



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS:
ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

JULIANA PRANDO

**SEGURANÇA EM BARRAGENS COM MAIS DE 50 ANOS
NO ESTADO DE SANTA CATARINA**

Salvador
2021

JULIANA PRANDO

**SEGURANÇA EM BARRAGENS COM MAIS DE 50 ANOS
NO ESTADO DE SANTA CATARINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Orientador: Professor José Marques Filho
Professora de Metodologia: Professora Alzira Ribeiro Mota

Salvador
2021

JULIANA PRANDO

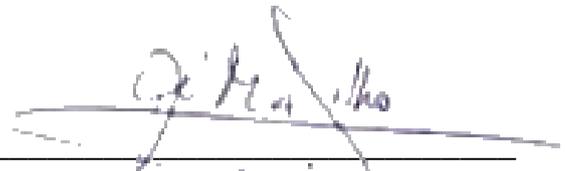
**SEGURANÇA EM BARRAGENS COM MAIS DE 50 ANOS
NO ESTADO DE SANTA CATARINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia.

Aprovado em 12 de janeiro de 2021.

Banca Examinadora

José Marques Filho – Orientador



Doutor em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul-

UFRG

Carlos Henrique de A. C. Medeiros



Doutor em Engenharia Geotécnica, University of Newcastle upon Tyne (Inglaterra).

RESUMO

As barragens construídas há mais de 50 anos, com o propósito de armazenar água para geração de energia no estado de Santa Catarina, foram executadas dentro de um contexto menos rigoroso em termos de normas e diretrizes. Sabendo que atualmente, nem todas atendiam aos critérios de estabilidade da Eletrobrás, a qual exige atender aos fatores de segurança para estabilidade global, em condições de carregamento para Tempo de Recorrência (TR) de 1000 anos, e ainda era preciso atender a Política Nacional de Segurança de Barragens, que surgiu após homologação da Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, os empreendedores necessitavam de orientação para verificar se as estruturas que constituem os barramentos em suas centrais geradoras de energia, estavam atendendo as novas diretrizes. Com o propósito de guiar os empreendedores, foi desenvolvido um procedimento para avaliação de segurança em estruturas com mais de 50 anos no estado de Santa Catarina. O procedimento foi aplicado com sucesso na PCH Celso Ramos, pertencente à Celesc Geração.

Palavras-chave: Procedimento, Barragem, Antigas, Estabilidade.

ABSTRACT

The dams built more than 50 years ago, with the purpose of storing water for power generation in the state of Santa Catarina, were executed within a less rigorous context in terms of standards and guidelines. Knowing that currently, not all met the stability criteria of Eletrobrás, which requires meeting the safety factors for global stability, under loading conditions for Recurrence Time (TR) of 1000 years, and it was still necessary to meet the National Dam Safety Policy, which arose after approval of Law No. 12,334, of September 20, 2010, entrepreneurs needed guidance to verify that the structures that make up the bus shacks in their power plants were meeting the new guidelines. With the purpose of guiding entrepreneurs, a procedure was developed for safety assessment in structures with more than 50 years in the state of Santa Catarina. The procedure was successfully applied at the Celso Ramos SHP, belonging to Celesc Geração.

Keywords: Procedure, Dam, Old, Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema estruturais sobre barramentos	12
Figura 2 – Tombamento de Barragem	15
Figura 3 – Bacias hidrográficas em Santa Catarina.....	19
Figura 4 – Regiões e sub-bacias hidrográficas de santa Catarina	21
Figura 5 – Barragens cadastradas em Santa Catarina – Imagem do site	28
Figura 6 – Localização das Barragens cadastradas em Santa Catarina – Imagem do site	28
Figura 7 – PCH Celso Ramos - Vista Aérea Geral de Jusante.....	39
Figura 8 – Barragem Margem Esquerda – Vista Aérea de Jusante	39
Figura 9 – Barragem Margem Direita – Vista Aérea de Jusante.....	40
Figura 10 – Barragem com reforço – Margem Esquerda	44
Figura 11 – Barragem com reforço – Margem Direita.....	45
Figura 12 – Resultados para condição normal – Barragem Margem Esquerda	45
Figura 13 – Resultados para condição excepcional – Barragem Margem Esquerda	46
Figura 14 – Resultados para condição normal – Barragem Margem Direita	46
Figura 15 – Resultados para condição excepcional – Barragem Margem Direita	47
Figura 16 – Barragem Margem Direita – Durante a obra	48
Figura 17 – Barragem Margem Direita – Obra concluída.....	49
Figura 18 – Barragem Margem Esquerda – Obra concluída.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Subsidiárias da Eletrobrás	11
Quadro 2 – Sub-bacias hidrográficas de Santa Catarina	19
Quadro 3 – Taxonomia geomorfológica do Estado de Santa Catarina	26

Quadro 4 – Barragens Antigas no Estado de Santa Catarina	29
Quadro 5 – Atividades e Produtos.....	32
Quadro 6 – Fatores de Segurança - Vertedouro	43
Quadro 7 – Fatores de Segurança - Barragem.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 ELETROBRÁS	10
2.1.1 Aspectos técnicos (critérios) definidos pela Eletrobrás	11
2.2 FATORES CLIMÁTICOS	17
2.2.1 Bacias Hidrográficas no Estado de Santa Catarina	18
2.2.2 Aspectos da Pluviosidade Catarinense	21
2.2.3 Cenários Atuais de Influência Meteorológica	22
2.3 FATORES GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS	24
2.3.1 Aspectos Gerais	24
2.3.2 Ambientação Geomorfológica	25
2.3.3 Ambientação Geológica Regional	26
3 BARRAGENS EM SANTA CATARINA	27
3.1 BARRAGENS CONSTRUÍDAS HÁ MAIS DE 50 ANOS	27
3.2 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA	30
3.2.1 Objetivo	30
3.2.2 Abrangência	30
3.2.3 Responsabilidades	31

3.2.4	Informação.....	31
3.2.5	Atividades e Produtos Típicos.....	31
3.2.6	Método Operacional.....	32
3.2.7	Análise Documental	32
3.2.8	Levantamentos de Campo	33
3.2.9	Inspeção de Segurança.....	34
3.2.10	Cálculo de Estabilidade Global	35
3.3	ESTUDO DE CASO	37
3.3.1	PCH Celso Ramos	37
4	CONCLUSÕES	50

1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo, o Estado de Santa Catarina investe em projetos que geram energia por fontes renováveis. Desde os primeiros imigrantes europeus até os dias de hoje, o crescimento industrial passou pela implantação de usinas geradoras que atendessem assim a demanda dos negócios. Atualmente, o Estado possui um significativo número de Pequenas Centrais Hidrelétricas, que precisam de cuidados e atenção. Muitas barragens foram construídas em um período com poucos protocolos e diretrizes. Com isso, as exigências e cuidados com os projetos, não são os mesmos observados e contemplados hoje pela legislação. As barragens em questão, possuem mais de cinco décadas de geração e até o momento não apresentaram maiores problemas estruturais.

Em setembro de 2010, foi criada a Política Nacional de Segurança de Barragens, através da Lei Nº 12.334, que delegou ao empreendedor a responsabilidade sobre a segurança das barragens. Por se tratar de barragens que possuem poucas informações de projeto, os empreendedores sentem dificuldade em apresentar documentos ao órgão fiscalizador, que atendam aos critérios de segurança atuais.

Atuando na área de segurança de barragens, observa-se a necessidade de desenvolver um procedimento para avaliação de segurança em estruturas com mais de 50 anos, que oriente os empreendedores, facilite as atividades de avaliação das estruturas e atenda os critérios da Política Nacional de Segurança de Barragens. Para isso, os objetivos passam pelo mapeamento das barragens mais antigas do Estado, com o levantamento de informações através de documentos, desenhos, fotografias, registros dos materiais empregados, estudos hidrológicos, entre outros, além de estudar e conhecer as exigências da legislação atual.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um procedimento para avaliação de segurança em estruturas com mais de 50 anos no estado de Santa Catarina, que oriente os empreendedores e atenda os critérios atuais.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para o desenvolvimento do procedimento são:

- 1 Conhecer a realidade das usinas antigas no estado de Santa Catarina;
- 2 Conhecer as exigências e critérios da Política Nacional de Segurança de Barragens para contemplá-los no procedimento;
- 3 Aplicar o procedimento em uma usina.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ELETROBRÁS

A Eletrobrás é atualmente a maior empresa de geração e transmissão de energia do país, responsável por cerca de 1/3 da capacidade geradora instalada no Brasil. Trata-se de uma empresa com capital aberto, ou seja, muitos de seus ativos estão comercializados à acionistas na Bolsa de Valores, tendo a União como sócio majoritário e responsável direto por importantes decisões da empresa.

Projetada pelo presidente da república Getúlio Vargas, em 1954, a então Centrais Elétricas Brasileiras S.A. passou por inúmeras dúvidas sobre sua efetiva criação. Vencidas as dificuldades iniciais e amparada por aceitação de que se tratava de uma excelente iniciativa para controle de um aspecto fundamental para o desenvolvimento nacional, foi por meio da Lei 3.890-A/61 que a Eletrobras foi oficialmente constituída. Em seu Artigo 2º, tem-se as atribuições definidas:

A ELETROBRÁS terá por objeto a realização de estudos, projetos, construção e operação de usinas produtoras e linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como a (VETADO) celebração dos atos de comércio decorrentes dessas atividades. (BRASIL, 1961)

Um ano depois, a empresa foi instalada, após sessão solene do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE). Em 2018, a estatal deixou de atuar no ramo da

distribuição de energia nos estados do Acre, Alagoas, Piauí, Rondônia, Roraima e Amazonas, devido a reorganização de suas atividades.

A empresa é composta por nove subsidiárias, da qual controlam de maneira descentralizada as atividades de geração e transmissão (hídrica e fotovoltaica) da energia. São elas:

Quadro 1 – Subsidiárias da Eletrobrás

Subsidiária	Região/Estado de Atuação
Eletrobrás Amazonas GT	AM
Eletrobrás CGT Eletrosul	Sul, MT, MS, RO e PI
Eletrobrás Chesf	Rio São Francisco
Eletrobrás Eletronorte	Amazônica
Eletrobrás Eletronuclear	Usinas Nucleares de Angra dos Reis – RJ
Eletrobrás Furnas	Sul, Sudeste, Norte e Centro-Oeste
Eletrobrás Cepel	Pesquisas em Energia
Eletrobrás Eletropar	SP
Itaipu Binacional	PR

Fonte: Eletrobrás, 2020.

Cabe ressaltar que a Eletrobrás CEPEL funciona como Centro de Pesquisas para a Eletrobrás.

2.1.1 Aspectos técnicos (critérios) definidos pela Eletrobrás

Quando se trata de projetos em geração de energia, a ELETROBRÁS assume papel central quanto aos critérios a serem adotados para as novas obras. Tal importância pode ser observada na aprovação de projetos encaminhados à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

A ANEEL utiliza os critérios definidos no manual chamado “CRITÉRIOS DE PROJETO CIVIL DE USINAS HIDRELÉTRICAS”, para balizar os itens como mínimo de

aceitação em termos de segurança de barragens. O documento foi publicado em 2003 com apoio do Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB e procurou estabelecer referências levando em consideração o desenvolvimento de projetos de viabilidade, projetos básicos e projetos de execução de usinas hidrelétricas, alcançados nas mais de cinco décadas de experiência. Assim, pode-se observar que:

Não se trata de um rol de exigências ou condições mínimas, mas de um documento de orientação ao estabelecimento do projeto com adequadas condições de qualidade técnica, segurança e custo. Características particulares podem indicar o interesse ou necessidade de alteração ou complementação dos critérios aqui definidos em casos específicos. (ELETROBRAS, 2003).

O manual é composto por 14 capítulos, que tratam de praticamente toda a parte estrutural de uma barragem. Critérios de Projeto Hidrológico/Hidráulico, Propriedade dos Materiais, Aspectos para Barragens de Concreto e Barragem de Terra/Enrocamento, Escavações, Auscultação e Instrumentação das Obras Civas são alguns dos importantes assuntos listados.

Para o trabalho aqui referenciado, é essencial esclarecer os aspectos relacionados a Estabilidade Global das barragens quanto a Flutuação, Tombamento e Deslizamento.

Figura 1 – Esquema estruturais sobre barramentos



Fonte: Possan *apud* Ketzer e Schäffer, 2019.

2.1.1.1 Fator de Segurança à Flutuação – FSF

Segundo o Scottini (2009), flutuar significa “ficar à superfície de um líquido, pairar, ficar à flor de.”. Um corpo que flutua está sujeito a várias forças. O princípio do físico

Arquimedes descrito por Silva, Araújo (2019), explica melhor essa influência: “todo corpo mergulhado em um líquido sofre um empuxo de baixo para cima igual ao peso do fluido por ele deslocado.”. Tem-se empuxo como uma força vertical que influencia diretamente sobre o objeto mergulhado no fluido. Isso significa que a diferença da massa do corpo em relação a densidade da água provocará a flutuação ou não deste corpo. Sendo assim tem-se os seguintes cenários:

- *Corpo afundado*: situação em que o peso do corporal é maior que o empuxo exercido pelo fluido.
- *Corpo em equilíbrio*: cenário em que a densidade do corpo e do fluido se equivalem.
- *Corpo flutuando*: ocorre quando o empuxo (força) exercida pelo fluido, é maior que o peso do corpo imerso.

Observa-se a influência do empuxo e o Princípio de Arquimedes aplicado em situações envolvendo submarinos, navios, e também nas barragens.

Quando se trata de barragens construídas com concreto armado, é importante observar o nível de água acumulado no reservatório, pois esse estará exercendo uma pressão sobre o barramento. Outro aspecto a ser levado em consideração é o possível depósito de materiais carregados pelo fluxo do rio, a qual deposita-se na base da barragem. A pressão hidrostática que acontece principalmente do fundo (baixo para cima) ocasiona uma tendência a flutuação da barragem. Seguindo os Princípios de Arquimedes, neste caso, o peso da barragem deverá ser maior do que a densidade da água do reservatório, a ponto de ocorrer a retenção do volume sem comprometer a estrutura.

Quando na fase do projeto, o cálculo de FSF envolve a soma das forças gravitacionais e de subpressão. O manual de critérios da Eletrobrás (2003) traz a seguinte fórmula:

$$1) FSF = \frac{\sum P}{\sum U}$$

Sendo,

FSF = fator de segurança à flutuação

P = forças verticais para baixo (pesos)

U = forças verticais para cima (subpressão)

Como orientação para um cálculo mais apurado, Eletrobrás (2003) define que:

Deverão ser desprezadas quaisquer contribuições favoráveis devidas à coesão e ao atrito entre blocos ou entre a estrutura e a fundação. As forças verticais deverão incluir as cargas permanentes mínimas das estruturas, o peso próprio de equipamentos permanentes, se instalados, e de lastros (água ou aterro) e sistemas de ancoragem, se utilizados durante determinados estágios da construção. Todas as cargas acidentais deverão ser ignoradas nas verificações de estabilidade.

2.1.1.2 Fator de Segurança ao Tombamento – FST

Outro importante fator a considerar em relação a estrutura é a capacidade de resistência ao tombamento. Para barragens de concreto, utiliza-se princípios ligados aos muros de arrimo. Segundo Pereira (2019), “Muro de arrimo é uma estrutura volumétrica formada por blocos destinadas a estabilizar encostas junto as edificações nas áreas urbanas, pontes, estradas ou ruas. A construção de um muro de arrimo representa sempre um elevado ônus no orçamento total de uma obra devido aos altos gastos com materiais como concreto e aço. Podem ser constituídos de paredes vertical ou quase vertical, sendo apoiados numa fundação rasa ou profunda.”. Ainda, os muros de arrimo podem ser dos mais variados tipos: de gravidade ou peso, de concreto armado e de concreto protendido.

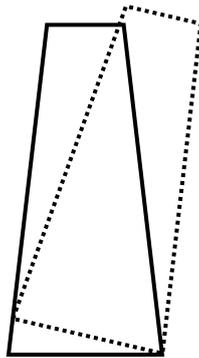
Barragens de concreto armado possuem características próprias por necessidade de cálculo da armadura da sapata e da barragem em si. Possuem geralmente formato em “L” (para altura não superior a dois metros), ou perfil clássico/especial (para alturas acima de 2 metros) podendo receber auxílio de tirantes em sua estrutura.

Para esses casos, existem os chamados “momentos”, que influenciam diretamente a estrutura tornando-a estável ou instável. Para Eletrobrás (2003), os momentos dividem-se em dois tipos:

- Momentos estabilizantes: são aspectos que proporcionam segurança, como o próprio peso da estrutura, cargas permanentes mínimas e o peso de equipamentos permanentes instalados.
- Momentos de tombamento: ao contrário do anterior, as cargas são desestabilizantes oriundas da pressão hidrostática (reservatório), subpressões causadas por acúmulo de resíduos na base, empuxo da terra, entre outros.

Os cálculos devem indicar referências seguras de que a barragem possui condições para suportar as pressões sem que ocorra rompimento ou deformidade excessiva.

Figura 2 – Tombamento de Barragem



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020

Assim, o FST pode ser calculado da seguinte forma:

$$2) FST = \frac{\sum MR}{\sum MT}$$

Sendo,

FST = fator de segurança ao tombamento

MR = momento resistente (estabilizante)

MT = momento de tombamento

2.1.1.3 Fator de Segurança ao Deslizamento – FSD

Um aspecto fundamental a ser observado em relação ao deslizamento, é a coesão na resistência ao cisalhamento de materiais rochosos ou mesmo na base da barragem, onde há o encontro concreto-rocha, considerando ainda que o solo na qual a estrutura está assentada, pode de mover.

A Eletrobrás (2003) em seus critérios nos mostra que:

Nas fases iniciais de projeto pode-se adotar como valores de coesão e do ângulo de atrito para o maciço de fundação e seus planos de descontinuidade, aqueles já adotados em outras obras com materiais similares. Sempre que uma superfície de deslizamento interceptar trechos onde os parâmetros geomecânicos (atrito e coesão) são diferentes, a segurança ao deslizamento da estrutura deve ser calculada para cada trecho, admitindo-se que há ruptura de cisalhamento nos trechos onde o coeficiente de segurança necessário não é alcançado.

Desse modo, o cálculo deve considerar que o trecho não possua resistência de Coesão ($C=0$) e o ângulo de atrito corresponda a situação de pós-ruptura da estrutura. Ainda, as sobras de tensão vindas do cisalhamento, não absorvido pelo trecho, devem ser considerados para as estruturas em deslizamento. Essa dinâmica deve acontecer até que os resultados possam atingir o mínimo exigido para demonstrar segurança em relação ao conjunto estrutura-fundação.

Ao considerar todas as possibilidades, o manual orientativo da estatal trás o cálculo para estruturas que possuem coesão:

$$3) FSD = \frac{\sum Fv \frac{\tan \phi}{FSD \phi} + \frac{c}{FSD c} A}{\sum Fh} \geq 1$$

Sendo,

FSD = fator de segurança ao deslizamento

Fv = forças verticais (P – U)

Fh = forças horizontais

A = área da base da fundação

FSD ϕ = Fator de redução da resistência ao atrito;

FSDc = Fator de redução da resistência à coesão;

ΣF_h = Somatório das forças normais à superfície de deslizamento;

ϕ = Ângulo de atrito característico das superfícies de deslizamento;

c = Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento;

E cálculo para estruturas *que não possuem coesão*:

$$4) FSD = \frac{\sum N_i \tan \phi_i}{\sum T_i} \geq 1$$

Sendo,

FSD = Fator de segurança ao deslizamento;

ΣN_i = Somatório das forças normais à superfície de deslizamento;

ΣT_i = Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

ϕ_i = Ângulo de atrito característico das superfícies.

2.2 FATORES CLIMÁTICOS

Não há dúvidas que os fatores climáticos possuem cada vez mais influência nas condições de vida da sociedade e representam atualmente um tema de relevância quanto ao futuro da humanidade. Empresas que não consideram atuar com equilíbrio socioambiental, passam a ser consideradas obsoletas e correm grandes riscos de manchar sua imagem junto a clientes e investidores. Muito além da preocupação com os negócios envolvendo parcerias, o quesito ambiente/fatores climáticos deve ser necessariamente observado quando envolvem estruturas na área de engenharia. As bases devem ser projetadas para sofrer grandes impactos a fim de estarem preparadas para suportar grandes cargas, seja de água, solo, vento, ação

humana, evitando assim desastres que possam provocar grandes consequências e comoção social.

Um dos aspectos a considerar na construção/manutenção de usinas hidrelétricas são os comportamentos pluviais e os terrenos a qual correm os rios. Conhecer as Bacias hidrográficas é um marco importante para o trabalho de segurança das estruturas, que fará significativa diferença nos momentos de emergências e urgências.

2.2.1 Bacias Hidrográficas no Estado de Santa Catarina

Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2020), bacia hidrográfica é “um território delimitado por divisores de água cujos cursos d’água em geral convergem para uma única foz localizada no ponto mais baixo da região.”.

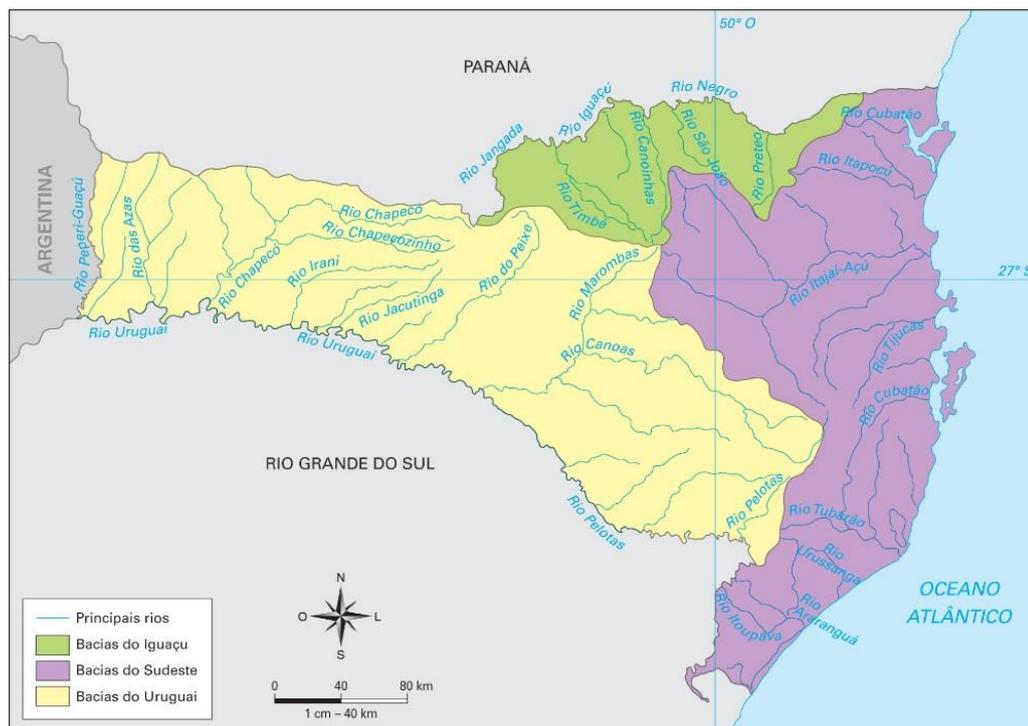
Para Tucci (1997), bacia hidrográfica pode ser assim definida:

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório.

O Brasil possui oficialmente doze grandes bacias hidrográficas em seu território. Na região Sul, três delas possuem maior relevância: Bacia do Uruguai, Bacia do Paraná/Iguaçu e Bacia do Atlântico Sudeste. Todas são consideradas bacias hidrográficas Federais (pois transpassam mais de um estado em sua totalidade) e adentram ao território catarinense.

No território catarinense, a Serra Geral funciona como divisor de águas, montando dois sistemas independentes de drenagem. De um lado, há o sistema integrado da Vertente do Interior a qual direciona seus cursos para as bacias do Uruguai e Paraná/Iguaçu. Do outro lado há o sistema integrado da Vertente Atlântica, onde o escoamento está direcionado para o litoral, desaguando diretamente no Oceano Atlântico.

Figura 3 – Bacias hidrográficas em Santa Catarina



Fonte: Wikimedia Commons, 2018.

Como característica principal, a Vertente do Interior apresenta rios com percurso predominantemente longitudinal e inúmeras quedas d'água, gerando enormes condições para geração de energia. Por outro lado, a Vertente Atlântica possui como fator único a influência direta das marés na região de desembocadura, aumentando o volume corrente em situações de preamar.

O estado de Santa Catarina possui área territorial superior a 95.000 km², segundo o site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas – IBGE. Nestes limites, está sob seus domínios 25 sub-bacias hidrográficas, distribuídas em dez Regiões hidrográficas. Destaque para as sub-bacias hidrográficas do Rio Chapecó, do Rio Canoas e do Rio Itajaí-Açu, a qual correspondem a 42% do total de águas do território estadual, sendo consideradas sub-bacias essenciais dentro do sistema mapeado pelo governo.

Quadro 2 – Sub-bacias hidrográficas de Santa Catarina

Bacia	Rio	Bacia Federal	Área de Drenagem (km ²)
-------	-----	---------------	-------------------------------------

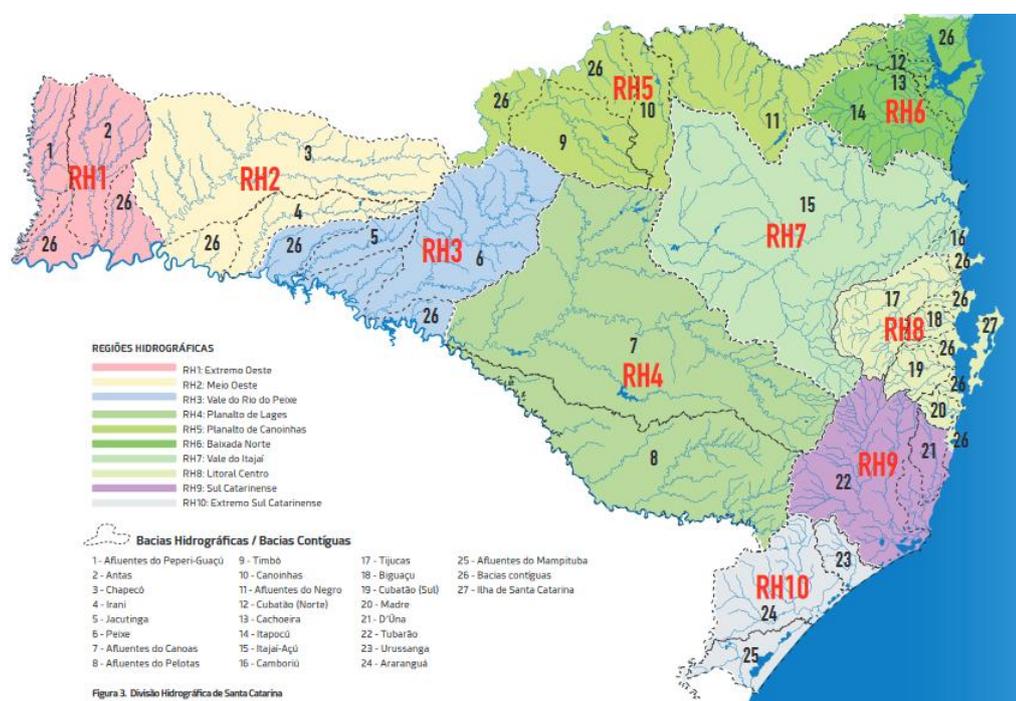
Bacia	Rio	Bacia Federal	Área de Drenagem (km ²)
1	Peperi-Guaçu	Uruguai	2.171,0
2	das Antas	Uruguai	3.841,4
3	Chapecó	Uruguai	9.159,4
4	Irani	Uruguai	2.630,3
5	Jacutinga	Uruguai	1.795,8
6	do Peixe	Uruguai	5.559,9
7	Canoas	Uruguai	15.329,2
8	Pelotas	Uruguai	7.282,7
9	Timbó	Paraná/Iguaçu	4.985,6
10	Canoinhas	Paraná/Iguaçu	1.617,8
11	Negro	Paraná/Iguaçu	4.299,0
12	Cubatão (Norte)	Atlântico Sudeste	1.512,1
13	Cachoeira	Atlântico Sudeste	272,3
14	Itapocu	Atlântico Sudeste	3.431,6
15	Itajaí-Açu	Atlântico Sudeste	15.122,5
16	Camboriú	Atlântico Sudeste	187,5
17	Tijucas	Atlântico Sudeste	3.052,2
18	Biguaçu	Atlântico Sudeste	402,1
19	Cubatão (Sul)	Atlântico Sudeste	1.480,0
20	da Madre	Atlântico Sudeste	535,0
21	Tubarão	Atlântico Sudeste	4.746,4
22	d'Uma	Atlântico Sudeste	1.168,8
23	Urussanga	Atlântico Sudeste	719,3
24	Araranguá	Atlântico Sudeste	3.683,6
25	Mapituba	Atlântico Sudeste	522,6

Fonte: Adaptado de Governo de SC, 2006.

As dez Regiões hidrográficas foram delimitadas de maneira que cada uma tivesse no máximo três sub-bacias hidrográficas contíguas, afins e consideradas principais. O limite geográfico está baseado nos divisores de água das bacias que as compõem (SANTA CATARINA, 2018).

Segundo o governo de Santa Catarina (2018), a ocorrência de perenidade dos rios é um cenário frequentemente observado. O fluxo é favorecido pelas constantes chuvas que ocorrem o ano inteiro, com boa distribuição durante os meses, garantindo assim o abastecimento dos mananciais.

Figura 4 – Regiões e sub-bacias hidrográficas de Santa Catarina



Fonte: PERH SC; 2018.

2.2.2 Aspectos da Pluviosidade Catarinense

Foi no ano de 1926 que o estado de Santa Catarina começou a registrar os índices pluviométricos em seu território. Inicialmente contando com menos de 10 estações, passou a investir em estudos e estrutura para que o mapeamento e conhecimento fossem aprimorados com o passar das décadas. Atualmente são distribuídos 234 postos pluviométricos que

registram mensalmente a quantidade de chuvas que ocorre no estado. Em 2006, foi publicado o 1º volume do Estudo Regionalizado de Vazões das Bacias Hidrográficas do Estado de Santa Catarina, a qual destacou importantes pontos:

- Os totais de precipitação anual no estado de Santa Catarina variam entre 1.400 e 2.200 mm/ano;
- A região que divide as sub-bacias do Rio Cubatão (Norte) e do Rio Itapocu é a que registrou maior volume de precipitação anual, variando entre 2.200 e 3.100 mm/ano. Essa condição é resultado do efeito orográfico da Serra e da umidade proveniente do Oceano Atlântico;
- Na faixa próxima ao litoral do Estado (Regiões hidrográficas 10, 09, 08 e 06) é possível observar efeitos orográficos da Serra aliados a umidade proveniente do Oceano Atlântico, a qual provocam índices anuais de precipitação que variam entre 1.400 e 1,800 mm/ano;
- No interior, sentido Leste-Oeste, é possível notar efeitos orográficos, porém não tão intensos, ocasionando níveis anuais de 1.500 mm/ano e atinge 2.200 mm/ano junto à fronteira com a Argentina.

Foi constatado pelo estudo que, a região de menor pluviosidade do Estado de Santa Catarina, está localizada nas Sub-bacias do Rio Canoas e do Rio Itajaí-Açú.

2.2.3 Cenários Atuais de Influência Meteorológica

O acompanhamento de fatores climatológicos por décadas permitiu cada vez mais o recolhimento de dados sobre como se comportam os rios no estado. Essas informações após processadas, traçam um cenário característico de cada região, de modo a esclarecer e definir quais são as épocas de maior e menor pluviosidade e vazão hídrica. É no Plano Estadual de Recursos Hídricos (2018) que se pode observar boa parte desses registros:

- Na Região 1 (Extremo Oeste) o evento hidrológico extremo mais frequente é a estiagem, com duração média de 14 registros ao ano. Inundações ocorrem

com menor frequência tendo média anual de cinco registros;

- Na Região 2 (Meio-Oeste) o cenário é semelhante, ou seja, a estiagem predomina com média de 23 registros ao ano. No período compreendido de 2003 a 2015, foi a região de Santa Catarina onde mais se observou tal situação, com 305 registros. A média de registros a respeito de inundações não costumam passar de sete ao ano;
- O Vale do Rio do Peixe, segue a tendência das regiões anteriores tendo a estiagem como evento hidrológico extremo principal, ocorrendo uma média de 16 registros anuais. As inundações ocorrem como menor frequência na Região 3, com seis registros por ano de média;
- Na Região 4 tem-se o Planalto de Lages, onde por suas características, ocorre um equilíbrio maior a respeito de eventos hidrológicos extremos. Enquanto a estiagem é registrada em média oito vezes ao ano, as inundações ocorrem sete vezes em média;
- O Planalto Norte, também conhecido como Planalto de Canoinhas é onde está localizada a Região Hidrográfica 5. Ao contrário das demais, possui registros anuais de média em inundações maior do que os feitos pela estiagem: sete contra três respectivamente;
- A Baixada Norte compõe a Região 6. Mesmo estando próximo da serra, as chuvas não são consideradas um grande problema. Essa região possui os menores números de média referente a inundações entre os anos de 2003 e 2015. Foram cinco registros, enquanto para estiagem não foram observadas ocorrências no mesmo período;
- A Região 7 é a localidade que mais houve registros sobre inundações em Santa Catarina no período compreendido entre 2003 e 2015. As 311 ocorrências revelam uma região bastante rica fluvialmente, com um dos principais canais de deságue no Oceano Atlântico. Em média são 24 registros anuais sobre inundações. Por outro lado, as estiagens ocorrem com frequência muito menor, tendo sido registrados 89 vezes no período de 12 anos;
- O Litoral Centro, a qual compreende a Região 8, é onde está localizada Florianópolis, a capital do estado de Santa Catarina. As inundações (com sete registros anuais de média) aparecem como o principal evento hidrológico extremo. Por outro lado, as estiagens são raras, com registro de seis

ocorrências entre 2003 e 2015;

- Na Região 9 (Sul Catarinense) é comum a observação de inundações. O evento é registrado em média seis vezes a cada ano. Número este maior que as estiagens, a qual possuem apenas três registros no período de 12 anos (2003-2015);
- As inundações é o evento que mais ocorre no Extremo Sul Catarinense (Região 10). Em média são registradas dez vezes ao ano. Esta mesma localidade sofre pouco com estiagens, ocorrendo à frequência de um evento por ano de média.

2.3 FATORES GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

2.3.1 Aspectos Gerais

As regiões dos Estados do Paraná (199.897 km²) e Santa Catarina (94.998 km²) representam uma parte da grande região geológica da antiga Terra de Gondwana. Formam maciços parciais da região sul-brasileira, mostrando limitações nítidas. O limite setentrional desta região contra o Estado de São Paulo segue os talvegues do rio Paranapanema e do rio Ribeira de Iguape.

Para o sul, a região é limitada contra o Estado do Rio Grande do Sul pelo vale de declive do rio Uruguai e pela escarpa da Serra Geral com o rio Mampituba. Entre o Paraná e Santa Catarina, o vale de base larga de aluviões do rio Iguaçu com o rio Negro traça o limite até a entrada na escarpa triássico-jurássica em Porto União, atingindo, rio Jangada acima, o divisor das águas entre o rio Iguaçu e o rio Uruguai.

O rio Peperí-Guaçú separa politicamente o Estado de Santa Catarina do território das Missões, na Argentina, o qual, geologicamente, representa parte integrante do derrame eruptivo básico da bacia do Paraná e do planalto de declive do interior catarinense.

O estado de Santa Catarina, na maior parte da sua extensão, é constituído por um planalto que mergulha suavemente para NW, W e SW. As rochas cristalinas representam a base de deposição dos sedimentos paleozóicos e mesozóicos, não mais perturbados por movimentos orogênicos, de modo que ainda jazem em camadas horizontais ou levemente

inclinadas. O pedestal cristalino cai abruptamente numa marcante escarpa de falha ou em escadas de falhas, em direção ao mar, causando assim o característico mais pronunciado na fisionomia da superfície dos Estados do Paraná e Santa Catarina, a saber, a separação em duas regiões naturais: a região litorânea e o planalto do interior.

2.3.2 Ambientação Geomorfológica

O território catarinense está situado entre os paralelos 25°57'41'' e 29°23'55'' de latitude sul e os meridianos 48°19'37'' e 53°50'00'' de longitude oeste.

Esquemáticamente, o relevo do estado de Santa Catarina é composto por 3 regiões principais, sendo elas:

- planícies costeiras, representadas por uma faixa estreita ao longo do litoral, que apresenta altitudes de 0 a 200 m e acompanha os vales dos rios da vertente;
- serras litorâneas que delimita as planícies costeiras, com altitudes entre 400 e 800 m;
- planalto, com altitudes entre 800 e 1.200m, que descem em direção ao oeste do estado.

De acordo com as características do relevo, as diferentes regiões podem ser discretizadas e ordenadas segundo uma taxonomia geomorfológica que permite a divisão e hierarquização do Estado de Santa Catarina em 4 Domínios Morfoestruturais, 7 Regiões Geomorfológicas e 13 Unidades Geomorfológicas.

Quadro 3 – Taxonomia geomorfológica do Estado de Santa Catarina

Domínio	Região	Unidade
Depósitos Sedimentares	<ul style="list-style-type: none"> Planícies Costeiras 	<ul style="list-style-type: none"> Planícies Litorâneas Planície Colúvio Aluvionar
Bacias e Coberturas Sedimentares	<ul style="list-style-type: none"> Planalto das Araucárias Depressão do Sudeste Catarinense Planalto Centro-Oriental de Santa Catarina Patamar Oriental da Bacia do Paraná 	<ul style="list-style-type: none"> Planalto dos Campos Gerais Planalto Dissecado Rio Iguaçu / Rio Uruguai Patamares da Serra Geral Serra Geral Depressão da Zona Carbonífera Catarinense Patamares do Alto Rio Itajaí Planalto de Lages Patamar de Mafra
Faixa de Dobramentos Remobilizados	<ul style="list-style-type: none"> Escarpas e Reversos da Serra do Mar 	<ul style="list-style-type: none"> Serra do Mar Planalto de São Bento do Sul
Embasamentos em Estilos Complexos	<ul style="list-style-type: none"> Serras do Leste Catarinense 	<ul style="list-style-type: none"> Serras do Tabuleiro / Itajaí

Fonte: EMBRAPA, 2004.

Os domínios estruturais são função de fatos geomorfológicos derivados de aspectos amplos da geologia, como os elementos geotécnicos, os grandes arranjos estruturais e eventualmente a predominância de uma litologia conspícua. As regiões geomorfológicas se caracterizam por uma divisão regionalmente reconhecida e estão ligadas a fatores climáticos atuais ou passados e/ou a fatores litológicos. As unidades geomorfológicas consistem no arranjo de formas de relevo fisionomicamente semelhantes em seus tipos e modelamentos.

2.3.3 Ambientação Geológica Regional

Para uma melhor compartimentação geológica do território brasileiro, Almeida et al (1977, 1981) aplicaram o conceito de províncias estruturais, através do qual foram identificadas 10 províncias presentes no território nacional.

Considera-se “província estrutural” uma larga região geológica que mostra ou apresenta feições estratigráficas, tectônicas, magmáticas e metamórficas próprias, características e diferentes daquelas apresentadas pelas regiões a ela confinantes. Sua discriminação contempla prioritariamente feições estruturais, litoestratigráficas e

geocronológicas, consideradas mais importantes, mas também tendo em conta a distribuição delas no espaço geográfico-geológico do país.

O estado de Santa Catarina possui um arcabouço geológico composto por um planalto no interior sustentado por rochas sedimentares da Bacia Sedimentar do Paraná, que foram depositadas sobre as rochas cristalinas que compõem e afloram na planície litorânea, pertencentes à Província Geotectônica da Mantiqueira. As idades radiométricas dessas rochas situam-se entre 700 a 450 Ma, que correspondem ao Ciclo Orogênico Brasileiro.

O setor meridional da Província Mantiqueira inclui as áreas pré-Cambrianas da Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A região leste deste setor expõe um cinturão granítico de orientação NE-SW, o Cinturão Granítico Dom Feliciano, com 800km de comprimento e largura média de 150 km, o qual é denominado de Batólito Pelotas, no Rio Grande do Sul, e de Batólito Florianópolis em Santa Catarina. Este cinturão, gerado no Ciclo Brasileiro (650-500 Ma), é constituído por rochas graníticas precoces ou tardias em relação aos eventos tectônicos abrangentes de forma tangencial ou transcorrente.

3 BARRAGENS EM SANTA CATARINA

3.1 BARRAGENS CONSTRUÍDAS HÁ MAIS DE 50 ANOS

O estado de Santa Catarina possui grande quantidade de centrais hidráulicas geradoras de energia elétrica, distribuídas em todas as regiões.

Atualmente estão cadastradas no SNISB 100 barragens no estado de Santa Catarina, fiscalizadas pela ANEEL. Não há registro oficial de quantas barragens com mais de 50 anos estão em operação no estado de Santa Catarina.

Quadro 4 – Barragens Antigas no Estado de Santa Catarina

Nome da usina	Nome dos Barramentos	Ano do início da operação
CGH Caveiras	<ul style="list-style-type: none"> Principal/Vertedouro Tomada d'água 	1940
CGH Cristo Rei	<ul style="list-style-type: none"> Cristo Rei 	1968
CGH Ivo Silveira	<ul style="list-style-type: none"> Principal 	1967
CGH Maruim	<ul style="list-style-type: none"> Maruim 	1908
CGH Piraí	<ul style="list-style-type: none"> 1° Salto 5° Salto 	1908
CGH Rio do Peixe	<ul style="list-style-type: none"> Principal 	1957
CGH São Lourenço	<ul style="list-style-type: none"> Principal 	1910
PCH Celso Ramos	<ul style="list-style-type: none"> Celso Ramos 	1963
PCH Flor do Mato	<ul style="list-style-type: none"> Flor do Mato 	1948
PCH São Luiz	<ul style="list-style-type: none"> São Luiz 	1964
UHE Bracinho	<ul style="list-style-type: none"> 1° Salto 8° Salto Rio do Júlio 	1931
UHE Cedros	<ul style="list-style-type: none"> Pinhal Tarnowski 	1949
UHE Garcia	<ul style="list-style-type: none"> Garcia 	1964
UHE Palmeiras	<ul style="list-style-type: none"> Barraginha UN-3 Rio Bonito Rosina 	1964
UHE Pery	<ul style="list-style-type: none"> Principal Tomada de Água 1 Tomada de Água 2 	1965
UHE Salto	<ul style="list-style-type: none"> Barragem I Barragem II Barragem III 	1914

Nome da usina	Nome dos Barramentos	Ano do início da operação
	<ul style="list-style-type: none"> • Barragem IV 	

Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

A criação da 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 e delega a responsabilidade da segurança aos empreendedores.

A partir da homologação da Lei e da Resolução Normativa 696 da ANEEL de 15 de dezembro de 2015, os proprietários de usinas antigas encontraram dificuldades para atender os critérios de segurança exigidos. Por terem sido construídas em períodos que não havia recursos digitais para armazenamento de dados, muitas informações que estavam guardadas em meios físicos, foram perdidas.

Com a preocupação em atender as exigências da Política Nacional de Segurança de Barragens e assegurar que as estruturas estão em conformidade com os critérios atuais, foi desenvolvido um procedimento para análise de segurança das estruturas em usinas hidrelétricas com mais de 50 anos no estado de Santa Catarina.

3.2 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA

3.2.1 Objetivo

Estabelecer uma metodologia para avaliação da segurança em estruturas civis, nas usinas hidrelétricas com mais de 50 anos, nos aspectos relacionados a estabilidade global. Tendo como referência a Política Nacional de Segurança de Barragens e os critérios técnicos da Eletrobrás.

3.2.2 Abrangência

Este procedimento é aplicável às usinas com mais de 50 anos no estado de Santa Catarina.

3.2.3 Responsabilidades

A Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, trata:

A responsabilidade legal do empreendedor pela segurança da barragem, pelos danos decorrentes de seu rompimento, vazamento ou mau funcionamento e, independentemente da existência de culpa, pela reparação desses danos. (BRASIL, 2020)

Cabe ao empreendedor, conhecer as características técnicas das estruturas das usinas hidrelétricas, e se necessário, adaptá-las às normas e critérios vigentes, assegurando que acidentes ocorram somente em casos imprevisíveis.

3.2.4 Informação

Os desenhos de arranjo, seções, plantas, estudos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos das bacias, são as fontes de informação básicas para a avaliação das estruturas civis.

3.2.5 Atividades e Produtos Típicos

As principais atividades e produtos típicos para avaliação das estruturas civis, são estabelecidos conforme tabela a seguir:

Quadro 5 – Atividades e Produtos

ATIVIDADES	PRODUTOS
ANÁLISE DOCUMENTAL	Desenhos básicos: plantas, seções, detalhes etc.; Estudos hidrológicos; Estudos hidráulicos; Informações geológicas;
LEVANTAMENTO DE CAMPO	Levantamento topográficos das estruturas, “ <i>as built</i> ”; Investigação geológica;
INSPEÇÃO DE SEGURANÇA	Avaliação visual das condições físicas; Avaliação e identificação dos materiais que compõe as estruturas; Avaliação da instrumentação existente; Relatório de Inspeção
CÁLCULO DE ESTABILIDADE GLOBAL	Análise para atendimento aos fatores de segurança ao tombamento, deslizamento e flutuação;

Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

3.2.6 Método Operacional

A avaliação da segurança das estruturas civis em usinas com mais de 50 anos, utiliza como principais ferramentas os softwares pacote Microsoft Office, softwares para cálculos de estabilidade e o AutoCad, e é desenvolvido conforme metodologia definida a seguir.

3.2.7 Análise Documental

Para iniciar a avaliação de segurança em uma estrutura, é necessário possuir os desenhos das seções, plantas e detalhes. Por se tratar de documentos antigos, podem ser encontrados nos arquivos técnicos das usinas em forma física. Também podem ser encontrados em meio digital, como imagens escaneadas.

Os desenhos devem conter dimensões, níveis operacionais (N.A.s Normal e Excepcional) e informações complementares como material constituinte.

Usinas que não possuem desenhos, deve-se fazer levantamento topográfico das estruturas.

As usinas antigas, foram executadas antes de iniciarem os registros hidrológicos. Todos os dados e informações pertinentes a respeito, devem ser restauradas para realização do estudo hidrológico da bacia.

Um novo estudo hidrológico deve ser elaborado para confirmar as vazões normais e excepcionais no local das estruturas, levando em consideração as informações atualizadas das estações hidrométricas mais próximas.

Com as informações dos desenhos e das vazões no local, deve-se fazer a conferência da capacidade de descarga do vertedouro. O estudo hidráulico confirma o nível excepcional (TR 1000 anos), nas estruturas.

É necessário conhecer as características da fundação das estruturas. As diferentes rochas, possuem ângulo de atrito específicos, necessários para o cálculo de estabilidade global. Essas informações podem ser encontradas nos documentos existentes, caso não possuir, deverá ser feito uma investigação em campo.

3.2.8 Levantamentos de Campo

Depois de fazer a pesquisa documental e avaliar as informações existentes, deve-se complementar com levantamentos de campo. Os levantamentos de campo também irão confirmar ou não, os dados levantados na análise documental.

O levantamento topográfico, “*as built*”, deverá ter grau de detalhamento necessário para a caracterização da geometria da barragem. A precisão do levantamento topográfico, é fundamental para a boa elaboração dos serviços.

Os DATUMs horizontal e vertical a serem utilizados por estes levantamentos deverão ser, respectivamente, o SIRGAS2000 e o Vértice de Imbituba/SC. Todas as referências planimétricas e altimétricas deverão ser originadas de vértices oficiais do IBGE, além das altitudes que deverão ser ortométricas.

O processo de aquisição das coordenadas planialtimétricas se dará pelo emprego da técnica de posicionamento estático de aparelhos rastreadores da constelação de satélites artificiais utilizando a fase das portadoras L1/L2 (no mínimo), com poligonal fechada (ou poligonal enquadrada, com origem e fechamento em vértices oficiais do IBGE), e com exatidão no fechamento da poligonal não inferior a 1:1.000.000.

A investigação geológica é feita através de poços, valas ou trincheiras de inspeção. Feitas com pás e picaretas, em solos coesivos, acima do nível d'água, geralmente de rasa profundidade, que permitem o acesso no interior do terreno para exame direto "in situ" das paredes da escavação em estado natural, permitindo o exame detalhado dos horizontes perfurados, a retirada de amostras indeformadas (solos), a coleta de amostras deformadas volumosas, qualquer que seja o tipo de solo com finalidade de ensaios laboratoriais. A trincheira de inspeção é recomendada nos casos em que há interesse em investigar o comportamento e/ou distribuição dos materiais no sentido lateral. A NBR 9604/86 especifica os procedimentos para a execução de poços e trincheiras de inspeção em solos para a retirada das amostras, deformadas e indeformadas.

3.2.9 Inspeção de Segurança

A inspeção de segurança preferencialmente, deverá ser feita por uma equipe multidisciplinar capacitada para identificar anomalias e ocorrências nas estruturas.

O manual do empreendedor sobre segurança de barragens – volume II, da Agência Nacional de Águas – ANA, traz o seguinte:

As inspeções de segurança das barragens têm o objetivo de avaliar as condições físicas das suas partes integrantes, visando a identificar e monitorar anomalias que afetem potencialmente sua segurança. Elas possibilitam apontar, com a devida antecedência ou urgência, a necessidade de reabilitar as barragens que estejam em perigo ou risco de rompimento, possibilitando, a tempo, mitigação de danos e reduzindo elevados prejuízos à vida humana, econômicos e ambientais às localidades afetadas.

Para avaliação em estruturas antigas, por não existirem documentos com detalhes construtivos, é importante registrar os materiais que as compõe e buscar o máximo de

informações possíveis, como a existência de ancoragens, juntas de construção, galerias de drenagens, entre outros.

Outro ponto importante a ser observado nas inspeções, é a existência de instrumentos para monitoramento. Algumas estruturas podem existir e não estarem sendo feitas as leituras adequadamente. Outras ainda, podem não possuir, e caso houver necessidade, pode-se recomendar instalação de marcos superficiais e medidores de vazão.

O relatório deverá conter um parecer conclusivo sobre as condições das estruturas que compõe o barramento e seu nível de perigo. Caso haja ocorrências, deverá ser apresentadas as soluções e o cronograma para implementação.

3.2.10 Cálculo de Estabilidade Global

Deverão ser feitas as análises de estabilidade global em todas as estruturas que compõem o barramento, considerando carregamento normal e excepcional (TR 1000 anos).

Seguindo os critérios de projeto da Eletrobrás, as análises da estabilidade global, deverão atender as seguintes verificações:

- Verificação à flutuação:

$$1) \text{FSF} = \frac{\sum P}{\sum U}$$

	CCN	CCE
FSF ≥	1,3	1,1

Onde:

FSF = fator de segurança à flutuação

P = forças verticais para baixo (pesos)

U = forças verticais para cima (subpressão)

- Verificação ao tombamento:

$$2) \text{ FST} = \frac{\sum \text{MR}}{\sum \text{MT}}$$

	CCN	CCE
FST ≥	1,5	1,2

Onde:

FST = fator de segurança ao tombamento

MR = momento resistente (estabilizante)

MT = momento de tombamento

- Verificação ao deslizamento:

$$3) \text{ FSD} = \frac{\sum F_v \frac{\tan \phi}{\text{FSD}\phi} + \frac{c}{\text{FSD}c} A}{\sum F_h} \geq 1$$

Os coeficientes de minoração do atrito (FSD ϕ) e da coesão (FSDc) são:

	CCN	CCE
FSD ϕ	1,5	1,1
FSDc	3,0	1,5

Onde:

FSD = fator de segurança ao deslizamento

Fv = forças verticais (P – U)

Fh = forças horizontais

A = área da base da fundação

Tensões na base da fundação:

$$5) \sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$

Onde:

σ = tensão na fundação [tração (+) ou compressão (-)]

N = resultante das forças verticais (ΣF_v)

M = momento resultante em relação ao centroide

A = área da base da fundação

W = módulo elástico da área da base

3.3 ESTUDO DE CASO

Entre as usinas estudadas e citadas no Quadro 4, foi selecionada uma com mais de 50 anos no estado de Santa Catarina, para apresentar os resultados da avaliação da segurança das estruturas. A usina pertence a Celesc Geração S.A., e serve de exemplo para outros empreendedores aplicarem o procedimento utilizado.

3.3.1 PCH Celso Ramos

O arranjo do empreendimento é composto por um barramento principal e um circuito hidráulico de geração. O registro de início da operação é de 1963.

3.3.1.1 *Dados Técnicos*

Os dados técnicos apresentados foram retirados do Relatório de Inspeção de Segurança Regular de 2019, elaborado pela Estelar Engenheiros Associados.

O barramento atual da PCH Celso Ramos tem 224,55 m de extensão, incorporando as barragens das margens direita e esquerda, o vertedouro, descarga de fundo e tomada de água.

Fazendo o fechamento do barramento, nas ombreiras direita e esquerda encontra-se a barragem de concreto ciclópico e externamente recoberta com alvenaria de pedra argamassada.

A barragem na ombreira esquerda possui 80,95 m de extensão e altura máxima de 15,80 m. Neste trecho está localizada a estrutura da tomada de água, próximo ao vertedouro. A elevação da crista é 723,30 m.

A barragem da ombreira direita possui 60,95 m de extensão e altura máxima de 15,15 m. Neste trecho está localizada a descarga de fundo, próximo ao vertedouro, com a finalidade também de manutenção da vazão sanitária, quando a usina não estiver gerando. A elevação da crista é 722,65 m na região do descarregador de fundo e na ombreira.

O vertedouro do tipo soleira vertente, possui crista na elevação 719,25 m, comprimento de 82,65 m e conta com paramento liso contendo, ao final, um defletor.

A estrutura da tomada de água encontra-se incorporada no barramento entre o vertedouro e a barragem da ombreira esquerda ombreira esquerda. É constituída de alvenaria de pedra argamassada e possui coroamento na El. 723,30 m.

A Tomada de água possui de grades metálicas e comportas-vagão metálicas. As comportas são movidas por meio de mecanismos acionados eletricamente, cada um constituído de motor elétrico e cremalheiras. A comporta vagão tem dimensões de 4,50 x 3,60 m.

Os condutos de adução de baixa pressão são constituídos de uma tubulação de aço de seção circular com diâmetro de 3,60 m, que percorrem 67 m, sendo um conduto enterrado e envolto em alguns trechos por concreto.

A chaminé de equilíbrio, ao final da tubulação adutora de baixa pressão, é em aço, com um diâmetro de 0,70 m e uma altura de 15 m.

Os condutos das unidades 1 e 2 utilizam a mesma chaminé de equilíbrio e possuem diâmetros iguais, de 2,05 m e comprimento total de 46 m.

A Casa de Força compõe-se de estrutura em alvenaria e concreto, abrigando as 2 (duas) unidades geradoras e todos os sistemas auxiliares mecânicos e elétricos da usina.

Figura 7 – PCH Celso Ramos - Vista Aérea Geral de Jusante



Fonte: Estelar, 2020.

Figura 8 – Barragem Margem Esquerda – Vista Aérea de Jusante



Fonte: Estelar, 2020.

Figura 9 – Barragem Margem Direita – Vista Aérea de Jusante



Fonte: Estelar, 2020.

3.3.1.2 *Análise Documental*

No ano de 2019, a Celesc Geração contratou a Estelar Engenheiros Associados, para elaboração de Laudo de Segurança da Barragem. Para elaboração do Laudo, foi aplicado o procedimento para avaliação de segurança em estruturas com mais de 50 anos.

As atividades iniciaram com uma busca por documentos pertencentes a PCH Celso Ramos na mapoteca existente na sede da empresa proprietária, onde foram encontrados documentos em forma física. Outra busca foi feita nos arquivos técnicos digitais existentes.

Finalizada a busca, os documentos foram organizados e armazenados em meio digital e analisados por uma equipe multidisciplinar.

Na busca foram encontrados os seguintes documentos:

- Levantamentos topográficos e geológicos;
- Desenhos de arranjo geral, barramento, circuito de geração e casa de força;
- Relatórios de avaliação técnica;

- Memoriais de cálculo das estruturas;
- Plano de Segurança da Barragem;
- Plano de Ação de Emergência;
- Relatórios de Inspeção de Segurança Regular.

A análise feita pela equipe multidisciplinar, constatou a existência de estudos e levantamentos recentes, demonstrando o interesse do proprietário em adequar as estruturas nos critérios atuais.

3.3.1.3 *Levantamento de Campo*

Não foi necessário realizar levantamentos de campo. Na análise documental realizada, foram encontrados levantamentos topográficos atualizados.

3.3.1.4 *Inspeção de Segurança*

A inspeção foi realizada no dia 07/11/2019, por uma equipe técnica multidisciplinar da Estelar Engenheiros Associados, com o objetivo de conhecer em campo as condições das estruturas civis da usina, bem como localização da barragem e descrever brevemente as características técnicas e condições atuais das estruturas de acordo com ANEEL – Resolução Normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015.

Durante a inspeção pode-se confirmar que o material utilizado para execução das estruturas, é pedra argamassada e não foram identificadas anomalias que comprometessem a estabilidade da barragem.

Não foi identificado monitoramento através de instrumentos. Para complementar as medidas de ação tomadas, em relação à segurança, foi sugerido ao proprietário, a instalação de marcos superficiais nas estruturas. O registro das leituras servirá para avaliar possíveis movimentações.

A usina entrou em operação em 1963, mais de meio século se passou e as estruturas estão em bom estado de conservação.

A conclusão segundo Estelar (2020) é a seguinte:

Após a realização da presente inspeção, verificação das condições das estruturas e análise das anomalias encontradas e registradas na ficha de inspeção deste relatório, pode-se registrar que o nível de segurança da PCH Celso Ramos, conforme estabelece a Resolução Normativa ANEEL nº 696/2015, em seu Artigo 9º, parágrafo segundo inciso VI, deve ser classificado como: NORMAL

3.3.1.5 *Cálculo de Estabilidade Global*

De posse de todos os dados necessários para realização do cálculo de estabilidade global, pode-se fazer o cálculo, conforme estabelece os critérios técnicos da Eletrobrás.

Peso específico dos materiais:

- Pedra argamassada (basalto): 28 kN/m³
- Água: 10 kN/m³

Parâmetros da fundação:

- Ângulo de atrito (ϕ): 40º
- Coesão (c): 80 kN/m²

A condição de carregamento normal (CCN) foi analisada com o N.A. de montante na EL. 718,95 m e o N.A. de jusante na EL. 709,05 m., correspondente à condição normal do reservatório, sem vertimento.

A condição de carregamento excepcional (CCE) foi analisada com o N.A. de montante na EL. 724,80 m e o N.A. de jusante na EL. 711,40 m, correspondente à cheia com tempo de recorrência decamilenar (TR = 10.000 anos).

Considerando que até o momento não há indícios da existência de planos de descontinuidade do maciço rochoso abaixo do plano da fundação, verificou-se a estabilidade global apenas para o plano da fundação, na superfície de contato concreto/rocha.

A análise foi realizada a partir de uma seção de comprimento unitário, cujos resultados representam o comportamento da estrutura como um todo.

Os resultados encontrados para o vertedouro, foram os seguintes:

Quadro 6 – Fatores de Segurança - Vertedouro

Caso	FST	FSF	FSD
CCN	2,47 (> 1,50)	3,14 (> 1,30)	2,26 (> 1,00)
CCE	1,45 (> 1,20)	1,88 (> 1,10)	1,53 (> 1,00)

Fonte: Estelar, 2020.

Considerando que todos os fatores de segurança foram atendidos e não ocorreram tensões de tração na base da fundação (não havendo abertura de junta), concluiu-se que a estrutura da seção do vertedouro analisada atende aos critérios de segurança.

Para a barragem, os resultados foram os seguintes:

Quadro 7 – Fatores de Segurança - Barragem

Caso	FST	FSF	FSD
CCN	3,53 (> 1,50)	5,27 (> 1,30)	3,43 (> 1,00)
CCE	0,96 (< 1,20)	2,69 (> 1,10)	1,16 (> 1,00)

Fonte: Estelar, 2020.

Para o caso CCN, todos os fatores de segurança foram atendidos e não ocorreram tensões de tração na base.

Entretanto para o caso CCE apareceram tensões de tração na base de montante, e o fator de segurança ao tombamento deixou de ser atendido.

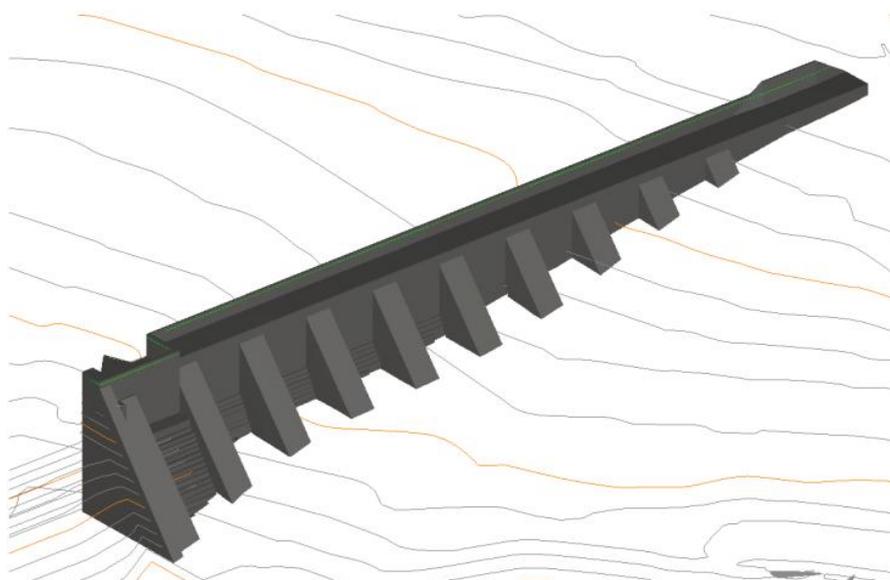
3.3.1.6 Reforço Estrutural

Em outubro de 2019, foi entregue à Estelar Engenheiros Associados um novo memorial de cálculo referente às barragens da margem direita e esquerda, elaborado pela

empresa Engevix Engenharia e Produtos. A empresa Engevix, foi contratada pela Celesc Geração para elaborar o projeto executivo de reforma e ampliação da usina.

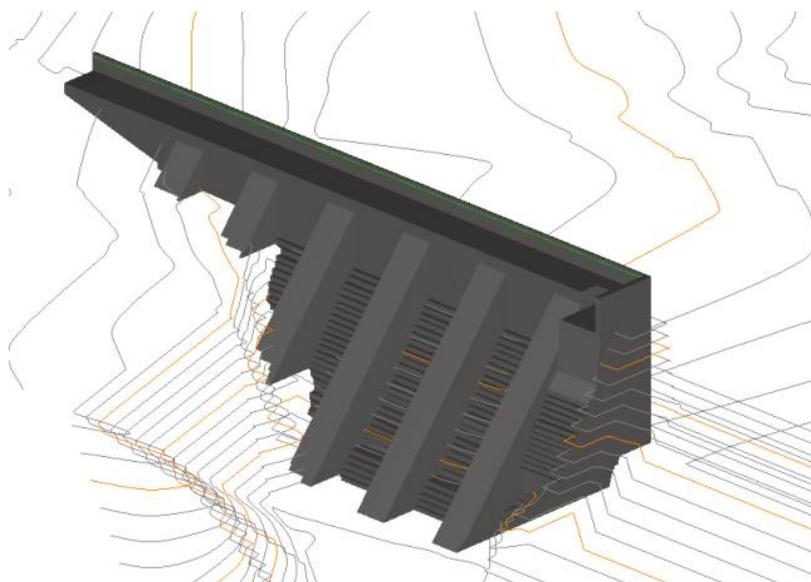
A nova concepção do barramento, previu alteamento das barragens da margem direita e esquerda, garantindo assim a capacidade de descarga do vertedouro para a vazão correspondente ao tempo de recorrência de 1000 anos. Além disso, a estrutura recebeu reforço com contrafortes, atendendo os fatores de segurança global, em conformidade aos critérios da Eletrobrás. O relatório EGVP00366/BP-3F-MC-1001, de outubro de 2019, apresentou as seguintes concepções para as novas barragens:

Figura 10 – Barragem com reforço – Margem Esquerda



Fonte: Engevix, 2019.

Figura 11 – Barragem com reforço – Margem Direita



Fonte: Engevix, 2019.

O relatório traz os seguintes resultados para a barragem da margem esquerda, em condições de carregamento normal:

Figura 12 – Resultados para condição normal – Barragem Margem Esquerda

Esforços Verticais (Vz)					
Carregamento	Esforço Vz (kJ)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (x) LT (m)	M (kJ.m)	dist. (x) CG (m)	M (kJ.m)
Peso Próprio (P.P.) Existente	16.073	-9,61	-154.462	-2,65	-42.594
Peso Próprio (P.P.) Alçamento	10.912	-6,66	-72.674	0,30	3.274
Peso de Água - Montante (P.A.m)	77	-11,69	-896	-4,73	-363
Subpressão - Máximo Normal - EL. 718,95 (S.B)	-3.668	-9,66	35.435	-2,70	9.904
Total	23.394	-8,23	-192.597	-1,27	-29.778

Esforços Horizontais (Hx)					
Carregamento	Esforço Hx (kJ)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (z) LT (m)	M (kJ.m)	dist. (z) CG (m)	M (kJ.m)
Empuxo - Máximo Normal - EL. 718,95 (E.P.m)	3.624	2,10	7.611	2,10	7.611
Total	3.624	2,10	7.611	2,10	7.611

FSD	ΣVz	23.394	9,53	FSD $\geq 1,0$ OK
	ΣHx <td>3.624</td> <td></td> <td></td>	3.624		
FST	ΣMe <td>-228.032</td> <td>5,30</td> <td>FST $\geq 1,5$ OK</td>	-228.032	5,30	FST $\geq 1,5$ OK
	ΣMt <td>43.047</td> <td></td> <td></td>	43.047		
FSF	$\Sigma Vz + \Sigma Vz-$ <td>27.062</td> <td>7,38</td> <td>FSF $\geq 1,3$ OK</td>	27.062	7,38	FSF $\geq 1,3$ OK
		3.668		

Tensões na fundação	
Ponto	OV (kJ/m ²)
A	50
B	77
C	104
D	131
E	157
F	184
G	211

Tensões na fundação	
Ponto	OV (kgf/cm ²)
A	0,50
B	0,77
C	1,04
D	1,31
E	1,57
F	1,84
G	2,11

Fonte: Engevix, 2019.

Em condição de carregamento excepcional, os resultados são os seguintes:

Figura 13 – Resultados para condição excepcional – Barragem Margem Esquerda

Esforços Verticais (Vz)					
Carregamento	Esforço Vz (kN)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (x) LT (m)	M (kN.m)	dist. (x) CG (m)	M (kN.m)
Peso Próprio (P.P.) Existente	16.073	-9,61	-154.462	-2,65	-42.594
Peso Próprio (P.P.) Alçamento	10.912	-6,66	-72.674	0,30	3.274
Peso de Água - Montante (P.A.m)	310	-11,69	-3.627	-4,73	-1.468
Subpressão - Máximo Maximorum - EL 724,80 (S.B)	-7.076	-9,66	68.355	-2,70	19.105
Total	20.219	-8,03	-162.409	-1,07	-21.682

Esforços Horizontais (Hx)					
Carregamento	Esforço Hx (kN)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (z) LT (m)	M (kN.m)	dist. (z) CG (m)	M (kN.m)
Empuxo - Máximo Maximorum - EL 724,80 (E.P.m)	13.472	4,05	54.562	4,05	54.562
Total	13.472	4,05	54.562	4,05	54.562

FSD	ΣVz	ΣHx	20.219	13.472	4,24	FSD ≥ 1.0 OK
FST	ΣMe	ΣMr	-230.764	122.917	1,88	FST ≥ 1.2 OK
FSF	$\Sigma Vz + \Sigma Vz -$		27.295	7.076	3,86	FSF ≥ 1.1 OK

Tensões na fundação		Tensões na fundação	
Ponto	OV (kN/m ²)	Ponto	OV (kgf/cm ²)
A	267	A	2,67
B	227	B	2,27
C	187	C	1,87
D	147	D	1,47
E	107	E	1,07
F	68	F	0,68
G	28	G	0,28

Fonte: Engevix, 2019.

Para a barragem da margem direita, os resultados para condição de carregamento normal foram:

Figura 14 – Resultados para condição normal – Barragem Margem Direita

Esforços Verticais (Vz)					
Carregamento	Esforço Vz (kN)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (x) LT (m)	M (kN.m)	dist. (x) CG (m)	M (kN.m)
Peso Próprio (P.P.) Existente	45.403	-12,26	-556.646	-3,12	-141.659
Peso Próprio (P.P.) Alçamento	14.126	-9,34	-131.941	-0,20	-2.825
Peso de Água - Montante (P.A.m)	370	-16,57	-6.139	-7,43	-2.753
Subpressão - Máximo Normal - EL 718,95 (S.B)	-14.894	-12,21	181.854	-3,07	45.724
Total	45.006	-11,40	-512.872	-2,26	-101.513

Esforços Horizontais (Hx)					
Carregamento	Esforço Hx (kN)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (z) LT (m)	M (kN.m)	dist. (z) CG (m)	M (kN.m)
Empuxo - Máximo Normal - EL 718,95 (E.P.m)	13.467	4,05	54.540	4,05	54.540
Total	13.467	4,05	54.540	4,05	54.540

FSD	ΣVz	ΣHx	45.006	13.467	4,56	FSD ≥ 1.0 OK
FST	ΣMe	ΣMr	-694.726	236.394	2,94	FST ≥ 1.5 OK
FSF	$\Sigma Vz + \Sigma Vz -$		59.900	14.894	4,02	FSF ≥ 1.3 OK

Tensões na fundação		Tensões na fundação	
Ponto	OV (kN/m ²)	Ponto	OV (kgf/cm ²)
A	86	A	0,86
B	110	B	1,10
C	134	C	1,34
D	159	D	1,59
E	183	E	1,83
F	207	F	2,07
G	231	G	2,31

Fonte: Engevix, 2019.

Em condição de carregamento excepcional, os resultados foram:

Figura 15 – Resultados para condição excepcional – Barragem Margem Direita

Esforços Verticais (Vz)					
Carregamento	Esforço Vz (kN)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (z) LT (m)	M (kN.m)	dist. (x) CG (m)	M (kN.m)
Peso Próprio (P.P.) Existente	45.403	-12,26	-556.646	-3,12	-141.659
Peso Próprio (P.P.) Alçamento	14.126	-9,34	-131.941	-0,20	-2.825
Peso de Água - Montante (P.A.m)	798	-16,52	-13.175	-7,38	-5.886
Subpressão - Máximo Maximorum - EL 724,80 (S.B)	-22.067	-12,21	269.440	-3,07	67.746
Total	38.260	-11,30	-432.322	-2,16	-82.624

Esforços Horizontais (Hx)					
Carregamento	Esforço Hx (kN)	Linha de Tombamento		CG da fundação	
		dist. (z) LT (m)	M (kN.m)	dist. (z) CG (m)	M (kN.m)
Empuxo - Máximo Maximorum - EL 724,80 (E.P.m)	29.552	6,00	177.313	6,00	177.313
Total	29.552	6,00	177.313	6,00	177.313

Tensões na fundação			
Ponto	GV (kN/m ²)		
FSD	ΣVz	38.260	
	ΣHx	29.552	3,36
			FSD ≥ 1,0 OK
FST	ΣMc	-701.762	
	ΣMr	446.753	1,57
			FST ≥ 1,2 OK
FSF	ΣVz +	60.327	
	ΣVz -	22.067	2,73
			FSF ≥ 1,1 OK

Tensões na fundação	
Ponto	GV (kgf/cm ²)
A	3,01
B	2,52
C	2,04
D	1,55
E	1,06
F	0,57
G	0,08

Fonte: Engevix, 2019.

O relatório traz a seguinte conclusão:

O alçamento do Barramento da PCH Celso Ramos é estável para os casos de carregamentos de níveis normal e excepcional, sem apresentar tração na base e com os fatores de segurança estão dentro dos limites preconizados pela norma. A resultante dos esforços está situada dentro do núcleo central da fundação para todos os casos analisados, não havendo descolamento entre o concreto e a rocha. As tensões calculadas são inferiores à tensão admissível recomendada para fundação, " $\sigma_v < Q_{adm} = 1000 \text{ kN/m}^2$ ", além disto as tensões na base são de compressão em todos os casos analisados.

As obras de reforço no barramento, iniciaram no final do ano de 2019, e atualmente encontram-se concluídas.

3.3.1.7 *Lauda Conclusivo*

Em abril de 2020, a Estelar emitiu um Laudo Técnico a respeito da Segurança das estruturas que compõe o barramento da PCH Celso Ramos.

O parecer técnico elaborado pela equipe multidisciplinar da Estelar, após a análise documental e inspeção de segurança, concluiu que as estruturas se encontram em condições normais e aptas à operação. A conclusão ainda traz a recomendação para acrescentar nas rotinas de manutenção civil, os procedimentos sugeridos nos manuais da Agência Nacional de Águas - ANA.

3.3.1.8 *Cenário Atual das Barragens*

Início do ano de 2020, foram iniciadas as atividades de reforço estrutural nas barragens da margem direita e esquerda da PCH Celso Ramos, seguindo o estudo de reforço com contra fortes elaborado pela Engevix.

Figura 16 – Barragem Margem Direita – Durante a obra



Fonte: Celesc Geração, 2020.

Atualmente, as obras encontram-se em fase de conclusão, atendendo os critérios descritos da Eletrobrás para os fatores de segurança das estruturas.

Figura 17 – Barragem Margem Direita – Obra concluída



Fonte: Celesc Geração, 2020.

Figura 18 – Barragem Margem Esquerda – Obra concluída



Fonte: Celesc Geração, 2020.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um procedimento para avaliação de estruturas de barragens de materiais rígidos, com mais de 50 anos, e aplicou em uma barragem existente. O desenvolvimento do procedimento, para avaliação de segurança em estruturas com mais de 50 anos no estado de Santa Catarina, se mostrou eficaz quando aplicado na PCH Celso Ramos.

As maiores dificuldades encontradas foram:

- Encontrar e reunir a maior quantidade de documentos referentes a PCH em estudo;
- Analisar cada documento encontrado. Muitos traziam informações diferentes sobre o mesmo assunto, fato que necessitou verificações no campo;
- Não existir histórico de monitoramento antes da criação da Política Nacional de Segurança de Barragens.

Por outro lado, notou-se uma preocupação por parte do empreendedor, em atender todos os critérios e diretrizes atuais, referentes à segurança das estruturas que compõem o barramento.

Estudar estruturas antigas, se tornou uma tarefa gratificante e despertou a atenção para um assunto que é pouco discutido entre os profissionais. Durante a atividade, alguns questionamentos surgiram, como: por mais quanto tempo os materiais que as compõem, irão manter a integridade? As ancoragens existentes no interior, permanecem íntegras? No entanto, após inspecionar as 16 usinas citadas no Quadro 4, pôde-se observar a riqueza em detalhes e a preocupação dos profissionais da época em projetar e executar estruturas únicas, que não são encontradas de forma parecida em outras usinas.

Usinas hidrelétricas com estruturas antigas, é uma realidade em todo país. Foram construídas em um período que ainda não existiam os critérios da Eletrobrás e tão pouco a Política Nacional de Segurança de Barragens vigente atualmente. Porém todas foram construídas atendendo as normas e critérios da época e seguem absolutas, mantendo suas funções.

REFERENCIAS

ANA. **Comitês de Bacia Hidrográfica**. 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/comites-de-bacia-hidrografica>.

Acesso em: 22 nov. 2020;

ANA. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem – Vol. II**. 2016. Disponível em:

<https://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/ManualEmpreendedor/GuiaOrientacaoFormulariosParaInspecoesSegurancaBarragem.PDF>. Acesso em: 06 jan. 2021;

ANEEL. **Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. 2015. Resolução nº 696. Disponível em: http://www.defesacivil.pr.gov.br/sites/defesa-civil/arquivos_restritos/files/documento/2018-12/ResolucaoANEEL696.pdf. Acesso em: 06 jan. 2021;

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Autoriza a União a constituir a empresa Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - ELETROBRÁS, e dá outras providências**. 1961. Lei nº 3.890a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/13890acons.htm. Acesso em: 14 nov. 2020;

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **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**. 2010. Lei nº 12.334. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 06 jan. 2021;

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração)**. 2020. Lei nº 14.066. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>. Acesso em: 06 jan. 2021;

COMMONS, Wikimedia. **Mapas das bacias hidrográficas de Santa Catarina**. 2020.

Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Santa-Catarina-Historia-Geografia-36-01.jpg>. Acesso em: 22 nov. 2020;

EGUTI, Felipe. **Efeito de Flutuação em Reservatórios Enterrados**. 2015. (416 min.), color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sT6wcM22JTE>. Acesso em: 19 nov. 2020;

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Outubro, 2003;

- ELETROBRÁS. **História**. 2020. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Historia.aspx>. Acesso em: 07 nov. 2020;
- EMBRAPA. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento n° 46 – Solos de Santa Catarina**. Dezembro, 2004;
- ENGEVIX. **Relatório de barragem – Análise de estabilidade – PCH Celso Ramos; EGVP00366/BP-3F-MC-1001**. Outubro, 2019;
- ESTELAR. **Relatório Técnico de Inspeção – PCH Celso Ramos; 5062-CEG-6C-RTIS-006-01-19**. Março, 2020;
- ESTELAR. **Barramento – Análise de Estabilidade – PCH Celso Ramos; 5062-CEG-6C-MCBA-006-00-20**. Dezembro, 2019;
- ESTELAR. **Laudo Técnico de Segurança de Barragem – PCH Celso Ramos; 5062-CEG-6C-LUBA-006-01-20**. Abril, 2020;
- IBGE. **Santa Catarina**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc.html>. Acesso em: 22 nov. 2020;
- PEREIRA, Caio. **Muro de arrimo: o que é e principais tipos**. 2019. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/muro-de-arrimo/>. Acesso em: 12 nov. 2020;
- SANTA CATARINA. **Plano estadual de recursos hídricos**. 2018. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Plano%20Estadual/Documento%20Sintese/documento_sintese_do_plano_2018-03-15.pdf. Acesso em: 22 nov. 2020;
- SANTA CATARINA. **Recursos hídricos de Santa Catarina**. 2018. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/bacias_hidrograficas/bacias_hidrograficas_s.c.pdf. Acesso em: 22 nov. 2020;
- SANTA CATARINA. **Regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do estado de Santa Catarina**. Volume 1. Fevereiro, 2006;
- SCOTTINI, Alfredo. **Minidicionário escolar de língua portuguesa**. Ed. Todolivro Ltda. Blumenau, SC, 2009;
- SILVA, E. DOS S.; ARAUJO, A. A. V. R. DE. **Empuxo sobre um corpo imerso: uma investigação em contexto de aprendizagem ativa considerando o paradoxo hidrostático de Galileu**. Revista Prática Docente, v. 4, n. 1, p. 185-195, 15 jul. 2019. Disponível em: <http://periodicos.cfs.ifmt.edu.br/periodicos/index.php/rpd/article/view/366/174>. 2019. Acesso em: 09 nov. 2020;
- SNISB, Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragem. **Painel de informações**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYjkiNjE3ZjQtNmIzNi00YzkyLWE5Y2UtMTZhZDM4ZDc0MTJlIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGItNDY5YS04YjRkLTUyN2ZjZDFiYWY4OCJ9>. Acesso em: 09 dez. 2020;

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. ABRH/Editora da UFRGS, 2ª Edição. Porto Alegre, 1997;

ZUFFO, Monica S., **Metodologia para avaliação da segurança de barragens**. Campinas, 2005;

WIKIPEDIA. **Eletrobrás**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Eletrobras>. Acesso em: 09 nov. 2020.