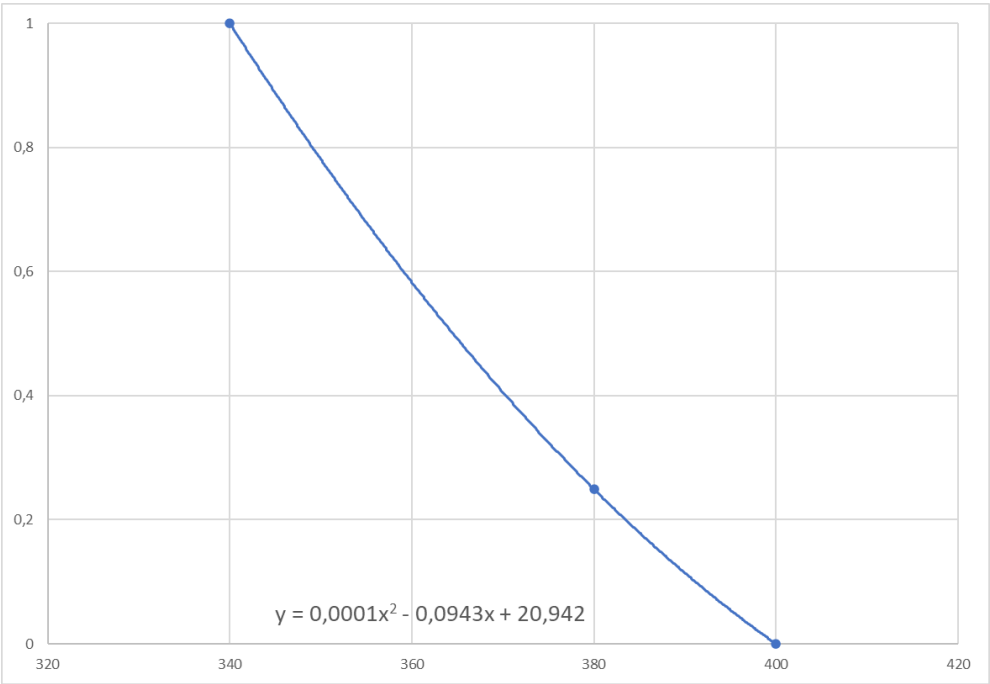
Fonte: Elaboração própria

Figura 76 - Escala ordinal do critério forma plana convencional



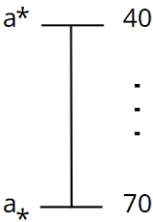
Fonte: Elaboração própria

Figura 77 - Comportamento econômico do critério forma plana convencional



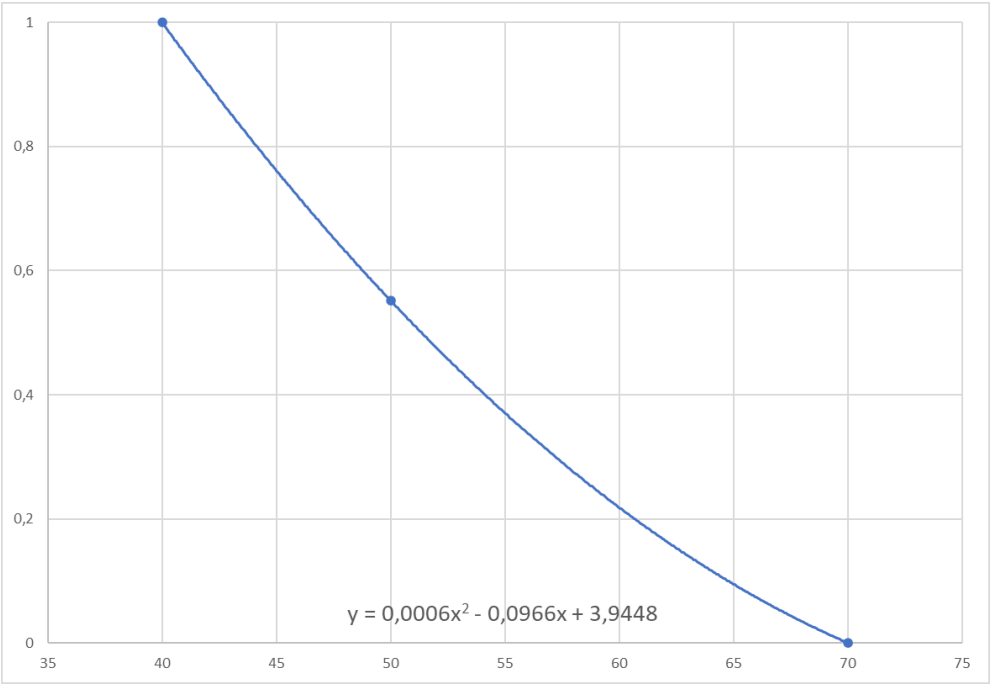
Fonte: Elaboração própria

Figura 78 - Escala ordinal do critério beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50



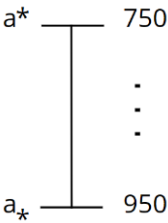
Fonte: Elaboração própria

Figura 79 - Comportamento econômico do critério beneficiamento e aplicação de armadura em aço CA-50



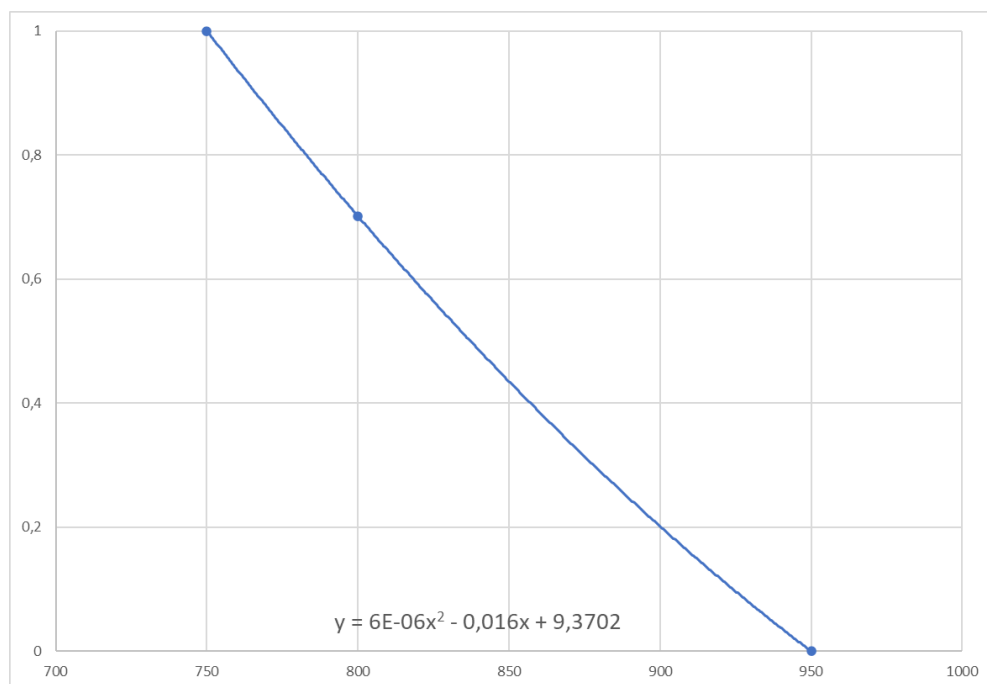
Fonte: Elaboração própria

Figura 80 - Escala ordinal do critério fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50



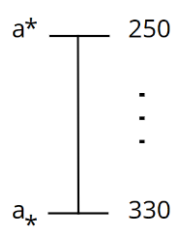
Fonte: Elaboração própria

Figura 81 - Comportamento econômico do critério fornecimento e aplicação de chumbador em aço CA-50



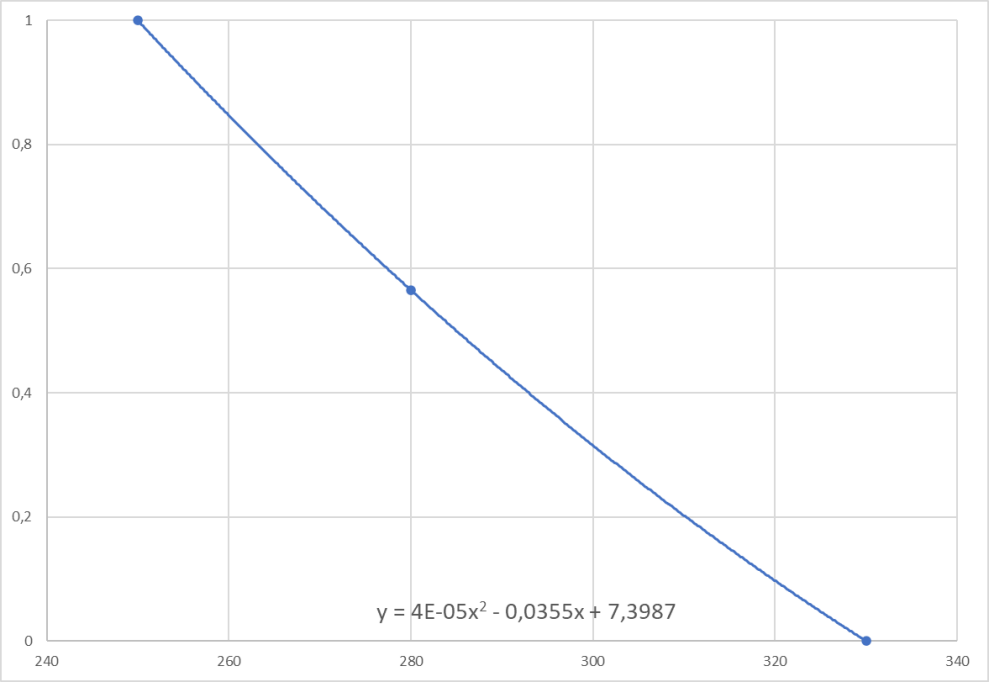
Fonte: Elaboração própria

Figura 82 - Escala ordinal do critério concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de veda-junta



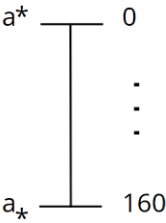
Fonte: Elaboração própria

Figura 83 - Comportamento econômico do critério concreto convencional 25 MPa, incluso agregados e aplicação de veda-junta



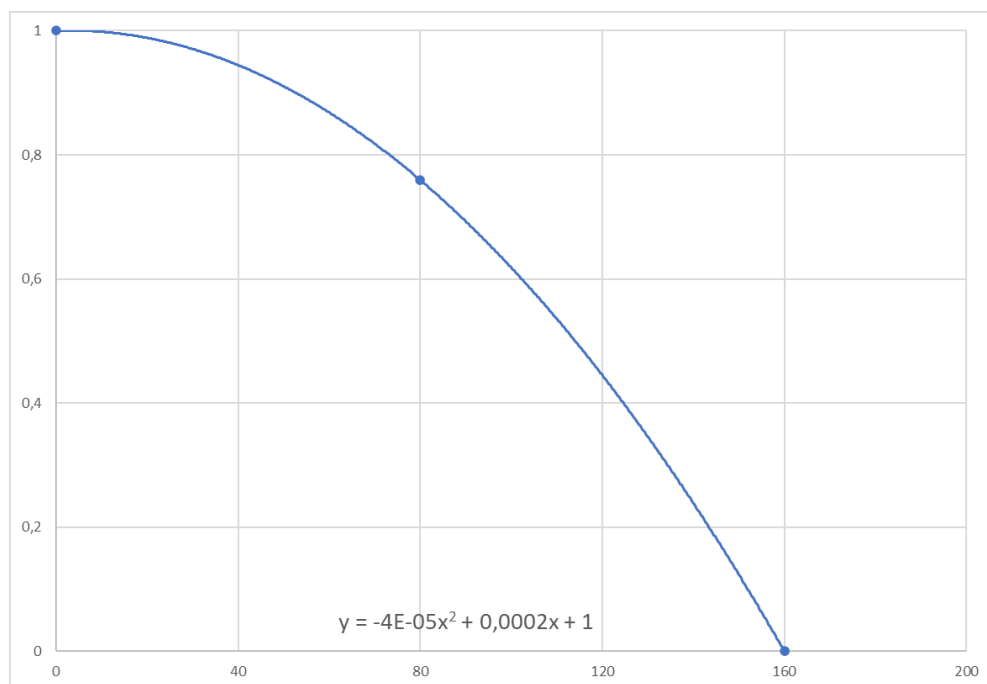
Fonte: Elaboração própria

Figura 84 - Escala ordinal do critério ensecamento extraordinário da bacia de dissipação



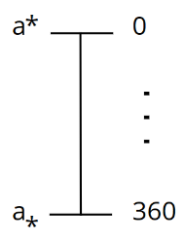
Fonte: Elaboração própria

Figura 85 - Comportamento econômico do critério ensecamento extraordinário da bacia de dissipação



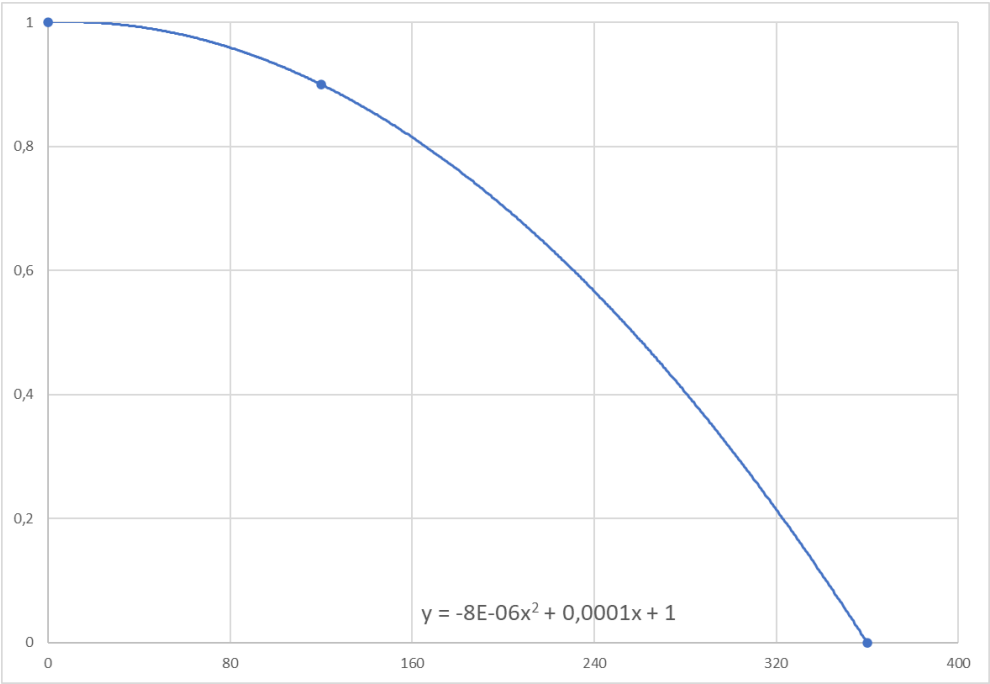
Fonte: Elaboração própria

Figura 86 - Escala ordinal do critério diária parada devido operação do vertedouro



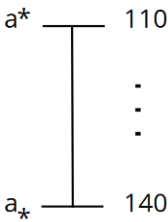
Fonte: Elaboração própria

Figura 87 - Comportamento econômico do critério diária parada devido operação do vertedouro



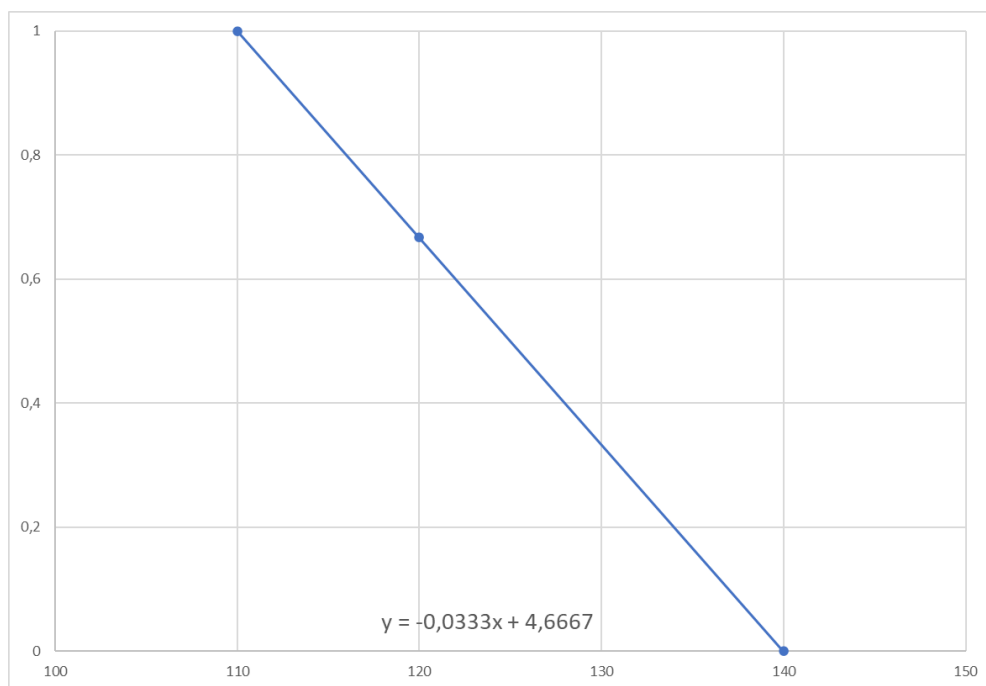
Fonte: Elaboração própria

Figura 88 - Escala ordinal do critério desmobilização de colaboradores da obra



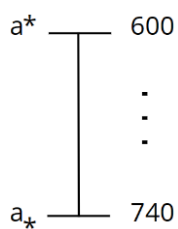
Fonte: Elaboração própria

Figura 89 - Comportamento econômico do critério desmobilização de colaboradores da obra



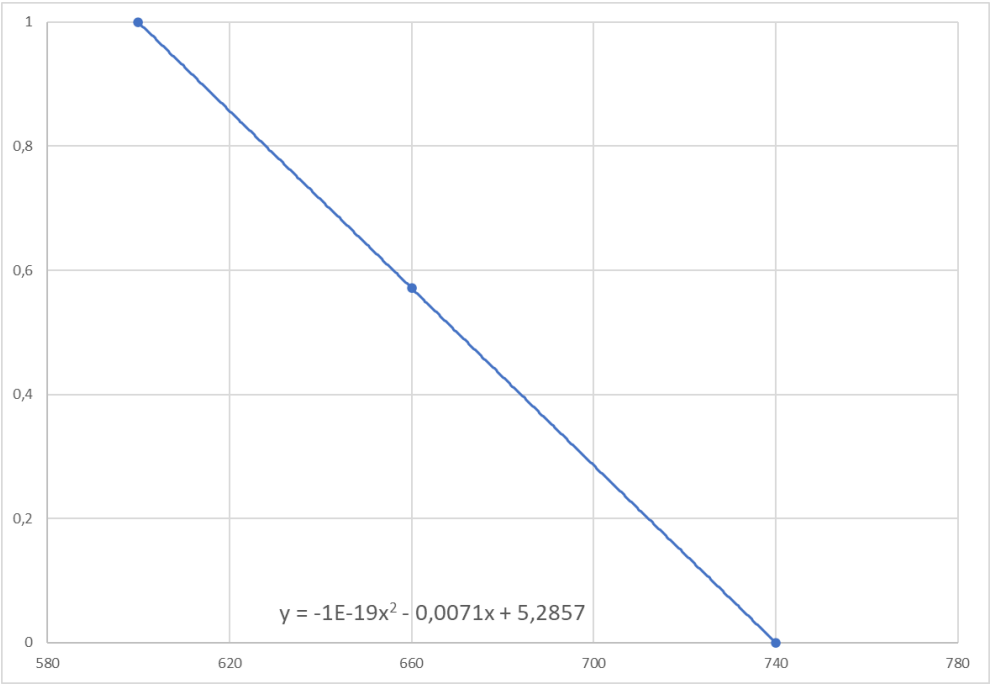
Fonte: Elaboração própria

Figura 90 - Escala ordinal do critério desmobilização de materiais e equipamentos da obra



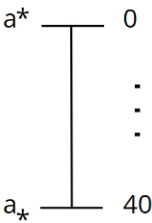
Fonte: Elaboração própria

Figura 91 - Comportamento econômico do critério desmobilização de materiais e equipamentos da obra



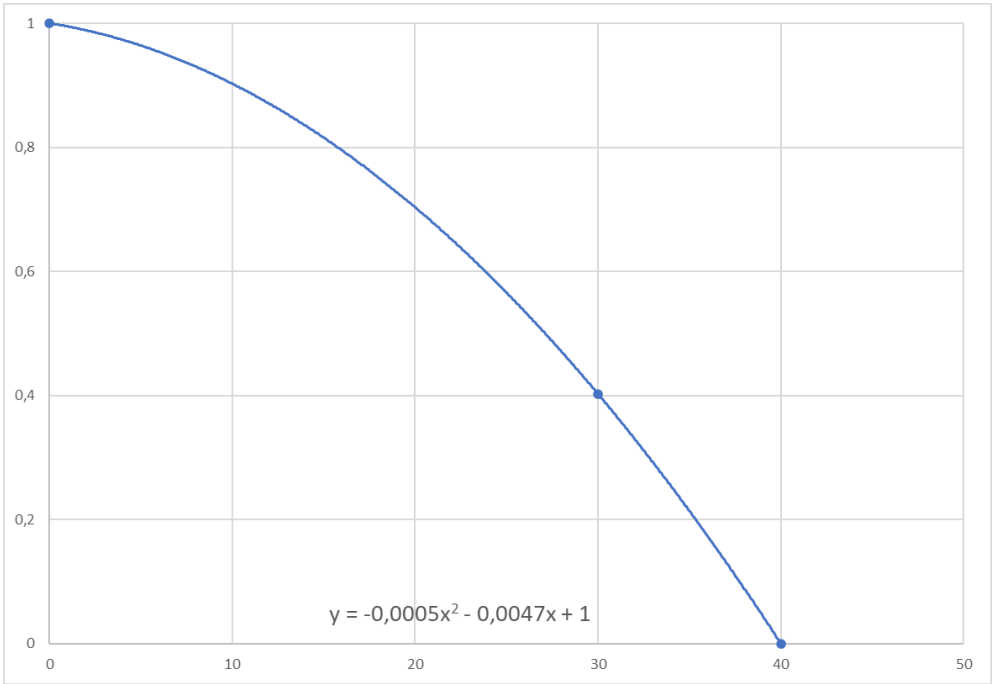
Fonte: Elaboração própria

Figura 92 - Escala ordinal do critério mudanças necessárias no projeto



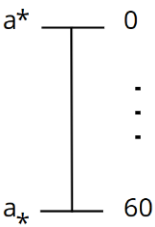
Fonte: Elaboração própria

Figura 93 - Comportamento econômico do critério mudanças necessárias no projeto



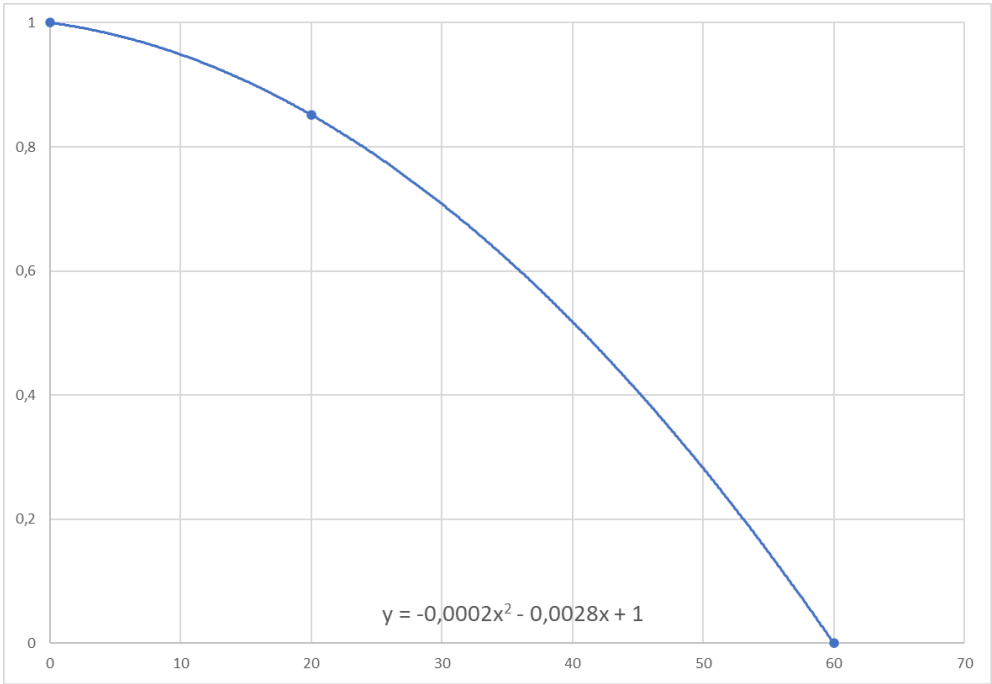
Fonte: Elaboração própria

Figura 94 - Escala ordinal do critério viagens do projetista



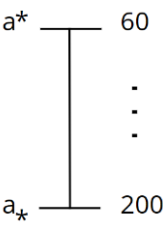
Fonte: Elaboração própria

Figura 95 - Comportamento econômico do critério viagens do projetista



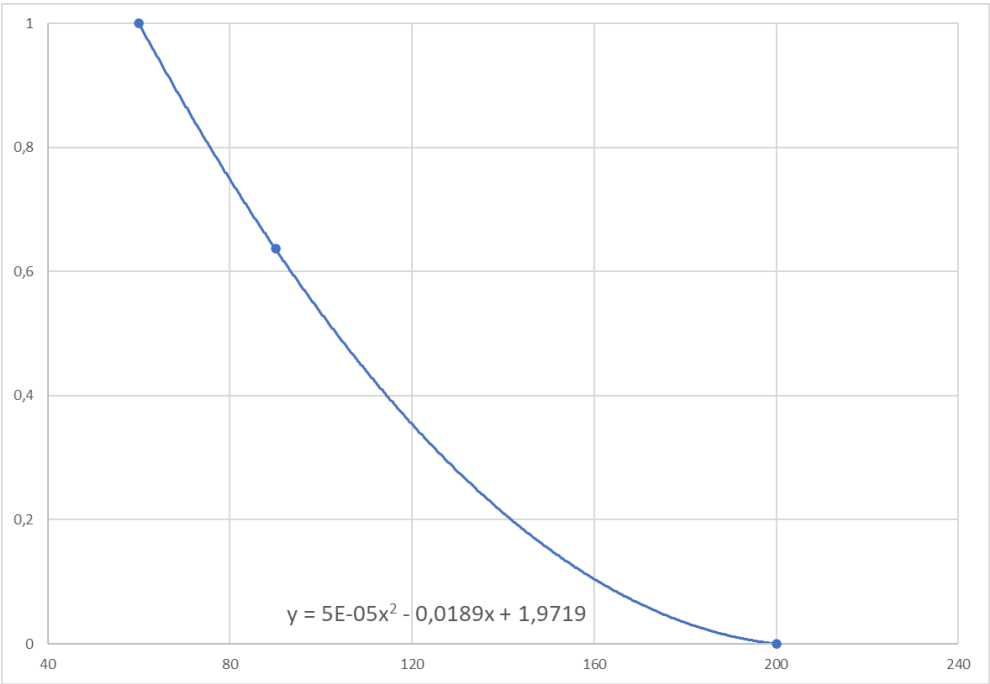
Fonte: Elaboração própria

Figura 96 - Escala ordinal do critério estudo para resgate da ictiofauna



Fonte: Elaboração própria

Figura 97 - Comportamento econômico do critério estudo para resgate da ictiofauna



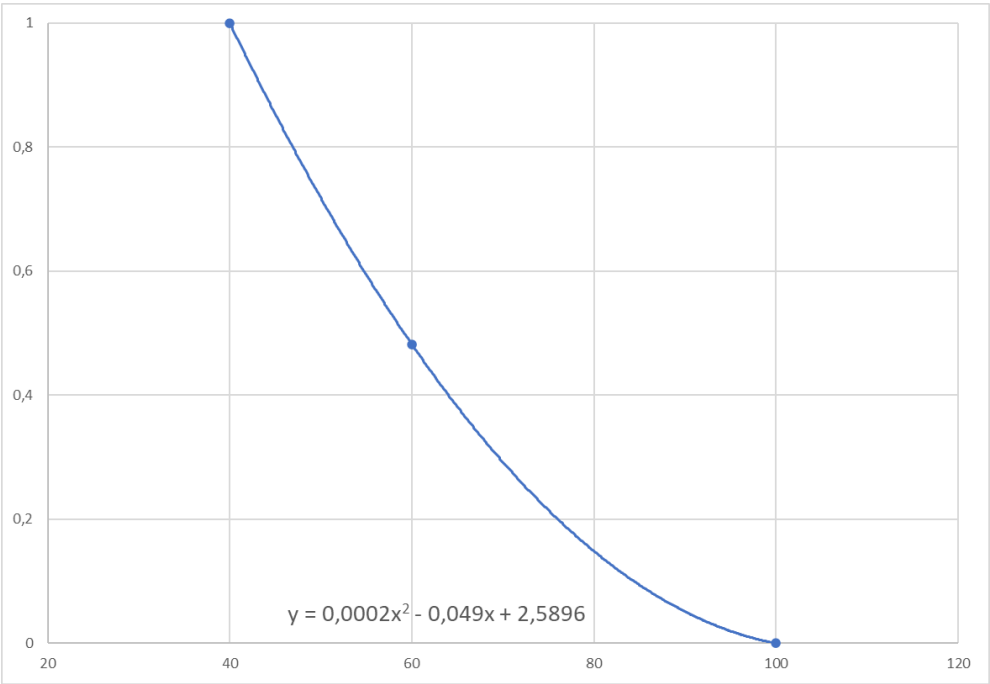
Fonte: Elaboração própria

Figura 98 - Escala ordinal do critério resgate da ictiofauna



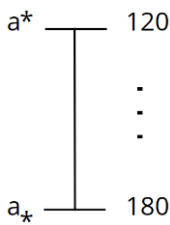
Fonte: Elaboração própria

Figura 99 - Comportamento econômico do critério resgate da ictiofauna



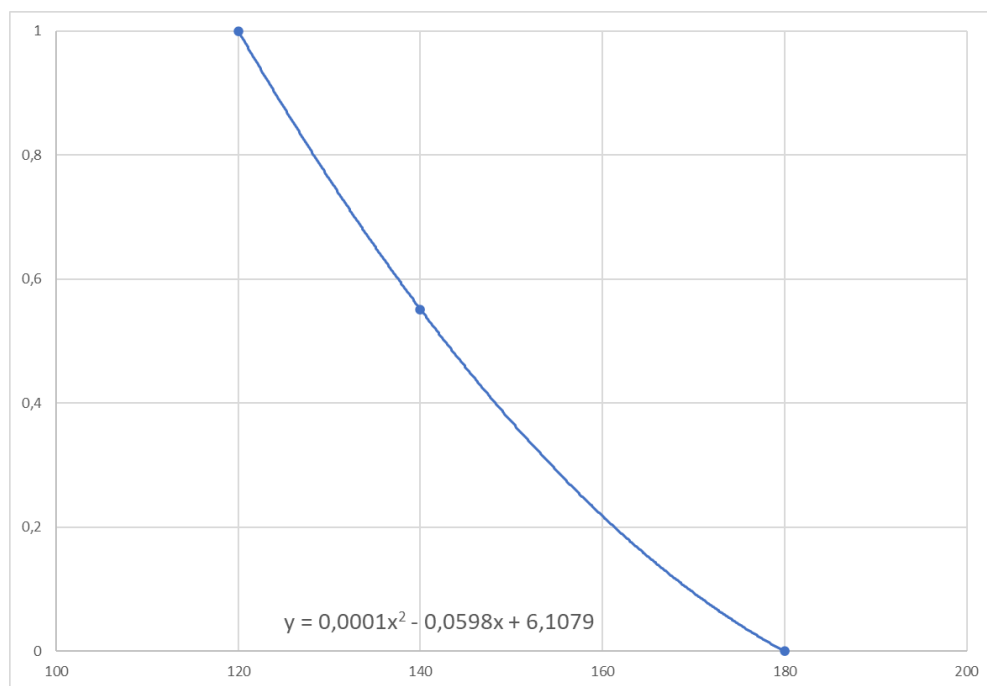
Fonte: Elaboração própria

Figura 100 - Escala ordinal do critério consultoria sobre a execução do projeto



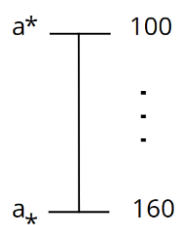
Fonte: Elaboração própria

Figura 101 - Comportamento econômico do critério consultoria sobre a execução do projeto



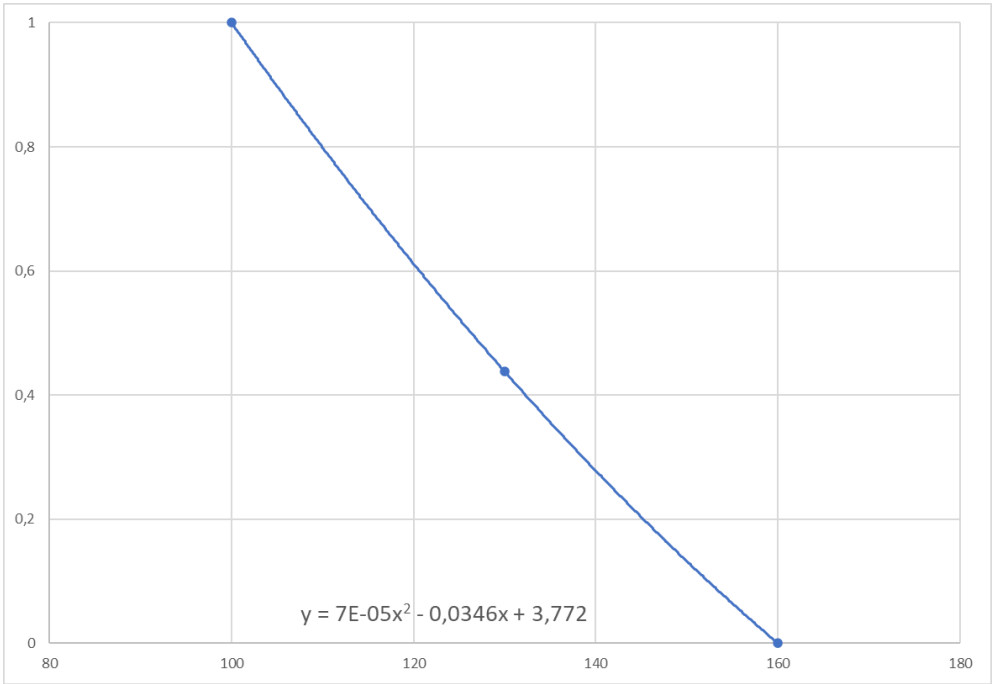
Fonte: Elaboração própria

Figura 102 - Escala ordinal do critério monitoramento dos indicadores do projeto



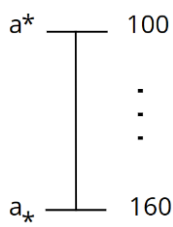
Fonte: Elaboração própria

Figura 103 - Comportamento econômico do critério monitoramento dos indicadores do projeto



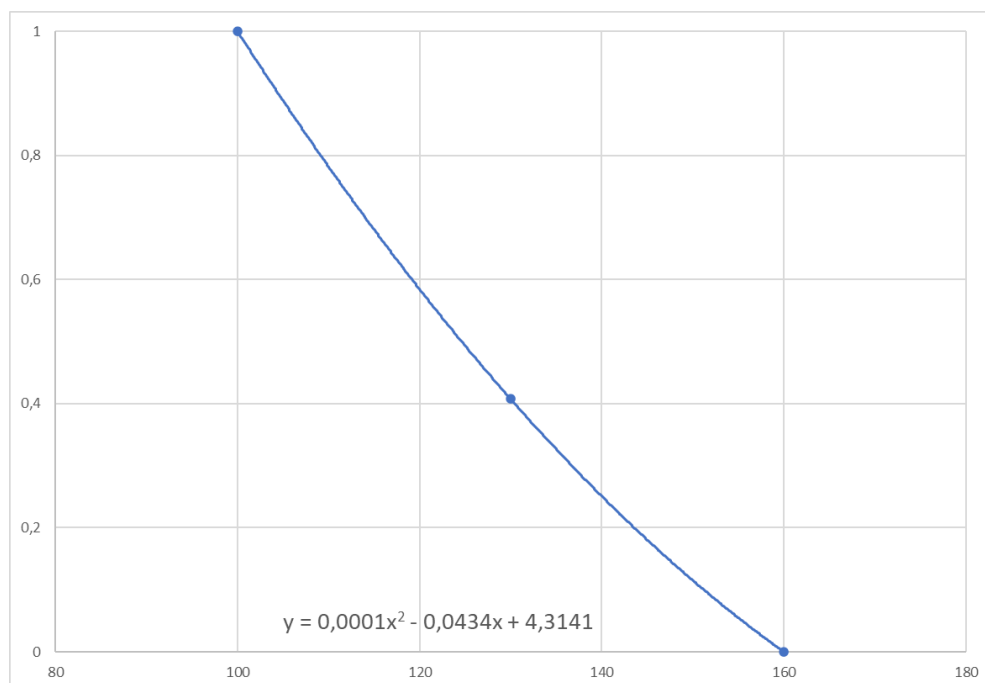
Fonte: Elaboração própria

Figura 104 - Escala ordinal do critério reuniões de acompanhamento de projeto



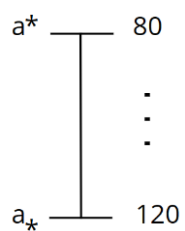
Fonte: Elaboração própria

Figura 105 - Comportamento econômico do critério reuniões de acompanhamento de projeto



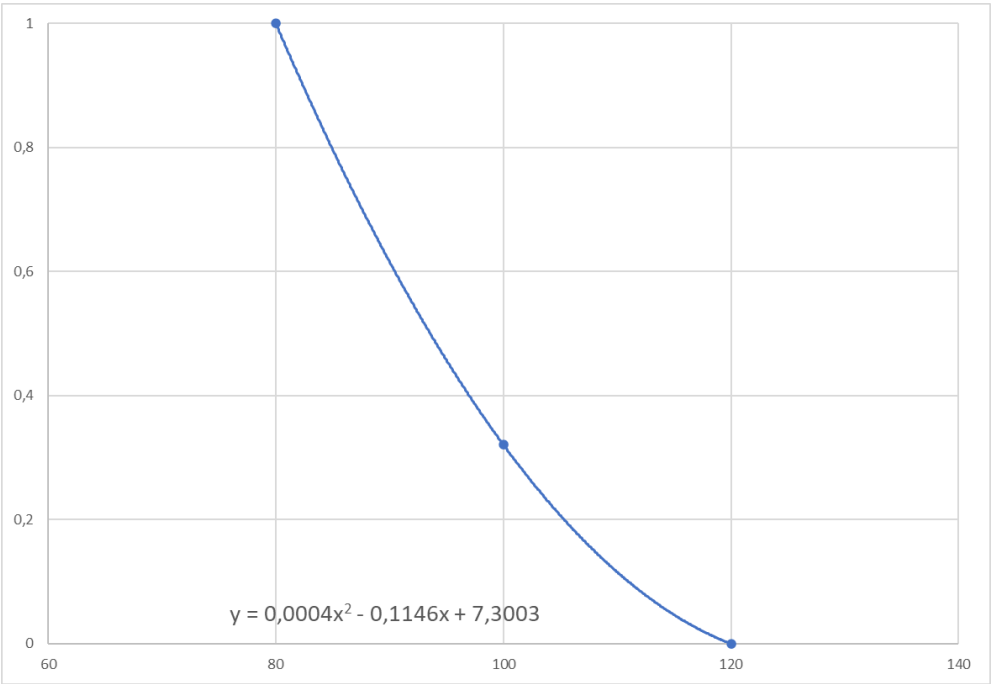
Fonte: Elaboração própria

Figura 106 - Escala ordinal do critério técnico(a) de segurança



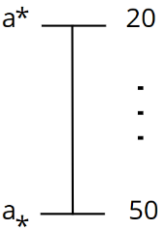
Fonte: Elaboração própria

Figura 107 - Comportamento econômico do critério técnico(a) de segurança



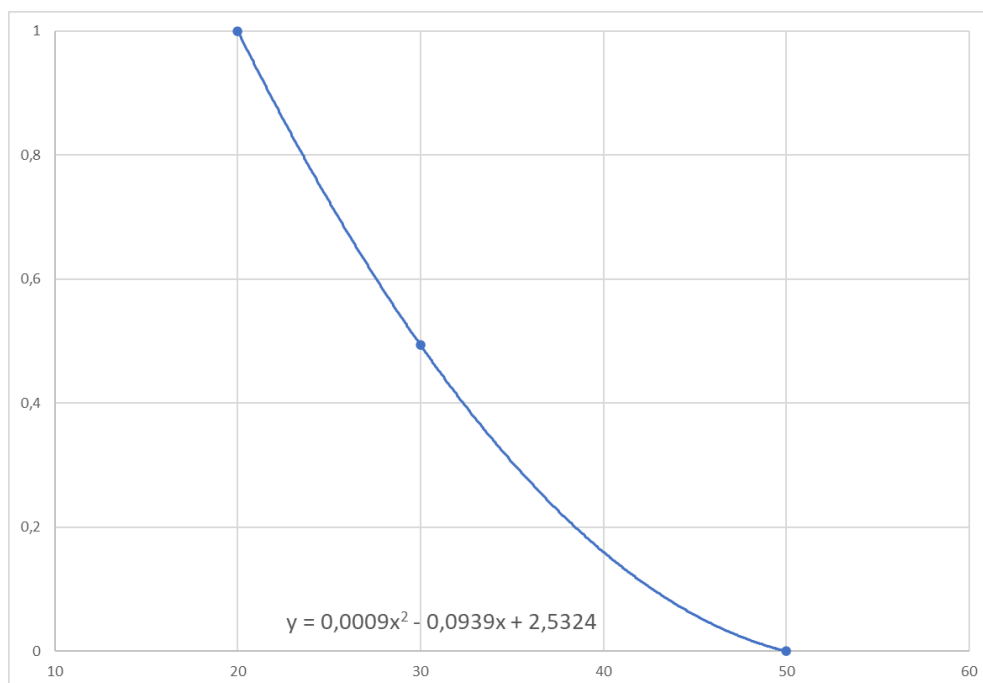
Fonte: Elaboração própria

Figura 108 - Escala ordinal do critério reuniões de acompanhamento de HSE



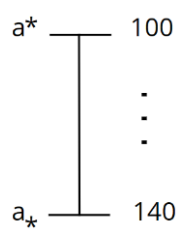
Fonte: Elaboração própria

Figura 109 - Comportamento econômico do critério reuniões de acompanhamento de HSE



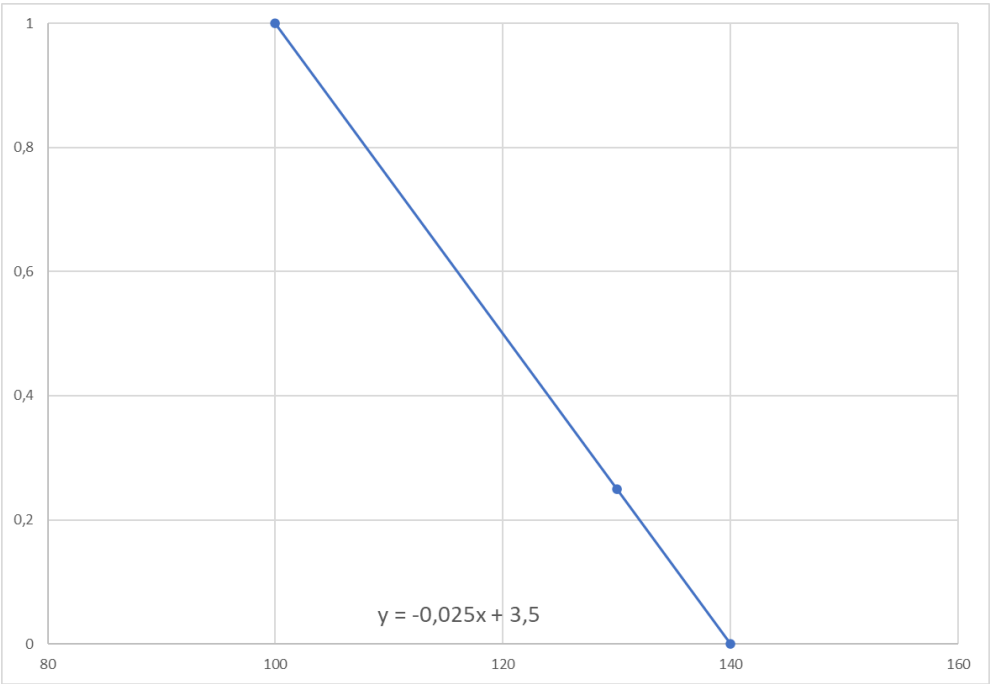
Fonte: Elaboração própria

Figura 110 - Escala ordinal do critério técnico(a) em mecânica



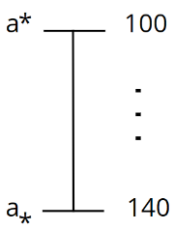
Fonte: Elaboração própria

Figura 111 - Comportamento econômico do critério técnico(a) em mecânica

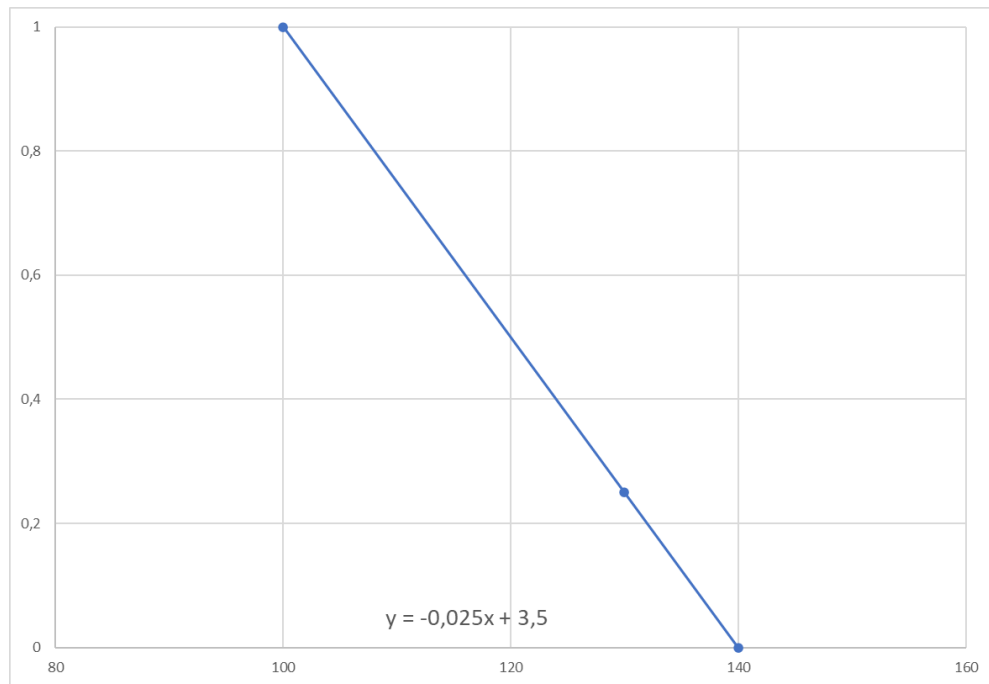


Fonte: Elaboração própria

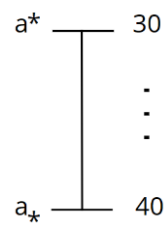
Figura 112 - Escala ordinal do critério técnico(a) eletricitista



Fonte: Elaboração própria

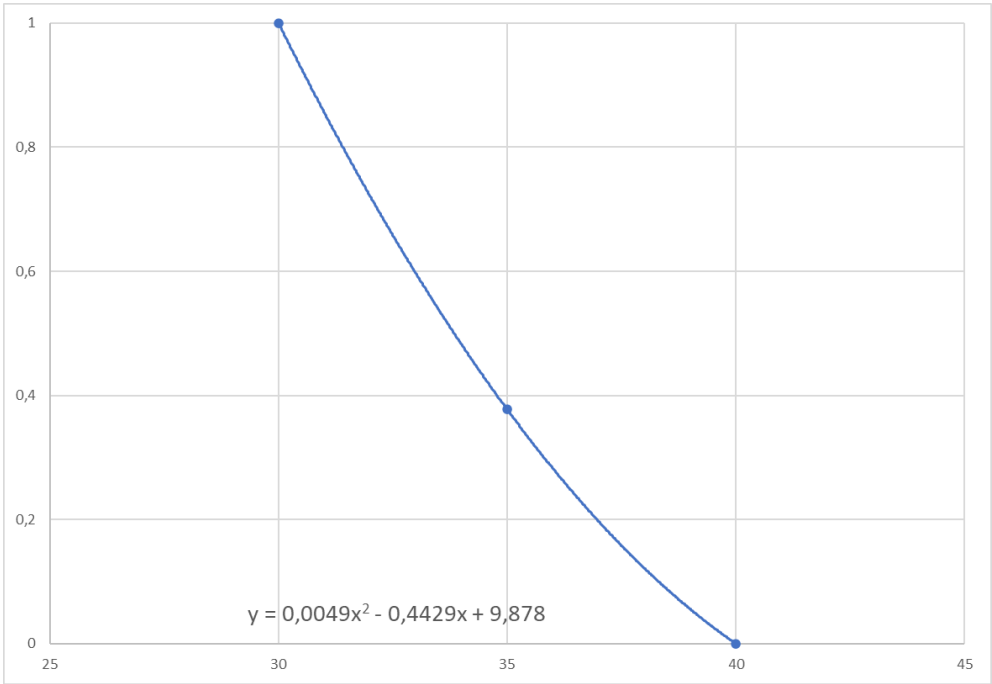
Figura 113 - Comportamento econômico do critério técnico(a) eletricitista

Fonte: Elaboração própria

Figura 114 - Escala ordinal do critério estudo do projeto

Fonte: Elaboração própria

Figura 115 - Comportamento econômico do critério estudo do projeto

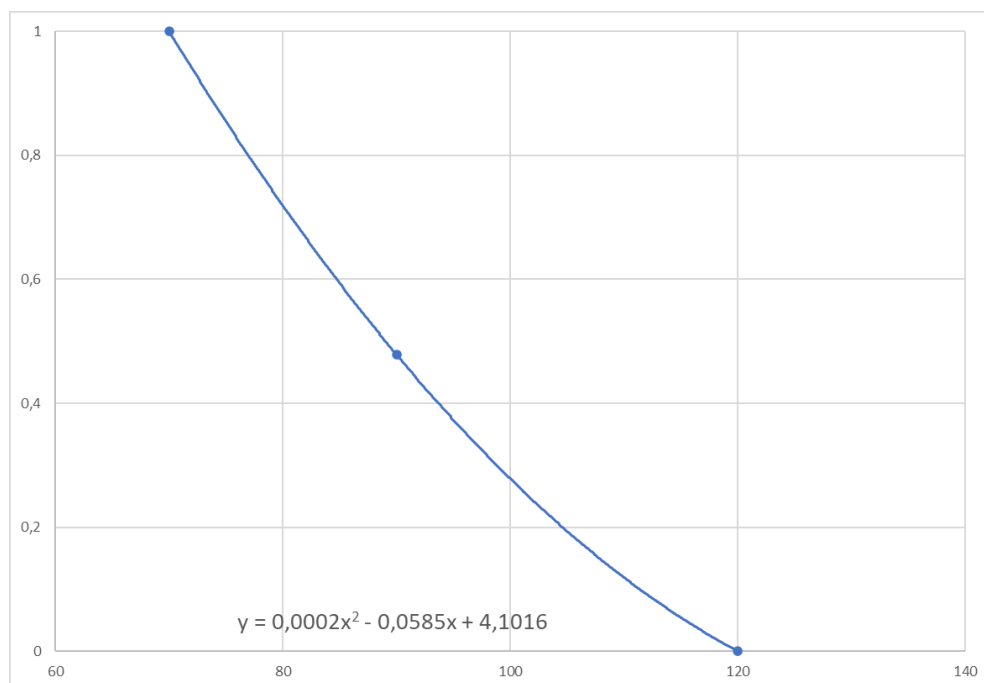


Fonte: Elaboração própria

Figura 116 - Escala ordinal do critério acompanhamento técnico de obra



Fonte: Elaboração própria

Figura 117 - Comportamento econômico do critério acompanhamento técnico de obra

Fonte: Elaboração própria