

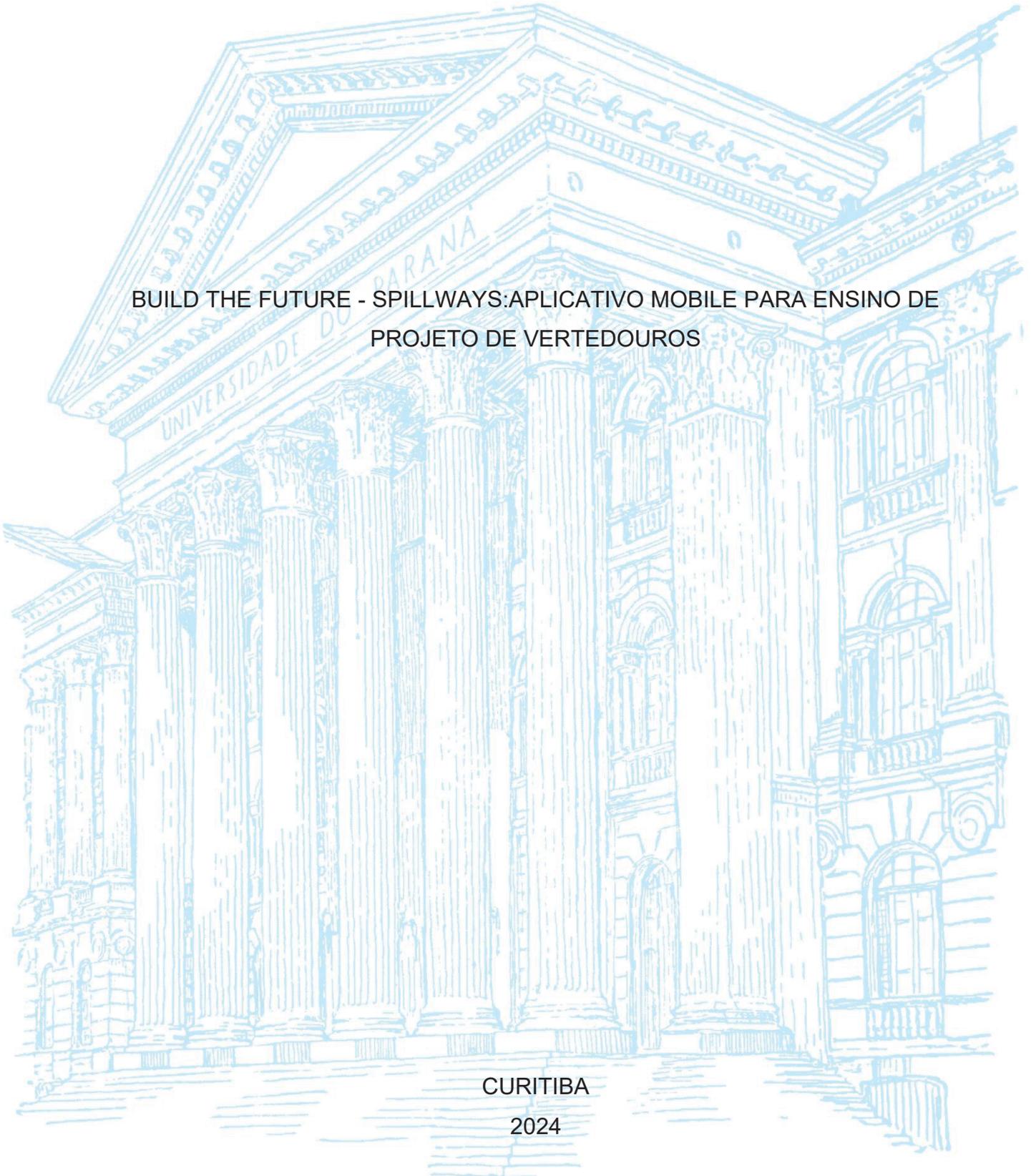
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO TANHOLE DE LIMA COLODEL

BUILD THE FUTURE - SPILLWAYS: APLICATIVO MOBILE PARA ENSINO DE
PROJETO DE VERTEDOUROS

CURITIBA

2024



BRUNO TANHOLE DE LIMA COLODEL

BUILD THE FUTURE - SPILLWAYS: APLICATIVO MOBILE PARA ENSINO DE
PROJETO DE VERTEDOUROS

Documento apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

Coorientador: Prof. Dr. André Luiz Tonso Fabiani

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Colodel, Bruno Tanhole de Lima

Build the future – Spillways: aplicativo mobile para ensino de projeto de vertedouros / Bruno Tanhole de Lima Colodel. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Daniel Henrique Marco Detzel

Coorientador: André Luiz Tonso Fabiani

1. Software educacional. 2. Psicologia educacional. 3. Recursos hídricos. 4. Engenharia de software. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Detzel, Daniel Henrique Marco. IV. Fabiani, André Luiz Tonso. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **BRUNO TANHOLE DE LIMA COLODEL** intitulada: **Build the Future - Spillways: Aplicativo Mobile para Ensino de Projeto de Vertedouros**, sob orientação do Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Maio de 2024.

Assinatura Eletrônica

23/05/2024 13:33:47.0

DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

24/05/2024 09:46:28.0

MARCOS CRISTIANO PALU

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/05/2024 20:33:26.0

ANDREIA DE JESUS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ -
CURITIBA)

Assinatura Eletrônica

24/05/2024 12:27:29.0

ELOY KAVISKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. Daniel Henrique Marco Detzel, do departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR, por todo o apoio no desenvolvimento deste trabalho, bem como na entrevista para elicitación de requisitos e na avaliação do *software* educativo.

A professora Ma. Andreia de Jesus, do Setor de Educação Profissional e Tecnológica da UFPR, pela orientação no trabalho de conclusão de curso de análise e desenvolvimento de sistemas, o qual serviu como base para o presente trabalho.

A Willian de Lima Miyamoto, pela criação das animações 3D e apoio na confecção das ilustrações.

“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção”. (FREIRE, 1996, p. 21)

RESUMO

Estruturas hidráulicas possuem uma ampla gama de aplicação na base de serviços públicos essenciais à população, como nas usinas hidrelétricas, no controle de cheias e no saneamento. Desta forma, dada a relevância e importância destas estruturas, é fundamental que haja profissionais qualificados para dimensioná-las, que são nada mais que o reflexo do êxito do sistema de ensino das universidades. Para tanto, o emprego de novas tecnologias em escolas de engenharia, apesar de incipiente, tem se mostrado uma alternativa promissora na facilitação e agilidade do processo de ensino aprendizagem. É com esse objetivo que este trabalho propõe *Spillways*: um *software* educativo de dimensionamento e análise de estabilidade de vertedouros do tipo ogiva. *Spillways* também é a segunda ferramenta desenvolvida para a série de aplicativos *Build the Future*, que tem como foco a criação de ferramentas voltadas ao ensino de engenharia de recursos hídricos e ambiental. Baseado na filosofia cognitivista de aprendizagem, na engenharia didático-informática, nos métodos consagrados do *US Army Corps of Engineers* e nas tecnologias de ponta do *Google* no que tange ao desenvolvimento de aplicações para dispositivos móveis, *Spillways* alia psicologia da educação, engenharia de recursos hídricos e engenharia de *software* no desenvolvimento de uma ferramenta capaz de guiar acadêmicos e engenheiros no aprendizado de um tema tão relevante para a sociedade. Esta primeira versão conta com duas etapas de projeto de vertedouro ogiva e treze módulos, nos quais o usuário poderá estudar da teoria à prática através de diversas ilustrações, *feedbacks* interativos e animações que facilitam a aprendizagem de forma lúdica. O desenvolvimento guiado por testes garantiu a qualidade do *software* e das exclusivas fórmulas produzidas para este trabalho, além de culminar em um modelo reduzido impresso em 3D. A avaliação do aplicativo foi realizada por professor especialista baseando-se em um método exclusivo para *softwares* educativos: a Taxonomia para Avaliação de Recursos Digitais de Aprendizagem (TARDA), no qual foi aprovado em 86% dos critérios analisados. Entretanto, *Spillways* não foi aplicado em sala de aula, o que pode ser alvo de estudo futuro. Além disso, a arquitetura de *software* de *Spillways* permite que novas estruturas hidráulicas possam ser adicionadas futuramente, de modo que diferentes aplicações da série *Build the Future* possam ser combinadas em um só aplicativo.

Palavras-chave: *Software* educativo. Vertedouro ogiva. Psicologia da educação. Engenharia didático-informática. Engenharia de recursos hídricos. Engenharia de *software*.

ABSTRACT

Hydraulic structures have a wide range of applications in essential public services for the population, such as hydroelectric power stations, flood control and sanitation. Therefore, given the relevance and importance of these structures, it is essential to have qualified professionals to design them, who are nothing more than a reflection of the success of the university education system. To this end, the use of new technologies in engineering schools, although still in its infancy, has proved to be a promising alternative for facilitating and speeding up the teaching-learning process. To this end, this paper proposes Spillways: an educational software program for the design and stability analysis of ogive spillways. Spillways is also the second tool developed for the Build the Future application series, which focuses on creating tools for teaching water resources and environmental engineering. Based on the cognitivist philosophy of learning, didactic-informatics engineering, the established methods of the US Army Corps of Engineers and Google's cutting-edge technologies when it comes to developing applications for mobile devices, Spillways combines educational psychology, water resources engineering and software engineering to develop a tool capable of guiding academics and engineers in learning about a subject that is so relevant to society. This first version has two stages of ogive spillway design and thirteen modules, in which the user can study from theory to practice through various illustrations, interactive feedback and animations that facilitate learning in a playful way. Test-driven development ensured the quality of the software and the exclusive formulas produced for this work, as well as culminating in a reduced 3D-printed model. The application was evaluated by a specialist teacher based on an exclusive method for educational software: the Taxonomy for the Evaluation of Digital Learning Resources (TARDA), in which it passed 86% of the criteria analyzed. However, Spillways has not been applied in the classroom, which could be the subject of future study. In addition, Spillways' software architecture allows new hydraulic structures to be added in the future, so that different applications from the Build the Future series can be combined into a single application.

Keywords: Educational software. Ogival spillway. Educational psychology. Didactic-informatics engineering. Water resources engineering. Software engineering.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VERTEDOIRO OGIVA ESCALONADO	20
FIGURA 2 – TIPOS COMUNS DE VERTEDOUROS.....	21
FIGURA 3 – VERTEDOIRO EM CANAL	25
FIGURA 4 – VARIÁVEIS DO PERFIL CREAGER	27
FIGURA 5 – CORREÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA EM FUNÇÃO DO GRAU DE SUBMERSÃO	29
FIGURA 6 – EXTREMIDADES COMUNS EM VERTEDOUROS.....	30
FIGURA 7 – GEOMETRIAS COMUNS DE PILARES CENTRAIS EM VERTEDOUROS	30
FIGURA 8 – EXEMPLOS DE CASOS DE CARREGAMENTO EM VERTEDOUROS	33
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES HIDROSTÁTICAS QUANDO HÁ ABERTURA DE FISSURA	37
FIGURA 10 – CLASSIFICAÇÃO DOS <i>SOFTWARES</i> EDUCATIVOS.....	42
FIGURA 11 – GRAVITY DAMS: TELAS INICIAIS.....	45
FIGURA 12 – GRAVITY DAMS: TELAS APÓS LOGIN	45
FIGURA 13 – GRAVITY DAMS: CAPÍTULO DE SIMULAÇÃO	46
FIGURA 14 – MODELO DE PROCESSO DE <i>SOFTWARE</i> : ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA	48
FIGURA 15 – O PROCESSO DE ELICITAÇÃO E ANÁLISE DE REQUISITOS	50
FIGURA 16 – O MASCOTE	53
FIGURA 17 – DIMENSÕES DE AVALIAÇÃO DA TARDA 2.0	57
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO CAMINHO PRINCIPAL DO <i>SOFTWARE</i> EDUCATIVO	63
FIGURA 19 – TELAS INICIAIS DE <i>SPILLWAYS</i>	64
FIGURA 20 – TELAS DE VISUALIZAÇÃO E CADASTRO DE ESTRUTURAS	65
FIGURA 21 – NÍVEIS DA OBRA ILUSTRATIVA DA USINA HIDRELÉTRICA	65
FIGURA 22 – TELAS DE CONFIGURAÇÕES DE <i>SPILLWAYS</i>	66
FIGURA 23 – SUBMÓDULOS DE <i>SPILLWAYS</i>	68
FIGURA 24 – SIMULAÇÕES FICTÍCIAS EM VERTEDOIRO OGIVA	69
FIGURA 25 – VISÃO COMPUTACIONAL DO MODELO REDUZIDO	75
FIGURA 26 – MODELO REDUZIDO IMPRESSO EM 3D	75

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DE VERTEDOUROS	19
QUADRO 2 –VERTEDOUROS EM <i>SPILLWAYS</i>	22
QUADRO 3 – VAZÃO DE PROJETO.....	23
QUADRO 4 – DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO EM CANAL	26
QUADRO 5 – VARIÁVEIS DE PROJETO DO PERFIL CREAGER	28
QUADRO 6 – COMPRIMENTO LÍQUIDO DA CRISTA DO PERFIL CREAGER	31
QUADRO 7 – TEORIAS EDUCACIONAIS NÃO-CRÍTICAS	38
QUADRO 8 – TEORIAS EDUCACIONAIS CRÍTICO-REPRODUTIVISTAS	39
QUADRO 9 – PRINCIPAIS FILOSOFIAS DE APRENDIZAGEM.....	40
QUADRO 10 – PRINCIPAIS TEORIAS DE APRENDIZAGEM	40
QUADRO 11 – EMENTA DE GRAVITY DAMS.....	44
QUADRO 12 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO ANALÍTICO- HIPOTÉTICO	49
QUADRO 13 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO HIPOTÉTICO- EXPERIMENTAL	51
QUADRO 14 – CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PROTOTIPAÇÃO	52
QUADRO 15 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO EXPERIMENTAL- OPERACIONAL	54
QUADRO 16 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO OPERACIONAL- ANALÍTICO	54
QUADRO 17 – CONFIGURAÇÕES DE USUÁRIO.....	66
QUADRO 18 – ESTRUTURAS, ETAPAS, MÓDULOS E SUBMÓDULOS DE <i>SPILLWAYS</i>	67
QUADRO 19 – RESULTADO DA AVALIAÇÃO DE <i>SPILLWAYS</i> POR ESPECIALISTA.....	77
QUADRO 20 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOFTWARE DE <i>SPILLWAYS</i> POR ESPECIALISTA.....	78
QUADRO 21 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE USO DE <i>SPILLWAYS</i> POR ESPECIALISTA.....	79
QUADRO 22 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE PEDAGÓGICA DE <i>SPILLWAYS</i> POR ESPECIALISTA.....	80

QUADRO 23 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE HÍBRIDA DE SPILLWAYS POR ESPECIALISTA.....	81
--	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE: FATORES MÍNIMOS DE SEGURANÇA	35
TABELA 2 – ENTRADA DE DADOS DE TESTE PARA DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTEDOIRO OGIVA.....	70
TABELA 3 – RESULTADOS DO TESTE DE DIMENSIONAMENTO DE VERTEDOIRO OGIVA	71
TABELA 4 – RESULTADOS DO TESTE DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTEDOIRO OGIVA	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. VERTEDOUROS.....	18
2.2. PROCESSO DE PROJETO DE VERTEDOUROS.....	21
2.2.1. Tipo de Vertedouro.....	22
2.2.2. Vazão de Projeto	22
2.2.3. Dimensionamento de Vertedouro em Canal.....	25
2.2.4. Dimensionamento de Barragem Vertedoura	26
2.2.5. Dimensionamento de Vertedouro Ogiva - Perfil Creager	27
2.2.6. Análise de Estabilidade de Vertedouros em Concreto	31
2.3. EDUCAÇÃO E TECNOLOGIAS EDUCACIONAIS.....	38
2.3.1. Teorias Educacionais	38
2.3.2. Teorias de Aprendizagem	39
2.3.3. Classificação de <i>Softwares</i> Educativos	41
2.4. TRABALHOS CORRELATOS	43
3. CAMINHO METODOLÓGICO	47
3.1. CICLO ANALÍTICO-HIPOTÉTICO	48
3.2. CICLO HIPOTÉTICO-EXPERIMENTAL.....	51
3.3. CICLO EXPERIMENTAL-OPERACIONAL.....	53
3.4. CICLO OPERACIONAL-ANALÍTICO	54
4. TECNOLOGIAS APLICADAS NO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	58
4.1. ASTAH	58
4.2. MOCKPLUS	59
4.3. ANDROID STUDIO	59
4.4. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO DART.....	60
4.5. FLUTTER	60
4.6. FIREBASE.....	61
4.7. GITHUB.....	62
4.8. INFRAESTRUTURA DE DESENVOLVIMENTO	62
5. APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE EDUCATIVO	63
6. AVALIAÇÃO DO SOFTWARE EDUCATIVO	77
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	82

7.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS.....	84
GLOSSÁRIO.....	88
APÊNDICE 1 – ENTREVISTA COM PROFESSOR DA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	89
APÊNDICE 2 – HISTÓRIAS DE USUÁRIO E PROTÓTIPOS	91
APÊNDICE 3 – REQUISITOS FUNCIONAIS E NÃO FUNCIONAIS	102
APÊNDICE 4 – PROCESSO DE PROJETO DE VERTEDOUROS TIPO OGIVA ..	104
APÊNDICE 5 – DIAGRAMAS UML	134
APÊNDICE 6 – CHECKLIST BASEADO NA TARDA 2.0.....	144
APÊNDICE 7 – MANUAL DE INSTALAÇÃO	148

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Resenha Energética Brasileira de 2023, publicada pelo Ministério de Minas e Energia, a participação da geração hidráulica na matriz elétrica brasileira aumentou de 56,8% em 2021 para 63,8% em 2022. Isto tornou o Brasil, em 2022, o segundo país do mundo que mais gerou energia elétrica a partir da fonte hidráulica, atrás somente da China. As fontes renováveis representaram 87,9% da energia elétrica gerada em 2022 (BRASIL, 2023, p. 23-24). Esses dados mostram que o Brasil é dependente das usinas hidrelétricas, e não apenas para geração de energia, mas também para os usos múltiplos dos seus grandes reservatórios, como no abastecimento de água, na irrigação e na navegação.

As usinas hidrelétricas mais comuns possuem os seguintes componentes: as estruturas hidráulicas, como barragem para criar o reservatório e um vertedouro para descarregar as cheias; uma casa de força, onde ficam as turbinas; condutos forçados que conduzem a água sob alta pressão até a casa de força; descarregador de fundo que possibilita a remoção de sedimentos que se depositam ao longo da barragem; uma subestação que inclui transformadores; uma linha de transmissão para a distribuição da energia gerada; e sistemas auxiliares como ventilação, proteção contra incêndio e comunicações. Todos esses componentes devem ser dimensionados harmoniosamente e considerando os parâmetros topográficos e geológicos da região (PEREIRA, 2022, p. 20).

A concepção das estruturas hidráulicas se inicia na determinação de valores extremos de vazão nos locais de implantação. Por muito tempo foi adotada a premissa de estacionariedade nos estudos de análise de frequência e magnitude de cheias, isto é, quando o tempo de retorno de uma vazão não varia com o tempo. Entretanto, 75 de 157 séries fluviométricas de vazões máximas anuais do sul do Brasil mostram um caráter não-estacionário, onde uma cheia com tempo de retorno de 100 anos muda para 48 a 75 anos considerando o novo modelo. Isso ocorre porque mudanças hidroclimáticas, a urbanização, as novas práticas agrícolas e a operação de usinas hidrelétricas e de reservatórios alteram o padrão de cheias, invalidando as análises estacionárias (BARTIKO, CHAFFE e BONUMÁ, 2017).

Este processo não-estacionário tende a se intensificar em regiões onde a suscetibilidade a inundações estão confirmadas em modelos estacionários, como é o caso de muitos municípios pertencentes a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas no

Rio Grande do Sul. No caso de Encantado e Roca Sales, por exemplo, foi utilizada, considerando o tempo de retorno de 5 anos, uma variação de 10m de aumento do nível do rio Taquari para o mapeamento das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas. Este mesmo estudo concluiu que 8% de toda a área dessa bacia é suscetível a tais eventos extremos (OLIVEIRA, ECKHARDT, *et al.*, 2017).

Os vertedouros são as estruturas hidráulicas utilizadas para o controle dessas cheias através da regulação da vazão a jusante. Em reservatórios de controle de cheias o vertedouro interrompe (reservatório *online*) ou desvia (reservatório *offline*) parte do escoamento do curso d'água principal para uma zona de amortecimento, resultando na atenuação da vazão de pico e na diminuição da vazão escoada para a jusante (RAIMUNDO, 2007).

Entretanto, os usos dos vertedouros não se resumem ao controle de cheias. Eles são amplamente utilizados também no saneamento, como em estações de tratamento de água, onde desempenham importante papel no controle, na estabilização e na regulação do nível de água a montante, além da possibilidade de medição da vazão afluente e da mistura rápida de coagulantes (ROSA, VIANNA e FILGUEIRAS, 2012).

Nas usinas hidrelétricas, os vertedouros assumem fundamental importância de segurança ao impedir o galgamento em grandes cheias, o que pode causar a ruptura da barragem e danos irreparáveis ao meio ambiente e às pessoas que habitam a área atingida. Desta forma, o aumento da frequência de vazões fluviométricas extremas torna o dimensionamento de vertedouros ainda mais crucial na formação de qualquer engenheiro hidráulico (DANTAS e SILVA, 2016).

Entretanto, a formação em engenharia possui diversos desafios no Brasil. Por um lado, a grande evasão dos discentes ocasionada por diversos motivos, como a falta de motivação para o curso e o baixo rendimento acadêmico. Por outro lado, os cursos de pós-graduação negligenciam a capacitação discente dos mestrandos e doutorandos, priorizando apenas a atividade de pesquisador (PARIZOTO, 2018, p. 57-58). Além disso, novas abordagens de ensino para a engenharia têm sido propostas para que o aluno adquira a capacidade de aprender a aprender. A aprendizagem baseada em problemas é uma dessas abordagens onde o foco é a geração de possíveis soluções para um problema específico (PARIZOTO, 2018, p. 80-81).

O processo de ensino-aprendizagem por meio de recursos computacionais nos cursos de engenharia ainda é pouco explorado devido à falta de capacitação docente e pelo pouco investimento das instituições na obtenção de *softwares* técnicos que muitas vezes não cabem no orçamento. Entretanto, a utilização de *softwares* na metodologia de ensino em disciplinas de engenharia civil tem se mostrado uma importante ferramenta para simular o ambiente de trabalho cada vez mais tecnológico dos engenheiros civis (BORÇATO, HACKBARTH e MELO, 2022).

É com base nestes contextos social e educacional que surgiu a série de *softwares* educativos *Build the Future* que possui como objetivo a melhoria do ensino de temas relacionados com a engenharia de recursos hídricos e ambiental. O primeiro destes aplicativos foi *Gravity Dams*, que visou o ensino de estabilidade de barragens à gravidade (COLODEL, OLIVEIRA e JESUS, 2021). Continuando esta série, este trabalho propõe *Spillways*, voltado ao ensino de projeto de vertedouros do tipo ogiva.

Desta forma, o objetivo geral desta dissertação é desenvolver um *software* educativo *mobile* para o ensino de dimensionamento e projeto de vertedouros do tipo ogiva. Com isso, visa-se disponibilizar um *software* educativo para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem, demonstrando o passo a passo das análises e simulações decorrentes de cada resultado encontrado. Os objetivos específicos são:

- a) Descrever sobre vertedouros e quais são os mecanismos de dimensionamento;
- b) Estabelecer fórmulas e ajustes polinomiais de acordo com os ábacos utilizados no dimensionamento dos vertedouros;
- c) Definir a filosofia de aprendizagem e a(s) teoria(s) de aprendizagem, além de classificar o *software* educativo para este conteúdo específico;
- d) Levantar requisitos funcionais e não funcionais;
- e) Realizar a análise do *software* por meio de diagramas, especificação de funcionalidades e elaboração de protótipos;
- f) Avaliar o *software* educativo pela visão de especialista;

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, incluindo a presente introdução (capítulo 1). Na fundamentação teórica (capítulo 2) são apresentados a definição, tipos e métodos de dimensionamento de alguns tipos de vertedouros. Considerando os objetivos educacionais, é feita uma passagem pelas teorias educacionais, através das quais são classificados os *softwares* educativos. Por fim, os trabalhos correlatos

demonstram o avanço na área de *softwares* voltados para o ensino superior, sobretudo para as engenharias.

No caminho metodológico (capítulo 3) é descrito um modelo de processo de *software* baseado na engenharia didático-informática, específica para o desenvolvimento de *softwares* educativos. É constituído por quatro fases: analítica, hipotética, experimental e operacional. Na fase operacional, onde é feita a verificação e validação, é apresentada um método avaliativo exclusivo baseado em uma taxonomia elaborada por Brito Junior (2015).

No capítulo 4 são explanadas todas as tecnologias utilizadas neste projeto, desde a modelagem e prototipação até a linguagem de programação e a plataforma de controle de versões.

Os resultados (capítulo 5) são a síntese do que foi feito em cada uma das fases previamente explanadas no capítulo 3, além de uma descrição detalhada do *software* desenvolvido, um teste completo de dimensionamento e análise de estabilidade do vertedouro ogiva, *prints* do aplicativo, além de ilustrações e animações criadas no seu desenvolvimento.

No sexto capítulo é mostrada a avaliação do software desenvolvido por um professor especialista da área de recursos hídricos. Para tanto, foi utilizada uma metodologia exclusiva de avaliação de softwares educativos, descrita no capítulo 3.

O sétimo e último capítulo retrata a importância de cada etapa no desenvolvimento do aplicativo, bem como o uso da tecnologia no ensino superior dada a ampla popularização dos *smartphones*. Por fim, é realizada uma reflexão das várias possibilidades de complementação e implementação de novas funcionalidades, uma vez que, como mostrado no capítulo 3, o desenvolvimento de *software* é um ciclo de melhoria contínua.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o alcance dos objetivos propostos e da efetividade do *software* desenvolvido é importante que os conceitos teóricos estejam bem especificados.

Assim, nesta seção são abordados os conceitos de vertedouros, seus tipos; bem como o processo de dimensionamento e projeto. Além disso, devido ao caráter educacional do *software*, deve-se estabelecer as teorias educacional e de aprendizagem aplicadas, bem como a classificação adotada. Os trabalhos correlatos na área de engenharia hidráulica estabelecem os avanços feitos por outras pesquisas e como outros projetos de informática na educação foram aplicados.

2.1. VERTEDOUROS

Frequentemente as barragens, que são estruturas construídas dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, são soluções para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos (BRASIL, 2010).

Os cursos d'água, apresentam, naturalmente, variações significativas de vazões ao longo do tempo. Desta forma, é necessário o controle da passagem das águas excedentes para jusante das barragens. Esse papel é feito pelos vertedouros, que “são as estruturas hidráulicas destinadas a efetuar a descarga das águas excedentes dos reservatórios sem ocasionar danos à barragem ou às outras estruturas hidráulicas adjacentes” (BAPTISTA e COELHO, 2010, p. 386). As condições geotécnicas e topográficas influenciam na escolha do tipo e da localização do vertedouro e geralmente são sucedidos por uma estrutura de descarga e de um dissipador de energia.

Quando utilizados para o controle de cheias, os vertedouros amortecem a vazão a jusante por meio da interrupção ou do desvio de parte da vazão do curso d'água principal, prevenindo inundações (RAIMUNDO, 2007).

Diversos critérios podem ser adotados para a classificação de vertedouros, como materiais constituintes, localização, operação, tipo de funcionamento hidráulico, forma geométrica da abertura, altura relativa da soleira, natureza da parede, comprimento relativo da soleira, natureza da lâmina, inclinação do paramento e forma geométrica da crista (QUADRO 1).

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DE VERTEDOUROS

Quanto a	Descrição	
Material	Concreto, gabiões, alvenaria, aço e madeira	
Localização	No corpo da barragem	Mais comum entre vertedouros de concreto. Pode-se ser subdividido em: de superfície e de fundo
	Independente	Através de um canal, tubulação ou túnel
Operação	Serviço	Descarrega as vazões mais frequentes
	Emergência	Descarrega apenas as grandes cheias
Funcionamento hidráulico	Com controle	Há presença de comportas (soleira situada abaixo do nível normal de água)
	Sem controle	Ausência de comportas (soleira elevada com crista arredondada)
Forma da abertura	Retangular, triangular, circular, trapezoidal, parabólico ou de seção composta	
Altura da soleira	Descarga livre	Altura da soleira é maior que o nível d'água de jusante
	Descarga afogada	Altura da soleira é menor que o nível d'água de jusante
Parede	Delgada	Espessura menor que 2/3 da carga hidráulica
	Espessa	Espessura maior que 2/3 da carga hidráulica
Comprimento da soleira	Sem contração lateral	Comprimento da soleira igual a largura do canal de chegada
	Com contração lateral	Comprimento da soleira é menor que a largura do canal de chegada
Natureza da lâmina	Livre	Pressão atmosférica na parte inferior da lâmina
	Deprimida	Pressão inferior à atmosférica na parte inferior da lâmina
	Aderente	Ausência de ar abaixo da lâmina vertente
Inclinação do paramento	Inclinado ou vertical	
Forma da crista	Retilínea, poligonal, labirinto, triangular ou circular	

FONTE: adaptado de Baptista e Coelho (2010) e de Raimundo (2007).

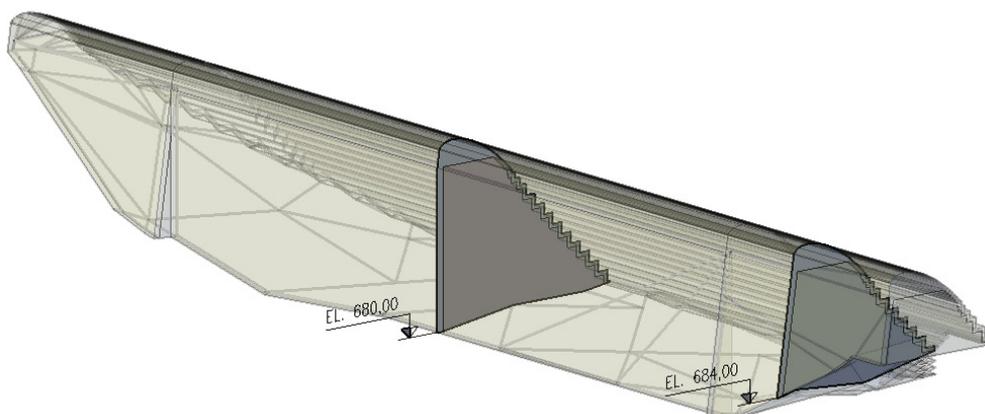
Desta forma, existem vários tipos de vertedouros, cada um com suas próprias características e aplicações específicas (FIGURA 2). Alguns dos tipos mais comuns são (PEREIRA, 2020):

- a) Ogiva: possui uma crista feita de acordo com o perfil de escoamento da água que incide sobre ele. Este tipo será o foco deste trabalho por se tratar de um dos tipos mais comuns de vertedouros. No vertedouro ogiva apresentado na FIGURA 1, onde sua base está em uma superfície irregular, há diferenças no perfil ao longo de seu comprimento;
- b) Lateral: utilizado quando as características topográficas do local implicarem em um vertedouro não incorporado ao eixo da barragem principal do rio. A crista é projetada considerando um fluxo supercrítico no canal lateral e de modo a permitir a dissipação de toda a energia descarregada, produzindo um fluxo;
- c) Tulipa: com uma crista circular em planta, a água flui para um poço no centro. É mais comum em locais onde o túnel utilizado na fase de desvio

do rio pode ser usado como parte do túnel de descarga horizontal ou em locais onde o arranjo de obra inclui uma barragem de terra relativamente baixa.

- d) Túnel: utilizado como extensão dos vertedouros tipo lateral e tipo tulipa. É fortemente condicionada a geologia e topografia da região;
- e) Calha: consiste em uma ogiva baixa com comportas que regulam o fluxo, seguidas por uma calha inclinada que conduz o fluxo a jusante da barragem. O projeto envolve solucionar dois problemas de fluxo supercrítico: ondas transversais de choque e a aeração ao longo da calha;
- f) Descarregador de fundo: normalmente controlado por uma comporta, é usado quando uma grande capacidade de fluxo é necessária em reservatórios de baixa pressão;
- g) Orifícios: utilizados no caso de barragens em arco em vales estreitos. O jato é lançado a uma distância da barragem para reduzir a erosão;
- h) Labirinto: particularmente vantajosos quando é necessário descarregar uma grande quantidade de água com uma pequena carga na crista. Tanto a estrutura quanto a manutenção são econômicas;
- i) Sifão: vertedouro de emergência ideal para locais remotos, pois despeja automaticamente o excesso de água para manter o nível do reservatório em elevação específica;
- j) Escalonado: composto por degraus que dissipam energia de modo a encurtar o comprimento da bacia de dissipação;
- k) Plataforma horizontal: composto por uma série de comportas e com baixo coeficiente de escoamento.

FIGURA 1 – VERTEDOURO OGIVA ESCALONADO



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 2 – TIPOS COMUNS DE VERTEDOUROS



FONTE: adaptado de Pereira (2020).

2.2. PROCESSO DE PROJETO DE VERTEDOUROS

O dimensionamento de um vertedouro envolve o cálculo das dimensões adequadas para garantir que ele possa lidar com o fluxo de água esperado sem causar problemas, como transbordamentos na barragem (galgamento) ou erosão excessiva a jusante. São passos básicos para este processo (ELETROBRÁS, 2000):

1. Escolha do tipo de vertedouro: fatores como topografia, capacidade de descarga necessária, espaço disponível e restrições ambientais devem ser levados em consideração na escolha do vertedouro. Em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) vertedouros de canal lateral e sobre o próprio corpo da barragem são amplamente adotados;
2. Determinação da vazão de projeto: é a vazão máxima que poderá passar pelo vertedouro. Para tanto, é necessário considerar dados geológicos, topográficos, hidrológicos e meteorológicos. Um dos métodos para estimar esta variável é o da precipitação máxima teórica, que é definida como o maior volume de precipitação em um determinado intervalo de tempo, bacia hidrográfica ou área de tempestade e época do ano. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2009);

3. Dimensionamento: varia conforme o tipo de vertedouro escolhido, mas de forma geral consiste no cálculo largura necessária, da altura da lâmina d'água, na análise da dissipação de energia a jusante e na análise de estabilidade.

2.2.1. Tipo de Vertedouro

Este trabalho se concentra, na primeira versão do aplicativo proposto, em vertedouros abrangidos e classificados pelo QUADRO 2.

QUADRO 2 –VERTEDOUROS EM *SPILLWAYS*

Quanto a	Descrição
Material	Concreto
Localização	No corpo da barragem e de superfície, tipo ogiva
Funcionamento hidráulico	Sem controle
Altura da soleira	Descarga livre ou afogada
Parede	Espessa (perfil Creager)
Comprimento da soleira	Com ou sem contração lateral
Inclinação do paramento de montante	Inclinado ou vertical
Forma da crista	Retilínea

FONTE: o autor (2024).

No caso de vertedouros de superfície, a escolha do tipo de funcionamento hidráulico se dá pela velocidade de subida do nível do reservatório R (em m/h) dada pela equação (1) (ELETROBRÁS, 2003, p. 32):

$$R = \frac{3600Q}{A} \quad (1)$$

Onde Q é a vazão de pico de projeto em m³/s e A é a área do reservatório em m².

2.2.2. Vazão de Projeto

Primeiramente, é importante ressaltar que, no Brasil, a vazão de projeto de um vertedouro dependerá da altura da barragem associada e do risco de perdas de vidas humanas caso se rompa, conforme QUADRO 3 (ELETROBRÁS, 2003).

QUADRO 3 – VAZÃO DE PROJETO

Critério	Vazão de Projeto
Altura da barragem superior a 30m ou reservatório com capacidade maior que 50.000.000 m ³ ou existência de habitações permanentes a jusante	Vazão máxima provável
Altura da barragem inferior a 30m e reservatório com capacidade menor que 50.000.000 m ³ e inexistência de habitações permanentes a jusante	Vazão com recorrência mínima de 1.000 anos

FONTE: adaptado de Eletrobrás (2003).

Para determinação da vazão de projeto é necessário o estudo das vazões extremas, conforme a disponibilidade de dados na bacia e na região de construção. Assim, são duas as possibilidades: o local dispõe ou não dispõe de dados de vazões médias diárias (ELETROBRÁS, 2000).

No primeiro caso deve ser estabelecida a relação entre os valores de vazões máximas e os tempos de retorno associados, baseando-se no exame probabilístico dos máximos registros fluviométricos anuais, da seguinte forma (ELETROBRÁS, 2000):

1. Definição da série de máximos anuais: de posse da série de vazões médias diárias, seleciona-se os maiores valores ocorridos anualmente;
2. Seleção da distribuição de probabilidades: exponencial de dois parâmetros quando a assimetria da amostra for superior a 1,5; ou Gumbel quando a assimetria for inferior a 1,5;
3. Dada uma variável aleatória x da qual se tem n observações, define-se a média pela equação (2), o desvio-padrão pela equação (3) e a assimetria pela equação (4).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

$$g = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \right) \quad (4)$$

4. Estimação dos quantis: o quantil de projeto x_T associado ao período de retorno T com a probabilidade p de não ser excedido é:

- Definido pela equação (5) para a distribuição exponencial de dois parâmetros.

$$x_T = x_o - \beta \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

onde: $x_o = \bar{x} - s$, $\beta = s$, x_o e β são os parâmetros da distribuição.

- Definido pela equação (6) para a distribuição de Gumbel.

$$x_T = \mu - \alpha \left(\ln \left(- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (6)$$

onde: $\alpha = 0,78s$; $\mu = \bar{x} - 0,577\alpha$; α e μ são os parâmetros da distribuição.

No segundo caso, onde não há uma série de vazões médias diárias, deve ser realizada a regionalização dos valores extremos por meio da transferência das vazões extremas ocorridas em bacias circunvizinhas para o local de estudo. Na falta de séries de vazões em bacias circunvizinhas, ainda é possível a elaboração do hidrograma sintético triangular (ELETROBRÁS, 2000):

a) Regionalização dos valores extremos:

- Determinação das curvas de regressão dos valores de vazões conhecidos pela equação (7), relacionadas com as respectivas áreas de drenagem:

$$q_t = a(A)^b \quad (7)$$

onde: a e b são coeficientes, q_t é a vazão específica em l/s.km² considerando o tempo de recorrência T e A é a área de drenagem de cada local em km².

- A qualidade do ajuste da correlação se dá pelo coeficiente de determinação (R²);

b) Hidrograma sintético triangular: a partir de um volume de chuva determina-se a vazão superficial no tempo. Neste caso, utiliza-se a formulação adotada pelo *Soil Conservation Service*, do departamento de agricultura dos Estados Unidos (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 1972).

2.2.3. Dimensionamento de Vertedouro em Canal

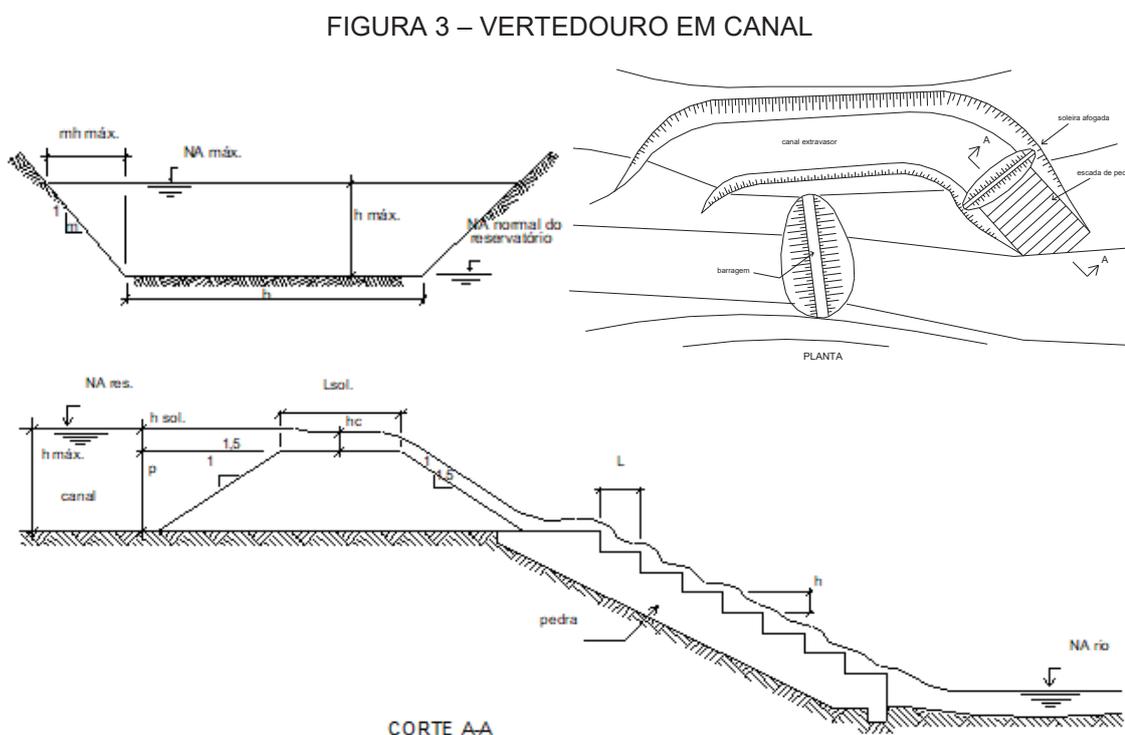
A Eletrobrás (2000) define uma sequência de cálculo para o dimensionamento de vertedouro em canal (FIGURA 3):

1. Coincidir a cota de fundo do canal com a elevação do nível de água normal de operação;
2. Definir a inclinação dos taludes (m), considerando a estabilidade com base nas características geotécnicas do material do terreno;
3. Inicialmente, fixar a lâmina d'água máxima no canal igual a 1,0m e a velocidade máxima admissível para este nível;
4. Determinar a largura necessária do canal pelas equações (8) e (9):

$$Q_{max} = V_{max}A = V_{max}(bh_{max} + mh_{max}^2) \quad (8)$$

$$b = \frac{Q_{max} - V_{max}mh_{max}^2}{V_{max}h_{max}} \quad (9)$$

5. Caso a largura do canal resulte em um valor impraticável, deve-se aumentar o nível d'água máximo.



FONTE: Eletrobrás (2000).

Definida a geometria do canal, é de suma importância a avaliação da dissipação de energia na região de restituição das águas ao leito do rio. Para isso, pode-se adotar um conjunto de soleira afogada e escadas, conforme dimensionamento apresentado pelo QUADRO 4.

QUADRO 4 – DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOIRO EM CANAL

Variável	Descrição	Equação
b	Largura do canal	$b = \frac{Q_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{a}x} m h_{m\acute{a}x}^2}{V_{m\acute{a}x} h_{m\acute{a}x}}$
p	Altura da soleira	$p \geq \begin{cases} h_{m\acute{a}x} - h_{sol} \\ 0,5m \end{cases}$
$h_{m\acute{a}x}$	Altura de água no canal	
h_{sol}	Altura de água na soleira	$h_{sol} = \left(\frac{Q_{m\acute{a}x}}{Cb} \right)^{2/3}$
C	Coefficiente de descarga	$C = 1,7$
$Q_{m\acute{a}x}$	Vazão de projeto	$Q_{m\acute{a}x} = C b h_{sol}^{3/2}$
h_c	Altura de água crítica sobre a soleira	$h_c = \sqrt[3]{\frac{(Q_{m\acute{a}x}/b)^2}{g}}$
L_{sol}	Comprimento da soleira	$L_{sol} = 2,5 h_{sol}$
$V_{m\acute{a}x,sol}$	Velocidade máxima sobre a soleira	$V_{m\acute{a}x,sol} \geq \begin{cases} \frac{Q_{m\acute{a}x}}{h_{sol} b} \\ \frac{Q_{m\acute{a}x}}{h_c b} \end{cases}$
L_{degrau}	Comprimento do degrau da escada de dissipação de energia	$L_{degrau} \geq 2 h_{degrau}$ A escada deve acompanhar a topografia do terreno natural.
h_{degrau}	Altura do degrau da escada de dissipação de energia	
Afastamento entre a entrada do canal e a barragem		$1,5b$

FONTE: adaptado de Eletrobrás (2000).

2.2.4. Dimensionamento de Barragem Vertedoura

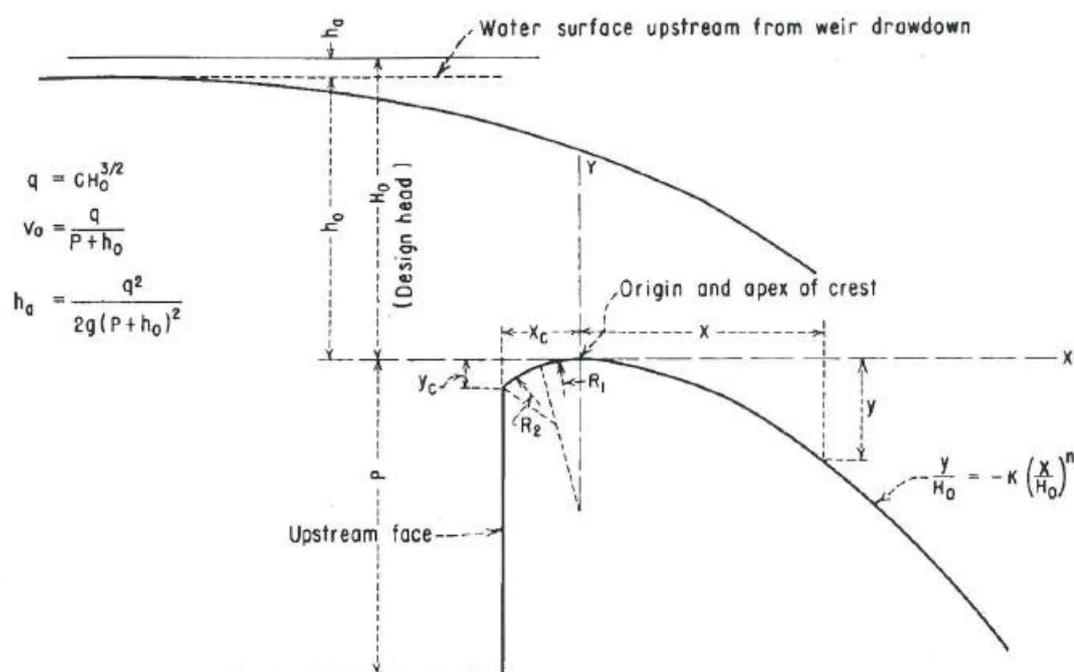
As barragens vertedoras são comumente feitas de dois materiais: concreto ou enrocamento. O processo de dimensionamento é o mesmo do vertedouro em canal, exceto o coeficiente de descarga que assume o valor de $C=2,0$ caso seja de concreto e $C=1,7$ caso seja de enrocamento (ELETROBRÁS, 2000).

2.2.5. Dimensionamento de Vertedouro Ogiva - Perfil Creager

O perfil Creager é um tipo de vertedouro ogiva em que há uma rampa à jusante inclinada em relação à superfície da água, o que permite maior descarga em comparação com um vertedouro retangular convencional. O dimensionamento segue um passo a passo semelhante aos dos tipos anteriores, seguindo um padrão definido pelo *Bureau of Reclamation* (1987), conforme FIGURA 4.

1. A altura da lâmina d'água é calculada considerando a carga hidráulica disponível;
2. A largura do vertedouro é função da vazão de projeto;
3. A capacidade de vazão do vertedouro deve ser superior à vazão de projeto.

FIGURA 4 – VARIÁVEIS DO PERFIL CREAGER



FONTE: Bureau of Reclamation (1987, p. 366).

De acordo com a FIGURA 4 definem-se as variáveis e as equações de projeto do perfil Creager resumidas pelo QUADRO 5 e considerando o comprimento necessário da crista L para a vazão de projeto.

QUADRO 5 – VARIÁVEIS DE PROJETO DO PERFIL CREAGER

Variável	Descrição	Equação
L	Comprimento efetivo da crista do vertedouro	-
H_0	Carga hidráulica de projeto	$P + H_0 = El_{NA} - El_{rio}$ (diferença entre as elevações do fundo do rio em questão e do nível de água normal no reservatório, de acordo com a vazão de projeto)
P	Altura da crista	
Q	Vazão de projeto	$Q = C_0 L H_0^{3/2}$
v_a	Velocidade de aproximação	$v_a = \frac{Q}{L(P + h_0)}$
h_a	Altura de energia relativa à velocidade de aproximação	$h_a = \frac{Q^2}{L^2 2g(P + h_0)^2} = \frac{v_a^2}{2g}$
X, Y	Coordenadas da face de jusante	$Y = -H_0 K \left(\frac{X}{H_0}\right)^n$

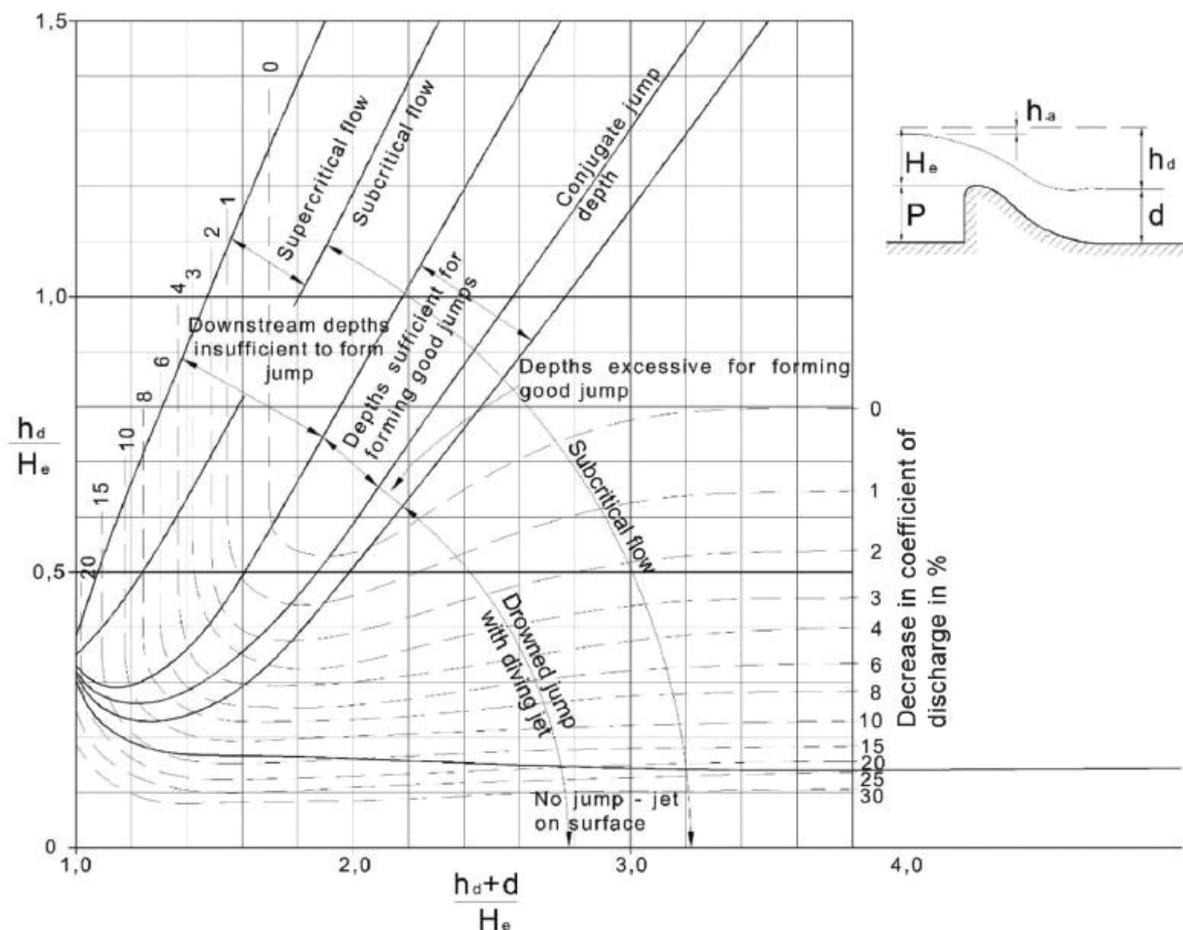
FONTE: adaptado de Pereira (2020).

As variáveis de geometria do vertedouro apresentadas na FIGURA 3 e o coeficiente de descarga C são definidos através de ábacos (CORPS OF ENGINEERS, 1977). Para efeito de programação do método computacional (produto deste trabalho) foram feitos ajustes polinomiais de acordo com o APÊNDICE 4.

É importante enfatizar que quanto maior o coeficiente de descarga C , menor será o comprimento do vertedouro, de modo a economizar o volume de concreto necessário. Assim, o dimensionamento de um vertedouro passa essencialmente pela otimização e ajustes deste coeficiente (APÊNDICE 4), que é afetado pela(o) (PEREIRA, 2020):

- a) Vazão de projeto;
- b) Profundidade do canal de entrada: quanto maior a relação P/H_0 , maior será o coeficiente de descarga de partida (C_0);
- c) Carga hidráulica de operação diferente da carga hidráulica de projeto: neste caso, se a carga de operação é maior que a de projeto, há um incremento no coeficiente de descarga;
- d) Inclinação do paramento de montante: tende a aumentar o coeficiente de descarga, exceto quando há inclinação de 45° e relação $P/H_0 \geq 1,0$;
- e) Regime de escoamento a jusante: a formação de ressalto favorece o coeficiente de descarga. O decremento no coeficiente de descarga pelos efeitos do grau de submersão (h_d/H_e) e da posição relativa do piso de jusante ($(h_d+d)/H_e$) é apresentado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – CORREÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA EM FUNÇÃO DO GRAU DE SUBMERSÃO

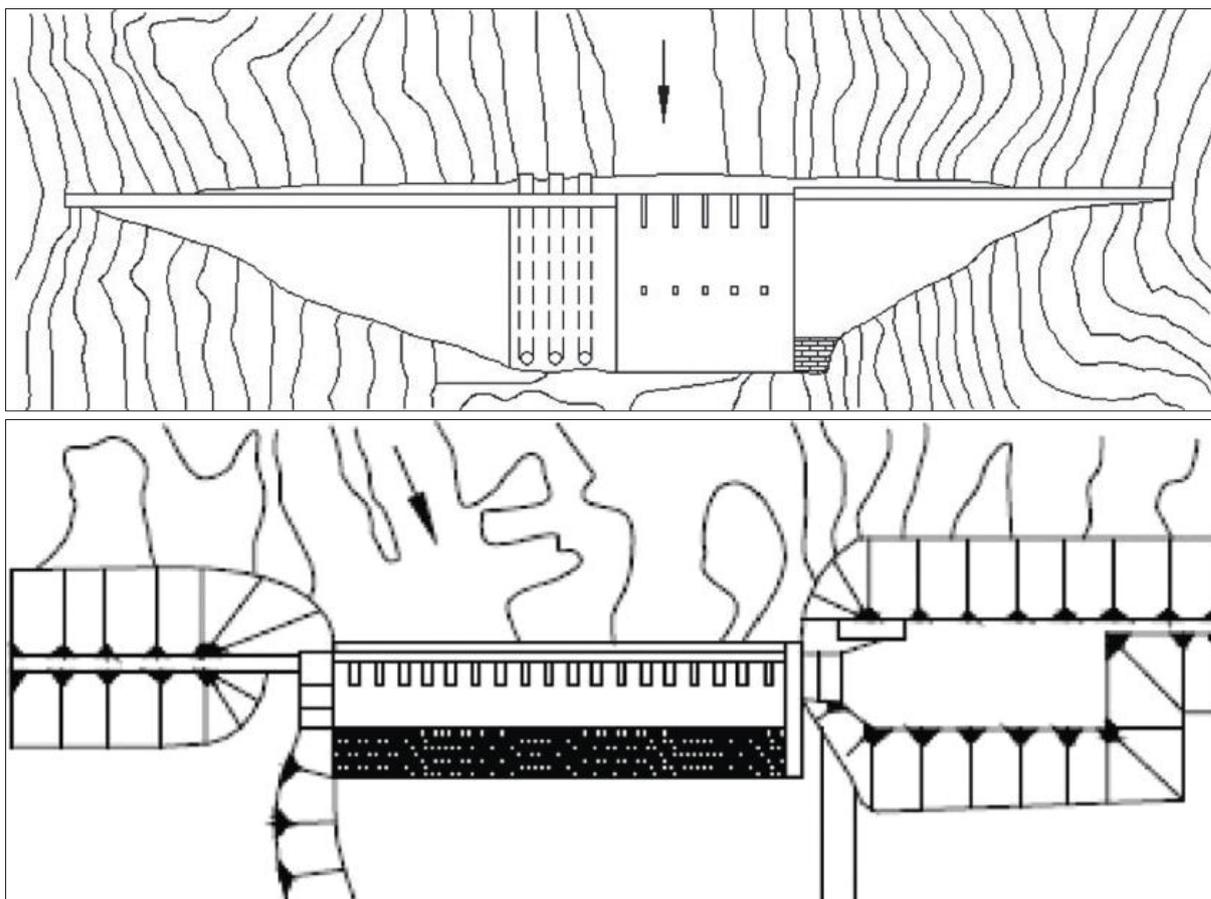


FONTE: PEREIRA (2020, p.87).

A FIGURA 5 ressalta os regimes de escoamento formados pela relação entre o grau de submersão à jusante (h_d/H_e) e a posição relativa do piso de jusante ($(h_d+d)/H_e$). O decremento no coeficiente de descarga ocasionado por estes dois parâmetros é demonstrado pelas linhas tracejadas.

Além disso, deve-se levar em consideração a redução do comprimento efetivo da crista devido à influência da estrutura utilizada nas extremidades (pilares de concreto ou enrocamento, conforme FIGURA 6) e da geometria dos pilares centrais do vertedouro (FIGURA 7) (QUADRO 6). Para tanto, são calculados os coeficientes K_p e K_a com o apoio de ábacos do US Army Corps of Engineers (1977), os quais também foram aplicados ajustes polinomiais (APÊNDICE 4).

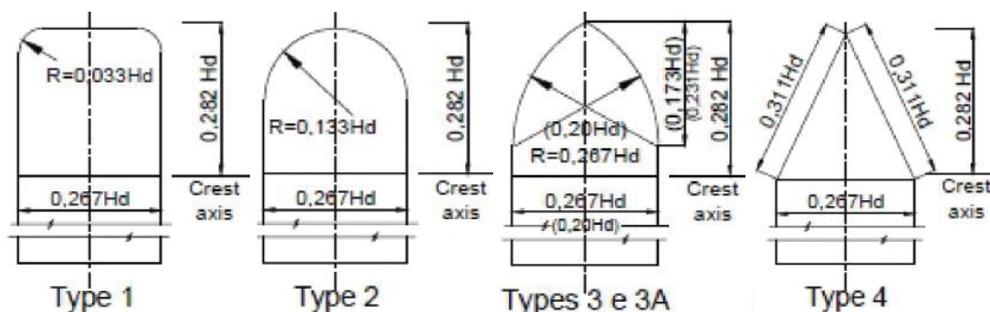
FIGURA 6 – EXTREMIDADES COMUNS EM VERTEDOUROS



FONTE: adaptado de Pereira (2020).

A FIGURA 6 demonstra duas estruturas de extremidade possíveis para um vertedouro: pilares de concreto e enrocamento. Cada uma delas afetam de forma diferente o escoamento, diminuindo o comprimento efetivo do vertedouro (L) em maior ou menor grau.

FIGURA 7 – GEOMETRIAS COMUNS DE PILARES CENTRAIS EM VERTEDOUROS



FONTE: adaptado de Pereira (2020).

A FIGURA 7 detalha alguns tipos possíveis de pilares centrais em vertedouros. Assim como as estruturas de extremidade, os pilares centrais afetam o escoamento. Portanto, a escolha desta geometria deve ser analisada a fim de otimizar a capacidade de descarga.

QUADRO 6 – COMPRIMENTO LÍQUIDO DA CRISTA DO PERFIL CREAGER

Variável	Descrição	Equação
L'	Comprimento líquido da crista	$L' = L + 2(NK_p + K_a)H_0$
N	Número de pilares centrais do vertedouro	-
Q	Vazão de projeto	$Q = C[L' - 2(NK_p + K_a)H_e]H_e^{3/2}$
H_e	Altura da linha de energia sobre a crista	-

FONTE: o autor (2023).

2.2.6. Análise de Estabilidade de Vertedouros em Concreto

Assim como em barragens à gravidade, a análise de estabilidade de vertedouros em concreto, como é o caso do tipo ogiva, inclui a verificação dos seguintes estados-limite: deslizamento em qualquer plano, tombamento, flutuação e tensões na estrutura, na fundação e na interface concreto-rocha. Além disso, nos elementos estruturais devem ser verificados os estados-limite associados à estabilidade elástica (flambagem), a deformações, a recalques e a vibrações. Para tanto, devem ser definidas as seguintes condições de contorno: as conformações topográficas do local; as tensões de confinamento pré-existente e as pressões de água do subsolo; e as subpressões e pressões intersticiais. A partir destas informações devem ser geradas as condições de carregamento, as quais são definidas por combinações de cargas que incidem permanentemente ou ocasionalmente na estrutura. Cada combinação gera uma condição de carregamento que possui um fator de segurança a ser cumprido quanto à flutuação, tombamento, deslizamento e tensões na base. As ações mais comuns a serem consideradas são (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2016):

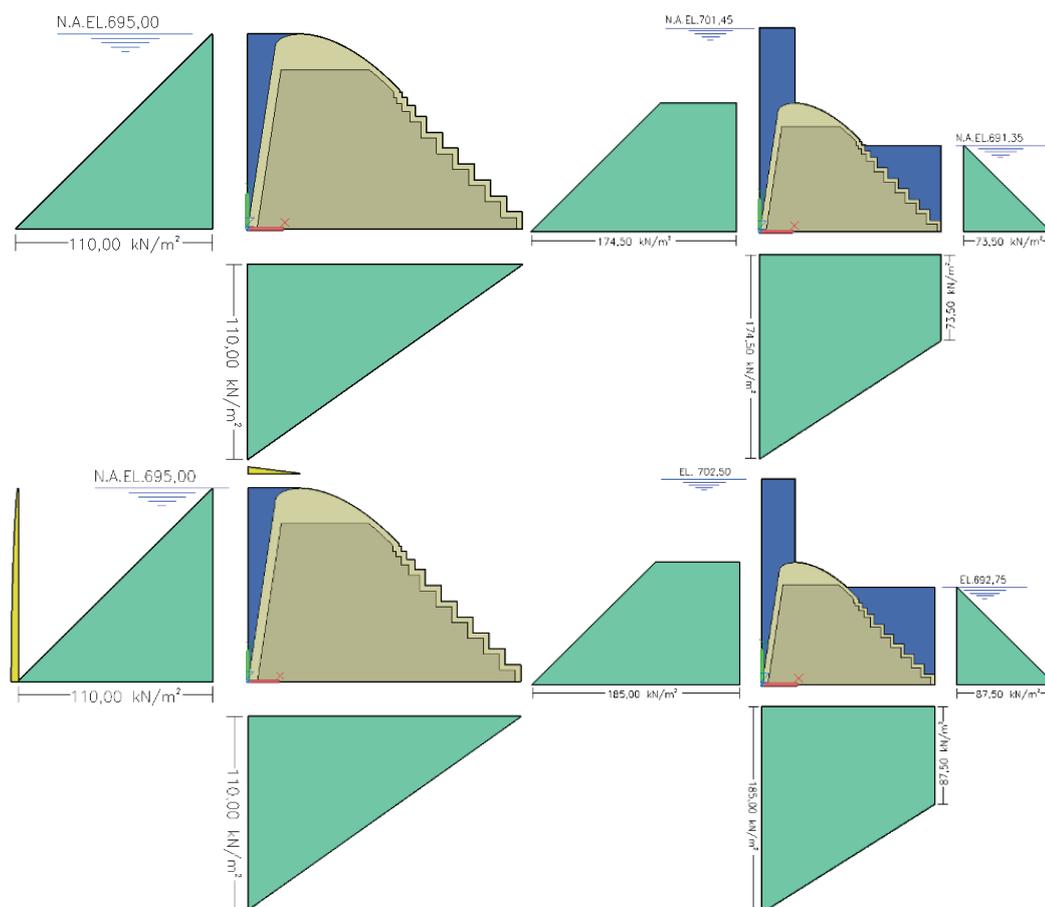
- Ações permanentes: peso próprio e sobrecargas fixas;
- Cargas acidentais: sobrecargas e de equipamentos, sejam eles de construção ou de operação;
- Pressões hidrostáticas;

- Pressões hidrodinâmicas: choques de ondas, ações sísmicas e outras ações dinâmicas da água;
- Pressões intersticiais nos poros: análises com traçado de redes de fluxo ou simplificadas, de acordo com as subpressões;
- Pressão dos sedimentos transportados;
- Empuxo de terraplenos;
- Ações devidas ao vento;
- Dilatação, retração e deformação lenta de estruturas de concreto;
- Ações devido à deformação das fundações e das encostas.

No Brasil, o manual que define como devem ser realizadas as análises de estabilidade de estruturas hidráulicas em concreto foi publicado em 2003 pela Eletrobrás, intitulado “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”, o qual fornece parâmetros para a análise estática (ELETROBRÁS, 2003). Em 2016, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico lançou o “Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens”, constituído por oito volumes, entre eles o “Volume V: Diretrizes para Elaboração de Projeto de Barragens” que contempla critérios de projetos das barragens, desde os elementos base aos órgãos extravasores e de operação, reservatório e área a jusante, além do controle da segurança através de plano de monitoramento, instrumentação, inspeções, análises e avaliações (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2016).

Neste trabalho a verificação de estabilidade global do vertedouro ogiva será realizada considerando o peso próprio e as pressões hidrostáticas que variam linearmente com a profundidade a partir do nível d’água (AZEVEDO NETTO, 1998). Estas são representadas através de diagramas triangulares ou trapezoidais para cada caso de carregamento (FIGURA 8).

FIGURA 8 – EXEMPLOS DE CASOS DE CARREGAMENTO EM VERTEDOUROS



FONTE: O autor (2023).

A FIGURA 8 apresenta as pressões hidrostáticas mais comuns em um vertedouro ogiva de acordo com os níveis d'água à montante e à jusante. A partir destas alturas hidrostáticas formam-se os diagramas de pressões incidentes. O primeiro caso, onde o nível d'água normal coincide com a crista do vertedouro, representa um caso de carregamento normal. O segundo, considerando níveis d'água com tempo de retorno de mil anos, representa um caso excepcional. No terceiro há a previsão de um sismo (em amarelo), mas com níveis d'água normais à montante e à jusante, resultando em outro caso excepcional. No último caso os níveis d'água são ainda mais altos que no segundo, representando um tempo de retorno de dez mil anos, o que resulta em um caso de carregamento limite.

A seguir são apresentadas todas as verificações pertinentes para as estruturas hidráulicas em concreto segundo o manual da Eletrobrás (2003):

- Casos de Carregamento: são resultados de um conjunto de níveis de água e eventos com certo grau de probabilidade de ocorrência. Os casos de

carregamento, de acordo com a Eletrobrás, são (ELETROBRÁS, 2003, p.141):

- Condição de Carregamento Normal (CCN): são as combinações de ações que apresentam grande probabilidade de ocorrência durante a operação normal ou manutenção de rotina da obra. São exemplos dessas ações os níveis de água que ocorrerão em quase 100% do tempo da vida útil (nível normal);
- Condição de Carregamento Excepcional (CCE): são as combinações de ações que apresentam baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura. Geralmente são tratadas de forma individual, uma vez que duas ações excepcionais possuem baixíssima probabilidade de ocorrência simultânea. São exemplos dessas ações os níveis de água com tempo de retorno de 1.000 anos (nível máximo), ou seja, tais níveis serão atingidos, em média, uma vez a cada milênio;
- Condição de Carregamento Limite (CCL): são as combinações de ações que apresentam baixíssima probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura. São exemplos destas ações a simultaneidade de duas ações excepcionais ou níveis de água com tempo de retorno de 10.000 anos (nível máximo maximorum), ou seja, tais níveis serão atingidos, em média, uma vez a cada dez milênios.
- Condição de Carregamento de Construção (CCC): são as combinações de ações que apresentam probabilidade de ocorrência durante a execução da obra, ou seja, acontece quando a construção da barragem não está finalizada. São exemplos destas ações os níveis de água nulo à jusante e variável à montante (podendo ser normal, máximo ou de desvio do rio).

Uma margem de segurança variável deve ser considerada para cada caso de carregamento. Assim, não apenas a condição limite deve ser verificada, mas todas as situações possíveis para verificar qual caso será determinante na escolha do perfil da estrutura (TABELA 1).

TABELA 1 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE: FATORES MÍNIMOS DE SEGURANÇA

Coeficientes de Segurança	Casos de Carregamentos			
	CCN	CCE	CCL	CCC
Flutuação – CSF	1,3	1,1	1,1	1,2
Tombamento – CST	1,5	1,2	1,1	1,3
Deslizamento sem Coesão – CSD _e	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)
Deslizamento com Coesão – CSD _c	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
Porcentagem Mínima de Base Comprimida	100%	75%	>0%	75%

FONTE: adaptado de Eletrobrás (2003, p.154 e 155).

b) Flutuação: ocorre quando as forças de subpressão são maiores que a do peso próprio da barragem. A subpressão é causada devido aos níveis de água à montante e à jusante. Quanto maiores as elevações dos níveis, maiores serão as forças de subpressão e, portanto, maior será a quantidade de concreto necessária para assegurar a segurança quanto à flutuação (ELETROBRÁS, 2003). O coeficiente de flutuação é dado pela equação (10) (ELETROBRÁS, 2003, p.146).

$$CSF = \frac{\sum V}{\sum U} \quad (10)$$

onde: CSF é o coeficiente de segurança à flutuação, $\sum V$ é o somatório das forças gravitacionais e $\sum U$ é o somatório das forças de subpressão.

c) Tombamento: é a consequência da ação que tende a tombar a estrutura e ocorre quando os momentos desestabilizantes, calculados a partir do ponto mais desfavorável (mais à jusante), são superiores aos momentos estabilizantes (ELETROBRÁS, 2003). O coeficiente de segurança ao tombamento é definido pela equação (11) (ELETROBRÁS, 2003, p.147).

$$CST = \frac{\sum M_e}{\sum M_t} \quad (11)$$

onde: CST é o Coeficiente de segurança ao tombamento, $\sum M_e$ é o somatório dos momentos estabilizantes e $\sum M_t$ é o somatório dos momentos de tombamento.

d) Deslizamento: acontece quando as forças de atrito e de coesão (obtidos através de parâmetros geomecânicos) entre a estrutura e a rocha (onde

normalmente os vertedouros são apoiados) não suportam as forças horizontais devido ao empuxo de água (ELETROBRÁS, 2003). Primeiramente, é analisado se apenas o atrito é suficiente para suportar as forças paralelas à superfície de escorregamento, de acordo com a equação (12). Caso não atenda o coeficiente mínimo, é feita a verificação com coesão através da equação (13).

$$\frac{\sum N_i t g \phi_i}{\sum T_i} \geq CSD_\phi \quad (12)$$

$$\frac{\frac{\sum N_i t g \phi_i}{CSD_\phi} + \frac{\sum C_i A_i}{CSD_c}}{\sum T_i} \geq 1,0 \quad (13)$$

onde: CSD_ϕ é o coeficiente de ponderação relativo ao atrito; CSD_c é o coeficiente de ponderação relativo à coesão; N_i é a força normal à superfície de escorregamento em análise; ϕ_i é o ângulo de atrito característico da superfície de escorregamento em análise; C_i é a coesão característica ao longo da superfície de escorregamento; A_i é a área efetiva de contato da estrutura no plano em análise; T_i é a resultante das forças paralelas à superfície de escorregamento.

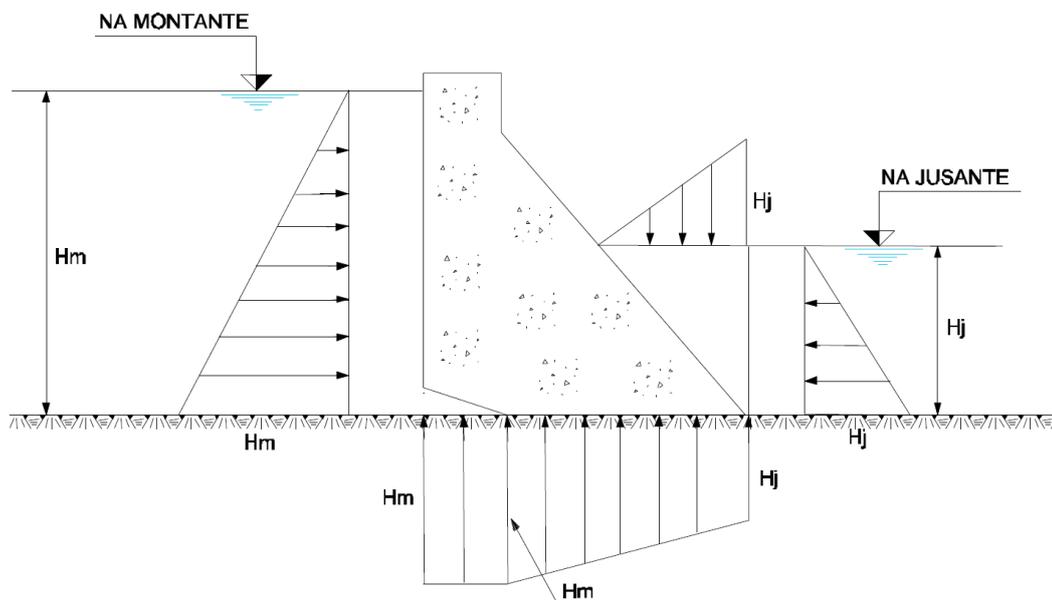
e) Tensões na Base: tensões de tração na seção sujeitam o concreto sem armadura adotado em vertedouros à ruptura devido à baixa resistência à tração. Além disso, as tensões de compressão excessivas podem ocasionar a ruptura do material e a consequente ruína da estrutura. *A priori*, é observado se a resultante das forças gravitacionais está dentro do terço médio da base (ou núcleo central de inércia), pois assim 100% dela terá tensões de compressão. Deste modo, pode-se dispensar a verificação quanto às tensões de tração. No entanto, se o valor da compressão for alto demais, a resistência dos materiais da fundação pode não ser suficiente. As tensões na seção de estudo são resultantes da ação conjunta das cargas verticais e da flexão, devido ao momento resultante da excentricidade das solicitações, conforme equação (14) (ELETROBRÁS, 2003).

$$\sigma = \frac{R_V}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (14)$$

onde: σ é a tensão máxima e mínima nas extremidades da seção; R_V é a resultante das forças verticais; A é a área da seção; $M = R_V \times e$, sendo e a excentricidade do ponto de aplicação da força resultante dos esforços, dada por $e = \eta - (\sum M/R_V)$, onde $\eta = h/2$; W é o módulo resistente da seção $W = I/\eta$, sendo I o momento de inércia da seção (para base retangular: $I = bh^3/12$);

Caso parte da base fique tracionada, deve-se realizar o processo de abertura de fissura, a fim de estabilizar quaisquer tensões de tração que ajudem a tombar o vertedouro (FIGURA 9).

FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES HIDROSTÁTICAS QUANDO HÁ ABERTURA DE FISSURA



FONTE: ELETROBRÁS (2003, p.128).

A FIGURA 9 apresenta como é dado o incremento de subpressão devido a abertura de fissura ao longo do trecho tracionado da base. Com a alteração da subpressão, conclui-se que este processo altera todas as outras verificações anteriores e por isso é necessário recalcular todos os coeficientes de segurança e a nova porcentagem da base que está comprimida. Desta forma, este processo confirma a estabilidade ou a instabilidade. Neste último caso mudanças na geometria da barragem são exigidas.

2.3. EDUCAÇÃO E TECNOLOGIAS EDUCACIONAIS

Para Freire (1996), a educação é um processo de libertação e conscientização e que deve ir além da mera transmissão de conhecimentos. A educação deve ser um processo dialógico em que professores e alunos aprendem juntos, questionando e transformando a realidade. Consequentemente, o aprendizado é baseado na troca de experiências e na construção coletiva do conhecimento. Desta forma, a aprendizagem é uma atividade ativa, conectada à realidade e ao contexto social dos aprendizes.

Este trabalho se propõe auxiliar a resolução de problemas de engenharia de recursos hídricos. Entretanto, no que couber, também possui o objetivo de tornar os aprendizes em agentes de mudança, capazes de transformar a sociedade em que vivem.

Esta seção compreende as teorias educacionais e de aprendizagens relatadas pela literatura, bem como a escolha de uma delas para servir como base para a criação do *software* proposto. A partir disto, também descreve o tipo de *software* educativo correspondente a estas correntes.

2.3.1. Teorias Educacionais

As teorias educacionais podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro, a educação é um instrumento de equalização social, isto é, de superação da marginalidade. A sociedade é vista como essencialmente harmoniosa, considerando a marginalização um fenômeno acidental, um desvio, uma distorção que deve ser corrigida. Assim, a educação é uma força homogeneizadora que tem por função reforçar os laços sociais promovendo a inclusão de todos os indivíduos e garantindo a construção de uma sociedade igualitária. Esta é a base das teorias não-críticas (QUADRO 7), pois encaram a educação como autônoma (SAVIANI, 1999).

QUADRO 7 – TEORIAS EDUCACIONAIS NÃO-CRÍTICAS

Teoria	Fundamentos
Pedagogia Tradicional	Submete-se ao tipo de sociedade correspondente aos interesses da classe dominante; a causa da marginalidade é a ignorância; é centrada no professor, o qual transmite, segundo uma graduação lógica, o acervo cultural aos alunos.
Pedagogia Nova	A marginalizado é todo aquele rejeitado pelo grupo simplesmente por possuir alguma diferença de qualquer aspecto em relação aos demais; o importante é aprender a aprender; o professor é apenas um

Teoria	Fundamentos
	estimulador e orientador da aprendizagem, cuja iniciativa principal cabe aos próprios alunos.
Pedagogia Tecnicista	Mecanização do processo de ensino-aprendizagem, colocando como elemento central a organização racional dos meios, no qual professores e alunos são apenas executores deste processo; o marginalizado é o ineficiente e improdutivo.

FONTE: adaptado de Saviani (1999).

No segundo grupo, a educação é um instrumento de discriminação social, ou seja, um fator de marginalização. Aqui a sociedade é marcada pela divisão entre grupos que se relacionam compulsoriamente. A marginalidade é um fenômeno inerente à própria estrutura da sociedade, uma vez que a classe dominante se apropria dos resultados da produção social. Desta forma a educação tem a função de reforçar a dominação e legitimar a marginalização. Esta é a base das teorias crítico-reprodutivistas (QUADRO 8), nas quais a função básica da educação é a reprodução da sociedade (SAVIANI, 1999).

QUADRO 8 – TEORIAS EDUCACIONAIS CRÍTICO-REPRODUTIVISTAS

Teoria	Fundamentos
Teoria do sistema de ensino enquanto violência simbólica	Imposição cultural da classe dominante economicamente às classes dominadas (marginalizadas); a função da educação é a reprodução das desigualdades sociais.
Teoria da escola enquanto aparelho ideológico de Estado	A ideologia de materializa em aparelhos ideológicos de Estado; reprodução das relações de exploração capitalista; classe trabalhadora é a marginalizada.
Teoria da escola dualista	Divisão da escola em duas grandes redes que correspondem à divisão da sociedade capitalista entre burguesia e proletariado; a escola possui o objetivo de formar força de trabalho e inculcar a ideologia burguesa.

FONTE: adaptado de Saviani (1999).

Neste contexto, dada a condição de *software* educativo de simulação, Spillways utiliza fundamentos da pedagogia nova ao considerar que, durante a utilização desta ferramenta, o aluno deve ser protagonista no processo de ensino-aprendizagem enquanto o professor exerce a função de orientar e motivar.

2.3.2. Teorias de Aprendizagem

As teorias de aprendizagem representam os pontos de vista de autores sobre como interpretar a aprendizagem. São elas que ditam o estudo da psicologia da educação. As teorias psicológicas da aprendizagem podem ser classificadas da

seguinte forma, conforme Moreira (1999): comportamentalista (*behaviorismo*), humanista e cognitivista. O QUADRO 9 resume as principais características de cada umas delas (MOREIRA, 1999).

QUADRO 9 – PRINCIPAIS FILOSOFIAS DE APRENDIZAGEM

Filosofias	Ênfase	Base
Comportamentalista	Comportamento observável	Condicionamento por meio de respostas a estímulos
Cognitivista	Cognição	Processos mentais de atribuição de significados, compreensão, transformação, armazenamento e uso da informação
Humanista	Pessoa	Aprender a aprender e crescimento pessoal

FONTE: adaptado de Moreira (1999).

Cada uma dessas filosofias possui uma ampla gama de ramificações que foram criadas ao longo do tempo por diversos autores. O QUADRO 10 apresenta as principais vertentes e respectivos autores de cada uma delas.

QUADRO 10 – PRINCIPAIS TEORIAS DE APRENDIZAGEM

Filosofia	Teoria e Autor	Princípio Principal
Comportamentalista	Behaviorismo de Burrhus Frederic Skinner	Condicionamento operante: processo no qual um reforçador vem imediatamente após uma resposta. O reforçador pode ser tanto um evento quanto um objeto que aumenta a frequência de uma resposta desejada.
	Hierarquias de aprendizagem de Robert Gagné	Conjunto de etapas onde a anterior é pré-requisito para a realização da próxima: discriminação, conceitos, regras e regras complexas.
Cognitivista	Teoria de ensino de Jerome Bruner	Aprendizagem por descoberta: os alunos devem ser incentivados a descobrir conceitos por si mesmos por meio da apresentação de problemas e desafios que levam os alunos a explorar, investigar e chegar a soluções por meio do pensamento crítico.
	Desenvolvimento cognitivo de Jean Piaget (Construtivismo)	A aquisição de conhecimentos acontece por meio da relação sujeito/objeto em processos de assimilação, acomodação e equilíbrio.
	Mediação de Lev Vygotsky	Zona de desenvolvimento proximal: refere-se à diferença entre o que um indivíduo pode fazer de forma independente e o que pode ser alcançado com a ajuda de alguém mais experiente. Reconhecer os limites inferior e superior desta zona é de fundamental importância para o desenvolvimento cognitivo, sendo a interação social indispensável neste processo.
	A psicologia dos construtos pessoais de George Kelly	As pessoas não apenas absorvem informações passivamente, mas também moldam e reestruturam suas ideias e percepções de acordo com seus construtos pessoais (maneiras específicas de categorizar e entender eventos e pessoas).

	Aprendizagem significativa de David Ausubel	A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação se ancora em conceitos preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Desta forma, os educadores devem ajudar os alunos a estabelecer conexões claras entre os conceitos, permitindo que eles vejam como os novos conhecimentos se encaixam em sua estrutura mental.
Humanista	Aprendizagem significativa de Carl Rogers	As pessoas têm uma potencialidade natural para aprender, mas a aprendizagem significativa tende a ocorrer quando situações facilitadoras estão presentes, tais como a relevância daquele conteúdo na autorrealização do aluno e as ameaças externas reduzidas a um mínimo.

FONTE: adaptado de Moreira (1999).

No comportamentalismo o foco são os comportamentos observáveis e as respostas do sujeito com base no comportamento operante. O cognitivismo enfatiza o ato de conhecer de maneira objetiva, científica. Enquanto o humanismo foca na autorrealização e crescimento pessoal do indivíduo (MOREIRA, 1999).

Para efeito do *software* produto deste trabalho é adotada a filosofia cognitivista como plano de fundo, uma vez que aqui não se analisa os comportamentos e as individualidades dos usuários. Entretanto, os aspectos comportamentais e humanistas podem ser levados em consideração nos planos de aula dos professores que utilizarão esta tecnologia. Ressalta-se também que não houve a adoção de uma teoria e autor específicos neste trabalho, a fim de se considerar todos os princípios cognitivistas ao longo do desenvolvimento do *software*.

2.3.3. Classificação de *Softwares* Educativos

Conforme FIGURA 10, os *softwares* educativos são classificados em oito grupos (TAVARES e SILVA, 2017):

- Exercício ou prática: busca reforçar conhecimentos através da memorização e repetição;
- Simulação: o aluno é colocado em situações que se assemelham à realidade onde precisa tomar decisões e posteriormente analisar as consequências;
- Modelagem: o aluno cria a situação a ser estudada que despertam a criatividade;
- Aplicativos: são *softwares* adaptáveis para diversos usos, inclusive o educacional;

- Jogos: ensinam conceitos de forma lúdica e interativa que entretêm o aluno e o estimula a resolver problemas utilizando conhecimentos prévios;
- Tutoriais: são caracterizados por uma sequência pedagógica e depois verifica se o aluno compreendeu através de exercícios. O tempo todo o aluno é instruído a realizar tarefas específicas e adequadas ao seu nível de habilidade e ritmo de aprendizado;
- Linguagem de programação: permitem a liberdade do próprio usuário criar seus códigos mesmo sem conhecimentos avançados em programação.
- Investigação: comumente representados por *softwares* de consulta a um banco de dados, como dicionários e motores de busca.

Para o presente *software* optou-se por um *software* de simulação, onde o usuário é conduzido por capítulos tutoriais, mas são propostas situações semelhantes à realidade em que ele deve dimensionar um vertedouro considerando as condições impostas.

FIGURA 10 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOFTWARES EDUCATIVOS



FONTE: Tavares e Silva (2017).

2.4. TRABALHOS CORRELATOS

As disciplinas habitualmente ensinadas nas escolas contam com ampla gama de *softwares* educativos, desde o ensino infantil até o médio. Entretanto, no ensino superior o uso de *softwares* educativos específicos ainda é incipiente (PARIZOTO, 2018). Isto abre uma grande variedade de oportunidades para o desenvolvimento de novos aplicativos para o ensino superior, inclusive nas áreas de engenharia civil e de engenharia de recursos hídricos, como alguns que serão relatados neste capítulo.

Um dos *softwares* nacionalmente conhecidos na área de engenharia civil, por exemplo, é o *Ftool* (*Two-dimensional Frame Analysis Tool*), desenvolvido inicialmente em 1991 através de um projeto de pesquisa integrado na PUC-Rio com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O principal objetivo do *Ftool* é a análise estrutural de pórticos planos, fornecendo como resultados diagramas de esforços internos e deformações, além da possibilidade de analisar múltiplos casos de carregamento em sua atual versão comercial. (PUC-RIO, 2024).

Ainda na área de estruturas, o *software* SEDim foi desenvolvido para auxiliar o professor no ensino de elementos de concreto armado segundo a NBR 6118. O SEDim permite o dimensionamento de vigas de flexão normal simples, o dimensionamento ao cisalhamento e o dimensionamento de pilares. Ao oferecer suporte na plataforma *mobile*, seu uso é facilitado em sala de aula pelos alunos de engenharia civil, no qual podem visualizar, de acordo com os dados de entrada, um roteiro de cálculo e um resumo dos resultados obtidos (TURPO, 2020).

No ramo da engenharia hidrológica, o Centro de Engenharia Hidrológica do *U.S. Army Corps of Engineers* desenvolveu, através de seu projeto *NextGen*, diversos *softwares* para apoiar a gestão e auxiliar as tomadas de decisão que envolvem os recursos hídricos. Entre eles está o *River Analysis System (HEC-RAS)*, que permite ao usuário realizar análises de escoamentos uni e bidimensionais, transporte de sedimentos e modelagem de temperatura e de qualidade da água. O sistema é composto por uma interface interativa e possui suporte a gráficos, mapeamento e relatórios automatizados (US CORPS OF ENGINEERS, 2024).

Outra poderosa ferramenta voltada para problemas de mecânica de fluidos é o *Open-source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM)*. Este *software* gratuito e de código aberto possibilita a resolução de problemas amplos da mecânica de meios contínuos, ou seja, também resolve problemas envolvendo sólidos rígidos e sólidos

deformáveis. *OpenFOAM* simula diversos cenários como fluxos incompressíveis e compressíveis, turbulência, transferência de calor, acústica, reações químicas, mecânica dos sólidos e eletromagnetismo (OPENCFD, 2024).

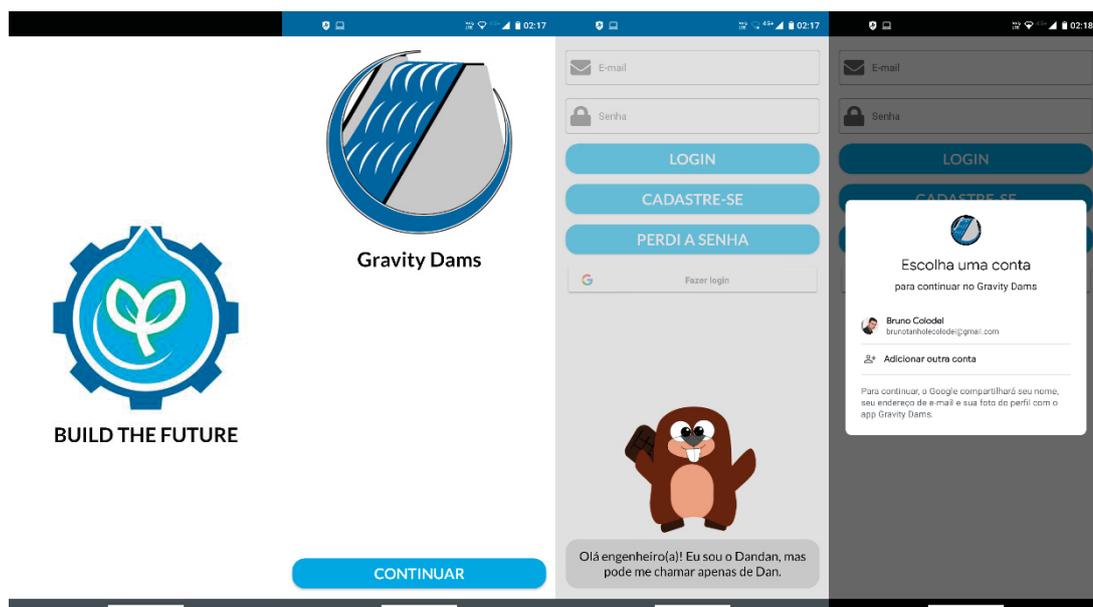
O *software* de ensino de estabilidade de barragens desenvolvido por Colodel, Oliveira e Jesus (2021), *Gravity Dams*, mostrou o potencial na área de recursos hídricos ao ser avaliado por professor universitário especialista: 29 pontos de 34 possíveis (métrica de avaliação). Este *software* mesclou capítulos conceituais e de simulação, de maneira que o aluno possa avançar na aprendizagem superando simulações criadas por ele próprio. O conteúdo abordado contemplou desde o estudo de centro de massa até abertura de fissura de base parcialmente comprimida (QUADRO 11). O sistema foi programado de tal maneira que conduziu o aluno pela sequência lógica de aprendizado e de forma lúdica com a presença de um mascote (FIGURA 11, FIGURA 12, FIGURA 13).

QUADRO 11 – EMENTA DE GRAVITY DAMS

Módulo	Capítulo	Tipo
Introdução	Barragens	Conceitual
	Barragens à Gravidade	Conceitual
	Centro de Massa	Simulação
Forças de Pressão	Hidrostática x Hidrodinâmica	Conceitual
	Pressões Hidrostáticas	Simulação
Ações	Casos de Carregamento	Conceitual
	Combinando Ações	Simulação
Forças Verticais	Gravitacionais	Conceitual
	Subpressão	Conceitual
	Flutuação	Simulação
Momentos Atuantes	Estabilizantes	Conceitual
	Desestabilizantes	Conceitual
	Tombamento	Simulação
Forças Horizontais	Deslizamento com Atrito	Conceitual
	Deslizamento com Coesão	Conceitual
	Deslizamento	Simulação
Abertura de Fissura	Máxima e Mínima	Conceitual
	Abertura de Fissura	Conceitual
	Tensões	Simulação

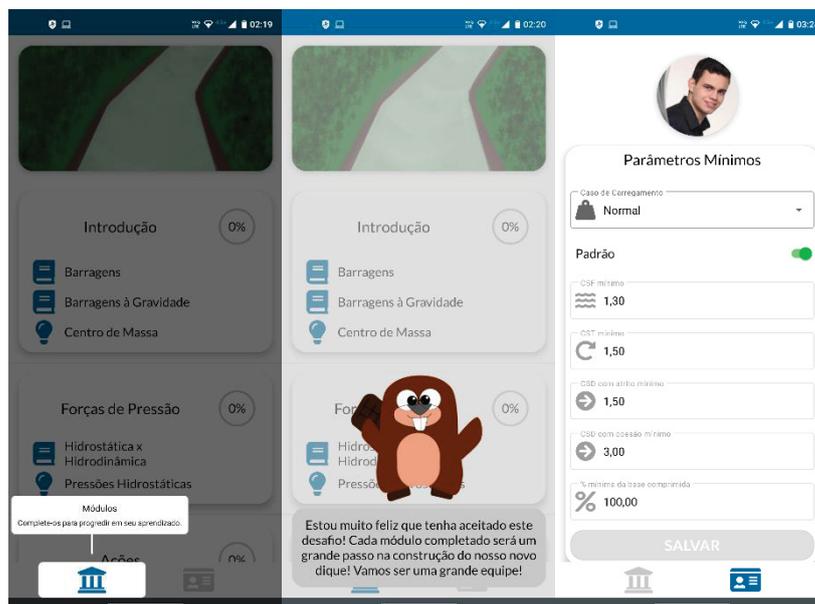
FONTE: Colodel, Oliveira e Jesus (2021, p.51).

FIGURA 11 – GRAVITY DAMS: TELAS INICIAIS



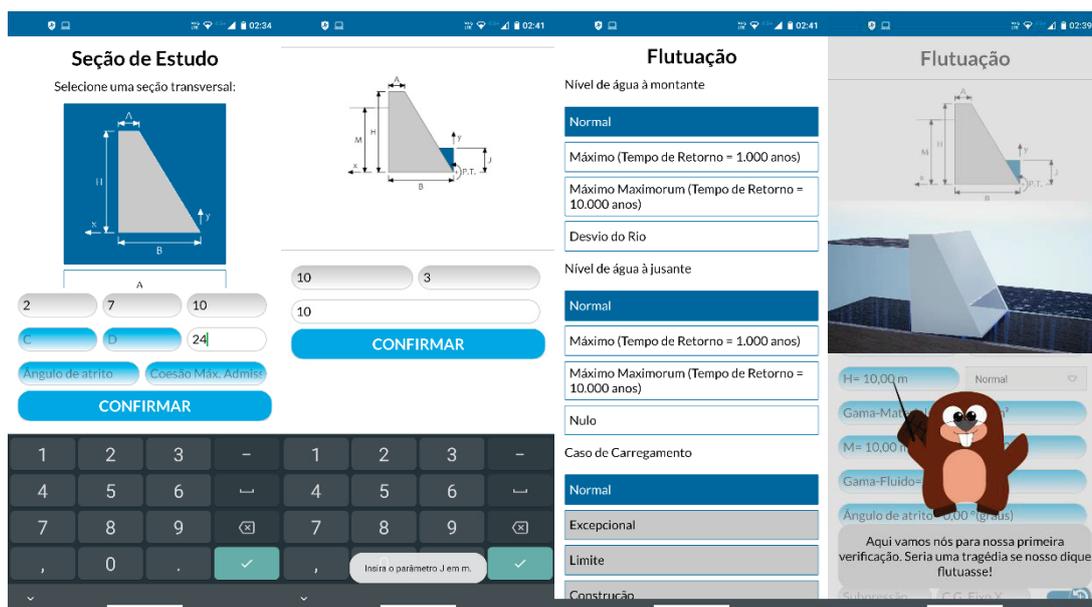
FONTE: Colodel, Oliveira e Jesus (2021, p.50).

FIGURA 12 – GRAVITY DAMS: TELAS APÓS LOGIN



FONTE: Colodel, Oliveira e Jesus (2021, p.52).

FIGURA 13 – GRAVITY DAMS: CAPÍTULO DE SIMULAÇÃO



FONTE: Colodel, Oliveira e Jesus (2021, p.56).

Gravity Dams e Spillways, ao contrário dos demais softwares mencionados nesta seção, possuem caráter lúdico, na tentativa de entreter e manter a atenção do usuário com um enredo explanado por um mascote. Além disso, *Spillways* possibilita expansão sem a necessidade de modificações na estrutura de classes do código ou de alterações no banco de dados.

3. CAMINHO METODOLÓGICO

O desenvolvimento de um *software* educativo possui um conjunto de etapas usadas para projetar, desenvolver e implementar. Alguns passos comuns envolvidos nesse processo e seus respectivos objetivos são:

- a) Análise de requisitos: compreender as necessidades e os requisitos educacionais é essencial. Nesta etapa são identificados o público-alvo, as metas de aprendizagem, os recursos disponíveis e as restrições do projeto;
- a) Design instrucional: definição dos objetivos de aprendizagem e os resultados desejados. É importante projetar atividades interativas, avaliações e recursos que apoiem a aprendizagem do usuário;
- b) Design de interface: criação da interface do *software* educativo, garantindo que seja intuitiva, atraente e acessível para os usuários. Deve-se levar em consideração a usabilidade e a experiência do usuário;
- c) Desenvolvimento: nessa fase, o *software* educativo é desenvolvido com base nas especificações do projeto. Geralmente engloba programação, criação de conteúdo educacional e implementação de recursos interativos;
- d) Testes e avaliação: realização de testes para verificar se o *software* educativo atende aos requisitos e às expectativas. São realizados testes de funcionalidade, usabilidade e avaliação da eficácia educacional;
- e) Implementação: depois de testado e aprovado, o *software* educativo é implantado e disponibilizado para uso;
- f) Avaliação contínua: uma vez implementado, o *software* educativo deve ser avaliado continuamente para verificar seu impacto na aprendizagem e identificar possíveis melhorias. Feedback dos usuários e professores é fundamental nesse processo.

Desta forma, considerando o propósito educativo de *Spillways*, adotou-se neste trabalho a metodologia baseada na engenharia didático-informática proposta por Tiburcio, Bellemain e Rodrigues (2021). Este modelo é composto por quatro fases e quatro ciclos (FIGURA 14). As fases são analítica, hipotética, experimental e operacional, enquanto os ciclos são as integrações destas fases (TIBURCIO, BELLEMAIN e RODRIGUES, 2021).

FIGURA 14 – MODELO DE PROCESSO DE SOFTWARE: ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA



FONTE: TIBURCIO, BELLEMAIN E RODRIGUES (2021, p.168).

3.1. CICLO ANALÍTICO-HIPOTÉTICO

Neste ciclo delimitam-se os problemas existentes que o *software* a ser desenvolvido auxiliará na solução, os saberes abordados, a composição da equipe e a compreensão dos encaminhamentos das dimensões didática, epistemológica, cognitiva e informática do conhecimento delimitado a ser trabalhado no *software*. Assim, o levantamento de requisitos é realizado observando o que foi verificado na fase analítica (TIBURCIO, BELLEMAIN e RODRIGUES, 2021). Para tanto, deve-se ter como guia as questões norteadoras para cada uma destas etapas, conforme QUADRO 12.

QUADRO 12 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO ANALÍTICO-HIPOTÉTICO

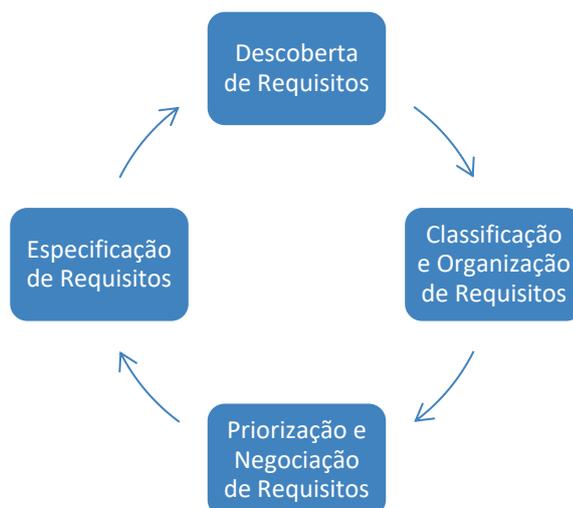
Etapa	Questões norteadoras	
Especificação inicial	Quais são os problemas percebidos que o <i>software</i> poderá se apresentar como solução?	
	Quais conhecimentos se pretende abordar na utilização do <i>software</i> ?	
	Considerando as relações entre os saberes delimitados, quais conceitos e definições devem estar presentes?	
	Qual será o diferencial da utilização desse <i>software</i> comparado a um ambiente papel e lápis?	
Composição da equipe	Deve ter um professor especialista no conhecimento abordado	
	Deve ter um profissional da área de desenvolvimento de <i>software</i>	
	Deve ter usuários do <i>software</i>	
Análises prévias	Cognitiva	Existem indicações na literatura de como o estudante aprende?
		Quais dificuldades de aprendizado são identificadas?
		Quais etapas são elencadas para a construção do conhecimento?
	Didática	Qual é o estado atual do ensino do conhecimento?
		Quais são as consequências desse ensino?
		Quais são as dificuldades em ensinar esse conhecimento?
	Epistemológica	Quais intervenções são realizadas para adaptar o saber matemático ao saber a ser ensinado?
		Quais são os aspectos do conhecimento que podem dificultar e/ou facilitar a aprendizagem?
	Informática	Quais são as contribuições tecnológicas que o <i>software</i> deve conter para auxiliar na compreensão e ensino dos conhecimentos?
		Em que aspectos as tecnologias digitais influenciam no currículo e nas mudanças das práticas docente e discente?
Levantamento de requisitos	Como o ensino e a aprendizagem podem ser favorecidos?	
	Como a compreensão dos saberes é auxiliada com o uso do <i>software</i> ?	
	Quais recursos e situações o <i>software</i> propõe para ajudar o usuário a compreender os conhecimentos?	
	Quais funcionalidades existem em produtos da área?	
	Quais são os possíveis diferenciais do <i>software</i> que se pretende desenvolver?	
	O que o <i>software</i> trará de novo referente ao que existe?	
	Elaboração do documento de requisitos considerando as dimensões Didática, Cognitiva, Epistemológica e Informática	

FONTE: adaptado de Tiburcio, Bellemain e Rodrigues (2021).

No caso de *Spillways* as etapas de especificação inicial e análise prévia são discutidas e elaboradas pelas seções de introdução e revisão sistemática de literatura deste trabalho.

Para responder as questões norteadoras do levantamento de requisitos foi adotado o modelo de processo de elicitação e análise de requisitos indicado na FIGURA 15 (SOMMERVILLE, 2011).

FIGURA 15 – O PROCESSO DE ELICITAÇÃO E ANÁLISE DE REQUISITOS



FONTE: adaptado de SOMMERVILLE (2011).

Em *Spillways* foi utilizada uma técnica específica para cada etapa deste processo:

- a) Descoberta de requisitos: realizada através de entrevistas com especialista na área de recursos hídricos (APÊNDICE 1) e a análise de *softwares* correlatos (apresentada na revisão de literatura);
- b) Classificação e organização de requisitos: considerando a teoria educacional não-crítica pedagogia nova e a filosofia de aprendizagem cognitivista, utilizou-se a técnica de histórias do usuário de acordo com o APÊNDICE 2;
- c) Priorização e negociação de requisitos: através de uma reunião com o especialista da área de recursos hídricos entrevistado, foi estabelecida uma ordem de prioridade dos requisitos para consideração na ordem de desenvolvimento do *software*. Esta ordem é observada no APÊNDICE 3;
- d) Especificação de requisitos: aqui são relacionados em um quadro o código, o nome, o tipo e a descrição da funcionalidade de cada requisito elicitado (APÊNDICE 3).

3.2. CICLO HIPOTÉTICO-EXPERIMENTAL

Neste ciclo são definidas as situações de uso, as hipóteses de interações dos usuários com o sistema, os problemas que podem surgir com a utilização do *software* e o desenvolvimento do protótipo considerando os requisitos estabelecidos. Assim, o desenvolvimento é iniciado de acordo com as tecnologias escolhidas (TIBURCIO, BELLEMAIN e RODRIGUES, 2021). As atividades são definidas no QUADRO 13.

QUADRO 13 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO HIPOTÉTICO-EXPERIMENTAL

Etapa	Atividades
Concepção e análise a priori	Definição das situações de utilização
	Definição dos referenciais teóricos e metodológicos
	Definição das interações sistema-usuário
	Definição das tecnologias a serem aplicadas
Prototipação	Definição e classificação da prototipação
	Tecnologia aplicada
	Prototipação das telas conforme requisitos
Desenvolvimento	Especificação dos sistemas operacionais em que o aplicativo será executado
	Programação
	Elaboração do manual do usuário: guia de instalação, espaço de armazenamento necessário, sistemas operacionais compatíveis, exigência mínima de hardware, inicialização do <i>software</i> e demonstração de como utilizar as funcionalidades
Experimentação	Testes de <i>software</i> ao longo do desenvolvimento

FONTE: adaptado de Tiburcio, Bellemain e Rodrigues (2021).

A concepção e a análise *a priori* foram feitas com base na *Unified Modeling Language* (UML), linguagem gráfica padrão para visualizar, especificar, construir e documentar sistemas orientados a objetos. A modelagem de um sistema através da UML proporciona (BOOCH, RUMBAUGH e JACOBSON, 2005):

- a) Relacionar a estrutura ao comportamento do sistema;
- b) Visualizar e controlar a arquitetura do sistema;
- c) Melhor compreensão do que está sendo desenvolvido;
- d) O gerenciamento de riscos.

A UML fornece um conjunto de notações gráficas que permitem representar visualmente os diferentes aspectos e perspectivas de um sistema, entre os quais destacam-se (BOOCH, RUMBAUGH e JACOBSON, 2005):

- a) Diagrama de casos de uso: exhibe as interações entre os atores (usuários ou outros sistemas) e as funcionalidades do sistema;

- b) Diagrama de classes: representa as classes, interfaces e colaborações do sistema, bem como os respectivos atributos, métodos e relacionamentos;
- c) Diagrama de sequência: mostra a interação entre objetos ao longo do tempo, permitindo visualizar a ordem das mensagens trocadas entre eles;
- d) Diagrama de atividades: descreve a estrutura e o fluxo de um processo abrangendo uma visão dinâmica do sistema;
- e) Diagrama de estados: representa os diferentes estados que um objeto pode assumir ao longo do tempo.

No que diz respeito aos referenciais teóricos técnicos utilizou-se os conceitos e equações observados na seção de processo de projeto de vertedouros do capítulo de fundamentação teórica e das etapas de projeto consideradas pelo autor, tendo como base os ábacos do US Corps of Engineers (1977) (APÊNDICE 4).

Na etapa de prototipação podem ser utilizadas diversas técnicas para simular o funcionamento dos requisitos (QUADRO 14). O objetivo é diminuir os riscos do projeto através da possível descoberta de problemas nos requisitos levantados (VAZQUEZ, 2016).

QUADRO 14 – CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PROTOTIPAÇÃO

Quanto a	Descrição	
Fidelidade	Baixa	cobre de forma ampla várias funcionalidades sem se aprofundar no funcionamento
	Alta	alto grau de detalhamento que permitem simular a experiência do usuário
Visão	Horizontal	exibe um maior número de funcionalidades sem se aprofundar no funcionamento
	Vertical	foca em funcionalidades específicas para aprofundar o entendimento de detalhes
Abordagem	Evolutiva	é utilizada a própria ferramenta de desenvolvimento para elaboração dos protótipos de forma que são alterados até comporem a versão final do <i>software</i>
	Descartável	os protótipos são feitos em ferramentas de desenho próprias e são descartados após cumprirem seus objetivos

FONTE: adaptado de Vazquez (2016).

De acordo com os requisitos funcionais especificados e em posse das etapas técnicas de projeto foram elaborados os diagramas UML apresentados no APÊNDICE 5. Simultaneamente foi feita a prototipação de baixa fidelidade, com visão horizontal e abordagem descartável, apresentada em conjunto com as histórias de usuário (APÊNDICE 2).

Partindo da prototipação e do diagrama de casos de uso foi possível detalhar cada um dos casos de uso (APÊNDICE 2). Estas especificações contém os *feedbacks* do sistema, os quais serão feitos na maioria das vezes através de um mascote (FIGURA 16). Nomeado “Dandan”, o castor faz alusão ao fato do animal construir “estruturas hidráulicas” para facilitar sua mobilidade e se proteger de predadores. O objetivo é tornar as simulações ainda mais interativas e o processo de ensino-aprendizagem mais atrativo.

FIGURA 16 – O MASCOTE



FONTE: O autor (2023).

Em seguida, em posse das especificações de casos de uso, foi elaborado o diagrama de classes de negócio (APÊNDICE 5) para detalhar todos os objetos do sistema e o diagrama de classes de interfaces (APÊNDICE 5) para mostrar como estas telas estão interligadas, apresentando a sequência de utilização do *software* educativo. A partir disso foi possível elaborar os diagramas de sequência (APÊNDICE 5), que representam com maior nível de detalhes o fluxo e os objetos em cada uma das telas.

Concluídas as fases de análise do sistema e escolhidas as tecnologias para a programação do *software* foi possível iniciar o desenvolvimento.

3.3. CICLO EXPERIMENTAL-OPERACIONAL

Este ciclo coloca o *software* em desenvolvimento em situações reais de utilização. Neste cenário, é realizada a análise dos requisitos levantados de modo a verificar se eles atendem as expectativas, auxiliando o ensino e a aprendizagem, e se

os recursos tecnológicos são eficazes para atender o que foi planejado. Falhas e *feedbacks* também são importantes para reunir informações para a evolução do *software* (TIBURCIO, BELLEMAIN e RODRIGUES, 2021). As atividades são definidas no QUADRO 15.

QUADRO 15 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO EXPERIMENTAL-OPERACIONAL

Etapa	Atividades
Experimentação	Testes com potenciais usuários
Análise a posteriori	Verificar se os requisitos levantados atendem as expectativas
	Obter feedbacks dos usuários
	Verificação de falhas

FONTE: adaptado de Tiburcio, Bellemain e Rodrigues (2021).

3.4. CICLO OPERACIONAL-ANALÍTICO

Este ciclo contempla uma avaliação geral do *software* através de validações teórica e experimental para que se relacione uma lista de atividades de manutenção visando sua evolução. O confronto entre as análises *a priori* e *a posteriori* permite verificar o alcance dos objetivos do *software* (TIBURCIO, BELLEMAIN e RODRIGUES, 2021). As questões e atividades são definidas no QUADRO 16.

QUADRO 16 – ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: CICLO OPERACIONAL-ANALÍTICO

Etapa	Questões norteadoras e/ou Atividades
Validação teórica	A utilização do <i>software</i> contribuiu para superar/auxiliar nos problemas elencados quanto ao ensino e a aprendizagem?
	Foi possível contemplar todos os conhecimentos idealizados na fase de análise?
	O diferencial entre trabalhar com um ambiente papel e lápis foi alcançado?
	A composição da equipe de desenvolvedores auxiliou na criação do <i>software</i> ?
	O <i>software</i> apresentou diferenciais para outros que versam sobre a mesma temática?
	Os referenciais teóricos adotados foram úteis para o desenvolvimento e criação de situações de uso do <i>software</i> ?
	As possibilidades de hardware e recursos digitais auxiliaram na criação do <i>software</i> ?
Validação experimental	Houve auxílio ao ensino dos conhecimentos com a utilização do <i>software</i> ?
	As dificuldades de compreensão dos saberes foram auxiliadas com a utilização do <i>software</i> ?
	As funcionalidades e recursos digitais contribuíram para as relações de ensino e aprendizagem dos conhecimentos?
	Os sujeitos envolvidos no experimento contribuíram de qual modo para o desenvolvimento do <i>software</i> ?
	As situações propostas foram facilitadoras para compreender os conhecimentos trabalhados?

Etapa	Questões norteadoras e/ou Atividades	
	Quais foram as implementações que surgiram com a realização do experimento?	
	Houve incompreensões ou dificuldades de utilização do <i>software</i> ?	
Evolução do <i>software</i>	Manutenção corretiva	Realizar os reparos identificados pelos usuários – reparos de erros, inconsistências, erros conceituais, entre outros
	Manutenção adaptativa	Alterar características do produto para se adaptar aos ambientes (hardware, sistema, etc) em que está inserido – mudança de sistema operacional, ambiente com ou sem touchscreen, características de acessibilidade, etc.
	Manutenção perfectiva	Modificar o programa a fim de fornecer aprimoramentos aos usuários – criação de novas funcionalidades, melhoria de desempenho, alteração de layout, etc.
	Manutenção preventiva	Detectar e corrigir falhas antes que elas tomem maiores proporções – observação antecipada da equipe das funcionalidades que podem levar a erros.

FONTE: adaptado de Tiburcio, Bellemain e Rodrigues (2021).

Para responder as questões e atividades definidas no QUADRO 16 foi utilizado um método exclusivo de avaliação de *softwares* educativos.

Existem diversos métodos de avaliação de *software* educativo que podem ser aplicados para verificar a sua eficácia e qualidade. A escolha do método depende dos objetivos específicos da avaliação e das características do *software* em questão. Alguns métodos comuns de avaliação de *software* educativo são:

- a) Avaliação de especialistas: nesse método, especialistas na área educacional e/ou no domínio específico do *software* analisam e avaliam o *software* com base em critérios pré-definidos. Esses especialistas podem incluir professores, pesquisadores ou profissionais com experiência relevante. Eles avaliam aspectos como a qualidade do conteúdo, a adequação dos recursos educacionais, a usabilidade da interface e a eficácia pedagógica do *software*.
- b) Testes com usuários: essa abordagem envolve a realização de testes com usuários reais do *software* educativo. Os usuários podem ser alunos, estudantes, professores ou outros profissionais envolvidos na educação. Durante os testes, são coletados dados sobre a experiência do usuário, a facilidade de uso, a compreensão do conteúdo, a interação com o *software* e o impacto na aprendizagem. Essa abordagem pode incluir observações diretas, questionários, entrevistas ou outros métodos de coleta de dados.
- c) Estudos experimentais: esse método envolve a condução de estudos controlados para avaliar a eficácia do *software* educativo. Nesses estudos,

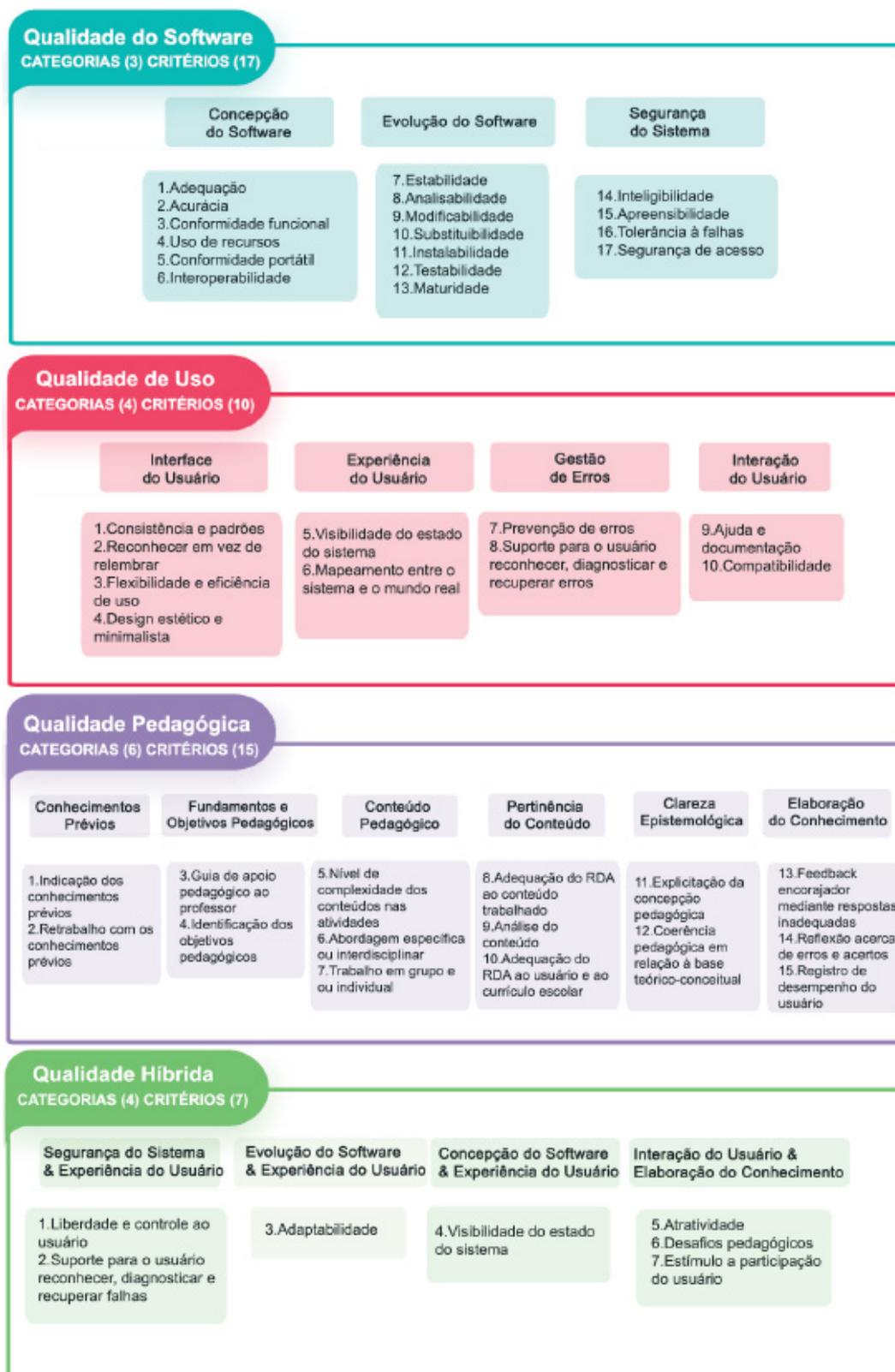
grupos de usuários são selecionados aleatoriamente e expostos ao *software*, enquanto outros grupos não o utilizam (grupo de controle). Os dados coletados podem incluir testes de aprendizagem, questionários, observações comportamentais e outros indicadores de desempenho. A comparação dos resultados entre os grupos permite avaliar o impacto do *software* na aprendizagem.

- d) Avaliação formativa: é um processo contínuo que ocorre durante o desenvolvimento do *software* educativo. Envolve a coleta de *feedback* de usuários e especialistas em várias etapas do desenvolvimento. Esse *feedback* é usado para identificar problemas, fazer melhorias e aprimorar o *software* antes de sua implementação final. A avaliação formativa pode incluir testes de usabilidade, grupos focais, *feedback* por escrito, entre outros métodos.
- e) Avaliação por pares: Nesse método, outros desenvolvedores ou especialistas na área revisam o *software* educativo e fornecem *feedback* e recomendações. Essa avaliação pode ajudar a identificar problemas de usabilidade, erros no conteúdo ou oportunidades de melhoria.

Esses são apenas alguns exemplos de métodos de avaliação de *software* educativo. É importante adaptar a abordagem de avaliação de acordo com as características específicas do *software*, as metas educacionais e as restrições do projeto.

No caso do aplicativo *Spillways* foi escolhido um método avaliativo baseado em uma taxonomia elaborada por Brito Junior (2015). A Taxonomia para Avaliação de Recursos Digitais de Aprendizagem (TARDA – Versão 2.0) foi proposta a partir de 26 abordagens descritas na literatura nacional e internacional. Esta ferramenta avalia o *software* em quatro dimensões de qualidade: *software*, uso, pedagógica e híbrida conforme FIGURA 17 (BRITO JUNIOR, 2021). Este método totaliza 49 critérios de avaliação que foram listados no *checklist* do APÊNDICE 6. Neste trabalho o *checklist* foi aplicado ao professor especialista em estruturas hidráulicas e ao próprio autor do aplicativo e do presente trabalho.

FIGURA 17 – DIMENSÕES DE AVALIAÇÃO DA TARDA 2.0



FONTE: BRITO JUNIOR (2021, p.116).

4. TECNOLOGIAS APLICADAS NO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Esta seção descreve as principais tecnologias utilizadas para o desenvolvimento da aplicação. A saber:

- Edição de diagramas UML (*Unified Modeling Language*): *Astah*;
- Prototipação das telas: *Mockplus*;
- Ambiente de desenvolvimento integrado (IDE): *Android Studio*;
- Linguagem de programação: *Dart*;
- *Framework front-end*: *Flutter*;
- Armazenamento de dados: *Google Cloud (Firebase)*;
- Controle de versões: *GitHub*;
- Infraestrutura de desenvolvimento: notebook com placa de vídeo dedicada e sistema operacional *Windows 11*.

4.1. ASTAH

Astah é uma ferramenta de modelagem visual de *software* que permite que os usuários criem diagramas e modelos para representar visualmente o design e a arquitetura de um sistema. Ela suporta uma variedade de diagramas, incluindo diagramas UML (*Unified Modeling Language*), diagramas de fluxo de dados, diagramas de rede, diagramas de classe, entre outros.

O Astah é compatível com várias linguagens de programação, incluindo Java, C ++, C #, PHP e Ruby, e possui recursos de geração de código que permitem que os usuários gerem código a partir dos modelos criados.

A ferramenta também possui recursos de colaboração, que permitem que várias pessoas trabalhem em um projeto simultaneamente e compartilhem suas alterações em tempo real. Além disso, o Astah possui integração com outras ferramentas de desenvolvimento de *software*, como IDEs (*Integrated Development Environments*) e sistemas de controle de versão.

O Astah é usado principalmente por desenvolvedores de *software*, engenheiros de *software*, arquitetos de *software* e gerentes de projeto em empresas de tecnologia, startups e organizações governamentais. A ferramenta é especialmente útil para aqueles que desejam criar modelos de *software* visualmente atraentes e

precisos para ajudar a comunicar ideias e conceitos de design de *software* de forma eficaz e para gerar código de qualidade com rapidez e facilidade (CHANGE VISION INC, 2023).

4.2. MOCKPLUS

Mockplus é uma ferramenta de prototipagem rápida e design de interface do usuário (UI) para aplicativos e sites. Com o *Mockplus*, os usuários podem criar protótipos interativos de alta fidelidade sem escrever código.

A ferramenta oferece uma interface fácil de usar e intuitiva, com recursos como arrastar e soltar, elementos pré-construídos e uma variedade de modelos de design para acelerar o processo de prototipagem. Ele também oferece recursos de colaboração, como comentários e compartilhamento de projetos, permitindo que as equipes trabalhem juntas de forma mais eficiente.

Além disso, o *Mockplus* é compatível com uma variedade de formatos de arquivo, como PNG, JPG, PDF, HTML, CSS e *JavaScript*, o que permite a fácil exportação e integração com outras ferramentas de design e desenvolvimento.

O *Mockplus* é usado principalmente por designers de interface do usuário, desenvolvedores, gerentes de projeto e equipes de produto em empresas de tecnologia, startups e agências de design. A ferramenta é especialmente útil para aqueles que desejam criar protótipos de alta qualidade rapidamente para testar ideias e conceitos de design antes de investir tempo e recursos em desenvolvimento (MOCKPLUS, 2023).

4.3. ANDROID STUDIO

Android Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para desenvolvimento de aplicativos Android. É uma ferramenta completa para desenvolvedores que desejam criar aplicativos Android profissionais e funcionais.

O *Android Studio* é baseado no *IntelliJ IDEA* da *JetBrains*, e fornece recursos poderosos para criação de interfaces de usuário, depuração, edição de código e integração com outras ferramentas de desenvolvimento de *software*, como o *Dart* e o *Flutter*.

Entre os recursos do *Android Studio*, estão o editor de layout, que permite que os desenvolvedores criem layouts complexos de maneira visual; o emulador de dispositivos *Android*, que permite que os desenvolvedores testem seus aplicativos em diferentes dispositivos *Android* virtuais; e o suporte para vários idiomas e configurações regionais.

Além disso, o *Android Studio* possui um sistema de compilação baseado em *Gradle*, que permite que os desenvolvedores gerenciem dependências, compilem seus aplicativos e gerem pacotes APK para distribuição.

O *Android Studio* é gratuito e de código aberto, e é atualizado regularmente com novos recursos e melhorias. Ele é a principal ferramenta de desenvolvimento de aplicativos *Android* usada por desenvolvedores profissionais e iniciantes em todo o mundo (GOOGLE INC, 2023a).

4.4. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO DART

A linguagem de programação *Dart* foi criada pela Google em 2011, com o objetivo de fornecer uma alternativa ao *JavaScript* para o desenvolvimento de aplicativos da web. Foi concebida para ser uma linguagem de programação mais produtiva para desenvolvimento multiplataforma.

Dart possui uma biblioteca padrão abrangente que inclui recursos para programação assíncrona, programação orientada a objetos, programação funcional e outros. Além disso, a linguagem possui uma sintaxe clara e concisa, tornando-a fácil de aprender para programadores que estão familiarizados com outras linguagens de programação.

Dart é usada principalmente para o desenvolvimento de aplicativos da web e aplicativos móveis, embora também possa ser usada para o desenvolvimento de aplicativos desktop e servidores (GOOGLE INC, 2023b).

4.5. FLUTTER

Flutter é um framework de desenvolvimento de aplicativos móveis criado pela Google em 2017. É uma ferramenta de código aberto em *Dart*, o que significa que é mantido por uma comunidade ativa de desenvolvedores em todo o mundo. Ele permite criar aplicativos para *Android*, iOS, web e desktop a partir de uma única base de

código. É uma ferramenta popular entre desenvolvedores devido à sua eficiência, desempenho e facilidade de uso.

O *Flutter* oferece um conjunto abrangente de ferramentas e widgets que permitem criar interfaces de usuário atraentes, responsivas e personalizáveis. Além disso, possui uma ampla gama de recursos, como *Hot Reload*, que permite ver imediatamente as alterações realizadas no código sem precisar recompilar.

Outra vantagem consiste no fato de ser altamente escalável e modular, permitindo que os desenvolvedores adicionem novos recursos facilmente, o que torna o desenvolvimento de aplicativos mais rápido e eficiente. Além disso, o *Flutter* oferece suporte a integrações com várias ferramentas de terceiros, o que o torna uma ótima escolha para desenvolvedores que precisam trabalhar com uma variedade de APIs e serviços diferentes.

Todas essas características resultam em uma ampla gama de recursos e documentação disponíveis, além de uma base de conhecimento compartilhada que pode ajudar os desenvolvedores a resolver problemas e aprender novas habilidades (GOOGLE INC, 2023c).

4.6. FIREBASE

O *Firebase* é uma plataforma de desenvolvimento de aplicativos móveis criada pelo Google em 2011. Ele fornece uma ampla gama de serviços em nuvem para ajudar os desenvolvedores a criar, gerenciar e escalar aplicativos com facilidade. É uma das plataformas de desenvolvimento de aplicativos mais populares atualmente, devido à sua facilidade de uso, flexibilidade e ampla gama de recursos.

O *Firebase* oferece serviços para ajudar os desenvolvedores em várias áreas, como autenticação de usuários, armazenamento de dados em tempo real, análise de aplicativos, notificações por *push*, testes de aplicativos e outros. Esses serviços são oferecidos em uma estrutura integrada e escalável, que ajuda os desenvolvedores a criar aplicativos com facilidade e rapidez.

Por exemplo, o serviço de autenticação do *Firebase* permite que os desenvolvedores adicionem facilmente a funcionalidade de login e registro de usuários aos seus aplicativos, utilizando uma variedade de métodos de autenticação, como e-mail e senha, login com Google, Facebook, Twitter, entre outros. O serviço de armazenamento em tempo real permite que os desenvolvedores armazenem e

sincronizem dados em tempo real com facilidade, sem precisar se preocupar com a infraestrutura de *backend*.

Por ser uma plataforma em nuvem, os desenvolvedores podem se concentrar na criação de aplicativos sem se preocupar com a infraestrutura de servidores e bancos de dados. Isso torna o desenvolvimento de aplicativos mais rápido e eficiente, além de reduzir os custos de infraestrutura (GOOGLE INC, 2023d).

4.7. GITHUB

O *GitHub* é uma plataforma de hospedagem de código-fonte e colaboração de desenvolvimento de *software* baseada na nuvem. Fundado em 2008, o *GitHub* que permite que os desenvolvedores hospedem seus projetos de *software* em repositórios públicos ou privados e colaborem com outros desenvolvedores. A plataforma oferece uma ampla gama de recursos, incluindo ferramentas de gerenciamento de projetos, controle de versão de código-fonte, integração contínua e recursos de segurança.

Uma das principais vantagens do *GitHub* é que ele é uma plataforma de código aberto, o que significa que os desenvolvedores podem criar, compartilhar e colaborar em projetos de *software* livremente. A plataforma também oferece uma ampla gama de recursos para gerenciamento de projetos, incluindo ferramentas de rastreamento de problemas, revisão de código e gerenciamento de solicitações de pull.

O *GitHub* oferece suporte a integrações com várias ferramentas de terceiros, como *Slack*, *JIRA*, *Trello* e muitas outras, além de contar com recursos avançados de segurança, como autenticação multifator e criptografia SSL (GITHUB INC, 2023).

4.8. INFRAESTRUTURA DE DESENVOLVIMENTO

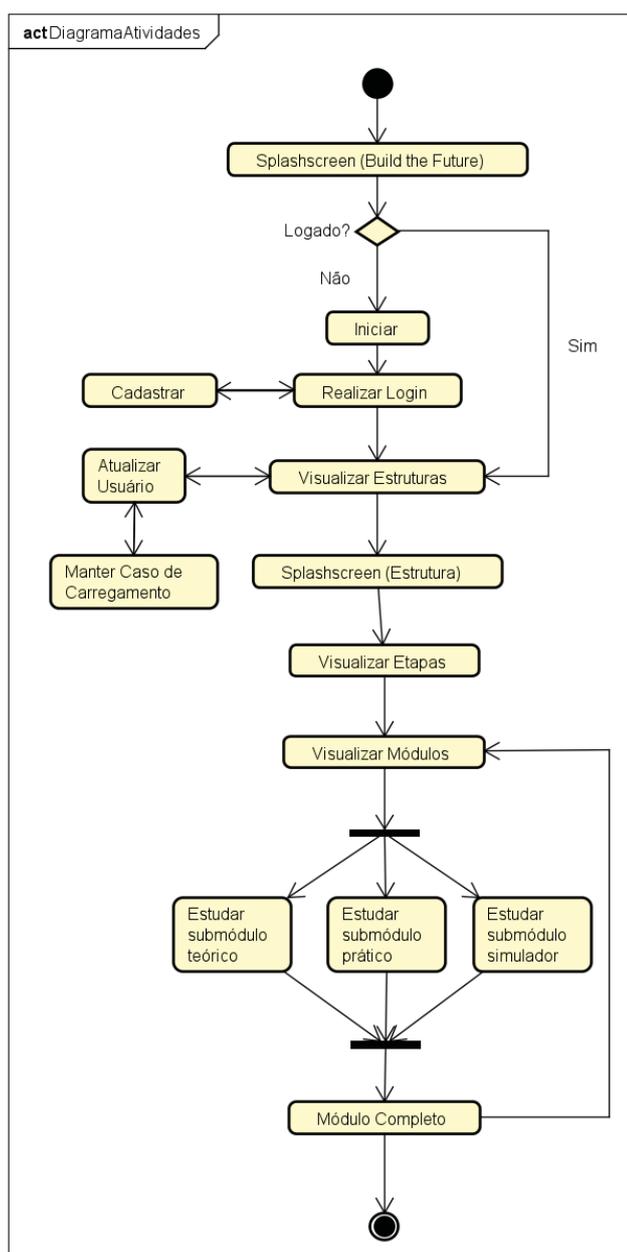
A máquina utilizada para o desenvolvimento do *software* educativo contém as seguintes especificações:

- Tipo: Notebook com sistema operacional Windows 11;
- Memória RAM de 16,00 GB e espaço de armazenamento de 480GB (SSD);
- Processador: AMD Ryzen 7 5800H;
- Placa de vídeo dedicada: NVIDIA GeForce RTX 3050 Laptop GPU.

5. APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE EDUCATIVO

Para apresentação do software educativo, foi testado seu uso em um dispositivo com sistema operacional Android 14 (API 34), com um novo usuário, considerando os fluxos principais dos casos de usos. Na FIGURA 18 é mostrado um fluxograma do caminho principal que pode ser percorrido no software.

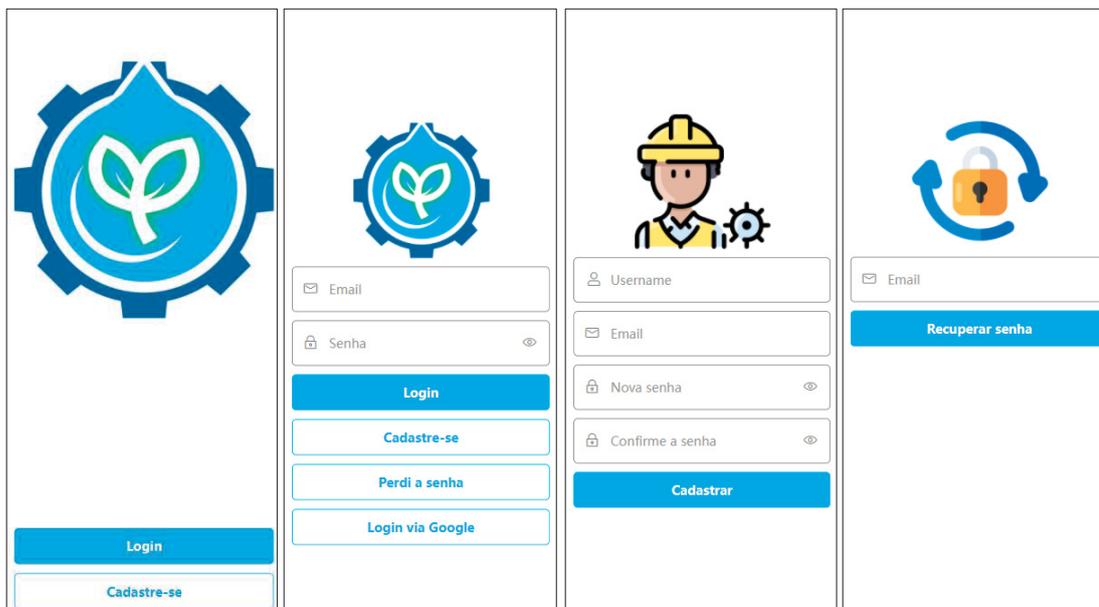
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO CAMINHO PRINCIPAL DO SOFTWARE EDUCATIVO



FONTE: O autor (2024).

As primeiras telas de *Spillways* contemplam telas para cadastro de novos usuários e de *login* para usuários existentes, além de uma tela para recuperação de senha, caso necessário (FIGURA 19).

FIGURA 19 – TELAS INICIAIS DE SPILLWAYS

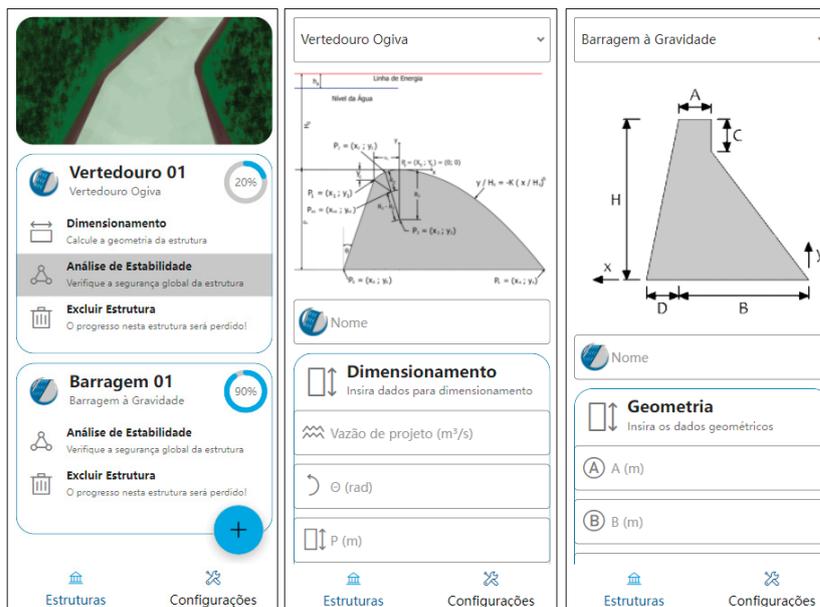


FONTE: O autor (2024).

Após a autenticação, o usuário é redirecionado para a tela de visualização e criação de estruturas (FIGURA 20), sendo que nesta versão inicial estarão disponíveis o vertedouro ogiva e a barragem à gravidade. Contudo, a arquitetura adotada neste aplicativo permite que novas estruturas hidráulicas possam ser facilmente adicionadas posteriormente com diferentes etapas de projeto. Da mesma forma, etapas, módulos e submódulos também podem ser adicionados às estruturas disponíveis. Portanto, o *software* educativo *Gravity Dams* (COLODEL, OLIVEIRA e JESUS, 2021) pode ser incorporado a *Spillways* como uma nova estrutura.

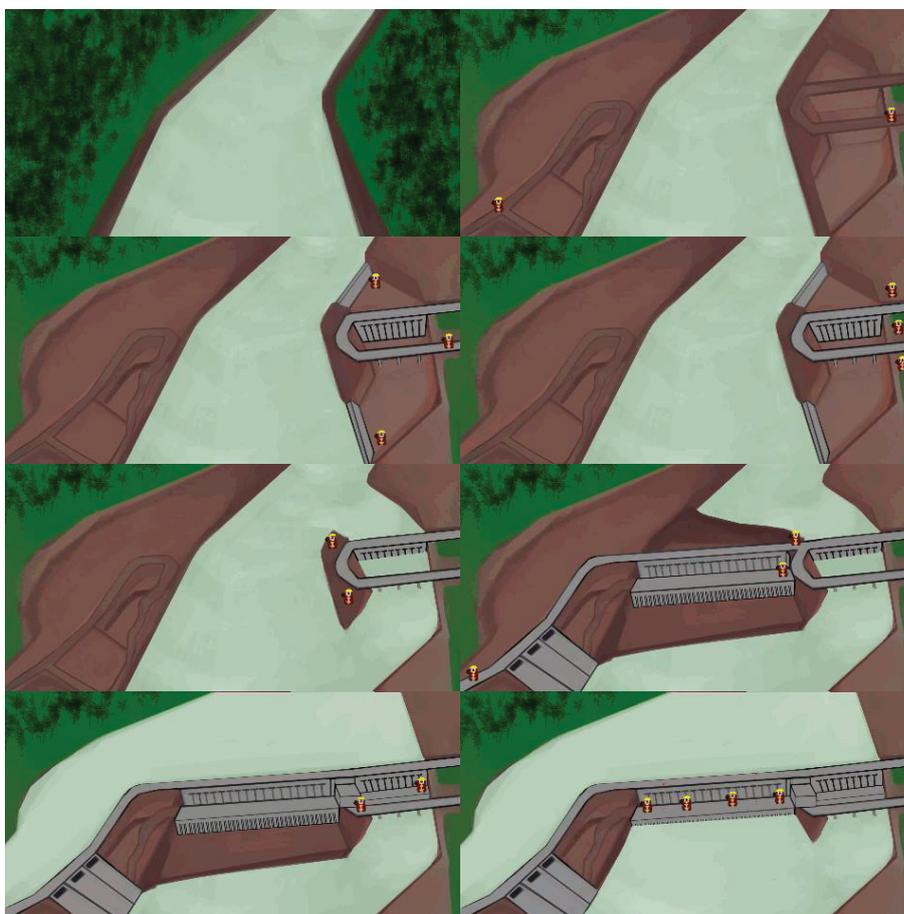
Na primeira vez que o um usuário é autenticado, o *software* educativo apresenta uma história fictícia interativa na qual o objetivo é ajudar o castor Dandan (mascote) na construção de uma usina hidrelétrica. O andamento desta obra é mostrado na parte superior desta tela. A cada estrutura completa a obra avança para próxima fase, conforme FIGURA 21. Portanto, é necessário criar e completar oito estruturas para chegar ao final da obra.

FIGURA 20 – TELAS DE VISUALIZAÇÃO E CADASTRO DE ESTRUTURAS



FONTE: O autor (2024).

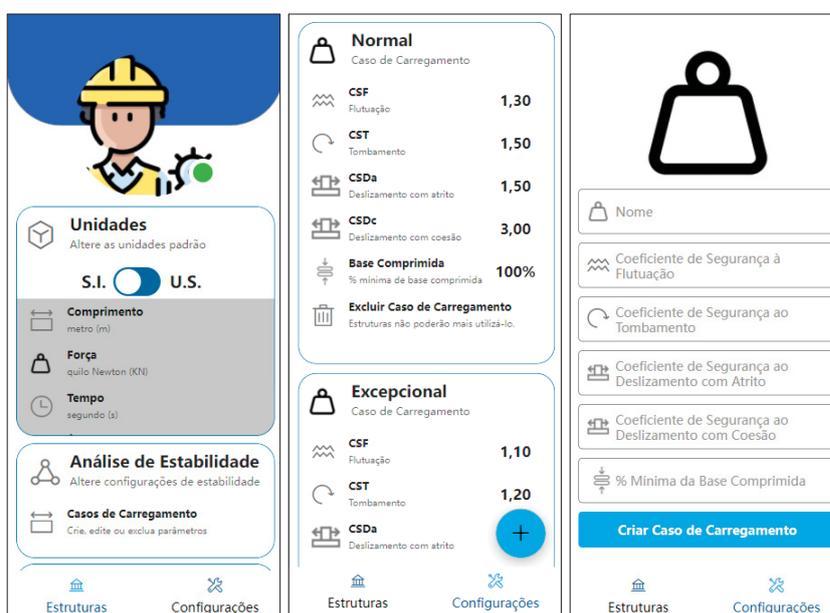
FIGURA 21 – NÍVEIS DA OBRA ILUSTRATIVA DA USINA HIDRELÉTRICA



FONTE: O autor (2024).

Após autenticação também é possível alterar dados de conta, realizar *logout* e alterar configurações gerais do aplicativo, como a adição e exclusão de casos de carregamento utilizados para a análise de estabilidade das estruturas implementadas (FIGURA 22). Portanto, algumas configurações do *software* educativo ficam atreladas diretamente a cada usuário de modo que possam ser personalizáveis. Entretanto, nesta primeira versão do aplicativo parte delas não podem ser modificadas, conforme QUADRO 17.

FIGURA 22 – TELAS DE CONFIGURAÇÕES DE *SPILLWAYS*



FONTE: O autor (2024).

QUADRO 17 – CONFIGURAÇÕES DE USUÁRIO

Atributo/Objeto	Padrão	Modificável?
Local	Brasil	Não
Tolerância de Erro	$\pm 1\%$	Não
Sistema de Unidades	Sistema Internacional	Não
Casos de Carregamento	(ELETROBRÁS, 2003)	Sim

FONTE: O autor (2024).

A ementa dos conteúdos presentes em *Spillways* é constituída pelas etapas de projeto descritas no QUADRO 18 considerando o dimensionamento e análise de estabilidade do vertedouro ogiva especificados no APÊNDICE 4. Cada etapa é dividida em módulos de modo que o aluno possa progredir em seu aprendizado de forma gradual. Cada módulo possui uma série de submódulos que podem ser de três

tipos: teórico (indicado por um livro), prático (indicado por uma calculadora) ou simulador (indicado pelo símbolo “*play*”) (FIGURA 23).

QUADRO 18 – ESTRUTURAS, ETAPAS, MÓDULOS E SUBMÓDULOS DE *SPILLWAYS*

Estrutura	Etapas	Módulos	Submódulos	Tipo de submódulo
Vertedouro Ogiva	Dimensionamento	Introdução	Vertedouros	Teórico
			Vertedouro Ogiva	Teórico
		Parâmetros	Principais Parâmetros	Teórico
			Parâmetros de Projeto	Prático
		Geometria	Variáveis	Teórico
			Cálculo da Geometria	Prático
		Coeficiente de Descarga	Efeitos	Teórico
			Cálculo dos Efeitos	Prático
		Escoamento	Regimes de Escoamento	Teórico
			Determinação do Regime de Escoamento	Prático
	Comprimentos	Efetivo, Líquido e Bruto	Teórico	
		Cálculo dos Comprimentos	Prático	
	Análise de Estabilidade	Mesmos módulos e submódulos da etapa de Análise de Estabilidade de Barragem à Gravidade, exceto módulo de Introdução, no qual os submódulos “Barragens” e “Barragens à Gravidade” serão substituídos pelo submódulo “Coordenadas”		
	Barragem à Gravidade	Análise de Estabilidade	Introdução	Barragens
Barragens à Gravidade				Teórico
Centro de Massa				Prático
Forças de Pressão			Hidrostática x Hidrodinâmica	Teórico
			Pressões Hidrostáticas	Prático
Ações			Casos de Carregamento	Teórico
			Combinando Ações	Prático
Forças Verticais			Gravitacionais	Teórico
			Subpressão	Teórico
			Flutuação	Simulador
Momentos Atuantes			Estabilizantes	Teórico
			Desestabilizantes	Teórico
			Tombamento	Simulador
Forças Horizontais			Deslizamento com atrito	Teórico
			Deslizamento com coesão	Teórico
			Deslizamento	Simulador
Abertura de Fissura	Máxima e Mínima	Teórico		
	Abertura de Fissura	Teórico		
	Tensões	Simulador		

FONTE: O autor (2024).

FIGURA 23 – SUBMÓDULOS DE SPILLWAYS

The image displays the user interface of the Spillways software. On the left, a progress dashboard shows the completion status of various sub-modules:

- Introdução** (Dimensionamento): 100% complete.
- Parâmetros** (Dimensionamento): 0% complete.
- Geometria** (Dimensionamento): 0% complete.
- Descarga** (Dimensionamento): 0% complete.
- Forças de Pressão** (Análise de Estabilidade): 100% complete.
- Ações** (Análise de Estabilidade): 100% complete.
- Forças Verticais** (Análise de Estabilidade): 66% complete.
- Momentos** (Análise de Estabilidade): 0% complete.

The central panel lists sub-modules with their respective completion status:

- Hidrostática x Hidrodinâmica** (Submódulo teórico): 100% complete.
- Pressões Hidrostáticas** (Submódulo prático): 100% complete.
- Casos de Carregamento** (Submódulo teórico): 100% complete.
- Combinando Ações** (Submódulo prático): 100% complete.
- Gravitacionais** (Submódulo teórico): 100% complete.
- Subpressão** (Submódulo prático): 100% complete.
- Flutuação** (Submódulo simulador): 100% complete.

The right panel shows a simulation window with a cartoon mascot (a brown beaver) and a message: "Verificação de estabilidade quanto à flutuação concluída com sucesso! Parabéns!". The simulation window also displays various parameters and units:

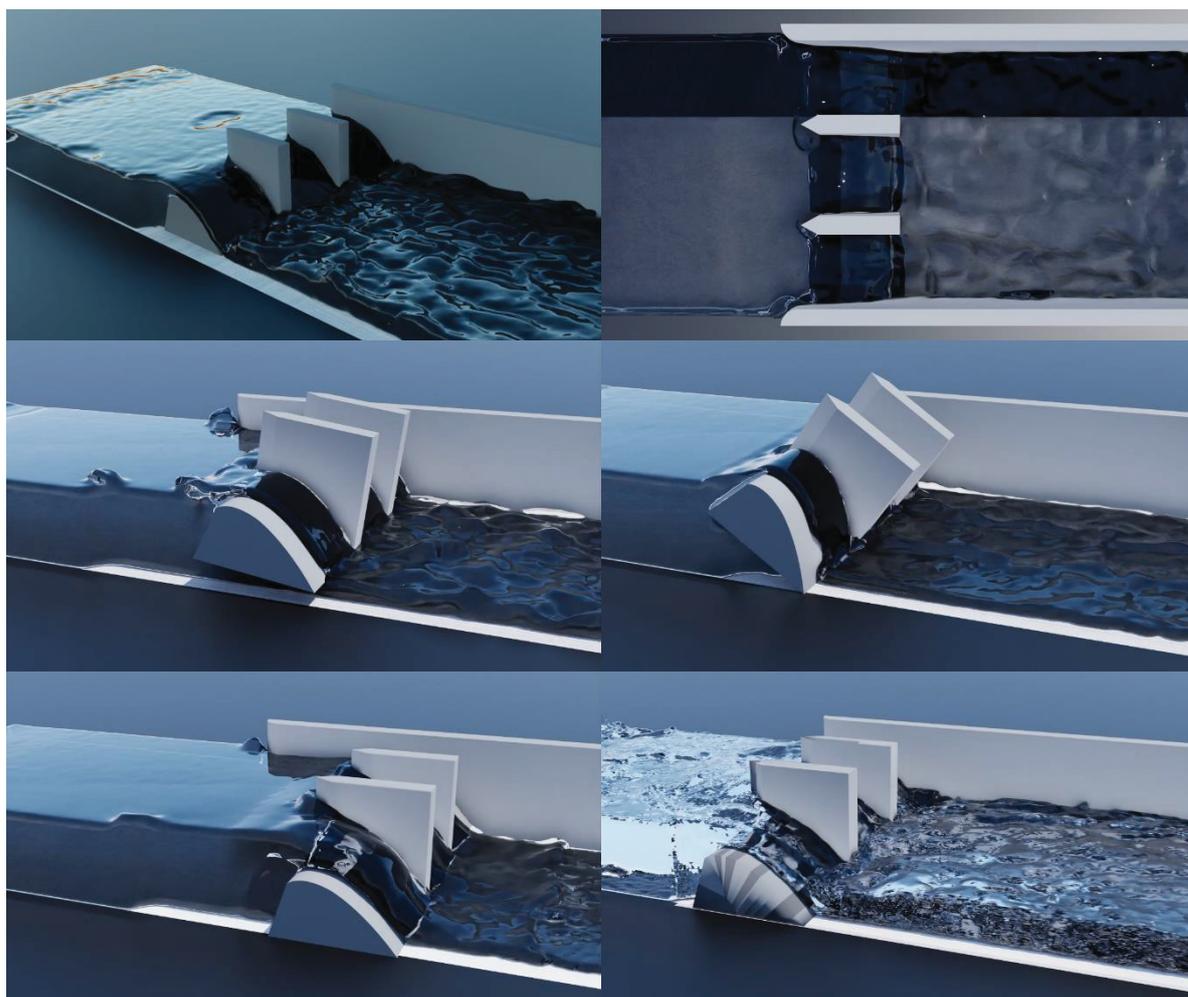
- C0 (v/m/s)
- q (m³/s*m)
- va (m/s)
- ha (m)
- vd (m/s)
- d (m)
- hd (m)
- Forças Verticais (KN)

FONTE: O autor (2024).

Spillways foi desenvolvido de modo que o usuário siga a ordem das etapas, módulos e submódulos, não podendo prosseguir sem completar a etapa, módulo ou submódulo anterior. Desta forma, exige-se o estudo dos submódulos teóricos antes de prosseguir aos submódulos práticos e de simulação. Assim, é recomendável uma complementação de estudos a partir dos *links* presentes nos submódulos teóricos.

Nos submódulos de simulação o *software* educativo simula ilustrativamente, através de animações não realísticas, o que aconteceria com o vertedouro de acordo com os parâmetros de entrada escolhidos pelo usuário (FIGURA 24). É importante notar que as animações somente são apresentadas quando o aluno responde corretamente as respostas das variáveis solicitadas, pois as simulações sempre estão de acordo com as respostas corretas (calculadas pelo sistema). Isto significa que quando determinado coeficiente mínimo não é atingido ocorre o dano associado à verificação atual. Quando a estrutura é estável, então é mostrada uma animação com fogos de artifício, simbolizando o sucesso na verificação. Além disso, em todos os submódulos há *feedbacks* correspondentes às respostas dadas pelo usuário, feitos pelo mascote.

FIGURA 24 – SIMULAÇÕES FICTÍCIAS EM VERTEDOIRO OGIVA



FONTE: O autor (2024).

Para realização de um teste de dimensionamento e de análise de estabilidade do vertedouro ogiva, de acordo com os passos descritos no APÊNDICE 4, foram simulados os dados de entrada de um modelo reduzido hipotético apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 – ENTRADA DE DADOS DE TESTE PARA DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTEDOIRO OGIVA

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade (S.I.)
g	gravidade	9,80665	m/s^2
Q	vazão total de projeto	0,0125	m^3/s
P	altura da crista do vertedouro	0,125	m
H_0	carga hidráulica total de projeto	0,125	m
H_e	carga hidráulica total de operação	0,125	m
θ	inclinação de montante	$\tan^{-1}(1/3)$	rad
P_d	cota do piso à jusante em relação ao piso de montante	0	m
n_p	número de pilares centrais	1	adm
p_c	tipo dos pilares centrais	Type 3A	-
p_a	estrutura nas extremidades do vertedouro	Concreto	-
R_p	raio dos pilares de concreto de extremidades	0,02	m
$C_{o_{max}}$	coesão máxima admissível da superfície de deslizamento	20	KN/m^2
ϕ	ângulo de atrito da superfície de deslizamento	$\pi/6$	rad
CSF_m	coeficiente de segurança mínimo quanto à flutuação	1,3	adm
CST_m	coeficiente de segurança mínimo quanto ao tombamento	1,5	adm
CSD_{am}	coeficiente de segurança mínimo quanto ao deslizamento sem coesão	1,5	adm
CSD_{cm}	coeficiente de segurança mínimo quanto ao deslizamento com coesão	3	adm
γ_a	peso específico da água	10	KN/m^3
γ_c	peso específico do concreto	24	KN/m^3

FONTE: O autor (2024).

Os resultados correspondentes aos dados de entrada do modelo reduzido são mostrados na TABELA 3 para o dimensionamento do vertedouro e na TABELA 4 para a análise de estabilidade.

TABELA 3 – RESULTADOS DO TESTE DE DIMENSIONAMENTO DE VERTEDOIRO OGIVA

Submódulo	Variável	Descrição	Resultado	Unidade (S.I.)
Parâmetros de projeto	C_0	coeficiente de descarga inicial	2,15846	\sqrt{m}/s
	q	vazão unitária	0,0953916	$m^3/s \times m$
	v_a	velocidade de aproximação	0,381566	m/s
	h_a	altura de energia cinética	0,00742317	m
	v_d	velocidade à jusante	1,99087	m/s
	d	profundidade à jusante	0,0479145	m
	h_d	altura de energia relativa à velocidade à jusante	0,202085	m
Cálculo da geometria	K		0,511576	adm
	n		1,82442	adm
	R_1	variáveis geométricas	0,0701775	m
	R_2		0,0228317	m
	x_c		0,0292753	m
	y_c		0,0100599	m
	P_0		$x_0 = -0,0675887$ $y_0 = -0,125$	m
P_1	$x_1 = -0,0292753$ $y_1 = -0,0100599$	m		
P_3	$x_3 = 0$ $y_3 = -0,0701775$	m		
P_4	pontos de interesse da geometria considerando a origem do sistema no topo da crista do vertedouro $x_4 = 0,180494$ $y_4 = -0,125$	m		
P_5	$x_5 = 0$ $y_5 = 0$	m		
P_{int}	$x_{int} = -0,011361$ $y_{int} = -0,024215$	m		
P_2	$x_2 = -0,0168398$ $y_2 = -0,0020504$	m		
Cálculo dos efeitos	C_{He}/C_0	efeito da carga hidráulica quando $H_0 \neq H_e$	0,998498	adm
	C_{inc}/C_0	efeito da inclinação do paramento de montante	1,0023	adm
	C_{sa}/C_0	efeito da posição do piso de jusante	1,00	adm
	C_{ss}/C_0	efeito da submersão à jusante	1,00	adm
	C_r	coeficiente de descarga resultante	2,16017	\sqrt{m}/s
	q_r	vazão unitária resultante	0,095467	$m^3/s \times m$
	v_{ar}	velocidade de aproximação resultante	0,381868	m/s

Submódulo	Variável	Descrição	Resultado	Unidade (S.I.)
	h_{ar}	altura de energia cinética resultante	0,00743491	<i>m</i>
	v_{dr}	velocidade à jusante resultante	1,99066	<i>m/s</i>
	d_r	profundidade à jusante resultante	0,0479575	<i>m</i>
	h_{dr}	altura de energia relativa à velocidade à jusante resultante	0,202042	<i>m</i>
Determinação do regime de escoamento	$\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}$	posição do piso de jusante	2,00	<i>adm</i>
	h_{dr}/H_e	grau de submersão	1,61634	<i>adm</i>
	<i>regime</i>	regime de escoamento	Supercrítico	-
Cálculo dos comprimentos	K_p	coeficiente de contração devido aos pilares centrais	-0,0011399	<i>adm</i>
	L_p	largura de cada pilar central	0,025	<i>m</i>
	K_a	coeficiente de contração dos pilares das extremidades	0,0842433	<i>adm</i>
	L_e	comprimento efetivo	0,130935	<i>m</i>
	L_n	comprimento líquido	0,151711	<i>m</i>
	L_g	comprimento bruto	0,176711	<i>m</i>

FONTE: O autor (2024).

TABELA 4 – RESULTADOS DO TESTE DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTEDOURO OGIVA

Submódulo	Variável	Descrição	Resultado	Unidade (S.I.)
Coordenadas	P_0		$x_0 = 0,248083$ $y_0 = 0$	<i>m</i>
	P_1		$x_1 = 0,209769$ $y_1 = 0,11494$	<i>m</i>
	P_3	Coordenadas da geometria do vertedouro considerando a origem do sistema no ponto de tombamento	$x_3 = 0,180494$ $y_3 = 0,0548225$	<i>m</i>
	P_4		$x_4 = 0$ $y_4 = 0$	<i>m</i>
	P_5		$x_5 = 0,180494$ $y_5 = 0,125$	<i>m</i>
	P_{int}		$x_{int} = 0,191855$ $y_{int} = 0,100785$	<i>m</i>
	P_2		$x_2 = 0,197334$ $y_2 = 0,12295$	<i>m</i>

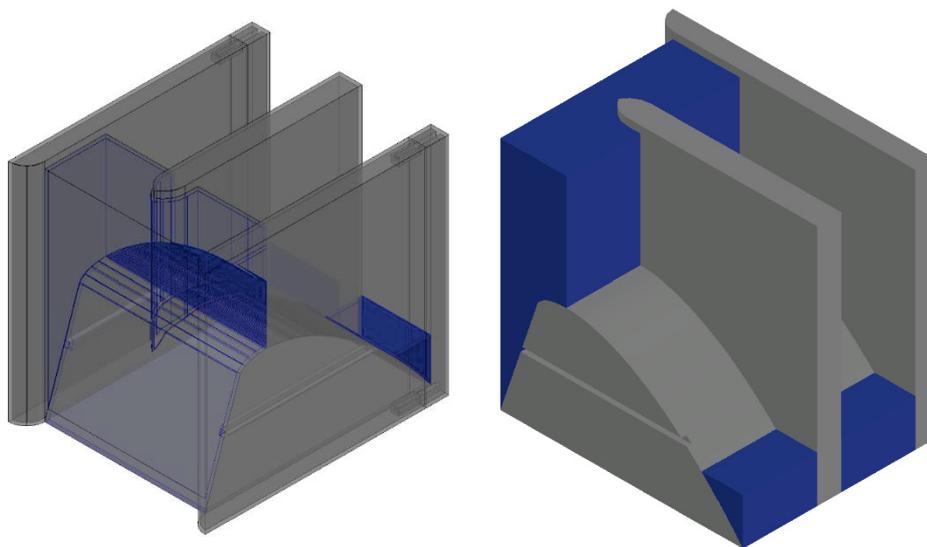
Submódulo	Variável	Descrição	Resultado	Unidade (S.I.)
Centro de Massa	$\gamma_c \times A_c$	Peso com comprimento unitário	0,4886496	<i>KN</i>
	$\overline{x_{gAc}}$	CGX (coordenada X)	0,139882	<i>m</i>
Pressões Hidrostáticas	M	Nível de água à montante	0,242565	<i>m</i>
	J	Nível de água à jusante	0,0479145	<i>m</i>
	$\gamma_a \times A_{em}$	Empuxo à montante	0,225081	<i>KN</i>
	$\overline{y_{gAem}}$	CGY (empuxo à montante)	0,0552688	<i>m</i>
	M_{em}	Momento (empuxo à montante)	Negativo	-
	$\gamma_a \times A_{ej}$	Empuxo à jusante	0,011479	<i>KN</i>
	$\overline{y_{gAej}}$	CGY (empuxo à jusante)	0,0159715	<i>m</i>
	M_{ej}	Momento (empuxo à jusante)	Positivo	-
	$\gamma_a \times A_{am}$	Peso de fluido à montante	0,106079	<i>KN</i>
	$\overline{x_{gAam}}$	CGX (peso de fluido à montante)	0,219107	<i>m</i>
	M_{am}	Momento (peso de fluido à montante)	Positivo	-
	$\gamma_a \times A_{aj}$	Peso de fluido à jusante	0,0097	<i>KN</i>
	$\overline{x_{gAaj}}$	CGX (peso de fluido à jusante)	0,0137397	<i>m</i>
	M_{aj}	Momento (peso de fluido à jusante)	Positivo	-
Flutuação	V	Soma das forças gravitacionais	0,604429	<i>KN</i>
	U	Subpressão	0,360315	<i>KN</i>
	$\overline{x_{gAU}}$	CGX (subpressão)	0,151748	<i>m</i>
	M_U	Momento (subpressão)	Negativo	-
	CSF	Coefficiente de segurança quanto à flutuação	1,6775	<i>adm</i>
Tombamento	ME	Soma dos momentos estabilizantes	0,0919124	<i>KN × m</i>
	MT	Soma dos momentos desestabilizantes	0,067117	<i>KN × m</i>
	CST	Coefficiente de segurança quanto ao tombamento	1,36944	<i>adm</i>
Deslizamento	T	Soma das forças horizontais	0,213602	<i>KN</i>

Submódulo	Variável	Descrição	Resultado	Unidade (S.I.)
		Coeficiente de segurança		
	CSD_a	quanto ao deslizamento com atrito	0,659821	<i>adm</i>
	Co_{min}	Coessão mínima necessária	1,44681	<i>KN/m²</i>
		Coeficiente de segurança		
	CSD_c	quanto ao deslizamento com coessão	8,1827	<i>adm</i>
	T_{min}	Tensão mínima de compressão sem fissura	0,449288	<i>KN/m²</i>
	T_{max}	Tensão máxima de compressão sem fissura	1,51872	<i>KN/m²</i>
	B_t	Comprimento de base tracionada	0,00	<i>m</i>
	$\%_{comp}$	% da base comprimida	100	%
Tensões na base	$B_{t,f}$	Comprimento da abertura de fissura após iteração	-	<i>m</i>
	$T_{min,f}$	Tensão mínima de compressão com fissura	-	<i>KN/m²</i>
	$T_{max,f}$	Tensão máxima de compressão com fissura	-	<i>KN/m²</i>
	$\%_{comp,f}$	% da base comprimida	-	%
	CSF_f	CSF após fissura	-	<i>adm</i>
	CST_f	CST após fissura	-	<i>adm</i>
	$CSD_{a,f}$	CSD com atrito após fissura	-	<i>adm</i>
	$CSD_{c,f}$	CSD com coessão após fissura	-	<i>adm</i>

FONTE: O autor (2024).

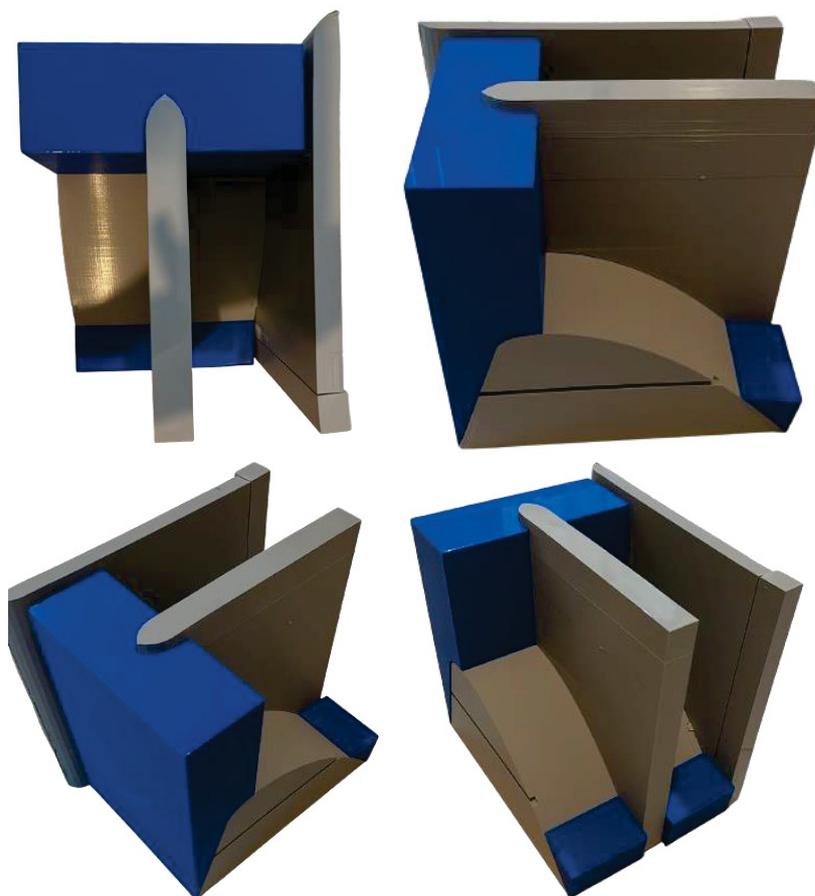
O modelo reduzido, fruto do teste de dimensionamento explicitado pelas tabelas anteriores, foi constituído computacionalmente (FIGURA 25) e impresso em 3D (FIGURA 26) para o potencial uso em aulas do curso de engenharia civil da Universidade Federal do Paraná. Ressalta-se que este modelo tem por finalidade exclusiva a validação de toda a lógica matemática aplicada em *Spillways* e, portanto, não possui o objetivo de replicar ou projetar um vertedouro real.

FIGURA 25 – VISÃO COMPUTACIONAL DO MODELO REDUZIDO



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 26 – MODELO REDUZIDO IMPRESSO EM 3D



FONTE: O autor (2024).

Por fim, é importante elencar alguns pontos importantes para o leitor que deseja se aprofundar no código-fonte e/ou na utilização deste *software* educativo:

- O controle de versões deste foi feito a partir da plataforma GitHub. O acesso deve ter autorização expressa do autor;
- O código-fonte em *Dart* pode ser compilado para diferentes plataformas, como *Windows*, *Linux*, *MacOS*, *Web*, *Android* e *iOS*. No entanto, os detalhes de instalação descritos no APÊNDICE 7 contemplam apenas as plataformas mobile *Android* e *iOS*;
- Após registro deste *software* no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), a respectiva propriedade intelectual, na classe de direitos autorais de programa de computador, pertencerá ao autor deste trabalho. O acesso ao código-fonte deve ter autorização sua expressa e pode ser solicitada por meio do e-mail *bruno.colodel@ufpr.br* informando seu nome de usuário do *GitHub*.

6. AVALIAÇÃO DO SOFTWARE EDUCATIVO

A avaliação conforme *checklist* do APÊNDICE 6 foi solicitada para o professor especialista da área de recursos hídricos Drº Daniel Henrique Marco Detzel, professor do curso de engenharia civil da Universidade Federal do Paraná. O resumo desta avaliação é apresentado no QUADRO 19, no qual confere a pontuação total de 42 pontos de 49 possíveis (86%). A avaliação foi dividida em quatro dimensões de qualidade, nos quais são ressaltados abaixo alguns pontos fracos:

- Qualidade de software: devido a especificidade de *Spillways*, até o momento não foi encontrado um *software* que possa substituí-lo (QUADRO 20);
- Qualidade de uso: não há possibilidade de personalização das interfaces e interações. Além disso, não foi feito um manual de ajuda e suporte ao usuário (QUADRO 21);
- Qualidade pedagógica: não indica explicitamente quais são os conhecimentos prévios necessários para sua utilização, ficando esta função a cargo do professor. Também não é disponibilizado um guia de apoio pedagógico ao professor, tampouco são mencionados explicitamente os objetivos pedagógicos (QUADRO 22);
- Qualidade híbrida: ações não podem ser interrompidas em tempo de execução (QUADRO 23).

QUADRO 19 – RESULTADO DA AVALIAÇÃO DE SPILLWAYS POR ESPECIALISTA

Dimensão	Pontos	Máximo
Qualidade de <i>Software</i>	16	17
Qualidade de Uso	8	10
Qualidade Pedagógica	12	15
Qualidade Híbrida	6	7
Total	42	49

FONTE: O autor (2024).

QUADRO 20 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOFTWARE DE SPILLWAYS POR ESPECIALISTA

QUALIDADE DE SOFTWARE			Sim	Não
Concepção do Software				
1	Adequação	Possui um conjunto apropriado de funções para tarefas e objetivos dos usuários especificados	X	
2	Acurácia	Possui, com o grau de precisão necessário, resultados ou efeitos corretos ou conforme acordado	X	
3	Conformidade funcional	Está de acordo com normas, convenções ou regulamentações previstas em leis e prescrições similares relacionadas à funcionalidade	X	
4	Uso de recursos	Usa tipos e quantidades de recursos (tecnologias, frameworks, bibliotecas) dentro dos limites acordados para o <i>software</i> executar suas funções sob condições estabelecidas	X	
5	Conformidade portátil	Está de acordo com normas ou convenções relacionadas à portabilidade	X	
6	Interoperabilidade	Interage com um ou mais sistemas especificados	X	
Evolução do Software				
7	Estabilidade	Evita efeitos inesperados decorrentes de modificações no <i>software</i>	X	
8	Analisabilidade	Permite o diagnóstico de deficiências ou causas de falhas no <i>software</i> , ou a identificação de partes a serem modificadas	X	
9	Modificabilidade	Permite que uma modificação especificada seja implementada	X	
10	Substitutibilidade	Pode ser substituído por outro produto de <i>software</i> especificado, com o mesmo propósito e no mesmo ambiente		X
11	Instalabilidade	Pode ser instalado em um ambiente especificado	X	
12	Testabilidade	É possível testar o sistema modificado, tanto quanto as novas funcionalidades quanto às não afetadas diretamente pela modificação	X	
13	Maturidade	Evita defeitos decorrentes de falhas no <i>software</i>	X	
Segurança do Sistema				
14	Inteligibilidade	Possibilita ao usuário compreender se o <i>software</i> é apropriado e como ele pode ser usado para tarefas e condições de uso específicas	X	
15	Apreensibilidade	Possibilita ao usuário entender como ele funciona e/ou aprender a usá-lo	X	
16	Tolerância a falhas	Mitiga falhas e mantém um nível de desempenho especificado em casos de defeitos no <i>software</i> ou em violação de sua interface especificada	X	
17	Segurança de acesso	Protege informações e dados, de forma que pessoas ou sistemas não autorizados não possam lê-los nem os modificar e que não seja negado o acesso às pessoas ou sistemas autorizados	X	

FONTE: O autor (2024).

QUADRO 21 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE USO DE SPILLWAYS POR ESPECIALISTA

QUALIDADE DE USO			Sim	Não
Interface do Usuário				
18	Consistência e padrões	Utiliza os mesmos ícones, denominações, organização da informação, nas diferentes partes do sistema	X	
19	Reconhecer em vez de lembrar	Utiliza elementos de interface que sejam significativos para os usuários, reduzindo a carga cognitiva e perceptiva destes e aumentando a eficiência do diálogo entre estes e o sistema	X	
20	Flexibilidade e eficiência de uso	Dispõe de mecanismos de configuração e personalização da interface e da interação		X
21	Design estético e minimalista	Apresenta apenas a informação necessária e relevante para o usuário, evitando distratores	X	
Experiência do Usuário				
22	Visibilidade do estado do sistema	Dispõe de feedback imediato nas respostas do sistema às ações do usuário	X	
23	Mapeamento entre o sistema e o mundo real	Dispõe de meios para organizar as informações conforme o modelo mental e as experiências de uso do usuário, usando terminologia familiares a este	X	
Gestão de Erros				
24	Prevenção de erros	Dispõe de mecanismos para detectar e prevenir erros de entradas de dados, comandos, possíveis ações de consequências desastrosas e/ou não recuperáveis	X	
25	Suporte para o usuário reconhecer, diagnosticar e recuperar erros	Dispõe de mecanismos que permitem evitar ou reduzir a ocorrência de erros e, quando eles ocorrem, favorecem sua correção	X	
Interação do Usuário				
26	Ajuda e documentação	Dispõe de mecanismos e documentos que permitem ajudar o usuário quando há alguma dificuldade		X
27	Compatibilidade	Dispõe de tarefas e ações que sejam compatíveis com as características do usuário (memória, percepção, hábitos, competências, idade, expectativa, etc)	X	

FONTE: O autor (2024).

QUADRO 22 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE PEDAGÓGICA DE SPILLWAYS POR ESPECIALISTA

QUALIDADE PEDAGÓGICA			Sim	Não
Conhecimentos Prévios				
28	Indicação dos conhecimentos prévios	Relaciona os pré-requisitos necessários à compreensão do conteúdo trabalhado no recurso digital de aprendizagem (RDA) indicados no guia de apoio pedagógico do professor		X
29	Retrabalho com os conhecimentos prévios	O RDA parte dos conhecimentos prévios disponíveis, possibilitando que o usuário construa e reconstrua seus próprios conceitos	X	
Fundamentos e Objetivos Pedagógicos				
30	Guia de apoio pedagógico ao professor	Possui informações pedagógicas, para que o professor amplie as possibilidades de utilização do RDA		X
31	Identificação dos objetivos pedagógicos	Especifica os conhecimentos a serem elaborados pelo usuário na utilização do RDA		X
Conteúdo Pedagógico				
32	Nível de complexidade dos conteúdos nas atividades	As atividades estimulam o interesse, a ativação do conhecimento prévio e a utilização deste na elaboração de novos conhecimentos	X	
33	Abordagem específica e/ou disciplinar	Permite a abordagem do conteúdo de forma interdisciplinar	X	
34	Trabalho em grupo e/ou individual	Possibilita o trabalho em grupo na execução do RDA	X	
Pertinência do Conteúdo				
35	Adequação do RDA ao conteúdo trabalhado	O conteúdo do trabalho didático-pedagógico é compatível com o conteúdo trabalhado no RDA	X	
36	Análise do conteúdo	O conteúdo é organizado logicamente e sem erros conceituais	X	
37	Adequação do RDA ao usuário e ao currículo	A complexidade do conteúdo é adequada ao nível do usuário em comparação ao currículo escolar	X	
Clareza Epistemológica				
38	Explicitação da concepção pedagógica	É explícita a concepção didático-pedagógica utilizada no desenvolvimento do RDA	X	
39	Coerência pedagógica em relação à base teórico-conceitual	É coerente com a teoria pedagógica utilizada no RDA, considerando a correlação entre a teoria e a prática pedagógicas	X	
Elaboração do Conhecimento				
40	Feedback encorajador mediante respostas inadequadas	O retorno dado pelo RDA ao usuário é positivo, incentivando-o nas atividades sem prejudicar a elaboração do conhecimento	X	
41	Reflexão acerca de erros e acertos	Permite reflexão do usuário sobre o conteúdo trabalhado no RDA com retorno às atividades e outras formas de resolução	X	
42	Registro de desempenho do usuário	Possui registro de desempenho relacionado às respostas das atividades realizadas pelo usuário no RDA	X	

FONTE: O autor (2024).

QUADRO 23 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE HÍBRIDA DE SPILLWAYS POR ESPECIALISTA

QUALIDADE HÍBRIDA			Sim	Não
Segurança do Sistema e Experiência do Usuário				
43	Liberdade e controle ao usuário	Dispõe de mecanismos que permitem aos usuários agir sobre o sistema para interromper, cancelar, suspender e continuar as ações do sistema		X
44	Suporte para reconhecer, diagnosticar e recuperar falhas	Dispõe de mecanismos que permitem evitar a ocorrência de erros durante a utilização do RDA e, quando eles ocorrem, auxiliam na sua manipulação para a devida correção	X	
Evolução do Software e Experiência do Usuário				
45	Adaptabilidade	É adaptável a diferentes ambientes especificados, sem necessidade de aplicar outras ações ou meios além dos fornecidos para tal finalidade e dispõe de meios para que o sistema respeite o nível de flexibilidade e experiência do usuário	X	
46	Visibilidade do estado do sistema	Fornecer tempos de resposta, de processamento e de taxas de transferência apropriados, ao executar suas funções nas condições estabelecidas, ou seja, dispõe de feedback imediato nas respostas do sistema às ações do usuário	X	
Concepção do Software e Experiência do Usuário				
47	Atratividade	Desperta no usuário um interesse intrínseco pelo conteúdo e não por premiações ou outras formas de manipulação de comportamento	X	
Interação do Usuário e Elaboração do Conhecimento				
48	Desafios Pedagógicos	Há desafios capazes de provocar desequilíbrios cognitivos no usuário e de manter o seu nível de interesse	X	
49	Estímulo a participação do usuário	Interage com o usuário para estimular a participação e ajudar na superação de conflitos cognitivos (mediante perguntas, simulações e desafios)	X	

FONTE: O autor (2024).

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Vertedouros são estruturas importantes no controle de cheias, no saneamento, em usinas hidrelétricas e em diversas outras aplicações na engenharia. Portanto, seu uso e correto dimensionamento é fundamental para serviços básicos à população, como a distribuição de água e energia elétrica, além de evitar tragédias ocasionadas por grandes cheias. O correto dimensionamento depende de um profundo aprendizado que começa nas faculdades de engenharia, o qual pode, e deve, ser auxiliado por novas tecnologias, como o software educativo proposto neste trabalho que possibilita o acesso a uma ementa com possibilidade de expansões, além de servir como ferramenta de auxílio de cálculo.

A popularização no uso de *smartphones* com crescente desempenho de *hardware* aliada a facilidade de instalação de aplicativos torna possível adotar uma estratégia de maior inclusão digital no aprendizado, como realizado neste trabalho.

O uso de teorias de aprendizagem baseadas na filosofia construtivista, como a teoria de ensino de Jerome Bruner e a aprendizagem significativa de David Ausubel, foi fundamental para estabelecer o incentivo e o estímulo correto para facilitar a aprendizagem.

Somado a isso, a utilização de estratégias adequadas na obtenção, e posterior análise dos requisitos do software educativo, possibilitou a elaboração de uma arquitetura de software que alia experiência de usuário, usabilidade e qualidade pedagógica. Assim, o produto deste trabalho foi uma ferramenta resultante capaz de auxiliar o processo de ensino aprendizagem através da divisão entre teoria, prática e simulação com *feedbacks* interativos e animações, tornando a construção lúdica do conhecimento por experimentação.

A avaliação de professor especialista da área abordada pode ser a base do próximo ciclo de melhoria do *software* educativo, uma vez que os pontos fortes e fracos foram apontados.

Todo o material elaborado neste trabalho é o segundo passo da série de aplicações intitulada “*Build the Future*”, que tem o intuito de auxiliar o ensino de temas relevantes da engenharia de recursos hídricos. O aprendizado conquistado com a elaboração de “*Gravity Dams*” e de “*Spillways*” foi, portanto, fundamental não apenas para ampliar os conteúdos abordados, mas também para aprimorar a arquitetura do *software* de modo a facilitar a introdução de novas estruturas.

7.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi contemplado apenas o necessário para atingir o objetivo primário de dimensionamento e verificação de estabilidade de vertedouros do tipo ogiva no Brasil. No entanto, várias são as possibilidades de complementação e implementação de novas funcionalidades. Entre elas:

- Adição de qualquer estrutura hidráulica cujo projeto possa ser separado em etapas;
- No dimensionamento de vertedouros ogiva: comportas, ponto de tangência à jusante e consideração da diferença entre as cotas do piso à montante e à jusante;
- Em análise de estabilidade: sismos (onde devem ser consideradas pressões hidrodinâmicas), deslizamento para uma base de estrutura situada num plano não horizontal, variações na subpressão através de galerias de drenagem, casos em que há solo causando pressões hidrostáticas;
- Recompensa final: quando o usuário atinge 100% de conclusão de conteúdo de uma estrutura, são disponibilizados: uma calculadora na qual o próprio software educativo apresenta todos os resultados (sem que o usuário necessite fazer qualquer cálculo); uma ferramenta de otimização automática de seção. Isto é, dado os parâmetros iniciais de uma estrutura, o sistema calcula iterativamente a área mínima da seção de concreto para passar nas verificações de dimensionamento e de estabilidade;
- Internacionalização do app através da implementação de novos arquivos HTML contendo referências às normas locais, além da tradução para a língua local, adaptação dos números decimais e conversão de unidades (entre o internacional e o americano);
- Acréscimo da funcionalidade de desafios, onde são calculados casos referentes a estruturas existentes;
- Elaboração de animações realísticas através da modelagem do escoamento e exportação dos respectivos dados do programa *OpenFOAM* e importando-os no *software* de renderização *Blender*.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Diretrizes para elaboração de projetos de barragens. In: BRASIL **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**. Brasília: [s.n.], v. V, 2016. p. 156.
- ANA. **Portaria nº149/2015: Lista de Termos**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília. 2015.
- AZEVEDO NETTO, J. M. D. **Manual de Hidráulica**. 8ª. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1998. 669 p.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- BARTIKO, D.; CHAFFE, P. L. B.; BONUMÁ, N. B. Nonstationarity in maximum annual daily streamflow series from Southern Brazil. **RBRH**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170054>>. Acesso em: 12 out 2023.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML: Guia do Usuário**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- BORÇATO, A. G.; HACKBARTH, C.; MELO, N. D. A. Uso de Softwares no Processo de Ensino-Aprendizagem dos Cursos de Engenharia Civil da Educação Profissional e Tecnológica. **Revista Extensão e Cidadania**, São Carlos, 10, jun. 2022. 84-100.
- BRASIL. LEI Nº 12.334: Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- BRASIL. **Portaria nº 149/2015**. Agência Nacional de Águas. Brasília, p. 43. 2014.
- BRASIL. **Resenha Energética Brasileira 2023**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2023.
- BRITO JUNIOR, O. O. Taxonomia para Avaliação de Recursos Digitais de Aprendizagem – TARDA – Versão 2.0. **Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información**, Coimbra, 01 jun. 2021. 120-135. Disponível em: <<https://scielo.pt/pdf/rist/n42/1646-9895-rist-42-120.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. 3ª. ed. Denver: Department of the Interior, 1987.
- CHANGE VISION INC. Astah: Leverage the power of software modeling, 2023. Disponível em: <<https://astah.net/>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

- COLODEL, B. T. D. L.; OLIVEIRA, A. M.; JESUS, A. **Build The Future –Gravity Dams**: A Primeira Versão de um Aplicativo Mobile para Ensino de Estabilidade de Barragens à Gravidade. Anais do XXXII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação. Porto Alegre: SBC. 2021. p. 429-439.
- COOMANS, S.; LACERDA, G. S. **PETESE, a pedagogical ergonomic tool for educational software evaluation**. 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Las Vegas: Elsevier B. V. 2015. p. 5881-5888.
- CORPS OF ENGINEERS. **Hydraulic Design Criteria**. Vicksburg: Army Corps of Engineers, v. I, 1977.
- DANTAS, J. B.; SILVA, D. F. Vertedores e sua relevância nas usinas hidrelétricas. **Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Maceió, nov. 2016. 241-250.
- ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. 1ª. ed. Brasília: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2000.
- ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Brasília: Eletrobrás/CBDB, 2003.
- FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 25ª. ed. São Paulo: Paz e Terra, 1996.
- GITHUB INC. GitHub: Let's build from here, 2023. Disponível em: <<https://github.com/>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- GOOGLE INC. Android Studio: Get the official Integrated Development Environment (IDE) for Android app development., 2023a. Disponível em: <<https://developer.android.com/studio>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- GOOGLE INC. Dart Overview, 2023b. Disponível em: <<https://dart.dev/overview>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- GOOGLE INC. Flutter: build apps for any screen, 2023c. Disponível em: <<https://flutter.dev/>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- GOOGLE INC. Firebase: deixe seu app o melhor possível, 2023d. Disponível em: <<https://firebase.google.com/>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- MOCKPLUS. Mockplus: design, prototype and deliver your digital future, 2023. Disponível em: <<https://mockplus.com/>>. Acesso em: 05 jan. 2023.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda, 1999.

- OLIVEIRA, G. G. et al. **CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES E ENXURRADAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI-ANTAS**. Geociências. São Paulo: UNESP. 2017. p. 849-863.
- OPENCFD. About OpenFOAM. **OpenFOAM**, 2024. Disponível em: <<https://www.openfoam.com>>. Acesso em: 12 jan. 2024.
- PARIZOTO, G. H. S. **CONSIDERAÇÕES SOBRE A FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO NAS ESCOLAS BRASILEIRAS**. Campo Mourão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- PEREIRA, G. M. **Spillway Design – Step by Step**. 1ª. ed. Leiden: CRC Press, 2020.
- PEREIRA, G. M. **Design of Hydroelectric Power Plants – Step by Step**. 1ª. ed. Leiden: CRC Press, 2022.
- PUC-RIO. Ftool: Visão Geral. **Ftool**, 2024. Disponível em: <<https://www.ftool.com.br/Ftool/site/about>>. Acesso em: 12 jan. 2024.
- RAIMUNDO, A. P. **Estruturas Hidráulicas utilizadas em Reservatório de Controle de Cheias**. USP. São Paulo. 2007.
- ROSA, D. W. B.; VIANNA, M. R.; FILGUEIRAS, L. S. D. S. **Utilização de vertedouros em estações de tratamento de água: limitações na aplicação das fórmulas disponíveis para dimensionamento**. XV SILUBESA. Belo Horizonte: ABES. 2012. p. 1-8.
- SAVIANI, D. **Escola e Democracia**. 32ª. ed. Campinas: Autores Associados, 1999.
- SOMMERVILLE, I. **Engenharia de Software**. 9ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- TAVARES, J.; SILVA, L. **Tipos e Classificações de Softwares Educacionais**. Anais do IV Congresso Nacional de Educação. Campina Grande: Realize Editora. 2017.
- TIBURCIO, R.; BELLEMAIN, F.; RODRIGUES, A. **CONCEPÇÃO E EVOLUÇÃO DA ENGENHARIA DIDÁTICO-INFORMÁTICA: Uma proposta de metodologia para a produção de software educativo**. **Revista de Educação Matemática e Tecnológica Iberoamericana**, Recife, 12, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/emteia/article/view/249773>>.
- TURPO, R. P. C. **Software de Auxílio no Ensino para Dimensionamento de Elementos Estruturais de Concreto Armado**. Uberlândia: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2020.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Hydrology. In: _____ **National engineering handbook**. Washington D.C.: Soil Conservation Service, 1972.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Gravity Dam Design**. 1ª. ed. Washington: Department of the Army, 1995.

US CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS User's Manual. **HEC-RAS**, 2024. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>>. Acesso em: 12 jan. 2024.

VAZQUEZ, C. E. **Engenharia de Requisitos**: software orientado ao negócio. 1ª. ed. São Paulo: Brasport, 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)**. World Meteorological Organization. Geneva, p. 291. 2009. (ISBN 978-926-3101045-9).

GLOSSÁRIO

Barragem: obra em que o eixo principal do maciço está num plano que intercepta a seção transversal de um curso d'água e respectivos terrenos marginais, alterando as suas condições de escoamento natural, objetivando a formação de um reservatório a montante, tendo como principal finalidade a regularização das vazões liberadas à jusante, por meio de estruturas controladoras de vazões (ANA, 2015).

Bacia hidrográfica: espaço geográfico delimitado pelo respectivo divisor de águas cujo escoamento superficial converge para seu interior sendo captado pela rede de drenagem que lhe concerne (ANA, 2015).

Crista: parte superior de uma barragem, dique ou descarregador acima da qual a água deve elevar-se antes de passar sobre a estrutura (ANA, 2015).

Hidrograma: gráfico que mostra a variação da vazão em função do tempo para determinado ponto (seção) de trecho de drenagem (ANA, 2015).

Jusante: atributo altimétrico de um ponto em relação a outro que está acima (montante), em relação ao mesmo trecho de drenagem (ANA, 2015).

Montante: qualitativo de um ponto ou uma área que, ao longo de um curso d'água, fica altimetricamente acima de outra. Em direção curso acima (ANA, 2015).

Obra hidráulica: qualquer obra permanente ou temporária capaz de alterar o regime natural das águas superficiais ou subterrâneas, incluídas as condições qualitativas e quantitativas (ANA, 2015).

Pressão hidrostática: pressão isotrópica exercida pela água em repouso.

Regionalização (de vazões): técnica estatística para estimar vazões características em locais sem dados, a partir dos dados existentes em bacias hidrologicamente semelhantes (ANA, 2015).

Segurança (obra hidráulica): condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e à preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente.

Série (de vazões): histórico de vazões em um determinado curso d'água, necessário para obtenção de estatísticas representativas da hidrologia local (ANA, 2015).

Tempo de retorno (ou de recorrência): tempo médio, em anos, para que determinado evento hidrológico seja igualado ou superado (ANA, 2015).

Vazão: volume de líquido que passa através de uma seção em uma unidade de tempo.

Vertedouro (ou vertedor): barreira relativamente baixa construída transversalmente a um curso d'água para conter, regular, derivar ou medir o escoamento (ANA, 2015).

APÊNDICE 1 – ENTREVISTA COM PROFESSOR DA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS

Nome do Professor	
Experiência como docente	
Disciplina que leciona em 2023 (relacionado ao tema de vertedouros)	
Nome	
C. Horária	
Curso	
Universidade	

Etapa	Questões norteadoras		
Especificação inicial	1	A respeito do conteúdo “Projeto de Vertedouros”, como classificaria: a. A complexidade do conteúdo? b. A carga horária disponível para lecioná-la? c. A importância na formação do bacharel? d. A relevância do tema na sociedade atual?	
	2	Quais conceitos e definições deveriam estar presentes em um <i>software</i> sobre vertedouros?	
	3	Qual seria o diferencial da utilização desse <i>software</i> comparado a um ambiente papel e lápis?	
Composição da equipe	4	Professores especialistas	
	5	Profissional da área de desenvolvimento de <i>software</i>	
	6	Usuários do <i>software</i>	
Análises Prévias	7	Cognitiva Quais são as principais dificuldades dos alunos no processo de ensino-aprendizagem e na avaliação do conteúdo “Projeto de Vertedouros”?	
	8	Qual é o estado atual do ensino de vertedouros?	
	9	Didática	Quais são as consequências desse ensino na formação do engenheiro?
	10		Quais são as dificuldades em ensinar sobre vertedouros?
	11	Epistemológica	Quais intervenções são realizadas para adaptar o saber matemático ao saber a ser ensinado?
	12		Quais são os aspectos do conhecimento que podem dificultar e/ou facilitar a aprendizagem sobre vertedouros?
	13	Informática	Quais são as contribuições tecnológicas que o <i>software</i> deve conter para auxiliar na compreensão e ensino dos conhecimentos?
	14		Em que aspectos as tecnologias digitais influenciam no currículo e nas mudanças das práticas docente e discente?
Levantamento de requisitos	15	Como o ensino e a aprendizagem podem ser favorecidos com o uso do <i>software</i> ?	
	16	Como a compreensão dos saberes pode ser auxiliada com o uso do <i>software</i> ?	
	17	Quais recursos e situações o <i>software</i> pode ajudar o usuário a compreender os conhecimentos?	
	18	Possui conhecimento de algum <i>software</i> específico sobre vertedouros? Se sim, quais funcionalidades ele apresenta?	
	19	Quais funcionalidades um novo <i>software</i> sobre vertedouros deveria trazer como diferencial?	

Profº Drº Daniel Henrique Marco Detzel	
Experiência como docente	7 anos
Disciplina que leciona em 2023	
Nome	Eng. Recursos Hídricos
C. Horária	60h
Curso	Eng. Civil
Universidade	UFPR

Etapa	Questões norteadoras		
Especificação inicial	1	a. Média b. As 6 aulas disponíveis para o tema não são suficientes para o aprofundamento do conhecimento c. Muito importante, pois são estruturas fundamentais de segurança d. Grande importância, dada a recente presença de notícias de inundações e rompimento de estruturas hidráulicas na mídia	
	2	Deve conter descrição dos tipos de vertedouros e conceituação da capacidade de descarga, bem como o processo de cálculo de suas respectivas geometrias através da carga hidráulica	
	3	Possibilidade de automatização de consulta a ábacos, além do processo lúdico da aprendizagem	
Composição da equipe	4	Profº Daniel Detzel e Profº André Fabiani	
	5	Bruno Colodel (autor)	
	6	Alunos do curso de Eng. Civil da UFPR	
Análises Prévias	7	Cognitiva	Déficit de conhecimentos prévios em hidráulica e dificuldade de leitura de ábacos
	8	Didática	As aulas são dadas pelo método tradicional (expositiva)
	9		Esse conhecimento poderá auxiliar o discente na resolução de problemas em outras áreas da engenharia
	10		Como ilustrar os conceitos e processos envolvidos
	11	Epistemológica	É necessário recapitular a resolução de equações não lineares
	12		Conhecimento prévio em hidráulica e mecânica dos fluidos pode facilitar o processo de ensino
	13	Informática	Possibilidade de visualização dos conceitos e de simulação do processo de cálculo da geometria mais adequada considerando a largura e carga hidráulica de projeto
14	Podem agilizar o processo de ensino e aumentar a motivação dos discentes		
Levantamento de requisitos	15	Como uma ferramenta auxiliadora do ensino, o aplicativo poderá facilitar a transmissão do conhecimento aumentando o engajamento da turma, visto o perfil dos discentes (altamente envolvidos com a tecnologia)	
	16	Com a ilustração de conceitos e da própria geometria dos vertedouros	
	17	Poderá auxiliar na leitura dos ábacos e através de cálculos iterativos para a descoberta da melhor geometria em cada caso	
	18	Conheço <i>softwares</i> bem-conceituados de dinâmica de fluidos, como <i>HEC-RAS</i> e <i>OpenFOAM</i> , mas nada específico para dimensionamento de vertedouros	
	19	A possibilidade do cálculo da geometria do vertedouro, bem como sua otimização	

APÊNDICE 2 – HISTÓRIAS DE USUÁRIO E PROTÓTIPOS

HU01 – Cadastrar usuário

SENDO	Um novo usuário do sistema
QUERO	Cadastrar-me com um e-mail qualquer
PARA	Utilizar o aplicativo com minhas próprias configurações

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a criação de um usuário cujo *username* seja inválido;

DADO QUE	Foi digitado um <i>username</i> inválido (com menos quatro caracteres ou com utilização de espaços ou caracteres especiais)
QUANDO	Crio um usuário
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de cadastro do usuário.

2. Não deve permitir a criação de um usuário cujo e-mail seja inválido;

DADO QUE	Foi digitado um e-mail inválido (quando não corresponde a expressão regular de um e-mail ou haja inserção de um e-mail pertencente a um usuário já cadastrado)
QUANDO	Crio um usuário
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de cadastro do usuário.

3. Não deve permitir a criação de um usuário cuja senha seja inválida;

DADO QUE	Foi digitada uma senha inválida (quando não corresponde a expressão regular)
QUANDO	Crio um usuário
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de cadastro do usuário.

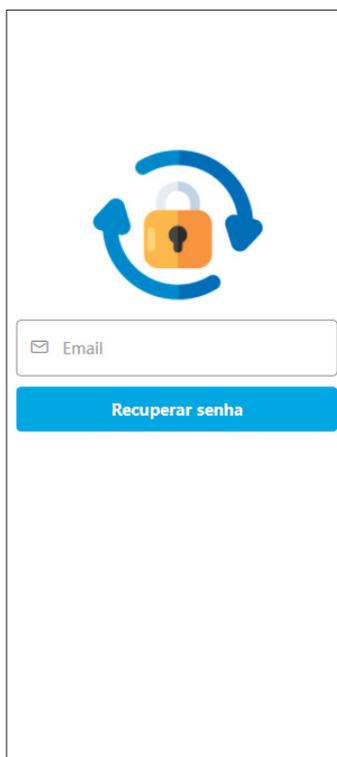
HU02 – Recuperar senha

SENDO	Um usuário cadastrado
QUERO	Recuperar senha esquecida
PARA	Utilizar o aplicativo com minhas próprias configurações

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a recuperação de senha de um usuário inválido;

DADO QUE	Foi digitado um e-mail inválido (quando não corresponde a expressão regular de um e-mail ou haja inserção de um e-mail não pertencente a um usuário já cadastrado)
QUANDO	Recupero a senha de um usuário
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de recuperação de senha.



HU03 – Realizar *login*

SENDO	Um usuário cadastrado
QUERO	Realizar <i>login</i>
PARA	Utilizar o aplicativo com minhas próprias configurações

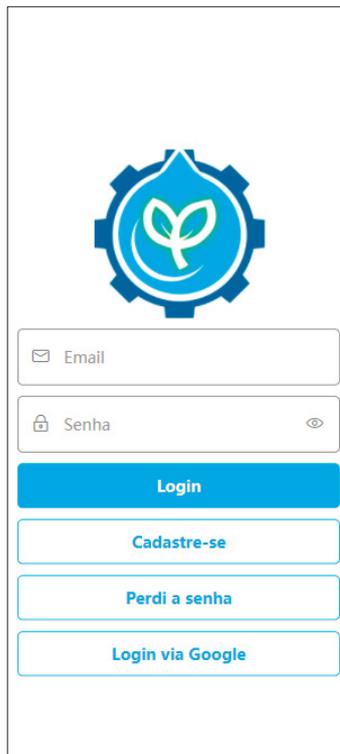
Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir o *login* quando o e-mail inserido seja inválido;

DADO QUE	Foi digitado um e-mail inválido (quando não corresponde a expressão regular de um e-mail ou haja inserção de um e-mail que não pertence a um usuário cadastrado)
QUANDO	Realizo <i>login</i>
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de cadastro do usuário.

2. Não deve permitir o *login* de um usuário cuja senha seja inválida;

DADO QUE	Foi digitada uma senha inválida (não correspondente ao e-mail de usuário inserido)
QUANDO	Realizo <i>login</i>
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de cadastro do usuário.



HU04 – Atualizar usuário

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Editar minhas configurações de conta
PARA	Utilizar o aplicativo com minhas próprias configurações

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a alteração para um novo *username* inválido;

DADO QUE	Foi digitado um novo <i>username</i> inválido (com menos quatro caracteres ou com utilização de espaços ou caracteres especiais)
QUANDO	Atualizo um usuário
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de configurações de conta do usuário.

2. Não deve permitir a alteração para uma nova senha inválida;

DADO QUE	Foi digitada uma nova senha inválida (quando não corresponde a expressão regular)
QUANDO	Atualizo um usuário
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de configurações de conta do usuário.



HU05 – Manter Caso de Carregamento

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Criar, visualizar e excluir casos de carregamento
PARA	Utilizar meus casos de carregamentos nos cálculos de estabilidade de minhas estruturas

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a criação de casos com valores de variáveis inválidas;

DADO QUE	Foi digitado um valor de variável inválida (coeficientes mínimos de segurança inferiores a 1 ou porcentagem mínima de base comprimida fora do intervalo 0 a 100)
QUANDO	Crio um caso de carregamento
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de criação de casos de carregamento.

Normal
Caso de Carregamento

- CSF** Flutuação **1,30**
- CST** Tombamento **1,50**
- CSDa** Deslizamento com atrito **1,50**
- CSDc** Deslizamento com coesão **3,00**
- Base Comprimida** % mínima de base comprimida **100%**
- Excluir Caso de Carregamento**
Estruturas não poderão mais utilizá-lo.

Excepcional
Caso de Carregamento

- CSF** Flutuação **1,10**
- CST** Tombamento **1,20**
- CSDa** Deslizamento com atrito **+**

[Estruturas](#) [Configurações](#)

Criar Caso de Carregamento

[Estruturas](#) [Configurações](#)

HU06 – Manter estrutura

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Criar, visualizar, selecionar e excluir estruturas
PARA	Estudar suas etapas de projeto

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a criação de estruturas com valores de variáveis ou verificações inválidas;

DADO QUE	Foi digitado um valor de variável inválida e/ou verificações fora de intervalos pré-estabelecidos (para o vertedouro, estas verificações estão no APÊNDICE 4 – por exemplo, a variável H_0 deve ser maior que zero)
QUANDO	Crio uma estrutura
ENTÃO	O sistema exibe uma mensagem correspondente a causa da invalidez. O sistema se mantém na tela de criação de estruturas.

The image displays three screenshots of a mobile application interface for dam and spillway design.

Left Screenshot: Project Overview

- Vertedouro 01** (Vertedouro Ogiva): 20% progress. Actions: Dimensionamento (Calculate structure geometry), Análise de Estabilidade (Verify global structure security), Excluir Estrutura (Warning: progress will be lost).
- Barragem 01** (Barragem à Gravidade): 90% progress. Action: Análise de Estabilidade (Verify global structure security). Warning: progress will be lost.
- Bottom navigation: Estruturas, Configurações.

Middle Screenshot: Vertedouro Ogiva Design

- Header: Vertedouro Ogiva
- Diagram: Shows spillway geometry with points $P_1 = (x_1; y_1)$, $P_2 = (x_2; y_2)$, $P_3 = (x_3; y_3)$, $P_4 = (x_4; y_4)$, $P_5 = (x_5; y_5)$, $P_6 = (x_6; y_6)$, $P_7 = (x_7; y_7)$, $P_8 = (x_8; y_8)$, $P_9 = (x_9; y_9)$, $P_{10} = (x_{10}; y_{10})$. Equations: $y/H_0 = -K(x/H_0)^2$, $R_1 = (x_1; y_1)$, $R_2 = (x_2; y_2) = (0; 0)$.
- Input fields: Nome, Dimensionamento (Insira dados para dimensionamento), Vazão de projeto (m^3/s), Θ (rad), P (m).
- Bottom navigation: Estruturas, Configurações.

Right Screenshot: Barragem à Gravidade Design

- Header: Barragem à Gravidade
- Diagram: Shows a trapezoidal dam with top width A, bottom width B, height H, and crest thickness C.
- Input fields: Nome, Geometria (Insira os dados geométricos), A (m), B (m).
- Bottom navigation: Estruturas, Configurações.

HU07 – Selecionar etapa

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Selecionar uma etapa de projeto de uma estrutura hidráulica (ver QUADRO 18)
PARA	Estudar, na ordem estabelecida, o passo a passo do processo de projeto

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a seleção de uma etapa fora da ordem estabelecida;

DADO QUE	Existe uma ordem de etapas fixa e pré-estabelecida
QUANDO	Seleciono uma etapa de projeto
ENTÃO	O sistema impede a seleção de uma etapa quando a etapa anterior não foi completada pelo usuário. O sistema se mantém na tela de seleção de etapa de projeto de uma estrutura hidráulica.



HU08 – Selecionar submódulo

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Selecionar um submódulo de um módulo (módulos e submódulos mostrados em uma mesma tela) de uma etapa de projeto (ver QUADRO 18)
PARA	Estudar, individualmente, o passo a passo de uma etapa de projeto da estrutura selecionada

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a seleção de um submódulo fora da ordem estabelecida;

DADO QUE	Existe uma ordem de módulos pré-estabelecido em cada etapa
QUANDO	Seleciono um submódulo de um módulo de uma etapa de projeto
ENTÃO	O sistema impede a seleção de um submódulo de um módulo de uma etapa quando o módulo anterior não foi completado pelo usuário. O sistema se mantém na tela de seleção de submódulo da etapa selecionada.

The screenshot displays a grid of modules and sub-modules, each with a progress indicator (percentage or checkmark). The modules are arranged in two columns. The left column includes: 'Introdução' (100%), 'Parâmetros' (0%), 'Geometria' (0%), and 'Descarga' (0%). The right column includes: 'Forças de Pressão' (100%), 'Ações' (100%), 'Forças Verticais' (66%), and 'Momentos' (0%). Each module has a list of sub-modules, some of which are marked with a green checkmark, indicating completion.

Módulo	Submódulo	Status
Introdução (100%)	Vertedouros	✓
	Vertedouro Ogiva	✓
	Dimencionamento	100%
Parâmetros (0%)	Principais Parâmetros	
	Parâmetros de Projeto	
	Dimencionamento	0%
Geometria (0%)	Variáveis	
	Cálculo da Geometria	
	Dimencionamento	0%
Descarga (0%)	Efeitos	
Forças de Pressão (100%)	Hidrostática x Hidrodinâmica	✓
	Pressões Hidrostáticas	✓
	Análise de Estabilidade	100%
Ações (100%)	Casos de Carregamento	✓
	Combinando Ações	✓
	Análise de Estabilidade	100%
Forças Verticais (66%)	Gravitacionais	✓
	Subpressão	✓
	Flutuação	
	Análise de Estabilidade	66%
Momentos (0%)	Estabilidade	

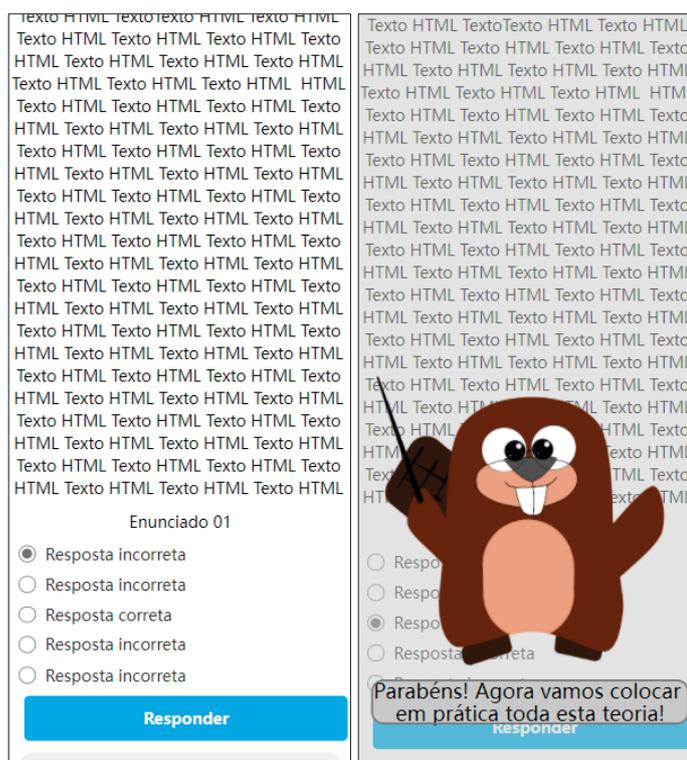
HU09 – Estudar submódulo teórico

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Estudar a teoria acerca de conceitos envolvidos no processo de uma etapa de projeto (ver QUADRO 18)
PARA	Obter uma base teórica para os submódulos práticos e de simulação

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a finalização do submódulo teórico (avanço no progresso) quando o usuário não responder corretamente ao menos 50% das questões objetivas vinculadas a este submódulo;

DADO QUE	Não acerto corretamente 50% das questões objetivas vinculadas a um submódulo teórico
QUANDO	Estudo um submódulo teórico
ENTÃO	O sistema impede a finalização do submódulo. O sistema se mantém na tela do submódulo teórico.



HU10 – Estudar submódulo prático

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Calcular variáveis do submódulo em questão e verificar se meus cálculos estão corretos (ver QUADRO 18)
PARA	Aprender a projetar uma estrutura hidráulica

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a finalização do submódulo prático (avanço no progresso) quando o usuário não responder corretamente os valores de todas as variáveis solicitadas, considerando a tolerância ao erro permitida;

DADO QUE	Não acerto corretamente o valor de uma das variáveis solicitadas
QUANDO	Estudo um submódulo prático
ENTÃO	O sistema exibe feedback através do mascote, conforme a variável incorreta. O sistema impede a finalização do submódulo. O sistema se mantém na tela do submódulo prático.

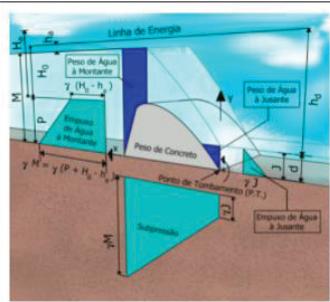


Diagrama de um submódulo hidráulico. A imagem mostra a linha de energia (Linha de Energia) e a linha de torque (Linha de Torque). As forças envolvidas são: Peso de Água à Montante, Peso de Água à Sotante, Peso de Concreto, Empuxo de Água à Sotante, e Empuxo de Água à Montante. O ponto de tombamento (P.T.) é indicado. A equação $\gamma M = \gamma (P + H_s)$ é mostrada.

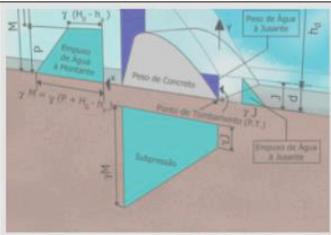


Diagrama de um submódulo hidráulico com parâmetros de projeto. A imagem mostra a linha de energia (Linha de Energia) e a linha de torque (Linha de Torque). As forças envolvidas são: Peso de Água à Montante, Peso de Água à Sotante, Peso de Concreto, Empuxo de Água à Sotante, e Empuxo de Água à Montante. O ponto de tombamento (P.T.) é indicado. A equação $\gamma M = \gamma (P + H_s)$ é mostrada.

Parâmetros de projeto disponíveis:

- C0 ($\sqrt{m/s}$)
- q (m^3/s^2m)
- va (m/s)
- ha (m)
- vd (m/s)
- d (m)
- hd (m)

Parabéns! Estamos um passo mais perto da construção do nosso novo vertedouro!
Calcular Parâmetros de Projeto

HU11 – Estudar submódulo simulador

SENDO	Um usuário cadastrado e autenticado
QUERO	Calcular variáveis do submódulo em questão e verificar se meus cálculos estão corretos (ver QUADRO 18)
PARA	Aprender a projetar uma estrutura hidráulica

Critérios de aceitação:

1. Não deve permitir a finalização do submódulo simulador (avanço no progresso) quando o usuário não responder corretamente os valores de todas as variáveis solicitadas, considerando a tolerância ao erro permitida;

DADO QUE	Não acerto corretamente o valor de uma das variáveis solicitadas
QUANDO	Estudo um submódulo prático
ENTÃO	O sistema exibe feedback através do mascote, conforme a variável incorreta. O sistema impede a finalização do submódulo. O sistema se mantém na tela do submódulo prático.

The image displays two screenshots of a simulation interface for a dam stability analysis. The left screenshot shows a technical diagram of a dam cross-section with various water levels and forces labeled. Below the diagram is a control panel with input fields for 'Forças Verticais (KN)', 'Subpressão (KN)', 'xgU (m)', and 'CSF (adm)', along with a 'Verificar Flutuação' button. The right screenshot shows the same interface but with a cartoon mole mascot character overlaid, holding a pencil. A message box at the bottom reads: 'Verificação de estabilidade quanto à flutuação concluída com sucesso! Parabéns!'.

APÊNDICE 3 – REQUISITOS FUNCIONAIS E NÃO FUNCIONAIS

SEQUÊNCIA	NOME DO REQUISITO	TIPO DO REQUISITO	DESCRIÇÃO DO REQUISITO
01	Cadastrar	Funcional	o sistema deve permitir o cadastro de um usuário.
02	Logar	Funcional	o sistema deve permitir o login de um usuário.
03	Alterar dados de usuário	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário visualizar e modificar seus dados de cadastro e de configurações gerais personalizadas do aplicativo (como o sistema de unidades escolhido)
04	Visualizar, criar e excluir casos de carregamento	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário criar, visualizar e excluir casos de carregamento, considerando que os casos de carregamento padrão e seus respectivos coeficientes são os descritos pela (ELETROBRÁS, 2003)
05	Visualizar, criar e excluir estruturas	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário criar, visualizar e excluir estruturas
06	Visualizar e selecionar etapa	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário visualizar e selecionar uma etapa de projeto de uma estrutura
07	Visualizar e selecionar módulo/submódulo	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário visualizar e selecionar um módulo e submódulo de uma etapa em uma única tela
08	Estudar teoria	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário estudar submódulos teóricos contendo textos, links e questões objetivas (QUADRO 18)
09	Realizar prática	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário estudar submódulos práticos nos quais ele calcula as variáveis solicitadas e recebe feedbacks sobre seus acertos ou erros (QUADRO 18)
10	Simular	Funcional	o sistema deve permitir ao usuário estudar submódulos simuladores nos quais ele calcula as variáveis solicitadas e recebe feedbacks e animações sobre seus acertos ou erros (QUADRO 18)
11	Funcionar	Não Funcional	o sistema deve funcionar nas plataformas <i>Android</i> e <i>iOS</i>

12	Utilizar	Não Funcional	o sistema deve utilizar a biblioteca <i>Firebase Database</i> e <i>Firebase Auth</i> da plataforma <i>Google Cloud</i>
----	----------	------------------	--

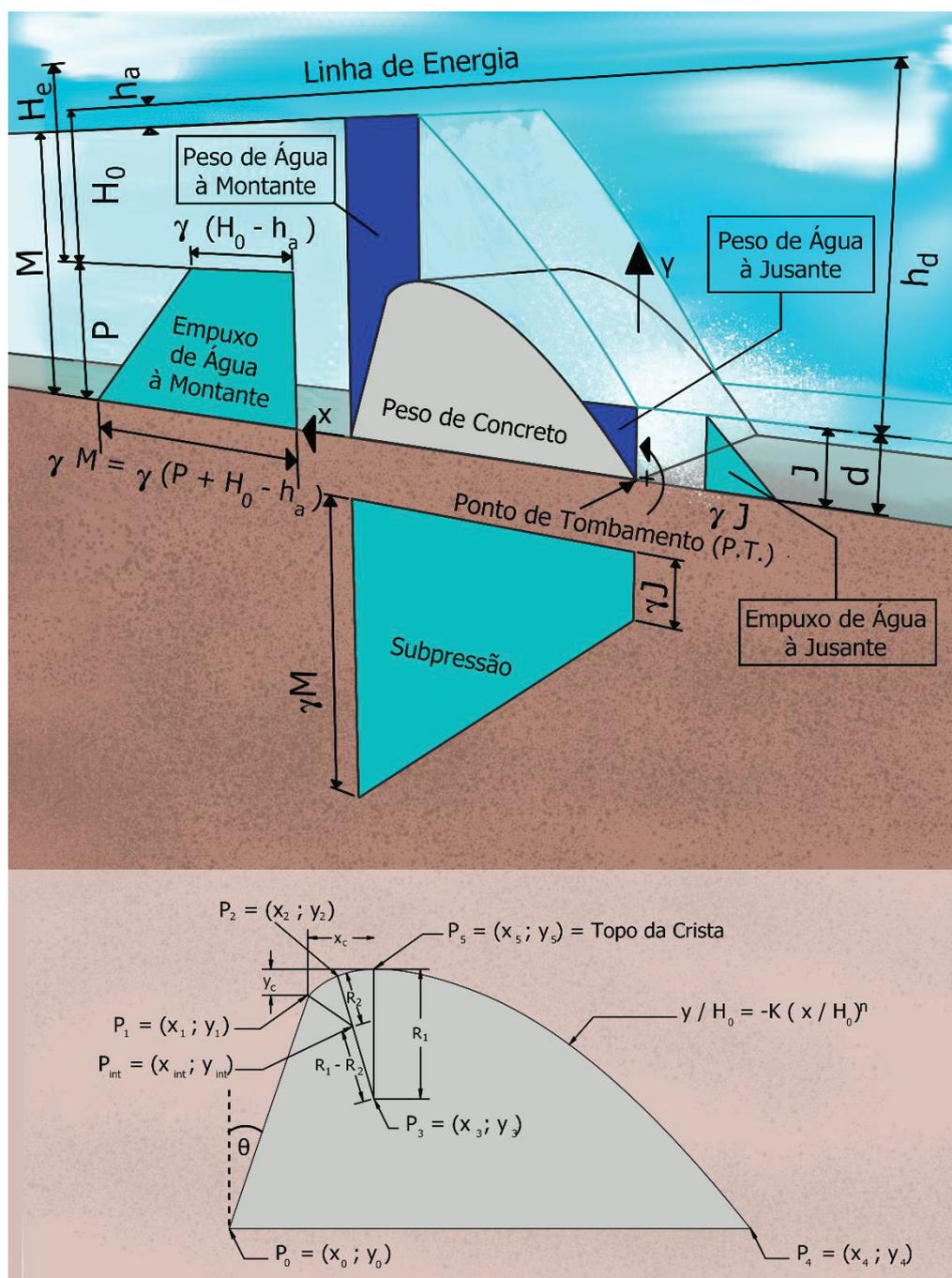
APÊNDICE 4 – PROCESSO DE PROJETO DE VERTEDOUROS TIPO OGIVA

Processo de Dimensionamento do Vertedouro tipo ogiva (perfil Creager) segundo os ábacos do *US Corps of Engineers* (1977):

1. Dimensionamento

1.1. Dados de entrada e verificações iniciais

Imagem ilustrativa das variáveis geométricas e de estabilidade global para o vertedouro tipo ogiva:



Variável / Constante	Descrição	Unidade	Valores Possíveis
g	gravidade	m/s ²	9.80665
Q	vazão total de projeto	m ³ /s	$Q > 0$
P	altura da crista do vertedouro	m	$P > 0$
H_0	carga hidráulica total de projeto acima da crista do vertedouro (posição da linha de energia) utilizada para a determinação das variáveis geométricas do vertedouro	m	$H_0 > 0$
H_e	carga hidráulica total de operação acima da crista do vertedouro	m	$H_e > 0$
θ	inclinação de montante (ângulo entre a vertical e o paramento)	rad	$\tan^{-1}(0)$ $\tan^{-1}(1/3)$ $\tan^{-1}(2/3)$ $\tan^{-1}(3/3)$
P_d	cota do piso à jusante em relação ao piso de montante. Assim, se o piso à jusante estiver abaixo do piso de montante, então $P_d < 0$. Na primeira versão de <i>Spillways</i> , P_d será sempre igual a zero, pois as equações de estabilidade global ainda não suportam que a ordenada do ponto de tombamento seja diferente da ordenada do ponto mais à montante da base do vertedouro	m	$P_d = 0$
n_p	número de pilares centrais	adm	$n_p \in \mathbb{N}$
p_c	tipo dos pilares centrais	-	Type 1 Type 2 Type 3 Type 3A Type 4
p_a	estrutura nas extremidades do vertedouro	-	Concreto Enrocamento
R_p	raio dos pilares de concreto de extremidades (utilizado se $p_a = \text{Concreto}$)	m	$R_p \geq 0$
$C_{o_{max}}$	coesão máxima admissível da superfície de deslizamento	KN/m ²	$C_{o_{max}} > 0$
ϕ	ângulo de atrito da superfície de deslizamento	rad	$0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$
CSF_m	coeficiente de segurança mínimo quanto à flutuação	adm	$CSF_m \geq 1$
CST_m	coeficiente de segurança mínimo quanto ao tombamento	adm	$CST_m \geq 1$
CSD_{am}	coeficiente de segurança mínimo quanto ao deslizamento sem coesão	adm	$CSD_{am} \geq 1$
CSD_{cm}	coeficiente de segurança mínimo quanto ao deslizamento com coesão	adm	$CSD_{cm} \geq 1$
γ_a	peso específico da água	KN/m ³	$\gamma_a \geq 0$
γ_c	peso específico do concreto	KN/m ³	$\gamma_c \geq 0$

Verificações adicionais iniciais	Motivo
$\frac{P}{H_0} \geq 0.2$ se $\theta \neq 0$	Intervalo de validade do ábaco da razão C_{inc}/C_0
$0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6$	Intervalo de validade dos ábacos da razão C_{He}/C_0 e de K_p
$1 \leq \frac{h_d + d}{H_e} = \frac{P + H_0}{H_e} \leq 4$ se $P_d = 0$	Intervalo de validade do ábaco da razão $(h_d + d)/H_e$

- 1.2. Calcular o coeficiente de descarga inicial pelo efeito da profundidade à montante

$$C_0 \left(\frac{\sqrt{ft}}{s} \right) = \begin{cases} \text{se } \frac{P}{H_0} < 0 \\ 3.92735 - 0.824545 \cdot 6.82456^{-2 \left(\frac{P}{H_0} \right)} \text{ se } 0 \leq \frac{P}{H_0} \leq 3 \\ 3.95 \text{ se } \frac{P}{H_0} > 3 \end{cases}$$

$$C_0 \left(\frac{\sqrt{m}}{s} \right) = \sqrt{0.3048} C_0 \left(\frac{\sqrt{ft}}{s} \right)$$

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da variável $C_0 (\sqrt{ft}/s)$ para paramento de montante vertical:

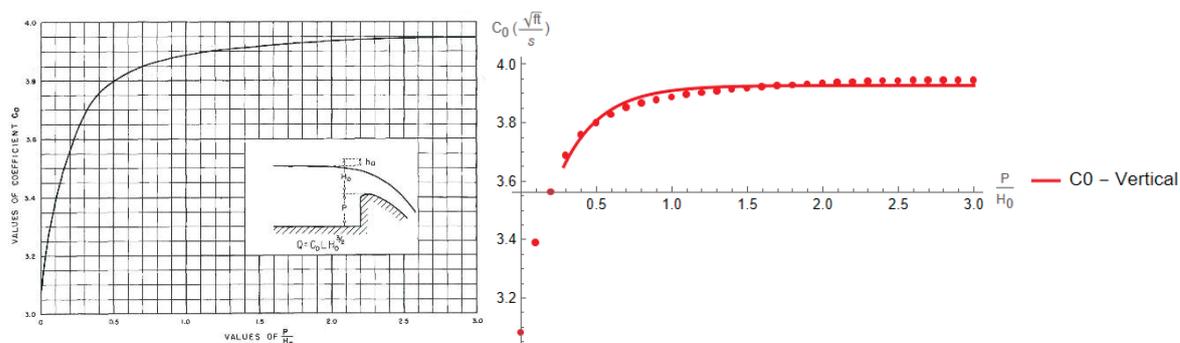
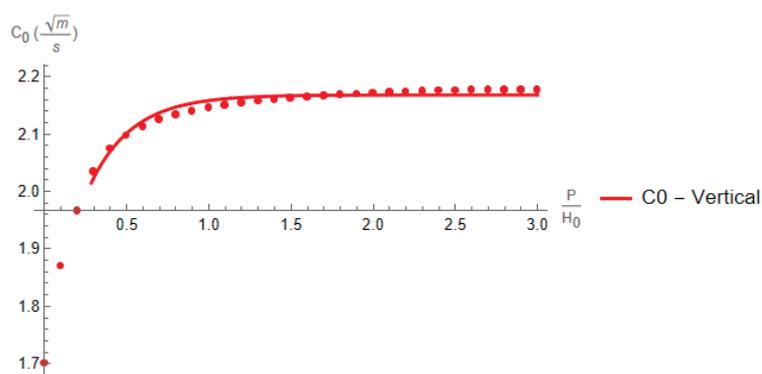


Gráfico de C_0 no sistema internacional de unidades (\sqrt{m}/s):



- 1.3. Calcular a vazão unitária, a velocidade de aproximação e a altura de energia cinética de projeto

$$q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s} \times \text{m}} \right) = C_0 \cdot H_0^{(3/2)}$$

$$v_a (\text{m/s}) = \frac{q}{P + H_0}$$

$$h_a (\text{m}) = \frac{v_a^2}{2g}$$

Verificação	Motivo
$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$	Intervalo de validade dos ábacos das variáveis de geometria do vertedouro

- 1.4. Calcular a velocidade e a profundidade à jusante de projeto a partir de Bernoulli e da Equação da Continuidade

$$\begin{cases} P + H_0 = P_d + d + \frac{v_d^2}{2g} \\ q = d v_d \end{cases}$$

$$v_{d1} = \text{Re} \left(\frac{\sqrt[3]{2}(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)}{3 \sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q^2 + 4(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq}}} - \frac{\sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q^2 + 4(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq}}}{3 \sqrt[3]{2}} \right)$$

$$v_{d2} = \text{Re} \left(\frac{(1 - i\sqrt{3}) \sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q^2 + 4(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq}}}{6 \sqrt[3]{2}} - \frac{(1 + i\sqrt{3})(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)}{3 \times 2^{2/3} \sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q^2 + 4(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq}}} \right)$$

$$v_{d3} = \text{Re} \left(\frac{(1 + i\sqrt{3}) \sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q^2 + 4(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq}}}{6 \sqrt[3]{2}} - \frac{(1 - i\sqrt{3})(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)}{3 \times 2^{2/3} \sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q^2 + 4(-6gH_0 - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq}}} \right)$$

$$d_1 (m) = \frac{q}{v_{d1}}; \quad d_2 = \frac{q}{v_{d2}}; \quad d_3 = \frac{q}{v_{d3}}$$

$$d (m) = d_1 \vee d_2 \vee d_3 \mid d \in \mathbb{R} \wedge d \geq 0$$

$$h_d = \frac{v_d^2}{2g}$$

Observações:

- a) Apesar destas expressões possuírem parte complexa, isto não implica erro em seus resultados, uma vez que, após inúmeros testes, chegou-se à conclusão que as partes complexas de v_{d1} , v_{d2} e v_{d3} sempre terão resultado nulo (0i).

- b) Testes realizados indicam o seguinte padrão:

$$\begin{cases} d_1 < 0 \\ d_2 > 0 \text{ (no regime de escoamento supercrítico)} \\ d_3 > d_2 \text{ (escoamento completamente afogado sem ressalto)} \end{cases}$$

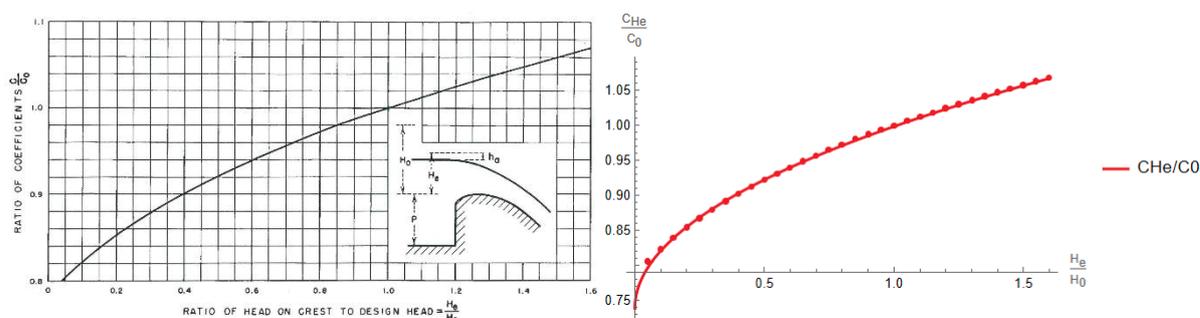
- c) Portanto, os resultados convergem para a adoção de d_2 .

1.5. Modificação do coeficiente de descarga considerando os seguintes efeitos:

1.5.1. Efeito da carga hidráulica de operação diferente da carga hidráulica utilizada para determinação da geometria

$$\frac{C_{He}}{C_0} = \begin{cases} \neq se \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ 0.260251 \sqrt{\frac{H_e}{H_0}} + 0.738247 se 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6 \\ \neq se \frac{H_e}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão C_{He}/C_0 referente à correção do coeficiente de descarga quanto ao efeito da carga hidráulica de operação diferente da carga hidráulica utilizada para determinação da geometria:



1.5.2. Efeito da inclinação do paramento de montante

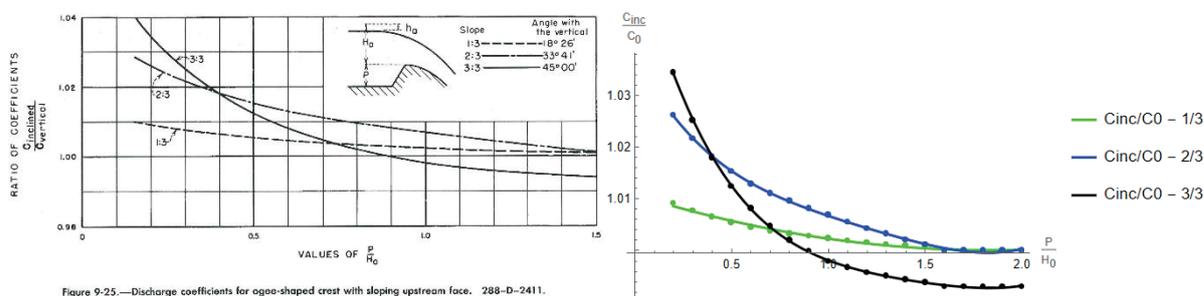
$$\frac{C_{inc}}{C_0} [\theta = \tan^{-1}(0)] = \begin{cases} \neq se \frac{P}{H_0} < 0 \\ 1 se \frac{P}{H_0} \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{C_{inc}}{C_0} \left[\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{3}\right) \right] = \begin{cases} \neq se \frac{P}{H_0} < 0.2 \\ 0.00317378 \left(\frac{P}{H_0}\right)^2 - 0.0116574 \left(\frac{P}{H_0}\right) + 1.01078 se 0.2 \leq \frac{P}{H_0} \leq 1.6 \\ 1 se \frac{P}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

$$\frac{C_{inc}}{C_0} \left[\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3}\right) \right] = \begin{cases} \neq se \frac{P}{H_0} < 0.2 \\ 0.00785967 \left(\frac{P}{H_0}\right)^4 - 0.037603 \left(\frac{P}{H_0}\right)^3 + 0.0701654 \left(\frac{P}{H_0}\right)^2 - 0.0715328 \left(\frac{P}{H_0}\right) + 1.03781 se 0.2 \leq \frac{P}{H_0} \leq 1.6 \\ 1 se \frac{P}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

$$\frac{C_{inc}}{C_0} \left[\theta = \tan^{-1}\left(\frac{3}{3}\right) \right] = \begin{cases} \neq se \frac{P}{H_0} < 0.2 \\ 0.0098838 \left(\frac{P}{H_0}\right)^4 - 0.0578905 \left(\frac{P}{H_0}\right)^3 + 0.132073 \left(\frac{P}{H_0}\right)^2 - 0.144149 \left(\frac{P}{H_0}\right) + 1.05819 se 0.2 \leq \frac{P}{H_0} \leq 1.6 \\ 0.993 se \frac{P}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

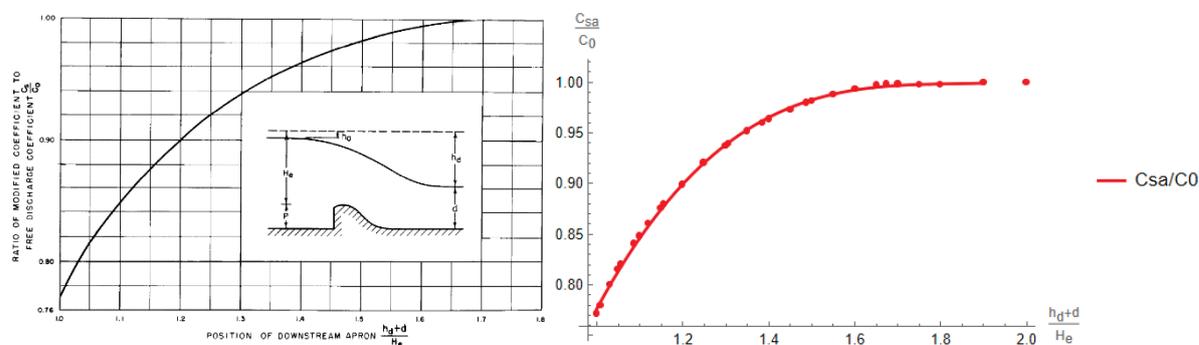
Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão $C_{inclinado}/C_0$, referente à correção do coeficiente de descarga quanto ao efeito da inclinação do paramento de montante:



1.5.3. Efeito da posição do piso à jusante

$$\frac{C_{sa}}{C_0} = \begin{cases} \text{se } \frac{h_d + d}{H_e} < 1 \\ 0.375258 \left(\frac{h_d + d}{H_e}\right)^3 - 2.06227 \left(\frac{h_d + d}{H_e}\right)^2 + 3.78468 \left(\frac{h_d + d}{H_e}\right) - 1.32088 \text{ se } 1 \leq \frac{h_d + d}{H_e} \leq 1.8 \\ 1 \text{ se } \frac{h_d + d}{H_e} > 1.8 \end{cases}$$

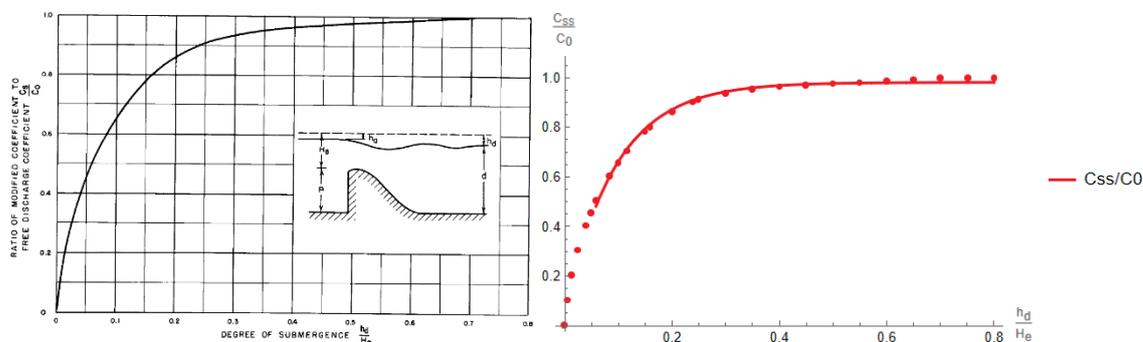
Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão C_{sa}/C_0 referente à correção do coeficiente de descarga quanto ao efeito da posição do piso de jusante em relação à carga hidráulica de operação:



1.5.4. Efeito da submersão à jusante

$$\frac{C_{ss}}{C_0} = \begin{cases} \text{se } \frac{h_d}{H_e} < 0 \\ 0.980996 - 0.928234 \times 8.48409^{-5 \left(\frac{h_d}{H_e}\right)} \text{ se } 0 \leq \frac{h_d}{H_e} \leq 0.8 \\ 1 \text{ se } \frac{h_d}{H_e} > 0.8 \end{cases}$$

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial ajustada da razão C_{ss}/C_0 referente à correção do coeficiente de descarga quanto ao efeito do grau de submersão à jusante:



1.5.5. Coeficiente de descarga resultante após todos os efeitos:

$$C_r = C_0 \times \frac{C_{He}}{C_0} \times \frac{C_{inc}}{C_0} \times \frac{C_{sa}}{C_0} \times \frac{C_{ss}}{C_0}$$

1.6. Recálculo de todas as variáveis após consideração dos efeitos que modificam o coeficiente de descarga

Vazão unitária resultante considerando o coeficiente de descarga modificado

$$q_r \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s} \times \text{m}} \right) = C_r \times H_e^{(3/2)}$$

Velocidade de aproximação resultante

$$v_{ar} (\text{m/s}) = \frac{q_r}{P + H_e}$$

Altura de energia referente a velocidade resultante

$$h_{ar} (\text{m}) = \frac{v_{ar}^2}{2g}$$

Velocidade e profundidade à jusante resultante a partir de Bernoulli e da Equação da Continuidade (nesta etapa aplica-se as observações relatadas no item 1.4)

$$\begin{cases} P + H_e = P_d + d_r + \frac{v_{dr}^2}{2g} \\ q_r = d_r \times v_{dr} \end{cases}$$

$$v_{d1} = \text{Re} \left(\frac{\sqrt[3]{2}(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)}{3\sqrt[3]{2916g^2q_r^2 + 4(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq_r}} - \frac{\sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q_r^2 + 4(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq_r}}}{3\sqrt[3]{2}} \right)$$

$$v_{d2} = \text{Re} \left(\frac{(1 - i\sqrt{3})\sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q_r^2 + 4(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq_r}}}{6\sqrt[3]{2}} - \frac{(1 + i\sqrt{3})(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)}{3 \times 2^{2/3} \sqrt[3]{\sqrt{2916g^2q_r^2 + 4(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq_r}}} \right)$$

$$v_{d3} = \operatorname{Re} \left(\frac{(1 + i\sqrt{3})^3 \sqrt{2916g^2q_r^2 + 4(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq_r}}{6^3\sqrt{2}} - \frac{(1 - i\sqrt{3})(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)}{3 \times 2^{2/3} \sqrt{2916g^2q_r^2 + 4(-6gH_e - 6gP + 6gP_d)^3 + 54gq_r}} \right)$$

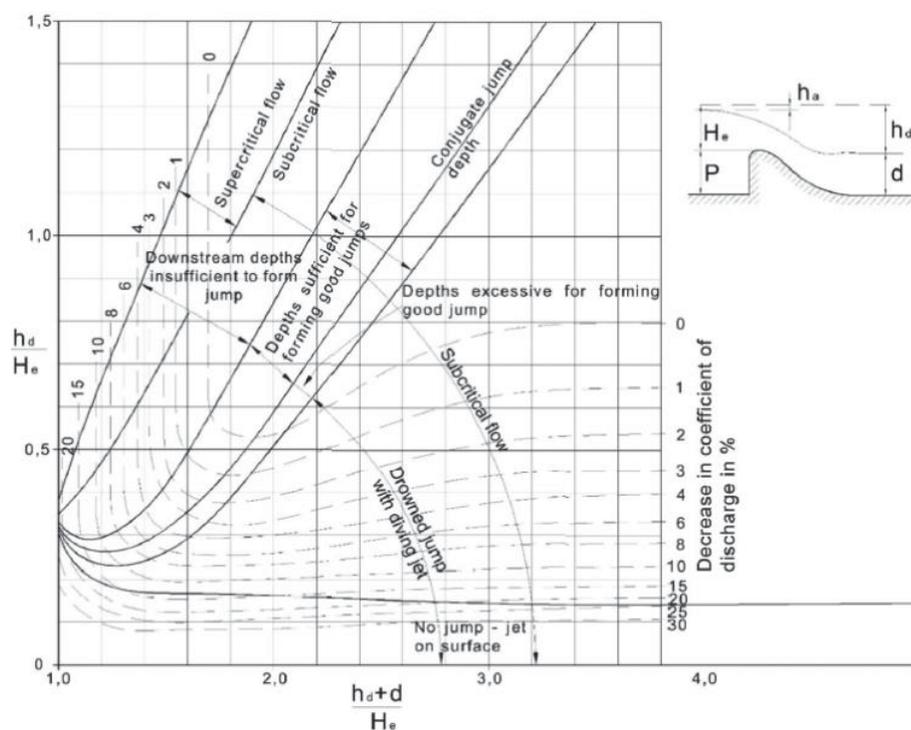
$$d_{1r}(m) = \frac{q_r}{v_{d1r}}; d_{2r} = \frac{q_r}{v_{d2r}}; d_{3r} = \frac{q_r}{v_{d3r}}$$

$$d_r(m) = d_{1r} \vee d_{2r} \vee d_{3r} \mid d_r \in \mathbb{R} \wedge d_r \geq 0$$

$$h_{dr} = \frac{v_{dr}^2}{2g}$$

1.7. Determinação do regime de escoamento

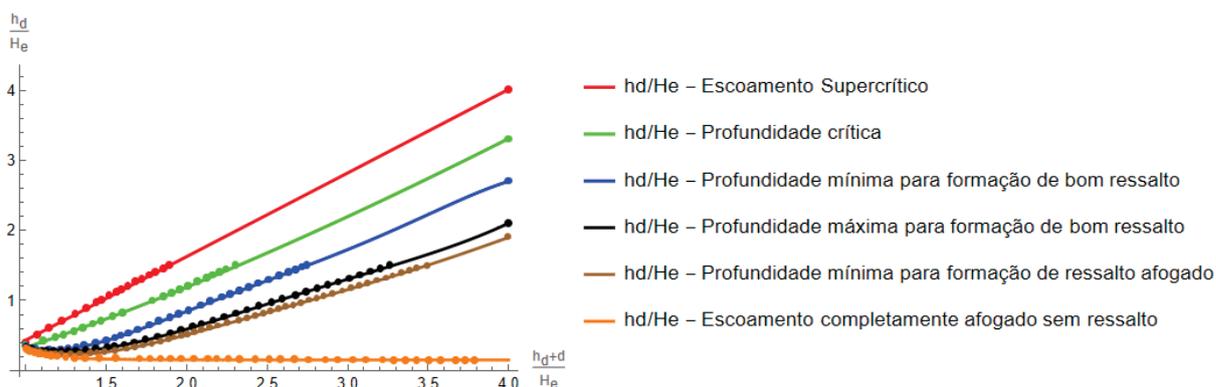
Com a determinação do ponto de submersão à jusante $S = \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}; \frac{h_{dr}}{H_e} \right)$, encontra-se o regime de escoamento localizando a posição de S no ábaco abaixo



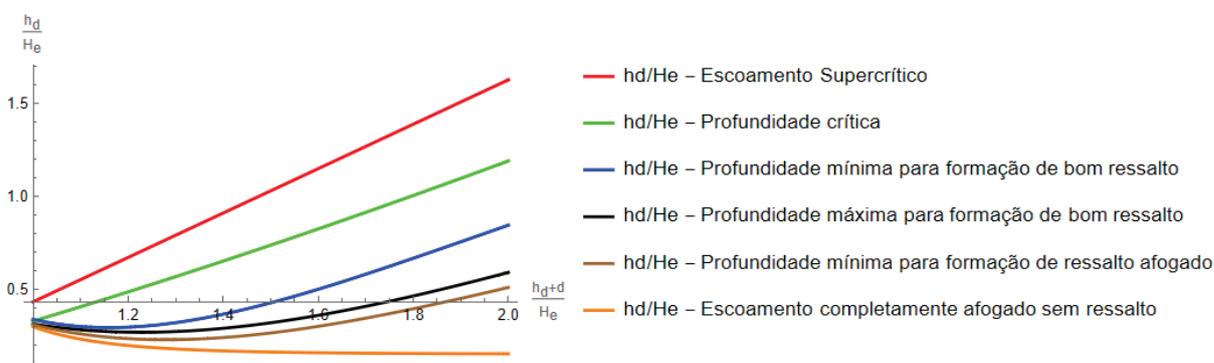
Regime de Escoamento	Ajuste polinomial ($R^2 \approx 1$)	Intervalo de validade
escoamento supercrítico	$\frac{h_{dr}}{H_e} = 1.19448 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right) - 0.763766$	$1 \leq \frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \leq 4$
profundidade crítica (escoamento crítico)	$\frac{h_{dr}}{H_e} = 0.58948 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right)^{1.3} - 0.262811$	
profundidade mínima para formação de bom ressalto	$\frac{h_{dr}}{H_e} = -0.0574097 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right)^5 + 0.766844 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right)^4 - 3.98367 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right)^3 + 10.0852 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right)^2 - 11.5861 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e} \right) + 5.11178$	

Regime de Escoamento	Ajuste polinomial ($R^2 \approx 1$)	Intervalo de validade
profundidade máxima para formação de bom ressalto	$\frac{h_{dr}}{H_e} = 0.0596514 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^4 - 0.65488 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^3$ $+ 2.65619 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^2 - 4.00223 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)$ $+ 2.25331$	
profundidade mínima para formação de ressalto afogado	$\frac{h_{dr}}{H_e} = -0.0193326 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^5 + 0.294392 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^4$ $- 1.74444 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^3 + 5.06884 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^2$ $- 6.61114 \left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right) + 3.31912$	
escoamento afogado sem ressalto	$\frac{h_{dr}}{H_e} = 0.149631 + \frac{0.147878}{\left(\frac{h_{dr} + d_r}{H_e}\right)^{6.37121}}$	

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajustes polinomiais das curvas de escoamento supercrítico, profundidade crítica, profundidade mínima para formação de bom ressalto, profundidade máxima para formação de bom ressalto, profundidade mínima para formação de ressalto afogado e escoamento afogado sem ressalto:

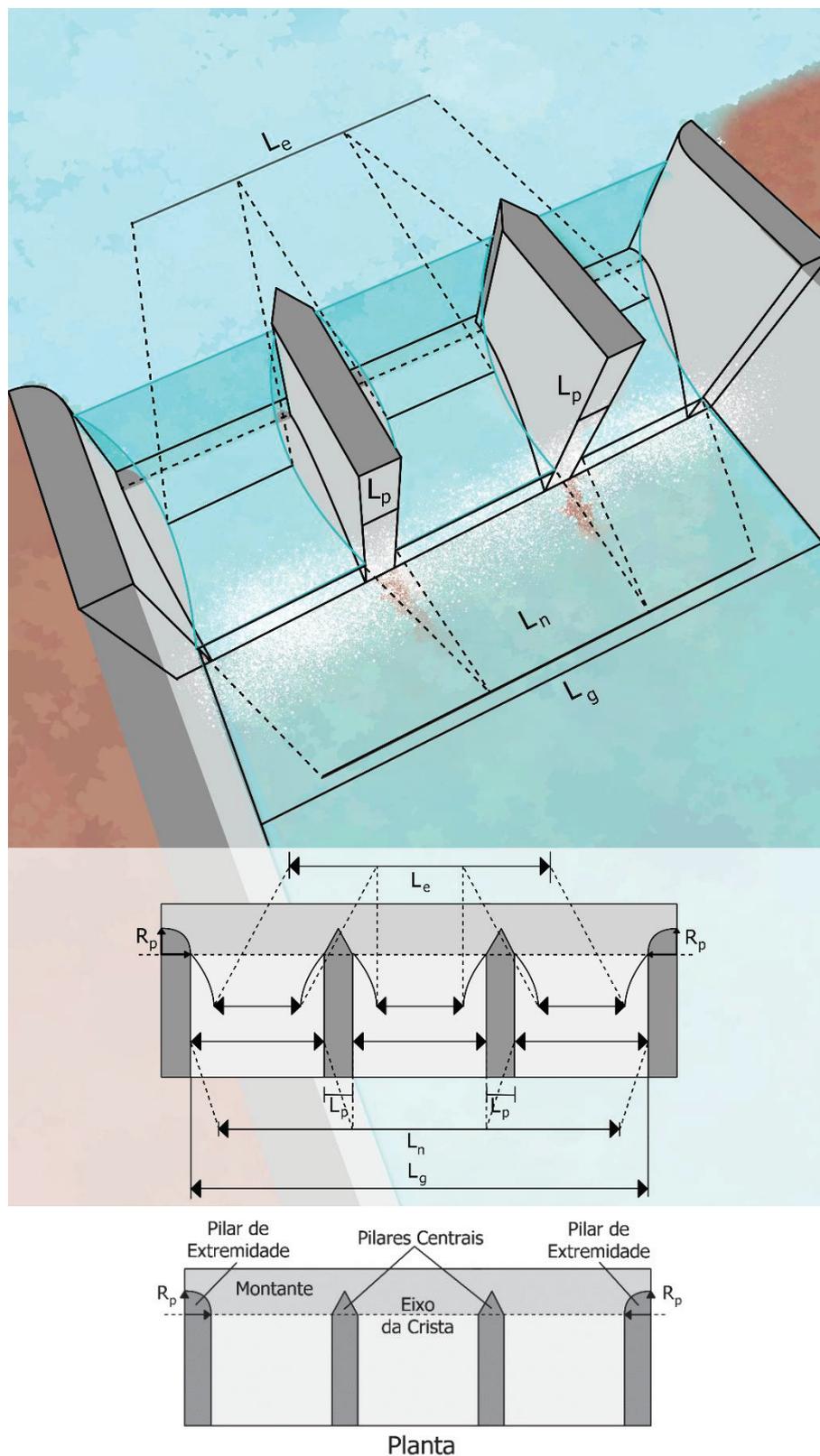


Detalhe do gráfico para $\frac{h_d+d}{H_e} \leq 2$:



1.8. Cálculo dos comprimentos efetivo, líquido e bruto do vertedouro

Imagem ilustrativa dos comprimentos efetivo (L_e), líquido (L_n) e bruto do vertedouro ogiva (L_g):



Frame retirado da animação 3D fictícia elaborada para demonstração dos comprimentos efetivo (L_e), líquido (L_n) e bruto (L_g) do vertedouro ogiva:



1.8.1. Cálculo do coeficiente de contração devido aos pilares centrais

$$K_p[p_c = \text{"Type 1"}] = \begin{cases} \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ -0.00163333 \left(\frac{H_e}{H_0}\right)^2 - 0.0360042 \left(\frac{H_e}{H_0}\right) + 0.0527757 \text{ se } 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6 \\ \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

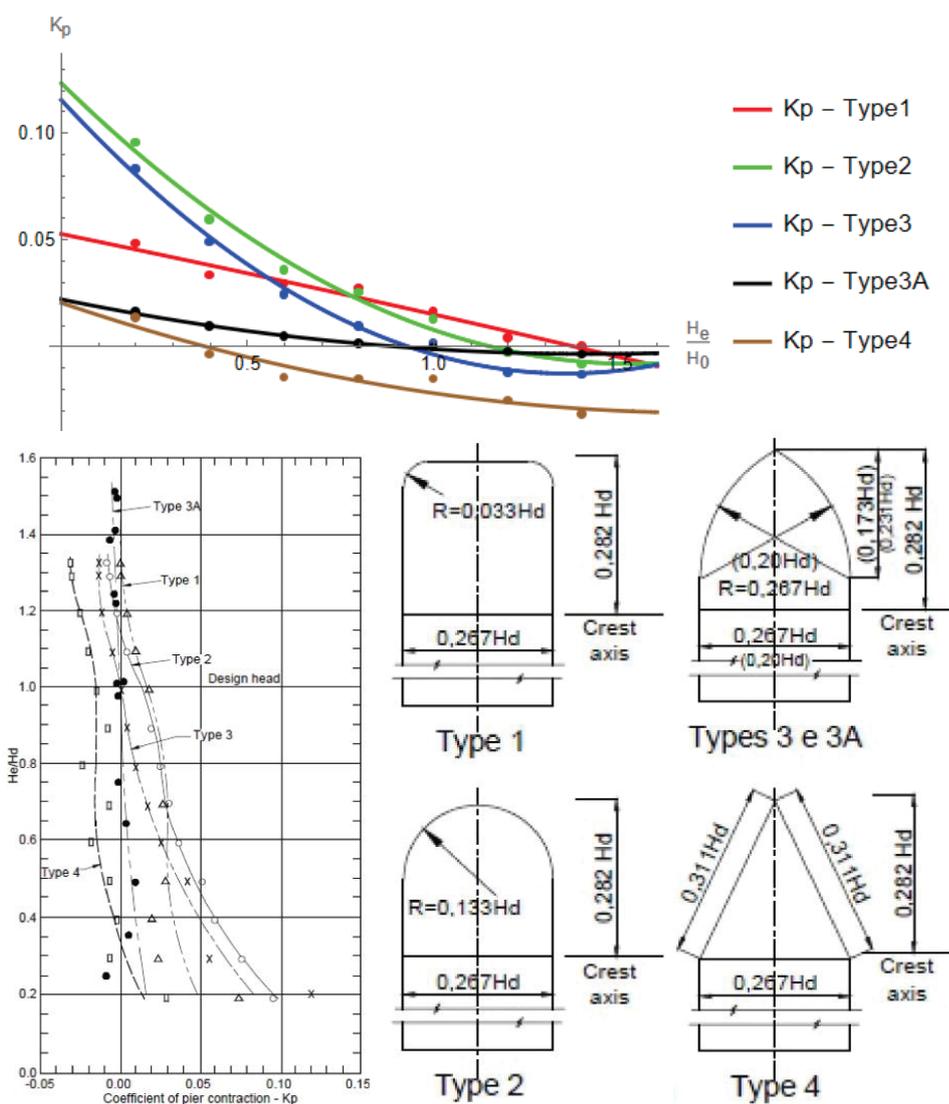
$$K_p[p_c = \text{"Type 2"}] = \begin{cases} \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ 0.0559012 \left(\frac{H_e}{H_0}\right)^2 - 0.171422 \left(\frac{H_e}{H_0}\right) + 0.12339 \text{ se } 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6 \\ \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

$$K_p[p_c = \text{"Type 3"}] = \begin{cases} \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ 0.0694988 \left(\frac{H_e}{H_0}\right)^2 - 0.188676 \left(\frac{H_e}{H_0}\right) + 0.115508 \text{ se } 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6 \\ \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

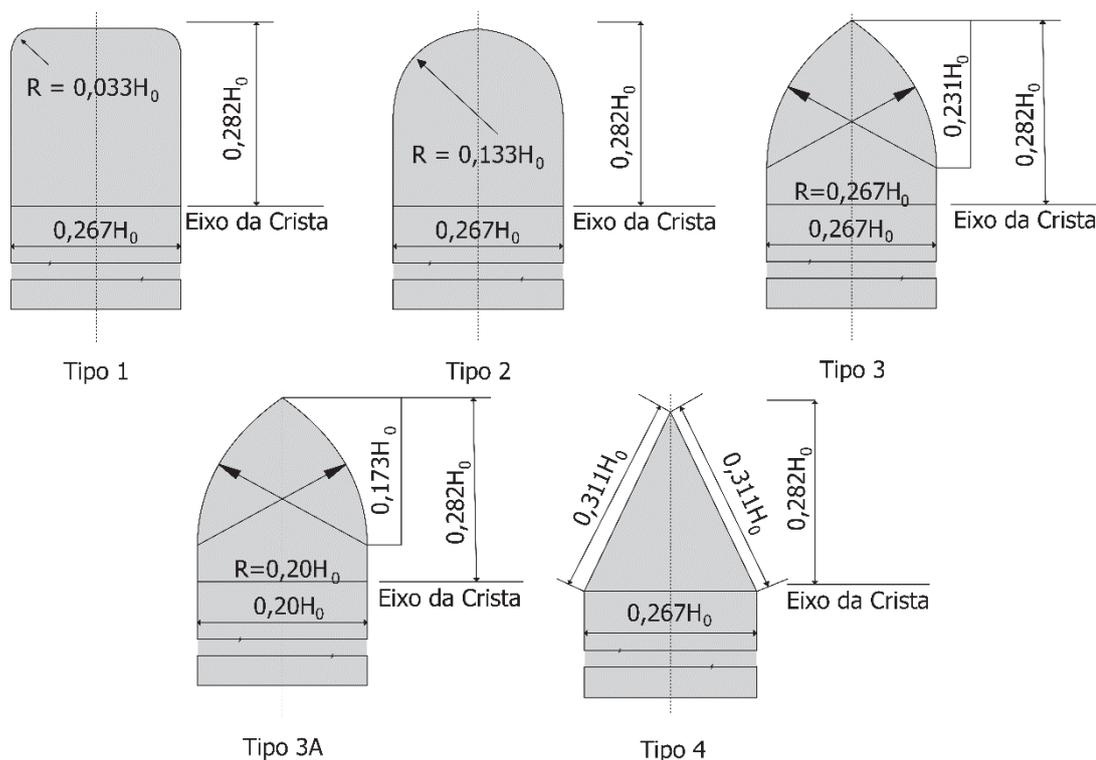
$$K_p[p_c = \text{"Type 3A"}] = \begin{cases} \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ 0.0126324 \left(\frac{H_e}{H_0}\right)^2 - 0.0359557 \left(\frac{H_e}{H_0}\right) + 0.0221834 \text{ se } 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6 \\ \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

$$K_p[p_c = \text{"Type 4"}] = \begin{cases} \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ 0.0171973 \left(\frac{H_e}{H_0}\right)^2 - 0.0594991 \left(\frac{H_e}{H_0}\right) + 0.0205391 \text{ se } 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1.6 \\ \nexists \text{ se } \frac{H_e}{H_0} > 1.6 \end{cases}$$

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da variável K_p para diferentes tipos de pilares centrais:



Imagens remasterizadas dos perfis dos pilares centrais:



1.8.2. Largura de cada pilar central (paralela ao eixo da crista)

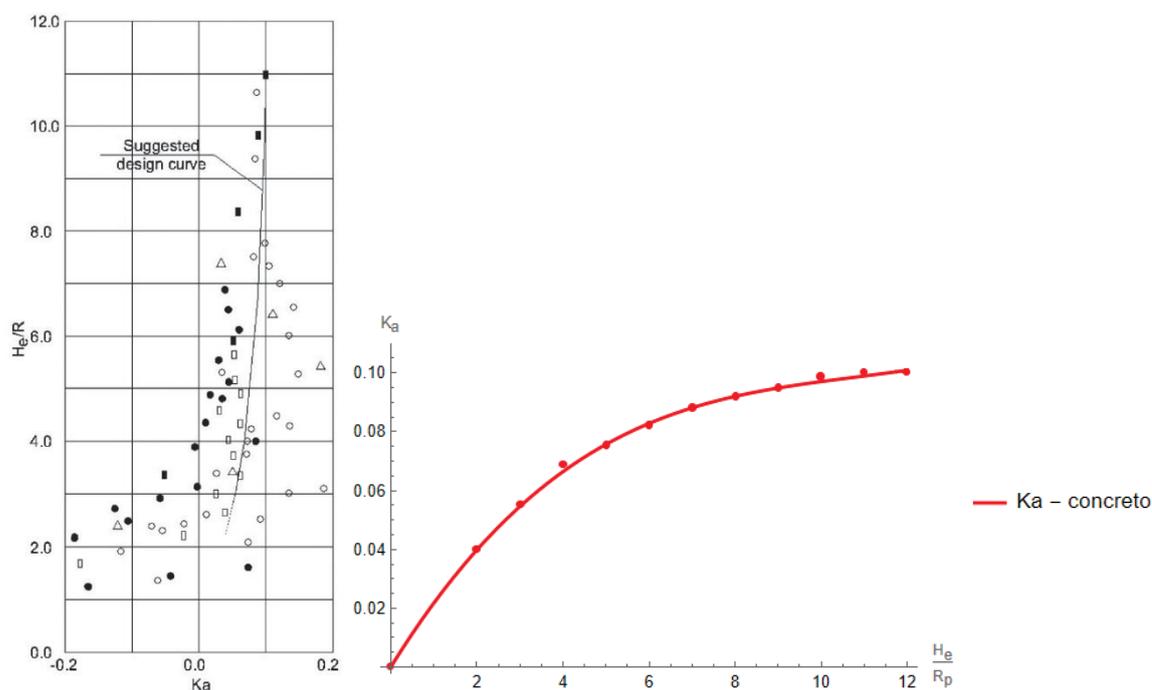
$$L_p = \begin{cases} 0,267 H_0 & \text{se } p_c = \text{"Type 1"} \vee \text{"Type 2"} \vee \text{"Type 3"} \vee \text{"Type 4"} \\ 0,2 H_0 & \text{se } p_c = \text{"Type 3A"} \end{cases}$$

1.8.3. Coeficiente de contração dos pilares das extremidades

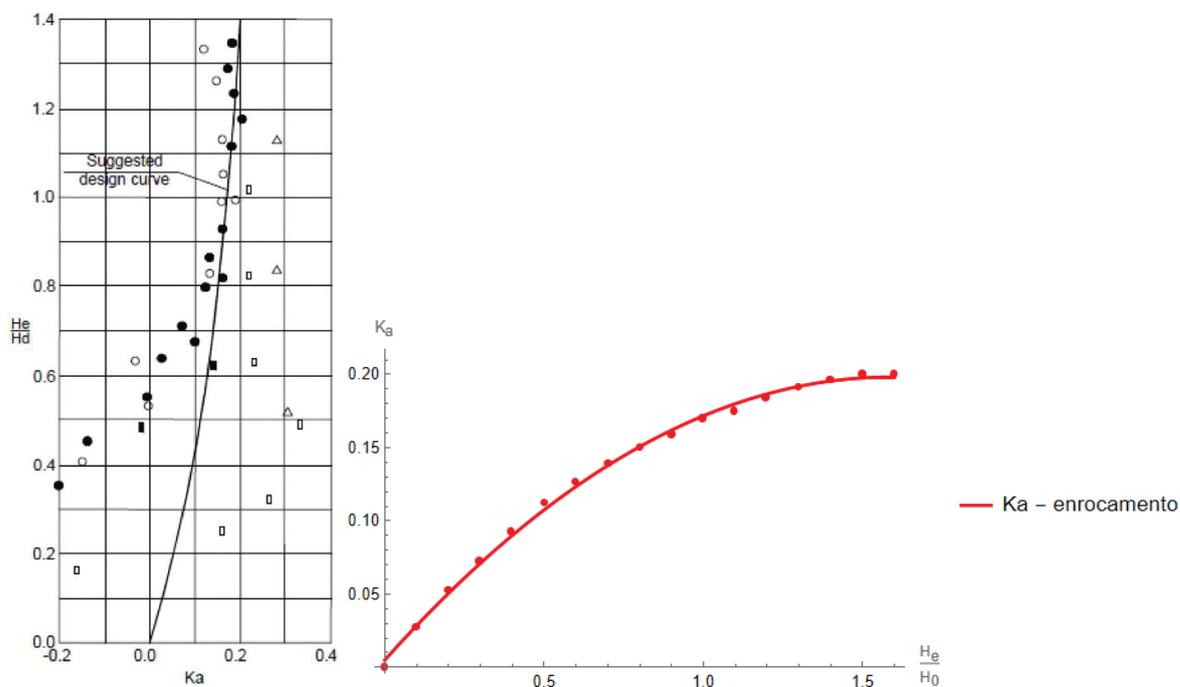
$$K_a[p_a = \text{"Concreto"}] = \begin{cases} \text{se } \frac{H_e}{R_p} < 0 \\ 0,0000628793 \left(\frac{H_e}{R_p}\right)^3 - 0,00202995 \left(\frac{H_e}{R_p}\right)^2 + 0,0237099 \left(\frac{H_e}{R_p}\right) & \text{se } 0 \leq \frac{H_e}{R_p} \leq 12 \\ 0,1 & \text{se } \frac{H_e}{R_p} > 12 \end{cases}$$

$$K_a[p_a = \text{"Enrocamento"}] = \begin{cases} \text{se } \frac{H_e}{H_0} < 0 \\ -0,0766161 \left(\frac{H_e}{H_0}\right)^2 + 0,24331 \left(\frac{H_e}{H_0}\right) + 0,0049418 & \text{se } 0 \leq \frac{H_e}{H_0} \leq 1,6 \\ 0,2 & \text{se } \frac{H_e}{H_0} > 1,6 \end{cases}$$

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da variável K_a para extremidades formadas por pilares de concreto:



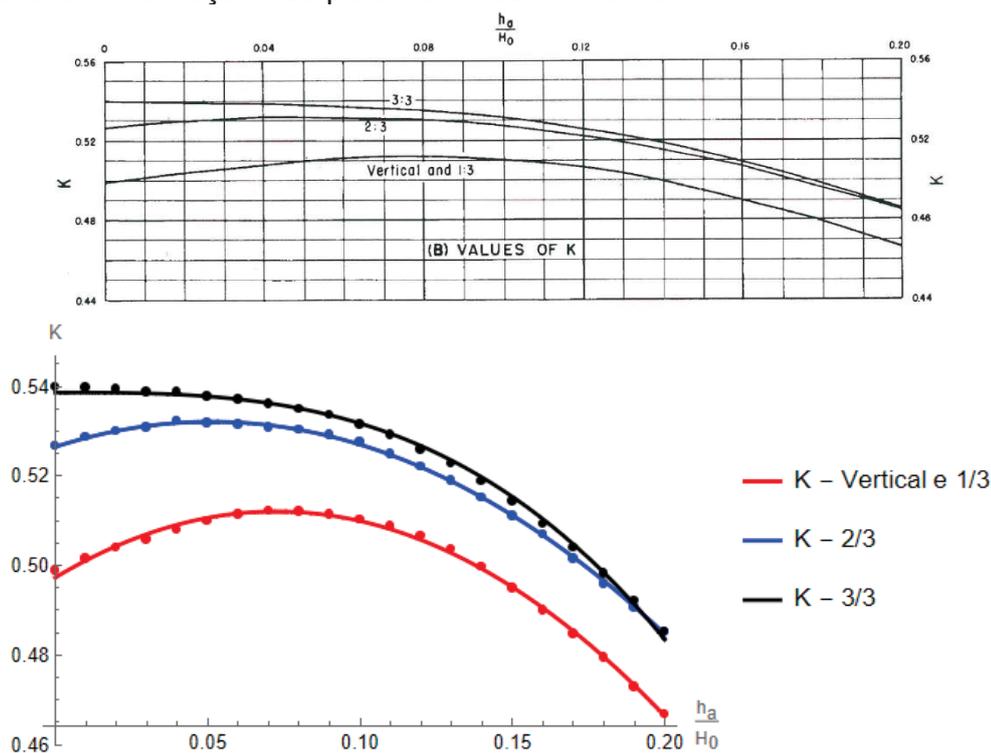
Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da variável K_a para extremidades formadas por enrocamento:



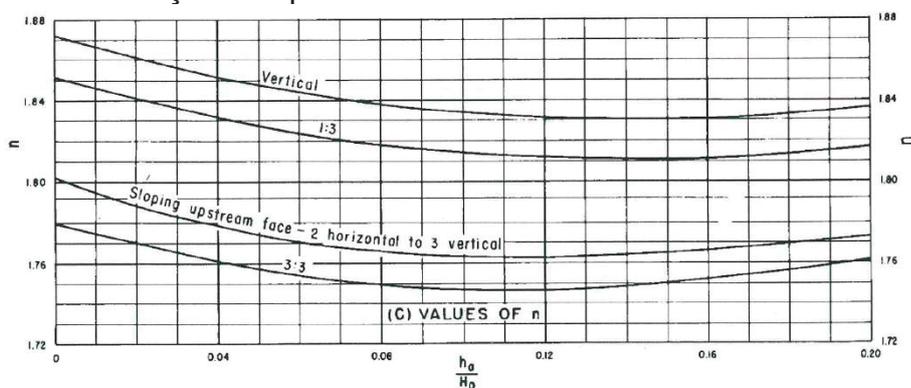
	Inclinação do paramento à montante (θ)	Ajuste polinomial ($R^2 \approx 1$)	Intervalo de validade
K	$\tan^{-1}(0)$ v $\tan^{-1}(1/3)$	$K = -2.80768 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 0.406955 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.49731$	$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$
	$\tan^{-1}(2/3)$	$K = -2.14082 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 0.219233 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.526474$	
	$\tan^{-1}(3/3)$	$K = 0.538609 - 6.89182 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3$	
n	$\tan^{-1}(0)$	$n = 2.06748 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.58994 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 1.8721$	$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$
	$\tan^{-1}(1/3)$	$n = 2.0431 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.582756 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 1.85182$	
	$\tan^{-1}(2/3)$	$n = -7.56432 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 + 4.71523 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.78956 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 1.80226$	
	$\tan^{-1}(3/3)$	$n = 2.42274 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.57065 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 1.77957$	
$\frac{R_1}{H_0}$	$\tan^{-1}(0)$	$\frac{R_1}{H_0} = -10.5766 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 + 1.05221 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.584171 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.531308$	$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$
	$\tan^{-1}(1/3)$	$\frac{R_1}{H_0} = -9.49692 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 1.20912 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.523108$	
	$\tan^{-1}(2/3)$	$\frac{R_1}{H_0} = -10.4284 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 1.44945 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.446851$	
	$\tan^{-1}(3/3)$	$\frac{R_1}{H_0} = -2.67047 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 0.396789 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.449781$	
$\frac{R_2}{H_0}$	$\tan^{-1}(0)$	$\frac{R_2}{H_0} = 0.231426 - 0.0902978 \sqrt{\frac{h_a}{H_0}}$	$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$
	$\tan^{-1}(1/3)$	$\frac{R_2}{H_0} = 12.5386 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 - 5.96378 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 0.949334 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.144683$	
	$\tan^{-1}(2/3)$	$\frac{R_2}{H_0} = 2.81334 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 0.83441 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.217245$	
	$\tan^{-1}(3/3)$	$\frac{R_2}{H_0} = -2.67047 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 + 0.396789 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.449781$	
$\frac{x_c}{H_0}$	$\tan^{-1}(0)$	$\frac{x_c}{H_0} = -2.87809 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 + 0.156699 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.514245 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.283648$	$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$
	$\tan^{-1}(1/3)$	$\frac{x_c}{H_0} = -1.63973 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.0849994 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.245033$	
	$\tan^{-1}(2/3)$	$\frac{x_c}{H_0} = -6.34929 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 + 0.134365 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.0391995 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.214029$	
	$\tan^{-1}(3/3)$	$\frac{x_c}{H_0} = 0.198289 - 4.67 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3$	
$\frac{y_c}{H_0}$	$\tan^{-1}(0)$	$\frac{y_c}{H_0} = 3.17749 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 - 0.500511 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.416699 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.126785$	$0 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0.2$
	$\tan^{-1}(1/3)$	$\frac{y_c}{H_0} = -1.54156 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 - 0.189194 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.0920372$	

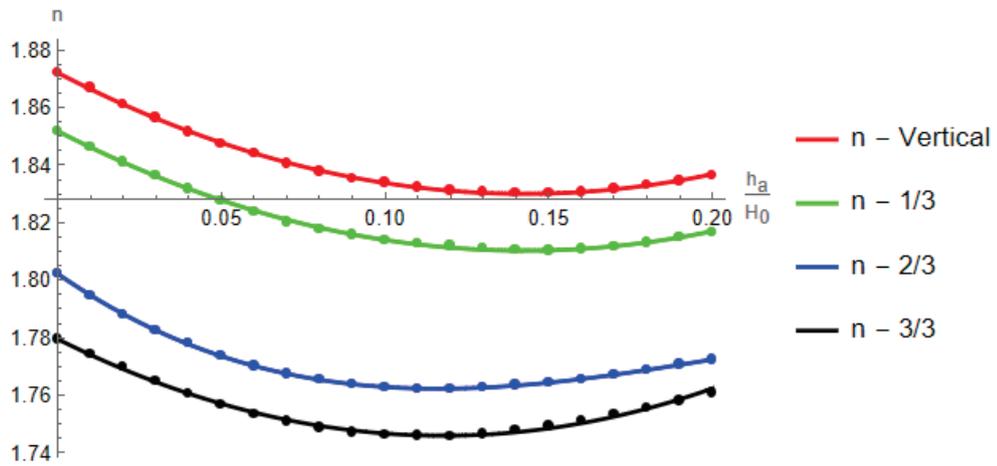
Inclinação do paramento à montante (θ)	Ajuste polinomial ($R^2 \approx 1$)	Intervalo de validade
$\tan^{-1}(2/3)$	$\frac{y_c}{H_0} = -1.64193 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^3 + 0.25648 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2 - 0.147592 \left(\frac{h_a}{H_0}\right) + 0.0687186$	
$\tan^{-1}(3/3)$	$\frac{y_c}{H_0} = 0.0446116 - 0.392668 \left(\frac{h_a}{H_0}\right)^2$	

Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da variável K para diferentes inclinações do paramento de montante:

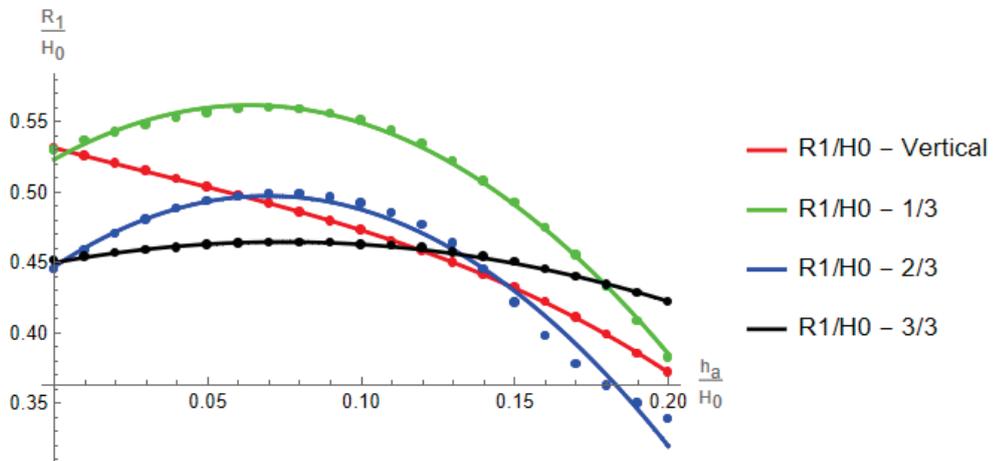
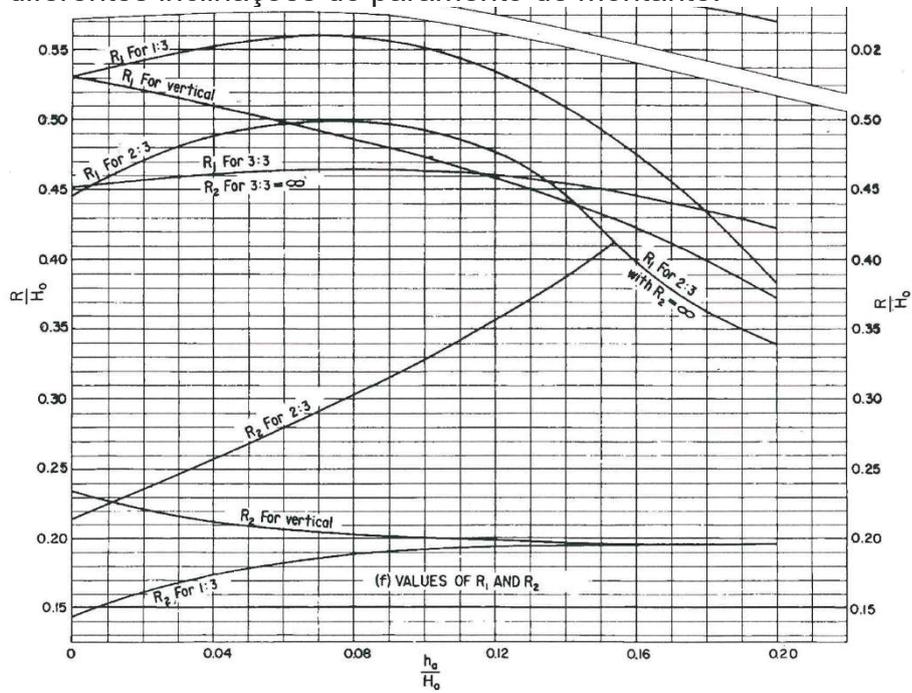


Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da variável n para diferentes inclinações do paramento de montante:

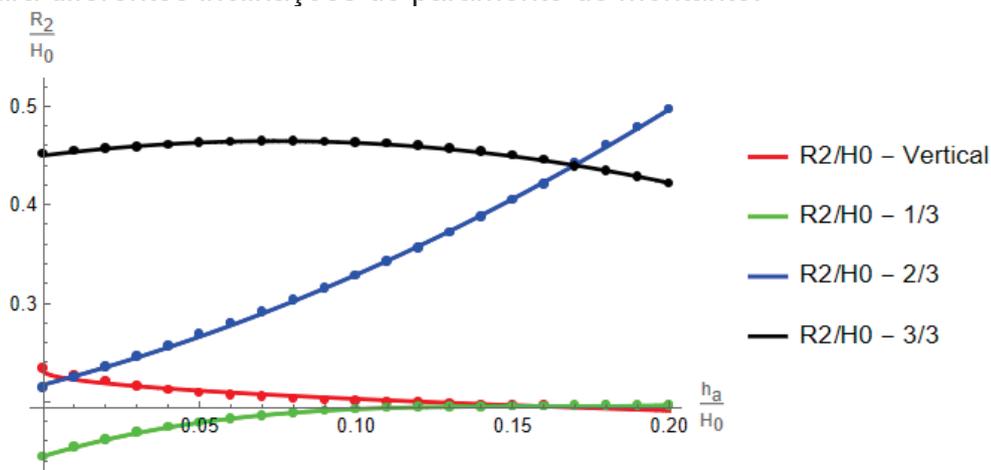




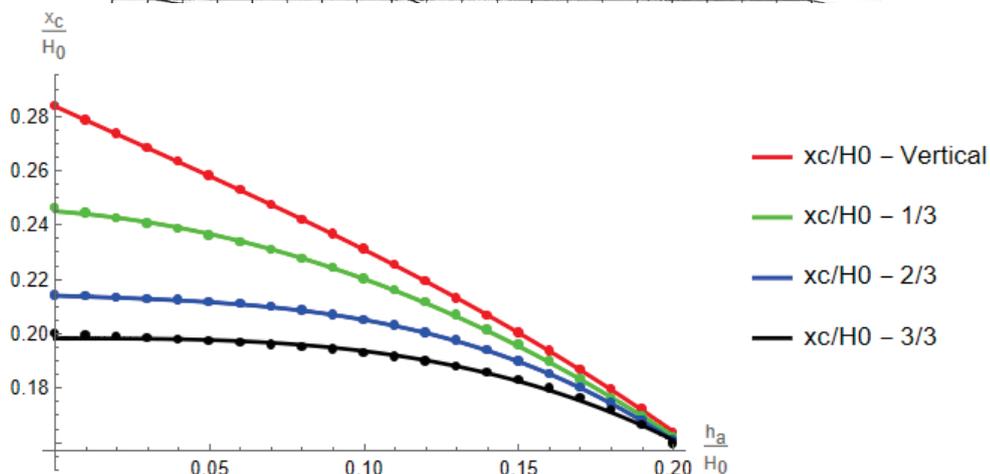
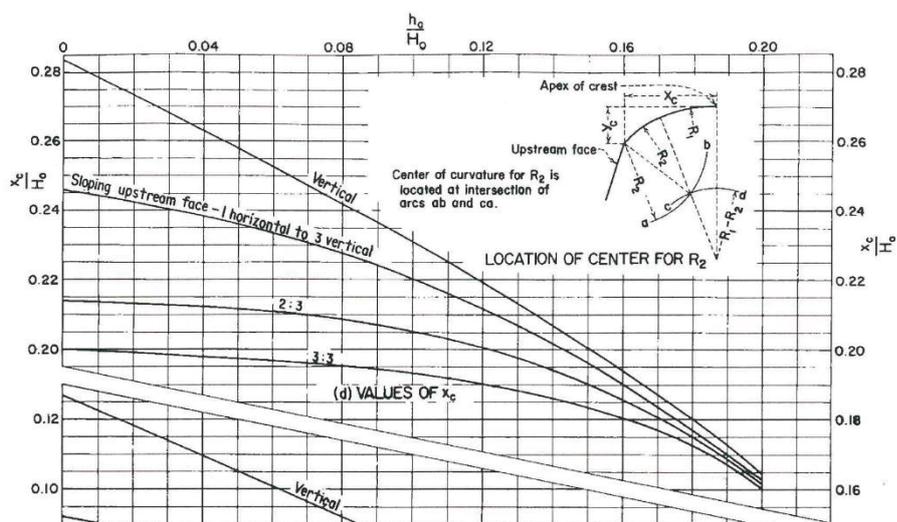
Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão R_1/H_0 para diferentes inclinações do paramento de montante:



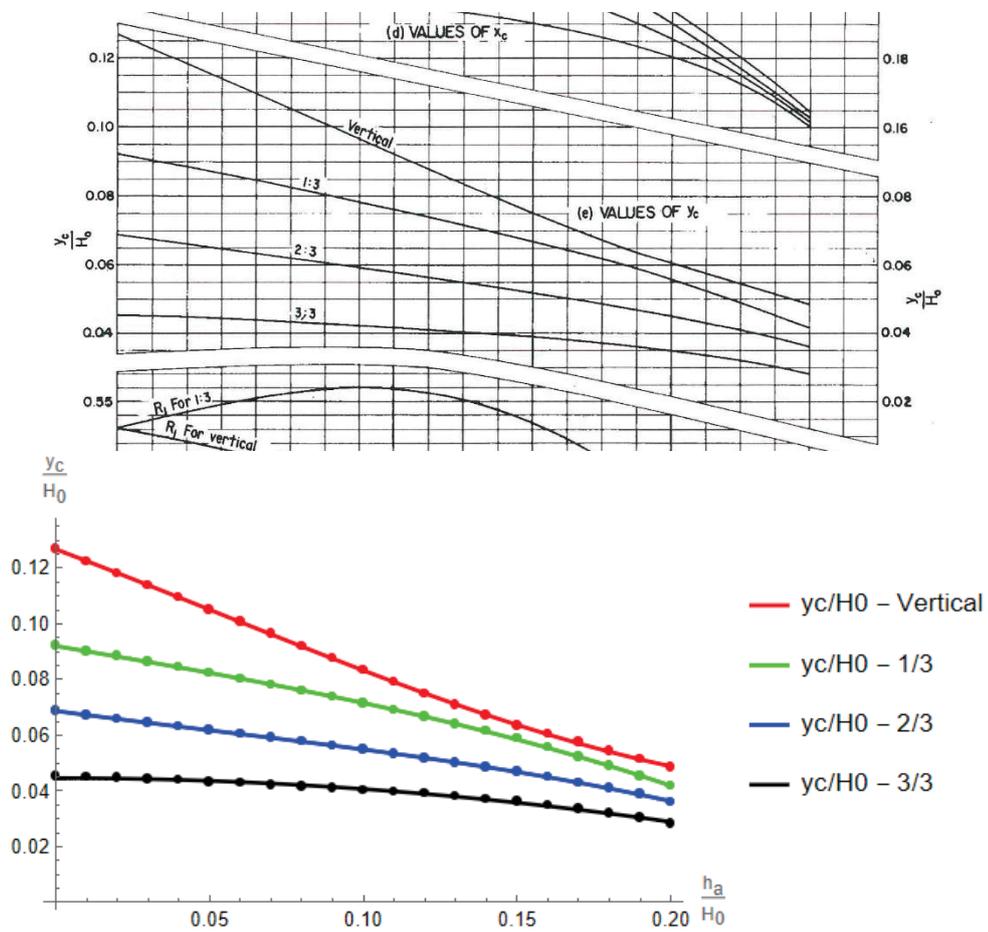
Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão R_2/H_0 para diferentes inclinações do paramento de montante:



Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão x_c/H_0 para diferentes inclinações do paramento de montante:



Comparação gráfica entre pontos retirados do ábaco e ajuste polinomial da razão y_c/H_0 para diferentes inclinações do paramento de montante:



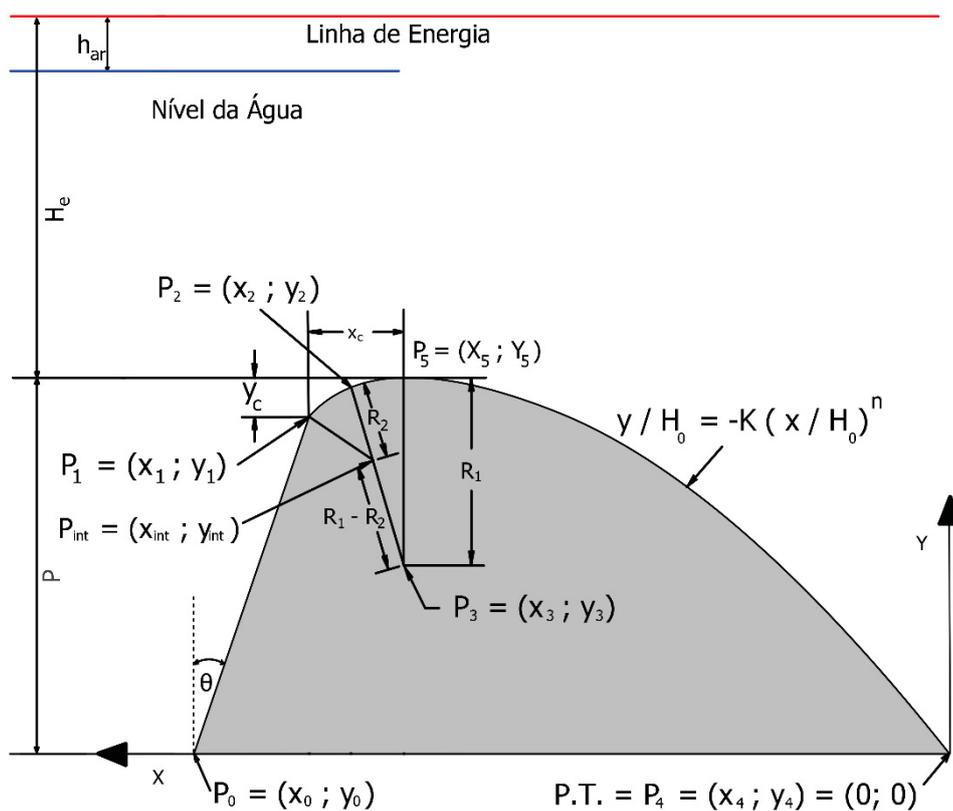
1.10. Determinação das coordenadas dos pontos de interesse do vertedouro considerando a origem do sistema no topo da crista do vertedouro (P_5)

Coordenadas	
P_0	$x_0 = -\tan(\theta) (P - y_c) - x_c$ $y_0 = -P$
P_1	$x_1 = -x_c$ $y_1 = -y_c$
P_3	$x_3 = 0$ $y_3 = -R_1$
P_4	$x_4 = H_0 \left(\frac{P}{H_0 K} \right)^{1/n}$ $y_4 = -P$
P_5	$x_5 = 0$ $y_5 = 0$
P_{int}	$x_{int} = x_3$ se $R_1 = R_2$ $x_{int} > \begin{cases} \frac{1}{2(4R_1^2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)} \\ (-\sqrt{(x_c^2(8R_1^2 - 8R_1 R_2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)^2 - 4(4R_1^2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)(-8R_1^2 R_2 y_c + 4R_1^2 x_c^2 + 4R_1^2 y_c^2 + 8R_1 R_2^2 y_c - 4R_1 R_2 x_c^2 + 4R_1 R_2 y_c^2 - 4R_1 x_c^2 y_c - 4R_1 y_c^3 - 4R_2^2 y_c^2 + x_c^4 + 2x_c^2 y_c^2 + y_c^4)}) - x_c(8R_1^2 - 8R_1 R_2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)} \\ \frac{1}{2(4R_1^2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)} \\ (\sqrt{(x_c^2(8R_1^2 - 8R_1 R_2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)^2 - 4(4R_1^2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)(-8R_1^2 R_2 y_c + 4R_1^2 x_c^2 + 4R_1^2 y_c^2 + 8R_1 R_2^2 y_c - 4R_1 R_2 x_c^2 + 4R_1 R_2 y_c^2 - 4R_1 x_c^2 y_c - 4R_1 y_c^3 - 4R_2^2 y_c^2 + x_c^4 + 2x_c^2 y_c^2 + y_c^4)}) - x_c(8R_1^2 - 8R_1 R_2 - 8R_1 y_c + 4x_c^2 + 4y_c^2)} \end{cases}$ se $R_1 \neq R_2$
	$y_{int} = \begin{cases} y_3 \text{ se } R_1 = R_2 \\ \sqrt{(R_1 - R_2)^2 - x_{int}^2} - R_1 \text{ se } R_1 \neq R_2 \end{cases}$
P_2	$x_2 = \begin{cases} x_1 \text{ se } R_1 = R_2 \\ \frac{R_1 x_{int}}{\sqrt{R_1^2 + 2R_1 y_{int} + x_{int}^2 + y_{int}^2}} \text{ se } R_1 \neq R_2 \end{cases}$ $y_2 = \begin{cases} y_1 \text{ se } R_1 = R_2 \\ \sqrt{R_1^2 - x_2^2} - R_1 \text{ se } R_1 \neq R_2 \end{cases}$

2. Análise de Estabilidade Global

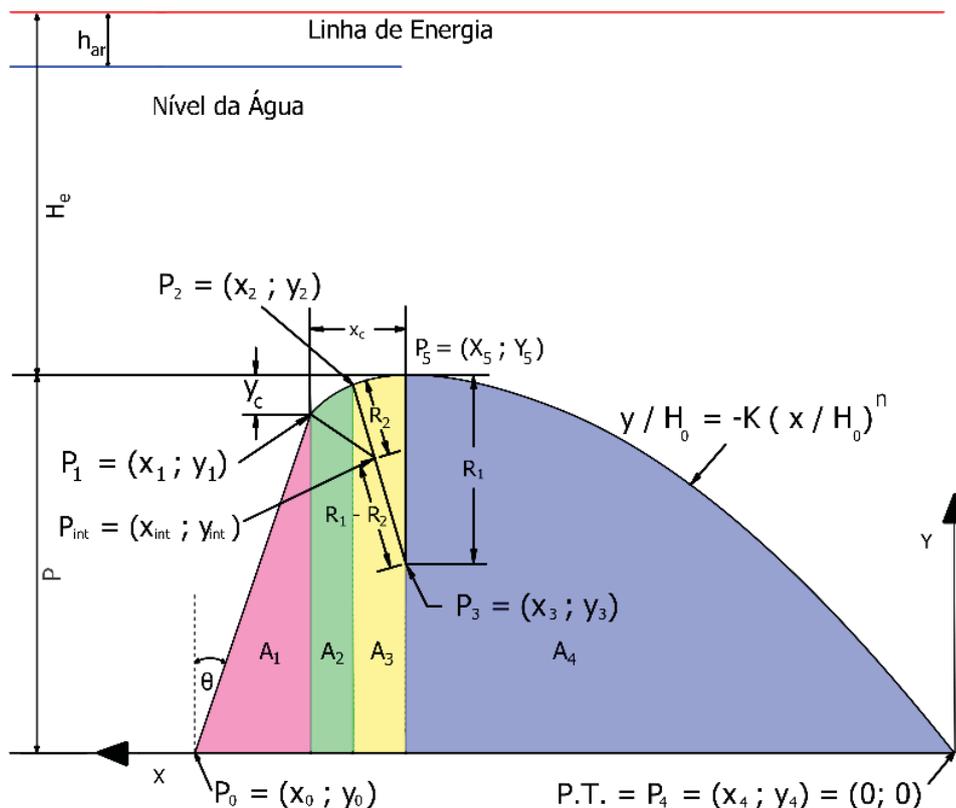
Conforme mencionado na entrada de dados, as fórmulas de análise de estabilidade global consideram $P_d = 0$. $P_d \neq 0$ poderá ser base de estudos futuros.

2.1. Alteração das coordenadas dos pontos de interesse do vertedouro considerando a origem do sistema no ponto de tombamento (P_4)



Ponto	Coordenadas
P_0	$x_0 = x_0 + x_4$
	$y_0 = 0$
P_1	$x_1 = x_1 + x_4$
	$y_1 = P - y_1 $
P_2	$x_2 = x_2 + x_4$
	$y_2 = P - y_2 $
P_3	$x_3 = x_4$
	$y_3 = P - R_1$
P_5	$x_5 = x_4$
	$y_5 = P$
P_{int}	$x_{int} = x_{int} + x_4$
	$y_{int} = P - y_{int} $
P_4	$x_4 = 0$
	$y_4 = 0$

2.2. Cálculo do peso e do centro de massa do vertedouro



Área (m ²)	Equações	Descrição
A_{1c}	$A_{1c} = \frac{1}{2} y_1 (x_0 - x_1)$ $\bar{x}_{gA_{1c}} = \frac{x_0 - x_1}{3} + x_1$	Área de perfil de A_1 (triângulo $\triangle P_0 P_1 x_1$)
A_{2c}	$\alpha = \pi - 2 \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{2 R_2} \right)$	$\overline{P_{int} P_1} \angle \overline{P_{int} P_2}$
	$\beta = \pi - \alpha - \cos^{-1} \left(\frac{x_1 - x_{int}}{R_2} \right)$	$y = y_{int} \angle \overline{P_{int} P_2}$
	$A_{2c1} = \frac{\alpha R_2^2}{2}$	Área da seção circular $\triangle \overline{P_{int} P_1 P_2}$
	$\bar{x}_{gA_{2c1}} = \begin{cases} 0 & \text{se } A_{2c1} = 0 \\ x_{int} + \left \frac{2R_2 \sin(\alpha) \cos(\beta)}{3\alpha} - \frac{2R_2(1 - \cos(\alpha)) \sin(\beta)}{3\alpha} \right & \text{se } A_{2c1} \neq 0 \end{cases}$	
	$A_{2c2} = \frac{1}{2} (x_1 - x_{int})(y_1 + y_{int})$	Área de perfil do trapézio entre x_1 e x_{int}
	$\bar{x}_{gA_{2c2}} = \frac{x_1(2y_1 + y_{int}) + x_{int}(y_1 + 2y_{int})}{3(y_1 + y_{int})}$	
	$A_{2c3} = \frac{1}{2} (x_2 - x_{int})(y_2 + y_{int})$	Área de perfil do trapézio entre x_2 e x_{int}
$\bar{x}_{gA_{2c3}} = \frac{x_2(2y_2 + y_{int}) + x_{int}(y_2 + 2y_{int})}{3(y_2 + y_{int})}$		
	$A_{2c} = A_{2c1} + A_{2c2} - A_{2c3}$	Área de perfil de A_2
	$\bar{x}_{gA_{2c}} = \begin{cases} 0 & \text{se } A_{2c} = 0 \\ \frac{A_{2c1} \bar{x}_{gA_{2c1}} + A_{2c2} \bar{x}_{gA_{2c2}} - A_{2c3} \bar{x}_{gA_{2c3}}}{A_{2c1} + A_{2c2} - A_{2c3}} \end{cases}$	

Área (m ²)	Equações	Descrição
A_{3c}	$\omega = \beta - \frac{\pi}{2}$	$y = y_{int} \angle \overline{P_{int}P_1}$
	$A_{3c1} = \frac{R_1^2 \omega}{2}$	Área da seção circular $\overline{P_2P_3P_5}$
	$\overline{x_{gA3c1}} = \left \frac{2R_1(1 - \cos(\omega))}{3\omega} \right + x_3$	
	$A_{3c2} = \frac{1}{2}(x_2 - x_3)(y_2 + y_3)$	Área de perfil do trapézio entre x_2 e x_3
	$\overline{x_{gA3c2}} = \frac{x_2(2y_2 + y_3) + x_3(y_2 + 2y_3)}{3(y_2 + y_3)}$	
	$A_{3c} = A_{3c1} + A_{3c2}$	Área de perfil de A_3
$\overline{x_{gA3c}} = \frac{A_{3c1}\overline{x_{gA3c1}} + A_{3c2}\overline{x_{gA3c2}}}{A_{3c1} + A_{3c2}}$		
A_{4c}	$A_{4c} = \int_0^{x_5} \left[y_5 - H_0 K \left(\frac{x_5 - x}{H_0} \right)^n \right] dx = x_5 y_5 - \frac{K H_0^{1-n} x_5^{n+1}}{n+1}$	Área de perfil entre x_3 e x_4
	$M_{yA4c} = \int_0^{x_5} \left[y_5 x - H_0 K x \left(\frac{x_5 - x}{H_0} \right)^n \right] dx$	
	$\overline{x_{gA4c}} = \frac{M_{yA4c}}{A_{4c}} = \frac{1}{2} x_5 \left(1 - \frac{H_0 K n x_5^n}{(n+2)(H_0 K x_5^n - (n+1)y_5 H_0^n)} \right)$	
A_c	$A_c = A_{1c} + A_{2c} + A_{3c} + A_{4c}$	Área total do perfil do vertedouro
	$\overline{x_{gAc}} = \frac{A_{1c}\overline{x_{gA1c}} + A_{2c}\overline{x_{gA2c}} + A_{3c}\overline{x_{gA3c}} + A_{4c}\overline{x_{gA4c}}}{A_{1c} + A_{2c} + A_{3c} + A_{4c}}$	

O peso de concreto por unidade de comprimento do vertedouro

$$Peso_{concreto} = \gamma_c A_c$$

2.3. Cálculo dos níveis de água à montante e à jusante

	Descrição	Equação
M	Nível de água à montante	$M = P + H_e - h_{ar}$
M_c	Nível de água à montante acima da crista	$M_c = H_e - h_{ar}$
J	Nível de água à jusante	$J = d$
J_c	Nível de água à jusante acima da crista	$J_c = \begin{cases} 0 & \text{se } P_d + J < P \\ P_d + J - P & \text{se } P_d + J \geq P \end{cases}$

2.4. Cálculo das forças de pressão

2.4.1. Pesos de água à montante e à jusante

Área (m ²)	Equações	Descrição
A_{am}	$A_{1am} = M(x_0 - x_1) - A_{1c}$	Área de água à montante sobre A_{1c}
	$\overline{x_{gA1am}} = \begin{cases} 0 & \text{se } A_{1am} = 0 \\ \frac{M(x_0 - x_1) \left(\frac{x_0 - x_1}{2} + x_1 \right) - A_{1c} \overline{x_{gA1c}}}{M(x_0 - x_1) - A_{1c}} \end{cases}$	
	$A_{2am} = M(x_1 - x_2) - A_{2c}$	Área de água à montante sobre A_{2c}
	$\overline{x_{gA2am}} = \begin{cases} 0 & \text{se } A_{2am} = 0 \\ \frac{M(x_1 - x_2) \left(\frac{x_1 - x_2}{2} + x_2 \right) - A_{2c} \overline{x_{gA2c}}}{M(x_1 - x_2) - A_{2c}} \end{cases}$	
	$A_{3am} = M(x_2 - x_3) - A_{3c}$	Área de água à montante sobre A_{3c}
	$\overline{x_{gA3am}} = \frac{M(x_2 - x_3) \left(\frac{x_2 - x_3}{2} + x_3 \right) - A_{3c} \overline{x_{gA3c}}}{M(x_2 - x_3) - A_{3c}}$	
$A_{am} = A_{1am} + A_{2am} + A_{3am}$	Área de água à montante total	
$\overline{x_{gAam}} = \frac{A_{1am} \overline{x_{gA1am}} + A_{2am} \overline{x_{gA2am}} + A_{3am} \overline{x_{gA3am}}}{A_{1am} + A_{2am} + A_{3am}}$		
A_{aj}	$x_j = \begin{cases} x_5 - H_0 \left(\frac{y_5 - J}{H_0 K} \right)^{1/n} & \text{se } J \leq P \\ x_5 & \text{se } J > P \end{cases}$	Área de concreto abaixo do nível de água à jusante
	$A_{1aj} = x_j y_5 - \frac{KH_0^{1-n} x_5^{n+1}}{n+1} - \frac{(H_0 K) \left((x_j - x_5) \left(\frac{x_5 - x_j}{H_0} \right)^n \right)}{n+1}$	
	$M_{yA1aj} = \frac{x_j^2 y_5}{2} - \frac{(H_0 K) \left((H_0 x_5) \left(\frac{x_5}{H_0} \right)^{n+1} - H_0 (n x_j + x_5 + x_j) \left(\frac{x_5 - x_j}{H_0} \right)^{n+1} \right)}{(n+1)(n+2)}$	
	$\overline{x_{gA1aj}} = \frac{M_{yA1aj}}{A_{1aj}}$	
	$A_{2aj} = \begin{cases} J_c x_5 & \text{se } J > P \\ 0 & \text{se } J \leq P \end{cases}$	Área de água à jusante acima da crista
	$\overline{x_{gA2aj}} = \frac{x_5}{2}$	
$A_{aj} = \begin{cases} \text{se } J > P \\ J x_j - A_{1aj} & \text{se } J \leq P \end{cases}$	Área de água à jusante	
$\overline{x_{gAaj}} = \begin{cases} \frac{x_j (P x_j)}{2} - A_{1aj} \overline{x_{gA1aj}} + A_{2aj} \overline{x_{gA2aj}} & \text{se } J > P \\ \frac{P x_j - A_{1aj} + A_{2aj}}{J x_j - A_{1aj}} & \text{se } J \leq P \end{cases}$		

Pesos de água à montante e à jusante por unidade de comprimento do vertedouro

$$Peso_{\text{água,montante}} = \gamma_a A_{am}$$

$$Peso_{\text{água,jusante}} = \gamma_a A_{aj}$$

2.4.2. Força de subpressão

Área (m ²)	Equações	Descrição
A_U	$A_U = \frac{x_0(J + M)}{2}$	Área de subpressão
	$\bar{x}_{gAU} = \frac{\frac{x_0(M - J)}{2} \frac{2x_0}{3} + (J x_0) \frac{x_0}{2}}{\frac{x_0(M - J)}{2} + (J x_0)}$	

Força de subpressão por unidade de comprimento do vertedouro

$$\text{Subpressão} = \gamma_a A_U$$

2.4.3. Forças de empuxo à montante e à jusante

Área (m ²)	Equações	Descrição
A_{em}	$A_{em} = \frac{(M + M_c)(M - M_c)}{2}$	Área de empuxo de água à montante
	$\bar{y}_{gAem} = \frac{\frac{(M - M_c)^2}{2} \times \frac{(M - M_c)}{3} + \frac{M_c(M - M_c)^2}{2}}{\frac{(M - M_c)^2}{2} + M_c(M - M_c)}$	
A_{ej}	$A_{ej} = \frac{(J - J_c)(J + J_c)}{2}$	Área de empuxo de água à jusante
	$\bar{y}_{gAej} = \frac{\frac{(J - J_c)^2}{2} \times \frac{(J - J_c)}{3} + \frac{J_c(J - J_c)^2}{2}}{\frac{(J - J_c)^2}{2} + J_c(J - J_c)}$	

Forças de empuxo à montante e à jusante por unidade de comprimento do vertedouro

$$\text{Empuxo}_{montante} = \gamma_a A_{em}$$

$$\text{Empuxo}_{jusante} = \gamma_a A_{ej}$$

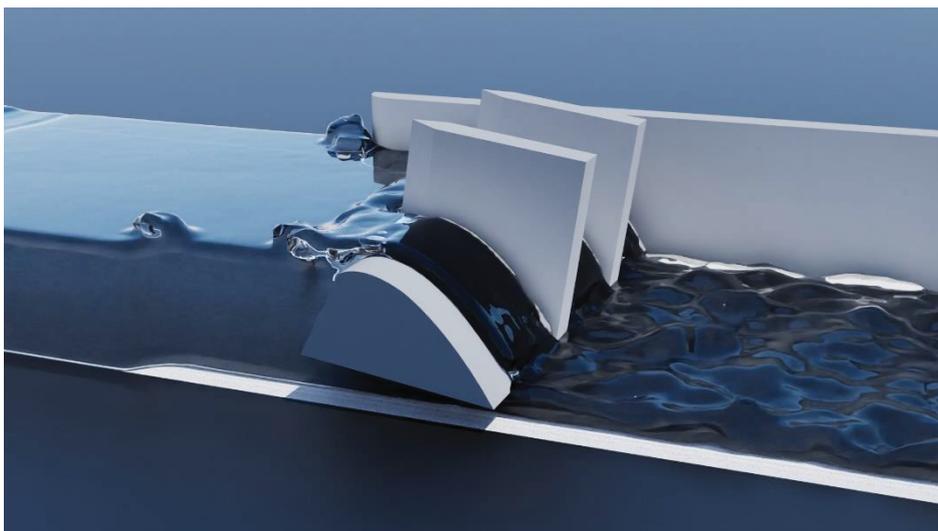
2.5. Simulação de flutuação

$$\sum \text{Forças Gravitacionais} = V = \gamma_c \times A_c + \gamma_a (A_{am} + A_{aj})$$

$$\sum \text{Forças de Subpressão} = U = \gamma_a \times A_U$$

$$CSF = \frac{V}{U} \geq CSF_m$$

Frame retirado da animação 3D fictícia elaborada para simular flutuação:



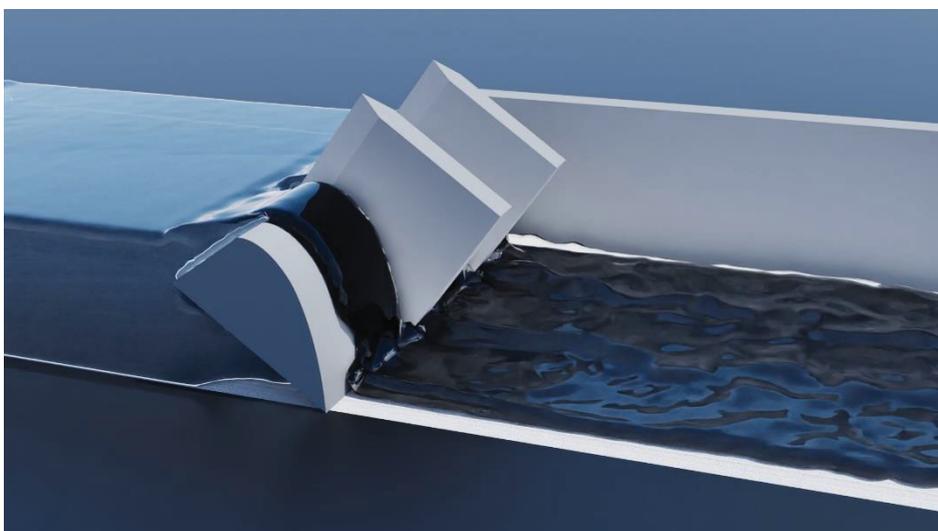
2.6. Simulação de tombamento

$$\sum \text{Momentos Estabilizantes} = ME = \gamma_c A_c \overline{x_{gAc}} + \gamma_a (A_{am} \overline{x_{gAam}} + A_{aj} \overline{x_{gAaj}} + A_{ej} \overline{y_{gAej}})$$

$$\sum \text{Momentos Desestabilizantes} = MT = \gamma_a (A_{em} \overline{y_{gAem}} + A_U \overline{x_{gAU}})$$

$$CST = \frac{ME}{MT} \geq CSF_m$$

Frame retirado da animação 3D fictícia elaborada para simular tombamento:



2.7. Simulação de deslizamento

2.7.1. Sem coesão

$$\sum \text{Forças Horizontais} = T = \gamma_a (A_{em} - A_{ej})$$

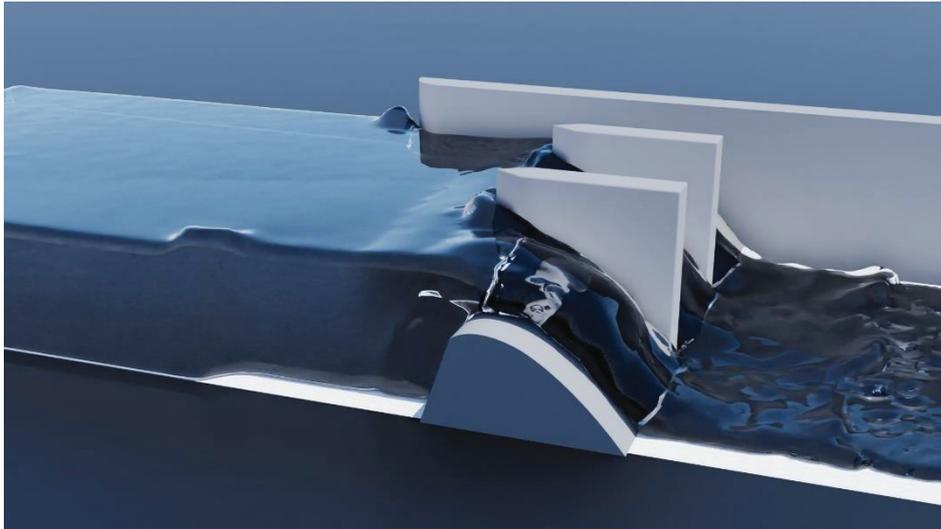
$$CSD_a = \frac{(V - U) \tan(\phi)}{T} \geq CSD_{am}$$

2.7.2. Com coesão

$$CSD_c = \frac{(V - U) \tan(\phi)}{CSD_{am} T} + \frac{C_{o_{max}} x_0}{CSD_{cm} T} \geq 1$$

$$C_{o_{min}} = \frac{T CSD_{cm}}{x_0} - \frac{(V - U) \tan(\phi) CSD_{cm}}{CSD_{am} x_0}$$

Frame retirado da animação 3D fictícia elaborada para simular deslizamento:



2.8. Simulação de tensões na base

$$T_{max} = \frac{(V - U)}{x_0} + \left[\frac{(V - U)}{(x_0^2/6)} \left(\frac{x_0}{2} - \frac{(ME - MT)}{(V - U)} \right) \right]$$

$$T_{min} = \frac{(V - U)}{x_0} - \left[\frac{(V - U)}{(x_0^2/6)} \left(\frac{x_0}{2} - \frac{(ME - MT)}{(V - U)} \right) \right]$$

Comprimento de base tracionada

$$B_t = \begin{cases} 0 & \text{se } T_{min} \geq 0 \text{ e } T_{max} > 0 \\ x_0 & \text{se } T_{min} < 0 \text{ e } T_{max} \leq 0 \\ \frac{|T_{min}| x_0}{T_{max} + |T_{min}|} & \text{se } T_{min} < 0 \text{ e } T_{max} > 0 \end{cases}$$

Porcentagem da base comprimida

$$\%_{comprimida} = 100 - 100 \frac{B_t}{x_0}$$

2.8.1. Abertura de fissura

No caso de existirem tensões de tração e de compressão ao longo da base do vertedouro ($T_{min} < 0$ e $T_{max} > 0$), deve-se realizar um processo iterativo no qual a base é reduzida artificialmente para estabilizar as tensões de tração considerando que a força resultante deve permanecer no terço médio da base

Enquanto $\frac{x_0 - B_t}{3} \neq \frac{(ME - MT)}{(V - U)} \vee B_t \leq x_0$

$$A_U = \frac{(x_0 - B_t)(M - J)}{2} + J(x_0 - B_t) + M B_t$$

$$\bar{x}_{gAU} = \frac{\left[\frac{(x_0 - B_t)(M - J)}{2} \times \frac{2(x_0 - B_t)}{3} \right] + \left[J(x_0 - B_t) \times \frac{(x_0 - B_t)}{2} \right] + \left[(B_t M) \left(x_0 - \frac{B_t}{2} \right) \right]}{\left[\frac{(x_0 - B_t)(M - J)}{2} + J(x_0 - B_t) + B_t M \right]}$$

$$U = \gamma_a \times A_U$$

$$MT = \gamma_a \left(A_{em} \bar{y}_{gAem} + A_U \bar{x}_{gAU} \right)$$

$$B_t = B_t + 0.001$$

Fim do Enquanto

Nova porcentagem de base comprimida

$$\%_{comprimida} = 100 - 100 \frac{B_t}{x_0}$$

Novos coeficientes e tensões na base após abertura de fissura

$$CSF = \frac{V}{U} \geq CSF_m$$

$$CST = \frac{ME}{MT} \geq CSF_m$$

$$CSD_a = \frac{(V - U) \tan(\phi)}{T} \geq CSD_{am}$$

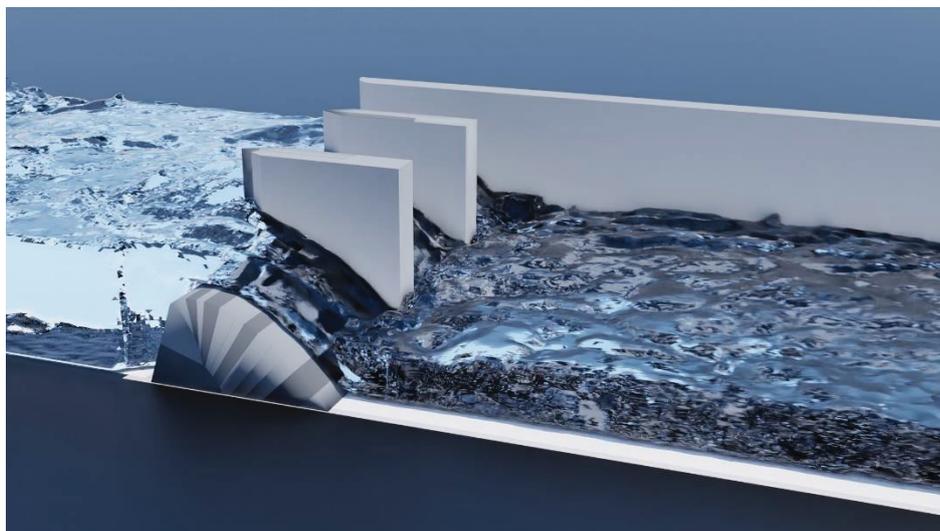
$$CSD_c = \frac{(V - U) \tan(\phi)}{CSD_{am} T} + \frac{C_{o_{max}} (x_0 - B_t)}{CSD_{cm} T} \geq 1$$

$$C_{o_{min}} = \frac{T CSD_{cm}}{(x_0 - B_t)} - \frac{(V - U) \tan(\phi) CSD_{cm}}{CSD_{am} (x_0 - B_t)}$$

$$T_{max} = \frac{(V - U)}{(x_0 - B_t)} + \left[\frac{(V - U)}{((x_0 - B_t)^2 / 6)} \left(\frac{(x_0 - B_t)}{2} - \frac{(ME - MT)}{(V - U)} \right) \right]$$

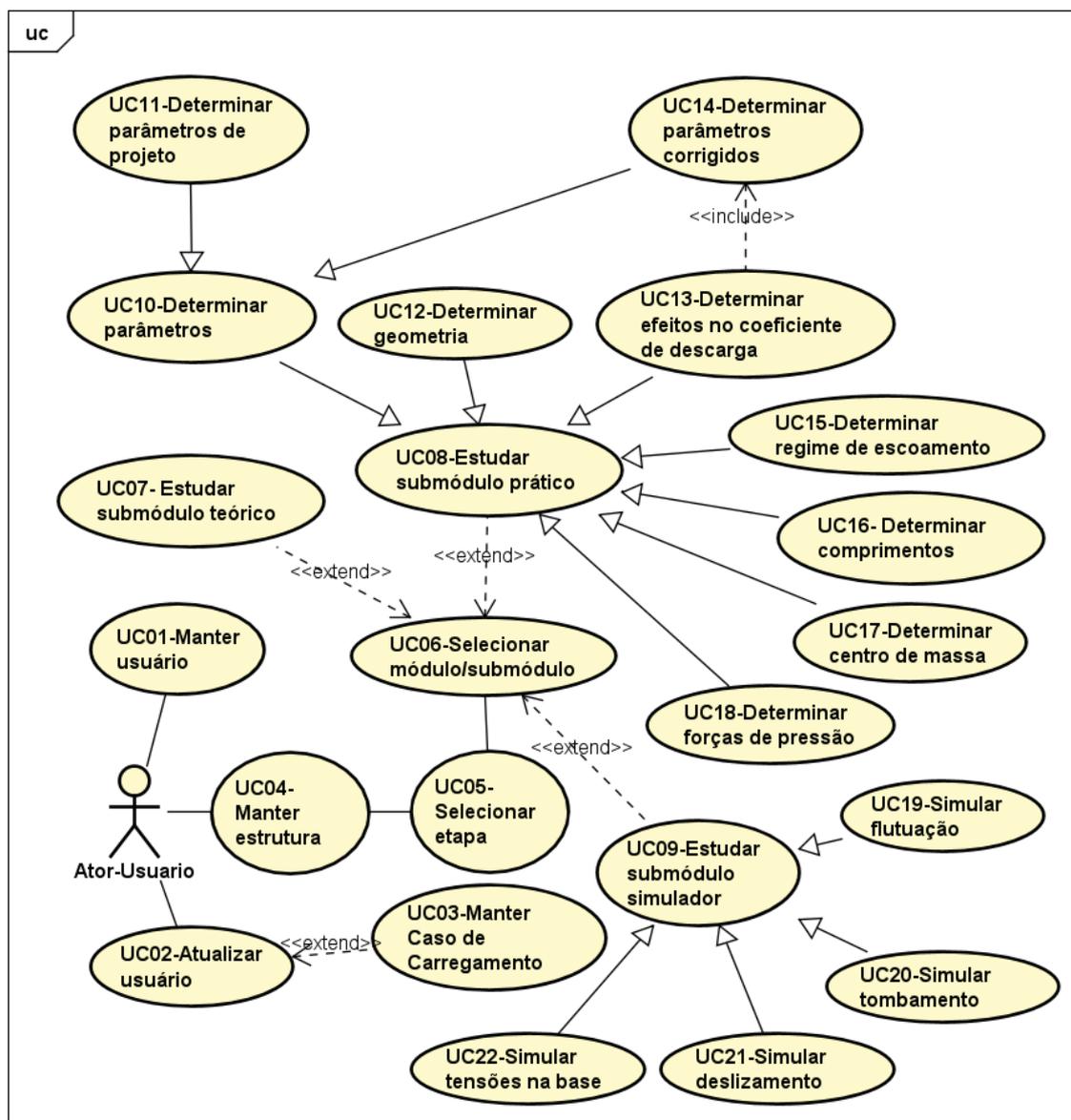
$$T_{min} = \frac{(V - U)}{(x_0 - B_t)} - \left[\frac{(V - U)}{((x_0 - B_t)^2 / 6)} \left(\frac{(x_0 - B_t)}{2} - \frac{(ME - MT)}{(V - U)} \right) \right] \cong 0$$

Frame retirado da animação 3D fictícia elaborada para simular tensões de tração na base sem resolução:

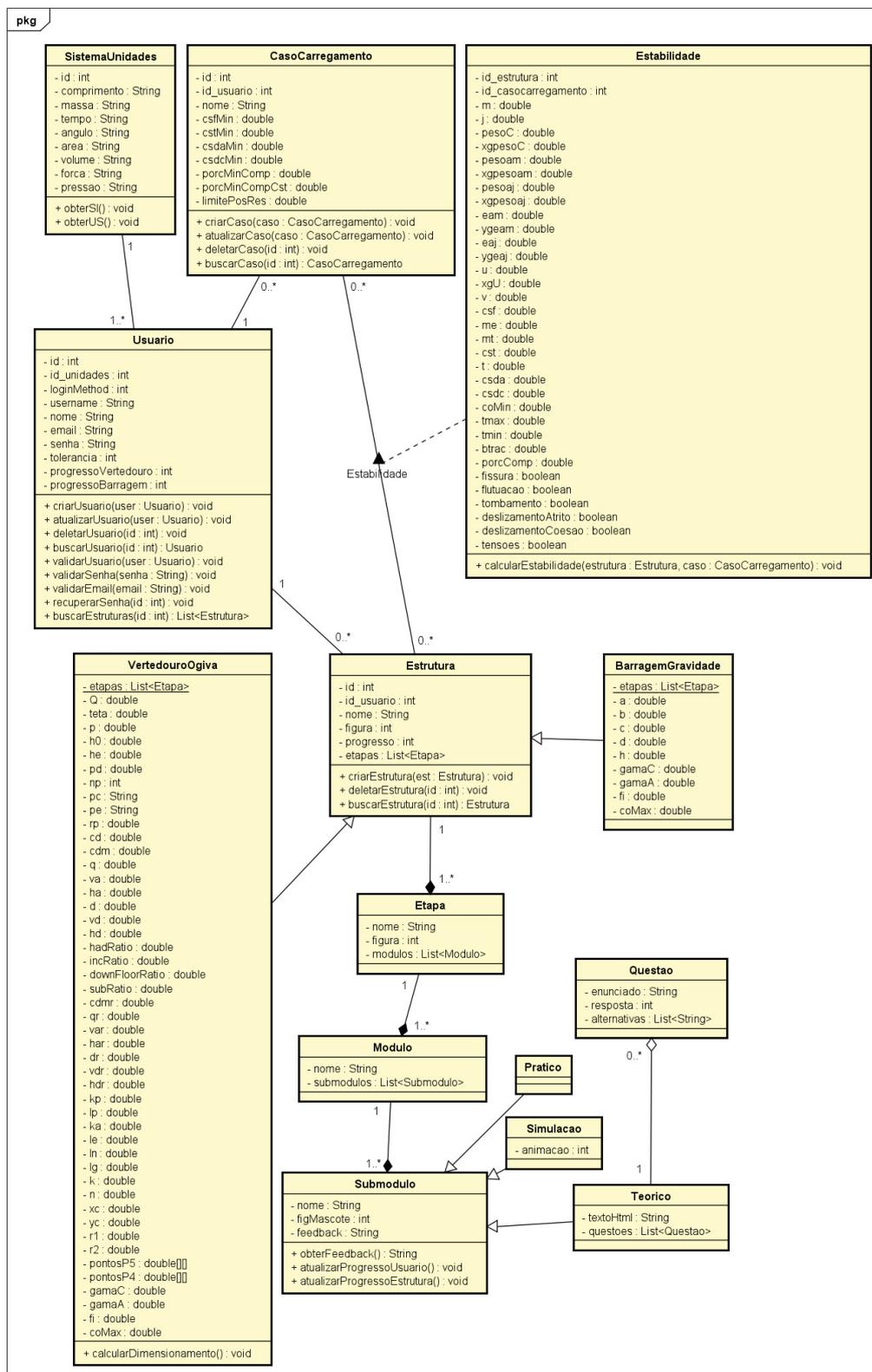


APÊNDICE 5 – DIAGRAMAS UML

1. Diagrama de Casos de Uso: elaborado a partir dos requisitos funcionais do sistema, este diagrama apresenta uma visualização geral de todas as suas funcionalidades.



2. Diagrama de Classes: considerando os casos de uso e especificações apresentadas nas histórias de usuário (APÊNDICE 2), o diagrama de classes apresenta os objetos que podem ser instanciados durante a execução do sistema.



Classe *Usuario*: contém os atributos pertinentes aos usuários do sistema, bem como os métodos para validação e atualização das informações

Classe *SistemaUnidades*: compreende o sistema de unidades escolhido pelo usuário, internacional ou americano. Cada usuário deverá escolher um dos dois, sendo que o padrão é o sistema internacional.

Classe *Estrutura*: é a superclasse de todas as estruturas que poderão compor a série *Build the Future*.

Classe *VertedouroOgiva*: classe filha de *Estrutura*, tema central de *Spillways*. Seus atributos refletem todas as variáveis envolvidas em seu dimensionamento e geometria.

Classe *BarragemGravidade*: classe filha de *Estrutura*, tema central de *Gravity Dams* (COLODEL, OLIVEIRA e JESUS, 2021). Seus atributos refletem a geometria da barragem à gravidade.

Classe *CasoCarregamento*: classe que pode ou não ter instância vinculada às instâncias da classe *Estrutura*, uma vez que nem toda *Estrutura* possuirá casos de carregamento e precisará de análise de estabilidade.

Classe *Estabilidade*: é a classe associativa entre *CasoCarregamento* e *Estrutura*, ou seja, para cada caso de carregamento vinculado a uma estrutura, haverá um cálculo de estabilidade. Seus atributos dizem respeito às variáveis envolvidas em todo o processo de cálculo das verificações de segurança.

Classe *Etapa*: cada tipo de estrutura possui uma lista de etapas de projeto pré-definidas. Por exemplo, o *VertedouroOgiva* possui as etapas de dimensionamento e de análise de estabilidade.

Classe *Modulo*: cada etapa possui uma lista de módulos pré-definidos.

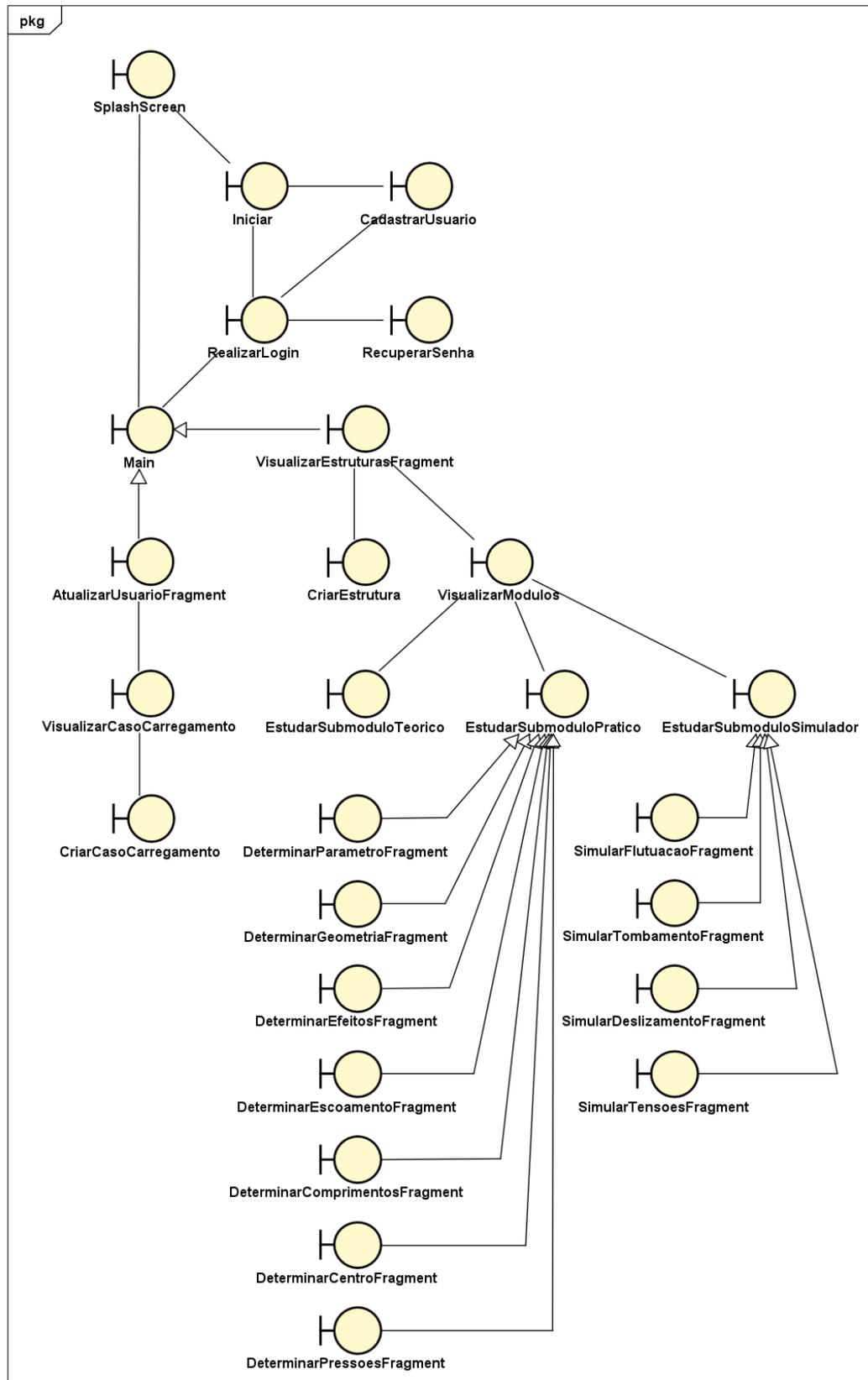
Classe *Submodulos*: cada módulo possui uma lista de submódulos pré-definidos, os quais poderão ser de três tipos: prático, teórico ou simulador.

Classe *Pratico*: classe filha de *Submodulo*, a qual será instanciada quando o usuário realizar cálculos para encontrar resultado(s) solicitado(s).

Classe *Simulacao*: classe filha de *Submodulo*, a qual será instanciada quando o usuário realizar cálculos para simular algum efeito físico em uma estrutura.

Classe *Teorico*: classe filha de *Submodulo*, a qual será instanciada quando o usuário realizar a leitura de um texto teórico do assunto abordado. Esta classe poderá ou não ter questões objetivas para o usuário responder (classe *Questao*).

3. Diagrama de Interfaces: representa as telas da aplicação e os fluxos possíveis entre elas.



4. Diagramas de Sequência: demonstra a interação entre o usuário, as interfaces e os objetos do sistema para cada um dos casos de uso.

Diagrama de Sequência UC01 – Manter Usuário

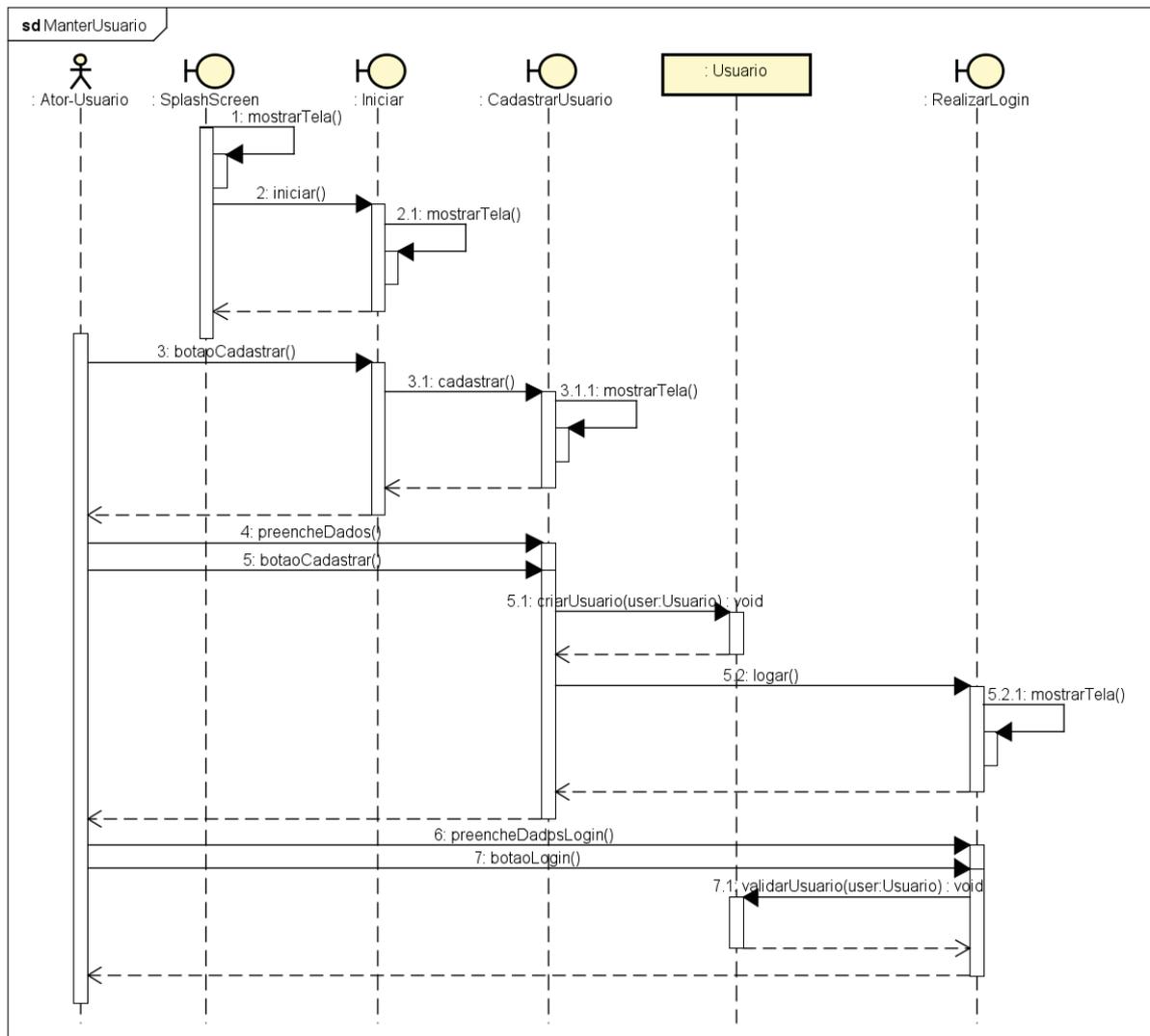


Diagrama de Sequência UC02 – Atualizar Usuário

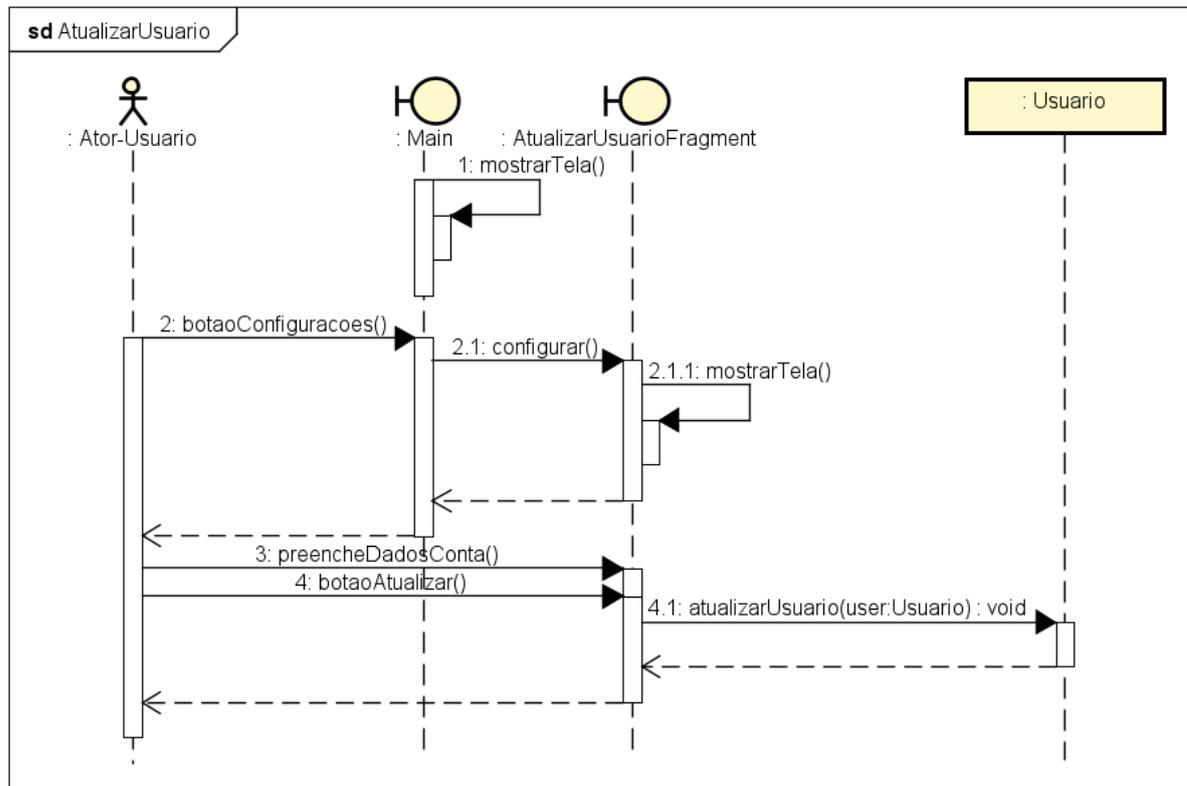


Diagrama de Sequência UC03 – Manter Caso de Carregamento

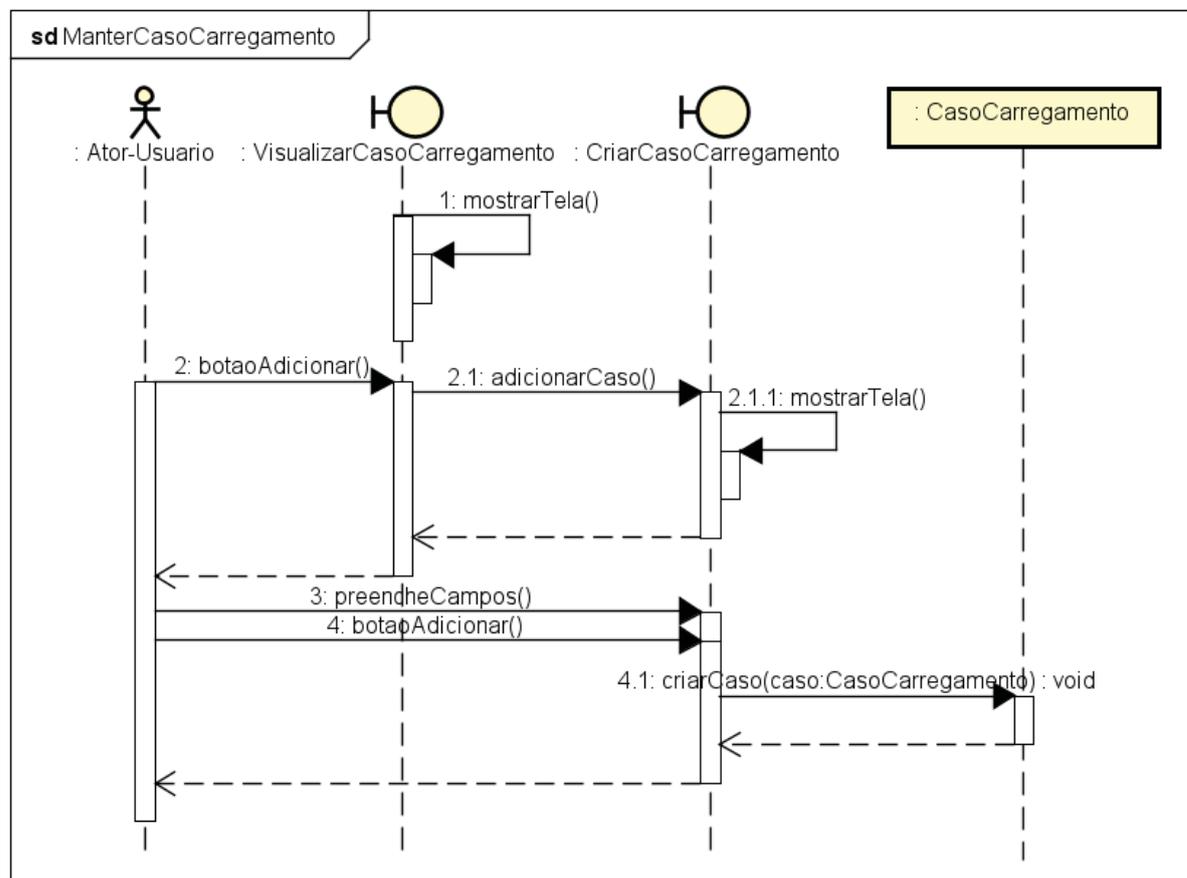


Diagrama de Sequência UC04 e UC05 – Manter Estrutura e Selecionar Etapa

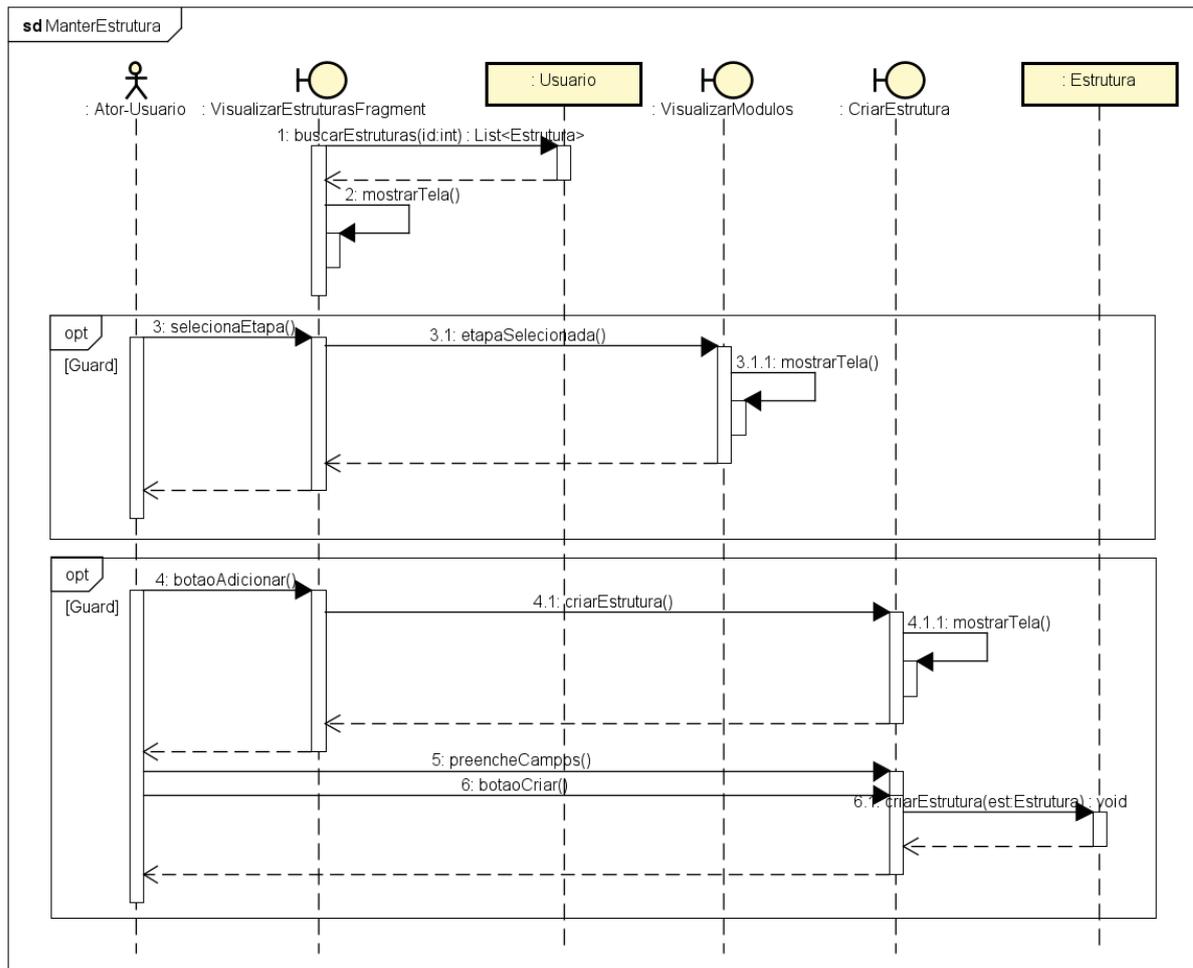


Diagrama de Sequência UC06 – Selecionar módulo/submódulo

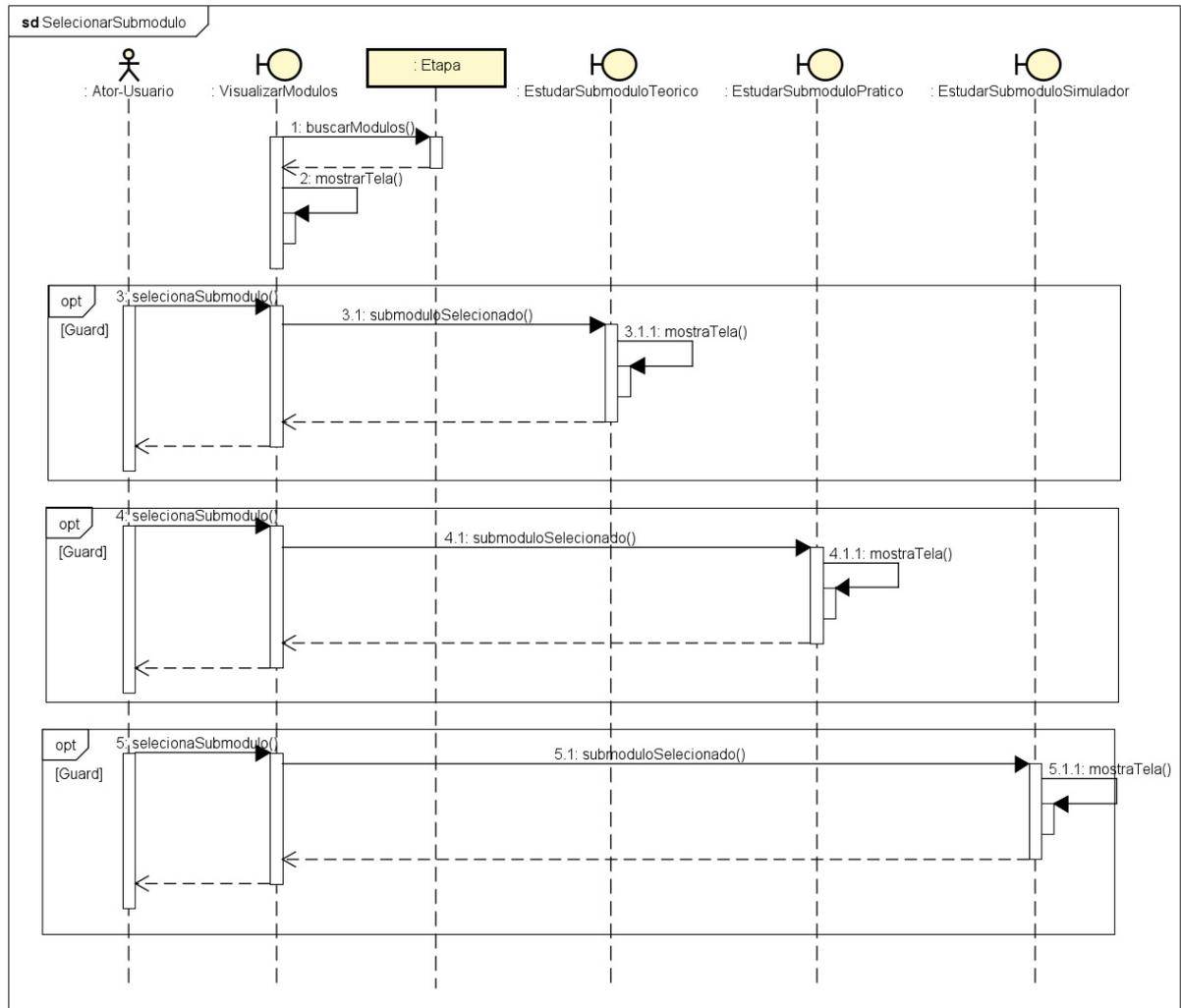


Diagrama de Sequência UC07 – Estudar submódulo teórico

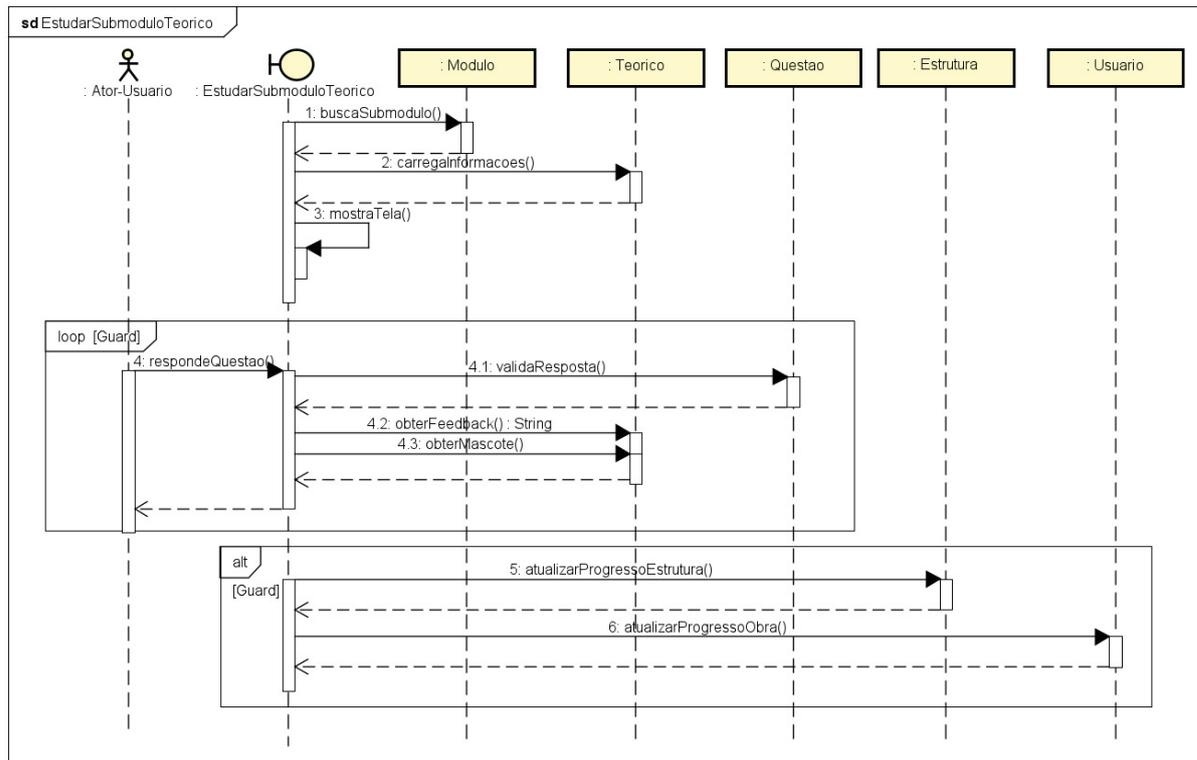


Diagrama de Sequência UC08 – Estudar submódulo prático

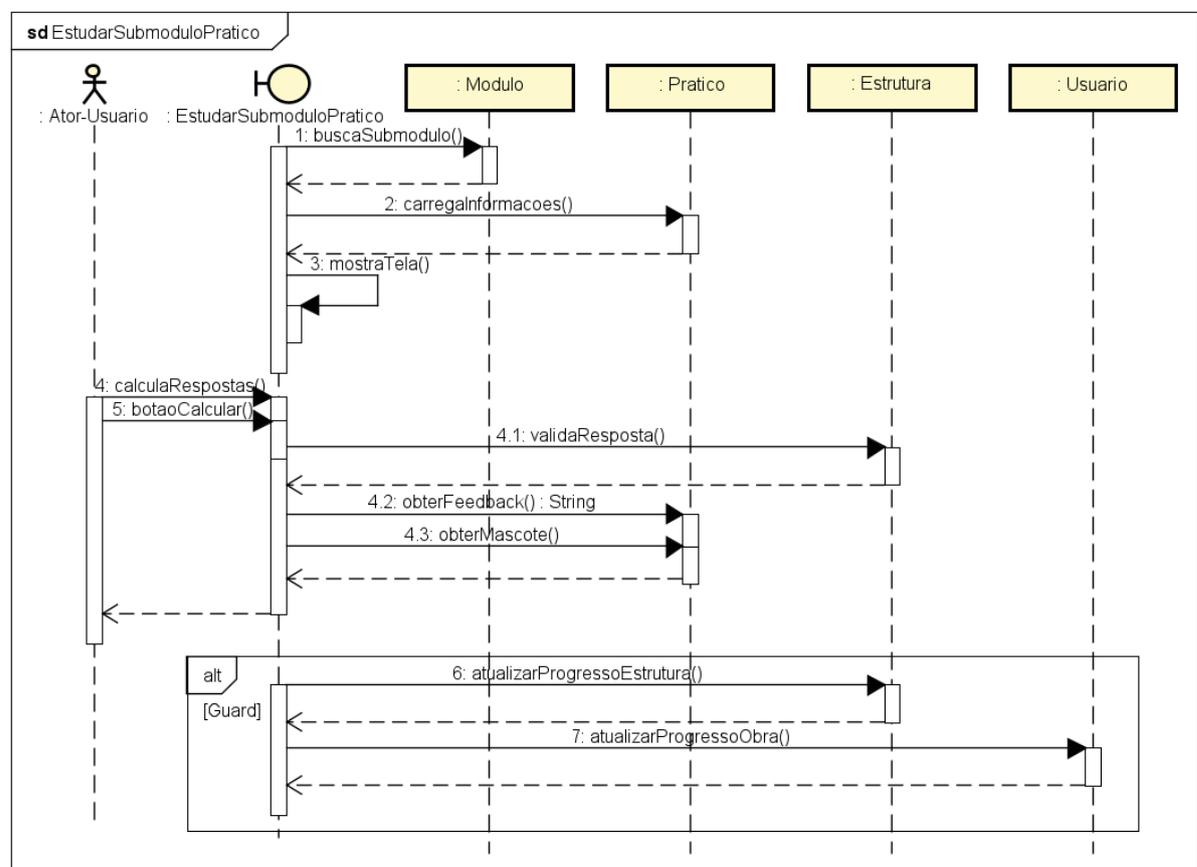
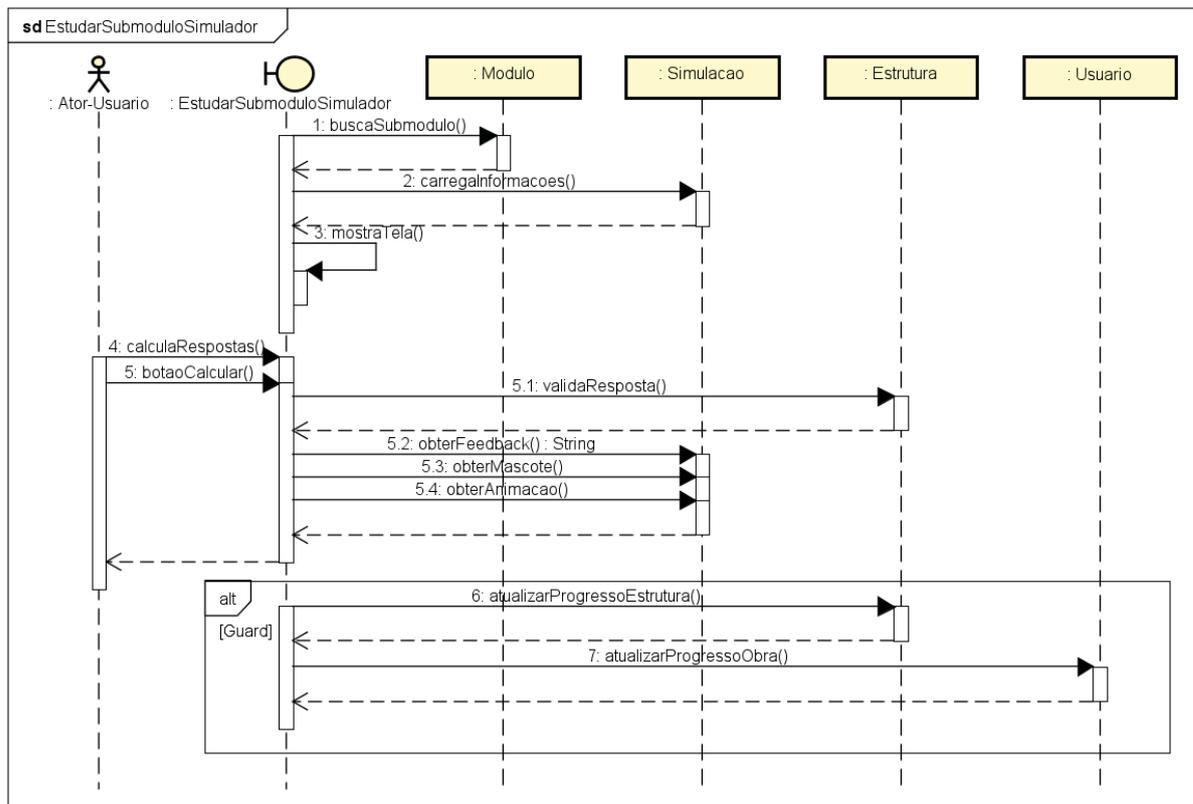


Diagrama de Sequência UC09 – Estudar submódulo simulador



APÊNDICE 6 – CHECKLIST BASEADO NA TARDA 2.0

QUALIDADE DE SOFTWARE			Sim	Não
Concepção do Software				
1	Adequação	Possui um conjunto apropriado de funções para tarefas e objetivos dos usuários especificados		
2	Acurácia	Possui, com o grau de precisão necessário, resultados ou efeitos corretos ou conforme acordado		
3	Conformidade funcional	Está de acordo com normas, convenções ou regulamentações previstas em leis e prescrições similares relacionadas à funcionalidade		
4	Uso de recursos	Usa tipos e quantidades de recursos (tecnologias, frameworks, bibliotecas) dentro dos limites acordados para o <i>software</i> executar suas funções sob condições estabelecidas		
5	Conformidade portátil	Está de acordo com normas ou convenções relacionadas à portabilidade		
6	Interoperabilidade	Interage com um ou mais sistemas especificados		
Evolução do Software				
7	Estabilidade	Evita efeitos inesperados decorrentes de modificações no <i>software</i>		
8	Analisabilidade	Permite o diagnóstico de deficiências ou causas de falhas no <i>software</i> , ou a identificação de partes a serem modificadas		
9	Modificabilidade	Permite que uma modificação especificada seja implementada		
10	Substitutibilidade	Pode ser substituído por outro produto de <i>software</i> especificado, com o mesmo propósito e no mesmo ambiente		
11	Instalabilidade	Pode ser instalado em um ambiente especificado		
12	Testabilidade	É possível testar o sistema modificado, tanto quanto as novas funcionalidades quanto às não afetadas diretamente pela modificação		
13	Maturidade	Evita defeitos decorrentes de falhas no <i>software</i>		
Segurança do Sistema				
14	Inteligibilidade	Possibilita ao usuário compreender se o <i>software</i> é apropriado e como ele pode ser usado para tarefas e condições de uso específicas		
15	Apreensibilidade	Possibilita ao usuário entender como ele funciona e/ou aprender a usá-lo		
16	Tolerância a falhas	Mitiga falhas e mantém um nível de desempenho especificado em casos de defeitos no <i>software</i> ou em violação de sua interface especificada		
17	Segurança de acesso	Protege informações e dados, de forma que pessoas ou sistemas não autorizados não possam lê-los nem os modificar e que não seja negado o acesso às pessoas ou sistemas autorizados		

QUALIDADE DE USO			Sim	Não
Interface do Usuário				
18	Consistência e padrões	Utiliza os mesmos ícones, denominações, organização da informação, nas diferentes partes do sistema		
19	Reconhecer em vez de lembrar	Utiliza elementos de interface que sejam significativos para os usuários, reduzindo a carga cognitiva e perceptiva destes e aumentando a eficiência do diálogo entre estes e o sistema		
20	Flexibilidade e eficiência de uso	Dispõe de mecanismos de configuração e personalização da interface e da interação		
21	Design estético e minimalista	Apresenta apenas a informação necessária e relevante para o usuário, evitando distratores		
Experiência do Usuário				
22	Visibilidade do estado do sistema	Dispõe de feedback imediato nas respostas do sistema às ações do usuário		
23	Mapeamento entre o sistema e o mundo real	Dispõe de meios para organizar as informações conforme o modelo mental e as experiências de uso do usuário, usando terminologia familiares a este		
Gestão de Erros				
24	Prevenção de erros	Dispõe de mecanismos para detectar e prevenir erros de entradas de dados, comandos, possíveis ações de consequências desastrosas e/ou não recuperáveis		
25	Suporte para o usuário reconhecer, diagnosticar e recuperar erros	Dispõe de mecanismos que permitem evitar ou reduzir a ocorrência de erros e, quando eles ocorrem, favorecem sua correção		
Interação do Usuário				
26	Ajuda e documentação	Dispõe de mecanismos e documentos que permitem ajudar o usuário quando há alguma dificuldade		
27	Compatibilidade	Dispõe de tarefas e ações que sejam compatíveis com as características do usuário (memória, percepção, hábitos, competências, idade, expectativa, etc)		

QUALIDADE PEDAGÓGICA			Sim	Não
Conhecimentos Prévios				
28	Indicação dos conhecimentos prévios	Relaciona os pré-requisitos necessários à compreensão do conteúdo trabalhado no RDA indicados no guia de apoio pedagógico do professor		
29	Retrabalho com os conhecimentos prévios	O RDA parte dos conhecimentos prévios disponíveis, possibilitando que o usuário construa e reconstrua seus próprios conceitos		
Fundamentos e Objetivos Pedagógicos				
30	Guia de apoio pedagógico ao professor	Possui informações pedagógicas, para que o professor amplie as possibilidades de utilização do RDA		
31	Identificação dos objetivos pedagógicos	Especifica os conhecimentos a serem elaborados pelo usuário na utilização do RDA		
Conteúdo Pedagógico				
32	Nível de complexidade dos conteúdos nas atividades	As atividades estimulam o interesse, a ativação do conhecimento prévio e a utilização deste na elaboração de novos conhecimentos		
33	Abordagem específica e/ou disciplinar	Permite a abordagem do conteúdo de forma interdisciplinar		
34	Trabalho em grupo e/ou individual	Possibilita o trabalho em grupo na execução do RDA		
Pertinência do Conteúdo				
35	Adequação do RDA ao conteúdo trabalhado	O conteúdo do trabalho didático-pedagógico é compatível com o conteúdo trabalhado no RDA		
36	Análise do conteúdo	O conteúdo é organizado logicamente e sem erros conceituais		
37	Adequação do RDA ao usuário e ao currículo	A complexidade do conteúdo é adequada ao nível do usuário em comparação ao currículo escolar		
Clareza Epistemológica				
38	Explicitação da concepção pedagógica	É explícita a concepção didático-pedagógica utilizada no desenvolvimento do RDA		
39	Coerência pedagógica em relação à base teórico-conceitual	É coerente com a teoria pedagógica utilizada no RDA, considerando a correlação entre a teoria e a prática pedagógicas		
Elaboração do Conhecimento				
40	Feedback encorajador mediante respostas inadequadas	O retorno dado pelo RDA ao usuário é positivo, incentivando-o nas atividades sem prejudicar a elaboração do conhecimento		
41	Reflexão acerca de erros e acertos	Permite reflexão do usuário sobre o conteúdo trabalhado no RDA com retorno às atividades e outras formas de resolução		
42	Registro de desempenho do usuário	Possui registro de desempenho relacionado às respostas das atividades realizadas pelo usuário no RDA		

QUALIDADE HÍBRIDA			Sim	Não
Segurança do Sistema e Experiência do Usuário				
43	Liberdade e controle ao usuário	Dispõe de mecanismos que permitem aos usuários agir sobre o sistema para interromper, cancelar, suspender e continuar as ações do sistema		
44	Suporte para reconhecer, diagnosticar e recuperar falhas	Dispõe de mecanismos que permitem evitar a ocorrência de erros durante a utilização do RDA e, quando eles ocorrem, auxiliam na sua manipulação para a devida correção		
Evolução do Software e Experiência do Usuário				
45	Adaptabilidade	É adaptável a diferentes ambientes especificados, sem necessidade de aplicar outras ações ou meios além dos fornecidos para tal finalidade e dispõe de meios para que o sistema respeite o nível de flexibilidade e experiência do usuário		
46	Visibilidade do estado do sistema	Fornecer tempos de resposta, de processamento e de taxas de transferência apropriados, ao executar suas funções nas condições estabelecidas, ou seja, dispõe de feedback imediato nas respostas do sistema às ações do usuário		
Concepção do Software e Experiência do Usuário				
47	Atratividade	Desperta no usuário um interesse intrínseco pelo conteúdo e não por premiações ou outras formas de manipulação de comportamento		
Interação do Usuário e Elaboração do Conhecimento				
48	Desafios Pedagógicos	Há desafios capazes de provocar desequilíbrios cognitivos no usuário e de manter o seu nível de interesse		
49	Estímulo a participação do usuário	Interage com o usuário para estimular a participação e ajudar na superação de conflitos cognitivos (mediante perguntas, simulações e desafios)		

RESULTADO	Pontos	Máximo
Qualidade de <i>Software</i>		17
Qualidade de Uso		10
Qualidade Pedagógica		15
Qualidade Híbrida		7
Total		49

Assinatura do Avaliador

APÊNDICE 7 – MANUAL DE INSTALAÇÃO

Para dispositivos com sistema operacional *Android*:

1. Este primeiro passo dependerá da versão do seu dispositivo *Android*:
 - a) *Android* 7.0 (*Nougat*) ou anterior: acesse Configurar -> Tela de Bloqueio e Segurança -> ative a opção “Fontes Desconhecidas” e toque em “Ok” para confirmar;
 - b) *Android* 8.0 (*Oreo*) ou posterior: acesse Configurar -> Apps e notificações -> Avançado -> Acesso especial a apps -> Instalar apps desconhecidos -> Drive -> Marcar a opção "Permitir desta fonte";
2. Abra o arquivo de instalação (.apk) a partir de seu dispositivo *Android* acessando o *link*:

[*Build the Future: Spillways \(Android device\)*](#)

Para dispositivos com sistema operacional *iOS*:

1. Conecte o seu dispositivo *iOS* a um computador;
2. Instale em seu computador um *software* de instalação de arquivos IPA, como o *Apple Finder* (para *Mac*) ou *3uTools* (para *Windows*);
3. Baixe o arquivo de instalação (.IPA) acessando o *link* abaixo e o importe no *software* escolhido:

[*Build the Future: Spillways \(iOS device\)*](#)