

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

JOSÉ HENRIQUE GUARAGNI VIESSIRI

**METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DE ESTRUTURAS  
HIDRÁULICAS DESCARREGADORAS DE CHEIAS**

Porto Alegre  
2022

JOSÉ HENRIQUE GUARAGNI VIESSIRI

METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DE ESTRUTURAS  
HIDRÁULICAS DESCARREGADORAS DE CHEIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Dai Prá.

Porto Alegre  
2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

Viessiri, José Henrique Guaragni  
METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DE ESTRUTURAS  
HIDRÁULICAS DESCARREGADORAS DE CHEIAS / José Henrique  
Guaragni Viessiri. -- 2022.  
187 f.  
Orientador: Maurício Dai Prá.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Superfícies Hidráulicas. 2. Danos em Concreto.  
3. Segurança de Barragens. 4. Descarregadores de  
Cheias. I. Prá, Maurício Dai, orient. II. Título.

JOSÉ HENRIQUE GUARAGNI VIESSIRI

METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DE ESTRUTURAS  
HIDRÁULICAS DESCARREGADORAS DE CHEIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 30 de setembro de 2022.

---

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá – UFRGS

Orientador

---

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques –UFRGS

Examinador

---

Dr<sup>a</sup>. Alba Valéria Brandão Canellas – FURNAS Centrais Elétricas S/A

Examinadora

---

Dr. Lucas Alexandre Reginatto - UFRGS

Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por dar todo o suporte e apoio necessário, especialmente para minha namorada, Djúlia, pelo apoio e compreensão durante todo período de mestrado. Ao meu orientador, por dar todo suporte necessário para desenvolvimento da dissertação aqui apresentada. A toda equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) e Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. À Foz do Chapecó Energia e a Furnas Centrais Elétricas pelo apoio no desenvolvimento do projeto de P&D Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas, implementando no âmbito do programa de P&D ANEEL.

## RESUMO

As barragens desempenham, no âmbito econômico e social, um importante papel na sociedade. Porém, pela sua magnitude, as barragens também representam um grande risco em caso de colapso, seja ele total ou parcial. Para garantir a segurança de um barramento é fundamental o perfeito funcionamento das estruturas descarregadoras de cheias. Sendo assim, é importante garantir que estejam sempre nas melhores condições de operação. Com o passar do tempo de operação, essas estruturas vão sendo expostas à ocorrência de danos, devido às altas velocidades e volume das vazões vertidas. Assim, é proposta nessa dissertação uma metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias, desenvolvida a partir de resultados de inspeções de campo, objetivando avaliar o grau de risco da estrutura, assim como a evolução das manifestações patológicas apresentadas pela estrutura. A metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias teve sua modelagem realizada com base em condições extremas hipotéticas e, posteriormente, realizada a aplicação da metodologia em onze barragens brasileiras. Todas as barragens objeto do estudo apresentaram grau de risco baixo ou muito baixo, indicando que estão em estágio normal de conservação. Essa afirmação é concordante com a análise da equipe que realizou a campanha de inspeção nas usinas, sendo assim foi constatado o desempenho satisfatório da metodologia proposta quando aplicada às barragens do estudo e exposta a condições extremas hipotéticas.

Palavras-chave: Superfícies Hidráulicas. Danos em Concreto.  
Segurança de Barragens. Descarregadores de Cheias.

## **ABSTRACT**

Dams play a major role in society within the economic and social sphere. Nevertheless, due to their size, dams also present a great risk in case of collapse, either complete or partial. In order to ensure the safety of a dam it is essential to have perfectly functioning flood spillway structures, and therefore it is important to ensure the best conditions for their operation. Over their time of operation these structures are gradually exposed to the occurrence of damage, due to the high velocities and discharges spilled. Thus, this dissertation proposes a risk classification methodology for hydraulic flood spillway structures, developed based on results of field inspections. This aims at evaluating the degree of risk of the structure, as well as the evolution of pathological manifestations presented by the structure. The risk classification methodology of hydraulic flood spillway structures was modeled based on hypothetical extreme conditions and later the methodology was applied to 11 Brazilian dams. All the dams studied presented a low or very low degree of risk, indicating that they are at a normal stage of conservation. This statement agrees with the analysis of the team that performed the inspection campaign at the plants, and thus the performance of the methodology was found satisfactory when applied to the dams in the study and exposed to hypothetical extreme conditions.

Keywords: Dams. Hydraulic Surfaces. Damages in Concrete.

Dam Safety. Flood Spillways.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de um barramento .....	21
Figura 2 – Representação esquemática de barragem com vertedor .....	22
Figura 3 – Surgência em vertedor em degraus .....	25
Figura 4 – Fissura longitudinal .....	26
Figura 5 – Fissura transversal em barragem .....	26
Figura 6 – Eflorescência.....	28
Figura 7 – Estalactite oriunda de lixiviação .....	29
Figura 8 – Usina hidrelétrica Dworshak após abrasão hidráulica .....	31
Figura 9 – Dano por cavitação na barragem Glen Canyon .....	32
Figura 10 – Representação de cavitação provocada por irregularidade na superfície hidráulica .....	34
Figura 11 – Gráfico para ocorrência de dano por cavitação .....	36
Figura 12 – Matriz de risco .....	45
Figura 13 – Matriz de risco para pontes essenciais .....	46
Figura 14 – Esquema da metodologia GDE/UnB .....	61
Figura 15 – Perfil do vertedouro da UHE Foz do Chapecó .....	72
Figura 16 – Vista superior do vertedouro da UHE Foz do Chapecó .....	73
Figura 17 – Vazamento na comporta do Vão 5 .....	74
Figura 18 – Descontinuidade de superfície do vertedouro no vão 13 .....	75
Figura 19 – Surgência com lixiviação de hidróxido de cálcio .....	75
Figura 20 – Fluxograma da aplicação da metodologia .....	76
Figura 21 – Condições extremas hipotéticas simuladas .....	91
Figura 22 – Etapas de aplicação da metodologia .....	92
Figura 23 – Descontinuidade das juntas de concretagem no muro lateral e fissuras na calha do vertedouro .....	93
Figura 24 - Desalinhamento da superfície do vertedouro na região de encontro entre calha e muro .....	93



Figura 25 – Surgências com lixiviação de hidróxido de cálcio: vão 11 .....	94
Figura 26 – Surgências com lixiviação de hidróxido de cálcio: vão 13 .....	94
Figura 27 – Vazamento em função da falta de vedação das comportas: vão 2	96
Figura 28 – Vazamento em função da falta de vedação das comportas: vão 5	96
Figura 29 – Fissuras com orientação e exposição de agregados: vão 15 .....	97
Figura 30 – Presença de hidróxido de cálcio lixiviado e fissuras: vão 6 .....	100
Figura 31 – Exposição de agregados: vão 8 .....	100
Figura 32 – Desplacamento com exposição de agregados: vão 12 .....	101
Figura 33 – Desplacamento com exposição de agregados: vão 12 .....	101
Figura 34 – Descontinuidade na superfície do concreto: vão 13 .....	101

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Faixas de determinação do porte da barragem .....	23
Quadro 2 – Estudos de concreto para resistência à abrasão e cavitação .....	39
Quadro 3 – Valores característicos para Fator de Ocorrência (OF) .....	43
Quadro 4 – Valores característicos do Fator de Consequência (CF) .....	44
Quadro 5 – Intervalo máximo de inspeção .....	45
Quadro 6 – Estados de condição para viga de concreto .....	48
Quadro 7– Classes de classificação de urgência de manutenção.....	49
Quadro 8 – Classificação detalhada para ocorrência de fissuras no tabuleiro ..	50
Quadro 9 – Valores característicos para $B_i$ .....	52
Quadro 10– Valores característicos de $K_1$ para vigas .....	52
Quadro 11– Valores característicos para $K_2$ .....	53
Quadro 12– Valores característicos para $K_3$ .....	53
Quadro 13– Valores característicos para $K_4$ .....	54
Quadro 14– Classes de deterioração .....	55
Quadro 15– Interpretação do FI definido para cada estrutura .....	57
Quadro 16 – Valores do FR em função da Família de Elementos .....	58
Quadro 17 – Valores do FG: exemplo para a família aparelhos de apoio .....	58
Quadro 18 – Valores limites para cada tipo de elemento constituinte da estrutura .....	59
Quadro 19 – Faixas de classificação de risco .....	60
Quadro 20 – Níveis de deterioração do elemento .....	63
Quadro 21 – Fator de Relevância Estrutural .....	64
Quadro 22 – Níveis de deterioração da estrutura .....	64
Quadro 23 – Caracterização geral das usinas .....	66
Quadro 24 – Características dos vertedouros .....	67
Quadro 25 – Características dos reservatórios .....	67

Quadro 26 – Características dos concretos empregados nas estruturas hidráulicas de descarga e dissipação de energia .....	69
Quadro 27 – Manifestações patológicas identificadas durante a campanha de inspeção .....	71
Quadro 28 – Danos detectados na vistoria da UHE Foz do Chapecó .....	73
Quadro 29 – Famílias de elementos para classificação de risco .....	77
Quadro 30 – Fator de Intensidade do dano .....	77
Quadro 31 – Fator de Gravidade da Família de elementos 1: juntas de dilatação de dilatação e de concretagem .....	79
Quadro 32 – Fator de Gravidade da Família de elementos 2: comportas e acionadores mecânicos .....	79
Quadro 33 – Fator de Gravidade da Família de elementos 3: muros laterais e entre vãos .....	80
Quadro 34 – Fator de Gravidade da Família de elementos 4: superfícies de concreto (vertedouro e bacia de dissipação) .....	80
Quadro 35 – Fator de Vertimento .....	83
Quadro 36 – Fator de Vertimento Hidrológico .....	84
Quadro 37 – Valores do Fator de Porte .....	85
Quadro 38 – Fator de Relevância estrutural .....	85
Quadro 39 – Faixas de classificação de risco da estrutura .....	86
Quadro 40 – Grau de Risco para caso hipotético com danos intermediários ...	90
Quadro 41 – Grau de Risco para caso hipotético com um único dano elevado	91
Quadro 42 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 1.....	94
Quadro 43 – Grau de Risco da Família 1 .....	95
Quadro 44 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 2 .....	96
Quadro 45 – Grau de Risco da Família 2 .....	97
Quadro 46 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 3 .....	98
Quadro 47 – Grau de Risco da Família 3 .....	99
Quadro 48 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 4 .....	102

Quadro 49 – Grau de Risco da Família 4 .....	102
Quadro 50 – Grau de Risco da Estrutura .....	103
Quadro 51 – Parâmetros hidrológicos das barragens estudadas .....	104
Quadro 52 – Fator de porte das barragens estudadas .....	105
Quadro 53 – Classificação das usinas .....	105

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área do escoamento. [ $L^2$ ]
$B_i$	Valor básico do dano.
CR	Classificação de condição.
CF	Fator de consequência.
$D$	Grau de dano.
$d$	Número de danos que a família pode apresentar.
$D_a$	Número de danos apresentados pela estrutura ( $FI > 0$ ).
$D_{máx}$	Maior grau de dano do elemento.
DRD	Dias com Registro de Dados.
DV	Dias de Vertimento apresentado pela estrutura
FG	Fator de gravidade.
$F_i$	Fator de intensidade.
FI	Fator de intensidade.
$FI_{lim}$	Valor máximo de FI.
FM	Fator de majoração.
$F_p$	Fator de ponderação.
FP	Fator de porte.
$Fr$	Número de Froude.
FR	Fator de relevância estrutural.
$g$	Aceleração da gravidade. [ $LT^{-2}$ ]
G	Tipo de dano.

$G_{de}$	Grau de deterioração do elemento.
GRE	Grau de risco do elemento.
GRF	Grau de risco da família de elementos.
FV	Fator de vertimento.
FVH	Fator de vertimento hidrológico.
$H$	Altura do escoamento. $[L]$
IPN	Número de prioridade de inspeção.
$k$	Número de famílias de elementos.
$K_{1i}$	Extensão do dano.
$K_{2i}$	Intensidade do dano.
$K_{3i}$	Membro estrutural.
$K_{4i}$	Urgência da intervenção.
$K_{5i}$	Fator de durabilidade.
$L$	Largura do escoamento. $[L]$
$L_{ref}$	Comprimento de referência. $[L]$
$m$	Número de elementos da família com $GRE > LIM$ .
$n$	Número de elementos componentes da família.
OF	Fator de ocorrência.
$P$	Pressão. $[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_v$	Pressão do vapor da água. $[ML^{-1}T^{-2}]$
$Q$	Vazão. $[L^3T^{-1}]$
$Q_{\text{máx vertida}}$	Máxima vazão vertida. $[L^3T^{-1}]$
$Q_{\text{projeto}}$	Vazão de projeto do vertedouro. $[L^3T^{-1}]$

RC	Classificação de condição.
$v$	Velocidade média do escoamento. $[LT^{-1}]$
V	Capacidade do reservatório. $[L^3]$
$V_D$	Tipo do dano.
$V_{D,ref}$	Valores de referência dos danos.
$\rho_w$	Massa específica da água. $[ML^{-3}]$
$\sigma$	Índice de cavitação.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2 QUESTÃO E OBJETIVOS DE PESQUISA</b> .....	20
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	20
2.2 OBJETIVOS.....	20
<b>2.2.1 Objetivo Global</b> .....	20
<b>2.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	20
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
3.1 BARRAGENS: CARACTERÍSTICAS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	21
<b>3.1.1 Definição de barragem</b> .....	21
<b>3.1.2 Porte das barragens</b> .....	22
3.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM BARRAGENS .....	23
<b>3.2.1 Movimentos diferenciais</b> .....	24
<b>3.2.2 Surgências</b> .....	24
<b>3.2.3 Fissuras</b> .....	25
<b>3.2.4 Deslocamento</b> .....	26
<b>3.2.5 Reação álcali-agregado</b> .....	27
<b>3.2.6 Lixiviação</b> .....	27
3.3 AÇÕES DE DESGASTE DE SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS .....	29
<b>3.3.1 Erosão por abrasão</b> .....	30
<b>3.3.2 Erosão por cavitação</b> .....	31
3.3.3.1 Formação e evolução da cavitação.....	32
3.3.3.2 Influência da rugosidade das superfícies na cavitação .....	33
3.3.3.3 Índice de cavitação.....	34
3.3.4 Concreto: comportamento frente à abrasão e à cavitação.....	36
3.3.4.1 Resistência à abrasão.....	36



3.3.4.2 Resistência à cavitação.....	38
3.3.4.3 Estudos do comportamento de materiais frente aos fenômenos de abrasão e cavitação .....	38
3.4 CLASSIFICAÇÃO DE RISCO .....	42
3.4.1 Metodologias Internacionais.....	42
3.4.1.1 Metodologia de inspeção baseada no risco (NCHRP, 2014) .....	43
3.4.1.2 Metodologia de inspeção dos Estados Unidos .....	47
3.4.1.3 Metodologia de inspeção do Japão.....	48
3.4.1.4 Método Austríaco (CEB, 1998).....	50
3.4.1.5 Método desenvolvido na Eslovênia (CEB, 1998) .....	51
<b>3.4.2 Metodologias Nacionais.....</b>	<b>55</b>
3.4.2.1 Método absoluto (WARMLING; SANTOS FILHO, 2018) .....	55
3.4.2.2 Método de classificação do LEME/UFRGS (KLEIN <i>et al.</i> , 1991) .....	56
3.4.2.3 Método GDE/UnB .....	60
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>65</b>
4.1 BARRAGENS ESTUDADAS.....	65
4.2 DADOS DA CAMPANHA DE INSPEÇÃO.....	70
4.2.1 Compilação das manifestações patológicas registradas nas Usinas Hidroelétricas estudadas.....	70
<b>4.2.2 Manifestações patológicas registradas na Usina Hidroelétricas Foz do Chapecó.....</b>	<b>72</b>
4.3 METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO.....	75
<b>4.3.1 Fator de Intensidade do dano (FI).....</b>	<b>77</b>
<b>4.3.2 Fator de Gravidade (FG).....</b>	<b>78</b>
<b>4.3.3 Grau de risco do elemento (GRE).....</b>	<b>81</b>
4.3.4 Grau de risco da família de elementos (GRF).....	81
<b>4.3.5 Grau de risco da estrutura (GR).....</b>	<b>82</b>
4.3.5.1 Fator de Vertimento (FV).....	82

4.3.5.2 Fator de Vertimento Hidrológico (FVH).....	83
4.3.5.3 Fator de Porte do Empreendimento (FP) .....	84
4.3.5.4 Grau de Risco da estrutura (GR).....	85
<b>5 RESULTADOS</b> .....	87
5.1 COMPORTAMENTO DA METODOLOGIA: CONDIÇÕES HIPOTÉTICAS .	88
5.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA: UHE FOZ DO CHAPECÓ .....	92
<b>5.2.1 Cálculo do Grau de Risco: Famílias</b> .....	92
5.2.1.1 Juntas de dilatação e concretagem.....	92
5.2.1.2 Comportas e acionadores mecânicos.....	95
5.2.1.3 Muros laterais e entre vãos.....	97
5.2.1.4 Superfícies de concreto.....	99
<b>5.2.2 Cálculo do Grau de Risco: Estrutura</b> .....	103
5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	103
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	107
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	109
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A .....	117
APÊNDICE B.....	179
APÊNDICE C.....	183

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme informações do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2011), a primeira barragem nacional que se tem registro foi construída em Recife (PE), possivelmente, no final do século XVI. Durante a segunda metade do século XIX, em função de grandes secas naquele período, iniciou o planejamento e projeto de grandes barragens no Brasil. A primeira delas foi a Barragem de Cedros (CE) concluída em 1906.

Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, o início da implantação de barragens esteve atrelada à produção de energia elétrica. No fim do século XIX, foram construídas pequenas barragens para suprimento de cargas modestas e localizadas de energia. Com essa finalidade, em 1906, entrou em operação a segunda grande barragem brasileira, a Barragem de Lajes (RJ), tendo como objetivo a derivação de águas do ribeirão das Lajes para a Usina de Fontes (CBDB, 2011).

A partir do final da Segunda Guerra Mundial, diversas barragens e grandes casas de força subterrâneas foram instaladas nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, na época, estado da Guanabara”. Nos anos 1950, já com relevante participação das concessionárias estatais, a construção de empreendimentos de grande vulto seguiu evoluindo e contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias nas áreas de projeto, operação e construção. Esses avanços, junto com ações do governo, resultaram na construção de um impressionante número de hidrelétricas de grande porte durante as décadas de 1960 e 1970 (CBDB, 2011).

Entretanto, durante as décadas seguintes (1980-1990), o ritmo de construção e implantação de barragens foi reduzido. Apesar disto, no período houve uma quantidade ainda significativa de barragens construídas no Brasil. Portanto, o período entre as décadas de 1950 e 1990 ficou marcado como o de grande expansão, pois foram instaladas, nestes anos, a grande parte das barragens no Brasil e no Mundo (CBDB, 2011).

Atualmente, parte relevante das barragens brasileiras, tal como as mundiais, ultrapassaram a marca de trinta anos de operação. Sendo assim, é cada vez mais

corriqueiro identificar danos relacionados tanto ao tempo de operação quanto à falta de manutenção preventiva. O controle e acompanhamento de possíveis danos é fundamental para impedir que a estrutura seja significativamente afetada ou que ocorra a sua ruptura parcial ou total. No âmbito de Usinas Hidrelétricas, a evolução dos danos pode obrigar à paralisação da geração de energia. Este desabastecimento, apagões, leva a transtornos à população e, até mesmo, à economia por ela servida. Além disso, quanto mais os danos evoluem, maiores os riscos que eles trazem à estrutura do barramento e sua correção se torna financeiramente mais onerosa.

Em caso de rompimento, as perdas são imensuráveis: causam mortes e danos materiais à sociedade. Além disso, o rompimento de um barramento fortalece os sentimentos de insegurança e medo já existente em muitas pessoas que vivem em regiões próximas a barragens. No Brasil, tem-se, como agravante a essa percepção das pessoas, os rompimentos das barragens dos municípios de Mariana e Brumadinho, que aconteceram, respectivamente, em 2015 e 2019: duas tragédias que afetaram a imagem nacional quanto ao controle e prevenção de acidentes. Tais eventos contribuíram para reacender o medo na população que vive a jusante de algum barramento.

Todos os pontos elencados anteriormente reforçam a importância do controle e manutenção das condições de operação dos barramentos. Estes visam garantir a segurança e, ao mesmo tempo, permitir a detecção de manifestações patológicas em sua fase inicial, facilitando a sua correção com intervenções menores e menos onerosas.

No Brasil, a Lei 12.334, de setembro de 2020, estabelece a política nacional de segurança de barragens com os objetivos de garantir a observância de padrões de segurança de barragens, regulamentar as ações de segurança a serem adotadas, promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas, criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público e fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos. Além disso, a Lei 12.334 criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) para registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional.

Quando se fala em segurança de barramentos, este assunto está completamente ligado ao funcionamento, em boas condições, das estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias. Em momentos de cheias, e portanto, maiores cargas agindo sobre a estrutura do barramento, as estruturas descarregadoras de cheias são responsáveis por verterem elevadas vazões em elevadas velocidades. O funcionamento inadequado ou a presença de graves manifestações patológicas podem afetar o funcionamento dessas estruturas em momentos cruciais, ou até mesmo acarretar em riscos de colapso da estrutura.

Estruturas hidráulicas submetidas a escoamentos em alta velocidade estão vulneráveis a danos decorrentes do fenômeno de cavitação (FALVEY, 1990). Esse é o caso de estruturas descarregadoras de cheias que, tipicamente, são compostas por vertedouros: de soleira livre ou controlado por comportas. A ocorrência do fenômeno de cavitação está atrelada a parâmetros hidráulicos, assim como podem ser fruto de irregularidades da superfície hidráulica.

Manifestações patológicas, em superfícies hidráulicas de estruturas descarregadoras de barragens, podem comprometer a segurança de toda a estrutura ou representar um elevado custo para sua recuperação. O papel crucial das estruturas descarregadoras tanto em relação à segurança operacional dos barramentos quanto a sua importância nos contextos sociais e econômicos da sociedade moderna, deixam evidente a importância de monitorar, de forma periódica, as condições dessas estruturas. Com essa finalidade, ao longo desse trabalho, foi desenvolvida uma metodologia que permite realizar a classificação de risco, com base em diferentes fatores, que visam representar diversos parâmetros diretamente relacionados às condições das estruturas hidráulicas descarregadoras de barragens.

A metodologia pode ser utilizada como ferramenta para acompanhar a evolução das manifestações patológicas presentes nas estruturas hidráulicas. Tal análise pode ser realizada comparando-se as classificações das estruturas descarregadoras de cheias na sequência de inspeções. Além desse acompanhamento, a metodologia permite que, em função das condições das estruturas hidráulicas descarregadoras, seja avaliada a necessidade, ou não, de intervenção na estrutura.

## 2 QUESTÃO E OBJETIVOS DE PESQUISA

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

É possível desenvolver uma metodologia de classificação de risco capaz de avaliar as condições operacionais das estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias tendo por base inspeções realizadas em campo?

### 2.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são subdivididos em global e específicos e estão dispostos nos tópicos a seguir.

#### 2.2.1 Objetivo Global

Desenvolver metodologia de classificação de risco, aplicada a estruturas hidráulicas extravasoras de barragens submetidas a escoamentos em alta velocidade, tendo por base métodos existentes para manifestações patológicas em diversas estruturas e inspeções realizadas em campo.

#### 2.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- a) com base em campanhas de inspeções realizadas em Usinas Hidrelétricas, analisar a ocorrência de anomalias e manifestações patológicas em estruturas hidráulicas de concreto;
- b) aplicar a metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras proposta nas barragens de propriedade de Furnas Centrais Elétricas
- c) empregar a metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas considerando condições hipotéticas extremas;
- d) realizar análise crítica da aplicabilidade da metodologia proposta de classificação de danos em estruturas hidráulicas frente aos registros das usinas hidrelétricas de propriedade de Furnas Centrais Elétricas e às condições hipotéticas extremas consideradas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

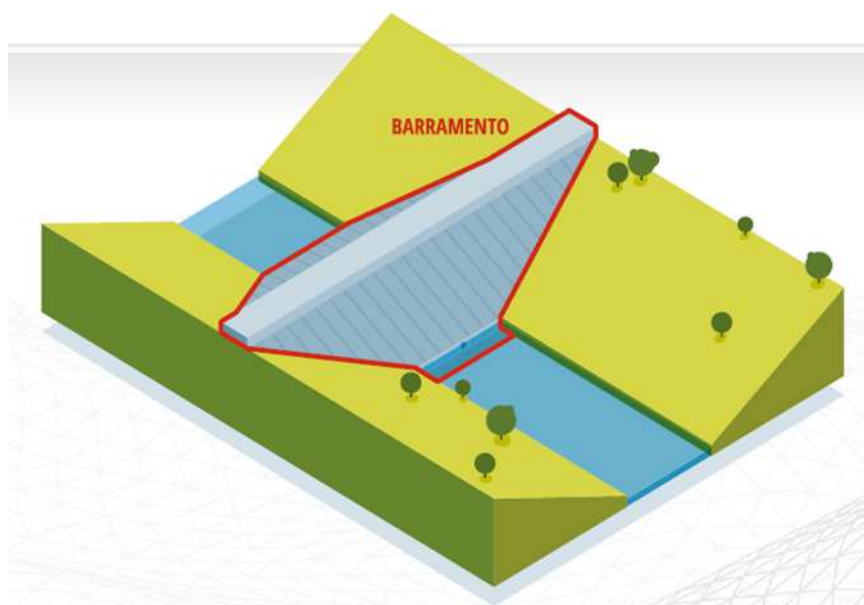
#### 3.1 BARRAGENS: CARACTERÍSTICAS E MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

##### 3.1.1 Definição de barragem

Barragens são definidas como quaisquer estruturas em corpo hídrico, temporário ou permanente, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (BRASIL, 2010).

Via de regra, uma barragem convencional é composta por estruturas de retenção ou barramento, fundação, ombreiras, zona de jusante, estruturas extravasoras, estruturas de adução e reservatório. O barramento é a estrutura construída transversalmente ao corpo hídrico que é responsável pela retenção das substâncias líquidas junto com a fundação e ombreiras (Figura 1). O barramento, segundo a Agência Nacional de Águas, pode ser executado com diferentes técnicas e materiais como concreto, aterro, alvenaria, entre outros (ANA, 2020).

Figura 1 – Representação esquemática de um barramento

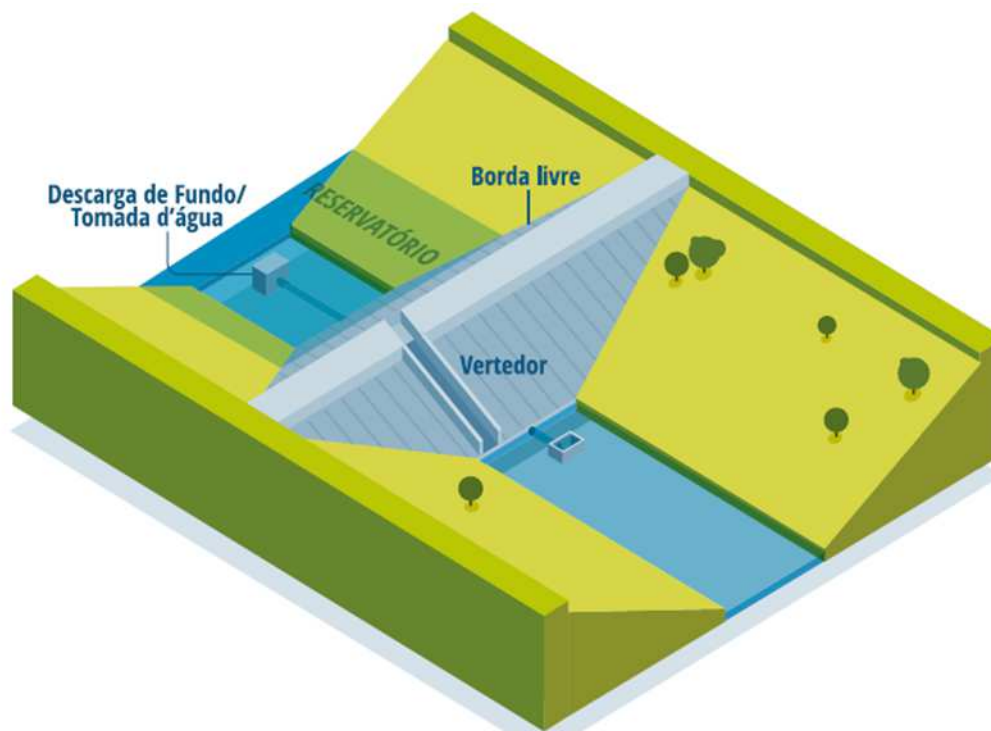


Fonte: ANA, 2020

As barragens, construídas em cursos de água, necessitam apresentar estruturas para a evacuação de cheias (Figura 2). Essas são denominadas estruturas

extravasoras, sendo constituídas por vertedouros de superfície que podem, ou não, apresentar comportas e, também, degraus (ANA, 2020).

Figura 2 – Representação esquemática de barragem com vertedor



Fonte: ANA, 2020

### 3.1.2 Porte das barragens

Uma das formas de classificar o porte das barragens é através do Fator X proposto pelo Boletim n. 157 do *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2016). A determinação do Fator X é realizada através da Fórmula 1:

$$X = H^2 \times \sqrt{V} \quad \text{Fórmula 1}$$

Sendo:

H: altura do barramento, em metros;

V: capacidade do reservatório do barramento, em hm<sup>3</sup>.

Com base neste Fator X, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2016b) propôs três faixas de classificação para os barramentos (Quadro 1).



Quadro 1– Faixas de determinação do porte da barragem

Porte da barragem	Fator X
Pequeno	$X < 400$
Médio	$400 < X < 1000$
Grande	$X > 1000$

Fonte: ANA, 2016b

A título de exemplo, a barragem de Itaipu tem altura máxima de 196 metros e reservatório de 29.000 hm<sup>3</sup>. Desta forma, seu Fator X é de 6.542.009, o que corresponde a uma barragem de grande porte. Outro caso é o da UHE Serra da Mesa, a barragem brasileira com o maior volume de reservatório, 54.400 hm<sup>3</sup>, e uma altura de 154 metros: resulta em um Fator X de 5.531.474, também se enquadrando em barragem de grande porte. Barragens de grande porte, como não poderia deixar de ser, em caso de colapso, apresentam danos a jusante muito maiores do que os de barragens de pequeno porte. Assim, o Fator X é um importante parâmetro que permite diferenciar as barragens de acordo com seu porte.

### 3.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM BARRAGENS

Estudo do ICOLD (1997 apud ANA, 2016a) apresentou uma análise das anomalias observadas nas barragens e, também, a fase da vida da estrutura em que as anomalias são registradas. Segundo a análise, 70% das rupturas de barragens ocorrem nos primeiros dez anos. Além disso, o mesmo estudo apontou as principais anomalias apresentadas por barragens de terra e apresentou o seguinte panorama:

- a) deteriorações nos órgãos de segurança e de operação: 35%;
- b) deteriorações devido a fissuras e fraturamento hidráulico: 30%;
- c) deslizamento de taludes de aterros e dos reservatórios: 10%;
- d) percolação excessiva ao longo da fundação: 12%;
- e) inadequada proteção dos taludes: 7%;
- f) diversas causas: 6%.

O Boletim 157, da mesma Comissão (ICOLD, 2016), apresentou dados de pesquisa sobre acidentes e ruínas em barragens de terra de pequeno porte. De acordo com o estudo, as causas mais prováveis para rompimentos de pequenas barragens de

terra é o galgamento sendo responsável por mais de 60% dos rompimentos. Com incidência de 12% nos rompimentos das estruturas, citam erosão interna, escorregamento de taludes e outras causas.

As barragens de concreto armado apresentam, com destaque, anomalias relacionadas à armadura e ao leito rochoso. Quanto às armaduras, as anomalias podem ser decorrentes de eletrólise, corrosão, fadiga, corte e ruptura. No leito rochoso, podem ser decorrentes da desintegração, amolecimento e dissolução da rocha ou movimentação nas descontinuidades (ANA, 2016a).

Os tipos de anomalias frequentemente encontrados nas inspeções de segurança regular em barragens de concreto são apresentados nos tópicos a seguir.

### **3.2.1 Movimentos diferenciais**

As deformações permanentes, das barragens de concreto, manifestam-se, normalmente, através de movimentos nas juntas. Esses movimentos devem ser acompanhados, especialmente nas regiões próximas às comportas, pois esses deslocamentos podem afetar o seu funcionamento. Movimentos diferenciais podem ser avaliados ao longo do tempo através de instrumentação. Por exemplo, através de medidores triortogonais instalados na estrutura (ANA, 2016a).

### **3.2.2 Surgências**

Apesar da existência de dispositivos de drenagem para conduzir a água infiltrada para galerias ou para regiões a jusante, pode ocorrer sua percolação através do corpo da barragem, por exemplo, em casos de deficiência do tratamento de juntas ou da vibração de áreas de concreto. Infiltrações de fluxo e velocidade elevada contribuem para a deterioração do concreto e para o desenvolvimento de reações químicas. A coleta e análise do volume de águas de percolação é um aspecto importante no controle de segurança das barragens (ANA, 2016a). A Figura 3 ilustra a ocorrência de surgência em um vertedouro em degraus.

Figura 3– Surgência em vertedor em degraus



Fonte: Piasentin(2010)

### 3.2.3 Fissuras

As barragens de concreto costumam apresentar diversos tipos de fissuras. Via de regra, as fissuras resultantes de variações térmicas são superficiais e não costumam representar risco à segurança das barragens. Podem também ocorrer fissuras em função de deficiências de projeto ou envelhecimento da estrutura e, essas, podem afetar o funcionamento de comportas e outros equipamentos (ANA, 2016a).

As fissuras podem ser classificadas como longitudinais ou transversais. As fissuras longitudinais propagam-se paralelamente ao eixo do corpo da barragem (Figura 4), enquanto as fissuras transversais, em planos que interceptam horizontal ou verticalmente o corpo da barragem (Figura 5).

Figura 4 – Fissura longitudinal



Fonte: Silveira *et al.* (2018)

Figura 5 – Fissura transversal em barragem



Fonte: Valente e Freitas(2019).

### 3.2.4 Desplacamento

O deslocamento consiste no desprendimento de placas de concreto ou argamassa na sua fase endurecida. O deslocamento, particularmente para os elementos armados, pode expor a armadura a diversos agentes agressivos ou reduzir o cobrimento existente, colocando em risco a integridade da estrutura a curto ou longo prazo. Diversas podem ser as causas de deslocamentos, como, por exemplo, camadas muito espessa de argamassa, base da superfície muito lisa não permitindo a aderência adequada, molhagem deficiente da base comprometendo a hidratação

do cimento e variações de temperatura que podem gerar tensões de cisalhamento na interface entre o acabamento e a base (WEIMER *et al.*, 2018).

### 3.2.5 Reação álcali-agregado

Algumas reações químicas entre elementos que constituem o concreto podem gerar processos expansivos e afetar as condições de funcionalidade e, até mesmo, de segurança das estruturas. De forma geral, a presença de água acelera a ocorrência desses processos de degradação. É necessário, portanto, controlar a presença de fissuras, pois facilitam a passagem de água, e, também, monitorar essas situações através de inspeções e ensaios (ANA, 2016a).

A reação álcali-agregado (RAA) é a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto entre os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, da água de amassamento, de aditivos químicos, de adições pozolânicas, entre outros.) e alguns tipos de minerais presentes nos agregados. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto. (NOGUEIRA, 2010)

A ocorrência da reação álcali-agregado depende da interação entre a quantidade de álcalis disponíveis e o potencial de reatividade dos agregados. Entretanto, fatores externos, como umidade e temperatura, podem ser importantes para a ocorrência ou aceleração do processo deletério. (BICZOK *et al.*, 1972).

### 3.2.6 Lixiviação

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 15):

É o mecanismo responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras. Para prevenir sua ocorrência, recomenda-se restringir a fissuração, de forma a minimizar a infiltração de água, e proteger as superfícies expostas com produtos específicos, como os hidrófugos.

Para a ocorrência da lixiviação de materiais cimentícios, é necessário que estes estejam em contato com líquidos constantemente renovados, como água pura, destilada, doce ou dessalinizada, pois estas agem como solvente (HAN *et al.*, 2014). Um fator determinante para a ocorrência da lixiviação é a dureza da água, em termos da concentração dos cátions cálcio e magnésio, normalmente associados a

presença de ânions carbonato, bicarbonato, cloreto e sulfato. A água é classificada, segundo a concentração destes cátions em: dura, teores acima de 150 mg/l; moderada, se entre 75 e 150 mg/l; e, para teores abaixo de 75 mg/l, mole (HU, 2018). Ao entrar em contato com a pasta de cimento, a água tende a hidrolisar os produtos da hidratação que contém cálcio, o CH, o C-S-H e a calcita que são os componentes mais susceptíveis à hidrólise (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As águas de infiltração podem ser conduzidas ao ambiente externo pelo sistema de drenagem. Quando expostas, o CH lixiviado interage com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), presente no ar, acarretando a formação de crostas brancas de carbonato de cálcio, fenômeno denominado eflorescência (Figura 6). Galerias e tubos de drenagem são ambientes nos quais eflorescências são encontrados de forma mais frequente (HU, 2018).

Figura 6 – Eflorescência



Fonte: Frazão (2020)

Normalmente esse fenômeno inicia pela percolação de água através dos poros do concreto, das fissuras ou juntas de concretagem mal executadas. Se o processo de lixiviação é contínuo, ocorre a formação de estalagmites ou estalactites (Figura 7). Por vezes a eflorescência pode ser avermelhada ou castanha, o que é um indicativo da presença de produtos provenientes da corrosão do aço da armadura da estrutura e do carreamento de matéria orgânica ou argila presente no reservatório. Assim, após descoberto o processo de lixiviação, é preciso realizar análise química do líquido resultante do processo para avaliar a sua composição e, assim, definir se o material lixiviado é proveniente da armadura ou não (CARDIA; KUPERMANN, 2012).

Figura 7 – Estalactite oriunda de lixiviação



Fonte: Frazão(2020)

### 3.3 AÇÕES DE DESGASTE DE SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS

Tratando-se do desgaste de superfícies hidráulicas, há divergências entre as definições dos vários autores. Neville (2016) afirma:

Em determinadas situações, as superfícies de concreto estão sujeitas ao desgaste, que pode ocorrer devido ao atrito por arraste, raspagem ou impactos. No caso de estruturas hidráulicas, a ação de materiais abrasivos carreados pela água causa erosão. A cavitação é outra causa de danos ao concreto em água corrente.

Mehta e Monteiro(1994), por sua vez, definem que os processos de desgaste em superfícies hidráulicas podem acontecer por três formas distintas:

- a) erosão: desgaste ocorrido por atrito seco, quando a superfície de concreto é utilizada como pavimento ou piso;
- b) abrasão: desgaste provocado pelo choque de partículas sólidas suspensas em líquidos com superfícies de concreto;
- c) cavitação: deterioração provocada pela implosão de bolhas de vapor formadas em fluxos de água em velocidade elevada.

De forma diferenciada, no Manual da American Concrete Institute(ACI, 1999), a cavitação, a abrasão e os desgastes ocorridos por ataques químicos são classificados como processos de erosão em estruturas de concreto. Quando adotada essa classificação é comum encontrar as seguintes categorias de erosão: por cavitação, por abrasão e por ataques químicos. No âmbito, desse trabalho, será

utilizada a diferenciação proposta pelo ACI (1999), não sendo detalhada a erosão por ataque químico.

Considerando-se, portanto a classificação adotada e aplicando-se às estruturas em concreto que compõem uma usina hidrelétrica, sabe-se que estas estão submetidas a ambientes, consideravelmente, agressivos, visto que a maioria delas desempenham suas funções em condição submersa. Particularmente, as estruturas hidráulicas, sujeitas à passagem de fluxos de água, podem apresentar processos de desgaste superficial, que, quando não controlados, podem comprometer a integridade da estrutura (ZUCH, 2008). Desta forma, nos próximos itens, são detalhadas as formas de erosão consideradas para este estudo.

### **3.3.1 Erosão por abrasão**

A erosão por abrasão consiste no desgaste da superfície devido a um processo de atrito ou fricção. Tais processos ocorrem pelo transporte de materiais sólidos em suspensão presentes nos escoamentos em grande velocidade (WOODS, 1968).

O processo de desgaste, que ocorre quando partículas são transportadas pela água e entram em choque com a superfície de concreto, dão origem a diversas manifestações patológicas. O motivo disto é o impacto das partículas que causa atrito, esfolamento e ranhuras na superfície, originando fissuras e agravando a extensão de prováveis microfissuras existentes na pasta de cimento, resultando na exposição dos agregados. Os detritos transportados pela água podem variar desde areias, pedras, escombros, cascalhos e, até, restos vegetais (KORMANN, 2002).

Latorre (2002), também, define a abrasão como o desgaste de uma superfície devido a um processo de atrito ou fricção, genericamente definida como uma deterioração causada pela ação abrasiva de fluidos ou sólidos em movimento. O autor ressalta a difícil previsão da intensidade da ação abrasiva em função das diversas variáveis envolvidas, como tipos de partículas transportadas, dureza, tamanho e quantidades delas, assim como a qualidade do concreto.

Na maior parte dos casos, as principais estruturas hidráulicas atingidas pela abrasão são: superfícies dos vertedouros, bacias de dissipação, taludes de montante, drenos e túneis hidráulicos. As superfícies de vertedouros e túneis hidráulicos são



especialmente suscetíveis à abrasão devido ao grande fluxo de água e a alta velocidade deste fluido aos quais essas estruturas estão submetidas. Outras estruturas submetidas à abrasão são os dissipadores de energia, como blocos de dissipação (Figura 8) e defletores, já que essas estruturas recebem diretamente o impacto de escombros carregados pelo fluxo de água originando o processo de erosão por abrasão (KORMANN, 2002).

Figura 8 – Usina hidrelétrica Dworshak após abrasão hidráulica



Fonte: Pinho *et al.*(2007)

### 3.3.2 Erosão por cavitação

A erosão por cavitação é um processo de deterioração relacionado à formação e colapso de bolhas de vapor. Quando o colapso das bolhas transportadas pelo escoamento ocorre junto à uma superfície, a energia liberada na implosão origina um alto impacto danificando a estrutura (KORMANN, 2002). A Figura 9 apresenta uma estrutura com dano por cavitação ocorrido no túnel do vertedouro esquerdo da barragem de Glen Canyon (FALVEY, 1990).

Figura 9 – Dano por cavitação na barragem Glen Canyon



Fonte: Falvey (1990)

### 3.3.3.1 Formação e evolução da cavitação

Geralmente o fenômeno da cavitação está associado a danos em uma superfície, podendo ser acompanhado por intenso ruído. A cavitação, decorrente da formação de uma bolha ou vazio dentro de um líquido, pode ser classificada em dois tipos de acordo com a composição dos gases que ocupam as bolhas ou vazios, ou seja, cavitação: gasosa, na qual o vazio é preenchido, principalmente, por outros gases além do vapor da água; e, a vaporosa, em que os vazios são preenchidos, principalmente, por vapor da água (FALVEY, 1990).

Se uma bolha com um pequeno conteúdo de gás estiver presente em uma região de baixa pressão, o seu diâmetro permanecerá aproximadamente constante. Porém, se a pressão diminuir o suficiente para que as dimensões da bolha atinjam o seu raio crítico, o tamanho da bolha aumentará até implodir, o que só é possível pela vaporização da água com pouca contribuição da expansão do gás, sendo típico da cavitação vaporosa. Entretanto, no caso da cavitação gasosa, uma bolha contendo

um grande conteúdo de gás, presente em uma região de baixa pressão, irá se expandir continuamente sem atingir um raio crítico e não atingirá a pressão de vapor.

O aparecimento de cavitação visível numa determinada estrutura, como descrito anteriormente, é sempre precedido pela ocorrência de um conjunto de bolhas microscópicas na região do campo de fluxo observado. Assim as bolhas são importantes como núcleos de cavitação, algo reconhecido há muito tempo e que serviu de base para toda a teoria sobre a formação de cavitação (KATZ, 1984). São necessárias, para o início da cavitação, bolhas de ar microscópicas ou impurezas. Entretanto, após o início da cavitação o fator mais importante para o crescimento das bolhas de cavitação é a vaporização (FALVEY, 1990).

Quando as implosões ocorrem perto de um contorno sólido, como, por exemplo, a superfície de concreto de um canal, as pressões instantâneas geradas pela explosão podem resultar em ruptura por fadiga e posterior remoção de pequenas quantidades de material da superfície. A contínua remoção do material da superfície pode causar danos significativos na estrutura (KELLS; SMITH, 1991).

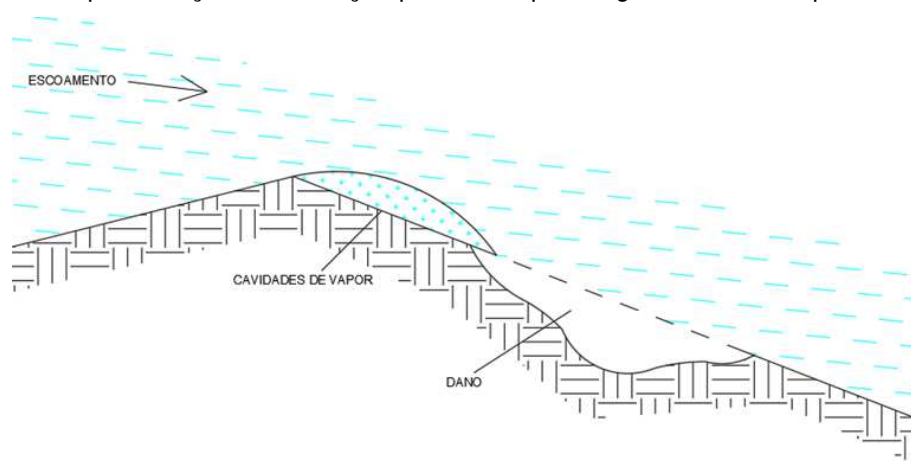
### 3.3.3.2 Influência da rugosidade das superfícies na cavitação

A cavitação pode ser decorrente da passagem de fluxo de água, em grande velocidade, sobre uma superfície de escoamento com irregularidades superficiais ou pela mudança brusca de direção, originando regiões nas quais o escoamento se separa da superfície de concreto (ZUCH, 2008). A cavitação ocorrerá sempre que a pressão local na água cair abaixo da pressão de vapor, como já citado, porém, em superfícies hidráulicas, a fonte mais comum de cavitação é a presença de irregularidades na superfície do fluxo (FALVEY, 1990).

Os danos em estruturas hidráulicas geralmente estão associados a vários mecanismos. Quando a cavitação se forma em função de uma irregularidade superficial, o dano começará na extremidade a jusante da nuvem de bolhas em colapso (Figura 10). A evolução desse dano irá resultar em uma cavidade alongada na superfície de concreto e, com o passar do tempo, essa vai crescendo devido à colisão do fluxo de alta velocidade com a sua extremidade de jusante. Esse fluxo

gera altas pressões e a diferença de pressão, entre a zona de impacto do fluxo e as outras zonas próximas, pode fazer com que agregados ou peças de concreto sejam quebrados e arrastados pelo fluxo. Com a evolução do processo de dano na estrutura, as barras de aço podem ficar expostas e, em função da alta velocidade do fluxo, podem apresentar uma vibração que, conseqüentemente, pode causar danos mecânicos à superfície (FALVEY, 1990).

Figura 10 – Representação de cavitação provocada por irregularidade na superfície hidráulica



Fonte: adaptado de Falvey(1990)

### 3.3.3.3 Índice de cavitação

Para ocorrência da cavitação, ou não, é necessária a combinação de fatores como, por exemplo, a velocidade e a pressão do fluxo e a pressão de vapor da água. É possível definir se ocorrerá cavitação através dos valores de um parâmetro definido como índice de cavitação ( $\sigma$ ) apresentado na Fórmula 2 (FALVEY, 1990):

$$\sigma = \frac{P - P_V}{\rho_w \frac{v^2}{2}} \quad \text{Fórmula 2}$$

Sendo:

$\sigma$ : índice de cavitação;

P: pressão na corrente da água;

$P_V$ : pressão do vapor da água;

$\rho_w$ : massa específica da água;

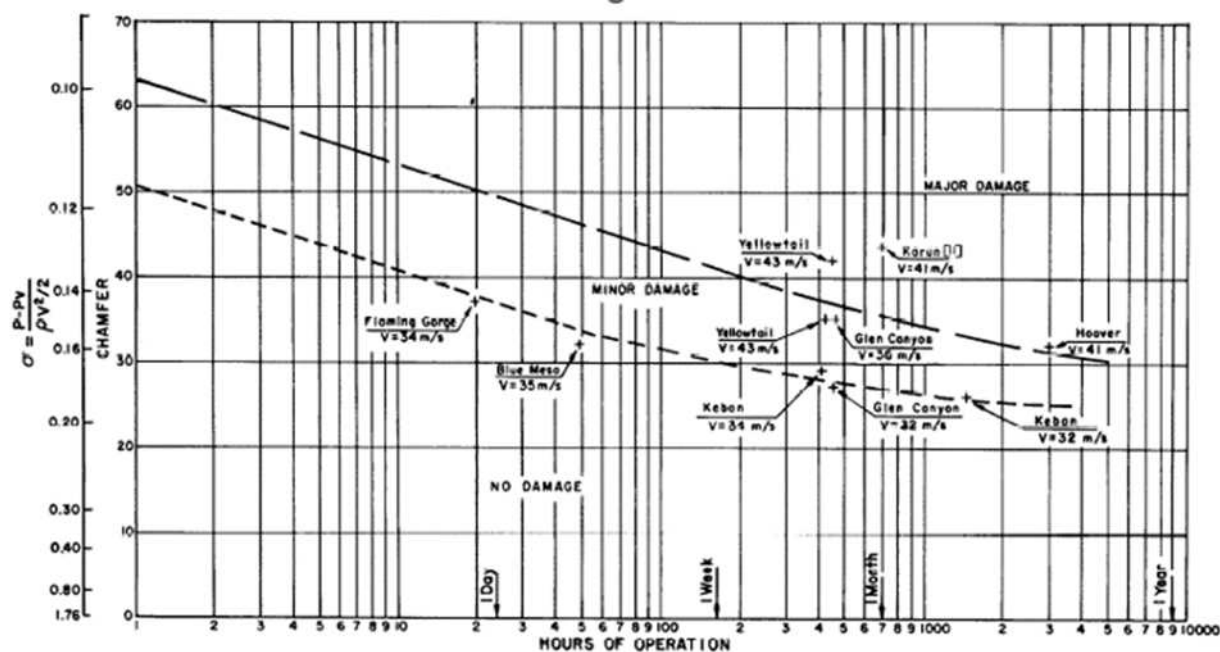
v: velocidade média do escoamento.

Com base em observações de campo, Falvey (1983) apresenta critérios que podem ser usados para prevenir danos em calhas e vertedouros com base nos valores de índice de cavitação:

- a) superior a 1,8: improvável que a estrutura apresente danos por cavitação, logo a estrutura não necessita proteção da superfície hidráulica;
- b) entre 1,8 e 0,25: a estrutura pode apresentar danos por cavitação, sendo recomendado proteger a superfície hidráulica retificando as rugosidades superficiais;
- c) entre 0,17 e 0,25: a superfície é altamente suscetível a cavitação, sendo recomendado a modificação do projeto;
- d) entre 0,12 e 0,17: a adição de ranhuras ou degraus pode ajudar a proteger a estrutura;
- e) inferior a 0,12: a superfície do fluxo não tem como ser protegida sendo indicado adotar uma configuração diferente para a estrutura.

Segundo Falvey (1983), os dois parâmetros que influenciam mais significativamente na ocorrência de cavitação são o tempo de operação e o índice de cavitação. O gráfico proposto pelo autor (Figura 11) apresenta três regiões que são definidas em função da possibilidade de ocorrência de danos à estrutura com base nos parâmetros citados anteriormente. As regiões do gráfico são as seguintes: sem ocorrência de danos, ocorrência de pequenos danos e ocorrência de grandes danos. Grandes danos são definidos pelo autor como situações que apresentam cavidades com mais de 1 metro de profundidade. Já os pequenos danos são identificados por cavidades com profundidade inferiores à 1 metro e que são facilmente observados. A região definida como sem ocorrência de danos, pode apresentar pequenas irregularidades definidas pelo autor como danos incipientes. Esses danos não são facilmente identificados, sendo necessário uma atenção especial para a sua observação.

Figura 11– Gráfico para ocorrência de dano por cavitação



Fonte: Falvey(1983)

### 3.3.4 Concreto: comportamento frente à abrasão e à cavitação

Em estruturas de concreto expostas às ações de desgaste, como abrasão e cavitação, a importância da região superficial é apontada por diversos autores. São destacadas as operações de acabamento e a sua relação com as propriedades do concreto na região superficial, podendo-se reduzir a relação água/cimento e melhorar a compactação. Uma superfície com um bom acabamento e sem imperfeições pode atenuar ou até mesmo impedir a ocorrência de abrasão ou cavitação. A cura do concreto bem realizada é, também, importante para a obtenção de uma boa resistência à abrasão, sendo recomendado um período de cura com o dobro da duração de uma cura normal (NEVILLE, 2016).

Frente a importância destas ações de desgaste do concreto, nos próximos itens são detalhadas características o comportamento deste material à abrasão e a cavitação.

#### 3.3.4.1 Resistência à abrasão

Alguns fatores influenciam a taxa de desgaste da estrutura de concreto, tais como: tamanho, forma, dureza, quantidade de partículas sendo transportadas pelo fluxo, velocidade do escoamento e qualidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No caso da abrasão, a região superficial do concreto tem papel predominante, sendo que a dureza e a resistência à compressão dessa região exercem influência importante neste tipo de desgaste. Por exemplo, o aumento da resistência à compressão de 50 para 100 MPa implica em um incremento de 50% na resistência à abrasão. Já no caso de concretos com resistência à compressão de 150 MPa, a resistência à abrasão é equivalente à de granitos de alta qualidade (GJØRV *et al.*, 1990).

Para obter um concreto com elevada resistência à abrasão é preciso uma combinação de vários fatores. São necessários agregados duros e resistentes, assim como materiais constituintes que resultam em um concreto denso e robusto. Além disso, é fundamental que apresentem alta resistência à compressão e ter baixa relação água/cimento para elevar a resistência à abrasão. Outro fator de vital importância para maximizar a resistência a este tipo de desgaste é ter a garantia de uma cura úmida adequada e um acabamento de ótima qualidade que leva a uma adequada dureza da superfície do concreto (SCOTT, 2015).

Agregados leves de elevada qualidade costumam apresentar uma boa resistência à abrasão pois, geralmente, são materiais cerâmicos. Por outro lado, não são, normalmente, resistentes ao impacto, por serem de materiais com estrutura porosa, o que não é desejável pois diversas vezes a ocorrência de abrasão ocorre em associação ao impacto dos detritos presentes no fluxo de água (PHILLEO, 1983).

A determinação da resistência à abrasão do concreto é difícil pois o processo de deterioração varia em função da causa do desgaste. Nenhum ensaio, de atrito, rolamento de esferas ou jatos de areia, é satisfatório para avaliar todas as condições que interferem no fenômeno. Estes podem ser adequados para alguns casos e, para outros, não. Os valores obtidos não são quantitativamente comparáveis devido às condições arbitrárias de ensaio, entretanto em todos os casos é possível observar uma relação proporcional entre as resistências à compressão e à abrasão do concreto. Aparentemente, o ensaio com esferas de aço apresenta maior consistência e é mais sensível que os demais (NEVILLE, 2016).

#### 3.3.4.2 Resistência à cavitação

A utilização de um concreto adequado pode reduzir os danos de cavitação, mas, a longo prazo, nenhum concreto suporta as forças de cavitação por tempo indefinido. Nesse caso, a solução é amenizar os fatores que originam a cavitação, o que pode ser feito com superfícies lisas e bem alinhadas, isentas de irregularidades, como depressões, saliências, juntas e desalinhamentos, e pela não existência de mudanças bruscas de inclinação ou curvaturas que tenham a tendência de afastar o fluxo de água da superfície. Também é interessante evitar o aumento localizado da velocidade da água pois os danos causados pela cavitação são potencializados pelo aumento da velocidade do fluxo (NEVILLE, 2016).

Concretos com alta resistência à compressão e produzidos com um revestimento absorvente, que reduza a relação água/cimento, apresentam maior resistência à cavitação. Quanto ao agregado, a sua dureza não é importante, mas a aderência entre o agregado e argamassa é vital para uma boa resistência à cavitação. Como este fenômeno tem a tendência de remover partículas maiores, recomenda-se que a dimensão máxima dos agregados na superfície do concreto deva ser 20 mm (KENN, 1968).

#### 3.3.4.3 Estudos do comportamento de materiais frente aos fenômenos de abrasão e cavitação

O Quadro 2 apresenta um compilado de resultados de estudos relacionados às resistências à abrasão e à cavitação.



Quadro 2 – Estudos de concreto para resistência à abrasão e cavitação

Autor (ano)	Observações do estudo	Principais conclusões
KORMANN(2002)	<p>O trabalho enfatiza a avaliação de desempenho de quatro materiais de reparo: argamassa com sílica ativa (SA), argamassa epoxídica (AE), argamassa polimérica (AP) e concreto com fibras de aço (FA).</p> <p>Para a seleção do melhor sistema em laboratório, foram realizados ensaios de resistência à abrasão, resistência de aderência à tração, resistência à tração direta, resistência à compressão axial simples, resistência à tração na flexão, módulo de deformação estática, ensaios de permeabilidade, envelhecimento acelerado em câmara de raios UV e de intemperismo e, ensaios físico-químicos dos materiais.</p>	<p>A argamassa epoxídica apresentou bom desempenho no ensaio de resistência à abrasão e alta resistência inicial (ideal para reparos emergenciais). Porém, pelas características do material, sua utilização em superfícies inclinadas deve apresentar dificuldades práticas.</p> <p>O concreto com fibras de aço, apesar do bom desempenho, apresentou corrosão acentuada das fibras expostas na superfície, quando submetido a armazenamento em câmara úmida.</p> <p>A argamassa com sílica ativa mostrou ser um material de reparo com desempenho atrativo, boa compatibilidade com o concreto do substrato, fácil manuseio e aplicação. As restrições estão no prazo inicial para atingir a resistência mecânica que resista aos efeitos de abrasão.</p> <p>A argamassa polimérica foi a de pior desempenho para as condições de ensaio e finalidades propostas, mesmo com a diminuição da relação a/c. Verificou-se baixa resistência mecânica à compressão axial e alta perda de massa no ensaio de abrasão.</p> <p>Com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à abrasão, de resistência de aderência à tração e de resistência à tração direta, pode-se classificar os sistemas de reparo na seguinte ordem de qualidade de desempenho: AE &gt; FA &gt; SA &gt; AP.</p> <p>Considerando-se todas as propriedades medidas, inclusive de aplicação prática em campo, a classificação dos materiais de reparo, segundo o melhor desempenho, foi: AE – SA &gt; FA &gt; AP.</p>
LATORRE(2002)	<p>Foram avaliadas argamassas de reparo sendo testadas: argamassas de base epóxi convencional e para aplicação submersa em água; três tipos de argamassas de base cimentícia com dosagens utilizadas normalmente para reparos de estruturas de concreto. Para a execução do estudo, foi considerado que deve existir total compatibilidade entre as argamassas de reparo e o concreto do substrato.</p> <p>Os ensaios à abrasão e à aderência das argamassas ao concreto do substrato, foram feitos simulando as condições de aplicação no campo para condutos forçados e tubos de sucção, mantendo a umidade acima de 90% e liberando os corpos-de-prova à ação das águas aos 3, 7 e 28 dias de idade.</p> <p>Para isso, foram elaborados cinco tipos de argamassas: argamassa epóxi (AE); argamassa epóxi p/ superfícies úmidas (AU) e argamassa cimentícia (1:2 e 1:3) e argamassa cimentícia com areia natural mais areia artificial com traço 1:3.</p>	<p>Nos ensaios de resistência à abrasão as argamassas de base epóxi tiveram melhor desempenho que as argamassas de base cimentícia e o mesmo ocorreu em relação ao desgaste por abrasão.</p> <p>As duas argamassas de base epóxi (AE e AU) apresentaram maior resistência mecânica e foram as que tiveram menor desgaste à abrasão; a argamassa de base cimentícia, com correção da faixa granulométrica da, agregado miúdo, misturando 70% de areia natural e 30% de areia artificial britada, apresentou um melhor desempenho de resistência ao desgaste por abrasão.</p>
MOMBER (2000)	<p>Duas misturas de concreto foram observadas sob exposição à cavitação de curta duração (<math>t &lt; 10s</math>). A principal diferença nas composições foi o uso de diferentes tipos de agregados: o concreto nº1 utilizou quartzo redondo; enquanto o concreto nº 2 usou calcário quebrado. Os tempos de exposição foram de 2 e 10 segundos.</p>	<p>Concreto nº1: a ação da cavitação não foi localizada em uma determinada faixa da superfície da amostra, mas distribuído por toda a sua largura. Geralmente, a falha começa na interface entre a matriz de cimento e os grãos agregados.</p> <p>Concreto nº2: mostra características de fissuras transgranulares localizadas em uma área restrita da amostra. Mesmo um tempo de exposição muito curto é suficiente para modificar a topografia da superfície das amostras investigadas.</p> <p>O comportamento do material durante a erosão por cavitação dependeu significativamente de sua capacidade de transferir tensões locais e deformar localmente. Alta rigidez e fragilidade promovem fratura transgranular. A ligação interfacial entre agregado e matriz de cimento tem importância decisiva para a resistência à erosão por cavitação.</p>

continua

continuação

Autor (ano)	Observações do estudo	Principais conclusões
HORSZCZARUK (2005)	O trabalho apresenta os resultados dos exames de resistência a abrasão de nove tipos de concreto de alta resistência (HSC) com resistências à compressão entre 75 e 120MPa. As misturas continham fibras de aço, de propileno e látex.	A suposição de dependência linear do desgaste de concretos de alta resistência (>80 MPa) está correta, se for desconsiderado o estágio inicial de abrasão (12-24 h).  A velocidade de desgaste pode ser considerada constante. O aditivo de látex não apresentou melhora a resistência à abrasão do concreto. O HSC com adição de fibra de PVC apresentou melhora nesta área.
KRELLA (2011)	Foram realizados testes experimentais em túnel de cavitação com sistema de barricadas. A intensidade da cavitação foi controlada alterando a largura de abertura e a velocidade da bomba de reforço. Os testes foram realizados com revestimentos TiN e Cr-N.	Os revestimentos TiN e Cr-N apresentam micro dobragem na fase inicial da erosão por cavitação. Observações microscópicas revelaram que as primeiras fissuras apareceram no topo da micro-dobra e nos pontos de de laminação. Os revestimentos de TiN, que possuíam composição de fase estável, apresentaram melhor correlação que os revestimentos de Cr-N, cuja composição de fase variou. Assim, a composição de fases do revestimento tem um impacto na perda de massa e no mecanismo de degradação.
GALVÃO <i>et al.</i> (2011)	Análise de amostras de concreto com substituição do agregado fino por materiais poliméricos, sendo eles oriundos da reciclagem de pneus, garrafas PET e polietileno de baixa densidade.	A adição de resíduos poliméricos e de materiais elastoméricos diminuíram a trabalhabilidade da amostra. Com o aumento da adição de materiais a resistência à compressão reduziu. Os materiais poliméricos aumentaram a resistência à abrasão no teste realizado embaixo da água.
CHOI e BOLANDER (2012)	Teste com concretos com cinza volante e escória de alto forno quanto à abrasão através de teste realizado com hélice rotativa, esferas de aço e água.	Nenhuma relação consistente entre razão de exposição de agregado e o volume erodido foi apresentada. Menor erosão por abrasão foi apresentado em agregados graúdos. O acabamento final da superfície é importante para aumentar a resistência à abrasão.
GALVÃO <i>et al.</i> (2012)	Análise dos danos decorrentes da abrasão em dois vertedouros de duas usinas hidrelétricas nos estados do Paraná e São Paulo e teste de diversas possibilidades de materiais para reparo.	No primeiro caso, foi comprovado uma relação entre a resistência à compressão e a resistência à abrasão, sendo que a argamassa epóxi apresentou melhor resistência à compressão e, conseqüentemente, melhor resultado no teste de abrasão realizado em 72 h.  No segundo caso, foi observado que a adição de polímeros reciclados reduziu a resistência à compressão do concreto. Entretanto, o concreto com adição de 5% apresentou melhor desempenho à abrasão, tanto que a adição de 2,5% como da amostra de referência. Indicando assim, que uma maior adição de polímeros pode aumentar a resistência à abrasão.
KORJAKINSet <i>al.</i> (2013)	Para melhor entender o processo de cavitação, foram realizadas sete misturas de concreto: duas de controle, duas de sílica ativa e água (1:5), uma de cimento e água (1:5) com adição de plastificante, uma com parte da sílica substituída por cimento e adição de plastificante e uma de sílica ativa e água com adição de plastificante.	A suspensão de sílica ativa em água (proporções 1: 5) mostrou alta estabilidade de não segregação durante 2 h após 4 minutos de tratamento de cavitação, o que prova uma melhor distribuição das partículas de sílica ativa na pasta em comparação com a suspensão misturada manualmente. A resistência média à compressão do concreto foi aumentada de 2,3% para 6,5% para ambos os tipos de traços de dimensionamento considerados com diferentes relações a/c nos resultados da aplicação de suspensão de aditivo de sílica ativa com água após o tratamento de cavitação.
KRELLA (2013)	Este estudo apresenta os resultados dos testes de cavitação de revestimentos multicamadas Ti/TiN depositados no aço X6CrNiTi18-10, realizado pelo método ARCPVD. Foram testadas três diferentes quantidades de camadas, quatro camadas, doze camadas e vinte camadas.  Os materiais foram soldados ao substrato e assim as microgotículas da solda se caracterizaram como uma região crucial no estudo.	Os revestimentos multicamadas Ti/TiN melhoraram a resistência à erosão por cavitação da superfície protegida. Um aumento no número de gotículas de Ti (N) dentro do revestimento, aumentando a rugosidade do revestimento, causa um aumento da taxa de perda de massa no início de uma cavitação. A perda de massa dos revestimentos multicamadas Ti/TiN diminuiu com o aumento da dureza do revestimento e com o aumento da espessura das camadas.

continua

continuação

Autor (ano)	Observações do estudo	Principais conclusões
SHARMA <i>et al.</i> (2018)	<p>O estudo foi sobre o comportamento do concreto reforçado com fibra de aço quanto à resistência ao impacto e abrasão. O teste foi realizado para diferentes percentuais de fibra de aço presentes na mistura.</p>	<p>A melhoria no comportamento pós-fissuração do concreto é observada com o uso de 1, 1,25 e 1,5% de fibras de aço no concreto. A resistência ao impacto do concreto reforçado com fibra de aço aumentou substancialmente mesmo no teor de 1%. Com a melhoria geral nas características do concreto, a mistura otimizada que incorpora 1,25 a 1,5% de fibras de aço é considerada adequada para aplicação em vertedouros onde o problema de erosão por abrasão e cavitação causado pelo impacto de rochas é uma grande preocupação.</p>
BARBOSA <i>et al.</i> (2013)	<p>O trabalho aborda a aplicação da tecnologia do concreto de alta resistência (CAR) para a produção de concretos com incorporação dos resíduos de cinza de casca de arroz (CCA) através da substituição em massa de parte do material aglomerante, e borracha de pneus em substituição parcial do agregado miúdo em volume, avaliando suas influências sobre as propriedades de durabilidade e mecânicas.</p>	<p>Para os concretos com CCA e borracha, foi possível verificar a redução da fragilidade através do aumento da capacidade de absorção de energia. Com relação à abrasão, os concretos contendo CCA e borracha apresentaram perda de massa inferior ao concreto sem resíduos, indicando que este material é atrativo para o uso em pavimentação. Contudo, espera-se que estes resíduos venham representar uma alternativa tecnológica e ecológica para a produção de concretos na construção civil.</p>
PINHO <i>et al.</i> (2007)	<p>O trabalho apresenta dois programas experimentais. O primeiro, é voltado para a avaliação do desempenho de diferentes pontes de aderência, sendo testados corpos de prova com as seguintes pontes de aderência: pasta cimentícia (0% de adição de pozolana), adesivo epóxi para superfície seca, primer epóxi para superfície úmida, resina acrílica para superfície úmida. O segundo programa experimental visou avaliar o desempenho à abrasão de diferentes reparos superficiais. Foram submetidos ao ensaio de abrasão os seguintes reparos superficiais: argamassa cimentícia, argamassa cimentícia com adição de metacaulim (10% em massa de cimento), argamassa cimentícia com adição de sílica ativa (10% em massa de cimento), concreto de referência com resistência característica em torno de 20 MPa.</p>	<p>O desempenho da pasta cimentícia sem adição de qualquer pozolana foi considerado satisfatório aos 3 e 28 dias, apresentando, também, os maiores valores de resistências para cada idade. A eficiência da ponte de pasta cimentícia foi cerca de 35% superior à do adesivo epóxi para superfícies secas – que apresentou melhor desempenho entre as demais pontes de aderência – em ambas as idades estudadas. Todos os reparos apresentaram melhores desempenhos quanto à abrasão quando comparados ao concreto de referência, em especial a argamassa com adição de sílica ativa que apresentou desempenho em torno de 52 vezes superior ao de referência, configurando um reparo extremamente eficiente aos esforços de abrasão solicitados. A argamassa sem qualquer adição mineral apresentou um ótimo desempenho à abrasão, provavelmente pela alta resistência alcançada. Os resultados deste material o credenciam a estudos mais detalhados.</p>

Fonte: elaborado pelo autor

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO DE RISCO

Diversas metodologias de classificação de risco, encontradas na literatura, serviram de inspiração para análise e desenvolvimento da metodologia apresentada nessa dissertação. Optou-se por classificar a apresentação das metodologias, neste trabalho, em internacionais e nacionais. Dentre as metodologias internacionais foram consultadas cinco, sendo elas:

- a) metodologia do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP): baseada no risco e desenvolvida para avaliar pontes rodoviárias;
- b) metodologia dos Estados Unidos, com base no *Federal Highway Administration* (FHWA): para inspeção de pontes;
- c) metodologia do Japão: referente à inspeção de pontes;
- d) os modelos desenvolvidos na Áustria e Eslovênia, ambos publicados no Bulletin n. 43 do *Comité Euro-International du Béton* (CEB) de 1998: desenvolvidos para avaliar pontes.

Entre as nacionais, foram consideradas, neste trabalho, três, ou seja:

- a) método absoluto: baseado nos modelos austríaco e esloveno, desenvolvido para avaliar estruturas de concreto (WARMLING; SANTOS FILHO, 2018);
- b) metodologia do LEME/UFRGS: para classificação de obras de arte, em 1991, desenvolvida através de parceria entre a Prefeitura Municipal de Porto Alegre e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS);
- c) metodologia Gde/UnB: para classificar estruturas de concreto armado convencional, desenvolvida pela Universidade Federal de Brasília (UnB).

Os tópicos a seguir apresentam detalhadamente todas as metodologias internacionais e nacionais.

#### 3.4.1 Metodologias Internacionais

Como acima citado, foram cinco as metodologias internacionais consultadas e utilizadas como referência para a metodologia proposta nesta dissertação.

### 3.4.1.1 Metodologia de inspeção baseada no risco (NCHRP, 2014)

O *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), dos Estados Unidos, propôs uma metodologia, tendo por foco pontes rodoviárias, com a finalidade de desenvolver práticas de Inspeção Baseadas no Risco (RBI). Dentre os objetivos dessa metodologia, encontra-se garantir a segurança e confiabilidade das pontes permitindo otimizar os recursos, utilizando-os onde são mais necessários, e concentrando os esforços de inspeção.

Metodologias baseadas no risco estão baseadas na probabilidade de falha de um elemento ou componente, em um determinado intervalo de tempo, considerando, simultaneamente, as consequências dessa falha. Tal abordagem, baseada no risco, já foi empregada em diversas indústrias para determinar o planejamento da inspeção, focando a atenção no elemento que apresente maior risco. Desta forma, o elemento de maior risco será o elemento com maior probabilidade de falha e que determina consequência mais grave em caso de falha. Para aplicação da metodologia são utilizados dois parâmetros que são apresentados detalhadamente a seguir.

O primeiro parâmetro é o Fator de Ocorrência (OF) que contempla os modos de danos que podem ocorrer durante a vida útil da ponte. Cada dano, ou evento, que pode resultar na falha de um elemento deve ter um OF com base na probabilidade daquela falha ocorrer em determinado período especificado. O OF classifica a probabilidade de falha de um elemento em quatro categorias variando desde remota até alta (Quadro 3).

Quadro 3– Valores característicos para Fator de Ocorrência (OF)

Valor	Categoria	Descrição
1	Remoto	Probabilidade remota de ocorrência, não é esperado que a falha ocorra
2	Baixo	Baixa probabilidade de ocorrência
3	Moderado	Moderada probabilidade de ocorrência
4	Alto	Alta probabilidade de ocorrência

Fonte: NCHRP, 2014

Esse parâmetro se relaciona, também, à condição do elemento, pois quanto mais deteriorado um elemento está, maior é a probabilidade de ocorrência de falha. Sendo assim, o parâmetro OF varia durante a vida útil da estrutura em função da condição dos seus elementos. Pode, portanto, aumentar de valor conforme o elemento se deteriora ou, até mesmo, diminuir, em caso de melhora da sua condição, em função de alguma intervenção ou reparo.

O segundo parâmetro é o Fator de Consequência (CF) que avalia o resultado provável em caso de falha de determinado elemento. O processo de avaliação da consequência de uma falha é uma ferramenta de classificação da importância de um determinado elemento em relação a outros. Tem a intenção de priorizar os elementos, nas inspeções, àqueles que causarão, em caso de falha, maior consequência.

O CF classifica as consequências de falhas em quatro categorias que variam desde baixa até severa (Quadro 4). Para os cenários de falha são avaliados diversos parâmetros, entre eles: local onde a ponte está inserida, padrões de tráfego, carregamentos típicos ou esperados, características estruturais da ponte e dos materiais envolvidos. Esses cenários são avaliados qualitativamente, por meio de análises ou com base na experiência anterior, em cenários de falha semelhantes.

Quadro 4 – Valores característicos do Fator de Consequência (CF)

CF	Categoria	Descrição
1	Baixo	Pequeno efeito na funcionalidade e nenhum efeito na segurança
2	Moderado	Efeito moderado na funcionalidade e pequeno efeito na segurança
3	Alto	Grande impacto na funcionalidade e impacto moderado na segurança
4	Severo	Colapso estrutural / fora de serviço

Fonte: NCHRP, 2014

A partir da determinação dos parâmetros OF e CF é possível delimitar o intervalo de inspeção colocando os parâmetros na Matriz apresentada na Figura 12. A matriz apresenta cinco diferentes intervalos de inspeção que correspondem aos intervalos apresentados na Quadro 5. Os intervalos entre inspeções são determinados a partir dos conhecimentos de engenharia para garantir a segurança da estrutura e de que ela passe por diversas inspeções antes da probabilidade de falha se tornar alta. Além disso, os intervalos de inspeção são ainda mais reduzidos conforme as consequências aumentam visando garantir níveis adicionais de segurança. O

intervalo de inspeção adotado para a ponte é baseado no intervalo de inspeção mais curto determinado a partir da análise.

Figura 12– Matriz de risco

Occurrence Factor	4	III	II	II	I
	3	III	III	II	II
	2	IV	IV	III	II
	1	V	IV	III	III
		1	2	3	4
		Consequence Factor			

Fonte: NCHRP, 2014

Quadro 5– Intervalo máximo de inspeção

Categoria	Intervalo máximo
I	12 meses ou menos
II	24 meses
III	48 meses
IV	72 meses
V	96 meses

Fonte: NCHRP, 2014

Para determinadas pontes, que sejam consideradas mais relevantes ou essenciais, é possível definir uma matriz de risco com uma margem adicional de confiabilidade. Essas pontes podem assim consideradas em função, por exemplo, da importância para todo sistema de transporte e do seu fluxo de veículos. A Figura 13 apresenta um exemplo de matriz de risco para pontes essenciais.

Figura 13 – Matriz de risco para pontes essenciais

Occurrence Factor	High	4	III	II	I	I
	Moderate	3	III	II	II	I
	Low	2	III	III	II	II
	Remote	1	IV	III	III	II
			1	2	3	4
		Consequence Factor				

Fonte: NCHRP, 2014

O método também permite desenvolver o escopo das próximas inspeções determinando aqueles modos de danos que são mais importantes com base no valor calculado do Número de Prioridade de Inspeção (IPN). Tal parâmetro é calculado com base nos valores atribuídos para OF e CF, como é possível observar na Fórmula 3:

$$IPN = OF \times CF$$

Fórmula 3

Sendo:

*IPN*: número de prioridade de inspeção;

OF: fator de ocorrência;

CF: fator de consequência.

Assim, os valores de IPN destacam os modos de dano mais importantes, ou seja, que tenham maior probabilidade de ocorrer e maiores consequências caso ocorram. Quanto maior o valor de IPN, maior a prioridade de inspeção que aquele modo de dano merece. Desta forma, deverá ser priorizada a atenção no momento da inspeção para aqueles modos de dano que apresentem maior IPN.



### 3.4.1.2 Metodologia de inspeção dos Estados Unidos

Nos Estados Unidos, durante os anos 2000, foi estabelecido o Padrão Nacional de Inspeção de Pontes (NBIS) com a finalidade de ajudar nas tomadas de decisões para inspeções de pontes. Entretanto, essa classificação do NBIS tinha alta subjetividade na sua interpretação por parte dos inspetores. Visando reduzir essa subjetividade, o *Federal Highway Administration* (FHWA), durante o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de pontes, realizou uma descrição detalhada das pontes, resultando na descrição de 160 elementos. O FHWA estabeleceu algumas diretrizes federais para realização de inspeções de pontes e permitiu que os estados desenvolvessem metodologias próprias para avaliação de risco destas estruturas com intervalos de inspeção não superiores a 12, 24, 48 e 72 meses. O processo de avaliação de risco, critérios utilizados e intervalos de inspeções devem ser documentados e aprovados pelo FHWA (2019).

Sendo assim, grande parte dos estados desenvolveram suas próprias metodologias para avaliação de risco de pontes se baseando nas descrições de elementos realizadas pelo FHWA. Os estados da Virgínia, Wisconsin, Hawaii, New Jersey e Delaware são alguns dos que utilizaram um método de classificação com quatro possíveis estados de condição, sendo eles: bom (1), razoável (2), ruim (3) e crítico(4). O departamento de transporte de cada estado possui um manual com quadros que correlacionam os danos com o estado do elemento para cada um dos quatro possíveis estados de condição. O Quadro 6 apresenta o exemplo de classificação dos estados de condição para viga de concreto.

Quadro 6– Estados de condição para viga de concreto

Defeitos	Estados de condição			
	1	2	3	4
	Bom	Razoável	Ruim	Severo
Delaminação / fragmentação / Área recuperada	Nenhum. Área recuperada.	Delaminação. Fragmentação com menos de 1 polegada de profundidade ou com menos de 6 polegadas de diâmetro. Área recuperada em más condições	Fragmentação com mais de 1 polegada de profundidade ou mais de 6 polegadas de diâmetro. Não justifica revisão estrutural.	A condição garante uma revisão estrutural para determinar o efeito na resistência ou capacidade de serviço do elemento ou ponte; ou uma revisão estrutural foi concluída e os defeitos impactam a resistência ou a capacidade de manutenção da ponte ou elemento.
Exposição de armadura	Nenhum	Sem perda de seção mensurável.	Perda de seção mensurável, mas não justifica revisão estrutural.	
Lixiviação / Eflorescência / Ferrugem	Nenhum	Superfície sem lixiviação ou eflorescência branca, sem manchas de ferrugem.	Superfície com muitas eflorescências com manchas de ferrugem.	
Fissuras / Rachaduras	Fissuras insignificantes ou fissuras moderadas que foram recuperadas.	Rachaduras moderadas não recuperadas.	Grandes rachaduras ou muitas rachaduras mapeadas.	
Danificado	Não se aplica.	O elemento tem dando de impacto. O dano específico causado pelo impacto foi classificado no estado de condição 2 sob a entrada de defeito de material apropriado.	O elemento tem dando de impacto. O dano específico causado pelo impacto foi classificado no estado de condição 3 sob a entrada de defeito de material apropriado	

Fonte: New Jersey Department of Transportation (2015) traduzido pelo autor.

### 3.4.1.3 Metodologia de inspeção do Japão

No Japão, os protocolos para inspeção de pontes são desenvolvidos pelo Ministério da Terra, Infraestrutura, Transporte e Turismo (MLIT). Todas as pontes, com mais de 2 metros de vão, passam por uma inspeção a cada cinco anos. Cada elemento da estrutura da ponte tem sua condição avaliada e classificada em uma das condições

de urgência de manutenção apresentadas no Quadro 7 (SHIRATO; TAMAKOSHI, 2013).

Quadro 7– Classes de classificação de urgência de manutenção

Classes	Descrição
A	Não necessita de reparo
B	Não necessita de reparos imediatos
C	Necessita de reparos
E1	Ação emergencial é necessária, do ponto de vista de segurança estrutural e estabilidade
E2	Ação emergencial é necessária por outros fatores
M	Necessita de reparos durante os trabalhos regulares de manutenção
S	Necessita de uma investigação mais detalhada

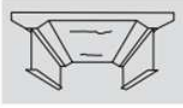




Fonte: adaptado de Shirato e Tamakoshi(2013)

A classificação de urgência de manutenção, em uma das sete classificações apresentadas, é realizada de forma subjetiva e deve ser exercida por engenheiro experiente. Estes inspetores devem recomendar a necessidade ou não de ação até o momento da próxima inspeção (SHIRATO; TAMAKOSHI, 2013).

Além da classificação de urgência de manutenção, os inspetores registram, de forma precisa, a existência e extensão dos danos através de uma classificação que vai de "A" até "E", onde "E" é o pior caso e, "A", o melhor. Nos casos de registros de danos, os critérios quantitativos e orientação dos danos é que definem a classificação, não tendo subjetividade como nos casos de classificação de urgência de manutenção. A posição final da avaliação é feita com base na classificação de urgência de manutenção. Assim, é de vital importância que a análise seja realizada por um engenheiro com muita experiência no assunto (BOETTGER, 2018).

Para a classificação de urgência de manutenção é avaliado todo o elemento enquanto para a realização dos registros de dados cada segmento do elemento é avaliado. Por exemplo, para classificação de urgência de manutenção é determinado um valor para todas as longarinas da ponte, enquanto no registro de dados cada longarina da ponte recebe uma classificação. O Quadro 8 apresenta um modelo que o MLIT fornece para cada tipo de dano, sendo apresentadas, por exemplo, as classificações detalhadas para a ocorrência de fissuras na laje do tabuleiro (BOETTGER, 2018).

Quadro 8– Classificação detalhada para ocorrência de fissuras no tabuleiro

Extensão dos danos	Padrão de fissuras	Densidade de fissuras	Largura máxima de fissura	Exemplo
A	Fissuras unidirecionais	Espaçamento entre fissuras normalmente de 1m ou mais.	Largura máxima de fissura é de 0,05 mm (trinca capilar).	
B	Prevalecem fissuras unidirecionais; Fissuras que se desenvolvem na direção do eixo da ponte são pequenas.	Espaçamento entre fissuras normalmente entre 1 m e 0,5 m.	Maioria das fissuras mais estreitas que 0,1mm de largura; algumas partes com 0,1mm ou mais largas.	
C	Padrão de fissuras em desenvolvimento nas duas direções, mas ainda não se tornou uma malha.	Espaçamento entre fissuras em torno de 0,5 m.	Maioria das fissuras mais estreitas que 0,2mm de largura; algumas partes com 0,2mm ou mais largas.	
D	Padrão de fissuras nas duas direções completamente desenvolvido.	Espaçamento das fissuras normalmente entre 0,5 m e 0,2 m.	Muitas fissuras de 0,2mm de largura; abrasão visível em algumas partes da superfície da fissura.	
E	Padrão de fissuras nas duas direções completamente desenvolvido.	Espaçamento das fissuras na maior parte inferior a 0,2m.	Muitas fissuras de 0,2 mm de largura; abrasão desenvolvida continuamente na superfície das fissuras.	

Fonte: Tamakoshi *et al.* (2016) traduzido pelo autor.

#### 3.4.1.4 Método Austríaco (CEB, 1998)

O *Bulletin n. 243 – Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures* (CEB, 1998) apresenta o método austríaco com seus respectivos parâmetros e aplicações. A aplicação da metodologia leva em consideração o tipo, a extensão e a propagação do dano observado, assim como o seu efeito global na segurança e durabilidade da estrutura. A partir de inspeções é realizada uma avaliação numérica que permite obter parâmetros de performance através do método.

Para avaliação de cada dano são utilizados quatro parâmetros que são definidos através de critérios descritivos e um quinto parâmetro que é definido com base no tipo de dano observado. Para avaliação de cada dano é utilizada a Fórmula 4 (CEB, 1998):

$$CR = \sum Gi \times K_{1i} \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i}$$

Fórmula 4

Sendo:

$CR$ : classificação de condição da estrutura;

$G$ : função do tipo de dano, variando de 1 a 5;

$K_{1i}$ : função da extensão do dano, variando de 0 a 1;

$K_{2i}$ : função da intensidade dos danos, variando de 0 a 1;

$K_{3i}$ : função do membro estrutural, variando de 0 a 1;

$K_{4i}$ : função da urgência de intervenção, variando de 0 a 10.

A classificação de condição pode variar de uma escala de 0 a 70 e, com base no valor calculado, a estrutura pode ser enquadrada em seis classes diferentes (CEB, 1998).

#### 3.4.1.5 Método desenvolvido na Eslovênia (CEB, 1998)

Além do método austríaco, apresentado no tópico anterior, o *Bulletin nº 243 – Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures* (CEB, 1998) também apresenta o método desenvolvido na Eslovênia. A classificação de condição através do método esloveno é realizada pela razão entre a soma dos valores dos danos detectados na inspeção e a soma dos valores de referência de danos que podem, realisticamente, ocorrer na mesma estrutura. O resultado desta razão é multiplicado pelos parâmetros  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4 = 1$  (Fórmula 5):

$$R = \sum V_D = \sum B_i \times K_{1i} \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \quad \text{Fórmula 5}$$

Sendo:

$V_D$ : valor do tipo de dano;

$B_i$ : valor básico em função do tipo de dano;

$K_{1i}$ : fator de relevância estrutural;

$K_{2i}$ : fator de intensidade;

$K_{3i}$ : fator de propagação;

$K_{4i}$ : fator de urgência;

$B_i$ : função do tipo de dano observado.

No Quadro 9 são apresentados valores típicos de  $B_i$  para alguns danos.

Quadro 9 – Valores característicos para  $B_i$ 

Dano	$B_i$
Movimentos laterais	2,00
Recalque diferencial	3,00
Corrosão dos estribos	1,00
Corrosão da armadura, com redução da seção de aço.	3,00
Corrosão de cordoalhas protendidas	4,00
Carbonatação	2,00

Fonte: CEB (1998)

O fator de importância estrutural ( $K_{1i}$ ) avalia a importância do elemento para a segurança estrutural e durabilidade da estrutura global. No caso de uma estrutura de ponte, o  $K_{1i}$  de elementos individuais deve ser selecionado de forma que o valor total para os componentes da ponte fique dentro dos seguintes limites:

- a) infraestrutura:  $1,0 \pm 0,2$  ;
- b) superestrutura, reforçada:  $1,2 \pm 0,2$ ;
- c) superestrutura, protendido:  $1,45 \pm 0,2$ ;
- d) tabuleiro:  $0,4 \pm 0,1$ ;

O Quadro 10 apresenta, como exemplo, os valores característicos para o parâmetro  $K_{1i}$  para vigas, que se enquadra como superestrutura, tendo a soma dos parâmetros limitados a  $1,2 \pm 0,2$ .

Quadro 10– Valores característicos de  $K_1$  para vigas

Componente estrutural	Elemento estrutural	$K_{1i}$	Soma
	Vigas	0,6	
Superestrutura:	Tabuleiro	0,4	
Vigas	Transversina	0,2	
	Longarina	0,2	1,4

Fonte: CEB (1998)

O fator de intensidade ( $K_{2i}$ ) avalia a intensidade ou grau de dano causados à estrutura. Valores característicos e um critério de descrição geral dos valores de  $K_{2i}$  são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11– Valores característicos para  $K_2$ 

Tipo	Grau	Critério	$K_2$
0	Insignificante	Dano irrelevante, em menos de 3% da área total do elemento	0,00
I	Pequeno	Dano pequeno, entre 3% e 10% da área total do elemento	0,50
II	Médio	Dano médio, confinado em uma área entre 10% e 25% da área total do elemento	1,00
III	Grande	Dano grande, de 25% a 75% da área total do elemento, ou em muitos lugares de um elemento estrutural	1,50
IV	Imenso	Dano muito grande, presente em mais de 75% da área do elemento	2,00

Fonte: CEB (1998)

O fator de propagação ( $K_{3i}$ ) avalia a extensão da propagação do dano em todo elemento ou em todo o grupo de elementos. O Quadro 12 apresenta valores característicos para o fator de propagação.

Quadro 12– Valores característicos para  $K_3$ 

Critério	$K_3$
Dano aparece em menos de 10% dos elementos do mesmo tipo	0,5
Dano aparece entre 10% e 25% dos elementos do mesmo tipo	1,0
Dano aparece entre 25% e 75% dos elementos do mesmo tipo	1,5
Dano aparece em mais de 75% dos elementos do mesmo tipo	2,0

Fonte: CEB (1998)

O fator de urgência ( $K_{4i}$ ) avalia a premência de necessidade de intervenção no elemento em função do dano observado. O Quadro 13 apresenta valores característicos para o fator de urgência.

Quadro 13– Valores característicos para  $K_4$ 

Descrição	$K_{4i}$
A intervenção não é urgente pois o dano não prejudica a segurança geral ou a durabilidade da estrutura e do elemento afetado.	1,0
Os danos devem ser reparados dentro de um período de 5 anos, evitando maior comprometimento da segurança, facilidade de manutenção e evitando maiores impactos a durabilidade da estrutura.	entre 2,0 e 3,0
O reparo imediato é necessário pois o dano está comprometendo a segurança e/ou a durabilidade da estrutura da ponte.	entre 3,0 e 5,0.
A limitação de carga de tráfego ou escoramento temporário é necessário	5,0

Fonte: CEB (1998)

A classificação de condição é calculada para toda estrutura e, também, para cada grupo de elementos da estrutura, como a infraestrutura. Isso permite comparar a condição média de toda estrutura com a de cada grupo de elemento, permitindo observar quais são os elementos mais ou menos danificados. A Fórmula 6 apresenta o cálculo da classificação de condição da estrutura:

$$R_C = \frac{\sum V_D}{\sum V_{D,ref}} \times 100 \quad \text{Fórmula 6}$$

Sendo:

 $R_C$ : classificação de condição; $V_D$ : soma dos valores de danos calculados observados na estrutura; $V_{D,ref}$ : soma de valores de referência dos danos considerando todos os danos que possivelmente poderiam ocorrer na estrutura multiplicados pelos valores dos parâmetros:  $K_{2i} = K_{3i} = K_{4i} = 1$ 

Com base no valor calculado a estrutura ou seu componente pode ser classificado em uma das seis classes de deterioração apresentadas no Quadro 14. A determinação dos intervalos das classes de deterioração foi definida pela geração e avaliação de cerca de 150 combinações de tipos de danos, que determinam o valor de  $B_1$ , e valores de  $K_2$  e  $K_3$  em função do grau e extensão dos tipos de danos selecionados.



Quadro 14– Classes de deterioração

Classes de deterioração	Descrição da condição, necessidade de intervenção	Intervalo de valores
I	Sem danos e sem necessidade de reparos, apenas manutenção regular	0 a 5
II	Pequenos danos que somente depois de um longo período podem afetar a durabilidade ou funcionalidade da estrutura. Locais deteriorados podem ser reparados com baixo custo durante os trabalhos de manutenção regular.	3 a 10
III	Deterioração média: pode causar uma redução na funcionalidade e durabilidade da estrutura, mas sem limitação de uso. Necessário realizar reparos num curto período de tempo.	7 a 15
IV	Deterioração elevada: afeta a funcionalidade e durabilidade da estrutura, mas sem grandes limitações de uso. Reparos imediatos são necessários para garantir a durabilidade e funcionalidade da estrutura.	12 a 25
V	Deterioração muito elevada: necessita limitação de uso. Reparos imediatos e reforços da estrutura são necessários ou a capacidade de carregamento deve ser reduzida.	22 a 35
VI	Deterioração crítica: necessita de escoramento imediato e limitação do uso. São imprescindíveis obras de reabilitação para recuperar a funcionalidade da estrutura, o uso da mesma e das condições de serviço. Entretanto, essas obras de reabilitação terão custos elevados.	>=30

Fonte: CEB (1998)

### 3.4.2 Metodologias Nacionais

Como citado anteriormente, foram três as metodologias brasileiras consultadas e utilizadas como referência para a metodologia proposta nesta dissertação.

#### 3.4.2.1 Método absoluto (WARMLING; SANTOS FILHO, 2018)

O modelo absoluto foi baseado no modelo esloveno, apresentado no tópico 3.1.4.5. O modelo original foi adaptado às condições brasileiras, sendo acrescentado um novo parâmetro,  $K_5$ , que visa avaliar a durabilidade com base em ensaios de campo. A Fórmula 7 é utilizada para avaliação numérica da ponte (WARMLING; SANTOS FILHO, 2018):

$$R = \sum V_D = \sum B_i \times K_{1i} \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \times K_{5i} \quad \text{Fórmula 7}$$

Sendo:

$V_D$ : valor do tipo de dano;

$B_i$ : valor básico em função do tipo de dano;

$K_{1i}$ : fator de relevância estrutural;

$K_{2i}$ : fator de intensidade;

$K_{3i}$ : fator de propagação;

$K_{4i}$ : fator de urgência;

$K_{5i}$ : fator de durabilidade relacionado a ensaios de campo.

Os parâmetros  $B_i$ ,  $K_{1i}$ ,  $K_{2i}$ ,  $K_{3i}$  e  $K_{4i}$  são definidos, respectivamente, pelos Quadros 9 a 13, anteriormente apresentados. Já, o parâmetro  $K_{5i}$ , deve ser utilizado apenas para os danos que envolvem os materiais da estrutura, nos demais casos o parâmetro  $K_{5i}$  é igual a 1,00.

O valor do parâmetro  $K_{5i}$  está relacionado aos ensaios de campo e a partir dos resultados dos ensaios o parâmetro é calculado. O trabalho de Warmling e Santos Filho (2018) apresenta valores e formulações para o parâmetro  $K_{5i}$  para ensaios de carbonatação, cloretos, esclerometria, ultrassom, reação álcali agregado, ataques por sulfato e potencial de corrosão. Com a definição do parâmetro  $K_{5i}$ , para cada um dos ensaios realizados na estrutura, é, então, calculada a média de todos esses parâmetros e é definido o valor final de  $K_{5i}$  para aplicação da Fórmula 7.

#### 3.4.2.2 Método de classificação do LEME/UFRGS(KLEIN *et al.*, 1991)

O Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) desenvolveu um método para avaliar obras de arte da cidade de Porto Alegre através de parceria com a Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA)(KLEIN *et al.*, 1991).

As obras de arte foram divididas em Famílias de Elementos. A divisão adotada foi: encontros, instalações pluviais, pavimentos, juntas de dilatação, aparelhos de apoio, pilares, tabuleiros (vigas e lajes da superestrutura) e instalações diversas.

Foi desenvolvido um Caderno de Inspeção no qual ficam indicados os elementos a serem vistoriados e uma lista das possíveis manifestações patológicas a serem encontradas em cada um desses elementos. Na vistoria, cada um dos engenheiros preenche individualmente o Caderno de Inspeção e atribui uma nota, de 0 a 4, para cada lesão observada.

Para classificação das obras de arte, são utilizados três fatores que representam parâmetros diferentes da estrutura em análise. Os fatores representam a condição da estrutura (FI), a relevância estrutural do elemento (FR) e a gravidade dos problemas encontrados (FG).

A média das notas atribuídas pelos vistoriadores corresponde a nota final, denominada Fator de Intensidade (FI). O FI varia em uma escala de 0 a 4, em função da intensidade de cada manifestação patológica. O Quadro 15 apresenta a classificação da estrutura em função dos valores de FI (KLEIN *et al.*, 1991).

Quadro 15–Interpretação do FI definido para cada estrutura

<b>Fator de Intensidade (FI)</b>	
0	Elemento em perfeitas condições;
1	Elemento em bom estado, lesões leves;
2	Elemento em estado razoável, lesões toleráveis;
3	Elemento em más condições, lesões graves;
4	Elemento em péssimas condições; estado crítico

Fonte: adaptado de Klein *et al.* (1991)

O Fator de Relevância Estrutural (FR) leva em consideração a importância de cada elemento para o desempenho da estrutura, ou seja, a que Família de Elementos ele pertence, ou seja, traduz a responsabilidade de cada elemento para o bom desempenho da estrutura como um todo. Assim, FR varia de acordo com a Família de Elementos, adotando valores de 1 a 5 conforme apresentado no Quadro 16.

Quadro 16 –Valores do FR em função da Família de Elementos

Fator de Relevância Estrutural (FR)	
1	Instalações diversas
2	Encontros
3	Instalações pluviais e pavimento
4	Juntas de dilatação e aparelhos de apoio
5	Pilares, vigas e tabuleiro

Fonte: adaptado de Klein *et al.* (1991)

O Fator de Gravidade do Problema (FG) quantifica o grau de comprometimento estrutural ou a queda de desempenho causado pela manifestação patológica detectada em um elemento. A escala de FG varia de 0 a 10 de acordo com o problema específico apresentado e em qual elemento a manifestação patológica é apresentada. Trata-se de um valor fixo definido pelo em função do dano e da família a qual elemento pertence. Por exemplo, para aparelhos de apoio, o FG para esmagamento é 10 e para sujeira é 4 (Quadro 17).

Quadro 17 –Valores do FG: exemplo para a família aparelhos de apoio

Aparelhos de apoio	
Dano	FG
Sujeira	4
Drenagem	5
Bloqueio	9
Esmagamento	10

Fonte: adaptado de Klein *et al.* (1991)

Definidos os valores dos três fatores descritos, é possível calcular os Graus de Risco: do Elemento (GRE) e da Família (GRF). Para cálculo desses valores são empregadas, respectivamente, as fórmulas 8 e 9 (KLEIN *et al.*, 1991):

$$GRE = \frac{\sum(FG \cdot FI)}{\sum FG} \cdot 100 \quad \text{Fórmula 8}$$

$$GRF = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_1 \cdot GRE_i}{n} \quad \text{Fórmula 9}$$

Sendo:

*GRE*: grau de risco do elemento;

*FG*: fator de gravidade do problema;

*FI*: fator de intensidade;

*GRF*: grau de risco da família.

O coeficiente de majoração ( $\delta_1$ ) tem como finalidade aumentar a contribuição de elementos altamente danificados, impedindo, assim, que esse valor seja encoberto, se estiver num grupo de elementos em bom estado sendo apenas um deles em estado crítico. O coeficiente de majoração é igual a 1 quando o Grau de Risco do Elemento (*GRE*) é inferior ao valor limite (*LIM*) de cada tipo elemento constituinte da estrutura, apresentado no Quadro 18 (KLEIN *et al.*, 1991).

Quadro 18 – Valores limites para cada tipo de elemento constituinte da estrutura

Valores Limites (LIM)	
Pilares	100
Aparelhos de apoio	200
Encontros	95
Juntas de dilatação	210
Tabuleiro	100

Fonte: adaptado de Klein *et al.* (1991)

Quando o *GRE* é superior ao valor limite, o coeficiente de majoração é calculado através da Fórmula 10 (KLEIN *et al.*, 1991):

$$\delta = \sqrt{\frac{[(n - m) + 2]}{2}}$$

Fórmula 10

Sendo:

*n*: número de elementos componentes da família;

*m*: número de elementos da família com *GRE*>*LIM*.

O Grau de Risco da Estrutura (*GR*) representa o risco de todas as famílias de elementos que integram a estrutura. A Fórmula 11 é utilizada para obter o valor de *GR*:

$$GR = \frac{\sum_{i=1}^k (FR_1 \cdot GRF_1)}{\sum_{i=1}^k FR_1}$$

Fórmula 11

Sendo:

k: número de famílias de elementos;

FR: fator de relevância estrutural do elemento;

GRF: grau de risco da família de elementos.

Vale ressaltar que o termo risco não significa o colapso da estrutura, porém indica que o conjunto de manifestações patológicas merece uma maior atenção e que a recuperação da estrutura deve ocorrer com maior brevidade. Os valores obtidos de GR definem a classificação da estrutura de acordo com as faixas propostas por Klein *et al.* (1991) apresentadas no Quadro 19.

Quadro 19 – Faixas de classificação de risco

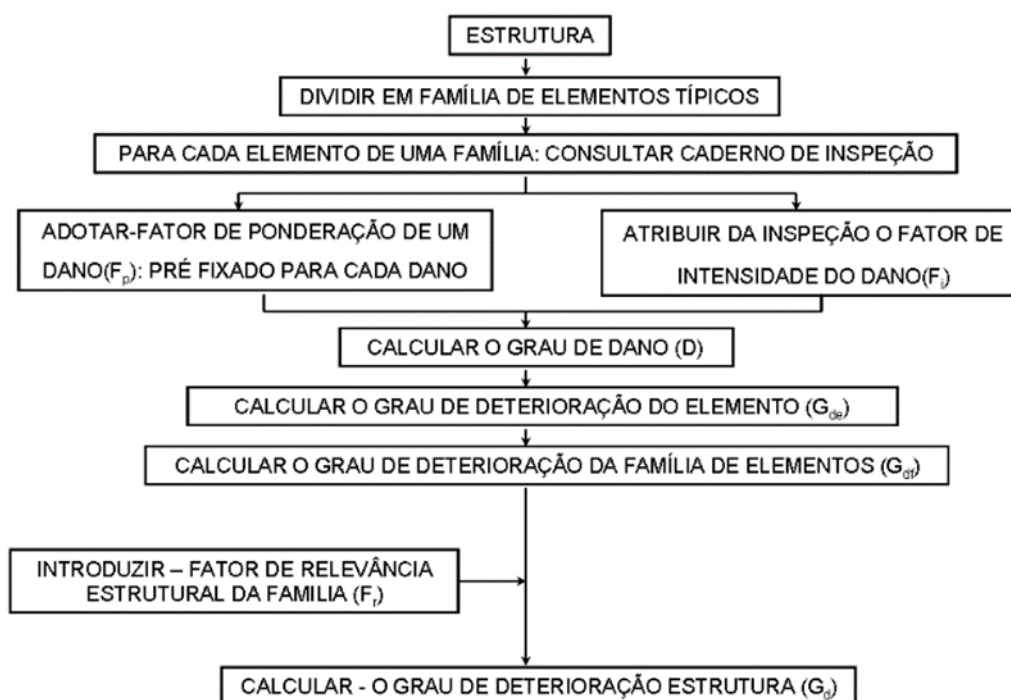
Grau de Risco	
Baixo	0 - 100
Médio	100 - 200
Alto	200 - 300
Crítico	> 300

Fonte: adaptado de Klein *et al.* (1991)

#### 3.4.2.3 Método GDE/UnB

Desenvolvida por Castro (1994), a metodologia GDE/UnB tem como objetivo avaliar quantitativamente as estruturas de concreto armado convencionais. Desde seu desenvolvimento esta já passou por diversas alterações propostas, como as desenvolvidas por Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007). A metodologia desenvolvida por Castro (1994) foi inspirada no modelo apresentado por Klein *et al.* (1991) para obras de arte. A Figura 14 apresenta o fluxograma da metodologia proposta por Boldo (2002).

Figura 14 – Esquema da metodologia GDE/UnB



Fonte: Boldo (2002)

O Fator de Ponderação ( $F_p$ ) varia de 0 a 10 e é definido com base nas consequências que as manifestações patológicas podem apresentar em relação à estética, funcionalidade e estabilidade. Outro fator característico do método GDE/UnB é o Fator de Intensidade ( $F_i$ ) que varia de 0 a 4 de acordo com as lesões do elemento. A classificação segue os mesmos critérios propostos por Klein *et al.* (1991) apresentados no Quadro 19. As Fórmulas 12 e 13 são as propostas por Castro (1994) para determinar o grau de dano:

$$D = 0,4 \cdot F_i \cdot F_p \text{ para } F_i \leq 2 \quad \text{Fórmula 12}$$

$$D = (6 \cdot F_i - 14) \cdot F_p \text{ para } F_i > 2 \quad \text{Fórmula 13}$$

Sendo:

$D$ : grau de dano;

$F_i$ : fator de intensidade;

$F_p$ : fator de ponderação.

Fonseca (2007) propôs alterações relacionadas ao Fator de Ponderação ( $F_p$ ). Segundo o autor a escala de 0 a 10 não se justifica e propõe que a escala de  $F_p$  varie

de 1 a 5. Assim, com esta alteração, a fórmula de Grau de Dano também é modificada. Elas estão apresentadas nas Fórmulas 14 e 15:

$$D = 0,8 \cdot F_i \cdot F_p \text{ para } F_i \leq 2 \quad \text{Fórmula 14}$$

$$D = (12 \cdot F_i - 28) \cdot F_p \text{ para } F_i \geq 3 \quad \text{Fórmula 15}$$

Sendo:

$D$ : grau de dano;

$F_i$ : fator de intensidade;

$F_p$ : fator de ponderação.

O Grau de Deterioração visa quantificar a intensidade do dano apresentado e são apresentados dois graus de deterioração. O primeiro, denominado Grau de Deterioração do Elemento ( $G_{de}$ ), visa avaliar o dano apenas do elemento em questão. A Fórmula 16 é utilizada para cálculo do  $G_{de}$  e leva em consideração o fator de intensidade atribuído a cada manifestação patológica detectada:

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \cdot \left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m D_{(i)} - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m D_{(i)}} \right] \quad \text{Fórmula 16}$$

Sendo:

$D_{m\acute{a}x}$ : maior grau de dano do elemento;

$D_{(i)}$ : grau de dano;

$G_{de}$ : grau de deterioração do elemento.

O Quadro 20 apresenta os níveis para classificação da deterioração do elemento com base nos valores de  $G_{de}$ .



Quadro 20 – Níveis de deterioração do elemento

Nível de deterioração	$G_{de}$	Ações a serem adotadas
Baixo	0-15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15-50	Definir prazo para nova inspeção. Planejar inspeção em médio prazo (máx.2 anos)
Alto	50-80	Definir prazo para nova inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (máx. 1 ano)
Crítico	> 80	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata.

Fonte: Castro (1994)

O outro Grau de Deterioração, proposto por Castro (1994), é o Grau de Deterioração da Família ( $G_{df}$ ) que, diferentemente do valor calculado pela Fórmula 16, avalia a deterioração da família de elementos e não apenas do elemento isolado. Castro (1994) define o  $G_{df}$  como a média aritmética dos graus de deterioração daqueles elementos que apresentam danos expressivos. Boldo(2002) propôs alterações na fórmula apresentada por Castro (1994) para impedir que a existência de muitos elementos em ótimas condições não encubram a ocorrência de um elemento muito danificado. Assim,

Boldo (2002) chega à Fórmula 17, sendo utilizados no cálculo apenas elementos com  $G_{de} \geq 15$ .

$$G_{df} = G_{demáx} \cdot \left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m G_{de(i)} - G_{demáx}}{\sum_{i=1}^m G_{de(i)}} \right] \quad \text{Fórmula 17}$$

Sendo:

$G_{df}$ : grau de deterioração da família;

$G_{demáx}$ : maior grau de deterioração do elemento;

$G_{de(i)}$ : grau de deterioração do elemento "i".

Com base nas equações apresentadas anteriormente é possível calcular o Grau de Deterioração da Estrutura ( $G_d$ ), definido com base no Grau de Deterioração da Família ( $G_{df}$ ) e no Fator de Relevância Estrutural ( $F_r$ ), através da Fórmula 18:

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^K F_{r(i)} \cdot G_{df(i)}}{\sum F_{r(i)}} \quad \text{Fórmula 18}$$

Sendo:

$F_{r(i)}$ : fator de relevância estrutural;

$G_{df(i)}$ : grau de deterioração da família.

O Quadro 21 apresenta os valores do Fator de Relevância Estrutural para cada família de elementos. A partir do valor obtido, é possível classificar a estrutura de acordo com as faixas de classificação apresentadas no Quadro 22 (CASTRO, 1994).

Quadro 21 – Fator de Relevância Estrutural

<b>Fator de Relevância Estrutura (FR)</b>	
Elementos de composição arquitetônica.	1,0
Reservatório superior.	2,0
Escada/rampas, reservatório inferior, cortinas, lajes secundárias, juntas de dilatação.	3,0
Lajes, fundações, vigas secundárias, pilares secundários.	4,0
Vigas e pilares principais.	5,0

Fonte: Fonseca (2007)

Quadro 22 – Níveis de deterioração da estrutura

<b>Nível de deterioração</b>	$G_d$	<b>Ações a serem adotadas</b>
Baixo	0-15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15-40	Definir prazo para nova inspeção. Planejar inspeção em médio prazo (máx.2 anos)
Alto	40-60	Definir prazo para nova inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (máx. 1 ano)
Crítico	> 60	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata.

Fonte: Castro (1994)

A seguir, é apresentada a metodologia da dissertação que detalha as etapas para o desenvolvimento da metodologia de classificação de risco de estruturas extravasoras de cheias baseada nos diversos estudos destacados na revisão bibliográfica do trabalho.

## 4 METODOLOGIA

Esta dissertação está inserida em um projeto de P&D, da carteira da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), intitulado "Estudos de Concreto em Superfícies Hidráulicas". Trata-se de um projeto que envolve Furnas Centrais Elétricas, Foz do Chapecó Energia S.A., DESEK Ltda – Consultoria em Engenharia e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (IPH/UFRGS).

A metodologia do trabalho foi dividida nas seguintes etapas:

- a) descrição das Usinas Hidrelétricas que são objeto desse estudo e apresentação das suas características gerais, dos vertedouros e dos concretos utilizados nas superfícies hidráulicas;
- b) análise das condições de conservação das estruturas de descarga dessas Usinas Hidrelétricas a partir das informações obtidas durante campanha de inspeção das Usinas Hidrelétricas de Furnas Centrais Elétricas;
- c) descrição da elaboração da metodologia de classificação de danos às estruturas hidráulicas submetidas a escoamentos em alta velocidade;
- d) simulação da metodologia de classificação de risco em condições extremas e seu comportamento em condições hipotéticas;
- e) aplicação detalhada da metodologia de classificação de risco nas barragens apresentadas no estudo com base na campanha de inspeção nelas realizada;
- f) análise crítica da metodologia e seu comportamento em condições extremas hipotéticas e comparação entre as classificações realizadas pela metodologia de classificação de risco e as conclusões dos relatórios de produto das campanhas de inspeção das barragens do estudo.

### 4.1 BARRAGENS ESTUDADAS

Nesse item são apresentadas as Usinas Hidrelétricas que foram inspecionadas e que são objeto de análise ao longo de todas as partes subsequentes desse estudo.

As barragens abordadas neste trabalho, como indicado acima, fazem parte do projeto de P&D cooperado entre Furnas Centrais Elétricas e Foz do Chapecó Energia da carteira ANEEL intitulado "Estudos de Concreto em Superfícies Hidráulicas". No projeto, uma equipe técnica acompanhou e realizou inspeções visuais em dez usinas hidrelétricas. As inspeções foram realizadas entre os meses

de setembro e outubro de 2019, por equipe composta por técnicos da Furnas Centrais Elétricas, da DESEK e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Os Quadros 23 a 25 apresentam, respectivamente, as características gerais, dos vertedouros e dos reservatórios das usinas incluídas no estudo.

Quadro 23 – Caracterização geral das usinas

<b>Usina</b>	<b>Cidade/UF</b>	<b>Ano de inauguração</b>	<b>Potência instalada (MW)</b>	<b>Corpo Hídrico</b>	<b>Altura máxima (m)</b>
UHE Furnas	São José da Barra/MG	1963	1.216	Rio Grande	127
UHE Mascarenhas de Moraes	Ibiraci/MG	1957	476	Rio Grande	30
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	Pedregulho/SP	1969	1.050	Rio Grande	92
Usina de Porto Colômbia	Planura/MG	1973	320	Rio Grande	40
UHE Marimbondo	Fronteira/ MG	1975	1440	Rio Grande	94
UHE Anta/Simplício	Três Rios/ RJ	2013	333,7	Rio Paraíba do Sul	29,50
UHE Serra da Mesa	Minaçu/GO	1998	1275	Rio Tocantins	154
UHE Batalha	Paracatu/MG	2014	52,5	Rio São Marcos	50
UHE Serra do Facão	Davinópolis/GO	2010	210	Rio São Marcos	92
UHE Foz do Chapecó	Águas de Chapecó/SC	2010	855	Rio Uruguai	48

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 24 – Características dos vertedouros

Usina	Descarga máxima (m <sup>3</sup> /s)	Número de comportas	Dimensões das comportas (m)	
			Largura	Altura
UHE Furnas	13.000	7	11,5	15,8
UHE Mascarenhas de Moraes (vertedouros: principal/auxiliar)	10.400/3.100	11/2	10,67/12	12,98/16,5
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	13.000	6	11,5	16,5
Usina de Porto Colômbia	16.000	9	15	15,4
UHE Marimbondo	21.400	9	15	18,85
UHE Anta/Simplício	6.800/1.700	3/-	15,00/250*	18,50/-
UHE Serra da Mesa	15.000	5	15	20,4
UHE Batalha	1.648	2	8,7	16,73
UHE Serra do Facão	2.684	2	11,2	15,45
UHE Foz do Chapecó	62.190	15	18,7	20,6

\* do vão

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 25 – Características dos reservatórios

Usina	Área inundada (km <sup>2</sup> )	Volume total (bilhões de m <sup>3</sup> )	Nível máximo	Nível normal de operação	Nível mínimo
UHE Furnas	1.440,0	23,0	769,30	768,00	750,00
UHE Mascarenhas de Moraes	250,0	4,0	666,92	666,12	666,12
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	46,7	1,4	626,30	622,50	618,50
Usina de Porto Colômbia	143	1,5	467,20	467,20	465,50
UHE Marimbondo	438,0	6,1	447,36	446,30	426,00
UHE Anta/Simplício	15,285	0,14095*	253,70	251,50	251,50
UHE Serra da Mesa	1.784,0	54,4	461,50	460,00	417,30
UHE Batalha	145,9	1,8	801,00	800,00	785,00
UHE Serra do Facão	218,8	5,2	756,98	756,00	732,50
UHE Foz do Chapecó	79,9	1,5	266,60	265,00	264,00

Fonte: Costa (2013)

As informações referentes aos concretos, utilizados nas estruturas hidráulicas extravasoras das Usinas estudadas, foram extraídas de relatórios técnicos, plantas de detalhamento construtivo e planilhas enviadas pela equipe técnica de engenheiros de Furnas Centrais Elétricas e Foz do Chapecó Energia. O Quadro 26 apresenta todas as informações coletadas nos arquivos citados anteriormente.

Os acabamentos denominados U3 são referentes à execução com colher de aço. Este tipo de trabalho de alisamento com a colher deve ser efetuado com uma pressão firme para aplainar a textura arenosa da superfície e produzir uma superfície compacta e uniforme sem defeitos e marcas de colher (FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, 1974).

O acabamento denominado F3 aplica-se às superfícies que necessitam de rigorosos alinhamento e uniformidade da superfície, com a finalidade de eliminar os efeitos destrutivos da ação da água. Nestes casos, o acabamento deve ser feito imediatamente após a remoção das fôrmas. As irregularidades das superfícies, quando medidas, não podem exceder o valor de 0,5 centímetros para irregularidades graduais e, as abruptas, devem ser completamente eliminadas (FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, 1974).

Quadro 26 – Características dos concretos empregados nas estruturas hidráulicas de descarga e dissipação de energia

Barragem	Resistência (MPa)	Idade de controle	Tipo de agregado	Fator água/cimento	Máx. agregado (mm)	Aditivos	Classe concreto	Acabamento
UHE Furnas	17,5	28	Quartzito	0,58	152	Sim	Classe B	*
UHE Mascarenhas de Moraes	40	90	*	*	*	*	*	U3**
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	21	28	Quartzito	0,5	76	Sim	Classe B1	*
Usina de Porto Colômbia	21	28	Basalto - Cascalho	0,6	38	Sim	Classe A	*
UHE Marimbondo	18	90	Basalto	0,65	152	Sim	Classe B	*
UHE Anta/Simplício	28 e 30	28 e 90	*	*	*	*	Classe A e B1	F3**
UHE Serra da Mesa	22	28	*	*	*	*	Classe B	U3**
UHE Batalha	20	90	*	0,769	25	*	Classe F	U3**
UHE Serra do Facão	37,6	28	*	0,48	25	*	*	*
UHE Foz do Chapecó	40	28	*	0,59	76	*	*	*

\*informações não encontradas

\*\* informações no texto a seguir

Fonte: elaborado pelo autor

## 4.2 DADOS DA CAMPANHA DE INSPEÇÃO

Nesse tópico são apresentadas as condições de conservação das superfícies hidráulicas, conforme foram verificadas na campanha de inspeção, realizada nas usinas hidrelétricas, e são disponibilizados registros fotográficos.

### **4.2.1 Compilação das manifestações patológicas registradas nas Usinas Hidroelétricas estudadas**

Com a finalidade de facilitar a leitura e apresentar as informações de forma agrupada, as manifestações patológicas encontradas durante as vistorias das usinas estão compiladas, resumidamente, no Quadro 27. Neste quadro, indica-se somente a ocorrência ou não, sem entrar no mérito de quantidades ou intensidades de cada manifestação.



Quadro 27 – Manifestações patológicas identificadas durante a campanha de inspeção

Barragem / Dano	Fissuras	Erosão	Exposição de agregados	Lixiviação	Surgência	Deslocamento	Presença de vegetação	Má vedação da comporta	Outro:
UHE Furnas	-	Sim	Sim	Sim	-	-	-	Sim	-
UHE Mascarenhas de Moraes	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	-
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-	-	Desgaste na junta de concretagem
Usina de Porto Colômbia	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-
UHE Marimbondo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-
UHE Anta/Simplício	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	-	-	Desgaste na junta de concretagem
UHE Serra da Mesa	Sim	-	-	-	-	Sim	-	-	Descontinuidade de superfície
UHE Batalha	Sim	Sim	-	-	-	-	-	-	-
UHE Serra do Facão	Sim	Sim	-	Sim	-	Sim	Sim	Sim	-
UHE Foz do Chapecó	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim	-

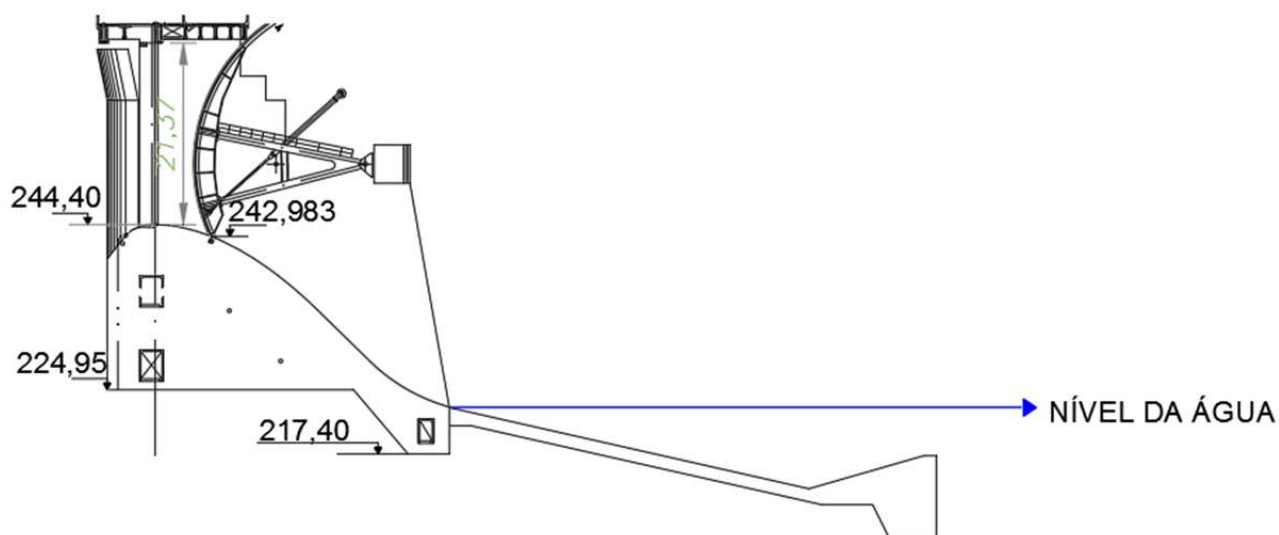
Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Manifestações patológicas registradas na Usina Hidroelétrica Foz do Chapecó

Para exemplificar, com maior detalhamento, são apresentadas as ocorrências verificadas na UHE Foz do Chapecó. Para as demais usinas, as informações são apresentadas no Apêndice A.

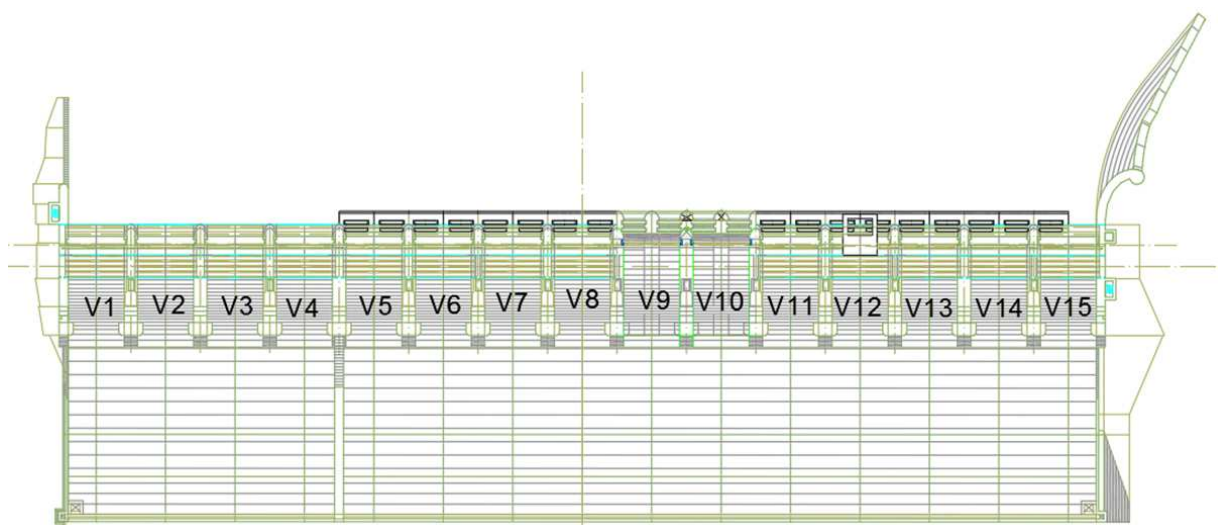
O sistema descarregador da UHE Foz de Chapecó foi vistoriado em 10 de dezembro de 2019. Nas Figuras 15 e 16 são apresentados, respectivamente, para o vertedouro, seu perfil e sua vista em planta. Dentre os danos detectados, destaca-se a exposição de agregados em diversos vãos da estrutura extravasora. Todos os danos detectados na vistoria são apresentados no Quadro 28. Cabe salientar, contudo, que de acordo com a equipe de vistoria, as ocorrências registradas se referem a desgastes naturais em função da operação do vertedouro e não representam risco à estrutura.

Figura 15 – Perfil do vertedouro da UHE Foz do Chapecó



Fonte: Marques *et al.* (2020)

Figura 16 – Vista superior do vertedouro da UHE Foz do Chapecó



Fonte: Marques *et al.* (2020)

Quadro 28 – Danos detectados na vistoria da UHE Foz do Chapecó

Localização: vão	Danos
1	Fissura, lixiviação e exposição de agregados
2	Erosão, deslocamento, fissura e exposição de agregados
3	Erosão e deslocamento
4	Surgência, deslocamento, erosão, exposição de agregado e lixiviação
5	Surgência, exposição de agregado e lixiviação
6	Fissura, lixiviação e descontinuidade de superfície
7	Erosão, deslocamento, surgência e lixiviação
8	Surgência, fissura, deslocamento, erosão, exposição de agregado e lixiviação
9	Surgência, deslocamento, erosão e lixiviação
10	Erosão, deslocamento, lixiviação, surgência, fissura e exposição de agregados
11	Fissura submersa, erosão, surgência e lixiviação
12	Fissura, erosão, exposição de agregado e pedaço de madeira inserido na erosão da calha.
13	Surgência, deslocamento, erosão, descontinuidade de superfície, exposição de agregado e lixiviação
14	Fissura, deslocamento, surgência, lixiviação, erosão e exposição de agregado
15	Deslocamento, erosão e exposição de agregado

Fonte: Marques *et al.* (2020)

Durante a visita técnica, foram identificados problemas de vedação nas comportas de controle em todos os vãos existentes no vertedouro. Deve-se, entretanto, destacar os vãos 2 e 5 que apresentaram os maiores vazamentos, estando ilustrado, para o vão 5, na Figura 17.

Figura 17 – Vazamento na comporta do Vão 5



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Os técnicos da usina informaram que os vãos mais utilizados são os 5 a 8 e que, normalmente, operam por 2 a 3 vezes ao ano. Durante a vistoria técnica não foram observados danos significativos nas superfícies de concreto desses vãos, somente foram identificados os vazamentos nas comportas de controle como citado anteriormente. Na Figura 18, é possível observar uma descontinuidade significativa no alinhamento da superfície de concreto no vão 13.

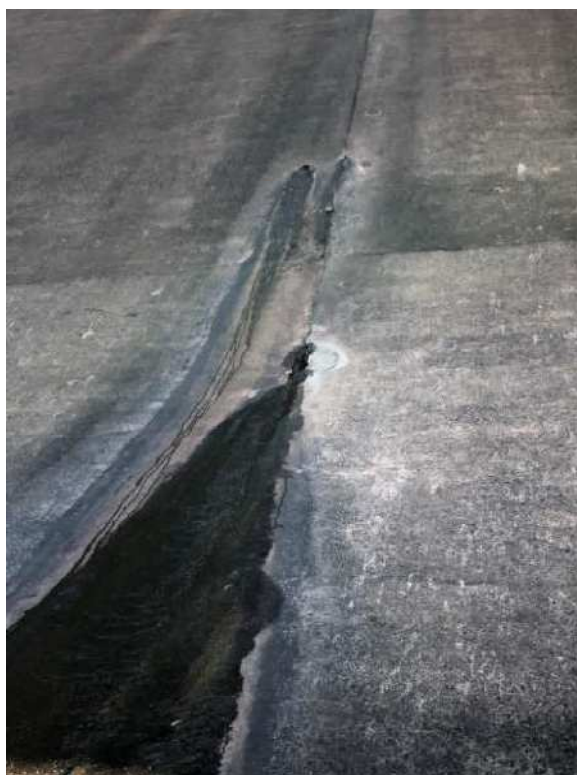
Fissuras longitudinais na calha foram observadas durante a inspeção, sendo que algumas apresentavam cálcio lixiviado na estrutura, como no exemplo da Figura 19. Fissuras com maiores infiltrações e um início do processo de surgência no concreto também foram relatadas.

Figura 18 – Descontinuidade de superfície do vertedouro no vão 13



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 19 – Surgência com lixiviação de hidróxido de cálcio



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Ao longo dos anos foram realizados reparos nas superfícies de concreto dos vertedouros e muros laterais, porém, com o passar do tempo, grande parte destes elementos voltaram a apresentar desgastes e erosões localizadas (MARQUES *et al.*, 2020).

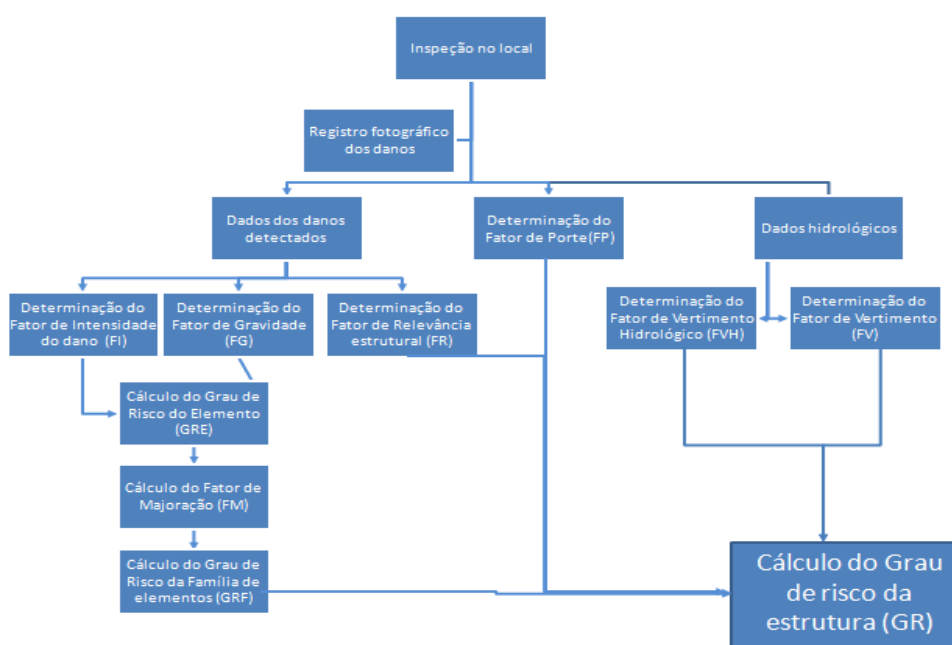
#### 4.3 METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO

Nesse item é apresentada a metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias proposta nesta dissertação. Tal metodologia visa avaliar as condições das estruturas de controle dos barramentos, a partir de inspeção visual realizada em campo, permitindo, em função da condição destas estruturas, a avaliação da necessidade, ou não, de intervenção. A aplicação dessa metodologia de forma sistemática permite, também, acompanhar a evolução das manifestações patológicas, assim como definir a eficiência de possíveis intervenções ou reparos. Tal análise é realizada observando as variações da classificação das estruturas descarregadoras de cheias entre inspeções subsequentes.

Nos itens abaixo, são apresentados diversos parâmetros, definições e formulações utilizados para definir e classificar as estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias de barragens. Usa-se uma escala que varia entre risco muito baixo, baixo, médio, alto e crítico.

Para análise e desenvolvimento da metodologia de classificação foram utilizadas diversas metodologias apresentadas anteriormente neste trabalho. A Figura 20 apresenta o fluxograma da aplicação da metodologia de classificação de risco.

Figura 20 – Fluxograma da aplicação da metodologia



Fonte: elaborada pelo autor

Na metodologia proposta, a estrutura extravasora, como um todo, é subdividida em quatro famílias de elementos e, cada família, é composta por um número de elementos que varia de acordo com a disposição e projeto da usina. Exemplificando: na estrutura extravasora da barragem, exemplos de famílias de elementos são as comportas e acionadores mecânicos. E, finalmente, os elementos são cada uma das comportas e acionadores mecânicos da barragem. O Quadro 29 apresenta as famílias de elementos propostas para a metodologia desenvolvida neste trabalho.

Quadro 29 – Famílias de elementos para classificação de risco

<b>Famílias de elementos</b>	
1	Juntas de dilatação e juntas de concretagem
2	Comportas e acionadores mecânicos
3	Muros laterais e entre vãos
4	Superfícies de concreto (vertedouro e bacia de dissipação)

Fonte: elaborado pelo autor

Definidas as famílias de elementos, cada um destes elementos, que compõe tal família, tem sua classificação realizada individualmente, tendo por base a sua condição na verificação em campo, levando em conta Fatores de Intensidade dos Danos (FI) e Fatores de Gravidade (FG). Isto possibilita o cálculo do Grau de Risco dos Elementos (GRE), do Grau de Risco da Família de elementos (GRF) e, posteriormente, o Grau de Risco da estrutura (GR). Nos itens a seguir, são apresentados diversos parâmetros, definições e formulações utilizados para classificar as estruturas hidráulicas descarregadoras de barragens.

#### 4.3.1 Fator de Intensidade do dano (FI)

O Fator de Intensidade do Dano (FI), é atribuído pelos vistoriadores e leva em consideração a intensidade de cada manifestação patológica encontrada em cada elemento inspecionado, podendo variar de 0 a 4 de acordo com o prescrito no Quadro 30.

Quadro 30 – Fator de Intensidade do dano

<b>Fator de Intensidade do dano (FI)</b>	
0	Elemento sem manifestações patológicas observadas
1	Elemento apresentou manifestações patológicas leves
2	Elemento com manifestações patológicas aceitáveis, estado regular
3	Elemento com manifestações patológicas graves, elemento em condição ruim
4	Elemento em estado crítico, em péssimas condições

Fonte: elaborado pelo autor

A avaliação dos valores de FI também deve levar em consideração a quantidade de ocorrências daquele evento. Caso a estrutura apresente uma manifestação patológica de forma muito recorrente, o valor de FI, atribuído ao elemento, pode ser 1 ponto superior ao valor adotado, mantendo-se dentro do valor limite de FI=4. Sugere-se que, em caso de mais de 70% dos elementos, de determinado tipo na estrutura, apresentarem o mesmo dano, essa regra deve ser aplicada. No caso de estruturas que não apresentarem separação por vãos, como ocorre muitas vezes nas calhas dos vertedouros ou bacias de dissipação, aplica-se a mesma recomendação, mas tendo por base a área da estrutura. Desta forma, caso grande parte da área da estrutura apresente a ocorrência de determinado dano, é recomendável majorar em 1 unidade o valor de FI.

#### **4.3.2 Fator de Gravidade (FG)**

O Fator de Gravidade (FG) considera o grau de comprometimento estrutural ou de desempenho do elemento causado pela manifestação patológica identificada. Para definição dos valores desse fator foram estabelecidos quais os problemas que são considerados mais relevantes para a integridade da estrutura.

Os Fatores de Gravidade foram definidos para cada família de elementos e seus valores podem variar de 1 a 10. Essa avaliação ocorre em função do tipo de elemento componente da família e da manifestação patológica detectada. Todos os parâmetros para essa classificação estão apresentados nos Quadros 31 a 34. Cabe salientar que danos equivalentes podem ser classificados com valores diferentes de Fator de Gravidade, dependendo da família de elementos em que a manifestação patológica for encontrada.



Quadro 31 – Fator de Gravidade da Família de elementos 1: juntas de dilatação de dilatação e de concretagem

<b>Família 1 Juntas de dilatação e de concretagem</b>	
<b>FG</b>	<b>Danos</b>
1	Desalinhamento
2	Surgências / Lixiviação
3	Desplacamento
4	Obstáculos/obstruções
5	Movimentação diferencial
6	Rupturas
7	Presença de vegetação

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 32– Fator de Gravidade da Família de elementos 2: comportas e acionadores mecânicos

<b>Família 2 Comportas e acionadores mecânicos</b>	
<b>FG</b>	<b>Danos</b>
1	Falta de vedação da comporta
2	Descentralização do vão
3	Obstruções que impedem o acionamento

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 33 – Fator de Gravidade da Família de elementos 3: muros laterais e entre vãos

<b>Família 3</b>		<b>Muros laterais e entre vãos</b>
<b>FG</b>	<b>Danos</b>	
1	Fissuras aleatórias	
2	Fissuras com orientação	
3	Surgências / Lixiviação	
4	Obstáculos	
5	Desplacamento	
6	Exposição de agregado	
7	Exposição e corrosão de armadura	
8	Movimentação	
9	Presença de vegetação	

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 34 – Fator de Gravidade da Família de elementos 4: superfícies de concreto (vertedouro e bacia de dissipação)

<b>Família 4</b>		<b>Superfícies de concreto (Vertedouro e Bacia de Dissipação)</b>
<b>FG</b>	<b>Danos</b>	
1	Fissuras aleatórias	
2	Fissuras com orientação	
3	Surgências / Lixiviação	
4	Obstáculos	
5	Desplacamento	
6	Exposição de agregado	
7	Exposição e corrosão de armadura	
8	Movimentação	
9	Irregularidade gradual	
10	Presença de vegetação	

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.3.3 Grau de risco do elemento (GRE)

O Grau de Risco do Elemento visa avaliar a condição de cada item da família de elementos. A classificação dos elementos é efetuada pela avaliação de cada manifestação patológica identificada e lhe é atribuído um valor de FI. Para o cálculo é utilizado o maior valor de FI encontrado para cada tipo de manifestação patológica em todos os elementos da estrutura. Com base nos parâmetros e fatores de classificação apresentados anteriormente é possível calcular o Grau de Risco do Elemento utilizando a Fórmula 19:

$$GRE = \frac{\sum(FG \times FI)}{\sum(FG \times FI_{lim})} \times 100 \quad \text{Fórmula 19}$$

Sendo:

FI: fator de intensidade;

FI<sub>lim</sub>: o máximo fator de intensidade que pode ser atribuído a cada manifestação patológica;

FG: fator de gravidade.

#### 4.3.4 Grau de risco da família de elementos (GRF)

O Grau de Risco da Família de elementos (GRF) visa avaliar a condição da família de elementos com base nas informações coletadas pelos vistoriadores em campo. A Fórmula 20 apresenta a relação que define o cálculo do Grau de Risco de Família de elementos e representa a condição, em conjunto, de todos os elementos da família:

$$GRF = FM \times GRE_i \quad \text{Fórmula 20}$$

Sendo:

GRF: grau de risco da família;

FM: fator de majoração da família de elementos;

GRE<sub>i</sub>: grau de risco do elemento "i".

Para impedir que uma família de elementos, que apresenta uma alta intensidade de danos, tenha seu grau de importância menosprezado no cálculo do Grau de Risco da Estrutura, o Fator de Majoração da Família de elementos (FM) é integrado ao

cálculo do Grau de Risco da Família (GRF). O FM é calculado através das Fórmulas 21 e 22:

$$FM = \frac{d}{D + 1} \text{ se } FM \geq 1 \quad \text{Fórmula 21}$$

$$\text{Quando } FM \leq 1, \text{ adota-se } FM = 1 \quad \text{Fórmula 22}$$

Sendo:

FM: fator de majoração da família de elementos;

$d$ : número de danos que a família pode apresentar;

$D$ : número de danos apresentados pela estrutura ( $FI > 0$ ).

#### 4.3.5 Grau de risco da estrutura (GR)

No cálculo do Grau de Risco da Estrutura, são introduzidos dois fatores relacionados ao seu uso ou operação, no que diz respeito aos vertimentos registrados ao longo da vida útil da estrutura: Fator de Vertimento (FV) e Fator de Vertimento Hidrológico (FVH). Além destes parâmetros hidrológicos, nessa etapa é acrescentado outro que visa diferenciar barragens de portes diferentes: Fator de Porte do empreendimento (FP).

Para a definição dos fatores hidráulicos e hidrológicos foram utilizadas faixas de classificação com o mesmo intervalo, 20% cada classificação, sendo adotados 5 intervalos possíveis com cada um deles. Os fatores apresentados nessa etapa da metodologia tiveram os mesmos valores adotados para seus máximos e mínimos. Tais valores foram adotados com a intenção de garantir que todos os parâmetros tivessem o mesmo nível de influência na metodologia de classificação de risco. O valor máximo para todos os parâmetros foi de 1,2, sendo adotado após simulações de diversos cenários diferentes e análise do comportamento da metodologia.

##### 4.3.5.1 Fator de Vertimento (FV)

O Fator de Vertimento (FV) visa avaliar se a estrutura extravasora apresentou vertimento e com que frequência. O pressuposto aqui é de que quanto mais vezes a estrutura operar, maior a tendência de que sejam verificados desgastes e danos

relacionados a operação em maior grau. A Fórmula 23 é utilizada para determinar o parâmetro de vertimento:

$$V = \frac{DV}{DRD} \times 100 \quad \text{Fórmula 23}$$

Sendo:

V: parâmetro de vertimento;

DV: número de dias de vertimento apresentado pela estrutura;

DRD: número de Dias com Registro de Dados.

Sendo assim, foram estabelecidas faixas de classificação que visam avaliar o percentual de dias que a estrutura apresentou vertimento. Com o valor do parâmetro de vertimento, o Fator de Vertimento (FV), que varia de 1,00 a 1,20, é definido de acordo com os critérios apresentados no Quadro 35.

Quadro 35 – Fator de Vertimento

Fator de Vertimento (FV)	
1,00	$0 < V \leq 20\%$
1,05	$20\% < V \leq 40\%$
1,10	$40\% < V \leq 60\%$
1,15	$60\% < V \leq 80\%$
1,20	$V > 80\%$

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.3.5.2 Fator de Vertimento Hidrológico (FVH)

O Fator de Vertimento Hidrológico (FVH) está atrelado ao vertimento máximo que ocorreu na estrutura em relação à vazão de projeto do vertedouro. Considerando-se que barragens que tiverem vertimentos de pequenas vazões tendem a apresentar menores problemas relacionados a danos nas estruturas extravasoras. Desta forma, o parâmetro FVH visa diferenciar as barragens com grandes vertimentos daquelas que passaram apenas por vertimentos menores. Tal análise é quantificada através do cálculo do vertimento hidrológico (Fórmula 24):

$$VH = \frac{Q_{\text{máx vertida}}}{Q_{\text{projeto}}} \times 100$$

Fórmula 24

Sendo:

VH: vertimento hidrológico;

$Q_{\text{máx vertida}}$ : máxima vazão vertida;

$Q_{\text{projeto}}$ : vazão de projeto do vertedouro.

Com base nos valores calculados para o vertimento hidrológico, determina-se o valor do FVH de acordo com as faixas de classificação apresentadas no Quadro 36.

Quadro 36 – Fator de Vertimento Hidrológico

Fator de Vertimento Hidrológico (FVH)	
1,00	$VH \leq 20\%$
1,05	$20\% < VH \leq 40\%$
1,10	$40\% < VH \leq 60\%$
1,15	$60\% < VH \leq 80\%$
1,20	$VH > 80\%$

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.3.5.3 Fator de Porte do Empreendimento (FP)

O Fator de Porte do empreendimento (FP) visa diferenciar as barragens que tenham portes diferentes. Sabe-se que, normalmente, barragens de maior porte tendem a apresentar maiores impactos, em caso de colapso ou paralisação da sua operação. Sendo assim, quanto maior o porte do empreendimento maior deve ser a atenção durante a realização de inspeções. As barragens podem ser classificadas através do Fator X apresentado anteriormente.

Inicialmente o Fator X apresenta três grandes grupos para definir o porte dos empreendimentos, conforme já apresentado no Quadro 1. Entretanto, é possível observar que o grupo de grandes barragens apresenta uma grande variabilidade na relação entre suas dimensões. Por exemplo: uma barragem com 9 metros de altura e volume de reservatório igual a 153 hm<sup>3</sup> apresenta um Fator X igual a 1.002 o que a

classifica como uma barragem de grande porte. Por outro lado, se a barragem tem 100 metros de altura e reservatório de 10.000 hm<sup>3</sup>, esta tem Fator X igual a 1.000.000 o que a classifica, também, como barragem de grande porte. Levando em consideração a diferença do porte entre empreendimentos que fazem parte do grupo de grandes barragens, foi constatada a necessidade da criação de subgrupos. Então as barragens de porte grande foram divididas em três subgrupos, apresentados no Quadro 37, ainda tendo o Fator X (Fórmula 1) como parâmetro principal.

Quadro 37 – Valores do Fator de Porte

<b>Porte</b>	<b>Fator X</b>	<b>FP</b>
Pequeno	$\leq 400$	1,00
Médio	$400 < X \leq 1.000$	1,05
Grande	$1.000 < X \leq 100.000$	1,10
Grande	$100.000 < X \leq 1.000.000$	1,15
Grande	$X > 1.000.000$	1,20

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.3.5.4 Grau de Risco da estrutura (GR)

Com base nos valores calculados no Grau de Risco da Família de elementos (GRF), é possível definir o Grau de Risco da estrutura (GR), incorporando o Fator de Relevância estrutural do elemento (FR), que varia de 1 a 4. Com isto se estabelece uma relação entre os elementos que apresentam uma maior relevância no desempenho da estrutura (Quadro 38).

Quadro 38 – Fator de Relevância estrutural

<b>Fator de Relevância estrutural (FR)</b>	
1	Juntas de dilatação e concretagem
2	Comportas e acionadores mecânicos
3	Muros laterais e entre vãos
4	Superfícies de concreto (vertedouro e bacia)

Fonte: elaborado pelo autor

Caso a barragem não apresente, na sua composição, algum dos elementos descritos no Quadro 38, o FR que deve ser atribuído ao grupo é igual a zero. Por exemplo, caso a barragem seja de soleira livre, e, portanto, sem a presença de

comportas, o FR do grupo deixará de ser igual a 2 (valor típico para o grupo relativo a comportas e acionadores mecânicos) e atribuir-se-á o valor zero.

A fórmula para cálculo do Grau de Risco da estrutura (GR) está apresentada na Fórmula 25:

$$GR = \frac{\sum_{i=1}^k FR_i \times GRF}{\sum_{i=1}^k FR_i} \times FVH \times FV \times FP \quad \text{Fórmula 25}$$

Sendo:

*GR*: grau de risco da estrutura.

*FR*: fator de relevância estrutural;

*GRF*: grau de risco de família;

*FVH*: fator de vertimento hidrológico;

*FV*: fator de vertimento;

*FP*: fator de porte;

Por fim, e com base nos valores obtidos no cálculo do Grau de Risco da estrutura, as barragens podem ser classificadas de acordo com as faixas apresentadas no Quadro 39.

Quadro 39 – Faixas de classificação de risco da estrutura

Classificação		Descrição
Muito baixo	GR <20	Sem danos significativos: necessita apenas realização de manutenção preventiva
Baixo	20 ≤ GR < 40	Pequenos danos que podem afetar a estrutura a longo prazo: os locais deteriorados devem ser reparados durante os trabalhos de manutenção regular
Médio	40 ≤ GR <60	Pode ocasionar redução na funcionalidade e durabilidade da estrutura: sendo necessário realizar reparos num curto período de tempo
Alto	60 ≤ GR <80	Deterioração elevada: reparos imediatos são necessários para garantir a funcionalidade e durabilidade da estrutura
Crítico	GR ≥ 80	Deterioração muito elevada: necessita reparos imediatos e deve ser avaliada a necessidade de limitação de uso com redução da carga operacional

Fonte: elaborado pelo autor



Como é possível observar no Quadro acima, foram adotadas 5 faixas de classificação de risco possíveis. As faixas de classificação determinam o grau de classificação de risco das estruturas descarregadoras de cheias e as ações a serem tomadas em função da classificação de risco apresentada. As classificações de risco muito baixo e baixo representam cenários de estruturas com poucos danos, enquanto as classificações de risco alto e crítico representam cenários muitos danos.

A metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias proposta neste trabalho classifica as estruturas nos 5 grupos apresentados anteriormente, tal classificação é obtida através de inspeções de campo realizadas nas estruturas em questão. Visando esclarecer dúvidas e auxiliar na aplicação da metodologia em outras barragens, o Apêndice C deste trabalho apresenta um roteiro típico de inspeção para estruturas descarregadoras de cheias ressaltando alguns cuidados e recomendações .

## **5 RESULTADOS**

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta e detalhada no capítulo anterior. Inicialmente, foram considerados alguns cenários hipotéticos visando identificar condições de conservação possíveis numa estrutura hidráulica extravasora. Posteriormente, foi feita a aplicação, considerando-se os dados das estruturas extravasoras de cheias, das usinas hidrelétricas que fazem parte desse estudo. Entretanto, para o caso da UHE Foz do Chapecó, apresenta-se a sua classificação e, detalhadamente, todos os danos observados na campanha de inspeção realizada na mesma. Para as demais usinas hidrelétricas do estudo, os respectivos valores de classificação estão detalhados no Apêndice B.

Cabe lembrar que a classificação das estruturas extravasoras das UHEs, aqui apresentada, é baseada nos relatórios de campanhas de inspeção, conforme registrado nas seguintes notas técnicas de inspeção em UHEs:

- a) Parte 01/05: inspeção das usinas de Furnas, Mascarenhas de Moraes, Luiz Carlos Barreto de Carvalho, Porto Colômbia e Marimbondo (MARQUES; ABREU, 2021a);

- b) Parte 02/05: inspeção das usinas de Batalha e Serra do Facão (MARQUES; ABREU, 2021b);
- c) Parte 03/05: inspeção da usina Serra da Mesa (MARQUES; ABREU, 2021c);
- d) Parte 04/05: inspeção da usina Foz do Chapecó (MARQUES; ABREU, 2021d);
- e) Parte 05/05: inspeção das usinas de Simplício (Barragem de Anta) e Funil (MARQUES; ABREU, 2021e).

## 5.1 COMPORTAMENTO DA METODOLOGIA: CONDIÇÕES HIPOTÉTICAS

Neste item, são consideradas, como afirmado acima, condições hipotéticas previsíveis de ocorrência em estruturas hidráulicas. Considerando-se os princípios da metodologia proposta, são apresentados os resultados alcançados com sua aplicação.

Caso a estrutura não apresentasse danos, todos os valores de Fator de Intensidade seriam iguais a 0 (condição 1). Assim, na metodologia, todos os demais parâmetros seriam iguais a 0 e, conseqüentemente, o Grau de Risco também seria nulo: situação hipotética que representa uma estrutura absolutamente íntegra.

Caso a estrutura apresentasse todos os danos com intensidade média, ou seja, com Fator de Intensidade  $FI=2$ , todas as famílias apresentariam Grau de Risco do Elemento (GRE) e Grau de Risco da Família de elementos (GRF) iguais a 50: exatamente o valor médio entre os possíveis valores desses parâmetros que variam de 0 a 100. Neste cenário, os parâmetros hidrológicos (FV e FVH) e de porte (FP), também seriam considerados com seus valores médios, ou seja, equivalentes a 1,1. Sendo assim, o Grau de Risco da estrutura (GR) seria igual a 66,6 e este valor corresponderia a uma estrutura classificada com dano alto (condição 2).

Outro cenário que pode ser avaliado, é se a estrutura apresentasse todos os danos em seus valores máximos, ou seja, todos os danos de todas as famílias iriam apresentar Fator de Intensidade  $FI=4$ . Nesta condição, todas as famílias apresentariam Grau de Risco do Elemento (GRE) e Grau de Risco da Família (GRF) igual a 100. Para determinação do Grau de Risco da estrutura (GR), nestas condições, pela metodologia proposta, ainda se deveria considerar mais três parâmetros: Fator de Vertimento (FV), Fator de Vertimento Hidrológico (FVH) e Fator

de Porte (FP). Caso todos esses parâmetros apresentassem seus valores mínimos (1,0), a estrutura resultaria com Grau de Risco igual a 100 (condição 3). Caso os parâmetros apresentem seus valores intermediários (1,1), a estrutura resultaria com Grau de Risco igual a 133,1 (condição 4). Por outro lado, se todos os parâmetros apresentassem seus valores máximos, a estrutura resultaria com Grau de Risco igual a 172,8 (condição 5). Com base na metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias desenvolvida neste trabalho, este é o maior valor possível para Grau de Risco de uma estrutura,

Vale ressaltar, que para que isso ocorresse seria preciso uma combinação absolutamente improvável de fatores, ou seja, ocorrência de: todos os danos em seus valores máximos, numa barragem de grande porte e com todos seus parâmetros hidráulicos e hidrológicos em seus valores máximos (vertendo mais de 80% do tempo e ter ocorrido vertimento com vazão superior a 80% da vazão de projeto do vertedouro). Além disso, a evolução dos danos deixaria essa condição ainda mais improvável. Por exemplo: a ocorrência de deslocamentos poderiam evoluir, de tal maneira, que resultaria na exposição de agregados ou, até mesmo, da armadura. Sendo assim, é extremamente improvável que todos esses danos pudessem atingir seus valores máximos em uma mesma estrutura.

Ao mesmo tempo, que a metodologia pode tratar os dados para casos máximos extremos, como o do citado anteriormente, gerando um resultado coerente com a situação, é de vital importância que ela tenha sensibilidade para que seus resultados possam traduzir, adequadamente, a ocorrência de poucos danos, mas que tenham intensidades elevadas. Portanto, o resultado deve representar um valor condizente com a intensidade da manifestação patológica observada. Sendo assim, um outro cenário que poderia ser avaliado é o do caso de se ter cada família apresentando apenas um dano intermediário, mas com sua intensidade máxima. O Quadro 40 apresenta os valores do Grau de Risco da Família (GRF), para todas as famílias nessa condição, sendo que foram considerados  $FI = 4$  para os seguintes danos: obstáculos (Família 1), descentralização do vão (Família 2), deslocamentos (Família 3) e exposição de agregados (Família 4). Assim, para os danos mencionados anteriormente, foi atribuído o FI máximo e, para todos os outros,  $FI = 0$ . Para os parâmetros hidráulicos, hidrológicos e de porte da estrutura foram

adotados valores médios (1,1). Considerando este conjunto de valores, a estrutura resultaria com GR= 69,0: Grau de Risco alto (condição 6).

Quadro 40 – Grau de Risco para caso hipotético com danos intermediários

<b>Grau de Risco – GR</b>			
<b>Família de elementos:</b>	<b>GRF</b>	<b>FR</b>	<b>GRF X FR</b>
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	50,0	1	50,0
2 - Comportas, acionadores mecânicos	50,0	2	100,0
3 - Muros laterais e entre vãos	50,0	3	150,0
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	54,5	4	218,2
		<b>FVH</b>	1,1
		<b>FV</b>	1,1
		<b>FP</b>	1,1
		<b>GR</b>	<b>69,0</b>

Fonte: elaborado pelo autor

Caso os mesmos danos do cenário 6, apresentado anteriormente, ocorressem em barragem de grande porte (FP=1,2) ou de pequeno porte (FP=1,0) os valores da classificação de risco seriam de 75,2 e 62,7, respectivamente. Em todas as situações a classificação de risco seria equivalente a Grau de risco alto. Para que a condição apresentada evoluísse para um Grau de risco crítico, seria necessário que algum dos demais parâmetros da metodologia apresentassem seu valor máximo (FV ou FVH), além do Fator de Porte seguir apresentando seu valor máximo (1,2). Por outro lado, para a classificação de risco passar de grau de risco alto para médio, seria necessário que além do Fator de porte fosse igual a 1,0, um dos demais parâmetros da metodologia (FV ou FVH) também fossem igual a 1,0.

Poderia ser avaliado, também, um cenário em que um único dano, com intensidade máxima, pudesse colocar em risco a segurança de toda a estrutura. Da mesma forma, é fundamental que resultado obtido com a aplicação da metodologia tivesse sensibilidade para representar essa ocorrência de um dano em elevada intensidade. Um exemplo dessa condição seria o da identificação, na estrutura, da presença de vegetação, representando um FI máximo na Família 4. Nesta situação, resultaria para a estrutura um GR = 62,8, ou seja, Grau de Risco alto. O Quadro 41 apresenta os valores de GRF e de GR para a condição mencionada (condição 7).

Quadro 41 – Grau de Risco para caso hipotético com um único dano elevado

Grau de Risco – GR			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	0,0	1	0,0
2 - Comportas, acionadores mecânicos	0,0	2	0,0
3 - Muros laterais e entre vãos	0,0	3	0,0
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	90,9	4	363,6
		<b>FVH</b>	1,2
		<b>FV</b>	1,2
		<b>FP</b>	1,2
		<b>GR</b>	<b>62,8</b>

Fonte: elaborado pelo autor

Considerando o mesmo cenário apresentado na condição 7, porém alterando apenas o porte do barramento para porte médio (FP=1,05) e porte pequeno (FP=1,0), a classificação de risco do barramento passaria para Grau de risco médio com valores iguais a 55,0 e 52,4 respectivamente. Além disso, seria possível que no mesmo cenário da condição 7 a estrutura apresentasse grau de risco baixo, para isso seria necessário que todos os parâmetros da metodologia tivessem seus valores mínimos (1,0) com apenas um dos parâmetros apresentando valor de no máximo 1,1. Nessa situação o Grau de risco seria equivalente a 39,9.

Na Figura 21 é possível observar todas as condições simuladas nos cenários hipotéticos em uma escala de cores onde é observada a classificação de risco de cada um dos cenários. Como já mencionado, as condições 1 e 5 representam, respectivamente, o menor e o maior valor possível para a metodologia de classificação de risco proposta.

Figura 21 – Condições extremas hipotéticas simuladas

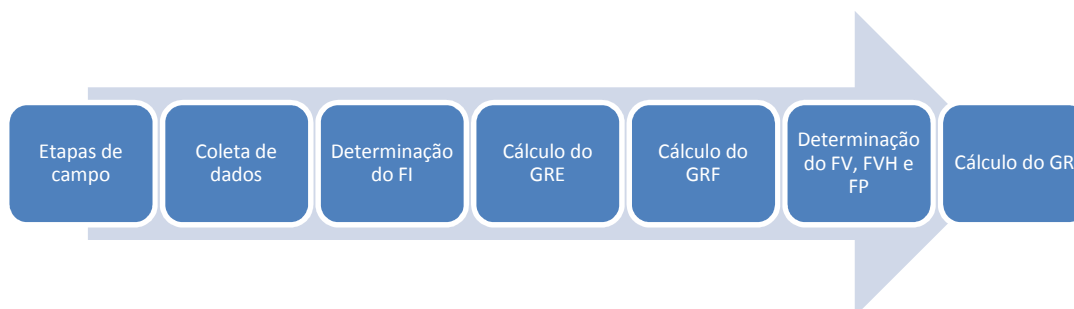


Fonte: elaborada pelo autor

## 5.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA: UHE FOZ DO CHAPECÓ

Neste tópico é apresentada a aplicação da metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas extravasoras de cheias com base nos registros da campanha de inspeção na UHE Foz do Chapecó. Para facilitar e auxiliar a aplicação da metodologia foram confeccionados quadros que são apresentadas nos tópicos a seguir. Esquemáticamente a Figura 21 apresenta as etapas envolvidas na aplicação da classificação de risco.

Figura 22 – Etapas de aplicação da metodologia



Fonte: elaborada pelo autor

### 5.2.1 Cálculo do Grau de Risco: Famílias

Seguindo o que está representado na Figura 21, para o cálculo do Grau de Risco da estrutura (GR), deve-se, primeiramente, calcular o Grau de Risco da Família. Assim, para facilitar a compreensão da metodologia proposta, a classificação foi subdividida em tópicos para cada família de elementos.

#### 5.2.1.1 Juntas de dilatação e concretagem

Na Família 1, juntas de dilatação e de concretagem, foi observada a ocorrência de dois dos sete danos possíveis: nos vãos 8 e 13. No vão 8, registrou-se descontinuidades das juntas de concretagem do muro lateral da calha do vertedouro (Figura 23). Além dos desalinhamentos, na mesma Figura, é possível observar a ocorrência de fissuras, na calha do vertedouro, com provável origem nas variações de temperatura. As fissuras observadas na calha do vertedouro foram consideradas na Família 4 (superfícies de concreto). O vão 13 apresentou, também, a ocorrência de descontinuidades, mas na região de encontro entre o muro e a calha do vertedouro (Figura 24). Em função dessas duas ocorrências foi atribuído o valor 1 (um) de Fator de Intensidade para desalinhamentos.

Nas Figuras 25 e 26, referentes aos vãos 11 e 13, respectivamente, foram observadas as ocorrências de surgências com lixiviação de hidróxido de cálcio nas regiões próximas as juntas de concretagem. O Fator de Intensidade atribuído às surgências e lixiviações foi de 1 (um).

Figura 23 – Descontinuidade das juntas de concretagem no muro lateral e fissuras na calha do vertedouro



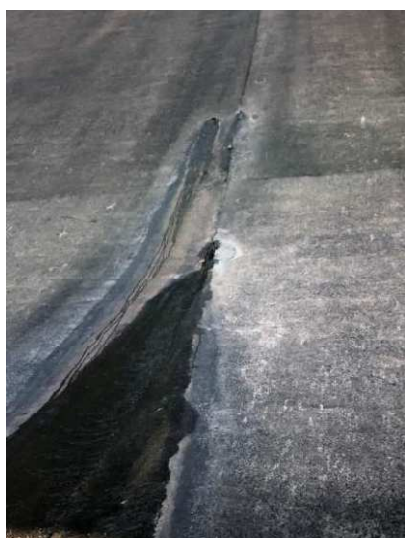
Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 24 - Desalinhamento da superfície do vertedouro na região de encontro entre calha e muro



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 25 – Surgências com lixiviação de hidróxido de cálcio: vão 11



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 26 – Surgências com lixiviação de hidróxido de cálcio: vão 13



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Com os valores atribuídos aos danos registrados e apresentada a sua justificativa, o Quadro 42 foi consolidado para os dados da Família 1, citando os vãos de ocorrência de danos.

Quadro 42 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 1

Danos / Família 1	Juntas de dilatação e juntas de concretagem															
	Vãos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Desalinhamento	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
Surgências / lixiviação	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Desplacamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Obstáculos/obstruções	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Movimentação diferencial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rupturas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Presença de vegetação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor

Para apresentação do cálculo do Grau de Risco da Família, são apresentados os valores a serem considerados, para a Família 1, no Quadro 43. Em primeiro lugar, define-se o  $FI_{máx}$ , utilizado o maior valor observado para o dano em questão. Posteriormente, é necessário verificar a necessidade ou não da majoração do dano observado: a majoração é aplicada quando mais de 70% dos vãos da estrutura apresentam o dano que está sendo avaliado. Por fim, a coluna FI apresenta o valor final do Fator de Intensidade utilizado para o cálculo do Grau de Risco da família. Baseado nas equações apresentadas, foram calculados os parâmetros: Fator de Majoração (FM), Grau de Risco da Estrutura (GRE) e Grau de Risco da Família (GRF). Portanto, a Família 1: juntas de dilatação e juntas de concretagem apresentou GRF = 6,2.



Quadro 43 – Grau de Risco da Família 1

Danos / Família 1	Juntas de dilatação e juntas de concretagem					
Fatores	FG	$FI_{máx}$	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Desalinhamento	1	1	N	1	1	4
Surgências / lixiviação	2	1	N	1	2	8
Desplacamentos	3	0	N	0	0	12
Obstáculos/obstruções	4	0	N	0	0	16
Movimentação diferencial	5	0	N	0	0	20
Rupturas	6	0	N	0	0	24
Presença de vegetação	7	0	N	0	0	28
					d	7
					D	2
					FM	2,3
					GRE	2,7
					<b>GRF</b>	<b>6,2</b>

Fonte: elaborado pelo autor

### 5.2.1.2 Comportas e acionadores mecânicos

Nas comportas e acionadores mecânicos (Família 2), foi identificada a ocorrência de uma das três manifestações patológicas possíveis: falta de vedação das comportas. O problema foi registrado em todos os quinze vãos do vertedouro. As Figuras 27 e 28, apresentam, respectivamente, os vãos 2 e 5 nos quais se detectou, de forma mais acentuada, esta ocorrência. Frente a essa incidência dos problemas, o FI atribuído aos danos observados, nos vãos 2 e 5, seria de 2. Considerando-se a recorrência dos danos em todos os vão do vertedouro, o FI adotado foi majorado em uma unidade, sendo atribuído o valor 3. Deve-se registrar que o valor limite de FI é 4.

Figura 27 – Vazamento em função da falta de vedação das comportas: vão 2



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 28 – Vazamento em função da falta de vedação das comportas: vão 5



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

O Quadro 44 apresenta, para cada um dos vãos, o número de danos observados da Família 2.

Quadro 44 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 2

Danos / Família 2	Comportas e acionadores mecânicos															
	Vãos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Falta de vedação de comporta	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Descentralização do vão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Obstruções que impedem o acionamento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor

Com base nas informações e valores mencionados, foram calculados os parâmetros FM, GRE e GRF. Como é apresentado no Quadro 45, a Família 2: comportas e acionadores mecânicas apresentou GRF = 18,8.

Quadro 45 – Grau de Risco da Família 2

Danos/ Família 2	Comportas e acionadores mecânicos						
	Fatores	FG	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Falta de vedação de comporta	1	2	S	3	3	4	
Descentralização do vão	2	0	N	0	0	8	
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	N	0	0	12	
					D	3	
					D	1	
					FM	1,5	
					GRE	12,5	
					<b>GRF</b>	<b>18,8</b>	

Fonte: elaborado pelo autor

### 5.2.1.3 Muros laterais e entre vãos

Nos muros laterais e entre vãos (Família 3), foram identificados dois tipos de danos: fissuras com orientação e exposição de agregados. Esses danos são ilustrados na Figura 29, na qual é possível observar exemplo de fissuras longitudinais ao plano de concretagem (indicadas pela seta) e a ocorrência de erosão cuja evolução culminou na exposição de agregado. Para as fissuras o FI adotado foi de 1. No caso da erosão com exposição de agregado também foi atribuído FI = 1.

O Quadro 46 apresenta os valores de todos os danos observados, por vão, na Família 3.

Figura 29 – Fissuras com orientação e exposição de agregados: vão 15



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Quadro 46 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 3

Danos / Família 3	Muros laterais e entre vãos														
Vãos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fissuras aleatórias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fissuras com orientação	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
Surgências / lixiviação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Obstáculos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Deslocamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exposição de agregados	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Exposição ou corrosão da armadura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Movimentação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Presença de vegetação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor

O Quadro 47 apresenta os valores calculados para GRE, FM e GRF, em função dos valores de FI, atribuídos aos danos identificados na Família 3. Resultou num GRF = 13,2 para muros laterais e entre vãos.

Quadro 47 – Grau de Risco da Família 3

Danos/ Família 3	Muros laterais e entre vãos					
Fatores	FG	$FI_{máx}$	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	0	N	0	0	4
Fissuras com orientação	2	1	N	1	2	8
Surgências / lixiviação	3	0	N	0	0	12
Obstáculos	4	0	N	0	0	16
Deslocamentos	5	0	N	0	0	20
Exposição de agregados	6	1	N	1	6	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	N	0	0	32
Presença de vegetação	9	0	N	0	0	36
					D	9
					D	2
					FM	3,0
					GRE	4,4
					<b>GRF</b>	<b>13,2</b>

Fonte: elaborado pelo autor

#### 5.2.1.4 Superfícies de concreto

A Família 4 foi a que apresentou a maior quantidade de manifestações patológicas. Das dez formas possíveis, foram registradas manifestações patológicas de cinco tipos. A Figura 30, relativa ao vão 6, apresenta dois dos quatro tipos de danos. No centro da calha, é possível observar a presença de hidróxido de cálcio lixiviado (detalhe em amarelo). O outro dano observado nesta mesma imagem são fissuras possivelmente de origem térmica (setas). Para as fissuras foi atribuído  $FI = 1$ , da mesma forma que foi atribuído para a lixiviação. O detalhe apresentado na Figura 31 exhibe uma região próxima ao final da calha do vertedouro (vão 8) onde se visualiza o desgaste do concreto que resultou na exposição de agregado.

Figura 30 – Presença de hidróxido de cálcio lixiviado e fissuras: vão 6



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 31 – Exposição de agregados: vão 8



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

No vão 12 do vertedouro, foi constatada a ocorrência de erosão com deslocamento que acabou revelando um obstáculo de madeira fixado na calha do vertedouro que, possivelmente, é oriundo das fôrmas utilizadas durante a concretagem da estrutura (Figura 32). A exposição de agregados foi atribuído  $FI$  igual a 1 (um).

No vão 13, foi observada descontinuidade da superfície de concreto do vertedouro (Figura 33). Esta manifestação patológica é, possivelmente, oriunda de recalques nas juntas do concreto. Para este evento de irregularidade, foi atribuído FI = 1.

Figuras 32 e 33 – Deslocamento com exposição de agregados: vão 12



Fonte: Marques e Abreu (2021d).



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

Figura 34 – Descontinuidade na superfície do concreto: vão 13



Fonte: Marques e Abreu (2021d).

No Quadro 48, apresenta-se os valores de todos os danos observados por vão na Família 4. No Quadro 49, os valores calculados de todos os outros parâmetros referentes a Família 4, estão registrados. Com base o quadro é possível observar que, para Família 4, o GRF = 18,5.

Quadro 48 – Danos nos vãos da UHE Foz do Chapecó – Família 4

Danos/Família 4	Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)															
	Vãos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fissuras aleatórias		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fissuras com orientação		1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
Surgências / lixiviação		0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
Obstáculos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Deslocamentos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exposição de agregados		0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
Exposição ou corrosão da armadura		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Movimentação		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Irregularidade gradual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Presença de vegetação		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 49 – Grau de Risco da Família 4

Danos/Família 4		Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)				
Danos	FG	$FI_{máx}$	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	0	N	0	0	4
Fissuras com orientação	2	1	N	1	2	8
Surgências / lixiviação	3	1	N	1	3	12
Obstáculos	4	1	N	1	4	16
Desplacamentos	5	0	N	0	0	20
Exposição de agregados	6	1	N	1	6	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	N	0	0	32
Irregularidade gradual	9	1	N	1	9	36
Presença de vegetação	10	0	N	0	0	40
					D	10
					D	5
					FM	1,7
					GRE	10,9
					<b>GRF</b>	<b>18,5</b>

Fonte: elaborado pelo autor

### 5.2.2 Cálculo do Grau de Risco: Estrutura

A partir dos parâmetros determinados para cada uma das Famílias, é possível calcular o Grau de Risco da Estrutura (GR). Para isso, é necessário determinar outros três fatores: Vertimento (FV), Vertimento Hidrológico (FVH) e o de Porte (FP). No caso da UHE Foz do Chapecó, o valor de FV = 1,2 pois a relação de dias de vertimento e de registro de dados é igual a 99,85%. Adotou-se FVH = 1,10, pois a máxima vazão vertida pela UHE Foz do Chapecó é relativa a 48% da vazão de projeto. O Fator de Porte, por sua vez, dadas as características de altura da barragem e volume do reservatório, foi estipulado como FP = 1,1.

Desta forma, com base nas Faixas de Classificação da metodologia proposta, o valor GR = 22,9 é consistente com uma classificação de risco baixo para as estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias da UHE Foz do Chapecó (Quadro 50).



Quadro 50 – Grau de Risco da Estrutura

<b>Grau de Risco da estrutura – GR</b>			
<b>Família de elementos:</b>	<b>GRF</b>	<b>FR</b>	<b>GRF X FR</b>
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	6,2	1	6,2
2 - Comportas, acionadores mecânicos	18,8	2	37,6
3 - Muros laterais e entre vãos	13,2	3	39,6
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	18,5	4	74,0
		<b>FVH</b>	1,1
		<b>FV</b>	1,2
		<b>FP</b>	1,1
		<b>GR</b>	<b>22,9</b>

Fonte: elaborado pelo autor

### 5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Neste tópico, são apresentados os parâmetros utilizados e os resultados da aplicação da metodologia de classificação de risco nas onze barragens brasileiras objeto do estudo. Além da apresentação dos valores, foi realizada uma análise qualitativa destes resultados.

O Quadro 51 apresenta os valores dos parâmetros hidrológicos FV e FVH para todas as barragens que fizeram parte deste trabalho. Para a maioria das barragens, seis das onze estruturas (aqui, são consideradas onze estruturas porque da UHE Simplício/Anta, foram considerados em separados os vertedouros principal e em degraus), FVH = 1,05. Uma única barragem, frente a seus dados hidrológicos, apresentou valor superior a 1,05 para FVH: UHE Foz do Chapecó. Isto, particularmente acontece em função da relação entre as vazões máxima vertida e de projeto do vertedouro ter sido equivalente a 48,04%, o que gera um FVH = 1,1.

O vertedouro em degraus da barragem de Simplício/Anta, em função da ausência de registros dos dias em que houve vertimento, ou mesmo dos valores de vazões vertidas, foram adotados para essa estrutura os maiores valores possíveis para os parâmetros FV e FVH.

No caso do parâmetro FV, para seis das onze barragens, o seu valor correspondeu ao mínimo (1,0). Duas barragens apresentaram o valor máximo (FV = 1,2): a UHE Foz do Chapecó e o vertedouro de comportas da UHE Simplício/Anta.

Quadro 51 – Parâmetros hidrológicos das barragens estudadas

<b>Usina</b>	<b>Q máx/Q proj</b>	<b>FVH</b>	<b>DDV/TDR</b>	<b>FV</b>
UHE Serra do Facão	11,18%	1,00	76,62%	1,15
UHE Serra da Mesa	6,35%	1,00	6,05%	1,00
UHE Porto Colômbia	35,63%	1,05	16,51%	1,00
UHE Mascarenhas de Moraes	37,64%	1,05	15,88%	1,00
UHE Marimbondo	38,17%	1,05	14,98%	1,00
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	31,78%	1,05	8,68%	1,00
UHE Furnas	29,23%	1,05	13,65%	1,00
UHE Foz do Chapecó	48,04%	1,10	99,85%	1,20
UHE Batalha	18,33%	1,00	23,82%	1,05
UHE Simplício/Anta (principal)	30,75%	1,05	92,13%	1,20
UHE Simplício/Anta (degraus)	-	1,20	-	1,20
<b>Média</b>	28,71%	-	36,82%	-

Fonte: elaborado pelo autor

O Quadro 52 apresenta os valores calculados para o Fator X e o respectivo Fator de Porte (FP) para todas as estruturas estudadas. É possível observar que todas apresentaram FP igual ou superior a 1,1, o que evidencia que, de forma harmoniosa, são classificadas como de grande porte. O valor que mais se repetiu para o Fator de Porte foi o 1,10, com cinco ocorrências. Apenas as barragens de Furnas e Serra da Mesa apresentaram Fator X superior a 1 milhão, o que resultou nos valores mais elevados: FP = 1,2.

Por fim, no Quadro 53, são apresentados todos os valores de Grau de Risco (GR) das estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias das usinas avaliadas neste trabalho. O detalhamento de cada uma delas, com exceção da UHE Foz do Chapecó, está apresentado no Apêndice A.

Quadro 52 – Fator de porte das barragens estudadas

Usina	Altura máxima (m)	Volume reservatório (Hm <sup>3</sup> )	Fator X	FP
UHE Serra do Facão	15,45	5.199	17.211	1,10
UHE Serra da Mesa	154	54.400	5.531.474	1,20
Usina de Porto Colômbia	40	1.525	62.482	1,10
UHE Mascarenhas de Moraes	30	4.040	57.205	1,10
UHE Marimbondo	94	6.150	692.936	1,15
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	92	1.418	318.723	1,15
UHE Furnas	127	22.950	2.443.424	1,20
UHE Foz do Chapecó	20,6	1.502	16.446	1,10
UHE Batalha	50	1.781	105.505	1,15
UHE Simplício/Anta (principal e degraus)	29,5	141	10.332	1,10

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 53 – Classificação das usinas

USINA	GR	Classificação
UHE Foz do Chapecó	22,7	Baixo
UHE Furnas	21,6	Baixo
UHE Mascarenhas de Moraes	18,6	Muito Baixo
UHE Simplício (Barragem de Anta - degraus)	18,4	Muito Baixo
UHE Serra do Facão	18,1	Muito Baixo
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	17,3	Muito Baixo
UHE Simplício (comportas)	16,6	Muito Baixo
UHE Batalha	16,5	Muito Baixo
UHE Serra da mesa	16,3	Muito Baixo
UHE Marimbondo	15,5	Muito Baixo
UHE Porto Colômbia	13,8	Muito Baixo

Fonte: elaborado pelo autor

Quanto à classificação das estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias, verificou-se, pela metodologia proposta, que nove das onze barragens analisadas apresentaram grau de risco muito baixo. Tal valor, corrobora com os resultados da análise realizada pela equipe multidisciplinar que foi responsável pela campanha de inspeções nas estruturas hidráulicas objeto desse estudo.

Apenas as barragens de Furnas e Foz do Chapecó apresentaram dano baixo, por apresentarem Grau de Risco superior a 20, a classificação de Grau de Risco Baixo indica que estas estruturas de descarga, atualmente, não apresentam riscos de operação nem sequer têm risco de colapso. De maneira geral, essas estruturas

apresentaram pequenos danos, devendo os locais deteriorados serem alvo de reparados durante os trabalhos de manutenção regular. No caso de tais manifestações patológicas não serem corrigidas, após sucessivas avaliações de classificação de risco, os danos podem evoluir e acarretar riscos às estruturas no longo prazo.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Considerando-se a questão de pesquisa proposta e os objetivos do trabalho, são feitas, neste capítulo, considerações sobre o seu desenvolvimento e os resultados alcançados e algumas sugestões de trabalhos que poderiam ser elaborados a partir da proposta desta dissertação.

### **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base em todos os pontos mencionados ao longo do trabalho, foi possível propor uma metodologia de classificação de risco capaz de avaliar as condições das estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias. A elaboração teve por base metodologias de classificação de risco presentes na literatura e a aplicação desta foi realizada a partir de dados obtidos em notas técnicas de inspeção, realizadas em campo, em UHEs.

Os danos observados nas usinas estudadas ao longo da dissertação reforçaram a ideia de que a ocorrência de danos é inerente ao desgaste esperado ao longo do tempo de operação. Não houve, nestas usinas, manifestações patológicas que indicassem grandes problemas estruturais ou de operação. Sendo assim, os valores obtidos como Grau de Risco da estrutura para todas as barragens nas quais foi aplicada a metodologia de classificação de estruturas hidráulicas proposta levaram à classificação de dano baixo ou muito baixo: condizente com as condições observadas nas usinas.

A metodologia foi desenvolvida e avaliada visando uma aplicação prática, mas sendo sensível a todas as condições extremas. Para os exemplos de estruturas hidráulicas nas quais a metodologia foi proposta, os resultados foram satisfatórios em todos os quesitos. Entretanto, esta metodologia deve seguir sendo aplicada em outras barragens de concreto para ampliar a base de dados de maneira a observar se a metodologia aqui desenvolvida seguirá apresentando comportamento satisfatório em condições diversas e distintas daquelas aqui apresentadas.

A realização de inspeções apresenta níveis de subjetividade e incertezas relacionados a vários fatores: desde a variabilidade da experiência e conhecimento dos membros da equipe de inspeção até mesmo a falha humana, caso em que, por algum motivo, não é registrado algum dano ou não ser inspecionada uma região do barramento. Sendo assim, parte dessas subjetividades e incertezas permanecem na aplicação da metodologia.

A ANA (2016a) recomenda que as barragens passem por inspeção de segurança especial em determinadas situações, entre elas após a ocorrência de eventos extremos como cheias superiores à cheia de projeto. Sendo assim, sempre que for recomendada uma inspeção de segurança especial para o barramento é recomendado que as usinas hidrelétricas passem por nova classificação de risco das suas estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias. Assim, a aplicação recorrente desta metodologia, para verificação das condições das barragens a cada inspeção, pode, através da classificação destas estruturas, permitir que se avalie se os danos apresentados antes do evento extremo evoluíram ou não. Estas alterações são avaliadas, na metodologia proposta, com base na variação dos valores do Grau de Risco da estrutura. Mas, é importante salientar que tal prática de comparação da classificação das barragens deve ser adotada também quando das inspeções regulares de segurança, de maneira a estabelecer uma cultura de segurança especificamente voltada aos sistemas extravasores de cheias e um histórico de cada uma destas estruturas.

Por fim, visando reduzir a influência do profissional sobre os resultados alcançados, recomenda-se, pelo menos nas primeiras aplicações da metodologia, que, uma vez disponibilizados os dados e informações de campo, cada membro da equipe defina a classificação de risco individualmente de cada estrutura hidráulica. Posteriormente, seria, portanto, possível comparar as classificações obtidas por cada profissional e, havendo divergências, debates seriam recomendáveis para permitir diferentes olhares sobre o mesmo problema, o que contribui para a segurança da barragem.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificou-se, ao final da aplicação da metodologia nas onze barragens estudadas, que os resultados levaram à classificação de todas as estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias em risco baixo ou muito baixo. Sendo assim, é recomendado, para trabalhos futuros, a realização da aplicação da metodologia de classificação de risco de estruturas extravasoras de cheias em barragens com maior diversidade quanto estado de conservação. Um estudo com essa abrangência tornaria possível observar o comportamento da metodologia de forma mais ampla.

Outra recomendação, além de diversificar as características de conservação das estruturas, é realizar a aplicação da metodologia em um número maior de barragens. Sabe-se que, em cada barramento, é possível observar condições específicas e situações únicas, sendo assim a aplicação da metodologia em um número mais elevado de barramentos vai permitir observar o comportamento da metodologia e perceber possíveis falhas a serem corrigidas no método, que não foram observadas até o presente momento.

Além disso, o Fator de Porte das barragens que fizeram parte do estudo, evidenciaram que todas as barragens estudadas apresentaram Fator X correspondente a barragens de grande porte. Sendo assim, é importante que, em trabalhos futuros, sejam incluídas barragens classificadas como de porte médio e pequeno para observar o comportamento da metodologia na classificação sobre estas estruturas de menor porte.

Uma sugestão, frente a proposta, de certa forma restrita, da metodologia deste trabalho, voltada para avaliar estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias, isto é, uma das estruturas que compreendem um barramento, seria ampliar ou adaptar a proposta para a avaliação e classificação de um número maior de estruturas que compõem um barramento.

Por fim, outra recomendação para trabalhos futuros é utilizar de recursos tecnológicos para aprimorar a metodologia e as inspeções. Um importante recurso seria utilizar veículo aéreo não tripulado durante as inspeções para acessar regiões de difícil acesso e registrar todos os danos observados durante a inspeção. Ademais, seria possível realizar comparação entre inspeções sendo observado se

os danos identificados são os mesmos das inspeções anteriores ou novas ocorrências.



## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ACI. **Concrete Repair Manual**. Farmington Hills/MI: American Concrete Institute, 1999.

ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**: guia de orientação e formulários para inspeções de segurança de barragem. 1. ed. Brasília/DF: Agência Nacional de Águas, 2016a. v. II.

\_\_\_\_\_. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**: guia de revisão periódica de segurança de barragem. Brasília/DF: Agência Nacional de Águas, 2016b. v. III.

\_\_\_\_\_. **Relatório de Segurança de Barragens: 2019**. 1. ed. Brasília/DF: Agência Nacional de Águas, 2020. E-book.

BARBOSA, M. B.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F.; FAZZAN, J. V.; TASHIMA, M. M.; BERNABEU, J. J. P.; MELGES, J. L. P. Impact strength and abrasion resistance of high strength concrete with rice husk ash and rubber tires = Resistência ao impacto e à abrasão de concreto de alta resistência com cinza de casca de arroz e borracha de pneus. **Ibracon Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 6, n. 5, p. 811-831, Oct. 2013.

BICZOK, I. **Corrosion y protección del hormigon**. Trad de Emilio J. d'Ocon Asensi. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p.275-280.

BOETTGER, A. E. **Análise dos métodos de avaliação de pontes do Brasil, Estados Unidos e Japão aplicados a um estudo de caso**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

BOLDO, P. **Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2002.

Disponível em:

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en%7B&%7DbtnG=Search%7B&%7Dq=intitle:Universidade+de+Bras%7Bí%7Dlia%7B#%7D9>. Acesso em: 15 ago. 2020.

BRASIL. **Lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília/DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12334-20-setembro-2010-608607-publicacaooriginal-129691-pl.html>. Acesso em: 22 maio 2020.

CARDIA, R. J.; KUPERMANN, S. **Curso Segurança de Barragens: módulo II – inspeção e auscultação de barragens – unidade 1: anomalias em barragem.** Brasília/DF: Agência Nacional de Águas, 2012.

CASTRO, E. K. de. **Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado.** 1994. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 1994.

CHOI, S.; BOLANDER, J. E. A topology measurement method examining hydraulic abrasion of high workability concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. 771-778, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1135-2>. Acesso em: 7 nov. 2020.

CBDB. **A história das barragens no Brasil: Séculos XIX, XX, XXI.** 1. ed. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2011.

CEB. **Bulletin 243: Strategies for testing and assessment of concrete structure.** Lausanne/CH: Comité Euro-International du Béton, 1998

COSTA, F. C. S. **Estudo de Caso para valoração dos efeitos positivos e negativos oriundos pela implantação do empreendimento UHE Simplício: queda única.** 2013. TCC (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Departamento de Ciências Econômicas e Exatas, Instituto de Três Rios, Universidade Rural do Rio de Janeiro, Três Rios, 2013.

FALVEY, H. T. Prevention of cavitation on chutes and spillways. Denver/CO/US: Bureau of Reclamation, 1983.

\_\_\_\_\_. Cavitation in Chutes and Spillways. Denver/CO/US: Bureau of Reclamation, 1990.

FHWA. **Federal Register n. 218: National Bridge Inspection Standards.** Washington DC: Federal Highway Administration, 2019.

FONSECA, R. P. da. **A estrutura do Instituto Central de Ciências: aspectos históricos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção.** 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2007. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/3062>. Acesso em: 10 jul. 2021.

FRAZÃO, Y. A. **Carbonatação do Concreto.** Spot Cursos, São Luís/MA, 2020. Disponível em: <https://spotcursos.com.br/blogs/patologia-da-construcao/posts/carbonatacao-do-concreto>. Acesso em: 16 jan. 2021.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Aproveitamento Hidroelétrico de Itumbiara: estruturas de concreto – Especificações Técnicas.** [S. l.]: Furnas Centrais Elétricas: 1974. vol. II.

GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; MENDES, R. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 1049-1055, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073>. Acesso em: 15 fev. 2021.

- GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; KORMANN, A. C. M. Abrasive Effects Observed in Concrete Hydraulic Surfaces of Dams and Application of Repair Materials. In: ADAMIAK, M. (Ed.). **Abrasion Resistance of Materials**. London: IntechOpen, 2012. p. 19-35. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/27964>. Acesso em: 23 set. 2020.
- GJØRV, O. E.; BAERLAND, T.; RONNING, H. H. Increasing service life of roadways and bridges. **Concrete International**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 45, 1990.
- HAN, F.; LIU, R.; YAN, P. Effect of fresh water leaching on the microstructure of hardened composite binder pastes. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 68, p. 630-636, 2014.
- HORSZCZARUK, E. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures. **Wear**, [S. l.], v. 259, n. 1-6, p. 62-69, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.079>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- HU, J. Carbonization and calcium leaching-induced deterioration of concrete in dams: field inspection and microstructural investigation. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [S. l.], v. 24, n. 12, 2018.
- ICOLD. Bulletin 157 – **Small Dams**: design, surveillance and rehabilitation = **Petits Barrages**: a Conception, surveillance et réhabilitation. Paris/FR: International Commission os Large Dams, 2016.
- KATZ, J. Cavitation Phenomena Within Regions of Flow Separation. **Journal of Fluid Mechanics**, [S. l.], v. 140, p. 397-436, 1984.
- KELLS, J. A.; SMITH, C.D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 18, p. 358-377, 1991.
- KENN, M. J. Factors influencing the erosion of concrete by cavitation. **CIRIA**, London, p. 15, 1968.
- KLEIN, D. L.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P. **Crerios adotados na vistoria e avaliaçã de obras de arte**. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, XXV Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Associação Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 1991. p. 185-196.
- KORJAKINS, A.; KARA, P.; TOROPOVS, N. Improving quality of high performance concrete by cavitation treatment of the raw materials. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 57, p. 597-604, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.076>. Acesso em: 12 jul. 2021.
- KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- KRELLA, A. K. The new parameter to assess cavitation erosion resistance of hard PVD coatings. **Engineering Failure Analysis**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 855-867, 2011.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.10.002>. Acesso em: 28 mar. 2021.

\_\_\_\_\_. Cavitation erosion resistance of Ti/TiN multilayer coatings. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 228, p. 115-123, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.04.016>. Acesso em: 15 dez. 2020.

LATORRE, P. E. V. **Estudo de argamassas para reparos de estruturas de concreto sujeitas à abrasão em locais com umidade elevada**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências da Construção Civil) – Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

LOPES, B. A. R. **Sistema de manutenção predial para grandes estoques de edifícios: estudo para inclusão do componente estrutura de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 1998.

MARQUES, M. G.; CUPERTINO, M. A. L.; CANELLAS, A. V. B.; LOPES, A. N. de M.; KUPERMAN, S. **Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas: Relatório de Produto – etapa 2: análise bibliográfica (R2.1) – IPH/UFRGS**. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, Fundação Empresa-Escola de Engenharia/UFRGS, 2020. Versão 1 – parte 1

MARQUES, M. G.; ABREU, A. S. (Red.). **Estudo de concreto para superfícies hidráulicas**: inspeção às usinas de Furnas, Mascarenhas de Moraes, Luiz Carlos Barreto de Carvalho, Porto Colômbia e Marimondo – 30/9/2019-04/10/2019. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Fundação Empresa-Escola de Engenharia/UFRGS; Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 2021a. Notas técnicas das inspeções em UHE'S – Parte 01/05.

\_\_\_\_\_. **Estudo de concreto para superfícies hidráulicas**: inspeção às usinas de Batalha e Serra do Facão – 23/10/2019-29/10/2019 – Revisão 1. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Fundação Empresa-Escola de Engenharia/UFRGS; Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 2021b. Notas técnicas das inspeções em UHE'S – Parte 02/05

\_\_\_\_\_. **Estudo de concreto para superfícies hidráulicas**: inspeção na usina de Serra da Mesa – 11/11/2019-14/11/2019. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Fundação Empresa-Escola de Engenharia/UFRGS; Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 2021c. Notas técnicas das inspeções em UHE'S – Parte 03/05.

\_\_\_\_\_. **Estudo de concreto para superfícies hidráulicas**: inspeção na usina de Foz do Chapecó – 10/12/2019 – Revisão 1. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Fundação Empresa-Escola de Engenharia/UFRGS; Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 2021d. Notas técnicas das inspeções em UHE'S: Parte 04/05.

\_\_\_\_\_. **Estudo de concreto para superfícies hidráulicas**: inspeção às usinas de Simplício (Barragem Anta) e Funil – 04/02/2020- 05/02/2020. Porto Alegre/RS:

Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Fundação Empresa-Escola de Engenharia/UFRGS; Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 2021e. Notas técnicas das inspeções em UHE'S: Parte 05/05.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto** : estrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo/SP: 1994. E-book.

\_\_\_\_\_. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Editora do Ibracon, 2014.

MOMBER, A. W. Short-time cavitation erosion of concrete. **Wear**, [S. l.], v. 241, n. 1, p. 47-52, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00348-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00348-3). Acesso em: 04 jun. 2021.

NCHRP. **Report 782**: Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, 2014. Disponível em: [www.TRB.org](http://www.TRB.org). Acesso em: 19 jan. 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre/RS: Bookman, 2016.

NEW JERSEY DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Bridge Element Inspection Manual**. New Jersey/NJ/USA: State Of New Jersey, 2015. Disponível em: [https://deldot.gov/Publications/manuals/bridge\\_inspection/pdfs/bridge\\_element\\_inspection\\_manual.pdf](https://deldot.gov/Publications/manuals/bridge_inspection/pdfs/bridge_element_inspection_manual.pdf). Acesso em: 15 set.2021.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. Monografia do curso de especialização em construção civil. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2010.

PHILLEO, R. E. **Report of materials working group**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE PERFORMANCE OF OFFSHORE CONCRETE STRUCTURES IN THE ARCTIC ENVIRONMENT, 1983, Washington DC. Proceedings... Washington DC: National Bureau of Standards, 1983. p. 19-25.

PIASENTIN, C. **Barragens: aspectos legais, técnicos de sócioambientais**: aspectos gerais da segurança de barragens. Brasília/DF: Agência Nacional de Água, 2010. Notas de aula do Curso Segurança de Barragens, módulo I, unidade 2.

PINHO, J. R. S.; BITTENCOURT JR, L. A. G.; BARATA, M. G.; SOUZA, R. M. de. **Avaliação de sistemas de separo de superfícies de concreto úmidas de UHEs submetidas à erosão por abrasão hidráulica**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XXVII, Belém/PA. Anais... Belém/PA: Comitê Brasileiro de Barragens, 2007. p. 1-15.

SCOTT, B. D. Abrasion Resistance of Concrete: design, construction and case study. **Concrete Research Letters**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 136-147, Sept. 2015.

SHARMA, S.; ARORA, V. V.; KUMAR, S.; DANIEL, Y.N. Durability study of high-strength steel fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, [S. l.], v. 115, n. 2, p.

219-225, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/51701122>. Acesso em: 1 mar. 2021.

SHIRATO, M.; TAMAKOSHI, T. **Bridge Inspection Standards in Japan and US**. [S. l: s. n.], 2013. 14 p.

SILVEIRA, J. F. A.; AYRES, M. C.; MANTESE, A.C. **Fissuras em barragens de concreto: critérios de classificação, experiência prática e tratamentos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 60., São Carlos/SP. Anais... São Paulo: Ibracon, 2018. Disponível em: <http://www.portaldageotecnia.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Fissuração-Barragens-Concreto-Critérios-de-classificação-experiência-prática-e-tratamentos.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2020.

TAMAKOSHI, T.; KAMADA, T.; SHIRATO, M. Steel bridge deterioration data in Japan and modelling. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering**, v. 170, n. 2, p. 133-146, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jbren.16.00004>. Acesso em: 8 out. 2021.

VALENTE, R.; S. FREITAS. **Relatório de vistoria Barragem Pedro Moura Júnior/PE**. Belo Jardim/PE: Associação Pernambucana de Águas e Climas, 2019.

WARMLING, G. M. B.; SANTOS FILHO, M. L. **Aplicação de Metodologia Objetiva Para Avaliação de Obras de Arte Especiais em Rodovias no Estado do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, X, Rio de Janeiro/RJ. Anais... Rio de Janeiro/RJ: Associação Brasileira de Estruturas, 2018. p. 10.

WEIMER, B. F.; THOMAS, M.; DRESCH, F. **Patologias das Estruturas**. 1. ed. Porto Alegre/RS: Sagah, 2018.

WOODS, H. **Durability of Concrete Construction**. Detroit/MI/US: American Concrete Institute, 1968. Monograph n. 4, 145-149 f.

ZUCH, R. A. **Manifestações patológicas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas: levantamento de ocorrências e estratégias de reparo utilizadas**. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

**APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO DETALHADA DAS USINAS**

## 1 UHE LUIZ CARLOS BARRETO DE CARVALHO

Nos itens abaixo serão apresentados os danos identificados em cada uma das famílias que compõem a estrutura descarregadora de cheias da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho e os seus respectivos valores atribuídos nos cálculos do Grau de Risco da estrutura. A Tabela 1 apresenta os danos identificados em cada vão da estrutura.

Tabela 1 - Ocorrência de danos por vão

Danos	Vão 1	Vão 2	Vão 3	Vão 4	Vão 5	Vão 6	Total	%
Surgência							0	0%
Fissuras	Sim						1	17%
Lixiviação	Sim			Sim			2	33%
Exposição de agregados	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6	100%
Erosão	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim		5	83%
Desplacamento		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	5	83%
Desgaste na junta		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	5	83%
Número de ocorrências	4	4	4	5	4	3		

### 1.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Na Figura 1, é possível observar a ocorrência de 2 danos. No detalhe em amarelo estão presentes fissuras transversais que provavelmente tem sua origem ligada a variação térmica. Além disso, é possível observar a descontinuidade entre as juntas construtivas no salto esquí. Assim, em função do desalinhamento apresentado pelas juntas o FI atribuído ao dano foi de 2. As fissuras serão classificadas na Família 4.

Figura 1 - Fissuras e descontinuidades



Fonte: Marques e Abreu (2021a).



Na Figura 2 é identificado o desgaste do concreto devido a descontinuidade das juntas de concreto transversais ao vertedouro com a presença de lixiviação de hidróxido de cálcio. Ao dano de lixiviação foi atribuído FI = 1.

Figura 2 - Lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Com os danos citados anteriormente foram calculados os parâmetros FM, GRE e GRF (Tabela 2). Para a Família 1 o GRF calculado foi de 8,3.

Tabela 2 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:		1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem										
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	$FI_{máx}$	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Desalinhamento	1	1	0	1	2	0	1	2	N	2	2	4
Surgências / lixiviação	2	1	0	1	1	1	0	1	N	1	2	8
Desplacamentos	3	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12
Obstáculos/obstruções	4	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16
Movimentação diferencial	5	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20
Rupturas	6	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24
Presença de vegetação	7	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28
											d	7
											D	2
											FM	2,3
											GRE	3,6
											<b>GRF</b>	<b>8,3</b>

## 1.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Na Família 2, não foram observados danos para entrarem na metodologia de classificação. Sendo assim, o GRF da Família 2 é igual a zero.

### 1.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Figura 3 é possível observar a presença de fissuras nas regiões dos muros. O FI atribuído ao dano foi de 1.

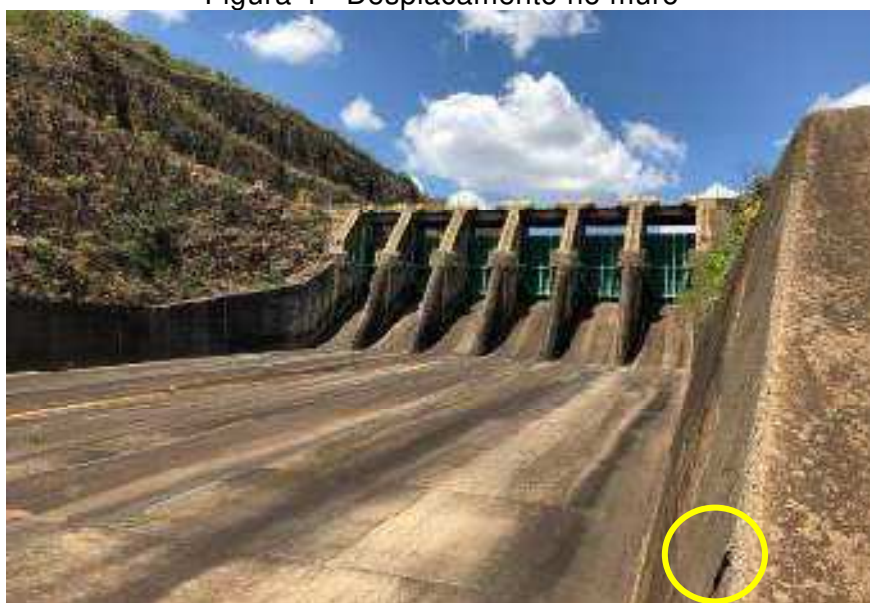
Figura 3 - Fissuras no muro



Fonte: Marques et al. (2020).

Ao longo do muro também foi possível observar a ocorrência de pequenos deslocamentos (Figura 4). Em função da dimensão dos deslocamentos o FI atribuído ao dano foi de 1.

Figura 4 - Deslocamento no muro



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

A partir dos FI atribuídos aos danos foram calculados os demais parâmetros da metodologia, entre eles o GRF. A Tabela 3 apresenta todos esses parâmetros.

Tabela 3 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos											
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	$FI_{máx}$	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	1	1	0	0	0	0	1	N	1	1	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Deslocamentos	5	1	1	0	0	0	1	1	N	1	5	20	
Exposição de agregados	6	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Presença de vegetação	9	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36	
											d	9	
											D	2	
											FM	3,0	
											GRE	3,3	
											<b>GRF</b>	<b>9,9</b>	

#### 1.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Na Figura 5 é possível observar o processo erosivo na laje a jusante do salto esquí. Em função da erosão, os agregados do concreto estão expostos. Para o dano seria atribuído o FI de 1, porém pela recorrência do dano em praticamente toda extensão da laje, o FI foi majorado para 2.

Figura 5 - Exposição de agregados



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Para as fissuras transversais apresentadas na Figura 1 do tópico 1.1 foram atribuídas ao dano um FI de 1. Além disso, na Figura 6 é possível observar a presença de vegetação na superfície hidráulica do vertedouro. Para a presença de vegetação o FI adotado foi de 1.

Figura 6 - Presença de vegetação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

A partir dos FI atribuídos aos danos foram calculados os demais parâmetros da metodologia, entre eles o GRF. A Tabela 4 apresenta todos esses parâmetros.

Tabela 4 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)											
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	$FI_{máx}$	Majorar?	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	1	0	1	1	0	0	1	N	1	1	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Desplacamentos	5	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20	
Exposição de agregados	6	1	1	1	1	1	1	1	S	2	12	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Irregularidade gradual	9	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36	
Presença de vegetação	10	0	1	0	0	0	0	1	N	1	10	40	
											d	10	
											D	3	
											FM	2,5	
											GRE	10,5	
											<b>GRF</b>	<b>26,3</b>	

## 1.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Com base nos GRF apresentados anteriormente é possível determinar o GR da estrutura. Para isso é preciso realizar a definição dos dois parâmetros hidrológicos o GV e o GVH, que no caso da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho foram de 1,05 e 1 respectivamente. Além disso, o parâmetro referente ao porte da barragem foi de 1,15.

Tabela 5 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	8,3	1	8,3
2 - Comportas, acionadores mecânicos	0,0	2	0,0
3 - Muros laterais e entre vãos	9,9	3	29,7
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	26,3	4	105,2
		GVH	1,05
		GV	1
		FP	1,15
		<b>GR</b>	<b>17,3</b>

Com base na Tabela 5, apresentada acima, é possível observar que as superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho apresentaram GR equivalente a 17,3. Segundo as faixas de classificação propostas as estruturas apresentaram dano muito baixo.

## 2 UHE FURNAS

No caso da UHE Furnas o relatório não apresentou detalhadamente quais danos foram identificados em cada vão do vertedouro impedindo que análise de recorrências de danos seja realizada por vão. Assim, a análise para definir se um dano deve ter seu FI majorado será em função da área, se aquele dano se repetir por grande parte da área da estrutura ele será majorado. Pelo mesmo motivo, não foi possível fazer a classificação vão a vão na planilha, sendo então realizada a classificação para toda a estrutura diretamente.

### 2.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Nas juntas de concretagem na calha do vertedouro é possível observar a ocorrência de uma descontinuidade sendo observado um desalinhamento na junta (Figura 7). O FI atribuído ao dano foi igual a 1.

Figura 7 - Desalinhamento na junta



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Outra ocorrência observada nas juntas presentes nas calhas do vertedouro são deslocamentos que resultaram na exposição de agregados graúdos (Figura 8). O FI atribuído ao deslocamento foi de 1.

Figura 8 - Exposição de agregados



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros GR, GRF e FM, sendo possível observar que a família apresentou GRF igual a 8,3.

Tabela 6 - Cálculo do GRF da Família 1

<b>Família de elementos:</b>	<b>1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem</b>			
Danos	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Desalinhamento	1	1	1	4
Surgências / lixiviação	2	0	0	8
Desplacamentos	3	1	3	12
Obstáculos/obstruções	4	0	0	16
Movimentação diferencial	5	0	0	20
Rupturas	6	0	0	24
Presença de vegetação	7	0	0	28
			d	7
			D	2
			FM	2,3
			GRE	3,6
			<b>GRF</b>	<b>8,3</b>

## 2.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Na Família 2, referentes as comportas e acionadores mecânicos foi identificada apenas um dano, sendo ele a falta de vedação das comportas (Figura 9). O FI adotado ao dano foi de 1.

Figura 9 - Má vedação das comportas



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

A Tabela 7 apresenta os valores calculados para todos parâmetros relacionados a metodologia. É possível concluir que a Família 2 apresentou GRF igual a 6,3.

Tabela 7 - Cálculo do GRF da Família 2

<b>Família de elementos:</b>	<b>2 - Comportas, acionadores mecânicos</b>			
	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Danos				
Falta de vedação de comporta	1	1	1	4
Descentralização do vão	2	0	0	8
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	0	12
			d	3
			D	1
			FM	1,5
			GRE	4,2
			<b>GRF</b>	<b>6,3</b>

### 2.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Figura 10 é possível observar o deslocamento do concreto revelando parte da armadura do muro da calha do vertedouro. O dano foi classificado como exposição de armadura com FI igual a 1.



Figura 10 - Deslocamento com exposição de armadura



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Tabela 8 apresentada abaixo é possível observar que o GRF da Família 3 - Muros laterais e entre vãos é igual a 17,5.

Tabela 8 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos			
Danos	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	0	0	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	16	
Deslocamentos	5	0	0	20	
Exposição de agregados	6	0	0	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	1	7	28	
Movimentação	8	0	0	32	
Presença de vegetação	9	0	0	36	
			d	9	
			D	1	
			FM	4,5	
			GRE	3,9	
			<b>GRF</b>	<b>17,6</b>	

## 2.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram identificadas a maior quantidade de danos, tendo sido registrados 4 dos 10 danos possíveis. Nas Figuras 11 e 12 é possível observar a ocorrência de dois danos: a ocorrência de um processo de deslocamento

do concreto e em algumas regiões esses deslocamentos evoluíram originando a exposição de agregados graúdos. Para ambos os danos o FI atribuído foi de 2.

Figura 11 e 12 - Deslocamentos e exposição de agregados



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 13 também é possível observar a ocorrência de deslocamentos do concreto com fissuras no concreto próximas as regiões do deslocamento. Sendo assim, foi atribuído FI igual a 1 para o dano de fissuras aleatórias.

Figura 13 - Fissuras próximas a deslocamentos



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 14 é possível observar o 4º dano identificado nas superfícies de concreto, são fissuras com profundidade variáveis que irradiam da um local onde foi retirado um corpo de prova ou é um dreno da estrutura. Assim foi atribuído FI igual a 2 para fissuras com orientação.

Figura 14 - Fissuras



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Com base nas informações citadas anteriormente foram calculados os parâmetros FM, GRE e GRF para a Família 4. Na Tabela 9 estão apresentados todos os parâmetros, entre eles o GRF que apresentou valor igual a 24,5.

Tabela 9 - Cálculo do GRF da Família 4

<b>Família de elementos:</b>	<b>4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)</b>			
Danos	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	1	1	4
Fissuras com orientação	2	2	4	8
Surgências / lixiviação	3	0	0	12
Obstáculos	4	0	0	16
Desplacamentos	5	2	10	20
Exposição de agregados	6	2	12	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	28
Movimentação	8	0	0	32
Irregularidade gradual	9	0	0	36
Presença de vegetação	10	0	0	40
			d	10
			D	4
			FM	2,0
			GRE	12,3
			<b>GRF</b>	<b>24,6</b>

## 2.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Os parâmetros GV e GVH necessários para o cálculo do Grau de Risco da estrutura foram definidos como 1 e 1,05 respectivamente. O parâmetro relacionado ao porte da barragem apresentaram seu valor máximo equivalente a 1,2.

Tabela 10 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	8,3	1	8,3
2 - Comportas, acionadores mecânicos	6,3	2	12,6
3 - Muros laterais e entre vãos	17,6	3	52,8
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	24,6	4	98,4
		GVH	1,05
		GV	1
		FP	1,2
		<b>GR</b>	<b>21,7</b>

As superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Furnas apresentaram GR equivalente a 21,7 (Tabela 10), que de acordo com a classificação proposta na metodologia corresponde a dano baixo.

### **3 UHE MASCARENHAS DE MORAES**

Na UHE Mascarenhas de Moraes apenas 1 dano foi observado em mais de 70% dos vãos como é possível observar Tabela 11 apresentada abaixo. Além da tabela, a seguir é apresentada uma foto do sistema extravasor da UHE Mascarenhas de Moraes.

Tabela 11 - Ocorrência de danos por vão

<b>Danos</b>	<b>Vão 1</b>	<b>Vão 2</b>	<b>Vão 3</b>	<b>Vão 4</b>	<b>Vão 5</b>	<b>Vão 6</b>	<b>Vão 7</b>	<b>Vão 8</b>	<b>Vão 9</b>	<b>Vão 10</b>	<b>Vão 11</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Surgência												0	0%
Fissuras				Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	8	73%
Lixiviação	Sim	Sim	Sim				Sim	Sim	Sim		Sim	7	64%
Exposição de agregados	Sim	Sim	Sim		Sim						Sim	5	45%
Erosão	Sim		Sim	Sim	Sim						Sim	5	45%
Desplacamento			Sim	Sim	Sim			Sim				4	36%
Desgaste na junta												0	0%
Número de ocorrências	3	2	4	3	4	1	2	3	2	1	4		

### 3.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Nas juntas de dilatação e concretagem foram observadas 3 dos 7 possíveis patologias identificadas. A Figura 15 é possível observar a ocorrência de desalinhamento na junta. Enquanto na Figura 16 é possível observar a lixiviação do hidróxido de cálcio na região das juntas. Ambos os danos foram classificados com FI igual a 1.

Figura 15 e 16 - Desalinhamento e lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Nas duas figuras apresentadas abaixo é possível observar a presença de vegetação nas juntas e demais regiões da Usina. Para a ocorrência foi atribuído FI equivalente a 2.

Figura 17 e 18 - Presença de vegetação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Assim com base nas informações previamente citadas foi possível calcular o GRF da Família 1 (Tabela 12), sendo obtido o valor de 27,4.

Tabela 12 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:	1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem																	
	Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Desalinhamento	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	N	1	1	4
Surgências / lixiviação	2	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	N	1	2	8
Desplacamentos	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12
Obstáculos/ obstruções	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16
Movimentação diferencial	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20
Rupturas	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24
Presença de vegetação	7	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	N	2	14	28
																	d	7
																	D	3
																	FM	1,8
																	GRE	15,2
																	<b>GRF</b>	<b>27,4</b>

### 3.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Na Família 2 foi identificada apenas 1 dano, que foi a falta de vedação das comportas. Apesar da ausência de informação detalhada de quais vãos apresentaram o dano foi possível observar que grande parte dos vãos apresentaram esse dano, sendo assim o FI, que inicialmente seria de 1, foi majorado para 2.

Figura 19 - Falta de vedação da comporta



Fonte: Marques et al. (2020).

Assim, com base no FI do dano de falta de vedação é possível calcular o GRF da Família 2. O valor calculado de GRF foi de 12,5 (Tabela 13).



Tabela 13 - Cálculo do GRF da Família 2

Família de elementos:		2 - Comportas e acionadores mecânicos																
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Falta de vedação de comporta	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	S	2	2	4	
Descentralização do vão	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12	
																d	3	
																D	1	
																FM	1,5	
																GRE	8,3	
																<b>GRF</b>	<b>12,5</b>	

### 3.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 Muros laterais e entre vãos não foram observados danos assim o GRF da família é igual a zero.

### 3.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram identificado 5 danos, sendo eles: fissuras com orientação, lixiviação, deslocamentos, exposição de agregados e presença de vegetação. Abaixo serão apresentados os danos e seus respectivos valores de FI adotados. A Figura 20 apresenta erosões localizadas na calha do vertedouro com o deslocamento da superfície de concreto, sendo atribuído ao dano o FI de 1.

Figura 20 - Desplacamento



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 21 é possível identificar dois danos na estrutura. A presença de vegetação na calha que também é possível identificar na Figura 18 e 19. Para o dano foi atribuído valor de FI igual a 2. Além disso, no detalhe da imagem é possível identificar a ocorrência de fissuras transversais sendo o FI adotado foi igual a 1.

Figura 21 - Fissura e presença de vegetação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 22 é possível observar a ocorrência de lixiviação na região das calhas do vertedouro. O FI adotado para o dano foi de 1.

Figura 22 - Lixiviação



Fonte: Marques *et al.* (2020).

O GRF calculado para a Família 4 foi de 27,30, os demais parâmetros de cálculo estão disponíveis na tabela abaixo.

Tabela 14 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)																
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	4	
Fissuras com orientação	2	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	2	8	
Surgências / lixiviação	3	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	N	1	3	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Desplacamentos	5	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	N	1	5	20	
Exposição de agregados	6	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	N	1	6	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Irregularidade gradual	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36	
Presença de vegetação	10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	2	N	2	20	40	
																d	10	
																D	5	
																FM	1,7	
																GRE	16,4	
																<b>GRF</b>	<b>27,9</b>	

### 3.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

A UHE Mascarenhas de Moraes apresentou GV de 1,05, pois a relação entre a vazão máxima vertida e a vazão de projeto foi de 37,64%. Já o GVH adotado foi igual a 1, pois o empreendimento apresentou vertimento em 15,88% dos dias de registro de dados. Enquanto o fator relacionado ao porte da estrutura foi empregado o valor de 1,1. Assim foi possível calcular o GR das superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Mascarenhas de Moraes. Como apresenta a Tabela 15, o GR é igual a 18,6.

Tabela 15 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	27,4	1	27,4
2 - Comportas, acionadores mecânicos	12,5	2	25,0
3 - Muros laterais e entre vãos	0,0	3	0,0
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	27,9	4	111,6
		GVH	1,05
		GV	1
		FP	1,1
		<b>GR</b>	<b>18,9</b>

#### 4 UHE MARIMBONDO

Na UHE Marimbondo, nenhum dos danos identificados apresentou recorrência superior aos 70 % (Tabela 16). Nos próximos tópicos serão apresentados todos os danos identificados na UHE e seus respectivos valores de FI.

Tabela 16 - Ocorrência de danos por vão

Danos	Vão 1	Vão 2	Vão 3	Vão 4	Vão 5	Vão 6	Vão 7	Vão 8	Vão 9	Total	%
Surgência							Sim			1	11%
Fissuras						Sim		Sim	Sim	3	33%
Lixiviação	Sim	Sim			Sim			Sim	Sim	5	56%
Exposição de agregados	Sim	Sim			Sim					3	33%
Erosão										0	0%
Deslocamento	Sim	Sim			Sim					3	33%
Desgaste na junta										0	0%
Número de ocorrências	3	3	0	0	3	1	1	2	2		

##### 4.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Nas juntas de dilatação e concretagem foram observados 2 dos 7 danos possíveis. Na Figura 23 é possível observar a lixiviação de hidróxido de cálcio nas juntas. Para o danos foi atribuído FI igual a 1.

Figura 23 - Lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Nas duas figuras apresentadas abaixo é possível observar a ocorrência de deslocamento na superfície do concreto próximo às juntas com erosão e presença de vegetação. Aos danos foi atribuído Fi igual a 1.

Figura 24 e 25 - Deslocamento e presença de vegetação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Com os valores de FI mencionados acima, foi calculado o GRF da família que foi igual a 10,4 (Tabela 17).

Tabela 17 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:		1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem														
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Desalinhamento	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	4	
Surgências / lixiviação	2	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	N	1	2	8	
Desplacamentos	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	N	1	3	12	
Obstáculos/obstruções	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Movimentação diferencial	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20	
Rupturas	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Presença de vegetação	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
														d	7	
														D	2	
														FM	2,3	
														GRE	4,5	
														<b>GRF</b>	<b>10,4</b>	

## 4.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Na Família 2 foi identificada apenas 1 dano, a falta de vedação de comporta. Na Figura 26, apresentada abaixo, é possível observar surgência de água em função de problema de vedação da comporta.

Figura 26 - Surgência



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Assim, com apenas 1 dano observado o GRF da Família 2 foi de 6,3 (Tabela 18).

Tabela 18 - Cálculo do GRF da Família 2

Família de elementos:		2 - Comportas e acionadores mecânicos													
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Falta de vedação de comporta	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	N	1	1	4
Descentralização do vão	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12
														d	3
														D	1
														FM	1,5
														GRE	4,2
														<b>GRF</b>	<b>6,3</b>

### 4.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 foi observada a ocorrência de erosões com deslocamento e fissuras nas juntas. A erosão é observada na região da base do muro (detalhe), enquanto as fissuras podem ser observadas em todas regiões da mesma. Aos dois danos foi atribuído FI igual a 1.

Figura 27 - Erosão e fissuras



Fonte: Marques et al. (2020).

O GRF da família 3: Muros laterais e entre vãos calculado foi de 10,0, como é possível observar na Tabela 19.

Tabela 19 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos														
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar?	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	N	1	1	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Desplacamentos	5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	N	1	5	20	
Exposição de agregados	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Presença de vegetação	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36	
														d	9	
														D	2	
														FM	3,0	
														GRE	3,3	
														<b>GRF</b>	<b>9,9</b>	

#### 4.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram observados 4 dos 10 danos possíveis. Na Figura 28 é observada uma região de reparos e deslocamentos do concreto da



superfície do vertedouro, também é possível observar fissuras devido a retração por secagem dos reparos (detalhe em vermelho). Para as fissuras e deslocamentos o FI atribuído foi de 1.

Figura 28 - Deslocamento e fissuras



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 29, é possível identificar novamente a ocorrência de deslocamentos mas nesse caso também é possível observar a ocorrência de exposição de agregados. O FI adotado para exposição de agregados foi de 1.

Figura 29 - Exposição de agregados



Fonte: Marques et al. (2020).

Na Figura 30, é possível observar a ocorrência de lixiviação de hidróxido de cálcio nas superfícies de concreto. O FI adotado foi de 1.

Figura 30 - Lixiviação



Fonte: Marques et al. (2020).

Na Figura 28 também é possível observar a presença de vegetação na região de encontro entre a superfície de concreto e do muro, sendo atribuído o FI de 1 ao dano. Com base nos valores apresentados acima, foi calculado o GRF e o valor obtido foi 18,9 (Tabela 20).

Tabela 20 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)													
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar?	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	N	1	1	4
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8
Surgências / lixiviação	3	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	N	1	3	12
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16
Deslocamentos	5	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	N	1	5	20
Exposição de agregados	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	N	1	6	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32
Irregularidade gradual	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36
Presença de vegetação	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	N	1	10	40
														d	10
														D	5
														FM	1,7
														GRE	11,4
														<b>GRF</b>	<b>19,4</b>

#### 4.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Para calcular o GR da estrutura é necessário delimitar os parâmetros GV e GVH. Os valores utilizados foram de 1,0 e 1,05 respectivamente. O Fator relacionado ao porte do empreendimento foi atribuído o valor de 1,15. O GR das superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Marimbondo foi de 15,5 (Tabela 21).

Tabela 21 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	10,4	1	10,4
2 - Comportas, acionadores mecânicos	6,3	2	12,6
3 - Muros laterais e entre vãos	9,9	3	29,7
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	19,4	4	77,6
		GVH	1,05
		GV	1
		FP	1,15
		<b>GR</b>	<b>15,7</b>

## 5 UHE PORTO COLÔMBIA

Na UHE Porto Colômbia não foi possível realizar a análise individualizada para cada vão da estrutura, em função das informações fornecidas. Sendo assim, as manifestações patológicas identificadas tiveram seus valores adotados para todos os vãos da estrutura.

### 5.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Nas juntas de concretagem foi observado 2 dos 7 danos possíveis. Na Figura 31 é possível observar fissuras nas juntas de concretagem com presença de hidróxido de cálcio lixiviado. Para o dano o FI adotado foi igual a 1.

Figura 31 - Fissuras com lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 32 é possível observar o início de um processo de deslocamento próximo as juntas transversais. Ao dano foi atribuído FI igual a 1.

Figura 32 - Detalhe de erosão e deslocamento nas juntas transversais



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

O GRF calculado para a Família 1 foi de 10,4 como está apresentado na Tabela 22.

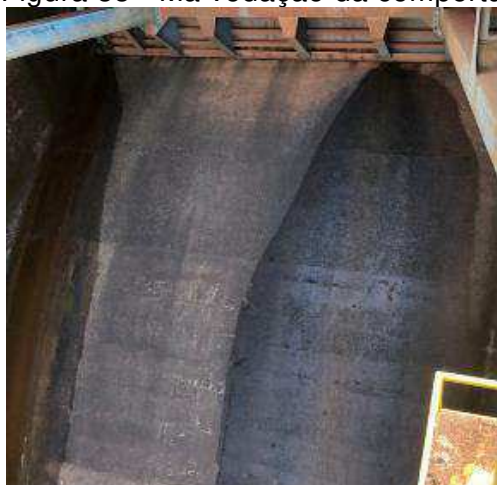
Tabela 22 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:		1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem														
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Desalinhamento	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	4	
Surgências / lixiviação	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	2	8	
Desplacamentos	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	3	12	
Obstáculos/obstruções	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Movimentação diferencial	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20	
Rupturas	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Presença de vegetação	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
														d	7	
														D	2	
														FM	2,3	
														GRE	4,5	
														<b>GRF</b>	<b>10,4</b>	

## 5.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Nas comportas e acionadores mecânicos o único dano identificado foi a falta de vedação das comportas. Na Figura 33, é possível observar vazamento na comporta por problemas do sistema de vedação da mesma. O FI adotado foi igual a 1.

Figura 33 - Má vedação da comporta



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Com base nas informações é então possível calcular o GRF das comportas e acionadores mecânicos. O valor do GRF é igual a 6,3 (Tabela 23).

Tabela 23 - Cálculo do GRF da Família 2

Família de elementos:		2 - Comportas e acionadores mecânicos													
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Falta de vedação de comporta	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	1	4
Descentralização do vão	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12
														d	3
														D	1
														FM	1,5
														GRE	4,2
														<b>GRF</b>	<b>6,3</b>

## 5.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 foram observados 2 dos 9 danos possíveis. Na Figura 34 é possível observar a ocorrência de lixiviação na região dos muros. Enquanto na Figura 35 é possível observar a ocorrência de fissuras. Para ambos os danos foi utilizado FI igual a 1.

Figura 34 e 35 - Lixiviação e fissuras



Fonte: Marques et al. (2020).

Com os dois danos identificados com FI = 1 a Família apresentou um GRF igual a 6,7 (Tabela 24).

Tabela 24 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos														
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	1	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	3	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Desplacamentos	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20	
Exposição de agregados	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Presença de vegetação	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36	
														d	9	
														D	2	
														FM	3,0	
														GRE	2,2	
														<b>GRF</b>	<b>6,6</b>	

#### 5.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram identificadas 4 dos 10 possíveis danos. Na Figura 36 é possível observar a ocorrência de erosões localizadas em diversas regiões das calhas e no detalhe em amarelo é possível observar a presença de hidróxido de cálcio lixiviado. Para erosão foi atribuído FI igual a 2 e para a lixiviação o FI adotado foi igual a 1.

Figura 36 - Desplacimento e lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

Na Figura 37 abaixo é possível observar processo erosivo que ocasionou a exposição de agregados graúdos. Foi atribuído FI igual a 1. Além disso, também foram observadas fissuras na calha do vertedor já citadas no tópico 5.1. Para esse dano o FI adotado foi 1.

Figura 37 - Exposição de agregadfos



Fonte: Marques e Abreu (2021a).

A Tabela 25 apresenta o cálculo do GRF, como é possível observar o valor do GRF é igual a 19,1.



Tabela 25 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)													
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	FI	Majorar?	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	4
Fissuras com orientação	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	2	8
Surgências / lixiviação	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	3	12
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16
Desplacamentos	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	N	2	10	20
Exposição de agregados	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N	1	6	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32
Irregularidade gradual	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36
Presença de vegetação	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0	40
														d	10
														D	4
														FM	2,0
														GRE	9,5
														<b>GRF</b>	<b>19,0</b>

### 5.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

O GV e GVH foram definidos como 1 e 1,05 respectivamente. O fator relacionado ao porte da barragem foi de 1,1. Com base nas informações apresentadas nos tópicos anteriores é possível calcular o GR das superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Porto Colômbia foi de 13,8. Sendo classificado como dano muito baixo (Tabela 26).

Tabela 26 - Cálculo do GR

GR			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	10,4	1	10,4
2 - Comportas, acionadores mecânicos	6,3	2	12,6
3 - Muros laterais e entre vãos	6,6	3	19,8
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	19,0	4	76,0
		GVH	1,05
		GV	1
		FP	1,1
		<b>GR</b>	<b>13,7</b>

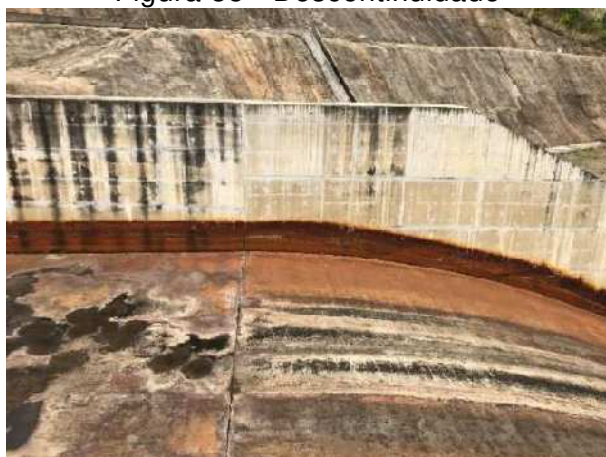
## 6 UHE BATALHA

Abaixo serão apresentados detalhadamente os danos identificados na UHE Batalha.

### 6.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Nas juntas foram identificados 2 dos 7 danos possíveis. Na Figura 38 é possível observar a ocorrência de uma descontinuidade na junta. Para o dano o FI adotado foi igual a 1.

Figura 38 - Descontinuidade



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

Na Figura 39, é possível observar o início do deslocamento de material vedante na junta. O FI atribuído ao dano foi 1.

Figura 39 - Deslocamento



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

O GRF calculado para a família 1 é igual a 7,4 (Tabela 27).

Tabela 27 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:		1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem							
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Desalinhamento	1	1	1	1	N	1	1	4	
Surgências / lixiviação	2	0	0	0	N	0	0	8	
Desplacamentos	3	1	0	1	N	1	3	12	
Obstáculos/obstruções	4	0	0	0	N	0	0	16	
Movimentação diferencial	5	0	0	0	N	0	0	20	
Rupturas	6	0	0	0	N	0	0	24	
Presença de vegetação	7	0	0	0	N	0	0	28	
							d	7	
							D	2	
							FM	2,3	
							GRE	3,6	
							<b>GRF</b>	<b>8,3</b>	

## 6.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Nas comportas e acionadores mecânicos o único dano identificado foi a falta de vedação das comportas. O FI adotado inicialmente foi 1, porém pela recorrência o FI foi majorado para 2.

Tabela 28 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:		2 - Comportas e acionadores mecânicos							
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Falta de vedação de comporta	1	1	1	1	S	2	2	4	
Descentralização do vão	2	0	0	0	N	0	0	8	
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	0	0	N	0	0	12	
							d	3	
							D	1	
							FM	1,5	
							GRE	8,3	
							<b>GRF</b>	<b>12,5</b>	

## 6.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 foram observados 4 danos dos 8 possíveis. Na Figura 40 é possível observar a ocorrência de lixiviação em fissuras verticais no muro. Para a lixiviação o FI adotado foi 1.

Figura 40 - Lixiviação



Fonte: Marques et al. (2020).

Na Figura 41 estão presentes a erosão no pé do muro e a exposição de agregados. Inicialmente, a erosão teria FI igual a 1, porém como a erosão foi apresentada em toda extensão do muro o seu FI foi majorado para 2. No Detalhe da foto é possível observar a exposição de agregado e da armadura também teve FI igual a 2.

Figura 41 -Exposição de agregados



Fonte: Marques et al. (2020).

Em função dos danos apresentados anteriormente foi calculado o valor de GRF, que apresentou resultado igual a 34,7 (Tabela 29).

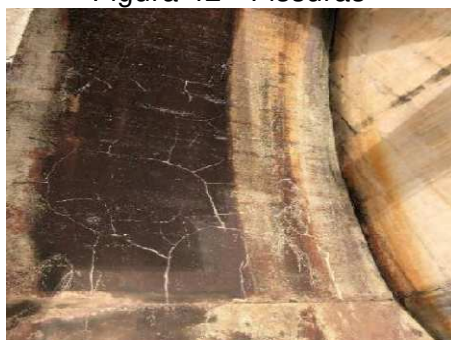
Tabela 29 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos						
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	1	1	1	N	1	1	4
Fissuras com orientação	2	0	0	0	N	0	0	8
Surgências / lixiviação	3	1	0	1	N	1	3	12
Obstáculos	4	0	1	1	N	1	4	16
Desplacamentos	5	0	0	0	N	0	0	20
Exposição de agregados	6	2	0	2	N	2	12	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	2	0	2	N	2	14	28
Movimentação	8	0	0	0	N	0	0	32
Presença de vegetação	9	0	0	0	N	0	0	36
							d	9
							D	5
							FM	1,5
							GRE	18,9
							<b>GRF</b>	<b>28,4</b>

#### 6.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram apresentado 2 danos, fissuras com orientação e aleatórias. A Figura 42 observa-se a ocorrência de fissuras sem orientação com origem provável na retração por secagem. O FI adotado para o dano foi igual a 1.

Figura 42 - Fissuras



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

Na Figura 43, é possível observar a ocorrência de fissuras verticais e horizontais próximas à comporta. Para as fissuras foi atribuído FI igual a 1.

Figura 43 - Fissuras com orientação



Fonte: Marques et al. (2020).

Com base nos danos apresentados foi calculado o GRF da superfícies de concreto, apresentando GRF igual a 4,5 (Tabela 30).

Tabela 30 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:	4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)							
	Danos	FG	V1	V 2	FI	Majorar	FI	FGxFI
Fissuras aleatórias	1	1	1	1	N	1	1	4
Fissuras com orientação	2	1	0	1	N	1	2	8
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	N	0	0	12
Obstáculos	4	0	0	0	N	0	0	16
Desplacamentos	5	0	0	0	N	0	0	20
Exposição de agregados	6	0	0	0	N	0	0	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	0	0	N	0	0	32
Irregularidade gradual	9	0	0	0	N	0	0	36
Presença de vegetação	10	0	0	0	N	0	0	40
							d	10
							D	2
							FM	3,3
							GRE	1,4
							<b>GRF</b>	<b>4,6</b>

## 6.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Para o cálculo do GR os parâmetros GV e GVH foram definidos como 1,0 e 1,05 respectivamente. O parâmetro relacionados ao porte da barragem FP foi de 1,15. Com base nas informações apresentadas nos tópicos anteriores é possível calcular o GR das superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Batalha, o valor obtido foi de 16,5 (Tabela 31). Sendo classificado como dano muito baixo.

Tabela 31 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	8,3	1	8,3
2 - Comportas, acionadores mecânicos	12,5	2	25,0
3 - Muros laterais e entre vãos	28,4	3	85,2
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	4,6	4	18,4
		GVH	1
		GV	1,05
		FP	1,15
		<b>GR</b>	<b>16,5</b>

## 7 UHE SERRA DO FACÃO

Na UHE Serra do facão dois danos apresentaram recorrência superior a 70%, foram as fissuras e falta de vedação da comporta (Tabela 32). A seguir serão apresentados os danos observados e suas respectivas classificações.

Tabela 32 - Ocorrência de danos por vão

Danos	Vão 1	Vão 2	Total	%
Surgência			0	0%
Fissuras	Sim	Sim	2	100%
Lixiviação		Sim	1	50%
Exposição de agregados			0	0%
Erosão	Sim		1	50%
Desplacamento	Sim		1	50%
Presença de vegetação	Sim		1	50%
Falta de vedação da comporta	Sim	Sim	2	100%
Número de ocorrências	5	3		

### 7.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Na Família 2 ocorreram 2 dos 8 danos possíveis. Na Figura 44 é possível observar a ocorrência de lixiviação. O FI adotado foi de 1.

Figura 44 - Lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

Na Figura 45, é possível observar um processo erosivo na junta próxima a comporta com presença de vegetação. O FI atribuído ao dano foi 1.



Figura 45 - Presença de vegetação



Fonte: Marques et al. (2020).

O GRF da Família 1 foi de 18,5 (Tabela 33).

Tabela 33 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:		1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem						
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Desalinhamento	1	0	0	0	N	0	0	4
Surgências / lixiviação	2	1	1	1	N	1	2	8
Desplacamentos	3	0	0	0	N	0	0	12
Obstáculos/obstruções	4	0	0	0	N	0	0	16
Movimentação diferencial	5	0	0	0	N	0	0	20
Rupturas	6	0	0	0	N	0	0	24
Presença de vegetação	7	1	0	1	N	1	7	28
							d	7
							D	2
							FM	2,3
							GRE	8,0
							<b>GRF</b>	<b>18,4</b>

## 7.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Na Família 2 o único dano observado foi a falta de vedação de comporta. O FI atribuído ao dano, apresentado na Figura 46, foi de 2 pela recorrência do dano.

Figura 46 - Acúmulo de água no vertedouro



Fonte: Marques et al. (2020).

O GRF para comportas e acionadores mecânicos foi de 12,5 (Tabela 34).

Tabela 34 - Cálculo do GRF da Família 2

<b>Família de elementos:</b>	<b>2 - Comportas e acionadores mecânicos</b>							
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Falta de vedação de comporta	1	1	1	1	S	2	2	4
Descentralização do vão	2	0	0	0	N	0	0	8
Obstruções que impedem o acionamento	3	0	0	0	N	0	0	12
							d	3
							D	1
							FM	1,5
							GRE	8,3
							<b>GRF</b>	<b>12,5</b>

### 7.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 foi identificada apenas 1 dano, sendo ele a ocorrência de lixiviação. Em partes do muro é possível observar a ocorrência de lixiviação em um tom amarronzado (Figura 47 e 48), essa coloração pode ser um indício de que a lixiviação está atacando a armadura. Nesse caso é recomendado realizar análise química do material lixiviado para confirmar se o processo de lixiviação está atingindo a armadura. Ao dano foi atribuído FI igual a 2.

Figura 47 e 48 - Lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

Assim, com base nas informações apresentadas anteriormente foi calculado o GRF. Como está apresentado na Tabela 35, o GRF calculado foi de 15,0.

Tabela 35 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos						
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	N	0	0	4
Fissuras com orientação	2	0	0	0	N	0	0	8
Surgências / lixiviação	3	0	2	2	N	2	6	12
Obstáculos	4	0	0	0	N	0	0	16
Desplacamentos	5	0	0	0	N	0	0	20
Exposição de agregados	6	0	0	0	N	0	0	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	0	0	N	0	0	32
Presença de vegetação	9	0	0	0	N	0	0	36
							d	9
							D	1
							FM	4,5
							GRE	3,3
							<b>GRF</b>	<b>14,9</b>

#### 7.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Na Família 4 foram observados 3 danos na estrutura. Na Figura 49 é possível identificar a ocorrência de fissura longitudinal ao longo da calha do vertedouro. O FI atribuído ao dano foi equivalente a 2 pela recorrência observada do dano.

Figura 49 - Fissura longitudinal



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

Na Figura 50 é possível observar a ocorrência de fissuras transversais com ocorrência de lixiviação (amarelo) e início de deslocamento do concreto (vermelho). Aos danos foi atribuído FI igual a 1.

Figura 50 - Deslocamento e lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021b).

A Tabela 36 apresenta o cálculo de todos os parâmetros necessários para o cálculo do GRF. O GRF da Família 4 foi de 15,0.

Tabela 36 - Cálculo do GRF da Família 4

<b>Família de elementos:</b>	<b>4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)</b>							
Danos	FG	V1	V2	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	N	0	0	4
Fissuras com orientação	2	2	0	2	N	2	4	8
Surgências / lixiviação	3	1	1	1	N	1	3	12
Obstáculos	4	0	0	0	N	0	0	16
Deslocamentos	5	1	0	1	N	1	5	20
Exposição de agregados	6	0	0	0	N	0	0	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	0	0	N	0	0	32
Irregularidade gradual	9	0	0	0	N	0	0	36
Presença de vegetação	10	0	0	0	N	0	0	40
							d	10
		-					D	3
							FM	2,5
							GRE	5,5
							<b>GRF</b>	<b>13,8</b>

## 7.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

O GV e GVH foram definidos como 1,15 e 1,0 respectivamente. Enquanto o parâmetro relacionado ao porte do empreendimento FP foi de 1,1. Com base nas informações apresentadas nos tópicos anteriores é possível calcular o GR das superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Serra do Facão foi de 18,1 (Tabela 37). Sendo classificado como dano muito baixo.

Tabela 37 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	18,4	1	18,4
2 - Comportas, acionadores mecânicos	12,5	2	25,0
3 - Muros laterais e entre vãos	14,9	3	44,7
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	13,8	4	55,2
		GVH	1
		GV	1,15
		FP	1,1
		<b>GR</b>	<b>18,1</b>

## 8 UHE SERRA DA MESA

Na UHE Serra da Mesa apenas os danos de deslocamento e descontinuidades apresentaram recorrência superior aos 70 % (Tabela 38).

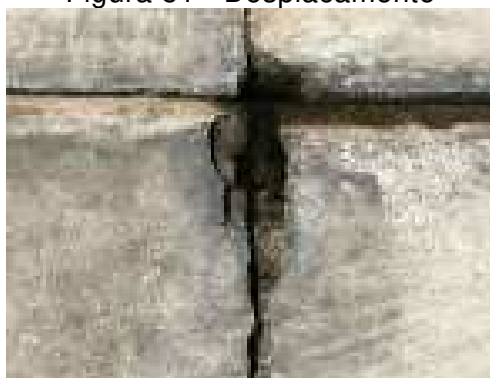
Tabela 38 - Ocorrência de danos por vão

Danos	Vão 1	Vão 2	Vão 3	Vão 4	Vão 5	Total	%
Surgência						0	0%
Fissuras			Sim	Sim	Sim	3	60%
Lixiviação						0	0%
Exposição de agregados						0	0%
Erosão						0	0%
Deslocamento		Sim	Sim	Sim	Sim	4	80%
Descontinuidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	5	100%
Falta de vedação da comporta						0	0%
Número de ocorrências	1	2	3	3	3		

### 8.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Nas juntas de concretagem só foi observada a ocorrência de deslocamento (Figura 51). O FI adotado para o dano foi de 1.

Figura 51 - Deslocamento



Fonte: Marques e Abreu (2021c).

Assim o GRF da Família 1 foi de 9,4 (Tabela 39).

Tabela 39 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:	1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem											
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Desalinhamento	1	0	0	0	0	0	0	N	0	0	4	
Surgências / lixiviação	2	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Deslocamentos	3	0	1	1	1	0	1	N	1	3	12	
Obstáculos/obstruções	4	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Movimentação diferencial	5	0	0	0	0	0	0	N	0	0	20	
Rupturas	6	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Presença de vegetação	7	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
										d	7	
										D	1	
										FM	3,5	
										GRE	2,7	
										<b>GRF</b>	<b>9,5</b>	

## 8.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Nas comportas não foram observados danos, sendo assim o GRF da Família 2 foi definido como 0.

## 8.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3, o dois danos observados foram o deslocamento no muro do vão 3 do vertedouro (Figura 52) e fissuras com orientação (Figura 53). O FI adotado para o deslocamento foi de 1. Para as fissuras o FI adotado também foi de 1.

Figura 52 e 53 - Deslocamento e fissuras



Fonte: Marques e Abreu (2021c).



O GRF calculado para a Família 3 foi de 11,7 (Tabela 40).

Tabela 40 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos										
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	0	0	0	N	0	0	4	
Fissuras com orientação	2	1	0	0	0	1	1	N	1	2	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Deslocamentos	5	0	1	1	0	1	1	S	2	5	20	
Exposição de agregados	6	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Presença de vegetação	9	0	0	0	0	0	0	N	0	0	36	
										d	9	
										D	2	
										FM	3,0	
										GRE	3,9	
										<b>GRF</b>	<b>11,7</b>	

#### 8.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram identificados 3 danos. Na Figura 54 é possível identificar fissuras sem orientação. Ao danos foi atribuído FI igual a 1.

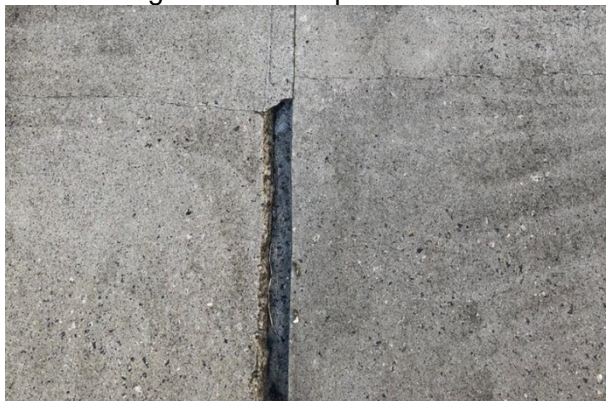
Figura 54 - Fissuras sem orientação



Fonte: Marques et al. (2020).

Além disso, é possível observar o deslocamento do concreto na Figura 55. Assim como nas demais famílias o FI adotado foi de 1.

Figura 55 - Desplacamento



Fonte: Marques e Abreu (2021c).

Na Figura 56 é possível observar a ocorrência de irregularidades na calha do vertedouro, o FI do dano foi de 1.

Figura 56 - Irregularidade



Fonte: Marques e Abreu (2021c).

Assim o GRF da Família 4 foi de 17,0 (Tabela 41).

Tabela 41 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)										
Danos	FG	V1	V2	V3	V4	V5	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	1	0	0	1	0	1	N	1	1	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	0	0	N	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	0	0	0	N	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	0	0	N	0	0	16	
Deslocamentos	5	1	1	1	1	0	1	N	1	5	20	
Exposição de agregados	6	0	0	0	0	0	0	N	0	0	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	0	0	N	0	0	32	
Irregularidade gradual	9	1	1	1	1	1	1	N	1	9	36	
Presença de vegetação	10	0	0	0	0	0	0	N	0	0	40	
										d	10	
										D	3	
										FM	2,5	
										GRE	6,8	
										<b>GRF</b>	<b>17,0</b>	

## 8.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Os parâmetros GV e GVH necessários para o cálculo do Grau de Risco da estrutura foram definidos como 1,10. Por outro lado, o parâmetro relacionado ao porte do barramento foi empregado o valor 1,20.

Tabela 42 - Cálculo do GR

GR			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	9,5	1	9,5
2 - Comportas, acionadores mecânicos	0,0	2	0,0
3 - Muros laterais e entre vãos	11,7	3	35,1
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	17,0	4	68,0
		GVH	1,1
		GV	1,1
		FP	1,2
		<b>GR</b>	<b>16,3</b>

As superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Serra da Mesa apresentaram GR equivalente a 16,3. que de acordo com a classificação proposta na metodologia corresponde a dano muito baixo.

## 9 UHE SIMPLÍCIO/ ANTA

Na UHE Simplício existe a presença de dois barramentos, um vertedouro com comportas (Figura 58) e outro vertedouro em degraus (Figura 57). Ambos serão classificados individualmente.

Figura 57 - Vertedouro em degraus



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

Figura 58 - Vertedouro com comportas



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

### 9.1 VERTEDOURO DE COMPORTAS (SIMPLÍCIO)

No vertedouro de comportas da UHE Simplício, assim como na UHE Porto Colômbia, não foi possível realizar a classificação de cada vão individualmente. Sendo assim, para cada manifestação patológica observada na usina foi adotado o mesmo valor de Fator de Intensidade para todos os vãos.

#### 9.1.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

No vertedouro com comportas não foram observados danos nas juntas de dilatação e concretagem.

### 9.1.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Nas comportas também não foram observados danos, assim como a Família 1.

### 9.1.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 foi observada a ocorrência de 2 danos. Na Figura 59, é possível observar a ocorrência de fissuras e nas fissuras é observada a presença de hidróxido de cálcio lixiviado. O FI atribuído a lixiviação foi equivalente a 1.

Figura 59 - Lixiviação



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

Na Figura 60 é possível observar a erosão na base do muro que originaram deslocamentos pequenos. Apesar da dificuldade para realizar a avaliação em função do fluxo de água, aparentemente o dano ocorre por toda extensão do muro, assim o FI foi majorado de 1 para 2.

Figura 60 - Erosão com deslocamento



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

Assim foi calculado o GRF da Família 1 que foi igual a 21,7 (Tabela 43).

Tabela 43 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos							
Danos	FG	V1	V2	V3	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	0	N	0	0	4
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	N	0	0	8
Surgências / lixiviação	3	1	1	1	1	N	1	3	12
Obstáculos	4	0	0	0	0	N	0	0	16
Desplacamentos	5	2	2	2	2	N	2	10	20
Exposição de agregados	6	0	0	0	0	N	0	0	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	N	0	0	28
Movimentação	8	0	0	0	0	N	0	0	32
Presença de vegetação	9	0	0	0	0	N	0	0	36
								d	9
								D	2
								FM	3,0
								GRE	7,2
								<b>GRF</b>	<b>21,6</b>

#### 9.1.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foi observado um dano. Na Figura 61 é possível observar a ocorrência de deslocamento na superfície do concreto da calha do vertedouro resultando na exposição de agregados. Para a exposição de agregados o FI adotado foi igual a 1.

Figura 61 - Desplacamentos



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

O GRF da Família 4 foi de 13,6 (Tabela 44).

Tabela 44 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)								
Danos	FG	V1	V2	V3	FI	Majorar	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)	
Fissuras aleatórias	1	0	0	0	0	N	0	0	4	
Fissuras com orientação	2	0	0	0	0	N	0	0	8	
Surgências / lixiviação	3	0	0	0	0	N	0	0	12	
Obstáculos	4	0	0	0	0	N	0	0	16	
Deslocamentos	5	0	0	0	0	N	0	0	20	
Exposição de agregados	6	1	1	1	1	N	1	6	24	
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	0	0	N	0	0	28	
Movimentação	8	0	0	0	0	N	0	0	32	
Irregularidade gradual	9	0	0	0	0	N	0	0	36	
Presença de vegetação	10	0	0	0	0	N	0	0	40	
									d	10
									D	1
									FM	5,0
									GRE	2,7
									<b>GRF</b>	<b>13,5</b>

### 9.1.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Os parâmetros GV e GVH necessários para o cálculo do Grau de Risco da estrutura foram definidos como 1,2 e 1,05 respectivamente. O parâmetro FP adotado foi de 1,1.

Tabela 45 - Cálculo do GR

GR			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	0,0	1	0,0
2 - Comportas, acionadores mecânicos	0,0	2	0,0
3 - Muros laterais e entre vãos	21,6	3	64,8
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	13,5	4	54,0
		GVH	1,05
		GV	1,2
		FP	1,1
		<b>GR</b>	<b>16,5</b>

As superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Simplício apresentaram GR equivalente a 16,5 (Tabela 45), que de acordo com a classificação proposta na metodologia corresponde a dano muito baixo.



## 9.2 VERTEDOIRO COM DEGRAUS

### 9.2.1 JUNTAS DE DILATAÇÃO E CONCRETAGEM

Os deslocamentos apresentados na Figura 62 ocorrem em toda a estrutura do barramento. Na família 1 o FI adotado para o dano seria de 1, mas pela recorrência foi majorado para 2. Como apresenta a Tabela 46, o GRF da Família 1 é igual a 18,8.

Figura 62 - Deslocamentos



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

Tabela 46 - Cálculo do GRF da Família 1

Família de elementos:	1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem			
Danos	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Desalinhamento	1	0	0	4
Surgências / lixiviação	2	0	0	8
Deslocamentos	3	2	6	12
Obstáculos/obstruções	4	0	0	16
Movimentação diferencial	5	0	0	20
Rupturas	6	0	0	24
Presença de vegetação	7	0	0	28
			d	7
			D	1
			FM	3,5
			GRE	5,4
			<b>GRF</b>	<b>18,9</b>

### 9.2.2 COMPORTAS E ACIONADORES MECÂNICOS

Como no barramento não tem a existência dessa família, será gerado o parâmetro GRF assim como o FR da família. Como orienta o texto da metodologia.

### 9.2.3 MUROS LATERAIS E ENTRE VÃOS

Na Família 3 foi observada a ocorrência de fissuras aleatórias no muro ( Figura 63). O FI adotado para o dano foi de 1.

Figura 63 - Fissuras aleatórias



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

Para a Família 3 o GRF calculado foi de 2,5 (Tabela 47).

Tabela 47 - Cálculo do GRF da Família 3

Família de elementos:	3 - Muros laterais e entre vãos			
Danos	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	1	1	4
Fissuras com orientação	2	0	0	8
Surgências / lixiviação	3	0	0	12
Obstáculos	4	0	0	16
Desplacamentos	5	0	0	20
Exposição de agregados	6	0	0	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	28
Movimentação	8	0	0	32
Presença de vegetação	9	0	0	36
			d	9
			D	1
			FM	4,5
			GRE	0,6
			<b>GRF</b>	<b>2,7</b>

### 9.2.4 SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Nas superfícies de concreto foram identificados dois danos. Nas 64 e 65 é possível observar a ocorrência de deslocamentos e fissuras respectivamente. Para surgência e fissuras o FI adotado foi 1, enquanto para os deslocamentos o FI inicialmente seria 1, mas foi majorado pois o dano acontece em toda extensão do barramento. Assim o FI de deslocamentos foi de 2.

Figura 64 e 65 - Deslocamentos e surgência



Fonte: Marques e Abreu (2021e).

Assim o GRF encontrado para a Família 4 foi de 16,7 (Tabela 48).

Tabela 48 - Cálculo do GRF da Família 4

Família de elementos:	4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)			
Danos	FG	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1	1	1	4
Fissuras com orientação	2	0	0	8
Surgências / lixiviação	3	0	0	12
Obstáculos	4	0	0	16
Deslocamentos	5	2	10	20
Exposição de agregados	6	0	0	24
Exposição ou corrosão da armadura	7	0	0	28
Movimentação	8	0	0	32
Irregularidade gradual	9	0	0	36
Presença de vegetação	10	0	0	40
			d	10
			D	2
			FM	3,3
			GRE	5,0
			<b>GRF</b>	<b>16,5</b>

### 9.2.5 GRAU DE RISCO DA ESTRUTURA

Os parâmetros GV e GVH necessários para o cálculo do Grau de Risco da estrutura foram definidos como 1,2 e 1,2 respectivamente. No caso do GV como o barramento é em degraus verde sempre que a água supera o nível da crista do vertedouro, porém não se tem o registro dos dias de vertimento assim foi adotado o valor máximo para o parâmetro. Quanto ao GVH, foi adotado o valor máximo pela falta de registro das vazões vertidas pelo barramento. Já o parâmetro relacionado ao porte da barragem (FP) foi adotado o valor de 1,1.

Tabela 49 - Cálculo do GR

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem	18,9	1	18,9
2 - Comportas, acionadores mecânicos	0,0	0	0,0
3 - Muros laterais e entre vãos	2,7	3	8,1
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)	16,5	4	66,0
		GVH	1,2
		GV	1,2
		FP	1,1
		<b>GR</b>	<b>18,4</b>

As superfícies hidráulicas da estrutura extravasora da UHE Simplício representaram GR equivalente a 14,7 (Tabela 49). De acordo com a classificação proposta na metodologia corresponde a dano muito baixo.

**APÊNDICE B – QUADROS DE APOIO PARA APLICAÇÃO  
DA METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO**

Neste apêndice serão apresentadas as tabelas de apoio e lista de equações para aplicação da metodologia de classificação de risco de superfícies de concreto de estruturas descarregadoras de cheias.

Tabelas de 1 até 5 - Tabelas de apoio

Família de elementos:		1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem							
Danos	FG	Vi	...	Vn	$FI_{máx}$	Majorar?	FI	FG x FI	FG (lim) x FI(lim)
Desalinhamento	1								4
Surgências / lixiviação	2								8
Deslocamentos	3								12
Obstáculos/obstruções	4								16
Movimentação diferencial	5								20
Rupturas	6								24
Presença de vegetação	7								28
									d
									D
									FM
									GRE
									<b>GRF</b>

Família de elementos:		2 - Comportas e acionadores mecânicos							
Danos	FG	Vi	...	Vn	$FI_{máx}$	Majorar?	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Falta de vedação da comporta	1								4
Descentralização do vão	2								8
Obstruções que impedem o acionamento	3								12
									d
									D
									FM
									GRE
									<b>GRF</b>

Família de elementos:		3 - Muros laterais e entre vãos							
Danos	FG	V <sub>i</sub>	...	V <sub>n</sub>	$FI_{máx}$	Majorar?	FI	FGxFI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1								4
Fissuras com orientação	2								8
Surgências / lixiviação	3								12
Obstáculos	4								16
Desplacamentos	5								20
Exposição de agregados	6								24
Exposição ou corrosão da armadura	7								28
Movimentação	8								32
Presença de vegetação	9								36
								d	
								D	
								FM	
								GRE	
								<b>GRF</b>	

Família de elementos:		4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)							
Danos	FG	V <sub>i</sub>	...	V <sub>n</sub>	$FI_{máx}$	Majorar?	FI	FG x FI	FG (lim)xFI(lim)
Fissuras aleatórias	1								4
Fissuras com orientação	2								8
Surgências / lixiviação	3								12
Obstáculos	4								16
Desplacamentos	5								20
Exposição de agregados	6								24
Exposição ou corrosão da armadura	7								28
Movimentação	8								32
Irregularidade gradual	9								36
Presença de vegetação	10								40
								d	
								D	
								FM	
								GRE	
								<b>GRF</b>	

<b>GR</b>			
Família de elementos:	GRF	FR	GRF X FR
1 - Juntas de dilatação e juntas de concretagem		1	
2 - Comportas, acionadores mecânicos		2	
3 - Muros laterais e entre vãos		3	
4 - Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)		4	
		GVH	
		GV	
		FP	
		<b>GR</b>	

Fonte: Autor (2021).

A Tabela abaixo apresenta a lista de todas as equações utilizadas durante a aplicação da metodologia de classificação de risco.

Tabela 6 - Lista de fórmulas

Fórmulas da metodologia:	
1	$G_{re} = \frac{\sum(FG \times FI)}{\sum(FG \times FI_{lim})} \times 100$
2	$G_{RF} = FM \times G_{RE_i}$
3	$FM = \frac{d}{D + 1} \text{ se } FM \geq 1$
4	<i>Quando <math>FM \leq 1</math>, adota – se <math>FM = 1</math></i>
5	$V = \frac{DV}{DRD} \times 100$
6	$VH = \frac{Q_{m\acute{a}x \text{ vertida}}}{Q_{projeto}} \times 100$
7	$X = H^2 \times \sqrt{V}$
8	$GR = \frac{\sum FR \times G_{RF}}{\sum FR} \times FVH \times FV \times FP$

Fonte: Autor (2021).



## **APÊNDICE C – ROTEIRO E FICHAS DE INSPEÇÃO**

Durante a inspeção é importante observar todas as zonas das estruturas descarregadoras de cheias dos barramentos. Usualmente, de um determinado ponto é possível observar pequenos detalhes que estejam de 3 a 10 metros de distância dependendo da região ou de outras condições. Quanto a trajetória adotada, não existem restrições entre realizar ela de forma paralela ou zigue-zague, entretanto para a adequada avaliação da estrutura é fundamental que toda a superfície da estrutura seja coberta pela inspeção.

De forma regular, enquanto se caminha pela estrutura devem ser realizadas paradas para observar a condição da estrutura em todas as direções. Além da análise da região de forma próxima, a estrutura também deve ser observada à distância, de uma forma geral, pois algumas anomalias podem ser facilmente detectadas a uma distância maior. Durante as inspeções devem ser fotografadas todas as manifestações patológicas observadas para realizar o registro da localização da manifestação patológica na estrutura.

A seguir será apresentado um roteiro de inspeção típico que pode servir de base para a realização das inspeções em outros barramentos e a aplicação da metodologia proposta no estudo.

Inicialmente deve ser realizada uma caminhada geral pela crista do barramento, realizando uma observação prévia das manifestações patológicas presentes nas estruturas descarregadoras de cheias. Posteriormente deve ser realizada a caminhada pela calha do vertedouro para observar de forma próxima as manifestações patológicas das estruturas descarregadoras de cheias.

As fichas de inspeção são realizadas individualmente para cada vão do vertedouro, sendo assim aconselha-se que a caminhada seja avaliada um vão após o outro. No exemplo apresentado abaixo, é apresentado um trajeto típico para avaliação da estrutura extravasora do vertedouro da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho. Inicialmente caminha-se pela calha do vertedouro, de jusante para montante, realizando paradas e observando as superfícies de concreto (Família 4), Muros laterais (Família 3) e Juntas de dilatação e concretagem (Família 1).

Ao chegar na região das comportas, deve-se obrigatoriamente realizar uma pausa para observação dos danos na região. Tal pausa deve ser realizada pois na região das comportas estão presentes as 4 famílias da metodologia, então devem ser preenchidas as planilhas para cada uma delas, assim como o registro dos danos observados e suas localizações. O processo deve ser repetido para todos os vãos da

estrutura. A imagem a seguir apresenta um roteiro padrão para realização das inspeções.

Figura 1 - Roteiro de inspeção



Fonte: Marques e Abreu (2021a) adaptado pelo autor.

Após a realização do roteiro de inspeção pela calha do vertedouro é recomendado realizar uma nova caminhada geral sobre o eixo do barramento, acima das comportas, caso a disposição da usina permita. Essa caminhada final, serve para fazer uma avaliação geral da estrutura após a observação de todos os danos observados na estrutura.

A seguir são apresentadas as fichas de inspeções para realização da inspeção nas usinas com base na metodologia proposta. Além das colunas com os 5 valores possíveis de FI, também é incluída uma coluna denominada NI referente a Não Inspeccionada. Tal classificação é adotada quando um item que deveria ser examinado, por motivos que não dependam dos inspetores, não foi possível ser examinado. Quando isso ocorrer, deve haver uma justificativa para a não realização da inspeção. Caso um item seja inspeccionado e não apresente a manifestação patológica em questão, deve ser adotado o FI igual a zero.

Tabela 1 a 4 - Fichas de inspeção

Ficha de inspeção								
Barragem:								
Vistoriador:								
Vão		Data:						
	Dano	Fator de Intensidade (FI)						Observações:
Família 1	Juntas de dilatação e juntas de concretagem							
1	Desalinhamento	0	1	2	3	4	NI	
2	Surgências / lixiviação	0	1	2	3	4	NI	
3	Desplacamentos	0	1	2	3	4	NI	
4	Obstáculos/obstruções	0	1	2	3	4	NI	
5	Movimentação diferencial	0	1	2	3	4	NI	
6	Rupturas	0	1	2	3	4	NI	
7	Presença de vegetação	0	1	2	3	4	NI	
Anotações:								

Ficha de inspeção								
Barragem:								
Vistoriador:								
Vão		Data:						
	Dano	Fator de Intensidade (FI)						Observações:
Família 2	Comportas e acionadores mecânicos							
1	Falta de vedação da comporta	0	1	2	3	4	NI	
2	Descentralização do vão	0	1	2	3	4	NI	
3	Obstruções que impedem o acionamento	0	1	2	3	4	NI	
Anotações:								

Ficha de inspeção								
Barragem:								
Vistoriador:								
Vão		Data:						
	Dano	Fator de Intensidade (FI)						Observações:
Família 3	Muros laterais e entre vãos							
1	Fissuras aleatórias	0	1	2	3	4	NI	
2	Fissuras com orientação	0	1	2	3	4	NI	
3	Surgências / lixiviação	0	1	2	3	4	NI	
4	Obstáculos	0	1	2	3	4	NI	
5	Desplacamentos	0	1	2	3	4	NI	
6	Exposição de agregados	0	1	2	3	4	NI	
7	Exposição ou corrosão da armadura	0	1	2	3	4	NI	
8	Movimentação	0	1	2	3	4	NI	
9	Presença de vegetação	0	1	2	3	4	NI	
Anotações:								

Ficha de inspeção								
Barragem:								
Vistoriador:								
Vão		Data:						
	Dano	Fator de Intensidade (FI)						Observações:
Família 4	Superfícies de concreto (Vertedouro e bacia)							
1	Fissuras aleatórias	0	1	2	3	4	NI	
2	Fissuras com orientação	0	1	2	3	4	NI	
3	Surgências / lixiviação	0	1	2	3	4	NI	
4	Obstáculos	0	1	2	3	4	NI	
5	Desplacamentos	0	1	2	3	4	NI	
6	Exposição de agregados	0	1	2	3	4	NI	
7	Exposição ou corrosão da armadura	0	1	2	3	4	NI	
8	Movimentação	0	1	2	3	4	NI	
9	Irregularidade gradual	0	1	2	3	4	NI	
10	Presença de vegetação	0	1	2	3	4	NI	
Anotações:								