

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – CONSTRUÇÃO E
INFRAESTRUTURA - PPGCI**

PAOLA GORKOS

**POTENCIAL DE USO DE *DRONES* EM INSPEÇÕES DE BARRAGENS:
Estudo de caso da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e Barragem
Rodolfo da Costa e Silva**

Porto Alegre

2022

PAOLA GORKOS

POTENCIAL DE USO DE *DRONES* EM INSPEÇÕES DE BARRAGENS:
Estudo de caso da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e Barragem Rodolfo
da Costa e Silva

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Coorientadora: Dr^a Denise Martins Chagas

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Gorkos, Paola

POTENCIAL DE USO DE DRONES EM INSPEÇÕES DE BARRAGENS: Estudo de caso da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e Barragem Rodolfo da Costa e Silva / Paola Gorkos. -- 2022.

212 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Coorientadora: Denise Martins Chagas.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Barragens. 2. Inspeções de Segurança. 3. Drones. 4. Gestão. 5. Conservação. I. Pinto da Silva Filho, Luiz Carlos, orient. II. Martins Chagas, Denise, coorient. III. Título.

PAOLA GORKOS

POTENCIAL DE USO DE *DRONES* EM INSPEÇÕES DE BARRAGENS:
Estudo de caso da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e Barragem Rodolfo
da Costa e Silva

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovado em 30 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Dr^a Mônica Regina Garcez – PPGECI/UFRGS

Dr. Rogério Catellan Antochaves de Lima - UFSM

Dr. Alexandre Lorenzi - UFRGS

Sem sombra de dúvidas, a dedicatória deste trabalho vai para meus pais, Paula e Henrique, que fizeram absolutamente tudo para que eu pudesse ir atrás desse sonho. Para sempre serei grata!

RESUMO

As barragens são construções que desafiam a natureza, devido ao fato de armazenarem fluidos. Sendo assim, é inerente que uma barragem apresente riscos associados para a sociedade, bens materiais e infraestrutura, economia e meio-ambiente. Mediante a adoção de programas de segurança de barragens que incluam inspeções periódicas, é possível mitigar riscos e garantir boas condições de operação. As inspeções visuais são atividades exaustivas e barragens possuem estruturas de difícil acesso, além de que, na grande maioria do tempo estão vertendo. Assim, é necessário que os inspetores utilizem equipamentos especializados de acesso que ofereçam condições de segurança. Nesse contexto, a utilização de *drones*, tem o potencial de oferecer vantagens significativas na coleta de dados, representando alternativas de baixo custo para aquisição de imagens de forma completa ou complementar às inspeções tradicionais. O objetivo geral do trabalho é avaliar como o uso de *drones* pode auxiliar na gestão da segurança de barragens, notadamente na execução de inspeções de segurança de barragens para acumulação de água. O objeto do estudo trata-se de duas barragens, uma de aterro e uma de concreto, nas quais realizou-se estudo de caso. Além de análise documental e geração de modelos 3D das mesmas, as imagens obtidas com *drone* foram disponibilizadas a um grupo de engenheiros especialistas, que realizaram inspeção virtual das barragens, sem que os mesmos estivessem presentes nas barragens previamente. Os questionários de inspeção preenchidos pelos especialistas foram confrontados com os resultados das inspeções *in loco* realizadas. Como resultados da pesquisa, verifica-se que a barragem de aterro apresentou um percentual de 81 % de respostas condizentes com as inspeções *in loco* e; a barragem de concreto, apresentou 65 %. O trabalho conclui que a adoção de *drones* para as inspeções de barragens traz inúmeras vantagens e possibilidades. Esse estudo permitiu a identificação de alguns fatores limitantes, que devem ser planejados, para que resultem em imagens de qualidade, facilitando e complementando as atividades de inspeção.

Palavras-chave: Barragens; Inspeções de segurança; *Drones*; Gestão; Conservação.

ABSTRACT

Dams are constructions that defy nature, due to the fact that they store fluids. Therefore, it is inherent that a dam presents associated risks for the society, material assets, infrastructure, economy and environment. By adopting dams safety programs including periodic inspections, it is possible to minimize risks and ensure good and safety operating conditions. Visual inspections are exhausting activities and dams have structures with poor accessibility, and most of the time they are leaking. Thus, it is necessary for inspectors to use specialized access equipment that provides security conditions. In this context, the use of drones has the potential to offer significant advantages in data collection, resulting low-cost alternatives for image acquisition in a complete way or complementary to traditional inspections. The general goal of this work is to evaluate how the use of drones can help in the management of dam safety, notably in the performance of dam safety inspections for water reservation. The object of the study is two dams, one of embankment and one of concrete, which a case study was performed. In addition to document analysis and generation of 3D models of the dams, the images obtained with drones were provided to a group of specialist engineers, who carried out virtual inspection of the dams, instead of them being in the dams previously. The inspection questionnaires filled by the specialists were compared with the results of the in-site inspections carried out. As a result of the research, it leads to the conclusion that the earthfill dam revealed 81% of responses consistent according the in-site inspections and; the concrete dam, presented 65%. Therefore the work concludes that the adoption of drones for dam inspections brings numerous advantages and possibilities. This study allowed the identification of some limiting factors, which must be planned, resulting in better precision images, facilitating and complementing inspection activities.

Key-words: Dams; Safety inspections; Drones; Management; Conservation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas operacionais da pesquisa desenvolvida nesta dissertação	30
Figura 2 - Seção típica de barragem de aterro (a) e de concreto-gravidade (b), com seus principais elementos	34
Figura 3 – Exemplos de trajetória a adotar para percorrer uma barragem. Em a), trajetória zigue-zague e em b), trajetória paralela ao eixo	38
Figura 4 – Diferentes perspectivas de inspeção visual em barragens	39
Figura 5 – Mudança de coloração do solo no pé de jusante.....	42
Figura 6 – Mudanças de coloração da vegetação na ombreira esquerda.....	42
Figura 7 – Ilustração do mecanismo de <i>piping</i> no interior de uma barragem de aterro	42
Figura 8 – Exemplo de <i>piping</i> em barragem de aterro.....	42
Figura 9 – Ilustração do processo de <i>piping</i> pela fundação de uma barragem.....	43
Figura 10 – Galgamento na Barragem do Carioca, no município de Pará de Minas/MG, ocorrido em 09/01/2022	44
Figura 11 – Rachadura longitudinal na barragem UHE Emborcação	46
Figura 12 – Ilustração de rachadura transversal	46
Figura 13 – Deformação excessiva na crista de barragem, indicando o deslizamento do talude	47
Figura 14 – Curvatura na linha de interseção do espelho de água com o <i>rip-rap</i> (parâmetro de montante)	47
Figura 15 – Ilustração típica de deslizamentos de taludes em barragens	47
Figura 16 – Exemplo de recalque aparente na crista de barragem	48
Figura 17 – Afundamentos em talude de montante e crista de barragens de aterro.....	49
Figura 18 – Erosão provocada pela água da chuva, correndo em caminhos abertos por pessoas e animais	49
Figura 19 – Em a) vegetação de grande porte no talude de jusante e em b), na lateral externa dos muros do vertedouro	50
Figura 20 – Em a) formigueiros no talude de jusante e em b), toca de tatu em barragem	51
Figura 21 – Inspeção de barragem de concreto, no qual os inspetores utilizam rapel como plataforma para trabalho em altura	53

Figura 22 – Ilustrações de possíveis deslocamentos permanentes em barramentos de concreto	55
Figura 23 – Em a), exemplo de soleira tipo <i>creager</i> com erosão do concreto e em b), exemplo de erosão na borda livre do parâmetro de montante.....	56
Figura 24 – Em a), erosão por cavitação junto aos blocos defletores do vertedouro de uma barragem e, em b) erosão por cavitação a jusante dos blocos de dissipação de vertedouro	57
Figura 25 – Em a), danos causados na soleira de vertedouro, a partir da junta de concretagem, após chuvas extremas e em b), erosão a jusante da bacia de dissipação.....	57
Figura 26 – Em a), <i>drone</i> de asas fixas e em b), <i>drone</i> de asas rotativas	59
Figura 27 – Representação de três projeções de um objeto	64
Figura 28 – Ilustração das posições de captura de imagens com uso de drone.....	64
Figura 29 – Em (a) densa nuvem de pontos dos blocos de concreto do lado direito, obtidas com o <i>drone</i> e (b) a densa nuvem de pontos de toda a barragem	65
Figura 30 – Simulação de defeitos inseridos na estrutura da barragem. Nas imagens à esquerda, a fotografia dos mesmos, e nas imagens à direita, a nuvem de pontos reconstituída através dos conjuntos de imagens obtidos com <i>drone</i>	66
Figura 31 – À esquerda a configuração do planejamento de voo e aquisição das imagens e à direita, o modelo 3D gerado pelas imagens verticais obtidas com <i>drone</i> de asas fixas	67
Figura 32 – Modelo 3D da face de jusante da barragem, obtido pelo processamento das imagens capturadas com <i>drone</i> de asas rotativas	67
Figura 33 – Vista geral do modelo 3D reconstituído da barragem estudada, com indicação dos pontos de prioridade de detalhamento.....	68
Figura 34 – Região da barragem em que o estudo foi conduzido	69
Figura 35 – Imagens” cruas” obtidas com <i>drone</i> e as mesmas imagens após tratamento de inteligência artificial, apontando o padrão e formato das fissuras	70
Figura 36 – Localização da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	72
Figura 37 – Fotografia da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, com destaque para os principais elementos e estruturas associadas da barragem	73
Figura 38 – Arranjo geral da barragem Rodolfo da Costa e Silva, em planta baixa..	74
Figura 39 – Localização da Barragem do DNOS.....	75

Figura 40 - Fotografia da Barragem do DNOS com destaque para as principais partes e estruturas associadas da barragem	76
Figura 41 – Fotografia do <i>drone</i> utilizado nesta pesquisa	77
Figura 42 – Esquema ilustrativo da inclinação da câmera do <i>drone</i>	80
Figura 43 – Em a), trajetórias de voo traçadas para a barragem Rodolfo da Costa e Silva e em b), a trajetória traçada para a barragem do DNOS	82
Figura 44 – Esquema da classificação adotada para análise documental das fichas de inspeção	86
Figura 45 –Fluxo de trabalho padrão para geração de modelos tridimensionais no <i>software</i> Agisoft® Metashape Pro.....	87
Figura 46 – Posição e perspectiva de captura de cada fotografia sobre imagem de GPS da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	88
Figura 47 – Posição e perspectiva de captura de cada fotografia sobre imagem de GPS da Barragem do DNOS.....	88
Figura 48 – Formigueiros constatados na inspeção in loco na Barragem do DNOS	95
Figura 49 – Desalinhamento percebido nos guarda-corpos da Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	96
Figura 50 – Erosão no muro lateral direito do vertedouro da Barragem do DNOS ...	97
Figura 51 – Esquema dos resultados quanto à classificação de acesso ou grandes áreas, em termos de vantagens da utilização de <i>drones</i> para inspeção	99
Figura 52 – QR Codes de acesso aos modelos tridimensionais das barragens Rodolfo da Costa e Silva (a) e Barragem do DNOS (b).....	100
Figura 53 – Resultantes do processamento de cada etapa da construção do modelo tridimensional da Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	101
Figura 54 – Resultantes do processamento de cada etapa da construção do modelo tridimensional da Barragem do DNOS	102
Figura 55 – Região do vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	104
Figura 56 – Região da ombreira esquerda da Barragem do DNOS.....	104
Figura 57 – Possível fissura no parâmetro de jusante do lado direito ao vertedouro	107
Figura 58 – Encontro do guarda-corpo de concreto pré-moldado com o barramento no parâmetro de jusante	107
Figura 59 – Danos constatados nas juntas de dilatação do parâmetro de jusante .	109

Figura 60 – Exemplos de manchas de umidade e criações bióticas nos parâmetros de jusante da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	110
Figura 61 – Trincas/rachaduras encontradas no parâmetro de jusante	111
Figura 62 – Fissura longitudinal identificada nos parâmetros de montante	111
Figura 63 – Aspecto geral do parâmetro de montante, no qual é possível verificar erosões superficiais do concreto	112
Figura 64 – Juntas de dilatação do parâmetro de montante da barragem, observadas a partir da galeria interna	113
Figura 65 – Falta de alinhamento nos blocos de guarda-corpos	114
Figura 66 – Guarda-corpo desalinhado de concreto situado a montante da crista .	114
Figura 67 – Imagem em que inspetores apontam para “possível desalinhamento na crista”, contudo trata-se de sedimento e/ou umidade acumulado no pavimento.....	115
Figura 68 – “Deterioração” no pavimento indicada por 92 % inspetores	116
Figura 69 – Fissura de origem térmica no pavimento de concreto sobre a crista ...	116
Figura 70 – Trincas ou rachaduras que podem ser identificadas na soleira	117
Figura 71 – Indícios de erosão superficial do concreto da soleira do vertedouro....	118
Figura 72 – Vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, com ênfase para a constatação de erosão na superfície do concreto em algumas áreas	119
Figura 73 – Junta de dilatação do vertedouro que apresenta uma pequena fratura no concreto	120
Figura 74 – Fratura no concreto na saída do vertedouro (dissipação).....	121
Figura 75 – Imagem do vídeo da bacia de dissipação que fora coletado no sentido montante-jusante	122
Figura 76 – Imagem da bacia de dissipação do vertedouro, na qual é possível verificar que não há erosão do solo abaixo da laje da dissipação	123
Figura 77 – Percepção de armaduras expostas apontadas por inspetor que analisou as imagens virtuais da barragem	123
Figura 78 – Possíveis indícios de corrosão nas vigas da ponte sobre o vertedouro na Barragem Rodolfo da Costa e Silva	124
Figura 79 – Fissuras transversais observadas em longarinas da ponte	125
Figura 80 – Exemplo de fissuras longitudinais observadas em longarinas da ponte	125
Figura 81 – Fratura no concreto próxima à ancoragem de tirante em viga transversina da ponte.....	125

Figura 82 – Trecho do vídeo coletado para análise dos pilares.....	126
Figura 83 – Trecho do vídeo coletado para análise das vigas.....	126
Figura 84 – Juntas no pavimento da ponte, no qual há perfis metálicos oxidados .	127
Figura 85 – Indicação de possível fissura em pilar da ponte sobre o vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	128
Figura 86 – Pilares da ponte sobre o vertedouro, que apresentam marcas das formas de concretagem	128
Figura 87 – Região da ombreira esquerda, na qual alguns dos inspetores identificaram a árvore existente como caída	129
Figura 88 – Região a jusante da barragem na qual existem rochas sãs afloradas .	129
Figura 89 – Região a jusante da barragem na qual existe surgência a partir da ombreira esquerda.....	130
Figura 90 – Surgências percebidas <i>in loco</i> na ombreira esquerda	131
Figura 91 – Surgência na ombreira direita, observada na inspeção <i>in loco</i> realizada	131
Figura 92 – Erosão no talude de jusante próximo à ombreira esquerda. Em a), imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores e em b), imagem obtida com <i>drone</i> em inspeção realizada <i>in loco</i> no dia 02/09/2021	142
Figura 93 – Falhas na proteção vegetal do talude de jusante	142
Figura 94 – Anomalia presente no talude de jusante da Barragem do DNOS, confundida por alguns inspetores com deslizamento	143
Figura 95 – Surgência no talude de jusante da Barragem do DNOS.....	143
Figura 96 – Falha na proteção vegetal confundida com <i>sinkhole</i>	144
Figura 97 – Proteção vegetal do talude de jusante	144
Figura 98 – Exemplos de arbustos no parâmetro de jusante.....	145
Figura 99 – Formigueiros identificados no talude de jusante.....	146
Figura 100 – Canaletas de drenagem do talude de jusante obstruídas por vegetação	147
Figura 101 – Anomalia confundida com surgências no talude.....	148
Figura 102 – Situações em que podem ser verificadas erosões no talude de montante.....	149
Figura 103 – Situações apontadas pelos inspetores como deslizamentos ou escorregamentos no talude de montante. Em a), no reservatório, próximo à ombreira direita, em b) no meio do talude e em c) e d), na ombreira esquerda.....	150

Figura 104 – Resposta de inspetor para desalinhamento sutil no <i>rip-rap</i>	151
Figura 105 – Resposta de inspetor para ausência do <i>rip-rap</i> do talude de montante junto à ombreira direita	151
Figura 106 – Árvores identificadas no talude de montante	152
Figura 107 – Anomalia identificada na crista da barragem	153
Figura 108 – Fissuras observadas na soleira do vertedouro	154
Figura 109 – Anomalias identificadas na soleira do vertedouro, confundidas com exposição de armaduras	155
Figura 110 – Vegetação escurecida na soleira do vertedouro, que passou por ação de manutenção visando a remoção	155
Figura 111 – Fotografias de exemplo da erosão superficial da soleira do vertedouro	156
Figura 112 – Juntas de dilatação da soleira do vertedouro danificadas e com vegetação	156
Figura 113 – Ponto mudança de caimento do vertedouro	157
Figura 114 – Exemplo de mancha no muro lateral do vertedouro, indicando para possível corrosão de armaduras, em fissura	158
Figura 115 – Imagem do muro lateral direito do vertedouro, no qual é possível identificar pequenas fissuras devido à percolação de água por dentre elas	158
Figura 116 – Vegetação de grande porte junto aos muros laterais do vertedouro..	159
Figura 117 – Laje de fundo do vertedouro, próxima à soleira, com vegetação que fora tratada para remoção	160
Figura 118 – Laje de fundo do vertedouro, próxima à bacia de dissipação	160
Figura 119 – Falhas nas juntas de concretagem da laje de fundo do vertedouro, em a) próximo à soleira e em b), próximo à saída do vertedouro.....	161
Figura 120 – Fraturas nas lajes da saída do vertedouro	161
Figura 121 – Erosão de solo abaixo de laje do vertedouro.....	162
Figura 122 – Vigas e tabuleiros da ponte em que existem situações difíceis de distinguir de sinais de corrosão de armaduras	163
Figura 123 – Exemplo de fissura em viga da ponte.....	163
Figura 124 – Falha de concretagem presente em viga da ponte	164
Figura 125 – Em a) fotografia obtida com telefone celular e em b) obtida com <i>drone</i>	168

Figura 126 – Em a) imagem obtida pelos vídeos disponibilizados e em b), imagem do modelo tridimensional	169
Figura 127 - Em a) fotografia obtida com telefone celular e em b) imagem do modelo tridimensional	170
Figura 128 – Vistas do talude de montante, em a) a partir de inspeção <i>in loco</i> e em b), com imagens capturadas com drone.	171

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao parâmetro de jusante	134
Gráfico 2 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao parâmetro de montante.....	135
Gráfico 3 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à crista	136
Gráfico 4 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à soleira do vertedouro	137
Gráfico 5 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à estrutura vertente.....	138
Gráfico 6 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à bacia de dissipação do vertedouro.....	139
Gráfico 7 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à ponte sobre o vertedouro	140
Gráfico 8 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas às ombreiras	141
Gráfico 9 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao talude de jusante	166
Gráfico 10 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao talude de jusante	167
Gráfico 11 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à crista da barragem.....	167
Gráfico 12 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à soleira do vertedouro	172
Gráfico 13 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas aos muros laterais do vertedouro.....	173
Gráfico 14 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as lajes de fundo do vertedouro.....	174
Gráfico 15 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à ponte	175

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	72
Quadro 2 – Características da Barragem do DNOS	75
Quadro 3 – Características do <i>drone</i> utilizado nesta pesquisa.....	77
Quadro 4 – Questionário de inspeção para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva.	191
Quadro 5 – Questionário de inspeção para a barragem do DNOS.....	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação das características de voo controlado	81
Tabela 2 – Parâmetros de voo para coleta dos vídeos manuais na barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	83
Tabela 3 – Parâmetros de voo para coleta dos vídeos manuais na barragem do DNOS	84
Tabela 4 - Parâmetros de processamento para geração do modelo tridimensional para a barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	88
Tabela 5 - Parâmetros de processamento para geração do modelo tridimensional para a barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.....	88
Tabela 6 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 2 do questionário da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	108
Tabela 7 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 10 do questionário da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	115
Tabela 8 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 30 do questionário da Barragem Rodolfo da Costa e Silva	132
Tabela 9 – Sumarização dos resultados do questionário de inspeção da Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	133
Tabela 10 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 4 do questionário da Barragem do DNOS	145
Tabela 11 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 7 do questionário da Barragem do DNOS	146
Tabela 12 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 9 do questionário da Barragem do DNOS	147
Tabela 13 – Sumarização dos resultados do questionário de inspeção da Barragem do DNOS	165

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASDSO	<i>Association of State Dam Safety Officials - EUA</i>
CEOPE	Coordenadoria Especial de Operações
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
DSG	<i>Dam Safety Guidelines - Canadá</i>
ICA	Instrução de Comando da Aeronáutica
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PAE	Plano de Ação em Emergência
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragem
RETA	Responsabilidade Civil do Explorador ou Transportador Aéreo
SARPAS	Sistema de acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro por Aeronaves não Tripuladas
SARPs	Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SISANT	Sistema de Aeronaves não Tripuladas
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	<i>Visual Line of Sight</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS.....	21
1.2 TEMA E OBJETIVOS.....	24
1.2.1 Objetivo geral	24
1.2.2 Objetivos específicos	24
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS	25
1.5 MÉTODO E DELINEAMENTO DA PESQUISA	28
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE BARRAGENS	33
2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS	35
2.2.1 PNSB e SNISB	36
2.3 INSPEÇÕES DE SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	37
2.3.1 Fichas de Inspeção	39
2.4 PRINCIPAIS ANOMALIAS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM BARRAGENS	40
2.4.1 Barramentos de aterro	41
2.4.1.1 Surgências e erosão interna.....	41
2.4.1.2 Erosão externa	43
2.4.1.3 Rachaduras.....	45
2.4.1.4 Instabilidade de taludes.....	46
2.4.1.5 Recalques e afundamentos	48
2.4.1.6 Proteção superficial	49
2.4.1.7 Vegetação (árvores, arbustos e aquática)	50
2.4.1.8 Tocas de animais	51
2.4.2 Barramentos e estruturas associadas de concreto	51
2.4.2.1 Infiltrações e surgências.....	52
2.4.2.2 Fissuras	53
2.4.2.3 Movimentação da estrutura	54
2.4.2.4 Reação Álcali-agregado (RAA)	55
2.4.2.5 Erosão e cavitação.....	55
2.5 SISTEMAS AÉREOS REMOTAMENTE PILOTADOS	57

2.5.1 Operações com <i>drones</i>	60
2.5.2 Estudos empregando <i>drones</i> em inspeções de barragens	62
3 PROCEDIMENTOS E MÉTODOS	71
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAGENS.....	71
3.1.1 Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	71
3.1.2 Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.....	74
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO <i>DRONE</i> UTILIZADO.....	76
3.3 INSPEÇÕES <i>IN LOCO</i> REALIZADAS.....	77
3.4 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE IMAGENS COM <i>DRONE</i>	78
3.4.1 Fotografias registradas com voo controlado.....	79
3.4.2 Vídeos coletados com voo manual.....	82
3.5 ANÁLISE DOCUMENTAL DAS FICHAS DE INSPEÇÃO AVALIADAS	84
3.6 GERAÇÃO DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS	86
3.7 INSPEÇÕES VIRTUAIS REALIZADAS POR ENGENHEIROS CIVIS ESPECIALISTAS	89
3.7.1 Questionários de inspeção.....	90
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	91
4.1 ANÁLISE DOCUMENTAL DAS FICHAS DE INSPEÇÃO AVALIADAS	91
4.1.1 Possibilidade de detecção visual.....	92
4.1.2 Facilidade de acesso ou área de grande extensão	98
4.2 MODELOS TRIDIMENSIONAIS.....	100
4.3 RESULTADOS DAS INSPEÇÕES VIRTUAIS POR ENGENHEIROS ESPECIALISTAS	105
4.3.1 Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	106
4.3.1.1 Síntese e discussão dos resultados das inspeções virtuais da Barragem Rodolfo da Costa e Silva.....	132
4.3.1 Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim	141
4.3.1.1 Síntese e discussão dos resultados das inspeções virtuais da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim	164
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	176
5.1 CONCLUSÕES.....	176
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	182
REFERÊNCIAS	185

ANEXO A – QUESTIONÁRIO DE INSPEÇÃO DISPONIBILIZADO AOS INSPETORES QUE REALIZARAM A INSPEÇÃO VIRTUAL.....	191
ANEXO B – FICHAS DE INSPEÇÃO PARA BARRAGENS DE ATERRO E CONCRETO SUGERIDAS PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO	195

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, é apresentado, inicialmente, a área no qual o tema da dissertação está inserido. Em seguida, expõe-se o tema da dissertação e os objetivos que a pesquisa busca alcançar. A justificativa para a escolha do tema e dos objetivos traçados é então apresentada. Descreve-se na sequência os métodos utilizados nas diversas etapas da pesquisa e o delineamento da mesma. As limitações e a estrutura utilizada na dissertação fecham o capítulo introdutório.

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

As barragens e reservatórios para abastecimento de água estão, sem dúvidas, dentre os primeiros tipos de estruturas concebidas pela humanidade. Registros históricos indicam que as barragens servem a sociedade há pelo menos 5.000 anos, como evidenciado nas civilizações primitivas (JANSEN, 1983).

Os objetivos da construção de tais obras são variados. Vão desde serviços vitais, como abastecimento humano, irrigação, dessedentação de animais ou piscicultura, até a serviços de geração de energia elétrica, regularização de vazões em cursos d'água, contenção de avalanches, cheias e maremotos, ou ainda, para acumulação de sedimentos, resíduos industriais e rejeitos de mineração. Os materiais de construção mais comuns em barramentos são solos, rochas e concreto.

As barragens são construções que desafiam a natureza, devido ao fato de armazenarem fluidos e, muitas vezes, caracterizam obras de infraestrutura de grande porte¹. Sendo assim, é inerente que uma barragem apresente riscos associados que podem afetar populações, bens materiais, serviços públicos essenciais, infraestrutura urbana, economia e meio-ambiente (BRASIL, 2016c).

Embora os riscos de rompimento que venham a resultar em danos significativos possam ser mínimos, eles tendem a aumentar substancialmente ao longo do tempo, caso não sejam realizadas atividades de manutenção e conservação das barragens (GUIDICINI *et al.*, 2021). À medida em progridem-se os mecanismos de degradação, aumentam-se os riscos potenciais, e os reparos podem ser complexos e extremamente caros (DSS, 2016).

¹ O porte de barragens é classificado em termos de “fator X”, de acordo com BRASIL 2016A, em função da altura do barramento e capacidade do reservatório.

A segurança de barragens é uma atividade que demanda constante acompanhamento. Alguns motivos são citados:

- As estruturas, como qualquer material de construção, passam por processos naturais de degradação e envelhecimento ao longo do tempo;
- As áreas do entorno de barragens têm mudado e continuam mudando significativamente, devido à atividade humana, o que faz com que os desastres relacionados a falhas em barragens tendam a afetar cada vez mais as populações (PISANIELLO *et al.*, 2015);
- As mudanças climáticas têm ocasionado situações ambientais adversas, como chuvas intensas e grandes períodos de estiagem;
- As condições ambientais e hidrológicas atuais, muitas vezes, diferem dos registros hidrológicos mais antigos, que basearam os projetos de muitas barragens (JANSEN, 1983).

Na maioria das situações, a adoção de um programa de segurança de barragens que inclua inspeções periódicas das condições das estruturas, manutenção preventiva regular e correção das anomalias identificadas, garantirá que a barragem permaneça em boas condições de operação (DSS, 2016).

Segundo a legislação brasileira, o empreendedor da barragem é o responsável legal pela segurança da mesma, assim como possui a responsabilização pelos possíveis acidentes e pelos danos decorrentes de falhas (BRASIL, 2016c). Por esse motivo, cabe ao empreendedor adotar programas de segurança das barragens que possui ou explora.

Embora a legislação que implementa o Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) tenha sido promulgada em 2010 e, antes disso, ainda existiam diversas normativas técnicas, no Brasil e no mundo, a implementação de Segurança de Barragens, por parte do empreendedor ainda é uma atividade negligenciada, tanto pela falta de fiscalização, quanto pela falta recursos e expertises para a implementação (GE *et al.*, 2020).

No Brasil, o assunto de segurança de barragens é emergente, notadamente considerando os desastres ocorridos nas barragens em Mariana (MG) e Brumadinho (MG), em 2015 e 2019, respectivamente, deixando uma soma de 289 vítimas fatais e afetando 463.520 pessoas (BRASIL, 2016a; 2019). Barna (2020) afirma que, excetuando-se usinas nucleares, nenhuma outra estrutura de engenharia tem o

potencial de afetar prejudicialmente tantas pessoas e o meio ambiente, como ocorre no caso de barragens, caso venha a acontecer algum desastre.

Nesse sentido, é imperativo que hajam motivações acadêmicas e científicas no sentido de auxiliar o empreendedor na implementação de tecnologias que auxiliem e facilitem as atividades de inspeções de segurança de barragens, e a adoção de métodos práticos de obtenção, registro e análise de informações do estado de conservação das mesmas.

O padrão convencional de inspeções de segurança de barragens requer a inspeção visual detalhada não apenas da estrutura primária, mas também dos subsistemas e da bacia hidrográfica circundante. A inspeção visual é tradicionalmente realizada percorrendo-se a barragem pessoalmente (BUFFI *et al.*, 2017). Além disso, para realizar uma inspeção visual com proximidade adequada, devido à altura ou zonas de difícil acesso, além de estruturas que, na grande maioria do tempo estão vertendo, é necessário que os inspetores utilizem equipamentos especializados de acesso e que ofereçam condições de segurança ao inspetor (CHEN *et al.*, 2018).

Khaloo *et al.* (2018) afirmam que a utilização de equipamentos de acesso, como rapel, plataformas de altura e equipamentos de segurança podem dificultar a tarefa do inspetor para realizar anotações, registrar fotografias e ter um panorama geral da barragem, que oriente o mapeamento espacial das anomalias encontradas. Adicionalmente, os autores enfatizam que a análise e interpretação desses dados coletados não geram produtos ideais, pois revisá-los pode ser uma tarefa tediosa, podendo ocorrer dificuldades de identificação das anomalias encontradas, no contexto espacial.

Nesse sentido, Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARPs), conhecidos como *drones*, oferecem vantagens significativas na coleta de dados e são uma alternativa de baixo custo para aquisição de imagens que irão compor as inspeções (TEMPLIN *et al.*, 2018). Diversos autores e especialistas reconhecem o uso de *drones* como uma ferramenta extremamente adequada para inspeções de campo, tanto de obras de infraestrutura, quanto aerofotogrametria e geração de mapas tridimensionais (BUFFI *et al.*, 2017).

A utilização de *drones* na inspeção pode ser tanto no sentido de “aproximar os olhos do inspetor”, quanto de adquirir imagens de qualidade que podem ser analisadas e processadas posteriormente. Dentre as vantagens, deve-se destacar

ainda, a segurança para o inspetor, a possibilidade de captura de diversos ângulos de visadas, a repetibilidade de inspeções, a facilidade para registro de dados, o aumento da velocidade da realização das inspeções e a possibilidade de geração de modelos tridimensionais das barragens.

1.2 TEMA E OBJETIVOS

O tema desta dissertação é o uso de *drones* como ferramenta auxiliar e complementar nas inspeções de segurança de barragens.

Diante do apresentado no subcapítulo anterior, verifica-se a oportunidade de utilização de tecnologias para facilitar e complementar a gestão de segurança de barragens, visando garantir sua operação e conservação, bem como a mitigação de riscos e desastres.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar como o uso de *drones* pode auxiliar na gestão da segurança de barragens, notadamente na execução de inspeções de segurança de barragens para acumulação de água.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos são considerados:

- a) Avaliar quais aspectos relativos à segurança de barragens, constantes nas fichas de inspeção, podem ser facilitados com o uso de *drones*, tanto na execução das inspeções, quanto para planejamento das mesmas, sob a ótica da normativa brasileira;
- b) Averiguar as demandas, limitações técnicas e operacionais da geração de modelos tridimensionais, a partir de nuvem de pontos obtidas com *drone* comerciais e processadas por computadores pessoais, bem como aferir sobre os possíveis usos e benefícios desse tipo de produto;
- c) Avaliar a possibilidade da utilização de imagens obtidas com *drone* para inspeções de barragens, através da percepção de inspetores ao avaliar as

imagens virtualmente, sem que os mesmos estivessem previamente presentes nessas estruturas.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS

Em países em desenvolvimento, a infraestrutura de recursos hídricos tem expandido, combinado com a deterioração das estruturas mais antigas e a falta de gestão da conservação. Assim, isso faz com que haja uma procura global por ferramentas e métodos para contornar a situação, incluindo melhorias na coleta de dados, avaliações de desempenho e classificação de barragens (PISANIELLO *et al.*, 2015).

As barragens, por serem estruturas grandes e robustas, criam uma falsa percepção de segurança, que encoraja a construção de residências e negócios onde normalmente seria o fluxo natural da água. Assim, quando uma grande enchente excede os limites de reservação de uma determinada barragem, as consequências são piores do que se não houvesse sido implementada tal barragem. A água armazenada, até mesmo em pequenas barragens, pode causar perdas de vidas humanas e grandes danos para as populações a jusante, caso venham a falhar (STATE LEGISLATURES, 2001).

O risco de falha de barragens é um dos fardos inevitáveis da civilização. O dever básico da engenharia é de minimizar esse perigo. Segundo Jansen (1983), em nenhum outro setor da engenharia a responsabilidade para com as populações pode ser tão pesada ou exigente. Considerando que muitas populações vivem na sombra de grandes barragens, é imperativo a atenção crescente para encontrar os melhores métodos de garantir proteção e segurança (JANSEN, 1983).

De acordo com o ICOLD (*International Commission on Large Dams*), em relatório de 2016, o Brasil é o quinto país com maior detenção de grandes barragens no mundo. Esse *ranking* é liderado por China, Estados Unidos, Índia, Japão e Brasil, respectivamente, e seguido por Coréia do Sul, Canadá, África do Sul, Espanha e Turquia (ICOLD, 2016).

Atualmente, segundo o SNISB – Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens – o Brasil possui 22.674 barragens cadastradas². No entanto, acredita-se que muitas barragens brasileiras ainda não estejam

² Dado atualizado em fevereiro de 2022.

cadastradas no sistema, principalmente nos casos de barragens de pequeno e médio porte. Além disso, o Brasil possui várias barragens consideradas “órfãs”, as quais não são identificados os responsáveis por sua operação.

No caso de grandes barragens, existe uma maior cobrança, por parte da sociedade, para que os empreendedores realizem os cadastros e implementem a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Para barragens de pequeno ou médio porte, devido à falta de informação, fiscalização ou alocação de recursos, ou ainda simplesmente pela falta de percepção do risco, as exigências de cadastro, classificação, inspeção, monitoramento e manutenção são deixadas em segundo plano, por parte dos empreendedores e da sociedade em geral. Segundo o ICOLD (2011), 90 % dos desastres em barragens ocorrem em barragens de pequeno porte.

Na literatura existem diversos guias, inclusive os publicados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento, com diretrizes práticas para a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Contudo, os dados apontam para faltas ou desconhecimento por parte dos empreendedores, para atendimento das normas e leis (SILVA *et al.*, 2021). Aliado a esse fato, tem-se que as inspeções de segurança de barragens demandam conhecimento técnico especializado, muitas vezes indisponível, além de poder apresentar dificuldades de execução, que são inerentes ao tipo de estrutura.

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens de 2020, verifica-se que apenas 18 % das barragens que deveriam ser inspecionadas regularmente, de fato passaram por, no mínimo, uma inspeção de segurança (BRASIL, 2021).

Buffi *et al.* (2017) reconhecem que existe a necessidade de adotar abordagens inovadoras de inspeções de estruturas, em conjunto com os métodos tradicionais. Segundo os autores, essa é uma forma de equilibrar a gestão da segurança das barragens com a contenção dos custos de manutenção diretamente ligados à vida útil das estruturas.

Nesse sentido, verifica-se que os *drones* são ferramentas que podem ser adotadas pelos empreendedores para auxiliar na gestão de suas barragens, principalmente relacionadas às inspeções. Dentre possibilidades de uso, cita-se o reconhecimento da área, preparações para as inspeções, inspeções cadastrais e inspeções rotineiras, de forma complementar aos métodos tradicionais.

Buffi *et al.* (2017) reportaram que a utilização dos *drones* pode trazer grandes benefícios para a inspeção de barragens: redução do tempo de trabalho em campo,

ângulos e proximidades diferenciadas, captura de imagens estáticas e em vídeo, redução de custos e segurança para os inspetores.

Entretanto, nem todas as anomalias e verificações necessárias nas inspeções de segurança podem ser aferidas em imagens obtidas com *drone*. O uso de *drones* não substitui totalmente a observação humana, quer seja por interpretações sensoriais como olfato, auscultação e tato, quer seja por possíveis limitações técnicas de operação do *drones*, como condições climáticas, locais não acessíveis ao equipamento ou restrições de voo.

Por esse motivo, verifica-se a necessidade do estudo científico de que tipo de verificações podem ser realizadas com o uso de *drones* e quais dependem mais diretamente da sensibilidade do inspetor *in loco*. Além disso, é importante elencar em quais situações os *drones* podem trazer vantagens às inspeções e em quais a ferramenta não se apresenta adequada. Dessa forma, será possível guiar os empreendedores na adoção da ferramenta, como parte do seu sistema de gestão da segurança e conservação de barragens.

Existem diversos estudos inovadores baseados na aplicação de *drones* nas inspeções de estruturas civis, inclusive em barragens. Contudo, as tarefas necessitam de equipamentos sofisticados de voo e de processamento, além do conhecimento especializado para a realização de tais inovações. Poucos os estudos são direcionados para a aplicação prática de inspeções regulares das estruturas, compondo um sistema de gestão, que possa ser aplicado pelos empreendedores de forma simples, prática e efetiva.

Dentre os métodos alternativos e complementares às tarefas de inspeção identificados na literatura recente, identifica-se que a geração de modelos tridimensionais de estruturas, a partir de imagens obtidas com *drones*, é emergente e em ascensão. A reconstituição 3D pode ser feita a partir de várias imagens bidimensionais, utilizando a técnica conhecida como *Structure from Motion* (SfM). O procedimento, idealizado por Ullman (1979), ganhou vasta aplicação a partir da difusão do uso de *drones* para diversos fins. Segundo Okeson *et al.* (2019), o SfM tornou-se popular devido à sua qualidade visual, portabilidade, facilidade de coleta de dados e custo relativamente baixo.

Feng *et al.* (2020) afirma que os modelos tridimensionais gerados têm potencial de revolucionar a indústria de inspeção de estruturas, pois os modelos 3D são considerados confiáveis e possuem múltiplas opções de uso, possibilitando a

identificação de falhas e anomalias. Para tais fins, é necessário que haja o processamento das imagens geradas, requerendo requisitos computacionais avançados, de acordo com a resolução desejada (WANG *et al.*, 2020). Estudos adotando o uso de modelos 3D gerados a partir de nuvens de pontos com *drones* podem ser identificados em publicações que tratam desde tarefas mais simples, como mapeamento, inspeção visual das imagens e cálculo de volume, quanto para aplicações mais sofisticadas, como detecção automática de padrões de manifestações patológicas de barragens, que utilizam algoritmos computacionais e técnicas de *Deep Learning Machine* (BUFFI *et al.*, 2017; TEMPLIN *et al.*, 2018; KHALOO *et al.*, 2018; OKESON *et al.*, 2019; FENG *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020).

1.5 MÉTODO E DELINEAMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa foi elaborada utilizando uma combinação de métodos. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa básica, com objetivo exploratório, fundamentada na revisão bibliográfica. Essa etapa permitiu aprofundamento sobre aspectos primordiais e qualitativos para a segurança de barragens. Tendo em vista que a inspeção de segurança de barragens possui uma etapa de avaliação visual bastante intensa, foi identificado que as limitações de acesso às estruturas podem ser favorecidas pelo uso de tecnologias como as disponíveis nos *drones*.

Na sequência da pesquisa exploratória, foram analisadas, qualitativamente, as fichas de inspeção constantes nos guias brasileiros, notadamente os desenvolvidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento, e verificados, de forma aplicada, quais os itens das inspeções de segurança poderiam ser identificados com o uso de *drones*, bem como os tipos de vantagens que a utilização do equipamento poderia fornecer para as inspeções em barragens. O procedimento desta etapa trata-se de uma análise documental.

O trabalho culmina em uma pesquisa exploratória aplicada, com estudo de caso. Foram selecionadas duas barragens, uma de aterro e uma de concreto. Essas barragens foram inspecionadas *in loco*, por uma equipe de especialistas, e algumas anomalias foram detectadas e documentadas.

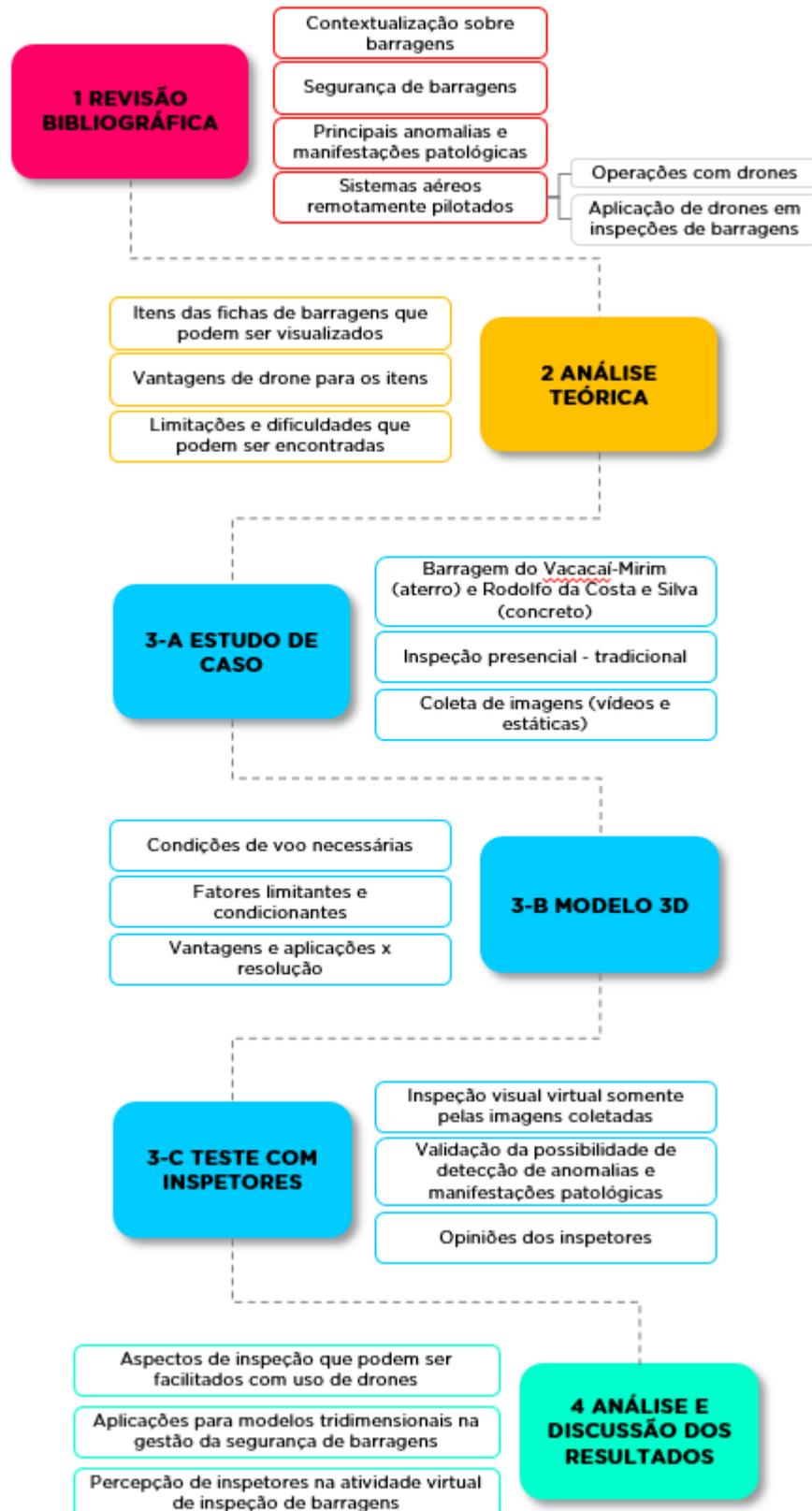
Com o uso de *drone*, foram coletadas imagens e vídeos e foi gerado um modelo tridimensional de cada barragem. Aspectos sobre a construção do modelo, resolução e aplicações são discutidos.

Os modelos 3D virtualmente navegáveis, acompanhados de vídeos coletados com o uso de *drone*, em cada barragem do estudo, foram disponibilizados para um grupo de engenheiros civis especialistas em estruturas ou patologia das construções. Esses engenheiros receberam curso preparatório sobre segurança de barragens, e realizaram a inspeção virtual de ambas as barragens selecionadas, sem que os mesmos estivessem presentes nas barragens previamente. Dessa forma, a pesquisa elaborou também um levantamento (*survey*) que buscou avaliar a capacidade de detecção de anomalias a partir de imagens capturadas com *drone*. O método de trabalho dessa etapa, quanto ao seu objetivo é descritivo.

Por fim, a pesquisa compreende a análise dos resultados das inspeções virtuais, através da aferição da capacidade de detecção de anomalias e manifestações patológicas que as barragens apresentaram no momento da coleta dos dados. Dessa forma, avaliou-se o potencial do uso de drones para inspeções de segurança de barragens de concreto e aterro, dentro das limitações do estudo.

Operacionalmente, a pesquisa foi desenvolvida em sete etapas, apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas operacionais da pesquisa desenvolvida nesta dissertação



Fonte: elaborado pela autora.

1.6 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa é focada no estudo de inspeções de barragens para acumulação de água. Essa definição se deu buscando o enfoque às barragens fiscalizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento, conforme instituído na Lei Federal 12.334 (Brasil, 2010).

O trabalho pretende atender a demanda da necessidade de empreendedores, principalmente de pequenas e médias barragens, os quais possuem dificuldades na implementação da segurança de suas barragens, sobretudo no que diz respeito às tarefas de inspeção.

Assim, buscou-se a utilização de *drone* comercial, sem a utilização de sensores específicos. O processamento das imagens coletadas se deu em um computador de uso pessoal, ou seja, um equipamento que não foi desenvolvido para grandes processamentos computacionais, no entanto, é o tipo de equipamento que possui configurações similares às de computadores amplamente utilizado por empresas e profissionais.

Para o estudo, foram selecionadas duas barragens: uma de concreto gravidade e uma de aterro, pois esses materiais constituintes representam maior parte dos barramentos existentes.

Nessas barragens, as estruturas analisadas foram selecionadas, de forma a constituir uma amostra. Sendo assim, considerou-se como objeto de inspeção os elementos mais comuns em barragens, como taludes e parâmetros, crista, ombreiras, vertedouro e ponte. O Capítulo 3 desta dissertação descreve os elementos analisados em cada uma das barragens.

Os itens de inspeção, constantes na normativa brasileira, que se referem a estruturas internas (como galerias, casas de máquinas e poços de acionamento e comando, além de tubulações internas), não foram considerados no escopo do trabalho, uma vez que esses ambientes não são adequados para o voo de *drones* usuais. Os itens de caráter sensorial do inspetor (tato, auscultação e olfato) também não fazem parte do escopo, sendo englobado na pesquisa apenas itens que possam ser visualmente aferidos. Além disso, as verificações relacionadas aos testes de funcionamento hidro e eletromecânico de estruturas não foram consideradas.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos principais. O primeiro trata-se de um capítulo introdutório, no qual foram apresentados comentários iniciais, objetivos, justificativa, método e delineamento da pesquisa, bem como as limitações.

O segundo capítulo refere-se a uma revisão bibliográfica, apresentando, com base na literatura, aspectos relacionados à segurança e inspeções de barragens, bem como as manifestações patológicas e anomalias mais comuns que podem acometer essas estruturas. Este capítulo também aborda o uso de *drones* e aplicações de *drones* em barragens. As informações e aspectos abordados neste capítulo de revisão bibliográfica fundamentaram as outras etapas da pesquisa.

O capítulo três refere-se a procedimentos e métodos que foram adotados na etapa experimental do estudo. Neste capítulo são caracterizados os objetos do estudo de caso – duas barragens, uma de concreto e uma de aterro -, além do *drone* utilizado na coleta de imagens. Ademais, é descrito o procedimento adotado para a aquisição de imagens e geração do modelo tridimensional de cada estrutura objeto do estudo. Apresenta-se também os questionários utilizados para a inspeção virtual das barragens, que foram preenchidos pelos engenheiros civis que participaram voluntariamente do estudo.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados de todas as etapas da pesquisa e, por fim, no quinto capítulo apresenta-se as considerações finais do estudo, bem como recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo é apresentada uma breve contextualização sobre o tema e, em seguida, aspectos relacionados à segurança de barragens e as normativas brasileiras. Na sequência, a fundamentação teórica aborda sobre inspeções de segurança de barragens e principais anomalias e manifestações patológicas que podem ser identificadas em barragens. Por fim, o capítulo trata de requisitos operacionais de *drones* e estudos relacionados à aplicação de *drones* para inspeções em barragens.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE BARRAGENS

Por definição, barragens são estruturas de engenharia destinadas ao acúmulo de água, resíduos industriais ou rejeitos (BRASIL, 2016c).

O termo “barragem” compreende, em termos gerais: (1) o barramento, (2) estruturas associadas e (3) reservatório (BRASIL, 2010; BRASIL, 2020b). Frequentemente, o termo “barragem” é associado apenas ao barramento. Contudo, as barragens são estruturas complexas, que são subdivididas em elementos, tais como fundação, taludes ou parâmetros, crista e ombreiras (esses relacionados ao barramento), além de dispositivos de descarga, como vertedouros, tomadas d’água, descarregadores de fundo, bacias de dissipação, canais de aproximação, casas de máquinas, entre outros.

No Brasil, considerando o total de 22.674 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), 4,00 % das barragens são destinadas à acumulação de rejeitos e 0,21 % são destinadas a resíduos industriais. Assim, as barragens destinadas à acumulação de água (para diversos fins) totalizam 90,05 % das barragens brasileiras cadastradas¹.

Além da classificação quanto ao uso principal, as barragens são classificadas também quanto ao material construtivo. As diversas soluções de engenharia apontam para arranjos cada vez mais arrojados, combinando diferentes materiais e métodos construtivos. Todavia, os tipos mais comuns são os barramentos de aterro e barramentos de concreto (DSS, 2016).

¹ Dado atualizado em fevereiro de 2022.

Os barramentos de aterro são os tipos mais frequentes. Dentre os materiais usados, incluem-se solo natural (terra) ou rocha (enrocamento), ou ainda materiais residuais obtidos do desmanche de rochas do próprio local em que foi implementada a barragem. As barragens de aterro resistem à pressão da água do reservatório pela força peso do maciço, contendo um núcleo de materiais impermeáveis, que impedem a percolação de água pelo material granular (ASDSO, 2012).

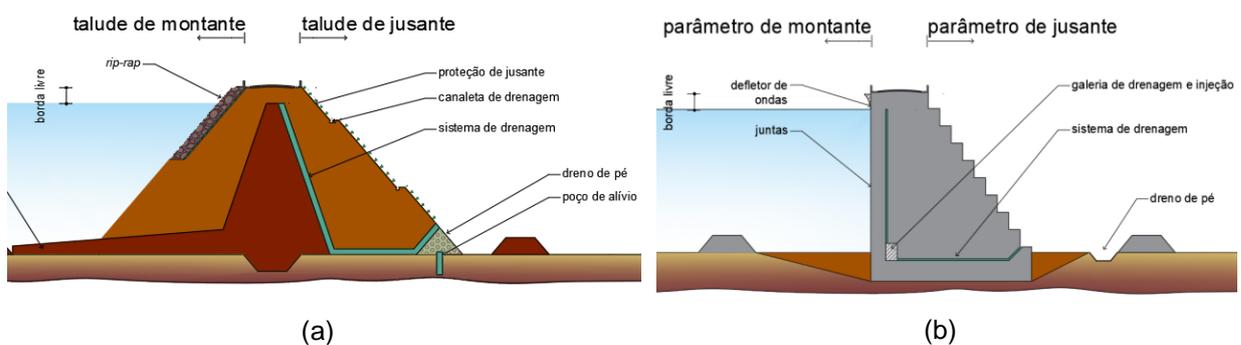
Barramentos de concreto, por sua vez, podem ser do tipo concreto-gravidade, em forma de arco, ou barragens em contrafortes.

No caso de barramentos de concreto por gravidade, o peso do concreto e o atrito do barramento com a fundação resistem à pressão da água do reservatório. Barramentos de contrafortes demandam menor volume de concreto do que os barramentos de concreto-gravidade, e os esforços são transferidos para a fundação através de contrafortes estruturados, com lajes verticais ou inclinadas. No caso de barragens em arco, os esforços da pressão da água armazenada são transferidos para as ombreiras (ASDSO, 2012).

Outro tipo específico de barramentos é o de enrocamento com face de concreto. Nesse caso, o peso das rochas atua por gravidade e a laje de concreto possui a função de vedação (JANSEN, 1983).

A Figura 2 mostra em (a) um desenho esquemático de seção típica de um barramento aterro e em (b), de barramento do tipo concreto-gravidade, com os principais elementos que as compõem.

Figura 2 - Seção típica de barragem de aterro (a) e de concreto-gravidade (b), com seus principais elementos



Fonte: elaborado pela autora.

De acordo com o tipo de material construtivo, existem tendências de mecanismos de deterioração e falhas que podem eventualmente acometer as

barragens. Barramentos de concreto-gravidade são caracteristicamente mais estáveis, porém, também são considerados potencialmente mais perigosos, pois seus mecanismos de ruptura tendem a ocorrer mais rapidamente, comparado com outros tipos de barramentos (CDSO, 2017). Barramentos de aterro são propensos a apresentar falhas de forma mais lenta, mas, obviamente, são mais suscetíveis a erosão do que estruturas de concreto ou alvenaria (JANSEN, 1983).

Os elementos e estruturas associadas que compõem o arranjo da barragem também possuem determinados mecanismos de falha ou manifestações patológicas inerentes, os quais precisam ser endereçados no momento da inspeção.

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Segundo as publicações da Província da Colúmbia Britânica, no Canadá, uma barragem é considerada segura quando ela desempenha suas funções pretendidas, de modo que sua existência não imponha riscos às populações (DSS, 2016).

A proteção da população diante das consequências de eventos adversos em barragens é uma tarefa que tem aumentado sua importância, à medida em que as populações têm se concentrado nas regiões a jusante, que são consideradas áreas de risco, e em áreas vulneráveis do entorno do reservatório (JANSEN, 1983).

Jansen (1983) afirma que os custos relacionados à segurança de barragens, envolvendo inspeções, monitoramento, manutenções e eventualmente correções, devem ser considerados desde o projeto e concepção das barragens. Segundo o autor, conceber uma barragem “segura” é mais importante e interessante, economicamente falando, do que a implementação de uma barragem “econômica”, considerando-se os custos relacionados ao ciclo de vida útil das mesmas.

Ao adotar um Programa de Segurança de Barragens, independentemente do porte ou do risco envolvido, o empreendedor se beneficia nas seguintes situações (DSS, 2016):

- Proteger seus ativos e investimentos;
- Capacidade de reconhecer anomalias e manifestações patológicas em seus estágios iniciais e eliminá-las, antes que o reparo ou recuperação se torne dispendioso e complexo;
- Mitigar os riscos para terceiros, como a população vulnerável à jusante;
- Minimizar os danos potenciais associados, em caso de falha;

- Ter uma fonte segura de água;
- Conservar o recurso valioso, nomeadamente a água.

2.2.1 PNSB e SNISB

A legislação brasileira que aborda a segurança de barragens é regulamentada, majoritariamente, pela Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Essa lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), cuja o principal objetivo é destinado a garantir que os empreendedores observem padrões de segurança, que incluem inspeções de segurança e monitoramento das barragens, para assim reduzir a possibilidade de acidentes e incidentes, bem como minimizar a consequência acarretada por essas situações, caso ocorram. Além disso, a lei visa estabelecer conformidades que permitam a avaliação e fiscalização pelo poder público (BRASIL, 2010). A Lei Federal 12.334 aplica-se a barragens que apresentem ao menos uma das seguintes características: (1) altura do maciço superior a 15 m, contado a partir do pé do talude de jusante; (2) reservatório com capacidade superior a 3.000.000 de m³; (3) reservatório que contenha resíduos considerados perigosos, de acordo com normas técnicas aplicáveis; (4) categoria de dano potencial associado médio ou alto e/ou; (5) categoria de risco alto (BRASIL, 2010). Os principais parâmetros para a classificação de barragens de acumulação de água, segundo a PNSB são: Categoria de Risco (CT), Categoria de Dano Potencial Associado (DPA) e volume do reservatório. As classificações são baseadas em critérios gerais estabelecidos pela Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012a).

A Categoria de Risco (CT) é determinada levando em consideração aspectos técnicos da própria barragem, estado de conservação que a mesma apresenta e plano de segurança da barragem (relacionado com operação e manutenção) (CNRH, 2012a).

A classificação conforme o Dano Potencial Associado (DPA), por sua vez, está relacionada com o impacto ou consequência de possíveis desastres. A classificação do DPA leva em consideração o volume do reservatório, o potencial de perda de vidas humanas, e os impactos ambientais e sócio-econômicos, caso ocorra algum evento adverso (CNRH, 2012a).

Ambas as classificações são calculadas pelo somatório da pontuação que cada característica apresenta, de acordo com as condições da barragem e do seu entorno, resultando em classes de risco e dano potencial associado ALTO, MÉDIO E BAIXO. Cabe ao órgão fiscalizador estabelecer uma matriz de risco, levando em conta a classificação, para definir o risco da barragem como A, B, C ou D. A classe de risco da barragem implica no (1) nível de detalhamento do Plano de Segurança de Barragens (PSB); (2) na periodicidade das Inspeções de Segurança (IS) e; (3) na periodicidade da Revisão Periódica de Segurança da Barragem (RPSB).

O Plano de Segurança da Barragem (PSB) trata-se de um documento, elaborado para barragens que se enquadrem na PNSB, contendo, principalmente: dados técnicos referentes à implantação do empreendimento; manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem; regra operacional dos dispositivos de descarga; Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido; relatórios das inspeções de segurança e revisões periódicas de segurança (BRASIL, 2010).

O órgão fiscalizador das barragens analisadas nesta pesquisa, por ter concedido a outorga de direito de uso dos recursos hídricos é a SEMA – Secretaria Estadual do Meio Ambiente – do Estado do Rio Grande do Sul. A CORSAN é a empresa empreendedora das barragens que são objeto desta pesquisa.

2.3 INSPEÇÕES DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

As inspeções de segurança de barragens são atividades de responsabilidade do empreendedor, e têm a finalidade de avaliar as condições físicas do barramento, estruturas associadas e reservatório, visando identificar possíveis anomalias e manifestações patológicas que potencialmente afetem a segurança, a operação ou o estado de conservação das barragens (ANA, 2017). Dentre outras estruturas anexas que devem ser analisadas nas inspeções, pode-se citar: acessos, pistas de rolamento, pontes e obras de arte especiais, sinalização, iluminação, cercas de proteção, casas de máquinas, dentre outros (BRASIL, 2016c).

A recomendação da Agência Nacional de Águas e Saneamento é de que, antes mesmo da vistoria, haja uma etapa de análise de “projetos, memoriais construtivos, relatórios de inspeções de segurança anteriores, registros de leituras de instrumentos, quando existentes, registros de operação e intervenções de

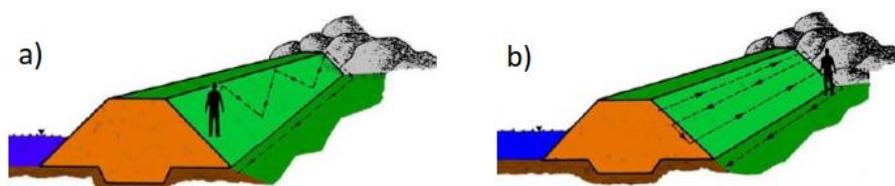
manutenção e Plano de Ação e Emergência (PAE), quando existente” (BRASIL, 2016c).

As anomalias e manifestações patológicas identificadas nas inspeções de barragens podem estar relacionadas à inadequações de materiais de construção, defeitos de fundação, condições ambientais adversas, deficiências de projeto ou operação e manutenção inadequadas (JANSEN, 1983).

Jansen (1983) afirma que as inspeções visuais em barragens são meios fundamentais e confiáveis de análise da segurança de barragens. A atividade de inspeção é de caráter sensorial e, por esse motivo, o inspetor precisa desempenhar a função de analista prático e dedicado, que examina minuciosamente cada sinal ou indício de anomalias no comportamento da barragem, bem como suas condições operacionais e instrumentação.

Durante a inspeção, é recomendado que o inspetor adote uma trajetória, sobre a crista e taludes, que pode ser zigue-zague ou paralela ao eixo da barragem. Não importa qual o caminho percorrido adotado, contanto que todos os pontos da barragem sejam cobertos pela inspeção visual, conforme exemplificado na Figura 3 (CDSO, 2017).

Figura 3 – Exemplos de trajetória a adotar para percorrer uma barragem. Em a), trajetória zigue-zague e em b), trajetória paralela ao eixo



Fonte: Central Dam Safety Organization - CDSO, 2017, p. 28.

Segundo os guias normativos da ANA, a análise visual pode detectar pequenos detalhes a uma distância de 3 a 10 m, para qualquer direção, dependendo da rugosidade da superfície, vegetação ou outras condições de visibilidade. Além disso, observar a superfície a partir de diferentes perspectivas pode revelar anomalias de que a partir de outro ponto poderiam não ter sido percebidas. Ainda segundo a ANA, todas as perspectivas analisadas devem ser fotografadas (BRASIL, 2016c).

A Figura 4 apresenta exemplos de diferentes perspectivas de análise visual para inspeção de barragens.

Figura 4 – Diferentes perspectivas de inspeção visual em barragens



Fonte: Mining Marketing. Cliente: Instituto Minere | como fazer a inspeção geotécnica em barragens de mineração | Doc 2019. 2021. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=T3F-O_LN2z0>. Acesso em 07/11/2021.

2.3.1 Fichas de Inspeção

A orientação de diversos órgãos e guias normativos é a de realizar inspeções com o auxílio de uma ficha de inspeção, em forma de *check-list*, contemplando todas as partes da barragem e estruturas associadas, além de seus equipamentos e aspectos de funcionamento dos mesmos.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) permite que o empreendedor opte por utilizar suas próprias fichas, adaptando-as para o arranjo da barragem a ser inspecionada. No entanto, o empreendedor precisa considerar e atender os aspectos normativos das entidades fiscalizadoras. No caso de barragens fiscalizadas pela ANA, existe a exigência do preenchimento do extrato da inspeção de segurança regular, que faz parte do Plano de Segurança da Barragem (PSB) (BRASIL, 2016c).

As fichas de inspeção no padrão desenvolvido pela ANA são baseadas no Ministério da Integração Nacional (2002, 2005, 2010) e são apresentadas no Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume II (BRASIL, 2016c). O manual apresenta fichas orientadas para:

- i) Barragens de terra;
- ii) Barragens de enrocamento com face em concreto (BEFC);
- iii) Barragens de concreto e;
- iv) Usina hidrelétrica.

As fichas são compostas de tabelas, divididas em subseções, contendo o barramento, estruturas associadas e reservatório, além de condições operacionais. Essas tabelas apresentam *check-lists* de itens que devem ser observados em

campo e classificados em termos de: (1) situação; (2) magnitude e (3) nível de perigo.

A situação (1) considera aspectos de evolução da anomalia, e pode ser aferida somente se há registros de inspeções anteriores. A magnitude (2) refere-se ao tamanho ou amplitude da anomalia. Classificar a magnitude tende a tornar menos subjetiva a avaliação (ANA, 2011). Já o nível de perigo (3) serve para indicar a urgência em que a anomalia deve ser corrigida.

O Anexo B apresenta, na íntegra, as fichas de inspeção desenvolvidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento, para barragens de aterro e de concreto.

Para fins de padronização de termos, apresenta-se os conceitos utilizados para anomalia e manifestação patológica, no presente trabalho:

- Anomalia: “qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa afetar a segurança, tanto em curto quanto em longo prazo” (ANA, 2011).
- Manifestação patológica: “ocorrência resultante de um mecanismo de degradação” (ABNT, 2020).

Assim, verifica-se que, o termo “anomalia”, para barragens, refere-se à constatação de uma exceção à regra, que pode comprometer a segurança, em termos de degradação, condição que dificulte a inspeção, manutenção e resiliência diante de uma situação adversa. Nem sempre uma anomalia indica um processo de degradação. Por manifestação patológica, trata-se de um sinal ou sintoma que indica que está ocorrendo algum “mecanismo ou processo de degradação de materiais, componentes ou sistemas” (ABNT, 2020). Para a segurança de barragens, o inspetor deve procurar tanto por anomalias quanto por manifestações patológicas.

2.4 PRINCIPAIS ANOMALIAS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM BARRAGENS

Os tipos de anomalias mais frequentes em barragens de aterro para acumulação de água são: surgências e erosão interna, erosão externa, rachaduras, instabilidade de taludes (deslizamentos), recalques e afundamentos, falhas na proteção superficial, vegetação (árvores, arbustos e aquáticas) e tocas de animais

(BRASIL, 2016c). No caso de barragens ou estruturas associadas de concreto, cita-se a ocorrência de infiltrações e surgências, fissuras, movimentação da estrutura, reação álcali-agregado (RAA), erosão e cavitação.

2.4.1 Barramentos de aterro

Abaixo serão descritas as anomalias mais frequentemente encontradas nas barragens de aterro, conforme a revisão bibliográfica desempenhada nesta pesquisa.

2.4.1.1 Surgências e erosão interna

As surgências são caracterizadas pela presença de água infiltrada, ou indícios de umidade localizados a jusante da barragem, que podem estar percolando pelo barramento, pela fundação ou pelas ombreiras. Essa anomalia pode desencadear processos de degradação como erosão interna ou aumento das poropressões e saturação do maciço e da fundação, com a consequente perda de resistência (BRASIL 2016c).

As infiltrações são controladas em barragens de aterro e de concreto, por sistemas de drenagem, que possuem a função de captar possíveis infiltrações e destiná-las para local adequado, no qual seja possível a observação das características da água drenada, principalmente se houver a presença de material carregado na água dos drenos (JANSEN, 1983).

Nos taludes de jusante e ombreiras, o inspetor deve procurar por sinais de umidade, principalmente na parte inferior do talude. A mudança de coloração do solo por estar umedecido, ou mudanças na coloração da vegetação, podem ser indícios da ocorrência de surgências (BRASIL 2016c). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 5 mostra surgências no pé de barragem, pela constatação da mudança de coloração do solo e a Figura 6 mostra a constatação de surgência no talude de jusante de uma barragem de aterro, a partir da mudança de coloração da vegetação. Nessa imagem, a ênfase é dada para a ombreira esquerda, em a vegetação encontra-se mais esverdeada e viçosa.

Figura 5 – Mudança de coloração do solo no pé de jusante



Fonte: Melo, 2018, p. 17.

Figura 6 – Mudanças de coloração da vegetação na ombreira esquerda



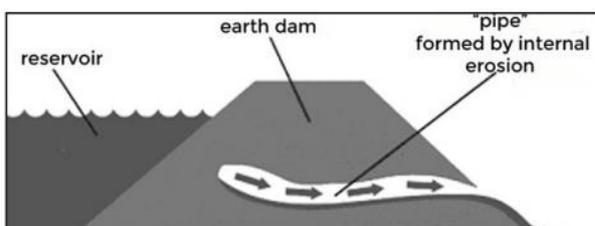
Fonte: Lambertini; Oberdiek, 2015, p. 4.

Como fora citado, as percolações e infiltrações de água em barragens podem desencadear mecanismos de deterioração que caracterizam consequências mais graves do que a constatação de umidade (BRASIL 2016c).

O mecanismo de *piping* é responsável por 46,10 % de falhas em barragens de aterro (FOSTER *et al.*, 1998). O termo "*piping*" refere-se a um tipo de erosão interna, também chamada de erosão interna regressiva, que vai se desenvolvendo de jusante para montante. A característica é que o fluxo d'água cria uma espécie de tubo, pelo qual a água progressivamente percola, carreando materiais granulares e assim desestabilizando o maciço. A Figura 7 ilustra como ocorre o mecanismo. Segundo a ASDSO (2021), uma barragem pode romper em poucas horas, a partir do momento em que o processo de erosão regressiva atingir o reservatório.

A Figura 8 apresenta exemplo da ocorrência de *piping* em barramentos de aterro.

Figura 7 – Ilustração do mecanismo de *piping* no interior de uma barragem de aterro



Fonte: ASDSO, 2021, p.1.

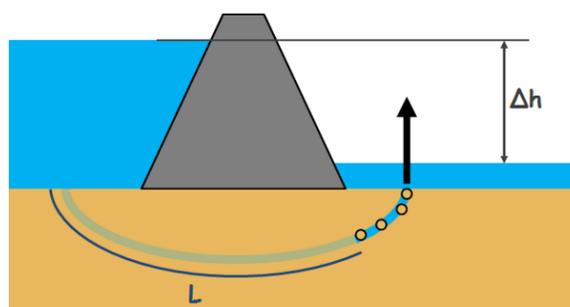
Figura 8 – Exemplo de *piping* em barragem de aterro



Fonte: Belcher et al., 2015

O fenômeno de *piping* não acomete apenas barramentos de aterro. Através das fundações, a erosão interna pode ocorrer também barragens de concreto (JANSEN, 1983). A Figura 9 ilustra como ocorre o processo de *piping* pela fundação de uma barragem genérica.

Figura 9 – Ilustração do processo de *piping* pela fundação de uma barragem



Fonte: Elementary Engineering Library, 2020.

Para a verificação da ocorrência de *piping* em barragens, durante a inspeção, o inspetor deve procurar por (FEMA, 2021):

- Sinais de umidade no talude de jusante ou no pé de jusante, observando se há acúmulos de sedimentos de solo;
- Água vertendo no encontro do aterro com estruturas rígidas, de concreto ou rocha, ou em tubulação embutida no corpo da barragem;
- Umidade próxima das raízes de árvores;
- Árvores mortas, cujas raízes que foram decompostas podem causar percolações preferenciais para infiltração;
- Água vertendo de tocas de animais.

2.4.1.2 Erosão externa

Os barramentos de aterro, de modo geral, são suscetíveis a erosão, tanto interna (*piping*), quanto externa (JANSEN, 1983). A erosão externa pode ser consequência de ação de ondas, vento, escoamento ou, em casos mais extremos, por galgamento.

Galgamento é o nome dado ao fenômeno que ocorre quando as águas do reservatório transbordam por cima do barramento, e é responsável por 48,40 % das causas de ruptura de barragens de aterro (FOSTER, 1998).

A Figura 10 mostra o galgamento ocorrido na Barragem do Carioca, no Município de Pará de Minas /MG. O fenômeno ocorreu em 09 de janeiro de 2022, após chuvas intensas na região, e a população que vive às margens do curso d'água foi evacuada do local, por medidas de segurança (ITATIAIA, 2022)

Figura 10 – Galgamento na Barragem do Carioca, no município de Pará de Minas/MG, ocorrido em 09/01/2022



Fonte: Itatiaia, 2022.

No talude de montante, a erosão pode acontecer devido à ação de ondas. No talude de jusante, a erosão pode ocorrer pela ação do vento ou, mais frequentemente, pelo escoamento de água da chuva (GUIDICINI *et al.*, 2021). A erosão externa é caracterizada pela presença de ravinamentos.

A melhor maneira de evitar a ocorrência de erosões é a proteção superficial da crista e taludes. O talude de montante normalmente recebe a camada de *rip-rap*, a fim de proteger a integridade do mesmo quanto à ação de ondas. O talude de jusante, por sua vez, pode ser revestido de proteção granular ou vegetal.

É possível que ocorram erosões próximas a tubulações ou estruturas associadas ao barramento. Nesse caso, as causas podem ser tanto devido ao escoamento e acúmulo de água nos encontros de diferentes materiais, assim como pela ação da vibração que eventualmente ocorre em vertedouros ou tomadas d'água (GUIDICINI *et al.*, 2021).

Outro aspecto a ser considerado no momento da inspeção, a fim de verificar a existência de erosão do talude, é verificar as canaletas de drenagem. A água da chuva escorre para essas canaletas, que por sua vez, destinam as águas pluviais para locais devidos. A presença de material de aterro nas canaletas é um indício de que partículas de solo estão se desagregando do maciço, pelo processo de erosão.

2.4.1.3 Rachaduras

A ocorrência de rachaduras² normalmente se dá na crista e no talude de jusante. A crista costuma ser o principal acesso à maioria das barragens, e frequentemente é usada como passagem para equipamentos agrícolas, gado, veículos de recreio e como via de acesso público. Esse tráfego pode acabar ocultando a constatação de rachaduras na crista, além de confundir falhas no pavimento com falhas estruturais do barramento. No talude de jusante, por sua vez, a vegetação excessiva dificulta a detecção de rachaduras (DSS, 2016).

As rachaduras de menor abertura, inferior a 2,5 cm, geralmente são devidas à secagem e retração da superfície do aterro, se propagam em diversas direções e não representam anomalias significativas para o comprometimento estrutural do barramento (FEMA, 2021).

As rachaduras maiores do que 2,5 cm costumam ser bem definidas e podem indicar um problema sério, como instabilidade dos taludes, recalques e problemas de fundação (FEMA, 2021). Essas rachaduras são classificadas em longitudinais e transversais.

Rachaduras longitudinais estendem-se paralelamente à crista ou talude e podem indicar os estágios iniciais de deslizamentos. Além disso, as rachaduras longitudinais podem permitir a infiltração de água externa para dentro do maciço, saturando-o e podendo causar instabilidade no aterro (DSS, 2016). A Figura 11 mostra um exemplo de rachadura longitudinal na crista/talude de montante em uma barragem de aterro.

As rachaduras transversais estendem-se perpendicularmente à crista e podem indicar recalques diferenciais no barramento. Essas rachaduras também fornecem meios de infiltração de água externa para o interior do aterro e, por estarem no sentido da contenção da água (montante-jusante), podem acarretar no processo de *piping*, considerado como um grave problema que provavelmente causará o rompimento da barragem (FEMA, 2021). A Figura 12 ilustra rachadura transversal.

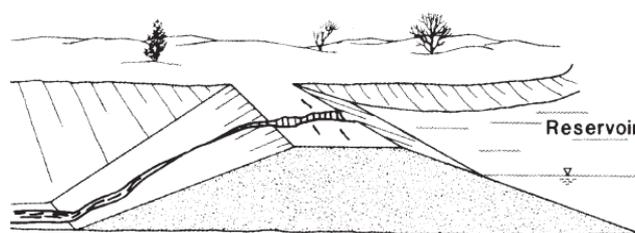
² Existe a diferenciação de termos “fissura”, “trinca”, “rachadura”, “fenda” e “brecha”, de acordo com a abertura da anomalia (BRASIL, 2016a). Nessa dissertação, os termos foram generalizados apenas a “rachadura”, pois trata-se do termo intermediário da classificação.

Figura 11 – Rachadura longitudinal na barragem UHE Emborcação



Fonte: Guidicini *et al.*, 2021, p. 88.

Figura 12 – Ilustração de rachadura transversal



Fonte: DSS, 2016.

Quando rachaduras longitudinais e transversais forem detectadas no momento da inspeção, o inspetor deve fotografar e registrar a localização, orientação, comprimento e abertura da rachadura (BRASIL, 2016c). Além disso, a recomendação é que sejam instalados marcadores para monitorar a abertura da rachadura ao longo do tempo.

2.4.1.4 Instabilidade de taludes

A instabilidade de taludes reflete-se no deslizamento, também conhecido como escorregamento de taludes, e é caracterizado como o efeito do movimento de massa de terra ou rocha que compõe o talude. Os deslizamentos podem ser classificados em superficiais ou profundos.

Os deslizamentos superficiais geralmente ocorrem em até 1 metro de profundidade da superfície do talude e não ameaçam a segurança imediata da barragem. Os deslizamentos profundos, por sua vez, são indicativos de problemas sérios estruturais dos taludes (ASDSO, 2021).

No talude de montante, deslizamentos superficiais podem ocorrer devido a um rebaixamento rápido do reservatório. Essa situação não afeta a integridade da barragem, mas pode acarretar na obstrução de tomadas d'água ou descarregadores de fundo. No talude de jusante, deslizamentos superficiais podem indicar que o material do aterro está saturado, seja pela água da chuva ou por percolação através do barramento (BRASIL, 2016b).

Indícios de deslizamentos podem ser verificados previamente em uma inspeção, pois, normalmente, iniciam-se pela presença de deformações na crista ou

nos taludes. A Figura 13 apresenta uma fotografia em que a deformação na crista indica o deslizamento do talude.

Durante a inspeção, o inspetor deve procurar por desalinhamentos no meio fio, nos guarda corpos ou ainda árvores inclinadas, que possam representar indicativos da ocorrência de deslizamentos. No talude de montante, deve ser verificado o alinhamento ou falha/falta do *rip-rap*, que também pode ser indicativo de deslizamentos (Figura 14).

Figura 13 – Deformação excessiva na crista de barragem, indicando o deslizamento do talude



Fonte: BRASIL, 2016b, p.42.

Figura 14 – Curvatura na linha de interseção do espelho de água com o *rip-rap* (parâmetro de montante)

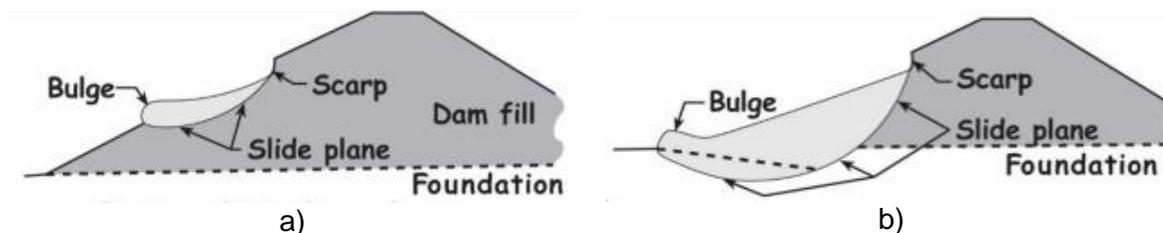


Fonte: BRASIL, 2016e, p. 28.

Tipicamente, um deslizamento tem a característica de escarpa, em forma de arco na parte superior, com deposição do material deslizado na parte inferior. A

Figura 15 ilustra a ocorrência de deslizamentos em barramentos de aterro. Em a), apresenta-se a seção transversal de um barramento com deslizamento superficial e em b), a seção transversal com deslizamento profundo.

Figura 15 – Ilustração típica de deslizamentos de taludes em barragens



Fonte: Adaptado de ASDSO, 2021, p.14.

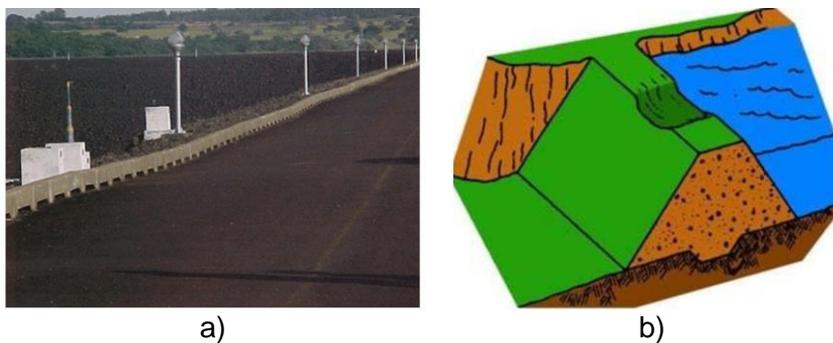
Segundo recomendação da Agência Nacional de Águas e Saneamento (Brasil, 2016c), o inspetor deve: medir e registrar a extensão e deslocamento do material movimentado; procurar por rachaduras nas proximidades, verificar se existem percolações nas proximidades e; observar a área, para determinar se as condições de instabilidade estão progredindo.

Além dos taludes do próprio barramento, os taludes de estruturas associadas e do reservatório também podem sofrer deslizamentos. No caso de reservatórios, o material deslizado pode contribuir para o assoreamento, reduzindo assim a capacidade de armazenamento do mesmo. Em vertedouros, por exemplo, a deposição de solos ou rochas que eventualmente podem deslizar de taludes adjacentes, vindo a obstruir parte do canal, ou ainda danificá-lo.

2.4.1.5 Recalques e afundamentos

Os recalques são representados por deformações que aparecem na crista da barragem, que podem ocasionar redução da borda livre e, em períodos de cheias, a possibilidade de galgamento. O recalque pode ser tanto no maciço quanto na fundação (BRASIL, 2016c). A Figura 16 mostra, em a), exemplo de recalque no aterro de barragem e em b) ilustração didática do fenômeno.

Figura 16 – Exemplo de recalque aparente na crista de barragem



Fonte: Inovacivil, 2019; CDSO, 2017, p. 49.

Os afundamentos, também conhecidos como *sinkholes*, são deformações normalmente circunscritas, decorrentes do colapso do solo, devido a um vazio no solo subjacente (BRASIL, 2016c). A causa mais comum para esse tipo de anomalia é a erosão interna. A Figura 17 apresenta em a) afundamento em talude de montante de barragem de aterro e em b), afundamento na crista da barragem de Benett, no Canadá.

Figura 17 – Afundamentos em talude de montante e crista de barragens de aterro



Fonte: Western Dam Engineering, 2015, p.3.; BRASIL, 2016b, P. 43.

2.4.1.6 Proteção superficial

A manutenção da proteção vegetal ou granular dos taludes em boas condições é parte do sistema de gestão e segurança da barragem.

A proteção superficial protege a barragem contra erosões. Por outro lado, o crescimento descontrolado da vegetação, quando ela não recebe os devidos cortes e podas, podem danificar os taludes e estruturas de concreto, além de impossibilitar inspeções visuais nas estruturas (ASDSO, 2021).

O tráfego de pedestres e animais, principalmente gado, são problemas comuns a muitos barramentos de aterro. Se um caminho/trilha for estabelecido, a vegetação nessa área não fornecerá proteção e cobertura adequada. Assim, os caminhos que foram trilhados facilitarão o acúmulo de água nessa região, causando a erosão do talude (BRASIL, 2016b). Por esse motivo, é recomendado que, numa inspeção, o inspetor procure por sinais da existência de animais pecuários na região.

A Figura 18 apresenta trilha de tráfego de animais e pessoas, com erosão do talude.

Figura 18 – Erosão provocada pela água da chuva, correndo em caminhos abertos por pessoas e animais



Fonte: BRASIL, 2016b, p. 46.

2.4.1.7 Vegetação (árvores, arbustos e aquática)

A ocorrência de árvores e arbustos nos taludes ou proximidades das barragens representam uma anomalia. Pelos diversos motivos citados a seguir, arbustos e árvores devem ser removidos, quando constatados (FEMA, 2015).

- As raízes das árvores podem fornecer caminhos preferenciais para a infiltração de água;
- Árvores que caem ou apodrecem podem deixar cavidades no interior do aterro, facilitando a percolação e erosão interna, além de que buracos na superfície podem levar ao aumento da erosão externa na região;
- Arbustos limitam a inspeção visual, proporcionam refúgio para animais roedores ou escavadores e inibem o crescimento da proteção vegetal;
- O crescimento de árvores e arbustos adjacentes às paredes e estruturas de concreto podem eventualmente causar danos ao concreto, principalmente pelo efeito do crescimento de suas raízes.

As fotografias apresentadas na Figura 19 exemplificam a presença excessiva de vegetação de grande porte na Barragem Mãe D'Água, situada no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As fotos são do ano de 2018 e refletem em a), a vegetação no talude de jusante e em b), na encosta dos muros laterais do vertedouro, danificando a estrutura de concreto.

Figura 19 – Em a) vegetação de grande porte no talude de jusante e em b), na lateral externa dos muros do vertedouro



Fonte: acervo da autora.

A vegetação aquática também é um fator a ser considerado, uma vez que podem entupir tomadas d'água ou descarregadores de fundo.

2.4.1.8 Tocas de animais

Animais roedores, formigueiros e cupinzeiros devem ser evitados ao máximo na barragem e nas suas regiões adjacentes, através de manutenções e ações corretivas. Além de comprometer parte da cobertura vegetal e assim propiciar infiltração de água da chuva, formigueiros enfraquecem o aterro, facilitando a formação de percolações e erosão interna.

Algumas espécies de roedores constroem suas tocas tanto no talude de montante quanto de jusante de barragens, que podem chegar a 10 m de profundidade (ASDSO, 2021).

Segundo a recomendação da Agência Nacional de Águas e Saneamento (BRASIL, 2016c), na inspeção, o inspetor deve: “procurar evidências de percolação provenientes de tocas no talude de jusante ou na fundação; localizar e registrar a profundidade estimada das tocas para comparar com as futuras inspeções”.

A Figura 20 apresenta em a) fotografia de formigueiros no talude de jusante e em b), um exemplo de toca de tatu, em barragem.

Figura 20 – Em a) formigueiros no talude de jusante e em b), toca de tatu em barragem



Fonte: BRASIL, 2016b, p. 46; IMASUL, 2016, p.12.

2.4.2 Barramentos e estruturas associadas de concreto

Barramentos de concreto geralmente são mais estáveis do que os de aterro, quando projetados e construídos adequadamente, e não são propensos a falhas por

galgamento, erosão, deslizamentos, animais escavadores e *pipings* (pelo maciço), os quais são problemas comuns em barragens de aterro.

No entanto, nas barragens de concreto, a inspeção completa pode ser mais desafiadora, devido às suas faces íngremes, necessitando, em muitos casos, de equipamentos especiais para trabalho em altura, para complementar as inspeções visuais tradicionais (CDSO, 2017).

Segundo o *Central Dam Safety Organization* (2017), os inspetores devem examinar todas as superfícies visíveis de concreto em busca de quaisquer sinais de infiltração de água através da barragem, fissuras e movimentação da estrutura.

A deterioração de barragens e elementos de concreto pode ser atribuída tanto a fatores físicos quanto químicos. Os fatores físicos estão relacionados com as tensões atuantes na estrutura, incluindo as causadas por variações de temperatura. Os indícios de sobrecargas são frequentemente identificados na inspeção. As anomalias de origens físicas incluem fissuras, abertura de juntas ou deslocamentos entre os blocos e infiltrações por entre as fissuras e juntas (JANSEN, 1983).

Os fatores químicos, por sua vez, são associados à ocorrência de infiltrações pela barragem, ou ainda quando a água do reservatório contém ácidos inorgânicos, sulfatos ou certos tipos de sais. As reações químicas dessas substâncias com os constituintes do concreto podem resultar na lixiviação de compostos do concreto (JANSEN, 1983). No item 2.4.2.4, desta dissertação, é abordado sobre a Reação Álcali Agregado (RAA).

2.4.2.1 Infiltrações e surgências

Os barramentos de concreto, assim como os barramentos de aterro, também são sujeitos às infiltrações e percolações. O correto funcionamento de drenos é essencial para a estanqueidade e durabilidade da barragem (JANSEN, 1983).

As infiltrações ocorrem no maciço de concreto, contribuindo para a deterioração do mesmo, tanto pela lixiviação de compostos do cimento, quanto pelo desenvolvimento de reações químicas que originam diversas anomalias (BRASIL, 2016c). Em barramentos de concreto, é mais comum a ocorrência de infiltrações nas juntas de contração ou de concretagem, ou ainda no contato entre concreto-fundação, concreto-rocha ou concreto-aterro. O mecanismo de *piping* pode ocorrer pelas fundações (GUIDICINI *et al.*, 2021).

No parâmetro de jusante e nas galerias de barragens de concreto é muito comum aparecerem eflorescências, devido a lixiviação de compostos do cimento pelo fluxo d'água. A deposição de sais na superfície do concreto pode “selar” as fissuras. Contudo, quando a formação de sais ocorre dentro de drenos do barramento, podem obstruí-los.

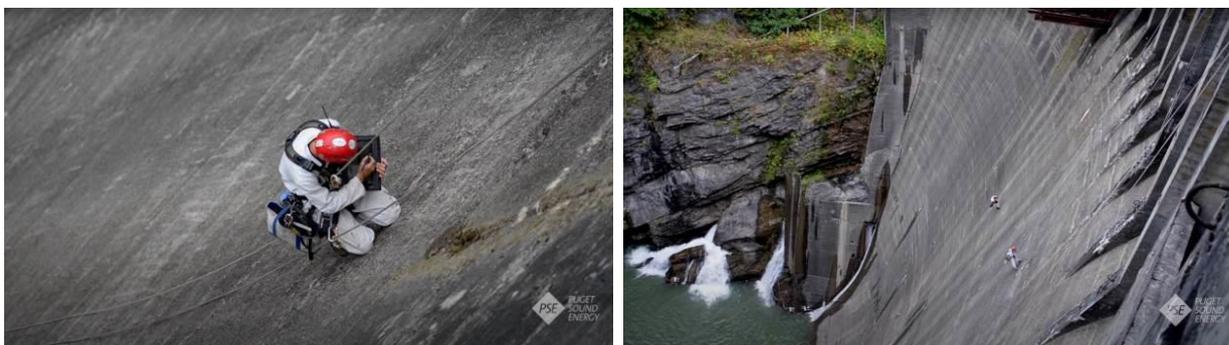
2.4.2.2 Fissuras

A fissuração em uma barragem de concreto ocorre quando se desenvolvem tensões de tração que excedem a resistência à tração do concreto. Essas tensões podem se suceder devido a sobrecargas ou por variações volumétricas no concreto (CDSO, 2017).

As fissuras ocasionalmente representam pontos de infiltração de água, e podem apresentar sinais de corrosão das armaduras do concreto, como a lixiviação dos óxidos de corrosão das armaduras.

Mesmo que uma fissura em si não represente uma ameaça séria, ela deve ser medida e documentada durante uma inspeção visual (CDSO, 2017). A Figura 21 mostra inspeção de uma barragem de concreto, na qual o inspetor utiliza técnicas de rapel, devido à limitação de acesso em altura, e anota o padrão, tamanho e localização da fissura encontrada.

Figura 21 – Inspeção de barragem de concreto, no qual os inspetores utilizam rapel como plataforma para trabalho em altura



Fonte: puget sound energy. Crews rappel from Lower Baker Dam in first-ever inspection work. 2015. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=G0Xj1OiwAQY>>. Acesso em 07/11/2021.

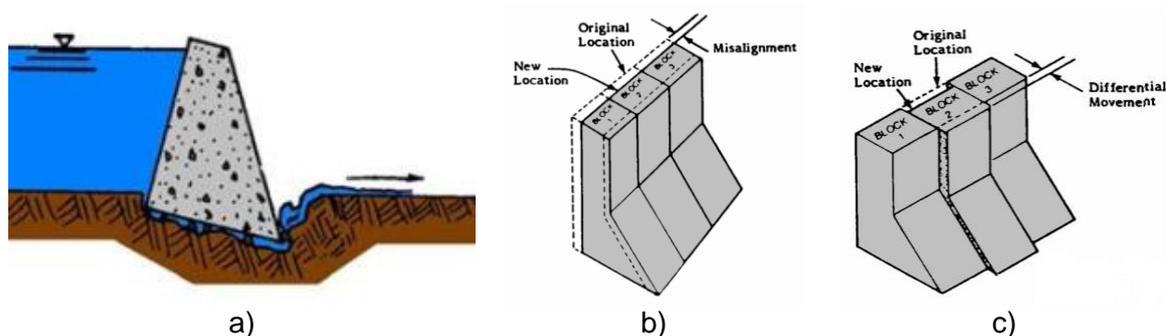
Além das fissuras estruturais, podem haver fissuras de origem térmica. As fissuras relacionadas a variações de temperatura não são relevantes para as condições de segurança das estruturas (BRASIL, 2016c). Barragens com grande volume de concreto tendem a apresentar fissuras de retração plástica, devido ao calor gerado do processo de hidratação do cimento. Segundo a *Central Dam Safety Organization* (2017), essas reações de hidratação podem continuar ocorrendo por décadas.

2.4.2.3 Movimentação da estrutura

Durante a inspeção, o inspetor deve procurar por sinais de deslocamento ou movimentação da estrutura, principalmente em barragens de concreto-gravidade, que possuem grande massa de concreto. A movimentação pode ser monitorada utilizando marcos de referência, medidas com equipamentos topográficos, além de instrumentos de controle como extensômetros ou medidores triortogonais (BRASIL, 2016c).

Normalmente, as deformações permanentes da estrutura podem ser observadas nas juntas, incluindo a verificação de possíveis infiltrações por entre elas. A Figura 22 apresenta ilustrações de possíveis deslocamentos que podem acontecer em barragens de concreto-gravidade. Em a), a movimentação exemplificada refere-se à falha na fundação da barragem, com infiltração de água por baixo da estrutura de concreto. Em b), apresenta-se o deslocamento horizontal do barramento como um todo, normalmente relacionado à fundação e tende a ocorrer logo no primeiro enchimento do reservatório. Em c), apresenta-se a movimentação diferencial dos blocos da estrutura, que normalmente é aparente por deflexão das juntas. Esse último caso pode ser causado por assentamento da fundação, reações químicas, efeitos sísmicos ou expansão volumétrica do concreto (CDSO, 2017).

Figura 22 – Ilustrações de possíveis deslocamentos permanentes em barramentos de concreto



Fonte: adaptado de CDSO, 2017, p. 90 e 91.

2.4.2.4 Reação Álcali-agregado (RAA)

Guidicini *et al.* (2021) relatam que muitas barragens de concreto, devido à necessidade do emprego de grandes volumes de concreto, utilizam agregados resultantes da detonação de rochas provenientes do próprio local da implantação da barragem, ou das proximidades. Por esse motivo, existe a possibilidade de que os agregados utilizados não sejam quimicamente adequados para o concreto ou ainda, não terem passado por ensaios de caracterização química.

A RAA é definida como a reação química entre os álcalis do cimento e certos agregados “reativos” que produzem um gel que se expande na presença de água, fraturando a argamassa do concreto (CDSO, 2017). Tipicamente, esse processo é evidenciado por estufamento a montante e pelo padrão de fissuração na superfície do concreto (JANSEN, 1983). Além disso, devido ao aumento de volume, o concreto pode romper nas juntas, ou ainda causar o emperramento de comportas (BRASIL, 2016c).

2.4.2.5 Erosão e cavitação

A erosão na superfície do concreto geralmente é causada pelo fluxo contínuo do escoamento, que muitas vezes vem acompanhado de pedras, sedimentos, troncos de árvores e *etc.* (JANSEN, 1983).

A erosão atinge todas as superfícies de concreto em contato com fluxo de água, como soleiras, vertedouros ou canais. A borda livre de montante também pode ser afetada devido à ação de ondas.

A Figura 23 exemplifica, em a), a erosão superficial do concreto em soleira tipo *creager* de uma barragem. Em b), mostra-se exemplo de erosão na borda livre do parâmetro de montante de uma barragem. Ambas as situações evidenciam a característica de agregados expostos, devido ao desgaste da argamassa do concreto na superfície mais extrema.

Figura 23 – Em a), exemplo de soleira tipo *creager* com erosão do concreto e em b), exemplo de erosão na borda livre do parâmetro de montante



Fonte: acervo da autora;

Um tipo específico de erosão é a que ocorre por cavitação, na qual os danos no concreto são causados pela formação e subsequente colapso de “bolhas” de vapor de água subatmosféricas, liberando grandes pressões na superfície do concreto (CDSO, 2017). A erosão por cavitação acontece onde há fluxos de água em grande velocidade, como em bacias amortecedoras e dispositivos de dissipação de energia da água. A Figura 24 mostra em a), erosão por cavitação junto aos blocos defletores do vertedouro de uma barragem e, em b), apresenta a erosão por cavitação a jusante dos blocos de dissipação de vertedouro.

Situações extremas, como chuvas que excedem o padrão de precipitação pelo qual a barragem opera normalmente, podem causar danos de forma rápida em vertedouros, principalmente quando os mesmos já apresentam juntas de concretagem danificadas ou fissuras, ou ainda, quando o solo abaixo da calha do vertedouro já se encontra saturado ou erodido.

Figura 24 – Em a), erosão por cavitação junto aos blocos defletores do vertedouro de uma barragem e, em b) erosão por cavitação a jusante dos blocos de dissipação de vertedouro



Fonte: Brasil, 2016b, p.59; p.58.

A Figura 25 mostra em a) danos causados na laje de fundo de vertedouro, após chuvas extremas, iniciando na junta de concretagem. Observa-se que o solo abaixo da laje foi erodido. Na fotografia b), apresenta-se erosão do solo a jusante da bacia de dissipação.

Figura 25 – Em a), danos causados na soleira de vertedouro, a partir da junta de concretagem, após chuvas extremas e em b), erosão a jusante da bacia de dissipação



Fonte: Brasil, 2016e, p. 59.

2.5 SISTEMAS AÉREOS REMOTAMENTE PILOTADOS

Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARPs) recebem uma nomenclatura popular chamando-os de *drones*. A palavra *drone*, do inglês, significa “zangão”, ou uma abelha-macho que não pica, devido à similaridade do zumbido

constante da aeronave com o do zangão. O nome *drone* ganhou popularidade quando os mesmos passaram a ser utilizados para fins domésticos e de recreação.

Considera-se que a palavra "sistema" se refere ao conjunto entre: i) aeronave, ii) sistema de controle, iii) comunicação entre aeronave e sistema de controle, iv) cargas embarcadas e v) comunicação entre as cargas e o sistema de controle.

Existem outras nomenclaturas técnicas para designar esses sistemas, como VANTs – Veículos Aéreos Não-Tripulados, SANTs - Sistemas Aéreos Não-Tripulados, ANTs – Aeronaves Não-Tripuladas, ARPs – Aeronaves Remotamente Pilotadas, dentre outros. Contudo, para os fins desta dissertação, não se considera distinção entre as nomenclaturas, uma vez que foca no uso das aeronaves comerciais.

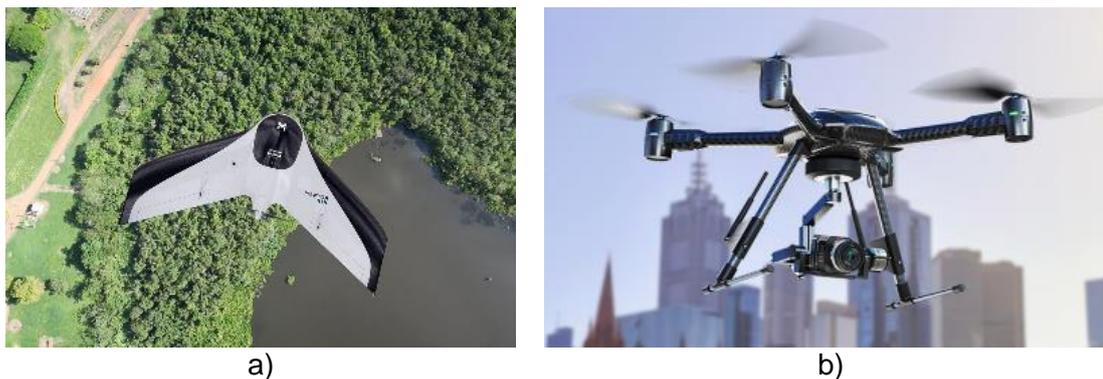
Os *drones* podem ser classificados em diferentes tipos, como o tipo de sustentação no ar, o grau de autonomia, o tamanho, o peso e o tipo da fonte de alimentação. Essas especificações são importantes na definição do tipo de missão que se deseja realizar, como por exemplo, para selecionar um modelo de *drone* que alcança longas distâncias, a duração máxima do voo e a capacidade de carga (VALAVANIS; VACHTSEVANOS, 2015).

A classificação técnica mais importante é a que categoriza os *drones* quanto ao tipo de sustentação. Os principais tipos de sustentação de *drones* são os de asas fixas e de asas rotativas.

“Asa fixa” é um termo usado principalmente na indústria da aviação para definir aeronaves que utilizam asas estáticas em combinação com a velocidade frontal do ar para gerar sustentação. *Drones* de asas fixas podem voar mais rápido e são mais adequados para longas distâncias. Esse tipo de *drone* necessita de pista de pouso e de decolagem, mas aeronaves mais leves podem ser lançadas manualmente (CORRÊA, 2016).

Os *drones* de asas rotativas, também chamados de multirotores, podem ter um ou vários rotores. Assim, podem ser subclassificados em tricópteros, quadricópteros, hexacópteros e octacópteros, com configurações de 3, 4, 6 e 8 hélices, respectivamente (VALAVANIS; VACHTSEVANOS, 2015). A Figura 26 exibe em a), um modelo de *drone* de asas fixas e em b), um exemplo de *drone* de asas rotativas.

Figura 26 – Em a), *drone* de asas fixas e em b), *drone* de asas rotativas



a)

b)

Fonte: Drone Visual, 2019; DroneShow, 2016.

Os *drones* de asas rotativas são, segundo Pinto *et al.* (2020), mais adequados para inspeções de estruturas e obras de infraestrutura, pois, sua arquitetura permite-lhes voar na vertical, operar em espaços mais apertados do que o de asas fixas e, especialmente, permite a realização de voos estáticos, pairando no ar. Outro aspecto crucial dos multirotores é a possibilidade de rotação: quanto maior o ângulo de rotação, mais ampla é a área coberta pelas imagens coletadas.

Os *drones* de asas fixas, por sua vez, são indicados para voos mais longos. Podem ser usados para conduzir uma inspeção geral da estrutura e seu contexto morfológico, coletando imagens nadirais, por exemplo (Pinto *et al.*, 2020).

A indústria da tecnologia de *drones* evoluiu, nas últimas décadas, passando de tecnologia militar avançada a dispositivos de consumo prontos para uso. Verifica-se que há uma mudança gradual em direção ao uso público de *drones*, o que representa uma gama de oportunidades relacionadas à avaliação do ambiente construído (RAKHA; GORODETSKY; 2018).

Segundo Huang *et al.* (2017), multicópteros simples, pequenos e de baixo custo, como o modelo DJI® Phantom, oferecem capacidade de cobertura de grandes áreas em poucos minutos, em alturas e distâncias de operação que vão desde 5 m até 300 m, possibilitando assim, a inspeção de diversas estruturas. Os autores comprovaram essa aplicabilidade em seus estudos de monitoramento de encostas na Usina de Três Gargantas – atualmente a maior barragem do mundo -, na China.

A utilização de *drones* para realização das inspeções de barragens, além de vencer fatores limitantes da inspeção visual, facilita ao empreendedor a gestão da conservação de seus ativos, principalmente no sentido de que os dados ficam registrados e podem ser analisados por vários especialistas ou gestores que

compõem a equipe. Os dados de uma inspeção periódica para a outra podem ser confrontadas, verificando a situação e evolução de possíveis anomalias, além de poder analisar a segurança da barragem em condições climáticas diversas, como períodos de cheia ou de estiagem.

2.5.1 Operações com *drones*

No Brasil, a operação de *drones* é regulamentada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) da ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil.

O DECEA é responsável por prover, regular e fiscalizar o acesso ao espaço aéreo, enquanto a ANAC é responsável pelo registro e certificação das aeronaves, regras de operação, licenças e habilitações de pilotos remotos. Além disso, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é responsável por administrar e fiscalizar o uso das radiofrequências utilizadas para os sistemas de controle e comunicação dos *drones* (BRASIL, 2020b).

O Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil Especial (RBAC-E) nº 94 apresenta e regulamenta os requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Dentre as principais exigências deste regulamento, considerando a operação de *drones* para inspeções de obras civis, cita-se (ANAC, 2017):

- Responsabilidade do piloto pela sua condução segura e pelas consequências advindas de quaisquer acidentes e danos;
- Verificação das condições da aeronave quanto à segurança do voo (possíveis problemas elétricos, mecânicos, estruturais);
- Operação segura considerando vento e tendo conhecimento das demais condições meteorológicas;
- Autonomia de bateria suficiente para realizar o voo e pousar em segurança no local previsto;
- Registro obrigatório da aeronave junto à ANAC, vinculado a uma pessoa física ou jurídica, responsável legal pela aeronave, via sistema SISANT (Sistema de Aeronaves não Tripuladas);
- Seguro obrigatório contra terceiros (Seguro RETA – Responsabilidade Civil do Explorador ou Transportador Aéreo), para quaisquer aeronaves não tripuladas de uso não recreativo, acima de 250 gramas de peso máximo de decolagem;

- Avaliação de risco operacional, para cada missão de voo, considerando: “os perigos, a probabilidade e severidade da consequência, o risco associado, a tolerabilidade, o nível hierárquico da aprovação da operação e eventuais medidas mitigatórias do risco” (ANAC, 2017);
- Atendimento às normas do DECEA, ANATEL e eventualmente outras autoridades competentes.

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), na Instrução de Comando da Aeronáutica (ICA) nº 100-40 (DECEA, 2020), regulamenta os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro por aeronaves não tripuladas. Nessa instrução, visando a operação de *drones* para inspeções de obras civis, cita-se:

- A necessidade de solicitação de autorização para utilização do espaço aéreo no SARPAS (Sistema de acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro por Aeronaves não Tripuladas), informando a localização, altura, regra de voo e tipo de operação que será realizada;
- A coleta de imagens para geração de modelos tridimensionais, enquadra-se na categoria de aerolevanteamento, na qual é obrigatória a autorização do ministério da defesa;
- É recomendado não sobrevoar áreas de segurança, salvo com autorização do detentor da instalação. Dentre as áreas de segurança, a instrução ICA 100-40 cita: refinarias, plataformas de exploração de petróleo, depósitos de combustível, estabelecimentos penais, áreas militares, usinas hidroelétricas, usinas termoelétricas, usinas nucleares, redes de abastecimento de água ou gás, barragens ou represas, redes de comunicação ou de vigilância da navegação aérea (DECEA, 2020);
- A operação deve manter uma distância mínima de 30 m de edificações e instalações, porém é possível voar a uma distância menor, obedecendo a regra do Princípio da Sombra, definido no item 11.2.3 da ICA 100-40 (DECEA, 2020);

- O sobrevoo de pessoas só é autorizado se as mesmas forem anuentes, ou seja, tenham expressado o conhecimento de que serão sobrevoadas e tenham consentido;
- A altitude recomendada de voo é de 131 pés de altura (40 m), a fim de evitar possíveis colisões com helicópteros e aviões. Contudo, é possível voar a altitudes maiores, respeitando a distância legal a aeroportos e helipontos;
- A instrução ICA 100-40 solicita preferência a operações do tipo VLOS (*Visual Line of Sight*), na qual o piloto permanece em contato visual com o *drone* durante todo o voo.

2.5.2 Estudos empregando *drones* em inspeções de barragens

Pinto *et al.* (2020) afirma que os *drones* são uma inovação disruptiva, com potencial para transformar as metodologias tradicionais de inspeção de barragens, expandindo as capacidades de imageamento tridimensional.

O estado da arte de pesquisas relacionadas às inspeções de barragens utilizando *drones* está, principalmente, na geração de modelos tridimensionais, processados a partir de densas nuvens de pontos. Tradicionalmente, as nuvens de pontos são obtidas por *Laser Scanner* Terrestre. No entanto, a utilização de *drones* para transformar imagens bidimensionais em modelos tridimensionais ganhou popularidade nos últimos anos, tanto pelos avanços e melhorias tecnológicas em sistemas aéreos remotamente pilotados, quanto pela redução de seus custos de aquisição (KHALOO *et al.*, 2018).

Diversos autores reconhecem as vantagens e possibilidades da utilização de modelos tridimensionais de barragens para a inspeção, monitoramento e gestão. Os autores Buffi *et al.* (2017) citam algumas vantagens:

- A técnica resulta em dados de alta precisão, adequados para levantamento detalhado do estado de conservação dos materiais e a reconstrução métrica do arranjo completo das barragens e dos terrenos adjacentes;
- A modelagem pode servir como estrutura base para análises computacionais, como de elementos finitos, simulações

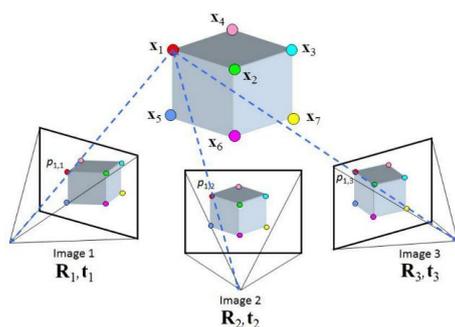
comportamentais das estruturas e cenários de situações extremas, como cheias e rebaixamento dos reservatórios;

- A possibilidade de se ter um registro fotográfico de cada detalhe da estrutura permite a participação compartilhada de diversos profissionais;
- Os registros fotográficos estabelecem parâmetros para acompanhamento e monitoramento da evolução do estado de conservação da estrutura, de modo que seja possível adotar estratégias de manutenção preventiva e pró-ativa que, segundo os autores, reduziriam os custos de manutenção entre 40 e 60 %.

A reconstrução 3D a partir de imagens 2D segue a técnica nomeada *Structure from Motion (SfM)*, descrita por Ulmann (1979), na qual o autor demonstrou que, por meio de simulação computacional, uma reconstrução métrica é possível de ser realizada a partir de três projeções contendo quatro pontos. A Figura 27 exemplifica essa teoria. Atualmente, a técnica e os algoritmos foram aprimorados e tornaram-se as principais bases para a reconstrução tridimensional (FRANCO; NAIME; 2021).

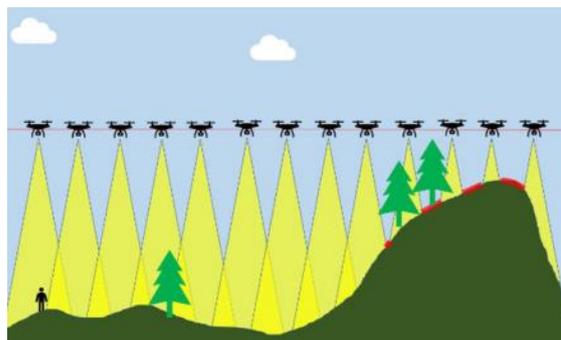
Segundo Okeson *et al.* (2019), a partir de várias imagens de um mesmo objeto, sob perspectivas diferentes, é possível determinar interseções espaciais entre uma imagem e outra e assim criar um modelo tridimensional. A Figura 28 ilustra diversas posições de captura de imagens de um terreno, com o uso de *drones*. Observa-se na figura, que ocorre uma determinada sobreposição do alcance de captura de cada imagem. Existem atualmente no mercado vários *softwares* que fazem esse tipo de processamento, e são utilizados para gerar mapas, curvas de nível, dados geográficos, reconstrução métrica de edifícios, projetos *as built* e *etc.*

Figura 27 – Representação de três projeções de um objeto



Fonte: YILMAZ, KARAKUS, 2013.

Figura 28 – Ilustração das posições de captura de imagens com uso de drone



Fonte: Adaptado de Franco; Naime, 2021, p. 8.

Na sequência, são apresentados alguns estudos relevantes sobre o tema, utilizando a técnica de reconstrução 3D de barragens e/ou de algoritmos computacionais, a partir de imagens obtidas com *drones*, para inspeção e gestão de barragens.

1) Estudo de Buffi *et al.* (2017):

A primeira reconstrução 3D por *drone* em barragem de arco-gravidade em concreto reportada na literatura foi realizada por Buffi *et al.* (2017). Para validar a precisão dimensional do modelo 3D reconstruído pela técnica *Structure from Motion* (SfM), os autores distribuíram marcadores ao longo da barragem, os quais foram medidos com estação total, sistema de posicionamento global (GPS) e *Laser Scanner* Terrestre. A barragem Ridracoli, localizada na Itália, foi o objeto da pesquisa, medindo 103,50 m de altura e comprimento da crista de 432 m. O *drone* utilizado foi um HighOne® 4HSEPro de quatro hélices, com autonomia de bateria de 18 a 30 minutos. As imagens estáticas foram adquiridas com câmera SONY® Alpha7R full frame de 36,4 *megapixels* e as imagens de vídeo foram adquiridas com uma câmera Lumix® GH4 Full Frame (vídeo FullHD, resolução de 1920 x 1080, 29 fps – *frames per second*).

Dezenove voos com duração de 15 minutos por voo foram realizados, a distâncias de 15 a 25 m da barragem, proporcionando um total de 4600 *frames* em 36 *megapixels*. Foram realizados voos manuais e automatizados. Os autores afirmaram que tiveram dificuldades em realizar voos próximos ao parâmetro de jusante, devido às fortes correntes de vento que incidiam na região.

As imagens estáticas de alta resolução em 7360 x 4912 *pixels* foram processadas utilizando *hardware* de desempenho médio-alto (processador Intel® Core i7, 32 GB de RAM, gráficos NVIDIA® GeForce GTX). O procedimento levou 60 dias úteis (FENG *et al.*, 2020).

Os autores concluíram que a nuvem de pontos reconstruída pelas imagens obtidas com *drone* foi satisfatória, comparada com os marcadores medidos com outras técnicas, e que um método valida o outro. A Figura 29 apresenta em a) a nuvem de pontos de blocos de concreto que conferem apoio à ombreira direita e em b) e a nuvem de pontos de reconstituição da barragem inteira.

Figura 29 – Em (a) densa nuvem de pontos dos blocos de concreto do lado direito, obtidas com o *drone* e (b) a densa nuvem de pontos de toda a barragem



Fonte: Buffi *et al.*, 2017, p. 1570.

2) Estudo de Khaloo *et al.* (2018):

Khaloo *et al.* (2018) combinaram o uso de *drones* de asa fixa e asa rotativa para realizar inspeção em uma barragem de concreto de grande porte, nos EUA, criando nuvens de pontos 3D. Os modelos tridimensionais foram avaliados quanto à capacidade de detecção da simulação de “defeitos” inseridos na estrutura. A Figura 30 apresenta à esquerda, fotografias dos defeitos simulados e, à direita, aproximação da região no modelo tridimensional.

Figura 30 – Simulação de defeitos inseridos na estrutura da barragem. Nas imagens à esquerda, a fotografia dos mesmos, e nas imagens à direita, a nuvem de pontos reconstituída através dos conjuntos de imagens obtidos com *drone*



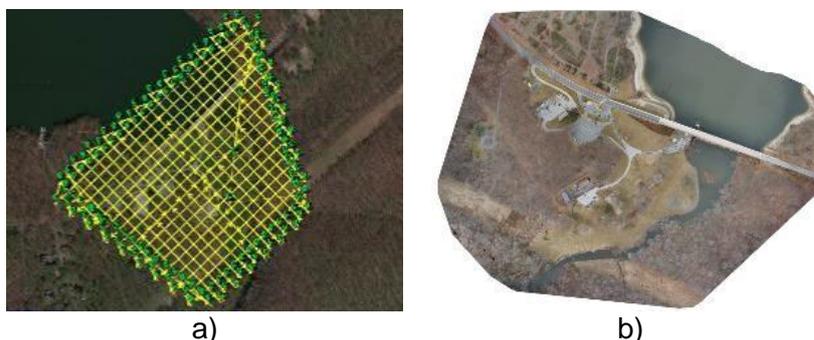
Fonte: Khaloo *et al.*, 2018, p. 7.

O estudo envolveu o uso de um *drone* de asa fixa embarcado com uma câmera Sony® Alpha Series 5100 (24,3 *megapixels*) para capturar imagens nadirais da barragem, e o uso dois *drones* de asas rotativas modelo DJI® Inspire 1 e DJI® Phantom 4, que possuem câmeras de 12 e 16, respectivamente, para a aquisição de imagens horizontais.

O *drone* de asa fixa registrou 558 imagens nadirais, em altitude de 75 m. O tempo de voo foi de 26 minutos, cobrindo uma área de 174.502 m². Os *drones* de asas rotativas registraram imagens com 80% de sobreposição. Os três *drones* juntos, somaram 2020 imagens.

A Figura 31 apresenta, em a), a configuração do planejamento de voo e aquisição das imagens e em b), o modelo 3D gerado pelas imagens verticais. A Figura 32 mostra o modelo 3D da face de jusante da barragem, obtido pelo processamento das imagens capturadas com *drones* de asas rotativas.

Figura 31 – À esquerda a configuração do planejamento de voo e aquisição das imagens e à direita, o modelo 3D gerado pelas imagens verticais obtidas com *drone* de asas fixas



Fonte: Khaloo *et al.*, 2018, p. 6.

Figura 32 – Modelo 3D da face de jusante da barragem, obtido pelo processamento das imagens capturadas com *drone* de asas rotativas



Fonte: Khaloo *et al.*, 2018, p. 8.

Segundo os autores, os resultados indicam que o processo integrado (captura de imagens nadirais e horizontais) é capaz de gerar modelos que renderizam, com precisão submilimétrica, vários tipos de manifestações patológicas (KHALOO *et al.*, 2018).

Como recomendações acerca de padrões climáticos para aquisição de imagens, os autores afirmam que a bateria sofre influência em temperaturas atmosféricas inferiores a 5° C. Assim, além das possibilidades de chuva e velocidade de vento, deve ser considerada a temperatura de operação, na definição das datas das missões. Os autores também citam que a radiação solar influencia significativamente na coleta de imagens, uma vez que as sombras podem incidir no modelo, além de que a exposição solar reflete nos parâmetros de abertura da câmera e da lente, que pode influenciar na capacidade de detecção de manifestações patológicas.

3) Estudo de Okeson *et al.* (2019):

Okeson *et al.* (2019) propuseram uma metodologia de aquisição e modelagem 3D em “multiescala”. O que os autores chamam de multiescala consiste em distinguir as regiões da barragem que devem ser analisadas com maior precisão, e as que não necessitam de tanto detalhamento. Assim, regiões mais críticas, como ombreiras, são modeladas utilizando recursos mais precisos (maior quantidade de imagens e maior tempo de processamento), resultando em modelagens mais acuradas nessas partes da barragem.

Para as regiões que necessitavam de maior precisão, o voo foi realizado com 15 m de altitude; para média precisão, 30 m e; para baixa precisão, 60 m de altitude. O modelo do *drone* utilizado foi o DJI® Phantom 4 Pro, com câmera de 18 *megapixels*.

Os autores concluíram que é possível reduzir em aproximadamente 75 % o tempo de voo e o tempo de processamento do modelo, enquanto mantém a alta precisão nas localizações em que forem necessários detalhamentos.

A Figura 33 apresenta uma vista geral aérea do modelo 3D reconstituído da barragem estudada, com indicação dos pontos de prioridade de resolução de imagem. Os pontos triangulares em azul correspondem a pontos de controle dimensional do modelo, e os pontos amarelos, laranjas e vermelhos indicam, respectivamente, o nível progressivo de prioridade de qualidade de detecção de imagem e detalhamento do modelo tridimensional.

Figura 33 – Vista geral do modelo 3D reconstituído da barragem estudada, com indicação dos pontos de prioridade de detalhamento



Fonte: Okeson *et al.*, 2019, p. 9.

4) Estudo 4: Feng *et al.* (2020):

Feng *et al.* (2020) desenvolveram um método de rede neural convolucional de aprendizagem profunda (*deep learning machine*), ou seja, um tipo de inteligência artificial em que um algoritmo de computador é treinado para identificar padrões. Esse estudo, diferentemente dos outros apresentados nesta dissertação, não envolveu modelagem tridimensional da barragem, somente a análise computacional automatizada das imagens.

O método foi desenvolvido para a detecção automática de fissuras de uma barragem de concreto, em imagens obtidas com *drone*. A barragem em questão situa-se na China e o principal uso é de geração de energia elétrica. Os autores utilizaram um *drone* DJI® modelo Mavic 2 Pro, com câmera de 20 *megapixels*. Foram obtidas 100 imagens com resolução de 5472 x 3648.

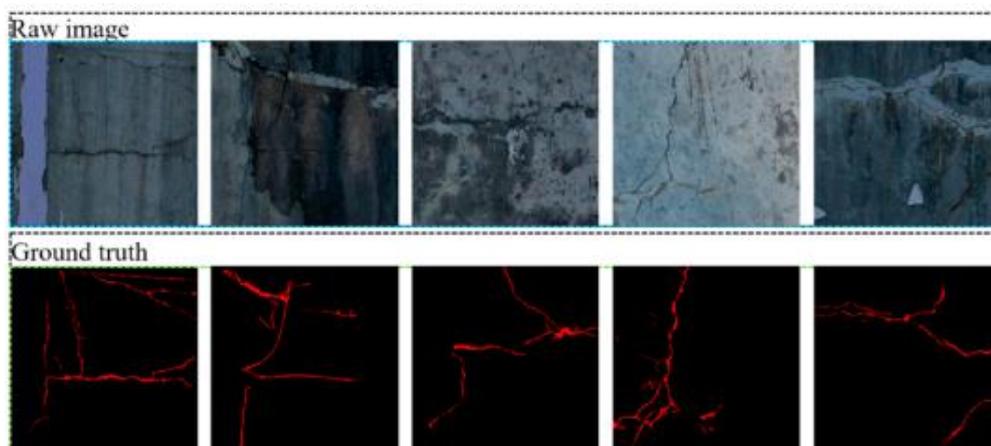
Pela análise dos *pixels*, foi possível extrair a abertura das fissuras e o comprimento das mesmas. Uma parte do conjunto de dados foi utilizada para treinamento da rede e a outra parte para validação dos dados. Segundo os autores, a precisão do método para detecção de fissuras foi de 80,45 %. A Figura 34 apresenta a barragem de concreto utilizada no estudo, e a Figura 35, o comparativo das imagens “cruas” obtidas com o *drone* e o resultado das mesmas imagens após processamento da rede, identificando automaticamente as fissuras, com seu padrão de abertura e formato.

Figura 34 – Região da barragem em que o estudo foi conduzido



Fonte: Feng *et al.*, 2020, p. 7.

Figura 35 – Imagens” cruas” obtidas com *drone* e as mesmas imagens após tratamento de inteligência artificial, apontando o padrão e formato das fissuras



Fonte: Feng *et al.*, 2020, p. 8.

Os autores afirmam que algumas condições da superfície influenciam no resultado, como textura da superficial do concreto, manchas ou umidades. No entanto, o método desenvolvido consegue captar com a precisão de *pixel* as principais fissuras da superfície de concreto desta barragem.

3 PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os procedimentos e métodos adotados para o desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente, são caracterizadas as barragens objetos deste estudo e o *drone* utilizado. Na sequência, é explicado os procedimentos adotados para a coleta de imagens com o *drone*, tanto para inspeções virtuais quanto para a geração dos modelos tridimensionais. Por fim, é apresentado o método do levantamento (*survey*) realizado com engenheiros especialistas (inspetores), que analisaram virtualmente a barragem.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAGENS

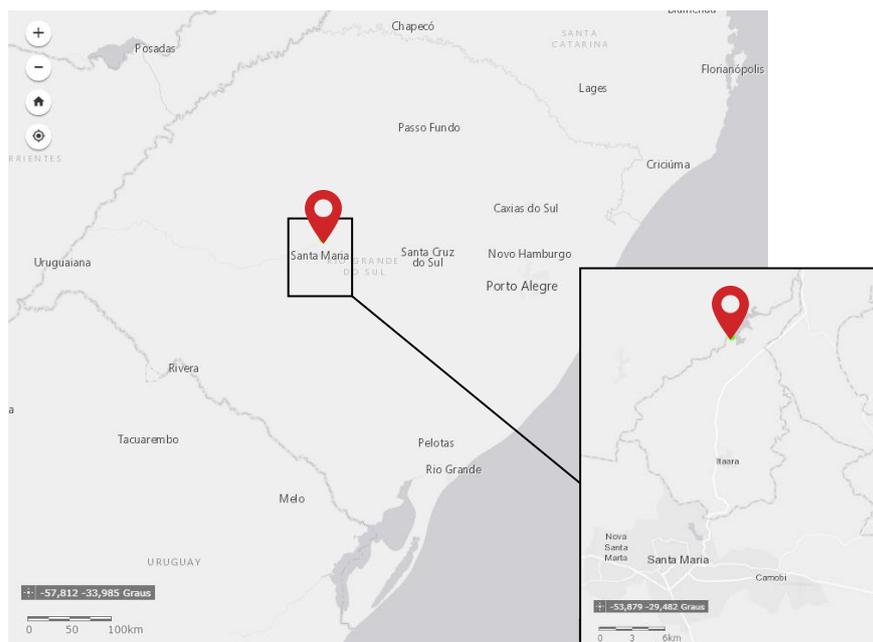
3.1.1 Barragem Rodolfo da Costa e Silva

A barragem Rodolfo da Costa e Silva foi construída para atender o aumento de demanda de abastecimento humano do município de Santa Maria/RS. A captação de água se dá na Barragem Saturnino de Brito, situada a jusante desta, e responsável por 69 % da captação e abastecimento de água do município. Assim, a barragem Rodolfo da Costa e Silva tem a função de regular o nível e vazão da barragem Saturnino de Brito.

Embora a Barragem Rodolfo da Costa e Silva atenda o município de Santa Maria/RS, a barragem situa-se no município de Itaara/RS, divisa com o município de São Martinho da Serra/RS, ao Norte de Santa Maria. O código de cadastro no SNISB é 6242, e fica localizada à latitude -29,509160 e longitude -53,509160. A Figura 36 apresenta a localização da Barragem Rodolfo da Costa e Silva no mapa.

Trata-se de uma barragem do tipo concreto-gravidade, com altura de 34 m, a partir da fundação, e pontos de fuga de aterro. Possui um vertedouro (descarregador de cheias) do tipo soleira livre, com 50 m de comprimento total. Além disso, existe uma tubulação de descarregador de fundo, com dissipador de energia do tipo salto de esqui, que lança a água do descarregador para longe das fundações da barragem. O descarregador de fundo permanece constantemente vertendo, a fim de preservar o leito do rio e manter a vazão necessária na tomada d'água da barragem a jusante. A barragem também é composta por uma galeria interna de drenagem e controle, na qual existem diversos equipamentos de manobra.

Figura 36 – Localização da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: Adaptado de SNISB, 2021. Disponível em:

<<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html>>. Acesso em 15/11/2021.

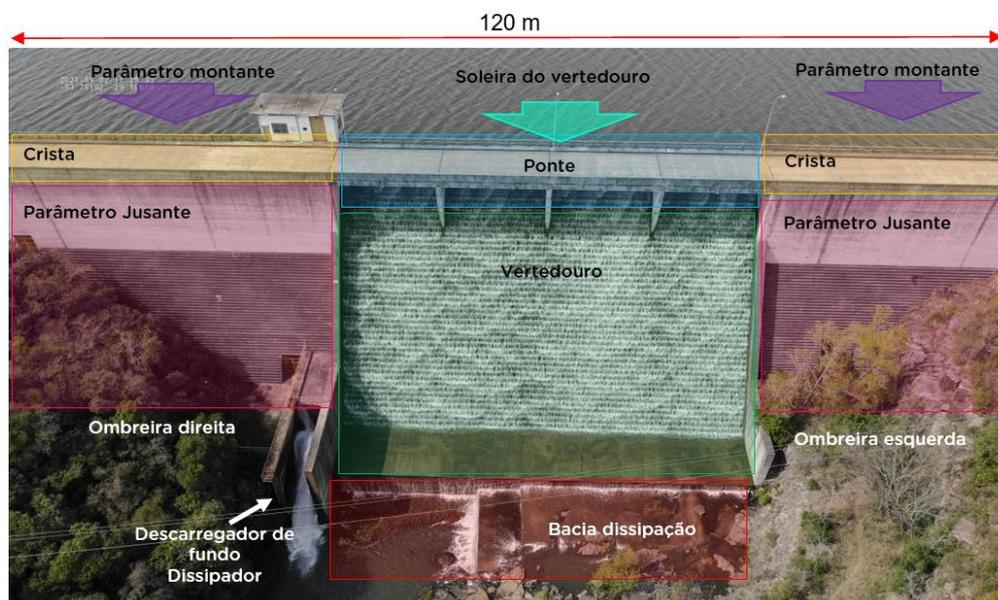
O Quadro 1 apresenta as principais características da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, e a Figura 37 mostra uma fotografia da barragem, na qual são destacados os principais elementos e estruturas associados à barragem.

Quadro 1 – Características da Barragem Rodolfo da Costa e Silva

Bacia contribuinte	Bacia do Rio Ibucuí-Mirim
Volume do reservatório	23,10 hm ³ (útil) 0,90 hm ³ (morto)
Área inundada	275 ha (nível normal) 320 ha (nível máximo)
Vazão de cheia afluyente (TR 500 anos)	410,90 m ³ /s ²
Altura sobre o leito	34,00 m (principal) 17,50 m (ponto de fuga)
Altura sobre as fundações	36,50 m (principal) 18,50 m (ponto de fuga)
Comprimento na cota de coroamento	425 m (principal) 260 m (ponto de fuga)
Ano da construção	1999
¹ Dado conforme SNISB, 2022; ² Conforme projeto original da barragem; ³ Conforme placa de identificação da barragem; ⁴ Conforme informado pelo empreendedor.	

Fonte: elaborado pela autora, conforme SNISB, 2022, projeto original da barragem e informações fornecidas pelo empreendedor.

Figura 37 – Fotografia da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, com destaque para os principais elementos e estruturas associadas da barragem

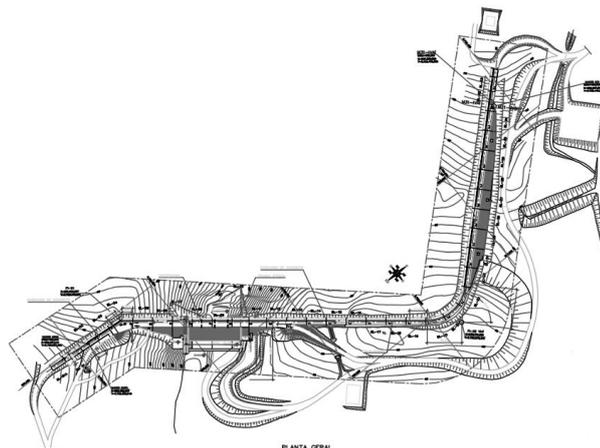


Fonte: elaborado pela autora.

A barragem Rodolfo da Costa e Silva possui o total de 685 m de crista, em formato de “L” invertido, como pode ser visto na Figura 38, que apresenta o arranjo geral da barragem, conforme o projeto da mesma. Para fins desta pesquisa, foi delimitado uma faixa de abrangência da barragem, compreendendo a zona em que a mesma possui maior altura. Assim, a amostra da barragem foi delimitada a 120 m de crista, centralizados no vertedouro.

Dentre os vários elementos e estruturas associadas que compreendem a barragem, para os fins desta pesquisa, foram considerados: a) parâmetros de jusante (lados direito e esquerdo do vertedouro); b) parâmetros de montante (lados direito e esquerdo do vertedouro); c) crista; d) soleira do vertedouro; e) vertedouro; f) bacia de dissipação; g) ponte e; h) ombreiras (direita e esquerda). A Figura 37 acima mostra essas estruturas e a faixa longitudinal de delimitação da barragem, com 120 m de comprimento de crista.

Figura 38 – Arranjo geral da barragem Rodolfo da Costa e Silva, em planta baixa



Fonte: disponibilizado pelo empreendedor.

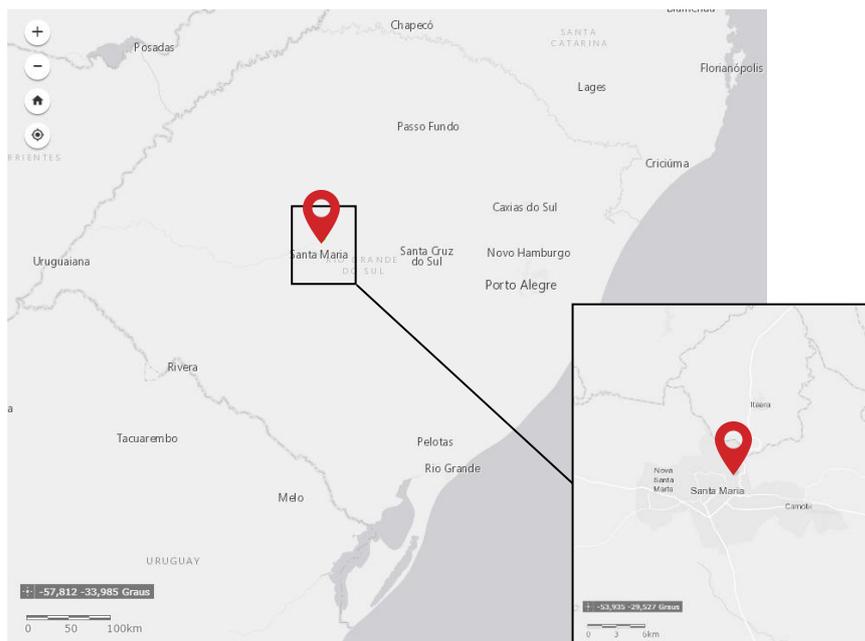
3.1.2 Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim

A Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim situa-se no município de Santa Maria/RS. O código de cadastro no SNISB é 6234, e fica localizada à latitude -29,674740 e longitude -53,78338. Essa barragem é utilizada para abastecimento de água de Santa Maria, correspondendo a aproximadamente 30 % da captação do município.

A Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim foi construída pelo antigo DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento e, por esse motivo, é também conhecida por Barragem do DNOS. A Figura 39 apresenta a localização da Barragem do DNOS no mapa.

Trata-se de uma barragem de aterro, com vertedouro de concreto, composto por soleira *creager*, calha e bacia de dissipação, na saída do vertedouro. A barragem possui estrutura de tomada d'água, na qual a tubulação passa por debaixo do aterro do barramento. Na crista existe uma via de circulação de automóveis, sem pavimentação. A barragem é situada em um meio urbano da cidade, e é utilizada como local de recreação para a população local. Além disso, as propriedades lindeiras possuem gado e cavalos, que costumam circular pela região.

Figura 39 – Localização da Barragem do DNOS



Fonte: Adaptado de SNISB, 2021. Disponível em:

<<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html>>. Acesso em 15/11/2021.

O Quadro 2 mostra as principais características da barragem do DNOS, e a Figura 40 apresenta uma fotografia da barragem, com destaque para os principais elementos e estruturas associadas à mesma.

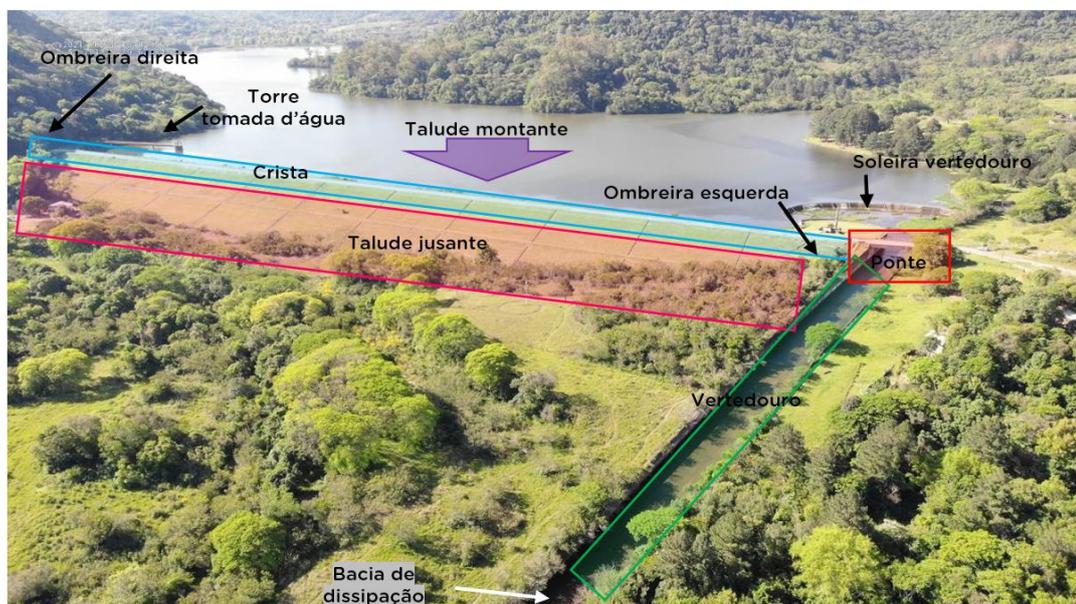
Quadro 2 – Características da Barragem do DNOS

Bacia contribuinte	Bacia dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim
Volume do reservatório	3,80 hm ³
Área inundada	57,14 ha (nível normal)
Vazão de cheia afluyente (TR 500 anos)	Sem informação
Vazão regularizada em nível normal	0,474 m ³ /s
Altura	20,00 m
Comprimento na cota de coroamento	540 m
Ano da construção	1961
Ano do enchimento do reservatório	1972

Fonte: elaborado pela autora, baseado em informações cedidas pelo empreendedor e medidas conforme o modelo tridimensional gerado nesta pesquisa.

Dentre os vários elementos e estruturas associadas que compreendem a barragem, para os fins desta pesquisa, foram considerados: a) talude de jusante; b) talude de montante; c) crista; d) soleira do vertedouro; e) vertedouro (muros laterais e laje de fundo); f) bacia de dissipação e; g) ponte.

Figura 40 - Fotografia da Barragem do DNOS com destaque para as principais partes e estruturas associadas da barragem



Fonte: elaborado pela autora.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO *DRONE* UTILIZADO

A aeronave utilizada para as inspeções é o modelo DJI® Mavic 2 Enterprise Dual, pertencente ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME - da UFRGS. Esse é um modelo considerado semiprofissional, pois, além da câmera em formato RGB, possui um sensor termográfico (câmera termal), e o modelo já vem de fábrica com acessórios: autofalante, refletor para voos noturnos e holofote LED.

Para as inspeções desse trabalho, foi utilizado esse *drone* somente com a câmera simples, e sem a utilização de acessórios e sensor termográfico. As características do *drone* utilizado, sem a utilização dos acessórios e sensores, assemelham-se a outros modelos da linha DJI® Mavic, os quais são considerados drones recreacionais/comerciais.

O *drone* utilizado possui três baterias recarregáveis, disponíveis para a realização das missões.

O Quadro 3 apresenta as principais especificações do *drone* utilizado na pesquisa e a Figura 41 mostra uma fotografia ilustrativa do mesmo.

Quadro 3 – Características do *drone* utilizado nesta pesquisa

Modelo	DJI® Mavic 2 Enterprise Dual
Peso de decolagem	899 g
Dimensões (comprimento x largura x altura)	- Dobrada: 214 x 91 x 84 mm - Desdobrada: 322 x 242 x 84 mm
Velocidade máxima (sem vento)	72 km/h
Tempo máximo de voo	31 min / bateria
Resistência máxima ao vento	29 a 38 km/h
GNSS	GPS + GLONASS
Alcance de precisão em voo estacionário (com posicionamento visual)	Vertical: ± 10 cm Horizontal: ± 30 cm
Inclinação controlável do gimbal	- 90° a 30°
Sensor da câmera	CMOS 1/2,3"; 12 M <i>pixels</i> efetivos
Lente	Campo de visão: aprox. 85°; Abertura: f/2.8
Dimensões da imagem	4056 x 3040
Modos de gravação de vídeo	4K Ultra HD : 3840x2160 (30fps) 2.7K : 2688x1512 (30fps) FHD : 1920x1080 (30fps)
Sistema de detecção de obstáculos	Omnidirecionais: frontal, traseiro, superior, inferior, laterais
Distância máxima de transmissão	6.000 a 10.000 m

Fonte: DJI, 2020.

Figura 41 – Fotografia do *drone* utilizado nesta pesquisa

Fonte: DJI Store, 2022.

3.3 INSPEÇÕES *IN LOCO* REALIZADAS

Antes da coleta das imagens utilizando *drone*, ambas as barragens foram inspecionadas *in loco*. Para cada barragem, primeiramente, realizou-se inspeção cadastral para reconhecimento, identificação do arranjo e elaboração das fichas de inspeção adaptadas para os elementos e estruturas que as compõem.

Após a inspeção cadastral, ocorreram etapas de preparação, elaboração de *croquis* e alinhamento de protocolos e procedimentos que seriam adotados nas inspeções regulares, juntamente com as equipes que participaram das inspeções *in loco*. Por fim, para cada barragem, foram realizadas inspeções regulares, para a

identificação de anomalias e manifestações patológicas, na forma visual convencional, conforme as orientações da ANA e seguindo os padrões de guias adotados por diversos países - consoante com a revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa. Os resultados das inspeções regulares foram registrados, fotografados, documentados e discutidos entre os participantes que compuseram as equipes de inspeção.

A Barragem Rodolfo da Costa e Silva foi inspecionada primeiramente, no dia 2 de setembro de 2021, no qual ocorreu a inspeção cadastral. Esse momento foi conduzido pela autora e dois engenheiros civis, sendo um deles o coordenador da CEOPE – Coordenadoria Especial de Operações da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) da regional de Santa Maria.

No dia 15 de setembro de 2021, foi realizada inspeção regular na Barragem Rodolfo da Costa e Silva, conduzida pela autora e dez engenheiros civis, colaboradores da CORSAN.

A Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim foi inspecionada no dia 2 de setembro de 2021, para fins cadastrais. Essa inspeção foi realizada também pela autora e dois engenheiros civis, sendo um deles o coordenador da CEOPE da regional de Santa Maria.

No dia 21 de outubro, ocorreu a inspeção regular na Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, realizada pela autora, acompanhada de cinco colaboradores da CORSAN, sendo eles três engenheiros civis e dois estudantes de engenharia.

3.4 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE IMAGENS COM *DRONE*

As imagens obtidas com *drone* foram capturadas nos dias 22 e 23 de janeiro de 2021. No dia 22, na parte da tarde, foi feita a coleta de imagens na barragem Rodolfo da Costa e Silva e, no dia 23, na parte da manhã, na Barragem do DNOS. A pilotagem do *drone* e a aquisição de imagens foram realizadas pela autora.

Em ambas as inspeções, o tempo estava ensolarado e claro, sem vento significativo. Durante o voo controlado realizado na barragem Rodolfo da Costa e Silva, no dia 22 de janeiro, contudo, houve um momento em que uma leve chuva precipitou. Por esse motivo, na metade do voo controlado, foi optado por pausar a missão, que foi retomada assim que a precipitação cessou.

Em ambas as barragens, foram coletadas fotografias, com voo controlado, para a geração dos modelos tridimensionais e realizadas filmagens, com voo manual, para a inspeção visual virtual que foi realizada por engenheiros civis especialistas.

3.4.1 Fotografias registradas com voo controlado

Os voos controlados, realizados em ambas as barragens, foram feitos com o *software* controlador de voo DJI® Drone Deploy. Esse *software* é amplamente utilizado nas tarefas de mapeamento, geração de modelos 3D, panoramas e vídeos, para os mais diversos fins (DRONE DEPLOY, 2022). Para a geração de modelos tridimensionais, existem duas opções principais de captura de imagens: modo ortogonal e modo oblíquo. O modo ortogonal é indicado para grandes áreas, geração de mapas e aerofotogrametria, ou seja, em áreas em que o plano horizontal é o principal. O modo oblíquo, por sua vez, é utilizado para mapear e modelar objetos ou áreas com maior precisão quanto à volumetria, ou seja, em casos em que há predominância tanto do plano horizontal quanto vertical.

De modo geral, o modo ortogonal traça uma trajetória de voo (nadiral), enquanto o modo oblíquo traça 5 trajetórias: 1 ortogonal e 4 inclinadas, com a câmera apontada para as diferentes orientações (N, S, L, O).

O tempo de voo das missões e a quantidade de dados a serem coletados (relacionados com a altitude e sobreposição de imagens), são parâmetros que devem ser dosados, de acordo com a finalidade de cada missão, pois, quanto maior o tempo de voo, maior a demanda de bateria requerida. Além disso, os dados coletados precisam ser posteriormente processados, para a geração de modelos, e esse processamento é demorado e requer configurações avançadas de computação, caso os dados sejam muito densos (OKESON *et al.*, 2019).

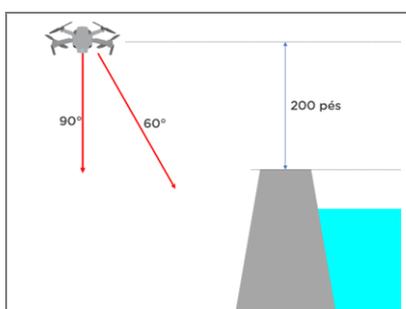
Para criar um plano de voo no *software* DJI® Drone Deploy, o usuário insere a localização no mapa e delimita as áreas do mapeamento. Os principais parâmetros a serem inseridos/configurados são: 1) altitude do voo; 2) percentual de sobreposição das imagens e; 3) inclinação da câmera em caso de mapeamento oblíquo. Quanto maior a altitude, menor a resolução espacial da câmera. Por outro lado, quanto maior a altitude, menos tempo de voo é necessário, pois a área é coberta com menor número de imagens, consumindo assim menos bateria. De

forma similar, quanto maior é a sobreposição utilizada, mais imagens são capturadas.

Para a geração do modelo tridimensional na Barragem Rodolfo da Costa e Silva, optou-se pela realização de voo com captura de imagens ortogonais e oblíquas, pois a área da barragem selecionada para a inspeção, correspondente ao barramento de concreto, possui duas dimensões principais: horizontal e vertical.

Na Barragem Rodolfo da Costa e Silva, a altitude de voo (1) foi selecionada considerando o tempo de bateria necessário para a realização das trajetórias (5 trajetórias para mapeamento oblíquo). Dentre as três baterias disponíveis, o objetivo era utilizar uma bateria para o voo controlado e duas baterias para o voo manual. Assim, foi definida a altura de 200 pés, para que os voos fossem realizados com segurança, na limitação de autonomia selecionada. Além disso, foi considerado que a barragem é inserida em um meio rural, na qual existem muitos pássaros na região, que poderiam interferir na missão de voo. Assim, quanto maior a altura, menor a probabilidade de pássaros circulararem o *drone* em voo. O percentual de sobreposição de imagens (2) foi definido em 65 %, pois esse número é o padrão sugerido pelo *software* DJI® Drone Deploy nas configurações padrões, para fins de mapeamento e geração de modelos tridimensionais. A inclinação da câmera (3) em 60 % foi selecionada para que o *drone* pudesse capturar, à altura de voo selecionada, feições horizontais da barragem. A Figura 42 ilustra os ângulos de inclinação da câmera do *drone*.

Figura 42 – Esquema ilustrativo da inclinação da câmera do *drone*



Fonte: elaborado pela autora.

Para a geração do modelo tridimensional na Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim (DNOS), optou-se pela realização de voo com captura de imagens ortogonais (nadirais), pois a região da barragem selecionada para a inspeção é predominantemente horizontal, devido à inclinação da barragem e a grande abrangência da área.

Na Barragem do DNOS, a altitude de voo (1) foi selecionada considerando a autonomia necessária para a realização da trajetória, cobrindo a área selecionada. Optou-se pela configuração de voo que consumisse apenas uma bateria. O percentual de sobreposição de imagens (2) foi definido em 65 %, também seguindo o padrão sugerido pelo *software* para fins de mapeamento e geração de modelos tridimensionais. A inclinação da câmera (3) foi de 90 %, ou seja, configuração nadiral/ortogonal.

As fotografias foram coletadas nas dimensões de 4056 x 2280 de resolução, sendo essa a capacidade máxima de resolução da câmera do *drone* utilizado.

A Tabela 1 relaciona as características do voo controlado para ambas as barragens do estudo. A Figura 43 exibe em a) as trajetórias traçadas para coleta de imagens na Barragem Rodolfo da Costa e Silva, e em b), a trajetória percorrida na Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.

Tabela 1 – Relação das características de voo controlado

	<i>Rodolfo da Costa e Silva</i>	<i>DNOS</i>
<i>Área coberta</i>	8.093,71 m ² (2 acres)	141.640,00 m ² (35 acres)
<i>Altitude</i>	60,69 m a partir da crista (200 pés)	76,20 m a partir da crista (250 pés)
<i>Resolução da cobertura</i>	0,66 cm/pixel	1,77 cm/pixel
<i>Tempo de voo</i>	15:36 min	22:47 min
<i>Modo de captura</i>	Oblíquo	Ortogonal
<i>Número de trajetórias</i>	1	5
<i>Inclinação da câmera</i>	60 °	-90 °
<i>Sobreposição das imagens</i>	65 %	65 %
<i>Número de imagens</i>	217	372
<i>Número de baterias</i>	1	2
<i>Data e hora das coletas</i>	22/01/22 – 16:47	23/01/22 - 08:51

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 43 – Em a), trajetórias de voo traçadas para a barragem Rodolfo da Costa e Silva e em b), a trajetória traçada para a barragem do DNOS



Fonte: a autora, imagens do software DJI® Drone Deploy.

3.4.2 Vídeos coletados com voo manual

Os vídeos foram adquiridos no formato Full-HD, com taxa de transmissão de 30 *frames* por segundo. Para os vídeos, optou-se por utilizar a gravação em formato Full HD em vez do formato 4K, pois os vídeos ocupariam muita memória, o que dificultaria não apenas a transmissão dos dados, mas também o compartilhamento dos vídeos.

Na barragem Rodolfo da Costa e Silva, foram registrados 11 pequenos vídeos, com duração variando de 32 s até 1 min e 06 s. O tempo total de vídeo registrado foi de 8 min e 35 s, somando 2,06 GB de tamanho. A altura da coleta variou de, aproximadamente, -5 a 25 m, contados a partir da crista, e a distância do alvo, variou de aproximadamente 5 a 30 m.

Os vídeos foram coletados, na Barragem Rodolfo da Costa e Silva, levando em consideração a interferência de obstáculos como árvores, que impossibilitam a aproximação, além de uma linha de distribuição de energia situada a jusante da barragem. Ademais, em elementos mais extensos como taludes e cristas, a coleta se deu em maior altura ou distância, para possibilitar a abrangência total do elemento em tempos reduzidos de voo, otimizando a capacidade de autonomia das baterias do *drone*. Cabe ainda ressaltar que, na coleta de imagens dos parâmetros de jusante da barragem, havia incidência de vento, devido à configuração do relevo no entorno do reservatório.

Por esses motivos, não foram padronizadas as alturas e distâncias de coleta de dados. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de voo para cada vídeo coletado, relacionando com o elemento ou estrutura da barragem correspondente.

Tabela 2 – Parâmetros de voo para coleta dos vídeos manuais na barragem Rodolfo da Costa e Silva

<i>Identificação vídeo</i>	<i>Alvo</i>	<i>Altura coleta a partir da crista aprox. (m)</i>	<i>Distância do alvo aprox. (m)</i>	<i>Duração (min)</i>	<i>Tamanho (MB)</i>
1 – PJD	Parâmetro de jusante - direita	0	10 a 30	00:33	148,95
1 – PJE	Parâmetro de jusante - esquerda	0	10 a 20	00:34	154,26
2 – PMD	Parâmetro de montante - direita	2	5	00:49	142,71
2 – PME	Parâmetro de montante - esquerda	2	5	00:46	138,15
3 – CR	Crista	25	25	00:57	253,28
4 – SLM	Soleira a montante	2	5	01:05	289,81
5 – V1	Vertedouro	3	5 a 20	00:42	188,00
5 - V2	Vertedouro	0	5 a 20	00:33	148,51
6 – DIS	Bacia de dissipação	- 5	20	00:32	145,57
7 – PP	Ponte – pilares	0	10	01:06	295,11
7 - PV	Ponte - vigas	-3	5	00:58	257,10

Fonte: elaborado pela autora.

Na barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim (DNOS), foram registrados 12 vídeos, com duração variando de 11 s a 2 min e 58 s. O tempo total de vídeo foi de 14 min e 3 s, com 770 MB de tamanho. A altura da coleta variou de, aproximadamente, 3 a 40 m, e a distância do alvo, variou de aproximadamente 3 a 30 m.

Os vídeos foram coletados na Barragem do DNOS levando em consideração a interferência de obstáculos como árvores, que impossibilitam a aproximação, além de dificultar a visibilidade do *drone* por parte do piloto. Além disso, em elementos mais extensos como taludes e cristas, a coleta se deu em maior altura, para possibilitar a abrangência total do elemento em tempos reduzidos de voo, otimizando a capacidade de bateria do *drone*. Por esses motivos, não foram padronizadas as alturas e distâncias de coleta de dados. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de voo para cada vídeo coletado, relacionando com o elemento ou estrutura correspondente à Barragem do DNOS.

Tabela 3 – Parâmetros de voo para coleta dos vídeos manuais na barragem do DNOS

Identificação vídeo	Alvo	Altura coleta aprox. (m)	Distância do alvo aprox. (m)	Duração (min)	Tamanho (MB)
1 – TJ	Talude de jusante	30	30	01:01	271,69
2 – TM e CR	Talude de montante e crista	40	30	00:57	255,15
3 – SJ	Soleira a jusante	5	5	01:51	491,70
4 – SM1	Soleira a montante	3	5	01:40	442,00
4 – SM2	Soleira a montante	3	5	00:11	49,97
5 – V1	Vertedouro	4 a 12	2 a 10	02:44	724,44
5 – V2	Vertedouro	4 a 12	2 a 10	02:58	788,53
5 – V3	Vertedouro – muro lateral	10	5	00:57	252,84
5 – V4	Vertedouro – muro lateral circular	5	3 a 6	00:39	173,27
5 – V5	Vertedouro – laje fundo circular	20	20	01:30	399,72
6 – P1	Ponte	3	3	00:26	117,72
6 – P2	Ponte	3	3	00:39	175,03

Fonte: elaborado pela autora.

3.5 ANÁLISE DOCUMENTAL DAS FICHAS DE INSPEÇÃO AVALIADAS

As fichas de inspeção constantes no Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume II, da Agência Nacional de Águas e Saneamento (BRASIL, 2016c), para barragens de aterro e barragens de concreto foram analisadas documentalmente. O Anexo B desta dissertação apresenta na íntegra as fichas de inspeção analisadas.

Compete à ANA a coleta, armazenagem, tratamento, gestão e disponibilização para a sociedade as informações relacionadas à segurança de barragens no Brasil. Por esse motivo, a ANA institui fichas padronizadas para as inspeções de segurança de barragens (CNRH, 20112b).

Esta etapa da pesquisa se deu para a identificação de quais itens do *check-list* das fichas normativas podem ser aferidos visualmente com o uso de *drones*; quais as vantagens que a utilização de *drone* poderia trazer para auxiliar na aferição de cada item e; quais itens seriam possíveis de serem verificados, contudo, com certa limitação ou dificuldades.

Além disso, a análise dos itens constantes nas fichas norteou a decisão de quais itens dos *check-lists* seriam utilizados para elaboração dos questionários de

inspeção que foram submetidos a engenheiros participantes da etapa de inspeção virtual das barragens, com imagens obtidas com *drones*.

A análise documental se deu seguindo as recomendações encontradas na bibliografia, para a identificação e diagnóstico de anomalias, bem como pelo conhecimento da autora relacionado às inspeções de segurança em barragens e às operações com *drones*.

As fichas de inspeção sugeridas iniciam-se por itens de dados gerais da barragem, seguidos por infraestrutura operacional, considerando a documentação da barragem, a realização periódica de manutenção e a operação dos sistemas e equipamentos. Esses itens, contudo, não foram avaliados, pois não são relacionados diretamente às atividades de inspeção.

Como desenvolvimento metodológico desta etapa, as fichas de inspeção sugeridas pela ANA para barragens de aterro e de concreto foram classificadas quanto (Figura 44):

1) Possibilidade de detecção visual:

- a) Item detectável visualmente: anomalias, situações e manifestações patológicas que podem ser verificadas a uma distância maior do que 5 m de distância;
- b) Item dificilmente detectável visualmente: refere-se a situações a serem verificadas que precisam ser analisadas de perto, a uma distância inferior a 5m, se possível;
- c) Item de interpretação sensorial: algumas situações do *check-list* apresentado falam sobre odor, auscultação, ou percepção alheia à detecção visual e;
- d) Item interno ou de teste de operação: refere-se a itens a serem verificados, no momento da inspeção, no interior de galerias, poços de acionamento, casa de máquinas ou de controle, ou ainda, itens verificados mediante a operação das estruturas.

2) Facilidade ou complexidade de acesso:

- a) Itens de difícil acesso: situações em que o inspetor precisaria de equipamentos específicos de acesso ou trabalho em altura, ou ainda barcos ou similares, para navegação;

- b) Itens relacionados a áreas de grande extensão: elementos e estruturas as quais o inspetor precisaria percorrer grandes áreas para analisar (relativo também ao tamanho da barragem) e;
- c) Itens de fácil acesso ou localização pontual: itens os quais o inspetor não necessita percorrer grandes trajetórias, assim como sistemas ou subsistemas pontualmente localizados na barragem.

Figura 44 – Esquema da classificação adotada para análise documental das fichas de inspeção



Fonte: elaborado pela autora.

3.6 GERAÇÃO DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS

Para a geração do modelo tridimensional das barragens, utilizou-se o software Agisoft® Metashape Professional, versão 1.8.0.

O fluxo de trabalho para a geração desse tipo de modelo consiste, basicamente em: i) alinhamento de fotos; ii) construção da nuvem de pontos; iii) construção da malha tridimensional e; iv) construção da textura (AGISOFT, 2017). A Figura 45 exibe o fluxo de trabalho tradicional para a modelagem 3D no software utilizado. Adicionalmente, pode-se optar pela construção de modelo “ladrilhado” (*tilled model*), na qual cada face do modelo tridimensional é substituída pelos *pixels* das imagens correspondentes, resultando em um modelo com resolução mais fiel da região modelada. Contudo, essa ferramenta pode ser visualizada/aberta somente no software Agisoft® Metashape ou Agisoft® Viewer.

Para cada uma dessas etapas (comandos), o usuário pode escolher sobre a resolução do produto da etapa. Quanto maior a resolução escolhida, maior o tempo de processamento requerido e maior a demanda do desempenho computacional.

O processador computacional utilizado foi um Intel® Core(TM) i7, modelo 4510U, com velocidade de 2.00GHz. O computador possui memória RAM de 8 GB e placa de vídeo dedicada modelo Intel® HD Graphics 4400.

Figura 45 –Fluxo de trabalho padrão para geração de modelos tridimensionais no *software* Agisoft® Metashape Pro



Fonte: elaborado pela autora com base em AGISOFT (2017).

A Tabela 4 e Tabela 5 apresentam os parâmetros de processamento utilizados para ambas as barragens, para cada etapa do fluxo de trabalho. As precisões que o software permite são: máxima (*highest*), alta (*high*), média (*medium*), baixa (*low*) e mínima (*lowest*). Em cada etapa do fluxo de trabalho, foi realizada a tentativa da seleção de maior precisão possível. Contudo, devido às limitações de processamento computacional, algumas etapas foram interrompidas por erro no computador, devido à baixa capacidade do processador utilizado para a realização de determinada tarefa, com a precisão selecionada. Assim, a cada vez que o processamento retornava em erro, retomou-se a tentativa de processamento, reduzindo-se a precisão.

No final da geração do modelo, as áreas adjacentes que não representavam a barragem foram recortadas do modelo 3D, a fim de resultarem em arquivos mais leves, em termos de ocupação de memória (RAM e SSD). O modelo da Barragem Rodolfo da Costa e Silva possui 99 MB e o modelo da Barragem do DNOS 425 MB.

A Figura 46 e Figura 47 apresentam, para as Barragens Rodolfo da Costa e Silva e Barragem do DNOS, respectivamente, a posição e perspectiva de captura de cada fotografia sobre imagem de GPS da barragem.

Tabela 4 - Parâmetros de processamento para geração do modelo tridimensional para a barragem Rodolfo da Costa e Silva

<i>Etapa do processamento</i>	<i>Precisão</i>	<i>Tempo de processamento</i>
Alinhamento de fotos	Máxima	1 h e 28 min
Construção da nuvem de pontos	Média	13 h 26 min
Construção do modelo	Média	12 min
Construção da textura	-	56 min
Modelo ladrilhado	-	1 h e 9 min
Tempo total de processamento		17 h e 11 min

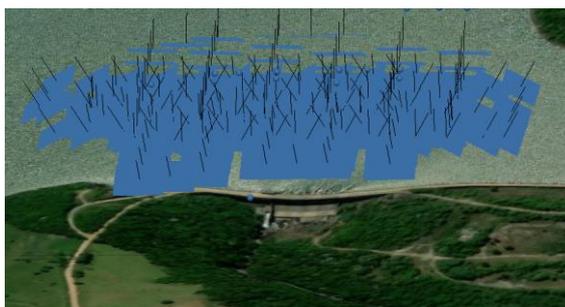
Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5 - Parâmetros de processamento para geração do modelo tridimensional para a barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim

<i>Etapa do processamento</i>	<i>Precisão</i>	<i>Tempo de processamento</i>
Alinhamento de fotos	Máxima	1 h 12 min
Construção da nuvem de pontos	Alta	4 h 12 min
Construção do modelo	Alta	7 h 16 min
Construção da textura	-	21 min
Modelo ladrilhado	-	3 h 50 min
Tempo total de processamento	-	16 h 51 min

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 46 – Posição e perspectiva de captura de cada fotografia sobre imagem de GPS da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: elaborado pela autora, com o software Agisoft® Metashape Pro

Figura 47 – Posição e perspectiva de captura de cada fotografia sobre imagem de GPS da Barragem do DNOS



Fonte: elaborado pela autora, com o software Agisoft® Metashape Pro.

3.7 INSPEÇÕES VIRTUAIS REALIZADAS POR ENGENHEIROS CIVIS ESPECIALISTAS

A etapa de teste da percepção de inspetores a partir da análise das imagens obtidas com *drone* contou com a participação de 12 voluntários, todos engenheiros civis com pós-graduação em fase de conclusão ou concluída, nas áreas de estruturas ou patologia das construções.

Os inspetores receberam um curso de preparação para inspeções de segurança de barragens, a fim de uniformizar termos, conceitos e importância da detecção das anomalias, além da apresentação de técnicas de inspeção e formas de percepção das anomalias.

O curso de preparação teve duração de 2h, foi realizado de forma virtual. Foram abordados os seguintes tópicos: a) Contextualização; b) Legislação; c) Inspeções de segurança; d) Tipos de barragens e arranjos; e) Principais anomalias e f) Explicação da atividade prática. Os tópicos “c” e “e” foram os que receberam maior ênfase, pois eram os objetivos do curso preparatório.

Cada inspetor recebeu um link para download de arquivos, nos quais constavam:

- 1) Vídeos para inspeção da barragem Rodolfo da Costa e Silva, conforme relacionado na Tabela 2;
- 2) Vídeos para inspeção da barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, conforme relacionado na Tabela 3;
- 3) Material de apoio em forma de texto, correspondente ao capítulo 2.4 desta dissertação, no qual são abordadas as principais anomalias e manifestações patológicas em barramentos de aterro e concreto;
- 4) Modelos tridimensionais de ambas as barragens, gerados a partir do software Agisoft® Metashape, disponibilizados de forma *online* na plataforma *Sketchfab* (sketchfab.com), que permite visualização, navegação e manipulação dos modelos.
- 5) Questionários de inspeção em arquivo de texto (.doc), na qual o inspetor foi instruído a responder cada questão, inserir seus comentários e apontar em imagem (*print screen*) do vídeo, quais as anomalias que identificou (caso tenha identificado). Para cada barragem, a ficha foi organizada conforme a divisão de elementos/estruturas associadas selecionadas como amostra para essa pesquisa.

As fichas continham imagens explicativas que demonstravam quais eram as estruturas, o sentido de captura do vídeo e qual o nome do arquivo correspondente. Os questionários são apresentados no subcapítulo subsequente.

3.7.1 Questionários de inspeção

Para a barragem Rodolfo da Costa e Silva, foram considerados na inspeção os seguintes elementos/estruturas associadas: a) parâmetros de jusante (lados direito e esquerdo do vertedouro), b) parâmetros de montante (lados direito e esquerdo do vertedouro), c) crista, (d) soleira do vertedouro, e) vertedouro, f) bacia de dissipação, g) ponte e h) ombreiras (direita e esquerda), conforme apresentado no capítulo 3.1 desta dissertação, na Figura 37.

O Quadro 4, constante no ANEXO A apresenta as perguntas constantes no questionário de inspeção, divididas para cada elemento ou estrutura associada, para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva.

A análise da barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim foi dividida nos seguintes elementos e estruturas associadas: (a) talude de jusante, (b) talude de montante, (c) crista, (d) soleira do vertedouro, (e) vertedouro (muros laterais e laje de fundo), (f) bacia de dissipação e (g) ponte.

O Quadro 5, constante no ANEXO A apresenta as perguntas constantes no questionário de inspeção, divididas para cada elemento ou estrutura associada para a barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de cada etapa de trabalho realizada nesta pesquisa. Primeiramente, é abordado sobre a análise documental das fichas de inspeção sugeridas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento. Na sequência são discutidos sobre os modelos tridimensionais gerados. Por fim, são apresentados e sintetizados os resultados acerca das inspeções virtuais realizadas por engenheiros civis especialistas.

4.1 ANÁLISE DOCUMENTAL DAS FICHAS DE INSPEÇÃO AVALIADAS

Conforme mencionado no subcapítulo 3.5, as fichas de inspeção sugeridas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento para barragens de aterro e concreto foram documentalmente analisadas e os itens dos *check-lists* foram classificados, em termos de (1) possibilidade de detecção visual e (2) Facilidade de acesso ou área de grande extensão.

A ficha de inspeção para barragens de aterro é bastante similar à ficha de inspeção para barragens de concreto, sendo a principal diferença que os barramentos de aterro apresentam itens inerentes relacionados a taludes, e os barramentos de concreto apresentam itens de anomalias e manifestações patológicas relacionadas aos parâmetros de concreto. Sendo assim, os resultados são apresentados agrupados para ambas as fichas, porém considerando essa diferença dos barramentos, quanto ao material construtivo.

Verifica-se que os termos utilizados nas fichas de inspeção da ANA são genéricos, como por exemplo: “estado das vigas”, “estrutura das vigas e tabuleiro”, “sinais de umidade ou áreas úmidas”, “danos”, dentre outros. Dessa forma, a inspeção, segundo as fichas de inspeção dos guias brasileiros, possui certa subjetividade, relacionada com a falta de especificidade dos termos utilizados, que pode ser refletida em diferentes percepções, dependendo do inspetor e da circunstância.

Como recomendações ou possibilidades, verifica-se que as classificações adotadas na análise documental desta pesquisa, para os itens do *check-list* poderiam ser utilizadas para nortear inspeções em “multi-escala”, conforme o estudo realizado por Okeson *et al.* (2019), nos quais as áreas de melhor possibilidade de

detecção visual sejam levantadas com *drone* com menor aproximação e, áreas de maior dificuldade de detecção visual sejam levantadas com *drone* com melhor aproximação ao alvo.

Ademais, verifica-se que a utilização de fichas de inspeção em formatos de *check-list* são boas opções para auxiliar o piloto na forma pela qual o mesmo irá desempenhar a captura de imagens com *drone*. Assim, é necessário que antes da etapa de coleta de imagens, haja um procedimento de preparação das inspeções, seleção dos ângulos de coleta e proximidade adequada ao alvo, considerando as estruturas e itens a serem analisados.

4.1.1 Possibilidade de detecção visual

Os itens das fichas que foram considerados possíveis de serem detectados visualmente, ou seja, anomalias que podem ser aferidas a partir de imagens obtidas com *drone*, são abaixo relacionados, de acordo com a estrutura:

- a) Talude de montante (barramentos de aterro): erosões; escorregamentos; afundamentos e buracos; árvores e arbustos; deslocamento de blocos de rocha pelo efeito de ondas; *rip-rap*; erosão no encontro das ombreiras e; animais pastando;
- b) Crista (barramentos de aterro): erosões; fissuras; revestimento; recalques; árvores e arbustos; meio-fio e; depressões.

Ressalta-se que “fissuras” para barramentos de aterro é um termo genérico apontado pelas fichas de inspeção, não fazendo distinção entre os termos que a própria ANA sugere para referenciar as anomalias, de acordo com o tamanho da abertura.

- c) Talude de jusante (barramentos de aterro): erosões; escorregamentos; fissuras; proteção granular e vegetal; afundamentos e buracos; árvores e arbustos; sinais de movimento; sinais de fuga ou áreas úmidas e; animais pastando.

As fichas de inspeção utilizam os termos “sinais de fuga água ou áreas úmidas”, genericamente para designar surgências. Ressalta-se que esse tipo de anomalia pode ser detectado facilmente visualmente pelas mudanças de cor na

proteção vegetal ou granular. No entanto, o tato e a percepção no local podem ser entendidos como situações de percepção sensorial.

- d) Parâmetro de montante (barramentos de concreto): presença de vegetação; ocorrência de trincas no concreto; ferrugem do concreto exposta; deterioração da superfície do concreto e; abertura de juntas de dilatação.
- e) Crista (barramentos de concreto): trincas ou rachaduras (com abertura superior a 2 mm); ferrugem exposta; deterioração da superfície; juntas de dilatação danificadas; desalinhamento e corrosão no guarda-corpo; corrosão nos postes de iluminação e; corrosão no pórtico.

Fissuras com aberturas inferiores a 2 mm são dificilmente detectadas por imagens sem que haja boa aproximação. No entanto, os estudos de Khaloo *et al.* (2018) e Feng *et al.* (2020) demonstraram que é possível identificar fissuras através de imagens obtidas com *drone*.

- f) Parâmetro de jusante (barramentos de concreto): trincas ou rachaduras; ferrugem exposta; deterioração da superfície do concreto; juntas de dilatação danificadas (infiltrações) e; sinais de percolação ou áreas úmidas.
- g) Ombreiras a montante: desmatamento na área de proteção e construções irregulares; erosão nas ombreiras; desmoronamento nas margens, assoreamento e; sinais de movimento.

Salienta-se que o item “assoreamento” pode ser identificado visualmente quando há formação de praias ou vegetação terrestre no reservatório. Assoreamento ao fundo do reservatório, contudo, só poderia ser aferido com o esvaziamento do mesmo.

- h) Ombreiras a jusante: desmatamento na área de proteção; desmoronamento nas margens; sinais de movimento; surgência de água e manchas de umidade e; árvores e arbustos.
- i) Reservatório: Réguas danificadas ou faltantes; construções em áreas de proteção; erosões; assoreamento; desmoronamento nas margens; existência de vegetação aquática excessiva; desmatamento na área de proteção; animais pastando.

- j) Região a jusante da barragem: sinais de movimento na rocha de fundação; desintegração ou decomposição da rocha; construções irregulares e; árvores e arbustos ao pé da barragem.
- k) Canais de aproximação do vertedouro: árvores e arbustos; obstrução ou entulhos; desalinhamento dos taludes e muros laterais; erosões ou escorregamentos nos taludes.
- l) Soleira do vertedouro: trincas ou rachaduras no concreto; ferragem exposta; deterioração da superfície do concreto; descalçamento da estrutura; juntas danificadas; sinais de deslocamento das estruturas; ocorrência de buracos; sinais de percolação ou áreas úmidas.
- m) Bacia de dissipação: trincas ou rachaduras no concreto; ferragem exposta; deterioração da superfície do concreto; buracos na bacia; erosões; presença de entulhos; presença de vegetação; falha no enrocamento de proteção.
- n) Muros laterais do vertedouro: erosão no contato dos muros; trincas ou rachaduras no concreto; ferragem do concreto exposta e; deterioração da superfície do concreto.
- o) Comportas do vertedouro: crescimento de vegetação na estrutura.
- p) Entrada da tomada d'água: assoreamento; obstrução e entulhos; falta da grade de proteção; defeitos na grade e; passarela de acesso.
- q) Comportas da tomada d'água: crescimento de vegetação na estrutura.
- r) Estrutura da torre de tomada d'água / poço de acionamento: ferragem exposta da estrutura; escada e passadiço e; guarda-corpo (escada e passadiço).
- s) Boca de montante/entrada: assoreamento; obstrução e entulhos; ferragem do concreto exposta; deterioração da superfície do concreto; falta da grade de proteção e; defeitos na grade de proteção.
- t) Estrutura de saída da galeria de fundo: sinais de abrasão ou cavitação; surgências; precariedade de acesso; construções irregulares; defeitos no concreto e; defeitos na cerca de proteção.
- u) Medidor de vazão: ausência da placa; corrosão da placa; defeitos no concreto; assoreamento da câmara de medição e; erosão a jusante do medidor.
- v) Estradas de acesso: estado do pavimento e; água estagnada no pavimento.
- w) Ponte: pilares; vigas e tabuleiros e; apoios.

Verifica-se que a maioria dos itens constantes nas fichas de inspeção analisadas são referentes a anomalias que podem ser percebidas a distâncias maiores do que 5 metros, de forma visual.

Os itens das fichas de inspeção de barragens que foram considerados dificilmente detectáveis visualmente, ou seja, anomalias que podem ser aferidas a partir de imagens obtidas com *drone*, contudo com certa limitação, são abaixo relacionados, de acordo com a estrutura. Essa classificação reflete situações em que é necessário realizar análise pontual ou de perto, para a constatação de anomalias. No entanto, são itens visualmente detectáveis e que, com devida aproximação, podem ser aferidos com o uso de imagens obtidas com *drone*.

- a) Talude de montante (barramentos de aterro): formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais.

Para a identificação dessas anomalias, acredita-se que seja necessário obter imagens a uma distância inferior a 5 m, pois formigueiros e tocas de animais podem ser sutis de serem observados, mesmo com a vegetação do talude em boas condições de manutenção. Além disso, o fato de o talude ser uma estrutura de grande extensão na barragem, comparado com as outras estruturas que as compõem, pode ser inviável a realização de levantamento de todo o talude com drone a distâncias tão próximas (inferiores a 5 m). A exemplo dessa situação, apresenta-se a Figura 48, na qual existem formigueiros próximos a uma pedra, que se apresentam sutis e de difícil detecção.

Figura 48 – Formigueiros constatados na inspeção in loco na Barragem do DNOS



Fonte: a autora. Imagem registrada com telefone celular em 21/10/2021.

- b) Crista (barramentos de aterro): defeitos na drenagem da crista/pavimento e; formigueiros, cupinzeiros e tocas de animais.

- c) Talude de jusante (barramentos de aterro): formigueiros, cupinzeiros e tocas de animais e; carreamento de material na água dos drenos.
- d) Parâmetro de montante (barramentos de concreto): erosão nos encontros das ombreiras.
- e) Crista (barramentos de concreto): movimentos diferenciais entre blocos (nas juntas).

A movimentação entre blocos pode ser verificada pela observação do aspecto das juntas. Contudo, algumas situações, como a apresentada na Figura 49, são de difícil percepção através de imagens. A Figura 49 mostra um desalinhamento que existe entre guarda-corpos adjacentes na Barragem Rodolfo da Costa e Silva. No entanto, esse desalinhamento ocorre apenas no guarda-corpo, e não reflete no barramento.

Figura 49 – Desalinhamento percebido nos guarda-corpos da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: a autora. Imagem registrada com telefone celular em 15/09/2021.

- f) Parâmetro de jusante: sinais de movimento; carreamento de material na água dos drenos e; vazão nos drenos de controle (aferição).
- g) Ombreiras a montante: cavernas e buracos nas ombreiras e; trinca nas ombreiras.
- h) Ombreiras a jusante: cavernas e buracos nas ombreiras; trinca nas ombreiras e; carreamento de finos.
- i) Reservatório: presença de animais ou peixes mortos.
- j) Região a jusante da barragem: *piping* nas juntas rochosas.
- k) Canais de aproximação do vertedouro: erosão na base dos canais escavados e; erosão a jusante dos canais.
- l) Bacia de dissipação: erosão na base dos canais escavados.

m) Muros laterais do vertedouro: erosão na fundação.

A Figura 50 mostra a constatação de erosão do solo na porção lateral do muro do canal do vertedouro da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, na inspeção *in loco* realizada em 21 de outubro de 2021.

Figura 50 – Erosão no muro lateral direito do vertedouro da Barragem do DNOS



Fonte: a autora. Imagem registrada com telefone celular em 15/09/21.

- n) Comportas do vertedouro e da tomada d'água: corrosão; amassamento e falha na pintura de peças fixas e estrutura; vazamento nas vedações e; água estagnada sobre os braços da comporta.
- o) Estrutura de saída da galeria de fundo: vazamento nos dispositivos de controle; corrosão e vazamentos na tubulação; falta ou deficiência de drenagem da caixa de válvulas e; presença de pedras e lixo dentro da caixa de válvulas.
- p) Medidor de vazão: falta na escala de leitura da placa medidora.

Os itens das fichas de inspeção de barragens que foram considerados internos, e por isso, não são possíveis de serem inspecionados com *drones*, além dos itens que dependem de teste, ou seja, da operação de válvulas ou equipamentos para verificação do funcionamento, são:

- a) Instrumentação: leitura dos instrumentos e aferição do funcionamento dos mesmos.

- b) Comportas do vertedouro: defeito nas rodas ou hastes de içamento; defeitos nos rolamentos ou buchas e retentores e; defeitos no ponto de içamento.
- c) Tomada d'água: tubulação danificada; registros defeituosos; acionamento de comportas; deterioração do portão de abrigo de manobra; deterioração da instalação de controle e; mancais.
- d) Boca de montante: peças fixas e estrutura do stop-log e; defeitos no acionamento e ponto de içamento.
- e) Estrutura de saída da galeria de fundo: defeitos nos dispositivos de controle.
- f) Ponte: estacas.
- g) Galeria de drenagem e injeção (barramentos de concreto).
- h) Galeria de tomada d'água.

Os itens de interpretação sensorial, ou seja, que dependem de olfato ou audição do inspetor, constantes nas fichas da ANA são:

- a) Reservatório: Poluição por esgoto, lixo ou pesticidas e; indícios de má qualidade da água.
- b) Estrutura de saída da galeria de fundo: ruídos estranhos.

4.1.2 Facilidade de acesso ou área de grande extensão

As estruturas ou elementos das barragens, constantes nas fichas de inspeção analisadas, que foram considerados de difícil acesso são: Parâmetro de montante; parâmetro de jusante; boca de montante ou de entrada; vertedouro; soleira do vertedouro; comportas do vertedouro e; ponte. Essas estruturas necessitam, na maioria dos casos, de equipamentos de apoio para inspeção, como rapel, barcos ou plataformas.

As estruturas e elementos das barragens, inscritas nas fichas de inspeção, que foram consideradas de grandes áreas, ou seja, aquelas em que, frequentemente, o inspetor precisaria percorrer longa trajetória para a inspeção, são: talude de montante; talude de jusante; crista; canais dos vertedouros; muros laterais dos vertedouros; bacias de dissipação; região a jusante da barragem; torre de tomada d'água; margens do reservatório e; reservatório.

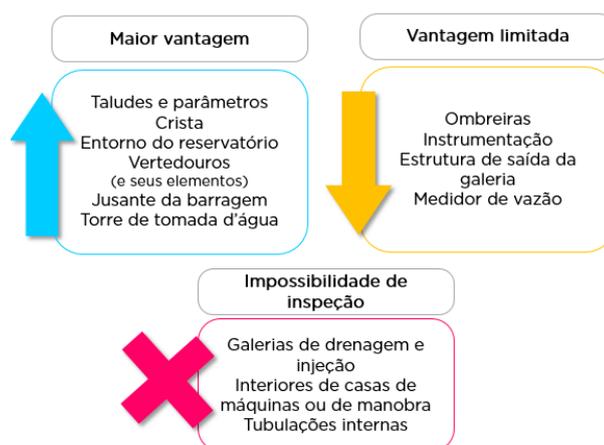
Sendo assim, as estruturas e elementos classificados como de difícil acesso e grandes áreas, representam as principais situações em que o uso de *drones* seria vantajoso nas inspeções de segurança de barragens.

Na classificação de fácil acesso ou localização pontual, enquadraram-se as seguintes estruturas e elementos das barragens (constantes nas fichas analisadas): ombreiras a montante; ombreiras a jusante; instrumentação; estrutura de saída da galeria e; medidor de vazão. As galerias de fundo e galerias de drenagem e injeção foram enquadradas nessa categoria, como localização pontual, embora algumas sejam de difícil acesso ou representem grandes trajetórias de inspeção.

As estruturas ou elementos classificados como fácil acesso ou localização pontual representam as análises em que o inspetor pode eventualmente utilizar *drone*, contudo, não refletem situações tão vantajosas ou estratégicas como as classificadas em difícil acesso ou grandes áreas.

A Figura 51 mostra um esquema dos resultados da classificação quanto à facilidade de acesso ou áreas de grande extensão, na qual são percebidos quais os elementos e estruturas correspondem à maior ou menor vantagem para a inspeção com o uso de *drones* e quais não são possíveis de serem inspecionados com o uso de *drones*.

Figura 51 – Esquema dos resultados quanto à classificação de acesso ou grandes áreas, em termos de vantagens da utilização de *drones* para inspeção



Fonte: elaborado pela autora.

4.2 MODELOS TRIDIMENSIONAIS

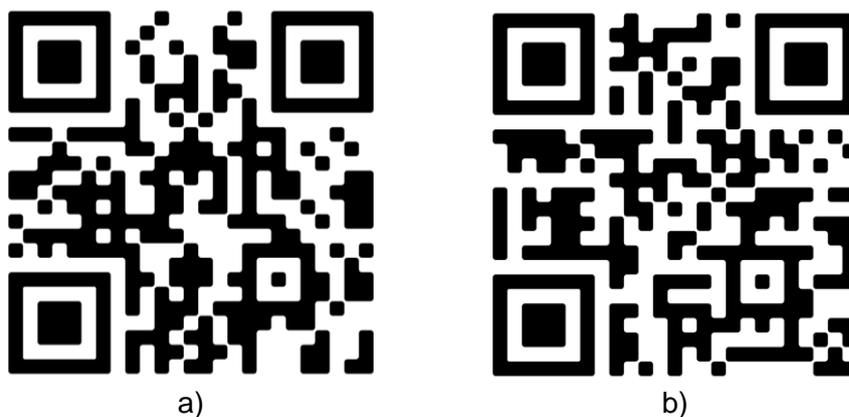
A utilização de modelos tridimensionais para inspeções com *drones* é tendência verificada na revisão bibliográfica. Os estudos encontrados na literatura da utilização desse tipo de produto para inspeções de barragens, contudo, utilizam de capacidades computacionais avançadas de processamento, câmeras específicas, combinação de métodos e voos de longa duração, com o consequente consumo de baterias, ou a necessidade de realização de vários voos distintos.

Esses estudos, contudo, para a aplicação prática, eventualmente podem ser inviáveis para o empreendedor, pois necessitariam de equipamentos específicos e pessoas especializadas para a realização.

Na presente pesquisa utilizou-se *drone* comercial, sem a utilização de sensores específicos, e os processamentos para a geração dos modelos 3D foram realizados em um computador de uso pessoal, ou seja, um equipamento com limitações computacionais de processamento e desempenho gráfico. Esses parâmetros foram selecionados para que os empreendedores pudessem facilmente construir modelos de suas barragens, com baixo custo de aquisição de equipamentos.

Os modelos tridimensionais gerados estão disponibilizados na plataforma *Sketchfab*, um visualizador e manipulador *online* de objetos tridimensionais. A Figura 52 apresenta códigos de acesso aos modelos tridimensionais gerados.

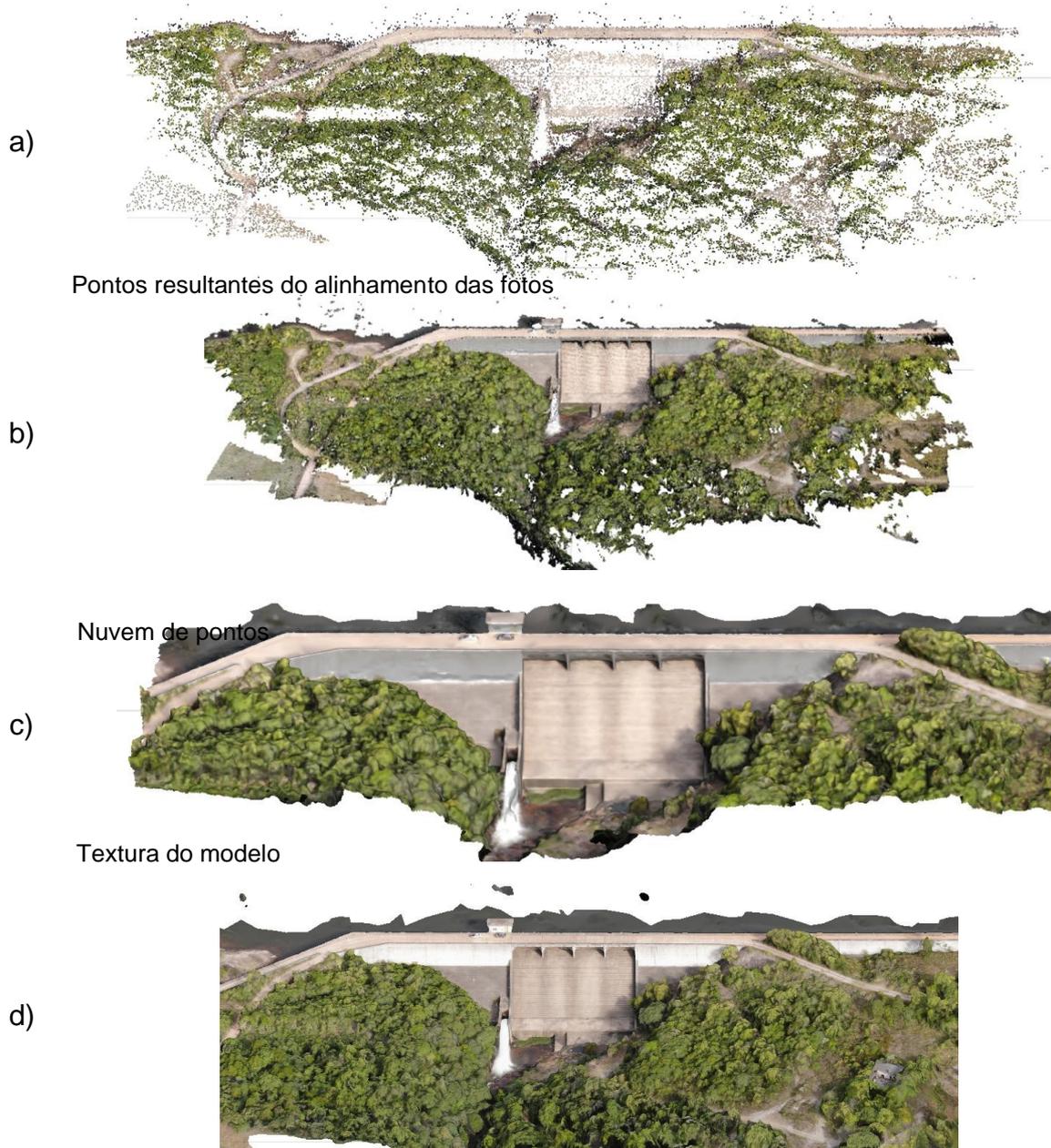
Figura 52 – QR Codes de acesso aos modelos tridimensionais das barragens Rodolfo da Costa e Silva (a) e Barragem do DNOS (b)



Fonte: a autora. Gerado pelo aplicativo QR Code Generator (<qr-code-generator.com>).

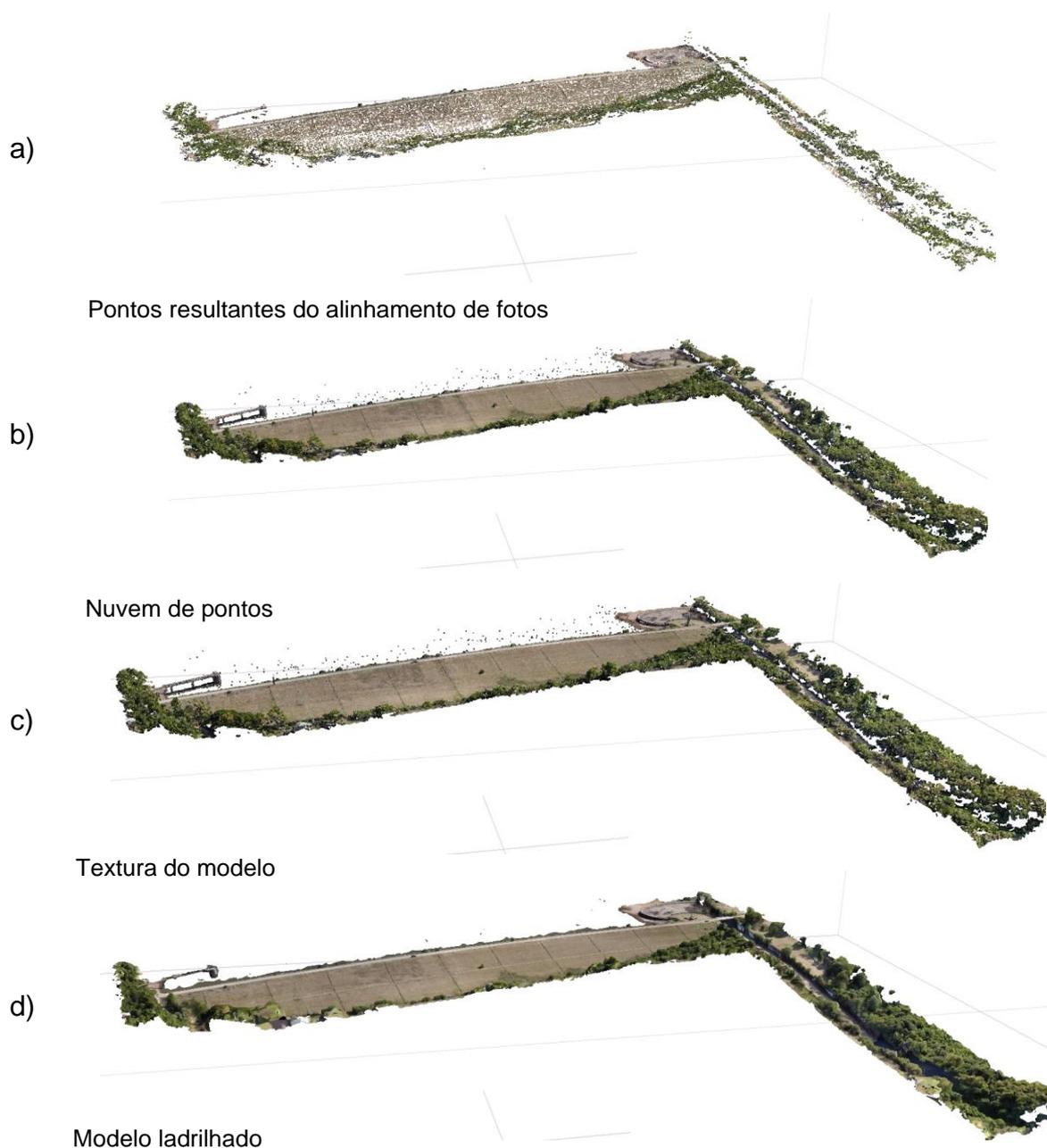
A Figura 53 e Figura 54 apresentam, para as Barragens Rodolfo da Costa e Silva e Barragem do DNOS, respectivamente, imagens resultantes de cada etapa de processamento. Em a) os pontos resultantes da etapa de alinhamento de fotos; em b), a nuvem de pontos construída; em c) a textura construída sobre a malha e; em d) o modelo ladrilhado (*tiled model*).

Figura 53 – Resultantes do processamento de cada etapa da construção do modelo tridimensional da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 54 – Resultantes do processamento de cada etapa da construção do modelo tridimensional da Barragem do DNOS



Fonte: elaborado pela autora.

Verifica-se que os modelos tridimensionais gerados representam fielmente as estruturas, de forma dimensional e possível de manipulação.

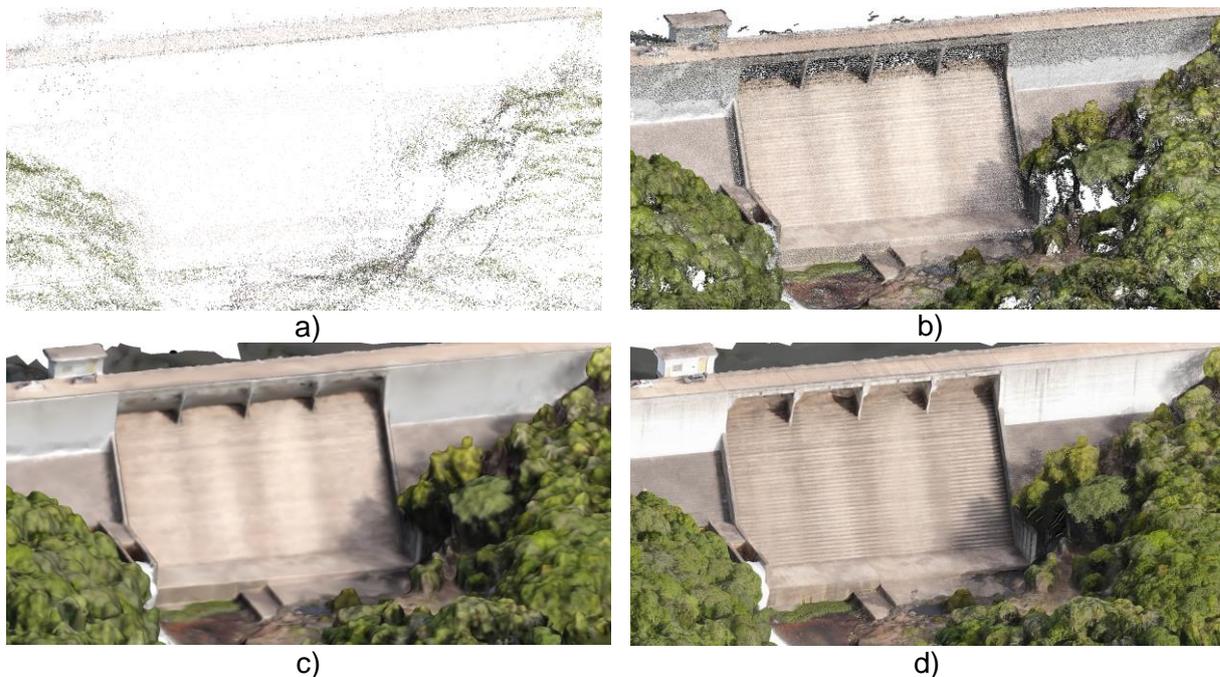
Contudo, devido aos parâmetros adotados de coleta de imagens e de limitações de processamento computacional, a resolução dos modelos não é considerada ideal para inspeções, mas pode ser utilizada para diversos outros fins. Dentre algumas dessas possibilidades, cita-se:

- Levantamento cadastral;
- Acompanhamento do estado de manutenção da barragem;
- Modelagem em BIM e reconstrução *as built*;
- Modelagem para simulações computacionais do comportamento estrutural, seja por elementos finitos, seja por outros métodos;
- Possibilidade de simulações de situações climáticas adversas e de escoamentos d'água;
- Capacidade de monitoramento temporal da barragem, mediante a geração de modelos tridimensionais em diferentes épocas;
- Possibilidade de avaliação da barragem por diversos especialistas, sem que os mesmos estejam presencialmente na barragem;
- Possibilidade de apontamento de determinadas anomalias no local exato de sua constatação, para guiar inspeções futuras e monitoramento das mesmas;
- Preparação de inspeções, tanto como *croquis*, ou como reconhecimento da barragem e do arranjo de seus componentes e;
- Localização espacial da barragem, para nortear os inspetores à análise de imagens coletadas *in loco* ou com o uso de *drones*;
- O *software* utilizado também permite a geração de curvas de nível e apoio para modelagem de dados batimétricos.

Destaca-se que as possibilidades de uso são diversas, e situações mais específicas, eventualmente, demandarão modelos gerados com maior resolução de imagens e de processamento. A Figura 55 e Figura 56 mostram, para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva e Barragem do DNOS, respectivamente, a comparação das etapas a) alinhamento de fotos; b) nuvem de pontos; c) textura e d) modelo ladrilhado, para determinadas regiões das barragens, de forma aproximada. Assim, é possível verificar a resolução obtida com cada etapa.

Verifica-se que, para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva, não é possível a identificação de anomalias, considerando os parâmetros de coleta e de processamento selecionados. Na Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, contudo, é facilmente perceptível a erosão do talude junto à ombreira esquerda, como exemplo.

Figura 55 – Região do vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: elaborado pela autora, com base nas imagens dos modelos tridimensionais.

Figura 56 – Região da ombreira esquerda da Barragem do DNOS



Fonte: elaborado pela autora, com base nas imagens dos modelos tridimensionais.

Para a geração dos modelos, no computador utilizado para processamento, verifica-se que não foi possível que as etapas fossem realizadas com a maior precisão disponibilizada no *software*, por limitação de capacidade computacional.

O tempo total de processamento, de 17h e 11 min, para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva e de 16 h e 51 min, para a Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, são tempos cabíveis de serem executados, considerando a importância que a utilização de modelos 3D podem significar na gestão de barragens. Por via de comparação, o estudo conduzido por Feng *et al.* (2020), que utilizou modelos tridimensionais para inspeções completas, levou 60 dias úteis para processamento.

Em termos de parâmetros de voo, verifica-se que, para a coleta de dados, são necessários apenas conhecimentos básicos de pilotagem de drones, pois a operação do *software* de voo controlado é simples e intuitiva. No entanto, o piloto precisa ter noções sobre a segurança de voo, além de respeitar as normas vigentes para a operação de *drones* no espaço aéreo brasileiro.

Recomenda-se que haja etapa de planejamento para as coletas de dados, visando a geração de modelos tridimensionais, considerando os seguintes parâmetros (entre outros):

- Delimitar a área a ser mapeada em escritório, criando o projeto de voo, abrangendo apenas a região da barragem, pois, o entorno da barragem será mapeado também, indiretamente;
- Ter disponibilidade de uso de várias baterias, para que as trajetórias possam ser conduzidas em menores altitudes, resultando assim em maior resolução do modelo;
- Selecionar datas para a inspeção com tempo estável, sem chuvas, e sem a incidência de ventos que possam interferir nos voos;
- Dar preferência para horários do dia, relacionados com o posicionamento solar, de forma que não incida sombra nas regiões da barragem, pois estas irão afetar o modelo gerado, conforme fora recomendado também por Khaloo *et al.* (2018).

4.3 RESULTADOS DAS INSPEÇÕES VIRTUAIS POR ENGENHEIROS ESPECIALISTAS

Neste subcapítulo, apresentam-se os resultados de cada questão dos questionários de inspeção que os doze engenheiros civis especialistas (100 % da amostra) receberam para a inspeção virtual de ambas as barragens. As “respostas esperadas” referem-se à identificação da existência ou inexistência de anomalias,

em conformidade com as situações que foram constatadas *in loco*, nas inspeções regulares realizadas.

Os questionários foram estruturados com perguntas direcionadas à determinada estrutura ou elemento da barragem. Para cada questão, apresenta-se a resposta esperada e o percentual de respostas consideradas corretas. Além disso, para cada questão, é brevemente discutido sobre os resultados da percepção/identificação de anomalias por parte dos inspetores, a partir das imagens coletadas com *drone*.

Ao final do questionário de cada barragem, apresentam-se a síntese e análise dos percentuais resultantes das questões. Em sequência, apresentam-se gráficos para as respostas das questões, de acordo com as divisões de elementos ou estruturas, aferindo assim acerca da capacidade de identificação de anomalias e manifestações patológicas com imagens obtidas com *drones*.

4.3.1 Barragem Rodolfo da Costa e Silva

a) Parâmetros de jusante

Questão 1. Você identifica FISSURAS, TRINCAS, RACHADURAS OU DESPLACAMENTO do concreto?

A resposta esperada é NÃO.

Para essa primeira pergunta sobre os parâmetros de jusante, todas as respostas obtidas (100 %) são coerentes e podem ser consideradas de acordo com o esperado, conforme abaixo explicado.

Dentre os doze entrevistados, oito (67 %) responderam que os parâmetros de jusante não tinham fissuras ou deslocamento no concreto.

Dois inspetores (16 %) indicaram uma fissura no parâmetro de jusante do lado direito, próximo ao vertedouro, conforme apresentado na Figura 57. A identificação dessa anomalia por parte dos inspetores é também considerada satisfatória, embora não se tenha certeza de que se trata realmente de uma fissura ou de alguma marca de concretagem, ou ainda de intervenção que possivelmente tenha sido realizada no local. Nesse caso, a recomendação seria de realizar nova verificação *in loco*, ou mesmo um novo acompanhamento com o uso de *drone*, para diagnosticar o fato.

O guarda-corpo da barragem, na parte correspondente ao parâmetro de jusante, é de concreto pré-moldado, acoplado ao barramento. Por esse motivo, também é possível associar a junta existente entre as duas estruturas à possíveis fissuras. Essa situação é mostrada na Figura 58. Nessa situação, não se trata exatamente de uma fissura estrutural, ou algo que precise ser documentado, pois não compromete a segurança da barragem. Contudo, trata-se de uma percepção dos inspetores, que identificaram a situação. Nesse caso, a circunstância ideal é que os inspetores conhecessem e estivessem familiarizados com o arranjo da barragem e seus métodos construtivos.

Figura 57 – Possível fissura no parâmetro de jusante do lado direito ao vertedouro



Fonte: a autora. Fotografia obtida a partir de telefone celular, na data de 02/09/2021.

Figura 58 – Encontro do guarda-corpo de concreto pré-moldado com o barramento no parâmetro de jusante



Fonte: a autora. Imagem obtida com câmera fotográfica convencional na data de 15/09/2021.

Questão 2. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível a identificação de danos significativos no concreto? (Relacionados com rachaduras e deslocamento). Dê uma nota de 1 a 5 (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

Para essa questão, a resposta média foi 3,16, na qual os inspetores consideraram a forma da coleta de dados entre “suficiente” e “bom”. Essa distribuição é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 2 do questionário da Barragem Rodolfo da Costa e Silva

<i>Resposta</i>	<i>Frequência da resposta</i>	<i>Percentual</i>
2: Ruim	5	42 %
3: Suficiente	1	8%
4: Bom	5	42%
5: Muito bom	1	8 %
TOTAL	12	100 %

Fonte: elaborado pela autora.

É importante ressaltar que a pergunta da questão 2 refere-se à possibilidade de identificação de danos “significativos”. Sendo assim, pode-se considerar que pequenas fissuras não seriam de fato significativas, e que danos de maior dimensão ou abertura, como rachaduras, seriam possíveis de serem detectadas à distância de 10 a 30 m do alvo, como a adotada para a coleta dos vídeos nos parâmetros de jusante.

Questão 3. As JUNTAS DE DILATAÇÃO estão danificadas?

A resposta esperada é SIM. Os danos nas juntas de dilatação são sutis, mas podem ser observados, principalmente pois existem algumas pequenas fraturas no concreto na região das juntas (Figura 59). Quanto ao material de vedação das juntas (poliuretano, neoprene, etc.), contudo, não pode ser aferido sobre a conservação do mesmo, pois a inspeção do material teria que ser realizada, com drone, a distâncias menores (preferencialmente inferior a 5 m). Nesse aspecto, observa-se a subjetividade entre o que os especialistas podem considerar entre a existência de dano ou não.

Para a questão, 50 % dos inspetores responderam que as juntas não estão danificadas e seis inspetores 50 % responderam que as juntas possuem danos.

Figura 59 – Danos constatados nas juntas de dilatação do parâmetro de jusante



Fonte: a autora. Fotografias de alta resolução obtidas com *drone*, na data de 02/09/2021.

Questão 4. Você identifica SINAIS DE PERCOLAÇÃO ou ÁREAS ÚMIDAS no parâmetro de jusante?

A resposta esperada é NÃO. Não existe sinal de percolação de água pelo interior da barragem, que poderiam ser identificadas nos parâmetros de jusante. Em alguns pontos da barragem, principalmente em juntas construtivas ou juntas de dilatação, existe uma certa criação biótica e/ou manchas de umidade. Contudo, essas manchas referem-se a umidades alheias a fenômenos de percolação da barragem. Exemplos dessas situações são apresentados na Figura 60, em a), do lado direito do parâmetro e em b), do lado esquerdo.

Dentre os inspetores que analisaram as barragens e responderam o questionário, 25 % responderam de forma esperada, que não havia sinais de umidade ou áreas úmidas e 75 % responderam que sim, que havia.

Os termos “sinais de percolação ou áreas úmidas” são utilizados nas fichas de inspeção para parâmetros de jusante de barragens de concreto, constantes nos guias normativos da Agência Nacional de Águas e Saneamento (Brasil, 2016c). Os termos fazem referência ao fenômeno de percolação de água pelo maciço, e não para a constatação de umidades genéricas.

Nesse caso, verifica-se que os termos “sinais de percolação ou áreas úmidas” não ficaram explícitos quanto ao seu objetivo, que é de referenciar o mecanismo de percolação.

Figura 60 – Exemplos de manchas de umidade e criações bióticas nos parâmetros de jusante da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: questionário de inspeção preenchido por inspetor, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletado em 22/01/2022.

b) Parâmetros de montante

Questão 5. Você identifica FISSURAS, TRINCAS, RACHADURAS OU DESPLACAMENTO do concreto dos parâmetros de montante?

A resposta esperada para essa pergunta é SIM.

Dentre os inspetores entrevistados, 50 % responderam afirmativamente, de acordo com a resposta esperada e outros 50 % responderam que não identificaram essas anomalias.

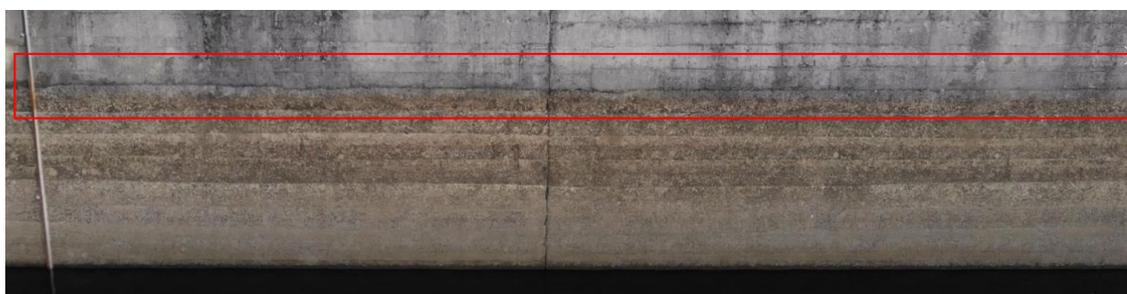
Existem duas trincas/rachaduras transversais que podem ser verificadas pelas imagens coletadas, próximas às juntas de dilatação (Figura 61 a) e b)). Além dessas trincas/rachaduras transversais, existem fissuras longitudinais em praticamente todo o parâmetro de montante, exatamente onde há a marca do nível normal do reservatório. Essa situação é apresentada na Figura 62.

Figura 61 – Trincas/rachaduras encontradas no parâmetro de jusante



Fonte: a autora. Imagens extraídas dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Figura 62 – Fissura longitudinal identificada nos parâmetros de montante

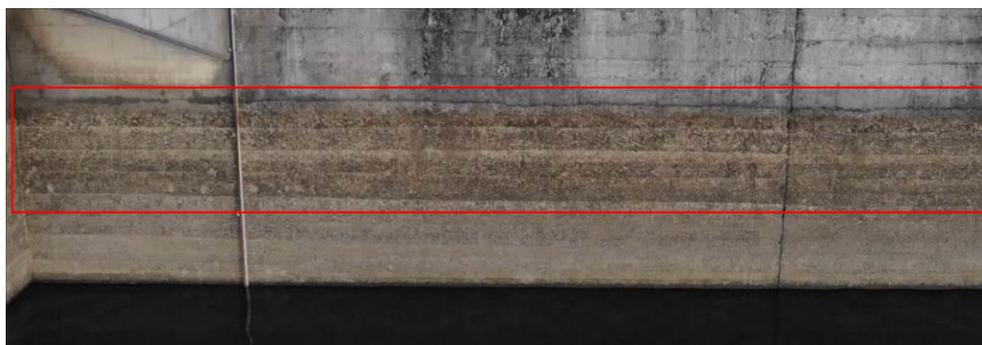


Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 6. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto?

A resposta esperada para essa questão é SIM. Existe deterioração superficial nos parâmetros de montante da barragem, principalmente próximos à borda livre, onde há ação de ondas que se chocam contra o parâmetro, além do próprio fluxo d'água do reservatório em direção ao vertedouro. Tal situação é mostrada na Figura 63.

Figura 63 – Aspecto geral do parâmetro de montante, no qual é possível verificar erosões superficiais do concreto



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Dentre os doze inspetores entrevistados, 67 % responderam que sim, apontando corretamente para a anomalia; 25 % responderam que não era possível identificar ou não havia esse tipo de deterioração. Um entrevistado (8 %) respondeu que sim, porém apontou para outro tipo de deterioração, que não é a procurada na questão, e sim, referindo-se à umidade ou criação biótica na superfície, o que foi considerado em desacordo com a resposta esperada.

Questão 7. As JUNTAS DE DILATAÇÃO estão danificadas?

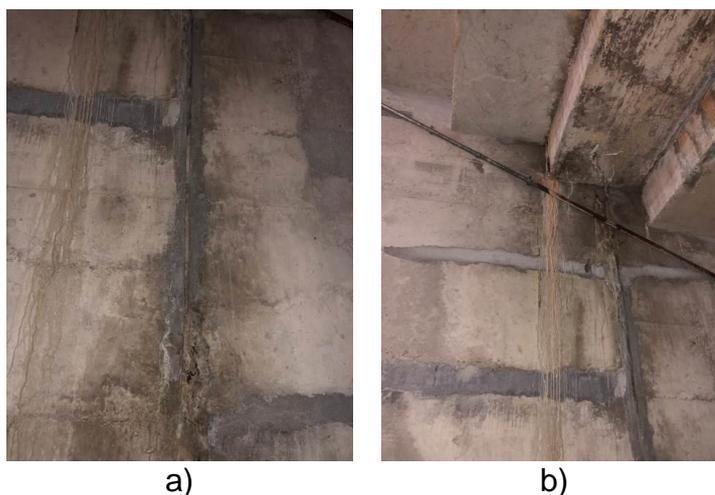
A resposta esperada para essa questão é SIM. As imagens apresentadas na Figura 61 apontam para algum tipo de dano nas juntas.

Do total de doze inspetores que analisaram as imagens da barragem, 42 % identificaram danos nas juntas de dilatação a montante, conforme a resposta esperada para a questão, e 58 % não identificaram nenhum dano.

Assim como no parâmetro de jusante, a verificação de danos nas juntas do parâmetro de montante é sutil, e não é possível aferir sobre a qualidade do material de vedação das juntas. Contudo, as pequenas fraturas e fissuras no concreto na região das juntas indicam para alguma falha nas juntas de dilatação.

Nas inspeções realizadas *in loco* na barragem, na galeria de drenagem e inspeção foi possível identificar fraturas do concreto nas juntas, infiltrações de água por entre as juntas e lixiviações. Além disso, pelo lado interno, houve algum tipo de intervenção de manutenção nas juntas de dilatação. Essas situações podem ser verificadas nas fotografias a) e b) da Figura 64.

Figura 64 – Juntas de dilatação do parâmetro de montante da barragem, observadas a partir da galeria interna



Fonte: a autora. Fotografia obtida a partir de telefone celular, na data de 02/09/2021.

Questão 8. Existe algum tipo de vegetação nos parâmetros de montante?

A resposta esperada para essa pergunta é NÃO. Não existe nenhum ponto em que há crescimento de vegetação, seja no parâmetro, nas juntas ou no reservatório.

Todos os inspetores (100 %) responderam corretamente, que não havia vegetação nos parâmetros de montante.

c) Crista

Questão 9. É possível perceber algum desalinhamento na barragem, a partir da crista?

A resposta esperada para a questão é NÃO.

83 % dos entrevistados responderam não identificar sinais de movimentação da estrutura a partir da crista, de acordo com o esperado, e 17 % responderam que havia sinal de desalinhamento.

De forma geral, a barragem não possui desalinhamentos ou sinais de movimentação, que sejam perceptíveis. No entanto, existem duas situações que, *in loco*, poderiam indicar desalinhamento da crista.

Uma delas trata-se de um trecho do guarda-corpo de concreto pré-moldado situado no parâmetro de jusante (Figura 65). É possível verificar desalinhamento no

trecho do guarda-corpo, a partir de um ponto de vista longitudinal da continuidade dos guarda-corpos. No entanto, o desalinhamento ocorreu somente nos guarda-corpos, sendo que os parâmetros de jusante em si não têm sinal algum de movimentação, o que indica que os guarda-corpos pré-moldados foram assentados/instalados com leve desalinhamento.

A outra situação que poderia significar desalinhamento trata-se de uma peça de guarda-corpo de concreto situado a montante (Figura 66). Nesse caso, por ser situada exatamente na curva da barragem, e por se tratar de um ponto no qual é possível que veículos manobrem, acredita-se que a falha ocorreu devido à colisão de um veículo no guarda-corpo, danificando-o.

Figura 65 – Falta de alinhamento nos blocos de guarda-corpos



Fonte: a autora. Imagem obtida com câmera fotográfica convencional na data de 15/09/2021.

Figura 66 – Guarda-corpo desalinhado de concreto situado a montante da crista

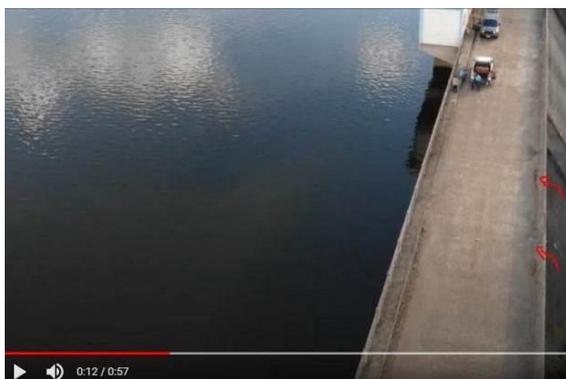


Fonte: a autora. Imagem obtida com câmera fotográfica convencional na data de 15/09/2021.

A Figura 67 mostra a indicação de local em que os dois inspetores perceberam desalinhamento a partir da crista. No entanto, essa indicação refere-se a sedimentos ou umidade que havia na pista, não sendo nenhum indicativo de desalinhamento.

Assim, verifica-se que sinais muito sutis precisam ser inspecionados *in loco*, para serem percebidos, ou ainda, que as imagens coletadas com *drone* fossem obtidas em ângulos e posições estratégicas (como visada longitudinal dos guarda-corpos) para serem identificados virtualmente.

Figura 67 – Imagem em que inspetores apontam para “possível desalinhamento na crista”, contudo trata-se de sedimento e/ou umidade acumulado no pavimento



Fonte: questionário de inspeção preenchido por inspetor, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletado em 22/01/2022.

Questão 10. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível a identificação de desalinhamentos ou sinais de movimentação dos blocos da barragem? Dê uma nota de 1 a 5 (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

A resposta média dos doze inspetores entrevistados foi 3,41, significando algo entre “suficiente” e “bom”. A Tabela 7 mostra a distribuição de frequências das respostas dos inspetores para a questão 10 do questionário.

Tabela 7 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 10 do questionário da Barragem Rodolfo da Costa e Silva

<i>Resposta</i>	<i>Frequência da resposta</i>	<i>Percentual</i>
2: Ruim	1	8 %
3: Suficiente	5	42 %
4: Bom	6	50%
TOTAL	12	100 %

Fonte: elaborado pela autora.

Questão 11. Você identifica DETERIORAÇÕES no pavimento ou nas calçadas?

A resposta esperada para essa questão é NÃO. Não existem deteriorações no pavimento ou calçadas, apenas algum acúmulo de sedimentos (terra, poeira) junto às bordas do pavimento.

Dentre os inspetores entrevistados, apenas 8 % (um inspetor) respondeu que não, de acordo com a resposta esperada, e os 92 % responderam sim, indicando para a mesma situação em seguida descrita, apresentada na Figura 68.

A situação que os inspetores perceberam como deterioração, trata-se apenas de sedimentos acumulados no pavimento. Cabe ressaltar que, pouco tempo antes da coleta das imagens com drone, havia precipitado uma leve chuva e, por esse motivo, alguns sedimentos apresentaram-se ainda molhados no momento da captura da imagem, embora o dia estivesse com temperaturas elevadas. Percebe-se assim que houve uma certa ilusão de ótica, na qual a imagem coletada reflete uma possível deterioração, que de fato não é.

O pavimento de concreto da crista apresenta algumas fissuras de origem térmica, que não são relevantes para a segurança estrutural da barragem, pois referem-se apenas a características construtivas do pavimento, como mostra a Figura 69.

Figura 68 – “Deterioração” no pavimento indicada por 92 % inspetores



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Figura 69 – Fissura de origem térmica no pavimento de concreto sobre a crista



Fonte: a autora. Imagem obtida com câmera fotográfica convencional na data de 15/09/2021.

Questão 12. Os postes de iluminação apresentam corrosão?

A resposta esperada é NÃO. De fato, os postes estão em bom estado de conservação.

Todos os inspetores (100 %) responderam que não havia ou não identificaram corrosão nos postes de iluminação.

d) Soleira do vertedouro

Questão 13. Você identifica RACHADURAS ou TRINCAS no concreto da soleira do vertedouro?

A resposta esperada para a existência de trincas ou rachaduras na soleira do vertedouro é SIM. Foi identificado apenas duas fissuras sutis, uma na soleira do vertedouro, propriamente dita, e outra no pilar do vertedouro, conforme mostrado na Figura 70.

Dos doze inspetores, 33 % identificaram essas fissuras, conforme o esperado, e 67 % não identificaram nenhuma fissura na soleira do vertedouro.

Figura 70 – Trincas ou rachaduras que podem ser identificadas na soleira



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 14. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS ou indícios de corrosão de armaduras no concreto da soleira do vertedouro?

A resposta esperada é NÃO. A soleira do vertedouro não apresenta indícios de corrosão de armaduras.

Dentre os entrevistados, todos (100 %) responderam que não identificaram armaduras expostas ou indícios de corrosão, conforme o esperado para a pergunta.

Questão 15. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto?

A resposta esperada é SIM. Existe uma leve erosão na soleira do vertedouro, principalmente na cota mais alta, onde há fluxo de água. Contudo, essa deterioração superficial é sutil e difícil de ser percebida, como mostra a Figura 71.

Dos inspetores entrevistados, 58 % responderam que sim, conforme o esperado para a questão, e 42 % responderam que não identificaram deterioração superficial.

Figura 71 – Indícios de erosão superficial do concreto da soleira do vertedouro



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 16. As JUNTAS DO CONCRETO da soleira estão danificadas?

A resposta esperada para essa questão é NÃO, pois o aspecto geral das juntas é de bom estado de conservação.

Considera-se que os doze entrevistados (100 %) responderam conforme o esperado. Dentre eles, 11 inspetores responderam que não verificaram danos nas juntas de dilatação do vertedouro. Um inspetor, no entanto, indicou que sim, referindo-se ao dano que é mostrado na Figura 70, que não se trata exatamente de um dano na junta, mas muito próximo à junta. Essa situação foi considerada também satisfatória, de acordo com o esperado.

e) Vertedouro

Questão 17. Existem sinais de deterioração do concreto nos muros laterais do vertedouro, como FISSURAS, ARMADURAS EXPOSTAS OU SINAIS DE CORROSÃO?

A resposta esperada é NÃO. Os muros laterais do vertedouro não indicam nenhum tipo de manifestações patológicas.

Considera-se que 100 % dos entrevistados responderam conforme o esperado.

Dentre os doze inspetores que analisaram as barragens, oito (67 %) responderam que não identificaram indícios de fissuração ou corrosão e quatro apontaram para algum sinal que acreditaram ser uma manifestação patológica, no entanto, os apontamentos não foram para os muros laterais do vertedouro e sim para alguma estrutura próxima como os degraus da estrutura vertente ou os parâmetros de jusante.

Questão 18. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto do vertedouro, como agregados expostos ou erosão do concreto?

A resposta esperada para essa questão é SIM. Embora os degraus do vertedouro estejam em bom estado de conservação, é possível verificar em alguns pontos a superfície do concreto erodida. Essa situação é evidenciada na Figura 72. É natural de esperar que existe algum tipo de erosão na estrutura do vertedouro, uma vez que ela está, na grande maioria do tempo, vertendo.

Dentre os doze inspetores entrevistados, cinco (42 %) identificaram algum tipo de dano na superfície do concreto, apontando para a região mostrada na Figura 72, e cinco (42 %) não identificaram nenhum tipo de erosão superficial no concreto do vertedouro.

Dois inspetores (16 %), contudo, apontaram para regiões adjacentes, porém não no vertedouro. Nesse caso, a resposta desses dois inspetores foi anulada, pois não se referiram à estrutura designada.

Figura 72 – Vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, com ênfase para a constatação de erosão na superfície do concreto em algumas áreas



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Assim, considera-se que 50 % dos inspetores responderam conforme o esperado para a questão e outros 50 % responderam em desacordo com o esperado.

Questão 19. As JUNTAS DO CONCRETO do vertedouro estão danificadas?

A resposta esperada para essa questão é SIM. De forma geral, as juntas estão intactas. No entanto, existe uma pequena região que apresenta um dano próximo a uma junta central (É importante ressaltar que essa região na qual existe o pequeno dano ao lado da junta, que aparece sombreada no vídeo, o que pode dificultar a aferição por parte dos inspetores, na análise virtual das barragens.

Figura 73).

Dentre os doze inspetores, dez responderam que as juntas não apresentam danos e dois responderam que existe dano, apontando para a referida situação que se evidencia na Figura 73.

Esse dano poderia ser entendido como um problema de deslocamento do concreto. Por esse motivo, considerou-se que quem respondeu que existe dano, apontando para essa situação, também respondeu corretamente.

Assim, 100 % dos entrevistados responderam de acordo com o esperado para a questão.

É importante ressaltar que essa região na qual existe o pequeno dano ao lado da junta, que aparece sombreada no vídeo, o que pode dificultar a aferição por parte dos inspetores, na análise virtual das barragens.

Figura 73 – Junta de dilatação do vertedouro que apresenta uma pequena fratura no concreto



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 20. O vertedouro apresenta algum desalinhamento ou sinal de movimentação?

A resposta esperada é NÃO. O vertedouro não apresenta indícios de desalinhamento ou movimentação, o que pode ser evidenciado tanto pelo bom estado de conservação das juntas quanto pelo dos muros laterais do vertedouro.

Os doze especialistas (100 %) responderam que o vertedouro não apresenta desalinhamento ou sinal de movimentação, conforme a resposta esperada.

f) Bacia de dissipação

Questão 21. Existem fraturas no concreto da saída do vertedouro?

A resposta esperada é SIM. De fato, na saída do vertedouro (dissipação), o concreto apresenta fraturas ou danos, possivelmente relacionado com a queda de galhos ou pedaços de rocha, que pode ter ocasionado o dano. Essa situação é evidenciada na Figura 74.

92 % responderam que havia esse dano e, apenas um inspetor (8 %) respondeu que não havia nenhum tipo de dano ou fratura na bacia de dissipação do vertedouro.

Ressalta-se que as imagens coletadas na região da bacia de dissipação apresentaram sombreamento devido às árvores adjacentes, o que dificulta a identificação de anomalias.

Figura 74 – Fratura no concreto na saída do vertedouro (dissipação)



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 22. Você identifica EROSÃO DO SOLO na saída do vertedouro?

A resposta esperada para essa questão é NÃO. Embora a bacia de dissipação contenha fraturas e contenha a rocha sã (detonada), a estrutura de concreto não está erodida por baixo, indicando que estivesse “descalçada”.

33 % dos inspetores responderam conforme o esperado, que não havia erosão de solo na saída do vertedouro. 67 % dos inspetores responderam que havia. Os que responderam positivamente (havia erosão) indicaram para a rocha aflorada que existe imediatamente após a laje de concreto.

Os vídeos registrados dessa região não permitem identificar a existência ou inexistência dessa anomalia, pois, além da sombra na região, o vídeo foi coletado no sentido de montante para jusante (Figura 75), e não o contrário, que possibilitasse a identificação.

A verificação da existência dessa anomalia seria possível a partir da análise do modelo tridimensional gerado e disponibilizado aos inspetores, como mostra a Figura 76.

Figura 75 – Imagem do vídeo da bacia de dissipação que fora coletado no sentido montante-jusante



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Figura 76 – Imagem da bacia de dissipação do vertedouro, na qual é possível verificar que não há erosão do solo abaixo da laje da dissipação



Fonte: a autora. Imagem extraída do modelo tridimensional gerado para a barragem, com imagens coletadas em 22/01/2022.

g) Ponte

Questão 23. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS nas vigas e tabuleiro da ponte?

A resposta para essa pergunta é NÃO. Não é possível identificar armaduras expostas.

92 % dos especialistas responderam conforme o esperado e um inspetor (8 %) respondeu que existiam armaduras expostas. A situação percebida por esse único inspetor é mostrada na Figura 77.

Figura 77 – Percepção de armaduras expostas apontadas por inspetor que analisou as imagens virtuais da barragem



Fonte: questionário de inspeção preenchido por inspetor, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletado em 22/01/2022.

A partir dessa imagem (Figura 77), verifica-se que as manchas de umidade presentes na viga longitudinal, assim como o encontro no sentido transversal das

vigas pré-moldadas da ponte, foram equivocadamente atribuídas à anomalia de armaduras expostas.

As fichas de inspeção da Agência Nacional de Águas e Saneamento, no item “ponte” não especificam o tipo de anomalia, apenas citam “estrutura das vigas e tabuleiro” e “estado dos pilares”.

As vigas da ponte sobre o vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva apresentam, contudo, alguns pequenos indícios de corrosão, pois existem manchas avermelhadas que podem ser indicativos de corrosão das armaduras. Essa anomalia foi verificada *in loco* somente com a utilização de binóculos, sendo que a olho nu não foi possível perceber. Com câmera profissional e lentes de aumento, foram registradas, no dia 15/09/2021 as seguintes imagens, apresentadas em a) e b) da Figura 78.

Figura 78 – Possíveis indícios de corrosão nas vigas da ponte sobre o vertedouro na Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: a autora. Imagens de câmera profissional de alta resolução registradas em 15/09/2021.

Questão 24. Você identifica FISSURAS, RACHADURAS OU TRINCAS nas vigas e tabuleiro da ponte?

A resposta esperada para essa questão é SIM. Nas longarinas da ponte existem fissuras transversais, principalmente nos dois terços médios da viga, conforme mostrado na Figura 79. Quanto às fissuras transversais, contudo, existe a possibilidade de se tratarem de marcas das formas das concretagens, e não fissuras de fato. Nesse caso, é necessária uma avaliação mais minuciosa para identificar corretamente a causa.

83 % dos inspetores que analisaram as barragens reportaram a identificação de fissuras nas vigas da ponte, conforme a resposta esperada, e 17 % responderam que não conseguiram identificar fissuras.

Figura 79 – Fissuras transversais observadas em longarinas da ponte



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Em longarinas aparecem fissuras de aresta, típicas de quando ocorre a corrosão das armaduras longitudinais das vigas, conforme apresentado na Figura 80.

Além dessas, existe, em uma transversina da ponte, deslocamento de concreto, na ancoragem do tirante. As transversinas da ponte não são vigas inteiras e sim, a união das várias longarinas pré-moldadas, atirantadas. Essa situação é mostrada na Figura 81.

Figura 80 – Exemplo de fissuras longitudinais observadas em longarinas da ponte



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Figura 81 – Fratura no concreto próxima à ancoragem de tirante em viga transversina da ponte



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 25. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS nos pilares da ponte?

A Resposta esperada para a questão 25 é NÃO. Os pilares da ponte não apresentam armaduras expostas e nem sinais de corrosão.

100 % dos entrevistados responderam que não identificaram corrosão de armaduras nos pilares da ponte.

O vídeo coletado para inspeção dos pilares, no qual aparece o pilar como um todo, da base até o topo, apresenta sombreamento do tabuleiro da ponte, o que dificulta a inspeção por imagens, como é mostrado na Figura 82. Já o vídeo coletado para análise das vigas, o qual foi realizado a uma distância menor do alvo e com exposição da câmera ajustada, permite melhor identificação das anomalias. Contudo, esse vídeo não pega os pilares na parte da base dos mesmos, como é mostrado na Figura 83.

Figura 82 – Trecho do vídeo coletado para análise dos pilares



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Figura 83 – Trecho do vídeo coletado para análise das vigas



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Na Figura 83 é possível verificar algumas manchas de óxidos ou produtos de corrosão. No entanto, essas manchas são decorrentes dos perfis metálicos inseridos no pavimento, nas juntas da ponte, como é apresentado na Figura 84.

Figura 84 – Juntas no pavimento da ponte, no qual há perfis metálicos oxidados



Fonte: a autora. Imagem obtida com câmera fotográfica convencional na data de 15/09/2021.

Questão 26. Você identifica FISSURAS, RACHADURAS OU TRINCAS nos pilares da ponte?

A resposta esperada para a questão 26 é NÃO.

75 % não identificaram nenhum tipo de fissuras nos pilares da ponte, conforme a resposta esperada e 25 % responderam que identificaram, conforme abaixo descrito.

Dois inspetores (16 %) responderam que encontraram fissuras, e apontaram para a situação mostrada na Figura 85 e um inspetor (8 %) apontou para uma mancha de umidade, que não se trata de fissura.

A situação apresentada na Figura 85 é sutil, e por isso pode ser confundida com fissura. No entanto, trata-se de uma marca da forma de concretagem do pilar, que apresenta o mesmo padrão para os demais pilares, como pode ser observado na Figura 86.

Figura 85 – Indicação de possível fissura em pilar da ponte sobre o vertedouro da Barragem Rodolfo da Costa e Silva



Fonte: questionário de inspeção preenchido por inspetor, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletado em 22/01/2022.

Figura 86 – Pilares da ponte sobre o vertedouro, que apresentam marcas das formas de concretagem



Fonte: a autora. Imagens de câmera profissional de alta resolução registradas em 15/09/2021.

h) Ombreiras

Questão 27. Você identifica árvores caídas próximas às ombreiras?

A resposta esperada é NÃO. Existem árvores no entorno do vertedouro e nas ombreiras, no entanto, não indicam algum tipo de escorregamento na ombreira.

58 % dos especialistas responderam conforme o esperado, que não havia árvores caídas e 42 % responderam que identificaram árvores caídas.

Os inspetores que identificaram árvores “caídas”, apontaram para as árvores existentes próximas aos taludes, que no entanto, não encontram-se caídas, conforme mostra a Figura 87.

É importante ressaltar que não foram coletados vídeos específicos para inspeção das ombreiras, e por esse motivo, torna-se difícil a real inspeção das mesmas.

Figura 87 – Região da ombreira esquerda, na qual alguns dos inspetores identificaram a árvore existente como caída



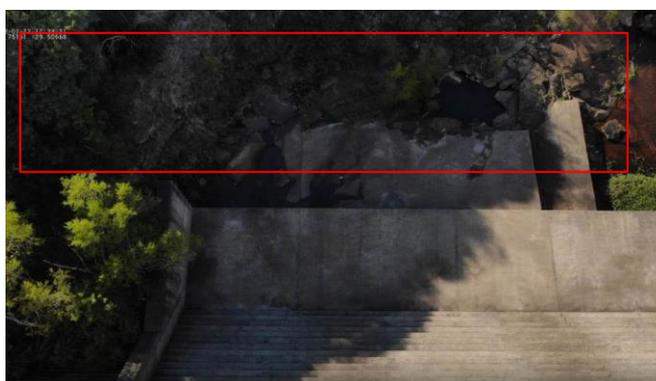
Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Questão 28. Você identifica rochas desmoronadas próximas às ombreiras?

A resposta esperada para essa questão é NÃO. Pelos vídeos disponibilizados, não é possível identificar rochas desmoronadas, indicando escorregamento nas ombreiras.

33 % dos inspetores entrevistados responderam corretamente e 67 % apontaram para as rochas sãs afloradas a jusante da barragem, conforme indicado na Figura 88, que não se tratam de rochas desmoronadas.

Figura 88 – Região a jusante da barragem na qual existem rochas sãs afloradas



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Além de não terem sido coletadas imagens específicas para inspeção das ombreiras, no momento da captura havia sombreamento das árvores nessa região, o que prejudica a correta identificação das anomalias.

Questão 29. Você encontra algum sinal de surgência nas ombreiras?

A resposta esperada é SIM. Existem surgências visíveis na ombreira esquerda, que aparecem nas imagens coletadas. Contudo, como fora citado, a região das ombreiras e bacia de dissipação apresentou sombra no momento da coleta das imagens, além de que não foram realizados vídeos específicos para a região das ombreiras.

Assim, apenas 33 % dos entrevistados perceberam essa surgência, que é mostrada na Figura 89. 67 %, contudo, não perceberam, o que não era o padrão esperado para a questão.

Figura 89 – Região a jusante da barragem na qual existe surgência a partir da ombreira esquerda



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 22/01/2022.

Na inspeção realizada *in loco* no dia 15/09/2021, foi percebido surgências em ambos os lados da barragem (esquerda e direita). No entanto, em setembro, o período é, no Rio Grande do Sul, tipicamente chuvoso, e o reservatório se encontrava cheio e vertendo. No dia da coleta das imagens para essa pesquisa (22/01/2022), o tempo estava quente, seco e não havia sido precedido por chuvas significativas. Assim, somente a ombreira esquerda apresentava surgência na data da coleta dos dados com *drone*. A Figura 90 e a Figura 91 mostram as surgências nas ombreiras esquerda e direita, respectivamente, observadas em setembro de 2021.

Figura 90 – Surgências percebidas *in loco* na ombreira esquerda



Fonte: a autora. Imagens de câmera profissional de alta resolução registradas em 15/09/2021.

Figura 91 – Surgência na ombreira direita, observada na inspeção *in loco* realizada



Fonte: a autora. Imagem de câmera profissional de alta resolução registrada em 15/09/2021.

Questão 30. Você julga que as ombreiras estão em boas condições de manutenção para inspeção? Dê uma nota de 1 a 5 (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

A nota média que os inspetores avaliados deram para as condições de manutenção das ombreiras para inspeção foi de 3,67, ficando entre “suficiente” e “bom”. No entanto, esperava-se que a nota fosse mais baixa, indicando uma condição ruim de manutenção, pois, de fato, existem muitas árvores na região das ombreiras, o que impossibilita a satisfatória inspeção visual.

A distribuição dos resultados respondidos para essa questão é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 30 do questionário da Barragem Rodolfo da Costa e Silva

<i>Resposta</i>	<i>Frequência da resposta</i>	<i>Percentual</i>
2: Ruim	3	25 %
3: Suficiente	1	8%
4: Bom	5	42%
5: Muito bom	3	25 %
TOTAL	12	100 %

Fonte: elaborado pela autora.

4.3.1.1 Síntese e discussão dos resultados das inspeções virtuais da Barragem Rodolfo da Costa e Silva

Neste subcapítulo são apresentados e discutidos, sinteticamente, os resultados médios obtidos para as questões de SIM OU NÃO do questionário de inspeção da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, organizados de acordo com as estruturas da barragem: barramento, vertedouro, ponte e ombreiras.

Na Tabela 9 apresenta-se a resposta esperada para questão, o percentual de inspetores que responderam SIM ou NÃO, sendo que os valores em verde referem-se a resultados satisfatórios, ou seja, de acordo com o esperado. Além disso, apresenta-se a resposta satisfatória média para cada estrutura e/ou elemento, indicando, segundo a metodologia deste estudo, o quanto cada estrutura e elemento pode ser corretamente inspecionado através das imagens obtidas com uso de *drone*.

Na sequência, é brevemente discutido sobre os resultados individuais das estruturas e elementos da barragem.

Tabela 9 – Sumarização dos resultados do questionário de inspeção da Barragem
Rodolfo da Costa e Silva

Estrutura/elemento	Questão	Resposta esperada	% Resposta dos inspetores		Resposta satisfatória média por estrutura/elemento	
			SIM	NÃO		
Barramento	Parâmetro de jusante	1	NÃO	0%	100%	58%
		3	SIM	50%	50%	
		4	NÃO	75%	25%	
	Parâmetro de montante	5	SIM	50%	50%	65%
		6	SIM	67%	33%	
		7	SIM	42%	58%	
		8	NÃO	0%	100%	
		9	NÃO	17%	83%	
	Crista	11	NÃO	92%	8%	64%
		12	NÃO	0%	100%	
		13	SIM	33%	67%	
	Vertedouro	Soleira do vertedouro	14	NÃO	0%	100%
15			SIM	58%	42%	
16			NÃO	0%	100%	
17			NÃO	0%	100%	
Vertedouro		18	SIM	50%	50%	88%
		19	SIM	100%	0%	
		20	NÃO	0%	100%	
		21	SIM	92%	8%	
Dissipação	22	NÃO	67%	33%	63%	
	23	NÃO	92%	8%		
Ponte	24	SIM	83%	17%	67%	
	25	NÃO	0%	100%		
	26	NÃO	25%	75%		
	27	NÃO	42%	58%		
Ombreiras	28	NÃO	67%	33%	41%	
	29	SIM	33%	67%		
Total Barragem	-	-	-	-	65%	

Fonte: elaborado pela autora.

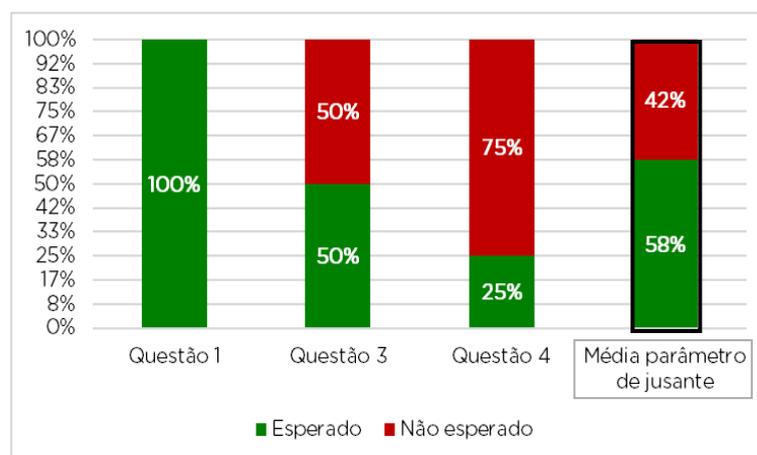
a) Barramento

O barramento foi analisado pelos elementos: parâmetro de jusante, parâmetro de montante e crista.

- **Parâmetro de jusante**

As respostas da análise do parâmetro de jusante foram 58 % satisfatórias, em média. O Gráfico 1 mostra o resumo de respostas para cada questão do parâmetro de jusante, bem como a média do elemento (parâmetro).

Gráfico 1 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao parâmetro de jusante



Fonte: elaborado pela autora.

Para a detecção de fissuras no parâmetro de jusante, as respostas foram unânimes, na qual todos os inspetores detectaram fissuras. Os inspetores entrevistados julgaram, com base nas notas atribuídas, que as imagens coletadas eram “suficientes” ou “boas” para a detecção de danos significativos no concreto dos parâmetros de jusante, embora a distância de coleta tenha sido de 10 a 30 m.

Quanto ao item “danos nas juntas”, verifica-se que, no termo, existe certa subjetividade associada, pois não distingue o que é considerado dano e o que não é. Existem falhas no concreto próximas às juntas, contudo, sutis. O material de vedação das juntas não pôde ser averiguado, a menos que as imagens tivessem sido coletadas muito próximas às juntas.

A pergunta de número 4, correspondente a “sinais de fuga ou áreas úmidas”, verifica-se que 75 % dos inspetores identificaram umidades nas juntas de dilatação, porém, não relacionadas a sinais de percolação. Nesse sentido, observa-se que o termo da pergunta poderia ser mais específico, relacionado a infiltrações por dentro o maciço, que refletissem nos parâmetros de jusante.

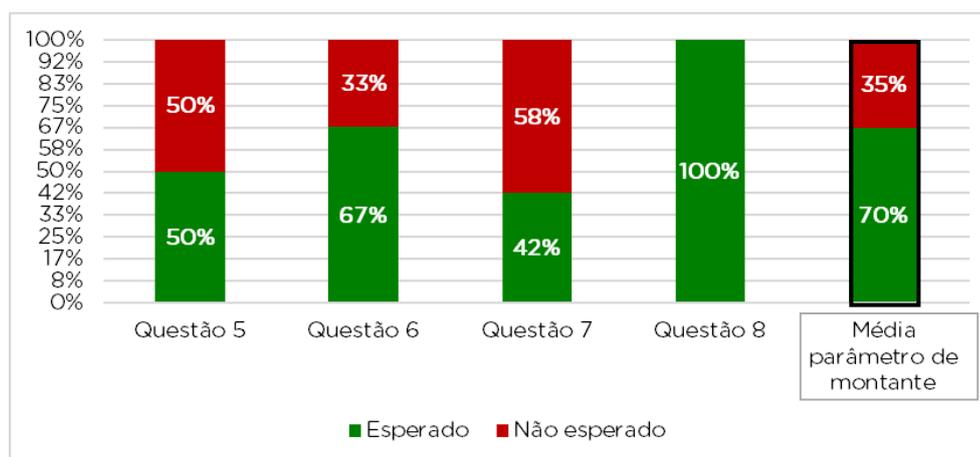
Para a aquisição de imagens do talude de jusante, salienta-se que a distância escolhida para o voo levou consideração a incidência de vento que ocorria na região

de jusante, além da presença de árvores na região. Assim, a opção do critério de distância considerou, principalmente, a segurança de voo.

- **Parâmetro de montante**

As respostas para o parâmetro de montante foram mais satisfatórias do que as do parâmetro de jusante, apresentando 70 % de respostas satisfatórias. O Gráfico 2 representa o resumo de respostas para cada questão do parâmetro de montante, bem como a média do elemento (parâmetro).

Gráfico 2 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao parâmetro de montante



Fonte: elaborado pela autora.

As anomalias presentes no parâmetro de montante eram mais sutis do que as presentes no parâmetro de jusante. Entre essas anomalias cita-se: fissuras, erosão superficial do concreto e danos nas juntas. O fato de o nível do reservatório estar abaixo do normal possibilitou a identificação dessas anomalias, o que não seria possível de aferir caso o nível estivesse normal.

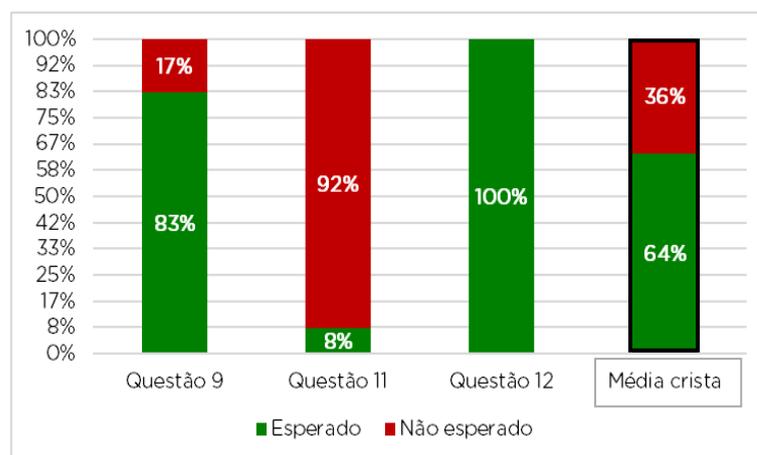
Acredita-se que os resultados percentuais para os parâmetros de montante foram superiores aos resultados dos parâmetros de jusante, pois, as imagens foram obtidas a distâncias menores, facilitando a interpretação e identificação das anomalias, por parte dos inspetores que analisaram virtualmente as imagens.

- **Crista**

As respostas da análise da crista da Barragem Rodolfo da Costa e Silva são apresentadas no Gráfico 3.

Verifica-se que o menor percentual de respostas esperadas foi obtido na questão 11, relacionadas com a deterioração no pavimento ou nas calçadas, na qual os inspetores atribuíram sedimentos acumulados à deterioração. Esse fato mostra que a distância de coleta da crista não foi ideal para a inspeção do pavimento.

Gráfico 3 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à crista



Fonte: elaborado pela autora.

Quanto à verificação de desalinhamentos a partir da crista, os inspetores julgaram as imagens “suficientes” ou “boas”. No entanto, a partir de imagens obtidas com *drone*, acredita-se que seria mais eficaz a identificação de possível movimentação na barragem a partir da abertura de juntas do parâmetro de jusante. A identificação de desalinhamentos a partir da crista tende a ser mais sutil e difícil de serem observados com imagens de *drone*, a menos que realize coleta específica para cada item, como meio fio, guarda-corpo, dentre outros, a partir de perspectivas estratégicas que possibilitassem a aferição.

- **Total do barramento**

Quanto ao total do barramento, utilizando média ponderada para o número de questões conforme o parâmetro de montante, parâmetro de jusante e crista, verifica-se que a estrutura apresenta um percentual de 63 %, ou seja, entende-se que a maioria das anomalias típicas de barramentos de concreto podem ser corretamente

identificadas pela análise das imagens obtidas com *drone*, segundo a metodologia desta pesquisa

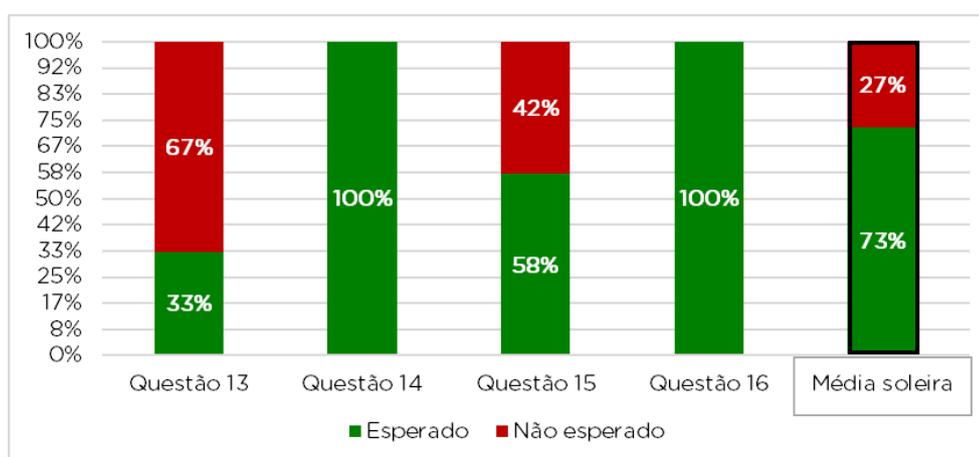
b) Vertedouro

O vertedouro foi analisado pelos elementos soleira, vertedouro (estrutura vertente e muros laterais) e bacia de dissipação.

- **Soleira**

A análise das imagens da soleira do vertedouro, para fins de inspeção, conforme os resultados obtidos no questionário, foi bastante satisfatória, resultando, em média, 73 % de respostas esperadas. A distância de coleta (5 m) foi a mínima dentre as distâncias das estruturas da barragem Rodolfo da Costa e Silva. Verifica-se que esse fato refletiu satisfatoriamente nos resultados. O Gráfico 4 mostra a relação de respostas esperadas e não esperadas para a soleira do vertedouro, bem como a resposta média do elemento.

Gráfico 4 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à soleira do vertedouro



Fonte: elaborado pela autora.

A questão de número 13 foi a questão com menos respostas satisfatórias, para a soleira do vertedouro, e referia-se a fissuras sutis que a soleira apresentava. Nesse caso, observa-se a subjetividade inerente da atividade de inspeção, na qual

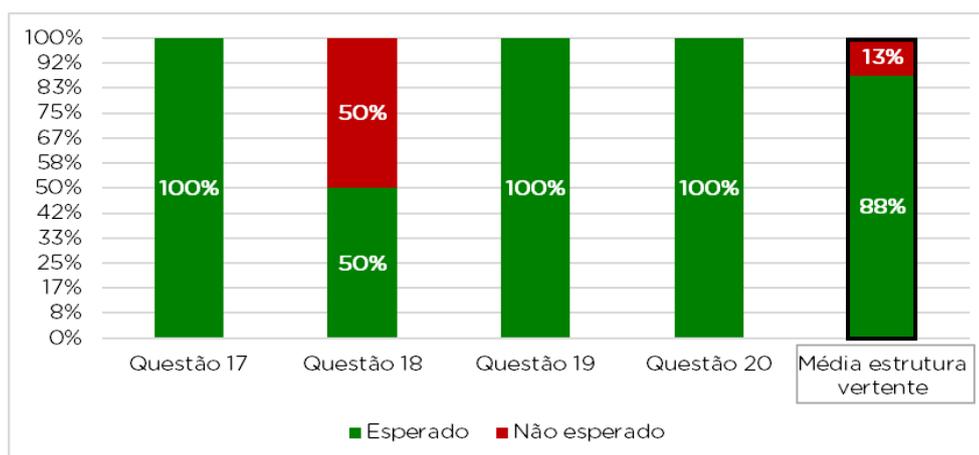
detalhes podem ser percebidos por alguns inspetores e serem desconsiderados por outros.

A inspeção da soleira do vertedouro com o uso de *drone*, através da análise das imagens coletadas, permitiu a vistoria de perto do elemento, sem que fosse necessário utilizar equipamentos para trabalho em altura ou, eventualmente, barcos, demonstrando assim vantagens para a aplicação do *drone* na inspeção de soleiras de vertedouros.

- **Estrutura vertente e muros laterais**

As perguntas relacionadas à estrutura vertente, ou seja, o vertedouro como um todo, resultaram em números satisfatórios, totalizando a maior média identificada para elementos da Barragem Rodolfo da Costa e Silva (88 %), como é apresentado no Gráfico 5. O fato de que a estrutura vertente apresentava poucas anomalias e estava em bom estado de conservação contribuiu para esse resultado.

Gráfico 5 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à estrutura vertente



Fonte: elaborado pela autora.

- **Bacia de dissipação**

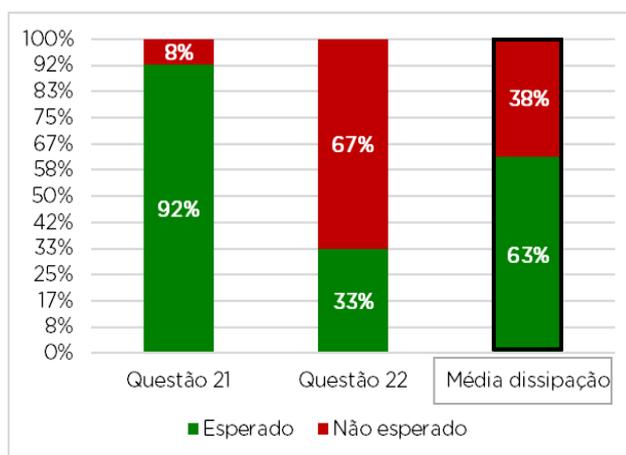
As questões correspondentes à bacia de dissipação do vertedouro eram as de número 21 e 22. A pergunta 21, relacionada com as fraturas no concreto da bacia de dissipação apresentaram resultados satisfatórios, na qual a maioria dos

inspetores identificou a anomalia. Já a questão 22, relacionada com a erosão do solo a jusante da bacia, os percentuais satisfatórios foram baixos (Gráfico 6).

Essa pequena porcentagem de resultados satisfatórios se deu pelo fato de que os vídeos apresentados não contemplavam o ponto de vista ideal para a verificação da existência ou inexistência da anomalia. Assim, verifica-se que é necessário realizar planejamento prévio de perspectivas estratégicas de coleta de imagens utilizando *drone*, notadamente na inspeção dessas estruturas.

Além disso, ressalta-se a existência de sombreamento na região, no momento da captura das imagens. Assim, enfatiza-se a necessidade de considerar a orientação solar no momento da coleta de dados. Possivelmente, na missão de aquisição das imagens, seja indispensável realizar as coletas em determinado horário do dia para algumas estruturas da barragem, e para outras, em outro momento do dia, evitando assim a incidência de sombreamento.

Gráfico 6 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à bacia de dissipação do vertedouro



Fonte: elaborado pela autora.

- **Total do vertedouro**

A média ponderada de resultados satisfatórios para a estrutura “vertedouro” foi de 77 %, indicando que a maioria dos itens relacionados a vertedouros, elencados na metodologia deste estudo, podem ser corretamente identificados pela análise das imagens com o uso de *drone*.

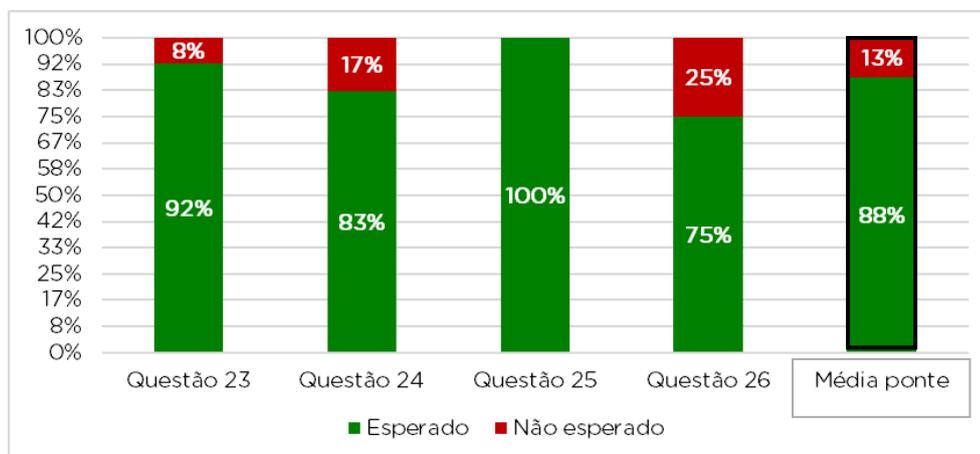
c) Ponte

A ponte sobre o vertedouro foi analisada pelas vigas e tabuleiros, sob o a perspectiva de frente/baixo da mesma. Não é possível capturar imagens ortogonais direcionadas para cima, com o uso de drones comerciais. Em algumas situações, pode ser possível passar com o *drone* por debaixo da ponte, dependendo da distância entre os possíveis obstáculos.

Assim, a ponte foi analisada por imagens parciais, mas que refletiam o estado geral da estrutura. Verifica-se que o uso de *drone* para a ponte permitiu a análise de regiões que só seriam possíveis de serem inspecionadas com apoio de equipamentos especiais de segurança e de trabalho em altura.

As respostas esperadas para as questões vinculadas à ponte foram bastante satisfatórias, conforme apresentado no Gráfico 7. O percentual médio para as questões relacionadas à ponte foi de 88 % de respostas conforme o esperado, evidenciando a possibilidade de detecção de anomalias em pontes através de imagens obtidas com *drone*, que pode refletir não somente em pontes sobre vertedouros, mas pontes e viadutos de um modo geral.

Gráfico 7 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à ponte sobre o vertedouro



Fonte: elaborado pela autora.

d) Ombreiras

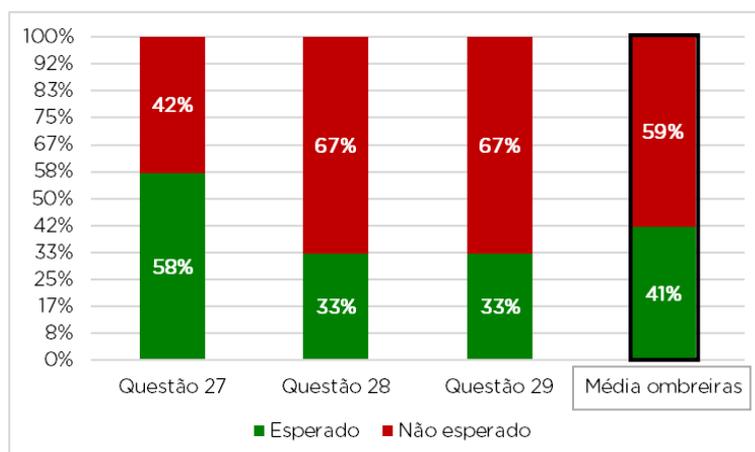
A detecção de anomalias nas ombreiras não apresentou, de modo geral, os resultados esperados para a identificação das anomalias que existiam nas ombreiras

da Barragem Rodolfo da Costa e Silva, que foram identificadas nas inspeções *in loco*. O Gráfico 8 mostra esse resultado.

Acredita-se que esse fato se deu pelo motivo de que não foram coletadas imagens/vídeos específicos para as ombreiras, dificultando a correta interpretação das anomalias por parte dos especialistas. Além disso, a presença de sombra na ombreira esquerda, que apresenta surgência, dificultou a percepção da anomalia.

Nesse caso, verifica-se que uma das anomalias mais sérias que essa barragem apresenta, que é a surgência, foi identificada por menos da metade dos inspetores.

Gráfico 8 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas às ombreiras



Fonte: elaborado pela autora.

4.3.1 Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim

a) Talude de jusante

Questão 1. Você identifica EROSÕES no talude de jusante?

A resposta esperada para essa questão é SIM.

92 % dos inspetores perceberam erosão no talude de jusante, conforme o esperado, e um inspetor (8 %) não identificou erosão no talude.

Próximo à ombreira esquerda da barragem, existe um trecho em que há circulação de gado e cavalos e, por isso, existem trilhas no talude. Essas trilhas tendem a formar caminhos preferenciais para o escoamento da água, acarretando em erosões. A situação é mostrada na Figura 92.

Além disso, talude de jusante apresenta várias falhas na proteção vegetal, indicando estágios iniciais de erosão. Essas situações, mesmo as mais sutis, foram percebidas por oito inspetores (67 %) e um exemplo é mostrado na Figura 93.

Figura 92 – Erosão no talude de jusante próximo à ombreira esquerda. Em a), imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores e em b), imagem obtida com *drone* em inspeção realizada *in loco* no dia 02/09/2021



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022 e imagem coletada com *drone* em 02/09/2021.

Figura 93 – Falhas na proteção vegetal do talude de jusante



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

Questão 2. Existe algum sinal de DESLIZAMENTO ou ESCORREGAMENTO no talude?

A resposta esperada para essa questão é NÃO. O talude não apresenta instabilidades.

Dentre os especialistas entrevistados, 67 % responderam que não encontraram sinais de deslizamento ou escorregamento. 33 % dos inspetores (5 inspetores), contudo, apontaram para outras anomalias, que não caracterizam deslizamentos ou escorregamentos, conforme descritos a seguir.

Um inspetor apontou para a erosão mostrada na Figura 92 e quatro apontaram para a situação mostrada na Figura 94 abaixo. Esta imagem mostra parte do talude de jusante que apresenta surgências. Pela formação arredondada da anomalia, alguns inspetores a atribuíram o padrão da mudança de vegetação a deslizamento, com formação de escarpa. A surgência pode ser também verificada na Figura 95, que apresenta o talude de outro ângulo, na qual a fotografia foi obtida com *drone* no dia 02/09/2021.

Figura 94 – Anomalia presente no talude de jusante da Barragem do DNOS, confundida por alguns inspetores com deslizamento



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Figura 95 – Surgência no talude de jusante da Barragem do DNOS



Fonte: a autora. Imagem coletada com *drone* em 02/09/2021.

Questão 3. Existe algum sinal de AFUNDAMENTO ou RECALQUE no talude?

A resposta esperada para a questão é NÃO. O barramento não apresenta problemas de recalques, assentamentos ou afundamentos, que possam ser percebidos nos vídeos e nas inspeções *in loco* realizadas.

Dos doze entrevistados, 83 % responderam que não havia sinal de afundamento ou recalque, conforme o esperado para a pergunta. Dentre os demais 17 %, que não responderam conforme o esperado, um inspetor afirmou que sim, apontando para a anomalia mostrada na Figura 94, e outro inspetor afirmou que sim, apontando para a anomalia apresentada na Figura 96. Nessa imagem, existe um

trecho com falha na proteção vegetal, de forma circular, que fora erroneamente entendido pelo inspetor com um afundamento do tipo *sinkhole*.

Figura 96 – Falha na proteção vegetal confundida com *sinkhole*



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 4. Você julga que a PROTEÇÃO VEGETAL do talude está em boas condições? Dê uma nota de 1 a 5 (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

A resposta média obtida pelos questionários de inspeção para essa pergunta foi 2,58, ficando entre “ruim” e “suficiente”. A distribuição dos resultados respondidos para essa questão é apresentada na Tabela 10.

Existe proteção vegetal do talude, de fato, que recebe poda e manutenção periódica. Contudo, devido às secas que antecederam a coleta de dados, em várias partes, o talude estava com falhas na proteção vegetal. A Figura 97 mostra a proteção vegetal do talude em a) janeiro de 2022, período de secas e em b), em setembro de 2021, período de chuvas constantes.

Figura 97 – Proteção vegetal do talude de jusante



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022 e imagem coletada com *drone* em 02/09/2021.

Tabela 10 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 4 do questionário da Barragem do DNOS

<i>Resposta</i>	<i>Frequência da resposta</i>	<i>Percentual</i>
2: Ruim	5	42 %
3: Suficiente	7	58 %
TOTAL	12	100 %

Fonte: elaborado pela autora.

Questão 5. Existem ÁRVORES E ARBUSTOS no talude que precisam ser removidos?

A resposta esperada para essa pergunta é SIM. Existem arbustos isolados no talude, que, segundo boas práticas de manutenção, devem ser removidos. A Figura 98 mostra exemplos de arbustos no talude de jusante. Além disso, em alguns locais, é possível verificar árvores que foram cortadas, restando apenas tocos das mesmas.

92 % dos inspetores reportaram terem identificado arbustos no talude de jusante e um inspetor (8 %) respondeu não ter identificado.

Figura 98 – Exemplos de arbustos no parâmetro de jusante



Fonte: a autora. Imagens extraídas dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

Questão 6. Você identifica algum FORMIGUEIRO, CUPINZEIRO ou TOCAS DE ANIMAIS no talude?

A resposta esperada para essa questão é SIM. Existem vários formigueiros no talude de jusante. No entanto, não se acreditava que os mesmos fossem identificados, pois na altura de voo (distância) em que as imagens foram coletadas, é difícil a diferenciação do solo e dos formigueiros.

Ainda assim, 33 % dos inspetores responderam identificar formigueiros e 67 % não identificaram, como fora esperado.

A Figura 99 mostra, em a) e b), exemplos de formigueiros que podem ser identificados no talude de jusante, pelas imagens obtidas com *drone*.

Figura 99 – Formigueiros identificados no talude de jusante



Fonte: a autora. Imagens extraídas dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

Questão 7. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível a identificação de formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais? Dê uma nota de 1 a 5 (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

A resposta média foi 2,33, indicando que as imagens coletadas ficam entre “suficiente” e “ruim” para a identificação de formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais. A distribuição dos resultados respondidos para essa questão é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 7 do questionário da Barragem do DNOS

<i>Resposta</i>	<i>Frequência da resposta</i>	<i>Percentual</i>
1: Muito ruim	2	16 %
2: Ruim	6	50 %
3: Suficiente	2	16 %
4: Bom	2	16%
TOTAL	12	100 %

Fonte: elaborado pela autora.

Questão 8. As CANALETAS DE DRENAGEM do talude de jusante apresentam alguma anomalia? (Quebradas, obstruídas, danificadas...).

A resposta esperada para essa questão é SIM. As canaletas não estão quebradas, contudo, há vegetação dentro das mesmas, o que fica nítido até mesmo em imagens distantes, como as coletadas para o talude de jusante (Figura 100).

As canaletas possuem pouco acúmulo de sedimentos, contudo, o que não foi possível identificar, pois esses sedimentos não chegam a obstruir as canaletas.

100 % dos inspetores entrevistados identificaram a obstrução vegetal das canaletas de drenagem do talude de jusante.

Figura 100 – Canaletas de drenagem do talude de jusante obstruídas por vegetação



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

Questão 9. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível aferir sobre possíveis anomalias nas canaletas de drenagem? Dê uma nota de 1 a 5 (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

A resposta média para essa pergunta foi 3,66, indicando que a possibilidade em aferir sobre anomalias nas canaletas de drenagem está entre “suficiente” e “bom”. A distribuição dos resultados respondidos para essa questão é apresentada na Tabela 12. Esse resultado implica que as imagens apresentadas são relevantes para indicar ações de manutenção corrente nas canaletas.

Tabela 12 – Respostas dos especialistas entrevistados para a questão 9 do questionário da Barragem do DNOS

<i>Resposta</i>	<i>Frequência da resposta</i>	<i>Percentual</i>
1: Muito ruim	1	8 %
2: Ruim	0	0 %
3: Suficiente	3	25 %
4: Bom	6	50%
5: Muito bom	2	16 %
TOTAL	12	100 %

Fonte: elaborado pela autora.

Questão 10. Você identifica algum sinal de que o talude tenha surgências?

A resposta esperada para essa questão é SIM. O talude apresenta surgências no pé de jusante, em grande parte da extensão da barragem, como pode ser verificado na Figura 95.

Dos doze inspetores que analisaram as barragens, todos responderam que identificaram sinais de surgências no talude de jusante. No entanto, quatro inspetores indicaram para outros sinais no talude, que não representam surgências. Assim, tem-se que 67 % dos inspetores identificaram corretamente a anomalia, conforme o esperado, e 33 % indicaram outra anomalia.

Verifica-se que esses quatro inspetores atribuíram a mudança de coloração do solo, onde é marrom mais escuro, à existência de surgências, enquanto é, de fato, apenas falha da proteção vegetal, conforme mostra a Figura 101.

Figura 101 – Anomalia confundida com surgências no talude



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

b) Talude de montante

Questão 11. Você identifica EROSÕES no talude de montante?

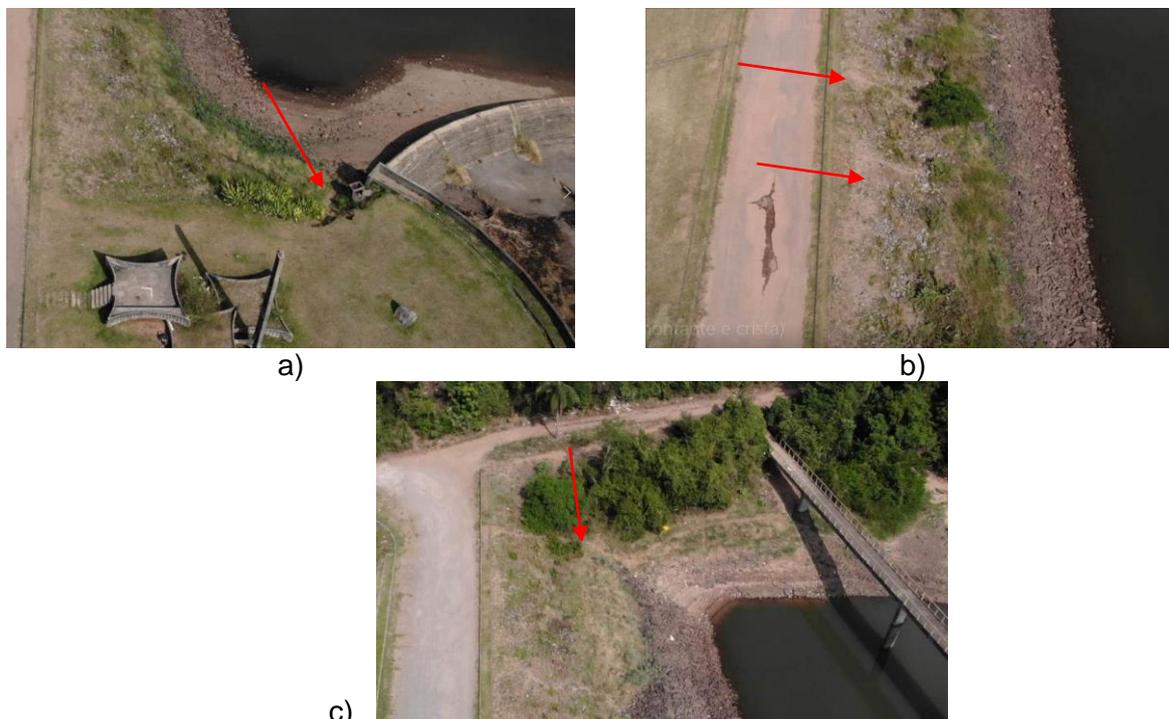
A resposta esperada para a identificação de erosões no talude de montante é SIM.

Dentre os inspetores que analisaram as imagens das barragens, 75 % afirmaram identificar erosões, apontando para as situações acima apresentadas, conforme a resposta esperada para a questão.

Existem três situações principais que poderiam ser identificadas: em a) erosão na ombreira esquerda, em b), erosão ao longo do talude (existem vários

pontos, alguns mais sutis, outros mais evidentes) e c) na ombreira direita, conforme apresentado na Figura 102.

Figura 102 – Situações em que podem ser verificadas erosões no talude de montante



Fonte: a autora. Imagens extraídas dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

Questão 12. Existe algum sinal de DESLIZAMENTO ou ESCORREGAMENTO no talude de montante?

A resposta esperada é NÃO. Não foi possível identificar pelas imagens coletadas ou nas inspeções *in loco*, sinais de instabilidades no talude de montante.

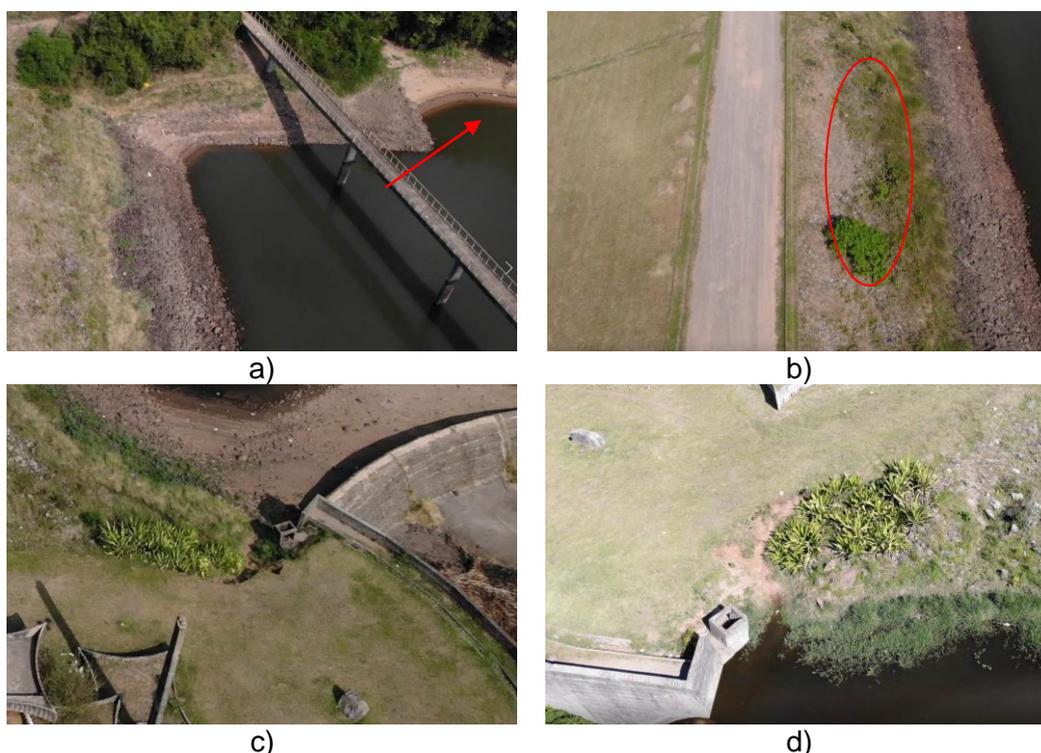
75 % dos inspetores entrevistados responderam que não identificaram deslizamentos ou escorregamentos nos taludes, como era esperado. 25 % dos inspetores (3), contudo, responderam afirmativamente, como abaixo explicado.

Dentre os três inspetores que identificaram deslizamento ou escorregamento, verifica-se que um apontou para a situação apresentada na Figura 103 a), na qual refere-se ao reservatório, e não ao talude, onde não existe mais a proteção *do rip-rap* e por isso houve uma formação de praia, não caracterizando, contudo, anomalia relacionada a deslizamentos. Acredita-se que a praia formada em padrão de “arco” tenha sido atribuída ao padrão de deslizamento (escarpa)

Na Figura 103 b), mostra-se uma região do talude de montante no qual existe falha na proteção vegetal, deixando o talude desprotegido. A configuração da falha também foi atribuída a deslizamentos, por um inspetor.

Na situação apresentada na Figura 103 c) e d) um inspetor identificou desmoronamento do talude próximo à ombreira, que, na verdade, trata-se de erosão, não de instabilidade do talude. Em c) apresenta-se a imagem dos vídeos disponibilizados aos inspetores e em d), a mesma situação, porém obtida do modelo tridimensional gerado para a barragem.

Figura 103 – Situações apontadas pelos inspetores como deslizamentos ou escorregamentos no talude de montante. Em a), no reservatório, próximo à ombreira direita, em b) no meio do talude e em c) e d), na ombreira esquerda



Fonte: a autora. Imagens extraídas dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

Questão 13. Existe algum sinal de AFUNDAMENTO ou RECALQUE no talude?

A resposta esperada é NÃO, pois não foi identificado, nem nos vídeos e nem nas inspeções *in loco* sinais de recalques, assentamentos ou afundamentos.

Todos os Inspetores (100 %) responderam que não existem sinais de afundamentos ou recalques, como era o esperado para a questão.

Questão 14. Você identifica algum ponto que o RIP-RAP está INCOMPLETO, OBSTRUÍDO OU DESLOCADO?

A resposta esperada para a questão 14 é NÃO. De forma geral, o *rip-rap* encontra-se em boas condições. Não existe um alinhamento perfeito do *rip-rap*, haja vista que a barragem se encontra em operação há 6 décadas. Contudo, essa situação não caracteriza uma anomalia.

Para a questão 14, considera-se que 100 % das respostas foram satisfatórias e coerentes.

Dos doze inspetores entrevistados, quatro (33 %) responderam que não existem deslocamentos no *rip-rap*, cinco inspetores (42 %) apontaram para desalinhamentos sutis (conforme apresentado na Figura 104), dois inspetores (16 %) identificaram falha no *rip-rap* da ombreira direita, o que é verdadeiro, pois de fato o *rip-rap* é ausente nessa região (Figura 105). Um inspetor afirma ter identificado falha no *rip-rap*, no entanto, apontou para falha na proteção vegetal do talude de montante. A resposta desse inspetor, portanto, foi invalidada, haja vista que o mesmo não inspecionou o elemento da questão, que era o *rip-rap*.

Figura 104 – Resposta de inspetor para desalinhamento sutil no *rip-rap*



Fonte: Questionário de inspeção preenchido por inspetor, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletado em 23/01/2022.

Figura 105 – Resposta de inspetor para ausência do *rip-rap* do talude de montante junto à ombreira direita



Fonte: Questionário de inspeção preenchido por inspetor, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletado em 23/01/2022.

Questão 15. Existem ÁRVORES E ARBUSTOS no talude de montante que precisam ser removidos?

A resposta esperada é SIM, pois existem várias árvores e arbustos no talude de montante que devem ser removidos, considerando as boas práticas de manutenção de barragens. Exemplos dessa situação são mostrados na Figura 106.

92 % dos inspetores entrevistados responderam identificar árvores e arbustos no talude de montante e um inspetor (8 %), afirma não ter identificado.

Figura 106 – Árvores identificadas no talude de montante



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletada em 23/01/2022.

d) Crista

Questão 16. Você identifica RACHADURAS na crista?

A resposta esperada é SIM. Existe uma rachadura mais significativa na crista, com empoçamento de água (Figura 107). No entanto, a causa mais provável é que essa anomalia seja apenas no pavimento da pista, que não possui revestimento, sem significar, contudo, instabilidade do talude.

92 % dos inspetores responderam que identificam rachaduras e um inspetor respondeu que não existem rachaduras na crista.

Figura 107 – Anomalia identificada na crista da barragem



Fonte: a autora. Imagens extraídas dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 17. Você identifica sinais de AFUDAMENTOS ou RECALQUES na crista?

A resposta esperada é NÃO. O barramento não apresenta problemas de recalques, assentamentos ou afundamentos, que possam ser percebidos nos vídeos e nas inspeções *in loco* realizadas.

Para essa questão, considera-se que 33 % das respostas foram satisfatórias, de acordo com o esperado, e 67 % não.

Dentre os doze inspetores que analisaram as barragens, quatro (33 %) responderam que não haviam sinais de afundamentos ou recalques e oito (67 %) responderam que encontraram algum tipo desses sinais. No entanto, os sinais apontados pelos oito inspetores referiam-se a pequenas falhas no pavimento da crista, como mostrado na Figura 107, e por isso foram consideradas respostas não satisfatórias.

Questão 18. Existem sinais de DESALINHAMENTO da crista?

A resposta esperada para sinais de desalinhamento na crista é NÃO. Não foram identificadas anomalias desse tipo pelos vídeos e nas inspeções *in loco*.

Os doze inspetores entrevistados (100 %) responderam que não havia sinal de desalinhamento na crista, mostrando que a perspectiva de captura de imagens com *drone* foi adequada para essa verificação.

e) Soleira do vertedouro

Questão 19. Você identifica RACHADURAS ou TRINCAS no concreto da soleira do vertedouro?

A resposta esperada é SIM. A soleira do vertedouro apresenta várias fissuras, rachaduras ou trincas.

100 % dos inspetores que analisaram as imagens identificaram exemplos de fissuras na soleira do vertedouro, como é mostrado na Figura 108.

Figura 108 – Fissuras observadas na soleira do vertedouro



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 20. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS ou indícios de corrosão de armaduras no concreto da soleira do vertedouro?

A resposta esperada é NÃO. A soleira do vertedouro possui vários tipos de anomalias e processos de deterioração, mas não há evidências de armaduras expostas.

67 % dos inspetores responderam não terem identificado armaduras expostas ou sinais de corrosão, conforme o esperado para a questão, e 33 % apontaram para outras anomalias, como fissuras ou junta de dilatação, conforme mostra a Figura 109.

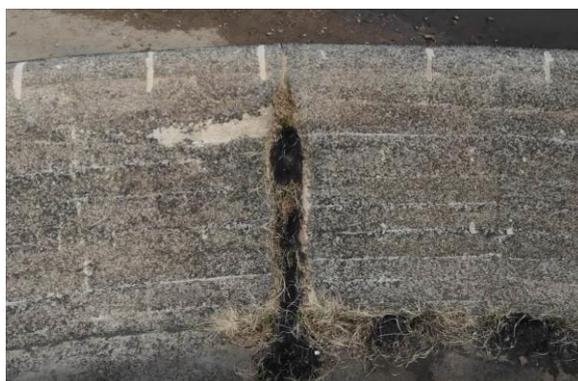
É importante ressaltar que, como o vertedouro não estava vertendo, havia sido realizado, poucos dias antes da inspeção, manutenção para a retirada da vegetação da soleira e da laje de fundo e, por esse motivo, em algumas regiões a vegetação aparece escurecida (Figura 110).

Figura 109 – Anomalias identificadas na soleira do vertedouro, confundidas com exposição de armaduras



Fonte: Questionário de inspeção preenchido por inspetore, a partir de vídeo coletado em 23/01/2022.

Figura 110 – Vegetação escurecida na soleira do vertedouro, que passou por ação de manutenção visando a remoção



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 21. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto?

A resposta esperada é SIM. A soleira do vertedouro apresenta a superfície erodida pela ação da água, com desgaste do concreto, deixando os agregados expostos, como pode ser visto nos exemplos a) e b) da Figura 111.

Todos os inspetores (100 %) que analisaram as barragens responderam positivamente, que é possível identificar a erosão superficial do concreto da soleira.

Figura 111 – Fotografias de exemplo da erosão superficial da soleira do vertedouro



Fonte: a autora. Fotografias obtidas com telefone celular em 23/01/2022.

Questão 22. As JUNTAS DO CONCRETO da soleira estão danificadas?

A resposta esperada é SIM. Além de as juntas estarem danificadas, há vegetação entre elas, o que foi percebido pelos doze inspetores entrevistados (100 %) (Figura 112).

Figura 112 – Juntas de dilatação da soleira do vertedouro danificadas e com vegetação



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 23. Você identifica algum sinal de que a estrutura da soleira está DESLOCADA, ou seja, sofreu movimentação?

A resposta esperada é NÃO. Embora a soleira apresente outras anomalias e falhas nas juntas de dilatação, ela não se encontra deslocada.

75% responderam que não existe sinal de deslocamento da estrutura, conforme a resposta esperada, e 25 % responderam que identificaram deslocamento, apontando, contudo, para as juntas de dilatação.

f) Muros laterais do vertedouro

Questão 24. Os muros laterais do vertedouro apresentam desalinhamento?

A resposta esperada para essa questão é NÃO. Embora exista vegetação externa e juntas de dilatação danificadas, os muros laterais não apresentam desalinhamento.

75 % dos inspetores responderam não ter verificado desalinhamento e 25 % afirmaram encontrar alguma situação de desalinhamento.

Um dos inspetores, que reportou desalinhamento, apontou para a situação mostrada na Figura 113. Existe uma parte do vertedouro em que o caimento sofre mudança no caimento, ou seja, aumenta o caimento. Os muros laterais, por sua vez, acompanham o caimento do vertedouro, dando a impressão de que estão desalinhados nesse ponto.

Figura 113 – Ponto mudança de caimento do vertedouro



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 25. Existem sinais de deterioração do concreto nos muros laterais do vertedouro como FISSURAS, ARMADURAS EXPOSTAS OU SINAIS DE CORROSÃO?

A resposta considerada correta é SIM, pois os muros laterais possuem fissuras, e muitas delas apresentam algum sinal de “escorrimento” ou lixiviação. Além disso, o muro lateral direito é um muro também de contenção, no qual o solo está em contato direto com a estrutura. Por esse motivo, existem algumas manchas de material do solo nos muros. Não há indícios de corrosão de armaduras, contudo.

67 % dos inspetores responderam que sim, apontando para fissuras nos muros laterais do vertedouro, conforme o esperado e, 33 % responderam que não haviam sinais de fissuras ou corrosão.

Dentre os doze inspetores, dois apontaram para manchas avermelhadas, como mostra a Figura 114.

Figura 114 – Exemplo de mancha no muro lateral do vertedouro, indicando para possível corrosão de armaduras, em fissura



Fonte: Questionário de inspeção preenchido por inspetores, a partir de vídeo disponibilizado aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

As fissuras que existem nos muros laterais são de pequena abertura e de difícil identificação. Cabe ressaltar que os dias que antecederam a coleta de imagens eram datas de estiagem, e por esse motivo, o solo e o concreto estavam secos. Na inspeção realizada no dia 21/10/2021, no entanto, havia chovido nos dias anteriores, e assim, foi possível identificar com mais clareza essas pequenas fissuras, devido à infiltração de água por entre elas, como mostra a Figura 115.

Figura 115 – Imagem do muro lateral direito do vertedouro, no qual é possível identificar pequenas fissuras devido à percolação de água por dentre elas



Fonte: a autora. Imagem obtida com *drone* em 21/10/2021, não disponibilizada aos inspetores.

Questão 26. Há vegetação no lado externo dos muros laterais que deveria ser removida?

A resposta esperada é SIM. Existe vegetação densa de grande porte, adjacente aos muros laterais do vertedouro, como pode ser observado na Figura 116.

Todos os inspetores (100 %) indicaram que existe vegetação que precisa ser removida.

Figura 116 – Vegetação de grande porte junto aos muros laterais do vertedouro



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

g) Laje de fundo do vertedouro

Questão 27. Quais desses itens você verifica que existem na laje de fundo do vertedouro?

As respostas esperadas para essa questão são:

- Vegetação: SIM (Figura 117). 100 % dos inspetores responderam corretamente.
- Lixo ou entulhos: SIM. 75 % responderam afirmativamente. No entanto, a constatação de “lixo ou entulhos” também pode ser subjetiva, uma vez que pedaços de árvores carreados também podem ser considerados como entulhos
- Pedacos de rocha: SIM. Não haviam pedacos de rochas desmoronados de taludes adjacentes. Contudo, na saída do vertedouro, onde existem danos na laje de fundo, é possível verificar

rochas da própria fundação da laje deteriorada (Figura 118). 83 % dos inspetores responderam afirmativamente.

- Animais: NÃO. Não havia nenhum tipo de animal no vertedouro. 100 % dos inspetores responderam corretamente.

Figura 117 – Laje de fundo do vertedouro, próxima à soleira, com vegetação que fora tratada para remoção



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Figura 118 – Laje de fundo do vertedouro, próxima à bacia de dissipação



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 28. Você identifica falhas nas juntas de concretagem da laje de fundo do vertedouro?

A resposta esperada para essa questão é SIM.

58 % dos inspetores entrevistados responderam afirmativamente, de acordo com o resultado esperado, e 42 % afirmaram que não haviam falhas nas juntas de concretagem.

Embora as juntas de concretagens sejam marcas inerentes da construção, observa-se que a vegetação cresce por entre elas, indicando que as juntas de concretagem apresentam falhas, ou seja, não são totalmente vedadas e intactas. Essa situação é claramente observada próxima à soleira do vertedouro (Figura 119 a). Além disso, existem falhas nas juntas da laje de fundo do canal do vertedouro, próximas à saída do vertedouro, como apresentado em b).

Figura 119 – Falhas nas juntas de concretagem da laje de fundo do vertedouro, em a) próximo à soleira e em b), próximo à saída do vertedouro.



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 29. Existem fraturas nas lajes de fundo do vertedouro?

A resposta esperada é SIM. Acredita-se que essa seja a anomalia mais significativa da barragem, e foi corretamente identificada por todos os inspetores que analisaram as imagens, 100 %. A situação é mostrada na Figura 120, na qual verifica-se que as duas últimas lajes do vertedouro foram totalmente danificadas, a montante da bacia de dissipação.

Figura 120 – Fraturas nas lajes da saída do vertedouro



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 30. Você identifica EROSÃO DO SOLO na saída do vertedouro? (Bacia de dissipação).

A resposta esperada é SIM. O solo abaixo das lajes do vertedouro, próximas à região em que houve fratura do concreto da laje de fundo apresenta-se erodido,

tornando a próxima laje (a montante) suscetível à falha. Essa situação é apresentada na Figura 121.

60% dos inspetores responderam que sim, que havia erosão do solo e 40 % responderam que não identificaram erosão do solo na saída do vertedouro.

Para a amostra das respostas dessa questão, considerou-se um número de 10 inspetores, pois 2 especialistas indicaram anomalias na soleira do vertedouro, não representando assim a estrutura correta que estava sendo analisada e, portanto, a resposta dos mesmos foi anulada para essa questão.

Figura 121 – Erosão de solo abaixo de laje do vertedouro



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

g) Ponte

Questão 31. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS nas vigas e tabuleiro da ponte?

A resposta esperada para essa questão é NÃO. Não existem armaduras propriamente expostas. No entanto, algumas colônias de insetos ou manchas avermelhadas de solo que aparecem nos drenos e nos pilares, podem tornar difícil a o correto diagnóstico dessas anomalias.

83 % dos inspetores responderam que não haviam armaduras expostas nas vigas e tabuleiro da ponte, conforme o esperado para a questão. 16 %, contudo, responderam afirmativamente, apontando para as situações mostradas na Figura 122. Em a), verifica-se drenos da crista, na qual ocorreu carreamento de partículas avermelhadas de solo e em b), colônias de insetos que, a partir das imagens se assemelham a armaduras expostas.

Figura 122 – Vigas e tabuleiros da ponte em que existem situações difíceis de distinguir de sinais de corrosão de armaduras



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022.

Questão 32. Você identifica FISSURAS, RACHADURAS OU TRINCAS nas vigas e tabuleiro da ponte?

A resposta esperada é SIM. Existem fissuras sutis nas vigas da ponte. No entanto, as marcas das formas de concretagem podem dificultar a correta detecção dessas anomalias.

Todos os inspetores entrevistados (100 %) identificaram fissuras. Um exemplo de fissura em viga é mostrado na Figura 123.

Figura 123 – Exemplo de fissura em viga da ponte



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022

Questão 33. Você identifica alguma FALHA DE CONCRETAGEM nas vigas e tabuleiro da ponte?

A resposta esperada é SIM. As fichas de inspeção sugeridas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento não sugerem esmiuçar o tipo de anomalia que

pode acometer vigas das pontes. Contudo, existe uma região de determinada viga da ponte da barragem que apresenta uma nítida falha de concretagem (conhecidas como ninhos ou bicheiras), conforme mostra a Figura 124. Assim, essa pergunta foi selecionada para testar a detecção dos inspetores que analisaram as barragens.

92 % dos especialistas responderam que identificaram a anomalia, apontando corretamente para ela. Apenas um inspetor (8 %) não reportou a identificação da anomalia.

Figura 124 – Falha de concretagem presente em viga da ponte



Fonte: a autora. Imagem extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletadas em 23/01/2022

4.3.1.1 Síntese e discussão dos resultados das inspeções virtuais da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim

Neste subcapítulo são apresentados e discutidos, sinteticamente, os resultados médios obtidos para as questões de SIM OU NÃO do questionário de inspeção da Barragem do DNOS, organizados de acordo com as estruturas da barragem: barramento, vertedouro e ponte.

Na Tabela 13 apresenta-se a resposta esperada para questão, o percentual de inspetores que responderam SIM ou NÃO, sendo que os valores em verde referem-se a resultados satisfatórios, ou seja, de acordo com o esperado. Além disso, apresenta-se a resposta satisfatória média para cada estrutura e/ou elemento, indicando o quanto cada estrutura e elemento pode ser corretamente inspecionado através das imagens obtidas com uso de *drone*, mediante as inspeções virtuais realizadas por inspetores especialistas, na metodologia do estudo. Na sequência, é brevemente discutido sobre os resultados individuais das estruturas e elementos da barragem.

Tabela 13 – Sumarização dos resultados do questionário de inspeção da Barragem do DNOS

Estrutura/elemento	Questão	Resposta esperada	% Resposta dos inspetores		Resposta satisfatória média por estrutura/elemento	
			SIM	NÃO		
Barramento	1	SIM	92%	8%	76%	
	2	NÃO	33%	67%		
	3	NÃO	17%	83%		
	5	SIM	92%	8%		
	6	SIM	33%	67%		
	8	SIM	100%	0%		
	10	SIM	67%	33%	83%	
	11	SIM	75%	25%		
	12	NÃO	25%	75%		
	Talude de montante	13	NÃO	0%	100%	88%
		14 *	NÃO	0%	100%	
		15	SIM	92%	8%	
	Crista	16	SIM	92%	8%	75%
		17	NÃO	67%	33%	
		18	NÃO	0%	100%	
	Vertedouro	19	SIM	100%	0%	88%
		20	NÃO	33%	67%	
		21	SIM	100%	0%	
22		SIM	100%	0%		
23		NÃO	25%	75%		
Muros laterais do vertedouro		24	NÃO	25%	75%	81%
		25	SIM	67%	33%	
		26	SIM	100%	0%	
Laje de fundo do vertedouro		27a	SIM	100%	0%	82%
		27b	SIM	75%	25%	
		27c	SIM	83%	27%	
		27d	NÃO	0%	100%	
	28	SIM	58%	42%		
	29	SIM	100%	0%		
30	SIM	60%	40%			
Ponte	31	NÃO	83%	17%	70%	
	32	SIM	100%	0%		
	33	SIM	92%	8%		
Total Barragem	-	-	-	-	81 %	

Fonte: elaborado pela autora.

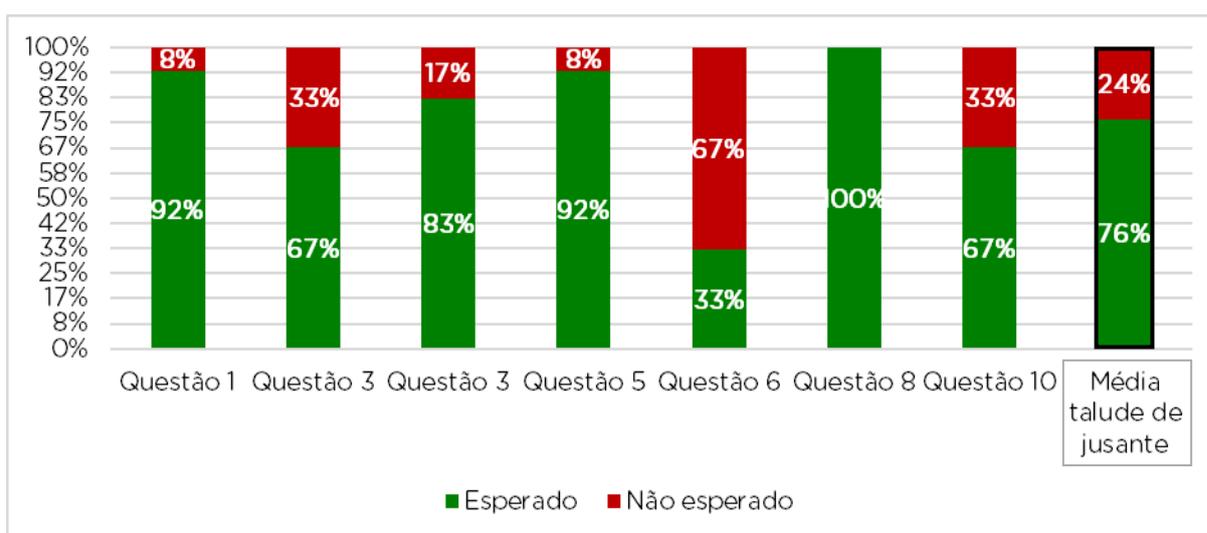
a) Barramento

O barramento foi analisado pelos elementos talude de jusante, talude de montante e crista.

- **Talude de jusante**

O talude de jusante resultou em percentuais satisfatórios, em média, de 76 %. Verifica-se que as imagens coletadas foram suficientes para a identificação da existência ou inexistência das principais anomalias que devem ser verificadas em taludes de jusante. O Gráfico 9 mostra os percentuais para cada questão relacionada ao talude de jusante, bem como a média das questões para o elemento.

Gráfico 9 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao talude de jusante

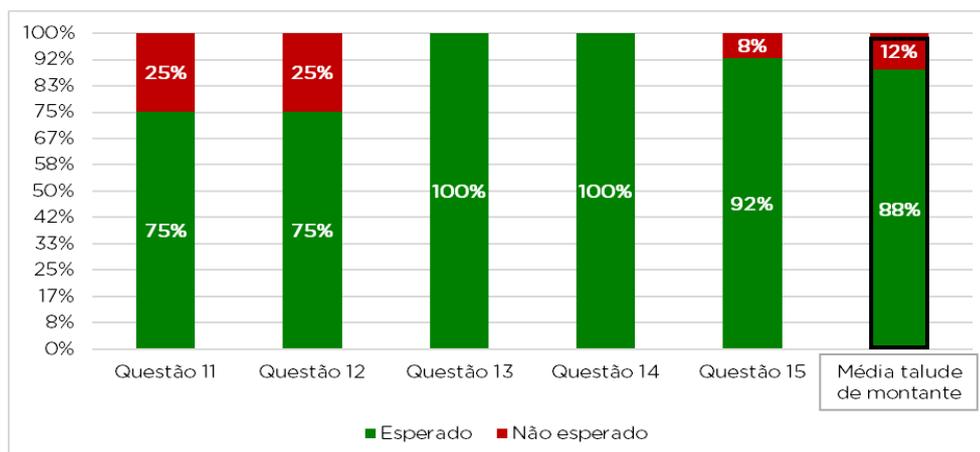


Fonte: elaborado pela autora.

- **Talude de montante**

Os resultados obtidos para as questões relacionadas ao talude de montante também foram satisfatórios, totalizando média de 88 % para a estrutura (Gráfico 10). Verifica-se que o percentual do talude de montante foi maior do que o do talude de jusante, com base no questionário elaborado.

Gráfico 10 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas ao talude de jusante

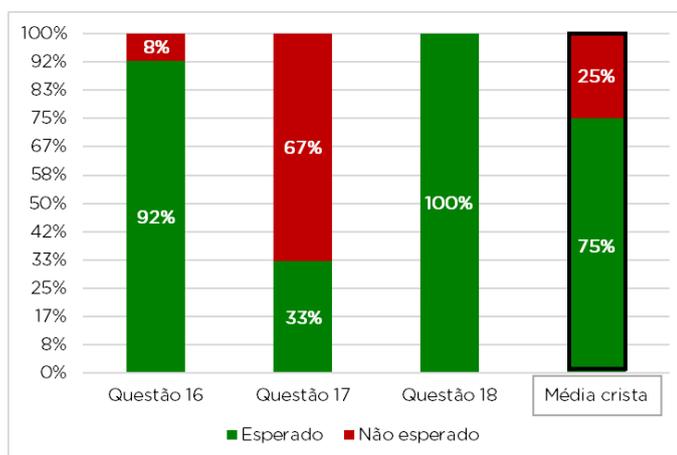


Fonte: elaborado pela autora.

- **Crista**

Para a crista da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, considera-se que o resultado geral também é satisfatório, com a média de 75 % para a estrutura., como mostra o Gráfico 11.

Gráfico 11 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à crista da barragem



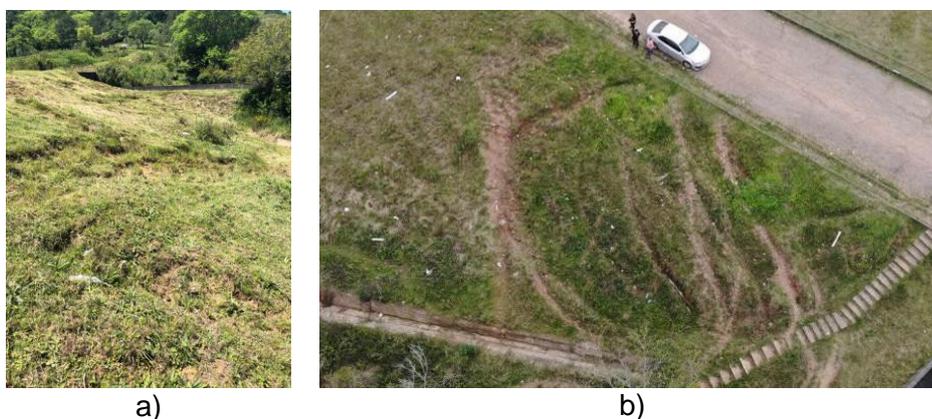
Fonte: elaborado pela autora.

- **Total do barramento**

O resultado médio ponderado de respostas satisfatórias para o barramento foi de 83 %, provando assim a aplicabilidade da metodologia adotada nesta dissertação para a inspeção de barramentos de aterro.

Erosões foram satisfatoriamente identificadas nos taludes de montante e de jusante, tanto as erosões significativas constantes na ombreira esquerda a jusante, quanto as erosões mais sutis existentes no parâmetro de montante. Com base nesse estudo de caso, pode-se afirmar que a inspeção com o uso de *drone* facilita a identificação de erosões nos taludes, como é mostrado na Figura 125, que compara a perspectiva de identificação da anomalia percorrendo a barragem pessoalmente em comparação com a perspectiva da identificação da anomalia com o uso de *drone*.

Figura 125 – Em a) fotografia obtida com telefone celular e em b) obtida com *drone*



Fonte: a autora. Imagens registradas em 02/09/2021.

A partir da análise de imagens obtidas com *drone*, nos parâmetros de coleta de imagens adotados neste estudo, verifica-se que deslizamentos e escorregamentos, para taludes de montante e jusante, podem ser erroneamente atribuídos a outras anomalias, como falhas na proteção vegetal ou surgências (jusante). Essa falsa impressão se dá, principalmente, quando a falha se apresenta em formato arredondado, similarmente aos arcos característicos de quando ocorrem deslizamentos em taludes. Nesse caso, para endereçar essa situação, é interessante que a captura de imagens contemple diversos ângulos, para que possam ser confirmadas e diagnosticadas as anomalias.

Nesta pesquisa, foram coletadas imagens para cada estrutura a partir de um único ângulo. Contudo, foi disponibilizado aos inspetores que realizaram inspeção virtual das imagens, o modelo tridimensional, o qual permite a análise das barragens

sob diferentes perspectivas. A exemplo disso, apresenta-se a Figura 126 que se refere à anomalia na proteção vegetal que foi erroneamente atribuída a deslizamentos. Na imagem em a) verifica-se um *frame* extraído dos vídeos disponibilizados, e em b), imagem do modelo 3D também disponibilizado, que pode ser manipulado sob diferentes perspectivas.

Figura 126 – Em a) imagem obtida pelos vídeos disponibilizados e em b), imagem do modelo tridimensional



Fonte: a autora.

Os inspetores responderam conforme o esperado para questões relacionadas à vegetação. A nota de qualidade da proteção vegetal atribuída foi parametrizada entre “ruim” e “suficiente”, o que é dentro do esperado, pois a cobertura vegetal embora estivesse aparada, estava ressecada, devido as condições climáticas. A existência de árvores e arbustos foi resposta praticamente unânime, evidenciando que a resolução utilizada na coleta de imagens para os taludes é indicada para a programação de ações de manutenção, como cortes ou podas.

Verifica-se que os resultados menos satisfatórios foram os da questão 6, que perguntava sobre a identificação de formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais. Conforme a análise documental das fichas de inspeção da Agência Nacional de Águas e Saneamento, realizada nesta pesquisa, não se acreditava que fosse possível a identificação de formigueiros. Contudo, ainda assim, alguns especialistas conseguiram identificar, apenas com as imagens obtidas com *drone* (33 % satisfatório para essa questão). Como recomendação para possíveis inspeções a serem realizadas com o uso de *drones*, cita-se que, caso haja a constatação de algum formigueiro, seja realizada inspeção *in loco*, pois podem haver outros que não são de fácil detecção, pois podem estar abaixo da proteção vegetal dos taludes.

A resposta média dos inspetores sobre a possibilidade de identificação de formigueiros, a partir das imagens disponibilizadas foi atribuída com parâmetro “ruim”, indicando que as imagens não foram ideais para a identificação de formigueiros.

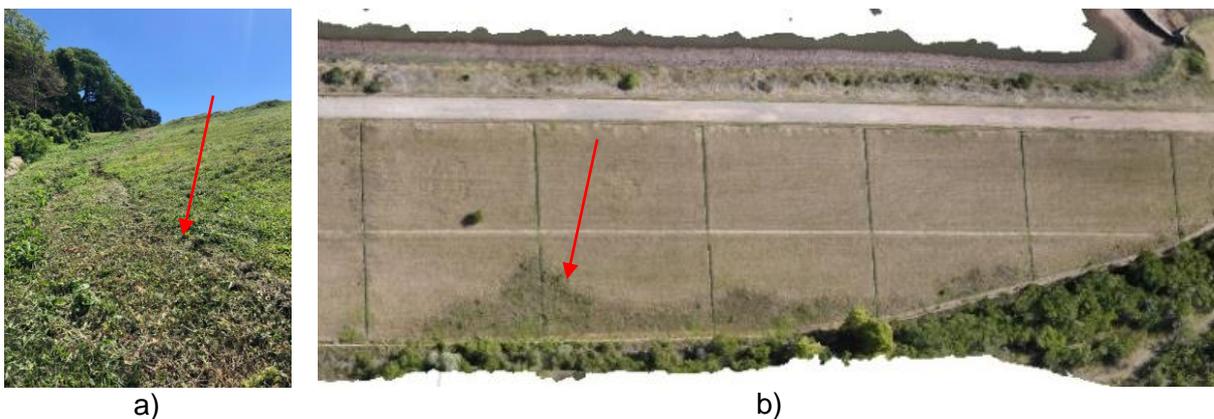
A detecção de surgências, a partir de imagens obtidas com *drone* para inspeções de barragens se dá, primordialmente, pela identificação da mudança de coloração do solo ou da vegetação.

Alguns inspetores atribuíram falha na proteção vegetal à existência de surgências, como mostrado na Figura 101. É esperado, contudo, que surgências ocorram no pé da barragem, e não próximas à crista, como foi o caso apontado nessa figura. Acredita-se que quem identificou a cor marrom do solo, devido à falha na proteção vegetal, não tinha familiaridade com inspeções de barragens ou ainda, não teve noção espacial adequada a partir dos vídeos disponibilizados.

Alguns inspetores atribuíram a detecção de surgências existentes no pé do talude, evidenciadas pela mudança no padrão da vegetação, à deslizamentos, também pela forma arredondada que a mesma apresentava, como fora mostrado na Figura 94.

Para a detecção desse tipo de surgência, a utilização de *drones* é vantajosa, se comparada com a inspeção tradicional *in loco*, como pode ser verificado na Figura 127, que compara a constatação de surgências no pé do talude *in loco*, com a imagem do modelo tridimensional gerado.

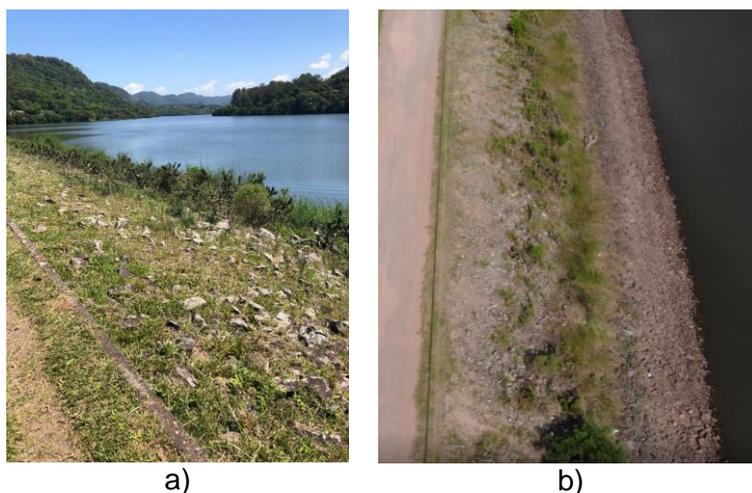
Figura 127 - Em a) fotografia obtida com telefone celular e em b) imagem do modelo tridimensional



Fonte: a autora.

O *rip-rap* foi corretamente inspecionado por todos os inspetores, demonstrando que a perspectiva da captura de imagem obtida com *drone* é interessante para a identificação de anomalias no *rip-rap*, mesmo as de desalinhamentos sutis. Essa situação pode ser verificada na Figura 128, que compara a perspectiva de inspeção *in loco* do talude de montante, com a perspectiva aérea, obtida com *drone*.

Figura 128 – Vistas do talude de montante, em a) a partir de inspeção *in loco* e em b), com imagens capturadas com drone.



Fonte: a autora. Imagem obtida com telefone celular em 21/10/2021 e extraída dos vídeos disponibilizados aos inspetores, coletados em 23/01/2022.

As rachaduras na crista foram verificadas devido à presença de umidade que estava acumulada no pavimento. Pela distância das imagens coletadas para a crista, acredita-se que somente fendas mais significativas poderiam ter sido constatadas, ainda dependendo condição da proteção vegetal ou granular dos taludes. Assim recomenda-se que, caso seja esperado que existam problemas relacionados a instabilidades de taludes, a coleta de dados seja programada para possibilitar a identificação mais de perto dessas possíveis anomalias.

Afundamentos e recalques referem-se a situações específicas que refletem instabilidade dos taludes de aterro. Contudo, é possível e frequente que defeitos no pavimento ou pista de acesso da crista sejam erroneamente atribuídos a problemas relacionados à instabilidade dos taludes (DSS, 2016).

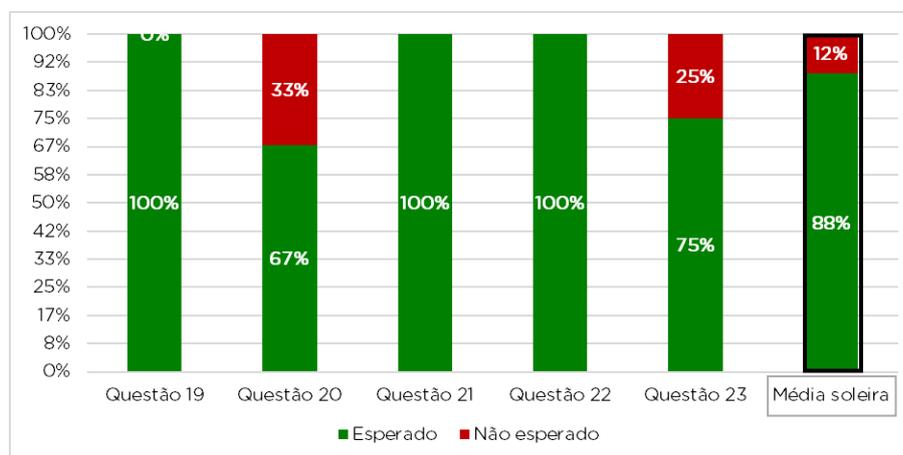
b) Vertedouro

O vertedouro foi analisado pelos elementos soleira, muros laterais e laje de fundo.

- **Soleira**

A inspeção da soleira do vertedouro resultou em bons percentuais, totalizando 88 % de respostas satisfatórias para a estrutura (Gráfico 12). Verifica-se que a aproximação do *drone* à estrutura facilitou a correta identificação de anomalias por parte dos inspetores que analisaram as imagens.

Gráfico 12 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à soleira do vertedouro



Fonte: elaborado pela autora.

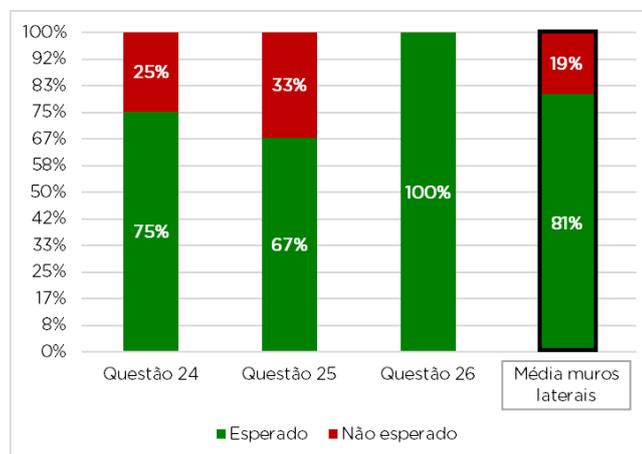
A identificação de armaduras expostas ou indícios de corrosão na soleira não foram em totalidade corretamente identificados pelos inspetores, pois foram confundidos com juntas ou fissuras. No entanto, a proximidade da soleira possibilitou a satisfatória identificação de danos superficiais no concreto da soleira do vertedouro, como erosões. As juntas de dilatação da soleira foram corretamente avaliadas, com percepção unânime.

A soleira da Barragem do DNOS é de grande extensão e, em casos de a barragem encontrar-se vertendo, a inspeção com *drones* seria uma ferramenta de grande utilidade, devido à dificuldade de acesso à soleira.

- **Muros laterais**

Os muros laterais dos vertedouros também apresentaram resultados satisfatórios de inspeção, totalizando 81 % em média, como mostra o Gráfico 13.

Gráfico 13 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas aos muros laterais do vertedouro



Fonte: elaborado pela autora.

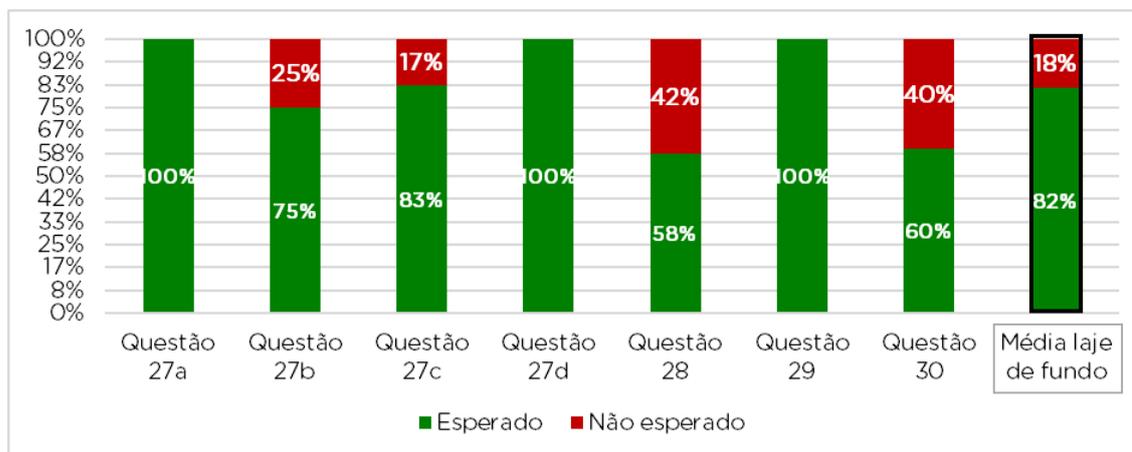
Para identificação de desalinhamentos nos muros laterais acredita-se que seja necessário a coleta de imagens com *drone* sob perspectivas estratégicas que possam refletir na percepção correta da existência ou inexistência de anomalias desse tipo. No caso da barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, a existência de vegetação densa na lateral dos muros dificulta a identificação, assim como impossibilita a realização de voos de *drone* muito próximos às árvores.

A identificação de fissuras em concreto é sutil e depende diretamente da qualidade das imagens coletadas. No entanto, nas estruturas associadas que são de concreto, é mais fácil a identificação de fissuras pela presença de umidade entre elas, ou pela lixiviação de compostos, do que pela abertura em si. Condições climáticas como umidade e temperatura, bem como a barragem estar vertendo ou não, no momento da coleta de dados, podem interferir na qualidade das imagens geradas, sob o aspecto da facilidade ou dificuldade de detecção.

- **Lajes de fundo**

A análise das lajes de fundo totalizaram 82% de resposta conforme esperado, como é mostrado no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as lajes de fundo do vertedouro



Fonte: elaborado pela autora.

Na questão 28, referente a “falhas nas juntas”, verifica-se que a resposta tende a ser subjetiva, pois o que um inspetor considera falha, não necessariamente será considerado por outro. Na tentativa de endereçar essa subjetividade, a sugestão padronizada pela ANA é que se estabeleça, para cada anomalia, a quantificação de magnitude e nível de perigo. Contudo, nesta pesquisa, o objetivo não se tratava da classificação da anomalia, mas sim, da percepção ou não das mesmas.

A fratura da laje existente na saída do vertedouro foi enfatizada nas imagens coletadas, o que refletiu em respostas 100 % conforme o esperado para a identificação. Assim, verifica-se que se o piloto do *drone* tiver algum tipo de conhecimento de anomalias em barragem, certamente ele vai enfatizar a qualidade da coleta de imagens nas anomalias verificadas, otimizando o processo de inspeção e contribuindo para o correto diagnóstico, por parte de quem analisar virtualmente as imagens.

- **Total do vertedouro**

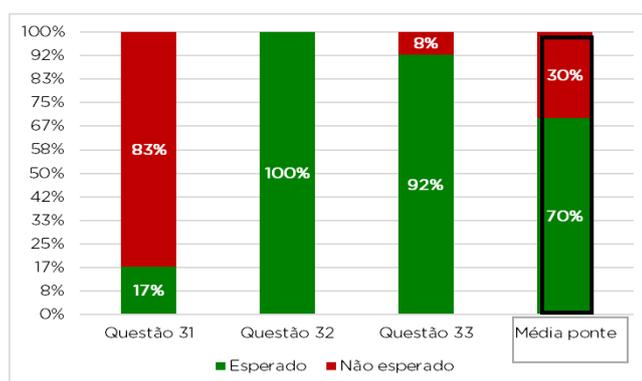
Verifica-se, portanto, que a inspeção do vertedouro da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim resultou em percentuais satisfatórios (84 %) para a identificação da existência ou não de anomalias que podem acometer vertedouros, considerando o questionário utilizado na pesquisa.

c) Ponte

A ponte foi analisada pelas vigas e tabuleiro e pilares, nas questões 31 a 33. Verifica-se que a resposta média para a identificação satisfatória da existência ou inexistência de anomalias na ponte, pelas imagens obtidas com *drones* foram satisfatórias, de 70 %, como é mostrado no Gráfico 15.

A possibilidade de inspeção em pontes com o uso de *drones* é considerada vantajosa, haja vista que se trata de uma estrutura de difícil acessibilidade para o inspetor.

Gráfico 15 – Percentual de respostas conforme esperado ou não esperado para as questões relacionadas à ponte



Fonte: elaborado pela autora.

A partir da análise das imagens obtidas com *drone*, verifica-se que as formas de concretagem dificultam a constatação de fissuras e que manchas de solo e colônias de insetos dificultaram a detecção da possibilidade de existência de armaduras expostas na ponte da Barragem do DNOS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho tratou-se de uma avaliação preliminar da potencialidade do uso de *drones* como ferramenta auxiliar nas inspeções de segurança de barragens, bem como na gestão de segurança das mesmas.

A revisão de literatura realizada possibilitou o conhecimento de aspectos relacionados à segurança e inspeções de segurança de barragens, envolvendo as legislações que devem ser atendidas, as normativas sugeridas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). Além disso, a revisão abordou temas relacionados à operação de *drones* e estudos utilizando *drones* para inspeções de barragens, que demonstram o estado da arte das pesquisas nessa linha.

A primeira etapa da pesquisa refere-se à análise documental das fichas de inspeção sugeridas pela ANA, para barragens de aterro e de concreto. Como conclusões dessa etapa, cita-se:

- i) Os itens constantes nas fichas de inspeção possuem certa subjetividade, relacionada com a falta de especificidade dos termos utilizados, que pode ser refletida em diferentes percepções, dependendo do inspetor e da circunstância;
- ii) As classificações adotadas para os itens das fichas podem ser utilizadas para o planejamento de inspeções com uso de *drone*, no qual as áreas de melhor possibilidade de detecção visual sejam levantadas com *drone* com menor aproximação e, áreas de mais dificuldade de detecção visual sejam levantadas com *drone* com maior aproximação ao alvo;
- iii) Dentre as estruturas que podem ser inspecionadas com *drone* apresentando maiores vantagens, comparados com os métodos tradicionais, relacionadas à complexidade de acesso ou áreas muito extensas, cita-se: taludes e parâmetros, crista, vertedouros, entorno dos reservatórios, área a jusante da barragem e torre de tomada d'água;
- iv) Dentre as estruturas que podem ser inspecionadas com *drone*, porém não apresentam tanta vantagem, com relação aos métodos

tradicionais, aponta-se: ombreiras, instrumentação, estrutura de saída da galeria e medidores de vazão;

- v) Dentre as estruturas de barragens que não são possíveis de serem inspecionadas com uso de *drones*, menciona-se: galerias de drenagem e injeção, interiores de casas de máquinas ou de manobras e tubulações internas.

Em uma segunda etapa, a pesquisa objetivou averiguar as demandas e limitações técnicas e operacionais da geração de modelos tridimensionais, a partir de nuvem de pontos obtidas com *drones* comerciais e processados por computadores pessoais, bem como aferir sobre os possíveis usos e benefícios desse tipo de produto. Assim, as principais conclusões da etapa são:

- i) Em termos de operação de voo, verifica-se que, para a coleta de dados, são necessários apenas conhecimentos básicos de pilotagem de *drones* e noções sobre a segurança de voo, além de respeitar as normas vigentes para a operação de *drones* no espaço aéreo brasileiro;
- ii) O tempo de voo das missões e a quantidade de dados a serem coletados (relacionados com a altitude e sobreposição de imagens), são parâmetros que devem ser dosados para cada missão. Quanto maior a altitude, menor a resolução espacial da câmera. Por outro lado, quanto maior a altitude, menos tempo de voo é necessário, pois a área é coberta com menor número de imagens, consumindo assim menos bateria. De forma similar, quanto maior é a sobreposição utilizada, mais imagens são capturadas, demandando maior processamento;
- iii) Recomenda-se que haja etapa de planejamento para as coletas, considerando, principalmente: a delimitação exata da área de voo; a disponibilidade de uso de várias baterias, para que as trajetórias possam ser conduzidas em menores altitudes, resultando assim em maior resolução do modelo; seleção de datas para a missão com tempo estável, sem chuvas, e sem a incidência de ventos que possam interferir nos voos; selecionar o horário da coleta, de forma que não incida sombra nas regiões da barragem;

- iv) Os modelos 3D gerados nesta pesquisa, a partir de *drones* comerciais e computadores pessoais não apresentam resolução adequada para inspeção e verificação de anomalias. No entanto, situações como erosão de taludes, presença de vegetação, falta de manutenção, falhas na proteção vegetal e granular, podem ser facilmente aferidos com esse tipo de produto;
- v) Possíveis usos para modelos 3D são vários, como por exemplo: levantamento cadastral; reconstrução *as built*; simulações computacionais; monitoramento temporal da barragem, mediante repetição da geração de modelos, mapeamento de anomalias encontradas, possibilidade de avaliação por diversos especialistas e equipes, preparação para inspeções futuras, curvas de nível e apoio para modelagem de dados batimétricos, entre outros;
- vi) O tempo total de processamento foi inferior a 24 h, o que mostra a possibilidade de repetição e utilização frequente. No entanto, para que seja utilizada a máxima capacidade de resolução disponível no software, requisitos computacionais mais avançados podem ser necessários;
- vii) A utilização de modelos tridimensionais para a detecção de anomalias e manifestações patológicas precisa contar com coleta de dados em alta resolução e dados de processamento avançado.

A etapa final da pesquisa, correspondente à avaliação da possibilidade da utilização de imagens obtidas com *drone* para inspeções de barragens, através da percepção de inspetores ao avaliar as imagens virtualmente, demonstrou resultados satisfatórios, indicando a potencialidade do uso de *drones* em inspeções, conforme abaixo detalhado.

- i) Pela análise dos percentuais médios das respostas das questões de acordo com a resposta esperada, verifica-se que, para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva, as respostas satisfatórias para o barramento foram de 65 %; para o vertedouro foram de 74 %, para a ponte foram 67 % e para as ombreiras, 41%, totalizando uma média ponderada da barragem de 65% de capacidade de aferição de anomalias e manifestações patológicas, segundo a metodologia deste estudo;

- ii) Na Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, as respostas satisfatórias, conforme o esperado para o barramento foram de 83 %, para o vertedouro, 84% e para a ponte 70 %;
- iii) Verifica-se que a Barragem dos Rios Vacacaí-Mirim refletiu melhores resultados do que a Barragem Rodolfo da Costa e Silva, resultando em percentual geral de 81 % e 65 %, respectivamente. Acredita-se que esse fato se deu, pois barragens de concreto apresentam anomalias mais sutis e difíceis de serem percebidas do que as barragens de aterro;
- iv) Os resultados mais satisfatórios foram aqueles em que as imagens foram coletadas com maior aproximação do drone com relação à estrutura analisada;
- v) Nas atividades de inspeção, de um modo geral, existe a subjetividade, pois o que um inspetor considera dano, não necessariamente seria considerado por outro inspetor. Classificar as anomalias seria uma forma de reduzir essa subjetividade. No entanto, o objetivo do estudo estava na identificação de anomalias, não na classificação das mesmas;
- vi) Determinadas aferições, como desalinhamentos e juntas de dilatação seriam melhores identificadas, caso fossem coletados vídeos específicos para análise dessas situações;
- vii) A verificação de erosão de solo na saída da bacia de dissipação da Barragem Rodolfo da Costa e Silva não apresentou resultados satisfatórios. Esse resultado se deu pelo fato de que os vídeos coletados não contemplavam o ponto de vista ideal para a verificação da existência ou inexistência das anomalias. Assim, verifica-se que, para determinadas situações, é necessário realizar planejamento prévio de perspectivas estratégicas de coleta de imagens utilizando *drone*;
- viii) A existência de sombreamento em determinadas estruturas, no momento da captura das imagens dificulta a correta inspeção da estrutura, de forma virtual. Assim, enfatiza-se a necessidade de considerar a orientação solar no momento da coleta de dados;

- ix) A surgência existente na ombreira esquerda da Barragem Rodolfo da Costa e Silva foi percebida por apenas 33% dos inspetores. No entanto, essa está entre as anomalias mais sérias que a barragem apresenta. Acredita-se que esse fato se deu pelo motivo de que não foram coletadas imagens/vídeos específicos para as ombreiras, dificultando a correta interpretação das anomalias por parte dos especialistas. Além disso, a presença de sombra na ombreira esquerda, que apresenta surgência, dificultou a percepção da anomalia. Considera-se também que a vegetação na região das ombreiras não representava boas condições de inspeção das mesmas;
- x) Erosões foram satisfatoriamente identificadas nos taludes de montante e de jusante, tanto as erosões significativas constantes na ombreira esquerda a jusante, quanto as erosões mais sutis existentes no parâmetro de montante. Com base neste estudo de caso, pode-se afirmar que a inspeção com o uso de *drone* facilita a identificação de erosões nos taludes, devido à perspectiva da coleta das imagens;
- xi) Nos parâmetros de coleta de imagens adotados para a Barragem do DNOS, verifica-se que deslizamentos e escorregamentos, para taludes de montante e jusante, podem ser erroneamente atribuídos a outras anomalias, como falhas na proteção vegetal ou surgências (jusante). Nesse caso, para endereçar essa situação, é interessante que a captura de imagens contemple diversos ângulos, para que possam ser confirmadas e diagnosticadas as anomalias;
- xii) Os inspetores que participaram das inspeções virtuais responderam conforme o esperado para questões relacionadas à vegetação de taludes, tanto da proteção vegetal quanto da existência de árvores e arbustos, evidenciando que a resolução de coleta de imagens adotada nesta pesquisa é indicada para a programação de ações de manutenção, como cortes ou podas;
- xiii) A existência de formigueiros, cupinzeiros e tocas de animais é de difícil detecção, a partir de imagens obtidas com *drone*. Neste caso, recomenda-se que seja feita inspeção complementar *in loco*, para confirmação e quantificação da anomalia;

- xiv) A detecção de surgências, a partir de imagens obtidas com drone para inspeções de barragens de aterro se dá pela identificação da mudança de coloração do solo ou da vegetação. Assim, verifica-se que alguns inspetores não conseguiram identificar corretamente a anomalia, associando-a a outras anomalias. No entanto, a partir da observação de imagens como panorama geral, a utilização de imagens obtidas com *drone*, devido à perspectiva aérea de coleta de imagens, é vantajosa, comparada com a detecção convencional;
- xv) O *rip-rap* foi corretamente inspecionado por todos os inspetores, demonstrando que a perspectiva da captura de imagem obtida com *drone* é interessante para a identificação de anomalias no *rip-rap*, mesmo as de desalinhamentos sutis;
- xvi) Pela distância das imagens coletadas para a crista da Barragem do DNOS, acredita-se que somente fendas mais significativas podem ser constatadas e que rachaduras menores não sejam possíveis de serem identificadas. Assim recomenda-se que, caso seja esperado que existam problemas relacionados a instabilidades de taludes, a coleta de dados seja programada para possibilitar a identificação mais de perto dessas possíveis anomalias.

De forma geral, verifica-se que a adoção de drones comerciais para as inspeções de barragens traz inúmeras vantagens e possibilidades. Esse estudo permitiu a identificação de alguns fatores limitantes, que devem ser planejados, para que resultem em imagens de qualidade, facilitando as atividades de inspeção.

Dentre algumas vantagens evidenciadas, além das possibilidades destacadas da utilização de modelos tridimensionais, cita-se: velocidade de coleta de dados, otimização do tempo das inspeções, possibilidade de captura de imagens sob diferentes perspectivas, possibilidade de avaliação por diversos especialistas, a forma pela qual as informações ficam registradas e documentadas, a possibilidade de inspeção de regiões e estruturas de difícil acesso e a cobertura de grandes áreas em pouco tempo de voo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente subcapítulo mencionam-se algumas possibilidades de avanços de estudos na linha de pesquisa de utilização de *drones* para segurança de barragens, elencados como possíveis continuidades deste estudo.

Dentre possíveis estudos relacionados ao segmento de análise documental das fichas de inspeção padronizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), cita-se:

- i) Desenvolvimento de protocolos e planos de voo que orientem para aquisição de imagens, considerando alturas de voo, visadas estratégicas para a percepção de irregularidades, sombreamento e condicionantes que possam interferir na análise das imagens e da pilotagem, em si;
- ii) Implementação dos protocolos, na forma de estudo/teste piloto, estudos de caso e capacitação para pilotos e inspetores, a fim de validar os protocolos, planejamentos e metodologias para aquisição de imagens de barragens com uso de *drones*, visando atividades de inspeção virtual.

Sob a ótica da utilização de modelos tridimensionais gerados a partir de imagens obtidas com *drones*, relacionados à gestão de segurança de barragens, como ferramenta de auxílio ao empreendedor:

- iii) Utilização de modelos 3D para a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, notadamente nas etapas iniciais de cumprimento à política, que estão relacionadas quanto à classificação das barragens conforme a Resolução nº 143 (CNRH, 2010a), que institui os critérios Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, bem como cálculo de volume e identificação de zonas de vulneráveis e de risco;
- iv) Utilização de modelos tridimensionais de barragens para compor o Plano de Segurança de Barragens, evoluindo o plano de documento físico a plataforma digital e interativa;
- v) Aplicação de modelos tridimensionais de barragens como ferramenta de gestão similar ao sistema BIM (*Building Information Modeling*), empregado para edificações, no qual existe integração entre *softwares* e *stakeholders*, considerando todo o ciclo de vida útil das barragens.

Considerando a possibilidade de emprego de modelos 3D gerados a partir de imagens obtidas com *drones*, relacionados à fiscalização de barragens:

- vi) Implementação de bancos de dados tridimensionais das barragens as quais as agências governamentais fiscalizam e regulamentam, para auxiliar na gestão da segurança a partir da esfera pública.

Considerando a avaliação do potencial da realização de inspeções de segurança de barragens a partir de imagens obtidas com *drones*, através da percepção de inspetores, conforme a metodologia de inspeção virtual realizada neste estudo, cita-se:

- vii) Mapeamento de manifestações patológicas e anomalias encontradas em barragens, em modelos tridimensionais, para que diversos inspetores e especialistas classifiquem as irregularidades com relação à de magnitude, situação e nível de perigo – termos utilizados e sugeridos pela ANA para minimizar subjetividade das inspeções, por meio da atribuição de pontuações quantitativas, para cada irregularidade, bem como para o acompanhamento evolutivo das mesmas.
- viii) Avaliação do potencial da metodologia empregada neste estudo, mediante a inspeção virtual realizada, com ferramentas de realidade virtual e aumentada, que influenciam diretamente na sensibilidade e percepção humana do ambiente virtual.

Dentre as mais diversas simulações computacionais possíveis de serem analisadas, utilizando como base os modelos tridimensionais gerados com uso de *drones*, menciona-se

- ix) Análises computacionais que relacionem a resposta da estrutura diante de situações distintas como: rebaixamento rápido do reservatório, onda de cheia, comportamento do material quanto aos estados de limites últimos e quanto à submissão a tensões dinâmicas, como é o caso do escoamento da água. Ressalta-se que esses tipos de análise tendem a refletir na definição e escolha de materiais adequados às solicitações reais das barragens, fornecendo assim, *feedback* ao projeto das obras de infraestrutura.

As tecnologias de Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARPs) são versáteis e permitem acoplar diversos sensores que podem ser de grande valia para a identificação de irregularidades nas mais diferentes obras de engenharia. Devido ao avanço tecnológico, existe uma vasta área de pesquisa científica:

- x) Aplicação de sensores termográficos, multi e hiperespectrais e LiDAR (*Light Detection and Ranging*), assim como as diferentes possibilidades de aplicações dos mesmos;
- xi) Desenvolvimento de técnicas de *deep learning* para identificação automática de diversas anomalias, a partir do reconhecimento de padrões e características das falhas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Resolução 236 de 30 de janeiro de 2017.**

_____. **Resolução 742 de 17 de outubro de 2011.**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens.** Brasília: ANA, 2016b. 135 P. ISBN 978-85-8210-043-1 (v7).

_____. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem.** Brasília: ANA, 2016c. 218 p. ISBN 978-85-8210-038-7 (v2).

_____. **Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem.** Brasília: ANA, 2016d. 66 p. ISBN 978-85-8210-039-4 (v3).

_____. **Guia Prático de Pequenas Barragens.** Brasília: ANA, 2016e. 120 P. ISBN 978-85-8210-041-7 (v8).

_____. **Relatório de segurança de barragens 2020a.** Brasília: ANA, 2021. 130 p.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2019.** Brasília: ANA, 2020. 131 p.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2018.** Brasília: ANA, 2019. 103 p.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2017.** Brasília: ANA, 2018. 81 p.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2016.** Brasília: ANA, 2017. 225 p. ISBN: 978-85-8210-035-6.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2015.** Brasília: ANA, 2016a. 168 p. ISBN: 978-85-8210-035-6.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2014.** Brasília: ANA, 2015. 156 p. ISBN: 978-85-8210-031-8.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil Especial - RBAC-E nº 94.** Ministério da Infraestrutura. Brasília: 2017.

AGISOFT. **Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3.** Agisoft: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16747/2020 – Inspeção predial: Diretrizes, conceitos, terminologias e procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS (ASDSO). **Internal Erosion of Earth Dams**. ASDSO: 2021. Disponível em: <https://damsafety-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/files/2021_Internal%20Erosion%20of%20Earth%20Dams.pdf>. Acesso 16/11/2021.

_____. **Living with dams: Know your risk**. ASDSO: 2012.

BARNA, M. Climate change, aging infrastructure raise risk for more US dam failures. **The Nation's health**, v. 50, n. 6, p. 9, 2020.

BELCHER, W.; CAMP, T.; KRZHIZHANOVSKAYA, V.V. Detecting Erosion Events in Earth Dam and Levee Passive Seismic Data with Clustering, **14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)**, 2015, pp. 903-910, doi: 10.1109/ICMLA.2015.9.

BRASIL. (CNRH, 2012a). Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**. Brasília, DF, 2012a.

_____. (CNRH, 2012b). Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012**. Brasília, DF, 2012b.

_____. **Lei Federal 12.334 de 20 de setembro de 2010**. Brasília, DF, 2010.

_____. **Lei Federal 14.066 de 30 de setembro de 2020**. Brasília, DF, 2020.

BUFFI, G.; MANCIOLA, P.; GRASSI, S.; BARBERINI, M.; GAMBI, A. Survey of the Ridracoli Dam: UAV-based photogrammetry and traditional topographic techniques in the inspection of vertical structures. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 8:2, 1562-1579, 2017. DOI: 10.1080/19475705.2017.1362039

CENTRAL DAM SAFETY ORGANIZATION (CDSO). Guidelines for safety inspection of dams. Government of India, **Central Water Commission**. Nova Delhi: 2017, 156 p.

CHEN, C.Y.; CHEN, S.C.; CHEN, K.H.; LIU, Z.H. Thermal monitoring and analysis of the large-scale field earth-dam breach process, *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 190, n. 8, p. 1 -17. **Springer International Publishing**, 2018.

CORRÊA, R. R. **Implementação de um controle de missões para Veículos Aéreos Não Tripulados utilizando plataforma Raspberry Pi**. Monografia (bacharelado) – Curso de Engenharia de Computação – Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2016.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **ICA 100-40 - Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica. Brasília: 2020.

DJI. Mavic 2 Enterprise. **Especificações**. DJI: 2020. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/mavic-2-enterprise/specs>>. Acesso em 30/08/2021.

DJI STORE, 2022. Disponível em: <<https://store.dji.com/product/mavic-2-enterprise-advancedand-dji-care>>. Acesso em 10/01/2022.

DRONE DEPLOY. **Product**. 2022. Disponível em: <<https://www.dronedeploy.com/product/mobile/>>. Acesso em 10/01/2022.

DRONE VISUAL. **Você sabe como funciona um drone de asa fixa (VANT)?**. 2019. Disponível em: <<https://www.dronevisual.com/post/2019/06/14/voce-sabe-como-funciona-um-drone-de-asa-fixa-vant>>. Acesso em 29/10/2020.

DRONESHOW. **ABM representa os pilotos remotos brasileiros**. 2016. Disponível em: <<https://droneshowla.com/abm-representa-os-pilotos-remotos-brasileiros/>>. Acesso em 10/01/2022.

ELEMENTARY ENGINEERING LIBRARY, 2020. Disponível em: <<https://www.elementaryengineeringlibrary.com/civil-engineering/soil-mechanics/piping-failure-in-hydraulic-structures>>. Acesso em 20/05/2021.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). **Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion, Interagency Committee on Dam Safety (ICODS)**. FEMA: 2015. Disponível em: <<https://www.damsafety.org/sites/default/files/files/FEMA%20TM%20EvalMonitorSeepageInternalErosn%20P1032-2015.pdf>>. Acesso em 02/06/2021.

_____. **Pocket Safety Guide for Dams and Impoundments**. FEMA: 2012. Disponível em: <<https://www.fs.fed.us/eng/pubs/pdfpubs/pdf12732805/pdf12732805dpi300.pdf>>. Acesso em 02/06/2021.

FOSTER, M., M. SPANNAGLE, AND R. FELL. Report on the analysis of embankment dam incidents. UNICIV Report No. R-374, **School of Civil and Environmental Engineering**, The University of New South Wales, 1998.

FRANCO, G.G; NAIME, A.F. Structure From Motion (SfM) – Uma breve revisão histórica, aplicações nas geociências e perspectivas futuras. **Anuário do Instituto de Geociências**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, V. 44, 2021.

GE, W; SUN, H.; ZHANG, H.; LI, Z.; GUO, X.; WANG, X.; QIN, Y.; GAO, W.; GELDER, P. Economic risk criteria for dams considering the relative level of economy and industrial economic contribution. **Science of the Total Environment**, v. 725, n. 138139, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138139>

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S.S.; MELLO, F.M. Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil. **Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro, 2021. ISBN 978-65-990860-1-4.

HUANG, H., LONG, J., LIN, H., ZHANG, L., YI, W., & LEI, B. Unmanned aerial vehicle based remote sensing method for monitoring a steep mountainous slope in the Three Gorges Reservoir, China. **Earth Science Informatics**, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0291-9>.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations**. – Bulletin 164 – Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance. 2016. 199 p.

_____. **Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation**. The International Committee on Large Dams, Paris, France, 2001.

INOVA CIVIL. **Barragens na Engenharia: Tipos e Patologias**. 2019. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/barragens/>. Acesso em 05/05/2021.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DE MATO GROSSO DO SUL (IMASUL). **Guia prático: Inspeção e manutenção de barragens de terra**. Governo do Estado de Mato Grosso do Sul: 2016. Disponível em: <http://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2016/06/Guia-de-manuten%C3%A7%C3%A3o-de-barragens.-Final.pdf>. Acesso em 16/11/2021.

ITATIAIA. Notícias. **Bombeiros e prefeitura alertam para risco de rompimento de barragem em Pará de Minas**. 09/01/2022. Disponível em

<<https://www.itatiaia.com.br/noticia/barragem-pode-se-romper-a-qualquer-momento-em-para-de-minas-e-moradores-devem-deixar-imoveis>>. Acesso em 28/01/2022.

JANSEN, R.B. **Dams and public safety, A Water Resources Technical Publication**. Denver: United States Government Printing Office, 1983.

JOHNSON, 2017. **Chico Enterprise-Record**. Fevereiro, 2017. Disponível em: <<https://www.chicoer.com/2017/02/08/water-will-keep-flowing-at-oro-dam-spillway-despite-gaping-hole-erosion/>>. Acesso em 04/06/2021.

KHALOO, A.; LATTANZI, D.; JACHIMOWICZ, A.; DEVANEY, C. Utilizing UAV and 3D Computer Vision for Visual Inspection of a Large Gravity Dam. **Frontiers in Built Environment**, v. 4, n. 31, p. 1-16, 2018.

LAMBERTINI, A.C.F.; OBERDIEK, C.S. Itabira e o Vale do Ribeirão do Peixe – Uma proposta de metodologia automatizada para a mitigação dos riscos. Comitê Brasileiro de Barragens, **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu – PR, 12-14 de maio de 2015. Disponível em: <<https://ptdocz.com/doc/1009026/itabira-e-o-vale-do-ribeir%C3%A3o-do-peixe>>. Acesso em 21/05/2021.

MELO, I.A. Plano de manutenção e segurança de barragens - RMSP serviços desenvolvidos pelo departamento de engenharia de manutenção – MME. **29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente**, 2018, 20p. Disponível em: <<https://www.saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2019/05/3.pdf>>. Acesso em 20/05/2021.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (Brasil). **Guia para fiscalização da operação de Aeronaves não Tripuladas**. Brasília: 2020b.

PISANIELLO, J.D.; DAM, T.T.; TINGEY-HOLYOAK, J.L. Internacional small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries. **Journal of Hydrology**, v. 531, p. 1141-1153, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.077>

DAM SAFETY GUIDELINES (DSS). Province of British Columbia, Water management branch. **Dam safety guidelines – Inspection and maintenance of dams**. Versão 3, 2016.

RAMEZANI, A.; CHUNG, S.J.; HUTCHINSON, S. A biomimetic robotic platform to study flight specializations of bats. **Science Robotics**, v. 2, n. 3, 2017, eaal2505. ISSN 2470-9476.

SHAHMORADI, J. ;TALEBI, E. ;ROGHANCI, P. ; HASSANALIAN, M. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. **Drones**, v. 4, n. 34, 2020.

SILVA, R. S. A.; MEDEIROS, A. B. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. P.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F. Acidentes e Incidentes em Barragens Brasileiras: Uma Análise dos Dados Disponíveis nos Relatórios de Segurança de Barragens e da Legislação Vigente. **HOLOS**, Ano 37, v. 6, e10245, 2021.

STATE LEGISLATURES. "Sometimes It Gets Dam Scary." **The Free Library**. 2001 National Conference of State Legislatures 10 Feb. 2022 <https://www.thefreelibrary.com/Sometimes+It+Gets+Dam+Scary.-a074583557>

TEMPLIN, T.; POPIELARCZYK, D.; KOSECKI, R. Application of Low-Cost Fixed-Wing UAV for Inland Lakes Shoreline Investigation. **Pure and Applied Geophysics**, v. 175, n. 9, 2018, p. 3263-3283.

VALAVANIS, K.; VACHTSEVANOS, G. J. (Eds.). Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Dordrecht: Springer Science+Business Media. Nova Deli: **Springer Netherlands**: 2015. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>.

WESTERND DAM ENGINEERING. <https://damfailures.org/wp-content/uploads/2015/07/Western-Dam-Engineering-Technical-Note1.pdf>

YILMAZ, O. ; KARAKUS, F. Stereo and kinect fusion for continuous 3D reconstruction and visual odometry, **International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)**, 2013, pp. 115-118, doi: 10.1109/ICECCO.2013.6718242.

**ANEXO A – QUESTIONÁRIO DE INSPEÇÃO DISPONIBILIZADO AOS
INSPETORES QUE REALIZARAM A INSPEÇÃO VIRTUAL**

Quadro 4 – Questionário de inspeção para a Barragem Rodolfo da Costa e Silva

a) Parâmetros de jusante
1. Você identifica FISSURAS, TRINCAS, RACHADURAS OU DESPLACAMENTO do concreto? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
2. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível a identificação de danos significativos no concreto? (Relacionados com rachaduras e deslocamento). Dê uma nota de 1 a 5: (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).
3. As JUNTAS DE DILATAÇÃO estão danificadas? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
4. Você identifica SINAIS DE PERCOLAÇÃO ou ÁREAS ÚMIDAS no parâmetro de jusante? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
b) Parâmetros de montante
5. Você identifica FISSURAS, TRINCAS, RACHADURAS OU DESPLACAMENTO do concreto dos parâmetros de montante? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
6. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
7. As JUNTAS DE DILATAÇÃO estão danificadas? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
8. Existe algum tipo de vegetação nos parâmetros de montante? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
c) Crista
9. É possível perceber algum desalinhamento na barragem, a partir da crista? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
10. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível a identificação de desalinhamentos ou sinais de movimentação dos blocos da barragem? Dê uma nota de 1 a 5: (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).
11. Você identifica DETERIORAÇÕES no pavimento ou nas calçadas? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
12. Os postes de iluminação apresentam corrosão? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
d) Soleira do vertedouro
13. Você identifica RACHADURAS ou TRINCAS no concreto da soleira do vertedouro? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
14. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS ou indícios de corrosão de armaduras no concreto da soleira do vertedouro? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
15. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
16. As JUNTAS DO CONCRETO da soleira estão danificadas? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
e) Vertedouro

17. Existem sinais de deterioração do concreto nos muros laterais do vertedouro como FISSURAS, ARMADURAS EXPOSTAS OU SINAIS DE CORROSÃO? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
18. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
19. As JUNTAS DO CONCRETO do vertedouro estão danificadas? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
20. O vertedouro apresenta algum desalinhamento ou sinal de movimentação? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
f) Bacia de dissipação
21. Existem fraturas no concreto da saída do vertedouro? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
22. Você identifica EROSIÃO DO SOLO na saída do vertedouro? (Bacia de dissipação) () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
g) Ponte
23. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS nas vigas e tabuleiro da ponte? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
24. Você identifica FISSURAS, RACHADURAS OU TRINCAS nas vigas e tabuleiro da ponte? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
25. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS nos pilares da ponte? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
26. Você identifica FISSURAS, RACHADURAS OU TRINCAS nos pilares da ponte? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.
h) Ombreiras
27. Você identifica árvores caídas próximas às ombreiras? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo)
28. Você identifica rochas desmoronadas próximas às ombreiras? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
29. Você encontra algum sinal de surgência nas ombreiras? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
30. Você julga que as ombreiras estão em boas condições de manutenção para inspeção? Dê uma nota de 1 a 5: (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).

Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 5 – Questionário de inspeção para a barragem do DNOS

a) Talude de jusante
1. Você identifica EROSÕES no talude de jusante? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
2. Existe algum sinal de DESLIZAMENTO ou ESCORREGAMENTO no talude? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
3. Existe algum sinal de AFUNDAMENTO ou RECALQUE no talude? () SIM () NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).
4. Você julga que a PROTEÇÃO VEGETAL do talude está em boas condições? Dê uma nota de 1 a 5: (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).
5. Existem ÁRVORES E ARBUSTOS no talude que precisam ser removidos? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.

<p>6. Você identifica algum FORMIGUEIRO, CUPINZEIRO ou TOCAS DE ANIMAIS no talude? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>7. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível a identificação de formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais? Dê uma nota de 1 a 5: (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).</p>
<p>8. As CANALETAS DE DRENAGEM do talude de jusante apresentam alguma anomalia? (quebradas, obstruídas, danificadas...) <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>9. A partir das imagens apresentadas, você acha que é possível aferir sobre possíveis anomalias nas canaletas de drenagem? Dê uma nota de 1 a 5: (1: Muito ruim; 2: Ruim; 3: Suficiente; 4: Bom; 5: Muito bom).</p>
<p>10. Você identifica algum sinal de que o talude tenha surgências? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>b) Talude de montante</p>
<p>11. Você identifica EROSÕES no talude de montante? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).</p>
<p>12. Existe algum sinal de DESLIZAMENTO ou ESCORREGAMENTO no talude de montante? SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).</p>
<p>13. Existe algum sinal de AFUNDAMENTO ou RECALQUE no talude? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, onde? (Colocar <i>print screen</i> do vídeo).</p>
<p>14. Você identifica algum ponto que o RIP-RAP está INCOMPLETO, OBSTRUÍDO OU DESLOCADO? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>15. Existem ÁRVORES E ARBUSTOS no talude de montante que precisam ser removidos? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>c) Crista</p>
<p>16. Você identifica RACHADURAS na crista? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>17. Você identifica sinais de AFUNDAMENTOS ou RECALQUES na crista? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>18. Existem sinais de DESALINHAMENTO da crista? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>d) Soleira do vertedouro</p>
<p>19. Você identifica RACHADURAS ou TRINCAS no concreto da soleira do vertedouro? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>20. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS ou indícios de corrosão de armaduras no concreto da soleira do vertedouro? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>21. É possível identificar se há DETERIORAÇÃO na superfície do concreto, como agregados expostos ou erosão do concreto? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>22. As JUNTAS DO CONCRETO da soleira estão danificadas? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>23. Você identifica algum sinal de que a estrutura da soleira está DESLOCADA, ou seja, sofreu movimentação? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>
<p>e) Muros laterais do vertedouro</p>
<p>24. Os muros laterais do vertedouro apresentam desalinhamento? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.</p>

25. Existem sinais de deterioração do concreto nos muros laterais do vertedouro como FISSURAS, ARMADURAS EXPOSTAS OU SINAIS DE CORROSÃO? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	
26. Há vegetação no lado externo dos muros laterais que deveria ser removida? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	
f) Laje de fundo do vertedouro	
27. Quais desses itens você verifica que existem na laje de fundo do vertedouro?	
Vegetação	() SIM () NÃO
Lixo ou entulhos	() SIM () NÃO
Pedaços de rocha	() SIM () NÃO
Animais	() SIM () NÃO
28. Você identifica falhas nas juntas de concretagem da laje de fundo do vertedouro? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo	
29. Existem fraturas nas lajes de fundo do vertedouro? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	
30. Você identifica EROSÃO DO SOLO na saída do vertedouro? (Bacia de dissipação). () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	
g) Ponte	
31. Você identifica ARMADURAS EXPOSTAS nas vigas e tabuleiro da ponte? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	
32. Você identifica FISSURAS, RACHADURAS OU TRINCAS nas vigas e tabuleiro da ponte? () SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	
33. Você identifica alguma FALHA DE CONCRETAGEM nas vigas e tabuleiro da ponte? SIM () NÃO. Caso positivo, mostre algum exemplo.	

Fonte: elaborado pela autora.

ANEXO B – FICHAS DE INSPEÇÃO PARA BARRAGENS DE ATERRO E CONCRETO SUGERIDAS PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE		NP
B	BARRAGEM													
B.1	Talude de Montante													
1	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Escorregamentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Fissura/afundamento (face de concreto)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Afundamentos e buracos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Erosão nos encontros das ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Deslocamento de blocos de rocha pelo efeito de ondas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE		NP
B.2	Crista													
1	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Fissuras longitudinais e transversais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Falta de revestimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falha no revestimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Desabamentos/afundamentos (recalques)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Defeitos na drenagem	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Defeitos no meio-fio	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Formigueiro, cupinzeiros ou tocas de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Desalinhamento do meio-fio	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Depressões devido à falta de sobrelevação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
B.3	Talude de Jusante													
1	Erosões ou ravina- mentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Escorregamentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Fissuras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falha na proteção granular	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falha na proteção vegetal	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Afundamentos e buracos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Erosão nos encontros das ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Cavernas e buracos nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Canaletas quebradas ou obstruídas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Formigueiros, cupinzei- ros ou tocas de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
12	Sinais de movimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
13	Sinais de fuga de água ou áreas úmidas (surgências)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
14	Carreamento de mate- rial na água dos drenos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
B.4	Ombreiras a Montante até Área de Segurança Definida em Projeto													
1	Desmatamento na área de proteção e constru- ções irregulares	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Erosão nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Desmoronamento nas margens	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Assoreamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Cavernas e buracos nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Sinais de movimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Trinca nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA													
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP
B.5	Ombreiras a Jusante Até Faixa de Segurança Definida em Projeto												
1	Desmatamento na área de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2	Erosão nos encontros barragem-ombreira	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3	Desmoronamento nas margens	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4	Cavernas e buracos nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5	Sinais de movimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6	Trinca nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7	Surgência de água e manchas de umidade	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
8	Carreamento de finos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
9	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
Comentários:													

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA													
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP
B.6	Instrumentação												
1	Acesso precário aos instrumentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2	Piezômetros entupidos ou defeituosos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3	Marcos de recalque defeituosos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4	Medidores de vazão defeituosos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5	Falta de instrumentação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6	Falta de registro de leituras da instrumentação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
Comentários:													

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO						MAGNITUDE				NP		
C	VERTEDOURO													
C.1	Canais de Aproximação e Restituição													
1	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Obstrução ou entulhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Desalinhamento dos taludes e muros laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Erosões ou escorregamentos nos taludes	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Erosão na base dos canais escavados	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Erosão na área a jusante (erosão regressiva)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Instabilidade/queda de blocos de rocha do talude lateral	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Construções irregulares (aterro/estrada, casa, cerca)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO						MAGNITUDE				NP		
C.2	Estrutura de Fixação da Cota da Soleira													
1	Fissuras no concreto (trincas ou rachaduras)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Descalçamento da estrutura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Juntas danificadas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Sinais de deslocamento das estruturas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO						MAGNITUDE				NP		
C.3	Bacia de Dissipação													
1	Fissuras no concreto (trincas ou rachaduras)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ocorrência de buracos na soleira	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Presença de entulho na bacia	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Presença de vegetação na bacia	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Falha no enrocamento de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
C.4	Muros/Diques Laterais													
1	Erosão na fundação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Erosão nos contatos dos muros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Fissuras no concreto (trincas ou rachaduras)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Erosões nos taludes dos diques	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
C.5	Comportas do Vertedouro													
1	Peças fixas (corrosão, amassamento da guia e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Estrutura (corrosão, amassamento e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito nas vedações (vazamento)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Defeito nas rodas (comporta-vagão) ou haste de içamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Defeito nos rolamentos ou buchas e retentores	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeito no ponto de içamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Água estagnada sobre os braços da comporta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Crescimento de vegetação na estrutura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
D	RESERVATÓRIO													
1	Réguas danificadas ou faltantes	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Construções em áreas de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Poluição por esgoto, lixo, pesticidas etc.	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Indícios de má qualidade da água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Assoreamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Desmoronamento nas margens	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Existência de vegetação aquática excessiva	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Desmatamento na área de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Presença de animais e peixes mortos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
E	TORRE DA TOMADA DE ÁGUA													
E.1	Entrada													
1	Assoreamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Obstrução e entulhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Tubulação danificada	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Registos defeituosos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falta de grade de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeitos na grade	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Passarela de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
E.2	Accionamento de Comportas													
1	Hastes (travada no mancal, corrosão e empenamento)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Base dos mancais (corrosão, falta de chumbadores)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Falta de mancais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Corrosão nos mancais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falha nos chumbadores, lubrificação e pintura do pedestal	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Falta de indicador de abertura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Falta de volante	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
E.3	Comportas													
1	Peças fixas (corrosão, amassamento da guia e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Estrutura (corrosão, amassamento e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito nas vedações (vazamento)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Defeito nas rodas (comporta-vagão)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Defeito nos rolamentos ou buchas e retentores	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeito no ponto de içamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Água estagnada sobre os braços da comporta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Crescimento de vegetação na estrutura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO							MAGNITUDE			NP		
E.4	Estrutura da Torre da Tomada de Água													
1	Ferragem exposta na estrutura da torre	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Falta de guarda-corpo na escada de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Deterioração do guarda-corpo na escada de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ferragem exposta na plataforma (passadiço)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falta de guarda-corpo no passadiço	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Deterioração do guarda-corpo no passadiço	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Deterioração do portão do abrigo de manobra	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Deterioração da tubulação da aeração e <i>bypass</i>	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Deterioração da instalação de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO							MAGNITUDE			NP		
F	BOCA DE MONTANTE (ENTRADA E STOP-LOG)													
1	Assoreamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Obstrução e entulhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Ferragem exposta na estrutura de concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deterioração no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falta de grade de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeitos na grade	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Peças fixas (corrosão, amassamento da guia e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Estrutura do <i>stop-log</i> (corrosão, amassamento e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Defeito no acionamento do <i>stop-log</i>	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Defeito no ponto de içamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
G	GALERIA DE FUNDO													
1	Corrosão e vazamentos na tubulação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Sinais de abrasão ou cavitação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeitos nas juntas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deformação no conduto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Desalinhamento do conduto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Surgências de água no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Precariedade de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Vazamento nos dispositivos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Surgência de água junto à galeria	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Falta de manutenção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Presença de pedras e lixo dentro da galeria	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
12	Defeitos no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
H	ESTRUTURA DE SAÍDA DA GALERIA													
1	Corrosão e vazamentos na tubulação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Sinais de abrasão ou cavitação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Ruídos estranhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Defeito nos dispositivos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Surgências de água no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Precariedade de acesso (árvores e arbustos)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Vazamento nos dispositivos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Falta de manutenção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Construções irregulares	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Falta ou deficiência de drenagem da caixa de válvulas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Presença de pedras e lixo dentro da caixa de válvulas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
12	Defeitos no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
13	Defeitos na cerca de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
I	MEDIDOR DE VAZÃO													
1	Ausência da placa mediadora de vazão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Corrosão da placa	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeitos no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falta de escala de leitura de vazão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Assoreamento da câmara de medição	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Erosão a jusante do medidor	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
J	ESTRADAS DE ACESSO													
1	Estado do pavimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Condições de drenagem (com água estagnada)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
K	PONTE													
1	Estado dos pilares	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Estrutura das vigas e tabuleiro	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Apoios	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Estacas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
B	BARRAGEM													
B.1	Paramento de Montante													
1	Presença de vegetação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Erosão nos encontros das ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Ocorrência de fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Abertura de juntas de dilatação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
B.2	Crista													
1	Movimentos diferenciais entre blocos (nas juntas)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ocorrência de fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Juntas de dilatação danificadas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Desalinhamento e corrosão no parapeito (guarda-corpo)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Corrosão nos postes de iluminação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Corrosão no pórtico	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
B.3	Paramento de Jusante													
1	Sinais de movimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ocorrência de fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Juntas de dilatação danificadas (infiltrações)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Sinais de percolação ou áreas úmidas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Carreamento de material na água dos drenos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Vazão nos drenos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE		NP
B.4	Estrutura Vertente													
1	Fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Descalçamento da estrutura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Juntas de dilatação danificadas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Sinais de deslocamento da estrutura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Sinais de percolação ou áreas úmidas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Carreamento de material na água dos drenos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Vazão nos drenos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Fissuras (trincas ou rachaduras) nos muros laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Erosão nos muros laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
12	Deterioração da superfície do concreto dos muros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
13	Ocorrência de buracos na soleira	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
14	Presença de entulho na bacia de dissipação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
15	Presença de vegetação na bacia de dissipação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
16	Erosão na base dos canais (área de restituição)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
B.5	Galeria de Drenagem e Injeção													
1	Deslocamento diferencial pronunciado entre blocos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Desplacamento do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Surgências de água no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Deterioração do portão de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Drenos obstruídos no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Drenos obstruídos na fundação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Precariedade de acesso à galeria	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Falta de manutenção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Falta de iluminação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
12	Falta de ventilação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
13	Presença de pedras e lixo dentro da galeria	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
14	Sinais de percolação ou áreas úmidas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
15	Carreamento de material na água dos drenos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
16	Vazão nos drenos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
17	Vazão elevada nos drenos de alívio	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
B.6	Instrumentação													
1	Acesso precário aos instrumentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Piezômetros entupidos ou defeituosos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Marcos de referência danificados	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Medidores de vazão defeituosos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Outros instrumentos danificados	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Falta de instrumentação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Falta de registo de leituras da instrumentação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO													
	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP
C	VERTEDOIRO												
C.1	Canais de Aproximação e Restituição												
1	Presença de vegetação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2	Obstrução ou entulhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3	Desalinhamento dos taludes e muros laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5	Erosões ou escorregamentos nos taludes laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6	Erosão na base dos canais escavados	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7	Erosão na área a jusante do vertedouro	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
8	Construções irregulares	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
Comentários:													

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO													
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP
C.2	Estrutura Vertente												
1	Fissuras (trincas ou rachaduras) no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4	Descalçamento da estrutura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5	Juntas de dilatação danificadas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6	Sinais de deslocamento das estruturas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7	Fissuras (trincas ou rachaduras) nos muros laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
8	Erosão nos contatos dos muros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
9	Sinais de percolação ou áreas úmidas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
10	Carreamento de material na água dos drenos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
11	Vazão nos drenos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
12	Deterioração da superfície do concreto dos muros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
Comentários:													

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
C.3	Comportas do Vertedouro													
1	Peças fixas (corrosão, amassamento da guia e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Estrutura (corrosão, amassamento e falha na pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito nas vedações (vazamento)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Defeito nas rodas (comporta-vagão)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Defeito nos rolamentos, buchas e retentores	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeito no ponto de içamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Água estagnada nos braços da comporta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Vegetação sobre a estrutura metálica	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
C.4	Muros Laterais													
1	Erosão na fundação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Erosão nos contatos dos muros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Fissuras (trincas ou rachaduras) no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
C.5	Rápido/Bacia Amortecedora													
1	Fissuras (trincas ou rachaduras) no concreto (muro)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ferragem do concreto exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Deterioração da superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Ocorrência de buracos na soleira	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Erosão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Presença de entulho na bacia	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Falha no enrocamento de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Presença de vegetação na bacia	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO											MAGNITUDE	NP
D	TOMADA DE ÁGUA													
D.1	Acionamento													
1	Hastes (travada ou mancal, corrosão e empenamento)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Base dos mancais (corrosão, falta de chumbadores)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Corrosão nos mancais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falhas nos chumbadores, lubrificação e pintura do pedestal	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falta de indicador de abertura	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Falta de volante	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO											MAGNITUDE	NP
D.2	Comportas													
1	Peças fixas (corrosão, amassamento, pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Estrutura da comporta (corrosão, amassamento, pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito nas vedações (vazamento)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Defeito nas rodas (comportavagão, se aplicável)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Defeito nos rolamentos ou buchas e retentores	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeito no ponto de içamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO											MAGNITUDE	NP
D.3	Poço de Acionamento													
1	Falta de guarda-corpo na escada de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Deterioração do guarda-corpo na escada de acesso	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Deterioração da tampa de acesso ao abrigo	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deterioração da tubulação de aeração e bypass	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Deterioração da instalação de controle (pedestal)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
D.4	Boca de Entrada e Stop-Log													
1	Assoreamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Obstrução e entulhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Ferragem exposta	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deterioração na superfície do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Falta de grade de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Defeito na grade	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Peças fixas (corrosão, amassamento, pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Estrutura do <i>stop-log</i> (corrosão, amassamento, pintura)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Defeito no acionamento do <i>stop-log</i>	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Defeito no ponto de lançamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
D.5	Galeria da Tomada de Água													
1	Corrosão e vazamentos na tubulação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Sinais de abrasão ou cavitação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito nas juntas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Deformação do conduto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Desalinhamento do conduto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Vazamento nos dispositivos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE				NP
D.6	Estrutura de Saída													
1	Corrosão e vazamentos na tubulação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Ruídos estranhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito nos dispositivos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Fissuras (trincas ou rachaduras) ou surgências de água no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Precariedade de acesso (árvores e arbustos)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Vazamento nos dispositivos de controle	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Construções irregulares a jusante	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Falta de drenagem da caixa de válvulas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Presença de entulho dentro da caixa de válvulas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Defeito na cerca de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
E	RESERVATÓRIO													
1	Réguas danificadas ou faltantes	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Construções em áreas de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Poliuição por esgoto, lixo, pesticida etc.	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Indícios de má qualidade da água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Assoreamento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Desmoronamento nas margens	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Existência de vegetação aquática excessiva	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Desmatamentos na área de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Presença de animais e peixes mortos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Animais pastando	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
F	REGIÃO A JUSANTE DA BARRAGEM													
1	Sinais de movimento na rocha de fundação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Desintegração/decomposição da rocha	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Piping nas juntas rochosas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Construções irregulares próximas ao leito do rio	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Vazamento (fuga de água) nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Árvores e arbustos na faixa de 10 m do pé da barragem	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Erosão nos encontros das ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Cavernas e buracos nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE CONCRETO														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE			NP	
G	MEDIDOR DE VAZÃO													
1	Ausência da placa medidora de vazão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Corrosão da placa	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Defeito no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falta de escala de leitura de vazão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Assoreamento da câmara de medição	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Erosão a jusante do medidor	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
Comentários:														