



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO ENGENHARIA CIVIL  
CURSO ENGENHARIA CIVIL

Eduardo Steffenon Oliveira

**DIMENSIONAMENTO DE ESCADAS HIDRÁULICAS EM DESCIDA D'ÁGUA A  
JUSANTE DE USINA FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE CFD**

Florianópolis

2023

Eduardo Steffenon Oliveira

**DIMENSIONAMENTO DE ESCADAS HIDRÁULICAS EM DESCIDA D'ÁGUA A  
JUSANTE DE USINA FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Aurelio Marcos Noronha

Florianópolis

2023

Ficha de Identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de  
Geração Automática da Biblioteca Universitário da UFSC

Steffenon, Eduardo

Dimensionamento de escadas hidráulicas em descida d'água a jusante de usina fotovoltaica através de CFD / Eduardo Steffenon, Marcos Aurelio Marques Noronha, 2023.  
126 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. usinas solares. 3. sistema de drenagem. 4. CFD. 5. escoamento em degraus. I. Noronha, Marcos Aurelio Marques. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Eduardo Steffenon Oliveira

**Dimensionamento de escadas hidráulicas em descida d'água a jusante de usina  
fotovoltaica através de CFD**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil

Florianópolis, 16 de junho de 2023

Prof<sup>a</sup>. Liane Ramos da Silva, Dr<sup>a</sup>  
Coordenação do Curso

**Banca examinadora**

Insira neste espaço  
a assinatura

Prof. Marcos Aurelio Marques Noronha, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Naloan Coutinho Sampa, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Rafael Rodrigues de Lima Espada  
Avaliador  
Araxá Engenharia

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente à minha família, a esse sobrenome Steffenon, que marca pessoas com a força de lutar e batalhar por seus objetivos. Em especial para Ervino, Denise e Manuella que ativamente me conduziram ao ponto mais alto.

Agradeço aos meus amigos próximos que vivenciaram todo o processo de minha formação como pessoa e engenheiro, contribuindo muito com cada etapa sem precisar realizar nenhum cálculo.

Agradeço aos líderes que andam ao meu lado Matheus Fernando, Matheus Steinhaus, Raul Rabaça, Guilherme Agostini e Lorenzo Bergamin.

Agradeço ao professor Marcos Noronha que dentre todos da academia soube valorizar meu conhecimento e aceitou encarar um novo ramo sem vaidade.

Agradeço aos meus mestres Alesandro Oliveira e Rafael Espada, que me trouxeram para o ramo de energia e em especial a energia solar e me deram oportunidade de crescer e estudar sobre drenagem de usina solares.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, os quais eu pude aprender e ensinar sobre infraestrutura em energia solar, em especial ao Mateus, Marcos, Alysson e Darci Jr.

Por fim, agradeço a vida que dentro de seus altos e baixos forma o indivíduo. Nem todo momento ruim é igualmente ruim e nem todo momento bom é igualmente bom.

“Se queres conhecer o passado, examina o presente que é o resultado; se queres conhecer o futuro, examina o presente que é a causa”

(Confúcio)

## RESUMO

No Brasil, em vista do aumento constante dos preços da energia elétrica, as chamadas fontes de energia alternativa estão ganhando espaço no mercado. Entre as fontes que merecem destaque em seu potencial de expansão, associado ao menor impacto ambiental, está a energia solar fotovoltaica. No entanto, o processo construtivo de usinas solares pode requerer grandes modificações nas paisagens gerando modificações nas propriedades do solo e vegetação. A adição de superfície impermeável, como os painéis, pode alterar a hidrologia do local de implantação e de sua vizinhança, já que a energia e velocidade da água escoada é maior. Além disso a alteração do uso do solo durante a implantação altera o regime de escoamento superficial ocasionando o aumento de vazão, especialmente se o solo é exposto. Portanto, há necessidade de aplicação de uma série de medidas, como a aplicação do projeto de técnicas de drenagem que possibilitam o controle de erosão. Diante deste cenário, neste trabalho será realizado o dimensionamento de escadas hidráulicas em descida d'água canalizando o talvegue a jusante de usina fotovoltaica localizada em Caldeirão Grande do Piauí, PI. Como metodologia de dimensionamento hidráulico será realizada uma modelagem numérica através de CFD (Computacional Fluid Dynamics), utilizando o software Ansys Fluent, em comparação com modelos empíricos. Desta forma, busca-se aliar o uso de modelagem numérica de fluidos com o ambiente de geração de energia fotovoltaica, fomentando o uso desta metodologia para a mitigação de processos erosivos em taludes no ambiente de geração fotovoltaica.

**Palavras-chave:** Usinas Solares; Sistema de Drenagem; CFD; Erosão; Talvegue; Escadas Hidráulicas; Escoamento em Degraus.

## ABSTRACT

In Brazil, considering the constant increase in electricity prices, alternative energy sources are gaining space in the market. Among the sources that deserve highlighting for their potential for expansion, associated with lower environmental impact, is photovoltaic solar energy. However, the construction process of solar power plants may require significant modifications to landscapes, resulting in changes to soil properties and vegetation. The addition of impermeable surfaces, such as solar panels, can alter the hydrology of the implementation site and its surroundings, as the energy and velocity of water runoff increase. Additionally, changes in land use during implementation alter the surface runoff regime, leading to increased flow, especially if the soil is exposed. Therefore, the application of a series of measures is necessary, such as the implementation of drainage techniques that enable erosion control. In this context, this work will carry out the design of hydraulic stairs for downward water flow, channeling the thalweg downstream from a photovoltaic power plant located in Caldeirão Grande do Piauí, PI. As a hydraulic design methodology, numerical modeling will be performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) through the Ansys Fluent software, in comparison with empirical models. Thus, the aim is to combine the use of numerical fluid modeling with the photovoltaic energy generation environment, promoting the use of this methodology for mitigating erosive processes on slopes in the photovoltaic generation setting.

**Keywords:** Fotovoltaic Plants; Drainage Systems; CFD; Ansys Fluent; Erosion; Thalweg; Stepped Chute; Stormwater Management; Hydraulic Stairs.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regiões <i>wet</i> , <i>dry</i> e <i>spacer</i> em uma única célula. Fonte: Cook & McCuen, 2013. ....	27
Figura 2 - Metodologia pré e pós-implantação (painéis no eixos leste-oeste, voltados ao sul). ....	28
Figura 3 - Metodologia pré e pós-implantação (painéis no eixos leste-oeste, voltados ao norte).....	28
Figura 4 - Esquema de nappe flow (a) e de skimming flow (b). Fonte: Adaptado de CHANSON, 2002. ....	35
Figura 5 – Regime de escoamento do tipo de transição. Fonte: Adaptado de CHANSON, 2002. ....	36
Figura 6 – Subdivisões dos escoamentos em quedas sucessivas. (a) impacto total do jato com formação do ressalto hidráulico, (b) impacto do jato e formação parcial do ressalto hidráulico e (c) impacto do jato sem formação do ressalto hidráulico.....	37
Figura 7 – Escoamento em transição, sub-regime primário TRA1. Fonte: CHANSON e TOOMBES (2004). ....	40
Figura 8 - Escoamento em transição, sub-regime secundário TRA2. Fonte: CHANSON e TOOMBES (2004). ....	41
Figura 9 - Recirculação instável com interferência esteira-degrau - SK1. Fonte: CHANSON (2002). ....	42
Figura 10 – Recirculação instável com interferência esteira-degrau - SK2. Fonte: CHANSON (2002). ....	43
Figura 11 – Escoamento com recirculação estável – SK3. Fonte: CHANSON (2002). ....	43
Figura 12 - Regiões do escoamento sobre em vertedouro em degraus. Fonte: Adaptado CHANSON (1993).....	46
Figura 13 - Detalhe de um degrau típico. ....	47
Figura 14 - Fluxo mássico em uma partícula infinitesimal de fluido.....	57
Figura 15 - Componentes de tensão em todas as faces de uma partícula, (a) em todas as direções (b) na direção x. ....	59
Figura 16 - Localização da UFV Caldeirão Grande 2. ....	74
Figura 17 - Fluxo do trabalho.....	75

Figura 18 - Uso do solo na região da UFV, pré-implantação.....	80
Figura 19 - Uso do solo na região da UFV, pós-implantação. ....	80
Figura 20 - Curve Number ajustado, pós-implantação. ....	81
Figura 21 - Sistema de drenagem proposto. ....	82
Figura 22 - Detalhe de projeto da BD-03.....	83
Figura 23 - Detalhe de projeto da BD-04.....	83
Figura 24 - Talvegue a jusante da BD-04.....	85
Figura 25 - Alinhamento talvegue.....	86
Figura 26 - Perfil longitudinal no alinhamento do talvegue. ....	87
Figura 27 – Perfil longitudinal ao longo do talvegue com as escadas hidráulicas propostas. ....	89
Figura 28 - Fluxo de modelagem criado no Ansys Workbench. ....	99
Figura 29 - Modelos 3D das Escadas com 50% e 30%, respectivamente....	99
Figura 30 - Modelos 3D das Escadas com 20% e 15%, respectivamente..	100
Figura 31 - Detalhe da malha computacional nas escadas. ....	101
Figura 32 - Janela de determinação dos modelos cálculo.....	102
Figura 33 - Esquemático das condições de contorno.....	103
Figura 34 – Velocidade – Plano XY – Escada 50%.....	105
Figura 35 – Velocidade - Plano YZ- Escada 50%.....	106
Figura 36 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 50%. .	106
Figura 37 - Concentração da fração de água – Plano YZ – Escada 50%...	107
Figura 38 - Vista isométrica do escoamento – Escada 50%.....	108
Figura 39 – Velocidade – Plano XY – Escada 30%.....	109
Figura 40 – Velocidade – Plano YZ - Escada 30%.....	109
Figura 41 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 30%. .	110
Figura 42 - Concentração da fração de água – Plano YZ– Escada 30%....	110
Figura 43 - Vista isométrica do escoamento – Escada 30%.....	112
Figura 44 – Velocidade – Plano XY – Escada 20%.....	112
Figura 45 – Velocidade – Plano YZ - Escada 20%.....	113
Figura 46 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 20%. .	113
Figura 47 - Concentração da fração de água – Plano YZ– Escada 20%....	114
Figura 48 - Vista isométrica do escoamento – Escada 20%.....	115
Figura 49 – Velocidade – Plano XY – Escada 15%.....	116
Figura 50 – Velocidade – Plano YZ - Escada 15%.....	116

Figura 51 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 15% ..	117
Figura 52 - Concentração da fração de água – Plano YZ – Escada 15%...	117
Figura 53 - Vista isométrica do escoamento – Escada 15%.....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos impactos hidrológicos da instalação de placas solares. Fonte: Edalat, 2017.....	29
Tabela 2 - Coeficientes empíricos do modelo SST $k - \omega$ .....	69
Tabela 3 – Resumo dos trechos com necessidade de escada hidráulica. ...	90
Tabela 4 - Trechos de escada hidráulica de referência. ....	91
Tabela 5 – Largura e verificação do regime de escoamento para as escadas típicas.....	93
Tabela 6 – Dimensionamento escada-01 – regime <i>nappe flow</i> . ....	94
Tabela 7 - Dimensionamento Escada-07 - regime <i>skimming flow</i> . ....	95
Tabela 8 - Dimensionamento Escada-15 - regime <i>skimming flow</i> . ....	96
Tabela 9 - Dimensionamento Escada-13 - regime <i>skimming flow</i> . ....	97
Tabela 10 – Dados das malhas computacionais geradas. ....	101
Tabela 11 - Resumo dos resultados Escada 50%.....	108
Tabela 12 – Resumo dos resultados Escada 30%. ....	111
Tabela 13 - Resumo resultados Escada 20%.....	115
Tabela 14 – Resumo resultados Escada 15%.....	118
Tabela 15 – Resultados simulação e desvios.....	119

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Regimes de escoamento.....	45
Gráfico 2 - Hidrograma BD-03.....	84
Gráfico 3 - Hidrograma BD-04.....	84
Gráfico 4 – Regime de escoamento para Escada-01.....	92
Gráfico 5 - Regime de escoamento para Escada-07.....	92
Gráfico 6 - Regime de escoamento para Escada-13.....	92
Gráfico 7 – Regime de escoamento para Escada-15.....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

CFD – *Computational Fluid Dynamics*;

CAE- *Computer-aided engineering*;

MDF – Método das Diferenças Finitas;

MEF – Método dos Elementos Finitos;

MVF – Método dos Volumes Finitos;

UFV – Usina Fotovoltaica;

HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*;

NA1 – regime *Nappe Flow* do tipo 1;

NA2 – regime *Nappe Flow* do tipo 2;

NA3 – regime *Nappe Flow* do tipo 3;

TRA1 – regime de transição do tipo 1;

TRA2 – regime de transição do tipo 2;

SK1 – regime *Skimming Flow* do tipo 1;

SK2 – regime *Skimming Flow* do tipo 2;

SK3 – regime *Skimming Flow* do tipo 3;

RANS – Equações Médias de Reynolds;

LES – *Large Eddy Simulation*;

DNS – *Direct Numerical Simulation*;

RNG – renormalização de grupo;

VOF – *volume of fluid*;

PI – Piauí;

SisCCoH - *System for Calculations of Hydraulic Components*;

CN – *curve number*;

BD – bacia de detenção;

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\bar{\tau}_e$  – declividade média da linha de energia;
- $\Delta E_V$  – variação de energia no topo do vertedouro e a base da calha em degraus;
- $\bar{C}$  – concentração média de ar;
- $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  – constantes do modelo  $k - \varepsilon$ ;
- $C_{2\varepsilon}^*$  – constante ajustada para o modelo de  $k - \varepsilon$  (RNG);
- $CD_{k\omega}$  – parcela positiva do termo de difusão cruzada;
- $C_u$  – constante do modelo de viscosidade turbulenta;
- $C_v$  – constante do modelo de viscosidade efetiva turbulenta;
- $D_h$  - diâmetro hidráulico;
- $E_0$  – energia específica no pé do vertedouro;
- $E_m$  – energia disponível na crista do vertedouro;
- $E_r$  – energia residual na base do vertedouro de calha em degraus;
- $E_r'$  - energia residual na base do vertedouro de calha lisa;
- $F_1$  – função de mistura;
- $F_2$  – função de mistura para viscosidade turbulenta no modelo  $SST - k - \omega$ ;
- $F\gamma^*$  - número de Froude em termos de rugosidade;
- $G_b$  – geração da energia cinética turbulenta devido às flutuações de velocidade;
- $G_k$  – geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média;
- $H_j$  – energia total do escoamento a jusante;
- $H_M$  – energia total do escoamento a montante;
- $H_v$  – altura do vertedouro;
- $L_A$  – posição do início da aeração;
- $L_p$  – comprimento a partir do desenvolvimento da camada limite;
- $Pr_t$  – número de Prandtl turbulento para energia;
- $S_\Phi$  – termo fonte na variável de interesse;
- $S_{Mx,y,z}$  – termo fonte (parcela relativa à coriolis e gravidade);
- $S_{ij}$  – componente da deformação linear;
- $Vol_{\text{água}}$  – volume de água em um volume de controle;
- $Vol_{\text{ar}}$  – volume de ar em um volume de controle;

$Y_M$  – contribuição da taxa de dissipação total devido a variação volumétrica (líquido compressível);

$c_f$  – coeficiente de atrito;

$c_f'$  - coeficiente de atrito para calhas lisas;

$d_{90}$  – profundidade equivalente de ar a uma concentração de ar de 90%;

$g_i$  – aceleração da gravidade na direção  $i$ ;

$i_e$  – declividade da linha de energia;

$k_r$  – rugosidade específica de uma calha lisa;

$\bar{u}$  – componente média da velocidade;

$\hat{\nu}$  – viscosidade cinemática;

$\nu_t$  – viscosidade turbulenta;

$y_0$  – lâmina da água na base do vertedouro;

$y_A$  – lâmina do escoamento na posição de início da aeração;

$y_c$  – lâmina crítica do escoamento;

$y_n$  – lâmina da água de escoamento uniforme;

$\alpha_1$  – coeficiente de Coriolis;

$\alpha_k$  e  $\alpha_\varepsilon$  - inverso do número de Prandtl turbulento, para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente;

$\mu_{eff}$  – viscosidade efetiva turbulenta;

$\mu_t$  – viscosidade turbulenta;

$\sigma_d, \beta^*, \sigma_{\omega 2}$  – constante empírica do modelo  $SST - k - \omega$ ;

$\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  – número de Prandtl turbulento para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente;

$\tau_{ij}$  – componente da tensão viscosa;

$\Gamma$  – termo de difusão;

$\Delta E'$  - variação de energia entre calha lisa e calha em degraus;

$\Delta E$  – variação de energia;

$\Delta H$  – perda de carga total;

$\Delta S$  – variação de distância longitudinal;

$\Delta l$  – distância entre as seções de montante e jusante;

$\Phi$  – variável de interesse (equação de transporte);

$A$  – área da seção transversal do canal;

$B$  – largura da calha;

$C$  – concentração de ar;

$D$  – parâmetro adimensional para cálculo da concentração média;

$Fr$  – número de Froude;

$H$  – altura do degrau;

$I$  – declividade do canal;

$K$  – pressão média negativa no espelho dos degraus;

$L$  – comprimento do degrau;

$L'$  - altura média do degrau de início de aeração;

$N$  – número de degraus;

$Q$  – vazão;

$Rh$  - raio hidráulico;

$S$  – declividade da linha de energia específica;

$S$  – módulo do tensor deformação médio  $S_{ij}$

$V$  – velocidade média de escoamento;

$V_c$  – velocidade crítica;

$d$  – profundidade equivalente de ar no escoamento;

$f$  – fator de atrito de Darcy-Weisbach;

$g$  – aceleração da gravidade;

$k$  – altura de rugosidade ou rugosidade relativa ;

$k$  – energia cinética turbulenta;

$n$  – rugosidade de Manning;

$p$  – pressão média;

$q$  – vazão específica;

$u, v e w$  – componentes vetoriais em (i, j,k) do vetor velocidade;

$u'$  - componente variável no tempo da velocidade;

$x, y e z$  – coordenadas do sistema cartesiano tridimensional;

$y$  – lâmina da água no escoamento;

$\alpha$  – inclinação do paramento de jusante do vertedouro com a horizontal;

$\beta$  – coeficiente de expansão térmica;

$\gamma$  – peso específico da água;

$\delta$  – espessura da camada limite;

$\varepsilon$  – taxa de dissipação de energia;

$\eta$  – deformação viscosa volumétrica;

$\mu$  – viscosidade do fluido;

$\rho$  – massa específica do fluido;

$\sigma$  – tensão superficial;

$\tau$  – tensor de tensões moleculares;

$\varphi$  – dissipação de energia média no degrau;

$\omega$  - taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	22
1.2	OBJETIVOS.....	23
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>23</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>25</b>
2.1	DRENAGEM DE USINAS SOLARES .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Ciclo Hidrológico</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Impactos no Uso do Solo na Implantação de Usinas Solares</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Erosão do Solo em Vertentes</b> .....	<b>29</b>
2.1.3.1	<i>Fatores Controladores da Erosão</i> .....	30
2.1.3.1.1	Erosividade .....	30
2.1.3.1.2	Erodibilidade .....	30
2.1.3.1.3	Cobertura Vegetal.....	31
2.1.3.1.4	Manejo dos Solos .....	31
2.1.3.2	<i>Processos Hidrológicos em Talvegues</i> .....	32
2.1.3.2.1	<i>Splash</i> .....	32
2.1.3.2.2	<i>Runoff</i> .....	32
2.1.3.2.3	<i>Piping</i> .....	32
2.1.3.3	<i>Tipos de Erosão</i> .....	33
2.1.3.3.1	Erosão Laminar.....	33
2.1.3.3.2	Erosão Linear.....	33
<b>2.1.3.3.2.1</b>	<b>Sulcos</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1.3.3.2.2</b>	<b>Ravinas</b> .....	<b>34</b>
<b>2.1.3.3.2.3</b>	<b>Voçorocas</b> .....	<b>34</b>
2.2	DESCIDAS D'ÁGUA EM DEGRAUS .....	35
<b>2.2.1</b>	<b>Regimes de Escoamento em Degraus</b> .....	<b>35</b>
2.2.1.1	<i>Regime de Escoamento em Quedas Sucessivas (Nappe Flow)</i> .....	36
2.2.1.1.1	Impacto total do jato com formação de ressalto hidráulico – NA1	
	37	
2.2.1.2	<i>Impacto total do jato sem formação de ressalto hidráulico – NA2</i> .....	38
2.2.1.3	<i>Impacto parcial do jato – NA3</i> .....	38

2.2.1.3.1	Crêterios de ocorrência do escoamento em quedas sucessivas	38
2.2.1.4	<i>Regime de Escoamento em Transi�o</i> .....	39
2.2.1.4.1	Sub-regime de transi�o primário – TRA1 .....	40
2.2.1.4.2	Sub-regime de transi�o secundário – TRA2 .....	41
2.2.1.5	<i>Regime de Escoamento Deslizante em Turbilhões (Skimming Flow)</i> .....	41
2.2.1.5.1	Escoamento com recircula�o instável e com interferência esteira – degrau (wake-step interference) – SK1 .....	42
2.2.1.5.2	Escoamento com circula�o instável e com interferência esteira – esteira (wake-wake interference) – SK2 .....	43
2.2.1.5.3	Escoamento com recircula�o estável ( <i>recirculating cavity flow</i> ) – SK3	43
2.2.1.5.4	Cr�terios de ocorr�ncia do escoamento deslizante sobre turbilh�es	44
<b>2.2.2</b>	<b>Aera�o do Escoamento</b> .....	<b>45</b>
2.2.2.1	<i>Posi�o de Início de Aera�o</i> .....	45
2.2.2.2	<i>Concentra�o de Ar</i> .....	48
<b>2.2.3</b>	<b>Dissipa�o de Energia</b> .....	<b>50</b>
2.2.3.1	<i>Fator de Resist�ncia</i> .....	50
2.2.3.2	<i>Dissipa�o de Energia</i> .....	52
<b>2.2.4</b>	<b>Press�es Atuantes nos Degraus</b> .....	<b>55</b>
2.3	DIN�MICA DOS FL�UIDOS COMPUTACIONAL .....	56
<b>2.3.1</b>	<b>Princ�pios Governantes</b> .....	<b>57</b>
2.3.1.1	<i>Conserva�o da massa</i> .....	58
2.3.1.2	<i>Conserva�o da quantidade de movimento</i> .....	58
<b>2.3.2</b>	<b>Equa�es de Navier-Stokes para fluidos Newtonianos</b> .....	<b>59</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Modelos de Turbul�ncia</b> .....	<b>62</b>
2.3.3.1	<i>Modelos das Equa�es Médias de Reynolds (RANS)</i> .....	63
2.3.3.1.1	Modelo $k - \varepsilon$ (padrão) .....	64
2.3.3.1.2	Modelo $k - \varepsilon$ (RNG) .....	65
2.3.3.1.2.1	<b>Modelagem da Gera�o de Energia Cinética Turbulenta</b> .....	<b>67</b>
2.3.3.1.2.2	<b>Efeito da flutua�o na turbulência</b> .....	<b>67</b>
2.3.3.1.3	Modelo $SST - k - \omega$ .....	67
2.3.3.1.3.1	<b>Modelagem da Gera�o de Energia Cin�tica Turbulenta</b> .....	<b>69</b>
2.3.3.2	<i>Simula�o Num�rica Direta (DNS – Direct Numerical Simulation)</i> .....	70

2.3.3.3	<i>Modelo de Simulação de Grandes Escalas “Large Eddy Simulation” (LES).</i>	
	70	
<b>2.3.4</b>	<b>Métodos para discretização numérica</b>	<b>71</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Modelos Multifásicos</b>	<b>72</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>74</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA OBRA	74
3.2	FLUXO DO TRABALHO	74
<b>3.2.1</b>	<b>Hidrologia da usina</b>	<b>75</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Pré-dimensionamento</b>	<b>75</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Modelagem Numérica via CFD</b>	<b>76</b>
3.2.3.1	<i>Escolha do Software</i>	76
3.2.3.2	<i>Etapas de Modelagem</i>	77
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO</b>	<b>79</b>
4.1	HIDROLOGIA DA USINA	79
<b>4.1.1</b>	<b>Estudo Hidrológico e Hidráulico</b>	<b>79</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Sistema de Drenagem e Vazão de Projeto</b>	<b>82</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Caracterização do Talvegue</b>	<b>85</b>
4.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESCADAS HIDRÁULICAS	91
<b>4.2.1</b>	<b>Dimensionamento Escadas em Regime de Quedas Sucessivas</b>	<b>93</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Dimensionamento Escadas em Regime Deslizante sobre Turbilhões</b>	<b>95</b>
4.3	MODELAGEM NÚMERICA EM CFD	98
<b>4.3.1</b>	<b>Pré-processamento - Geometria</b>	<b>99</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Pré-processamento - Malha</b>	<b>100</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Processamento – Solver</b>	<b>101</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Pós-processamento – Manipulação dos Resultados</b>	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>105</b>
5.1	RESULTADOS – ESCADA 50%	105
5.2	RESULTADOS – ESCADA 30%	108
5.3	RESULTADOS – ESCADA 20%	112
5.4	RESULTADOS – ESCADA 15%	115
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>120</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS	121
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>122</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre as fontes de energia sustentável, a energia solar é favorecida, devido a sua plenitude e crescente acessibilidade. Esta é abundantemente distribuída mais que qualquer outra fonte de energia renovável. (US Energy Information Administration, EIA, 2020).

No Brasil, em vista do aumento constante dos preços da energia elétrica, as chamadas fontes de energia alternativa estão ganhando espaço no mercado. Entre as fontes que merecem destaque em seu potencial de expansão, associado ao menor impacto ambiental, está a energia solar fotovoltaica (Perazzoli *et al* 2020). A tendência atual é de crescimento na implantação de usinas fotovoltaicas centralizadas (grande porte). Os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apontam que, uma vez que todas as usinas cadastradas entrem em operação, a potência associada à geração fotovoltaica no Brasil irá superar 29 GW (ANEEL, 2023).

No entanto, a implantação de usinas solares de grande porte necessita de muito espaço, e sua instalação pode potencialmente gerar impactos negativos no meio-ambiente, mas isto depende no modo que a planta solar é construída e mantida. (Hernandez *et al* 2019, 2014, Moore-O'Leary *et al* 2017).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O processo construtivo de usinas solares pode requerer de grandes modificações nas paisagens gerando alterações nas propriedades do solo e vegetação (Amanm *et al* 2015, Jacobson and Deluchi 2011). A adição de superfície impermeável, como os painéis, pode alterar a hidrologia do local de implantação e sua vizinhança (Barnard *et al* 2017), já que a energia e velocidade da água escoada pelos painéis é maior, podendo causar erosão no solo abaixo dos painéis, especialmente se o solo é exposto. (Cook and McCuen 2013).

Portanto, há necessidade de aplicação de uma série de medidas, como a aplicação do projeto de técnicas de drenagem que possibilitam o controle de erosão através de dissipadores de energia a jusante que facilita o escoamento mais rápido e eficaz. (Naruna, 2006).

Dentre os dispositivos de drenagem, destacam-se as descidas d'água em degraus. Estudos brasileiros como de Tozzi (1992), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Arantes (2007), Simões (2008), Vianna e Osmar (2013), mostram que calhas escalonadas em degraus podem reduzir de 60% até 90% da energia total a montante em relação ao valor final de pé para uma vazão específica.

Dentro deste contexto, o presente trabalho discute sobre o dimensionamento de descida d'água em degraus em talvegue a jusante de usina fotovoltaica localizada em Caldeirão Grande do Piauí, PI. Como metodologia de dimensionamento, foi realizado uma modelagem numérica através de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

A Modelagem Numérica de Fluidos ou Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD* segundo a literatura inglesa) é o ramo da mecânica dos fluidos responsável pela resolução e análise de escoamentos através de algoritmos e métodos numéricos. (Faria, 2014).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), os *softwares* utilizados para a modelagem numérica de fluidos ainda não são aplicados na prática de engenharia como outros *softwares* de CAE (*computer-aided engineering*). Isso se deve ao tempo de processamento para resolver as equações de Navier-Stokes, que mesmo em modelos discretos de Diferenças Finitas (MDF), Elementos Finitos (MEF) ou Volumes Finitos (MVF) é dispendioso.

Em suma, o presente trabalho busca aliar o uso de modelagem numérica de fluidos com o ambiente de geração de energia fotovoltaica, fomentando o uso desta metodologia para a mitigação de processos erosivos em taludes no ambiente de geração fotovoltaica.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo discutir e elaborar um dimensionamento de escada hidráulica a jusante de uma usina fotovoltaica (UFV) através de modelagem fluidodinâmica computacional (CFD). Considerou-se como estudo de caso uma usina fotovoltaica localizada em Caldeirão Grande do Piauí, PI.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral enunciado, são propostos os seguintes objetivos específicos.

- a) Discutir e analisar a resposta hidrológica da implantação de usinas solares;
- b) Avaliar a funcionalidade de descidas d'água em degraus para mitigação de processos erosivos em talvegues;
- c) Gerar um modelo hidrodinâmico em CFD de descida d'água em degraus;
- d) Realizar análises numéricas com o modelo em CFD e compará-las com os modelos empíricos usuais.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 DRENAGEM DE USINAS SOLARES

#### 2.1.1 Ciclo Hidrológico

O Ciclo Hidrológico se constitui de uma sucessão de vários processos na natureza pelos quais a água inicia o seu caminho indo de um estágio inicial até retornar à posição primitiva. Este fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera é impulsionado fundamentalmente pela energia radiante solar e associado à gravidade e à rotação terrestre (Miranda *et al*, 2010). Dentre os principais processos destacam-se:

- Precipitação: inclui a chuva, a neve e outros processo mediante dos quais a água cai na superfície terrestre. (Chow *et al*, 1988)
- Evapotranspiração: conjunto de processos físicos (evaporação) e fisiológicos (transpiração) responsáveis pela transformação em vapor atmosférico da água precipitada na superfície terrestre (Tucci & Beltrame, 2000).
- Interceptação: capacidade que a vegetação ou outro tipo de obstáculo possuem de reter a chuva nas suas copas. É um processo fortemente dependente das características das precipitações, das condições climáticas, da densidade da vegetação e do comportamento fisiológico das plantas durante o ano (Tucci, 2000).
- Infiltração: processo de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através de vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte que a retém, formando então o teor de umidade de um solo. Corresponde a uma das etapas mais importantes no ciclo hidrológico, uma vez que é responsável pela recarga de aquíferos e influencia diretamente o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão hídrica (Tucci & Beltrame, 2000).

Assim, a água proveniente da chuva ao atingir a superfície terrestre, pode escoar na superfície, em subsuperfície ou subterraneamente. O predomínio e a

importância relativa desses tipos de escoamento dependem da combinação de diversos fatores, em especial das condições climáticas, das características morfométricas, das condições bióticas e edafológicas e das atividades antrópicas. A água que não infiltra na superfície do terreno continua a fluir vertente abaixo, até encontrar um solo mais permeável ou atingir um canal definido de drenagem ou eventualmente um rio. (Bigarella, 2003)

### **2.1.2 Impactos no Uso do Solo na Implantação de Usinas Solares**

Usinas solares de grande porte requerem grandes terrenos o que torna necessário compreender os potenciais efeitos desses projetos nas taxas de erosão e no escoamento superficial, especialmente no impacto nas áreas adjacentes e afluentes d'água. (Cook & McCuen, 2013).

Em um estudo realizado por Cook e McCuen (2013) foi analisada a resposta hidrológica de uma usina solar através da modelagem de um sistema de 30 placas com espaçamento entre elas para veículos de manutenção, com o objetivo de determinar os efeitos que os painéis solares têm nas características do escoamento superficial, variando uma condição de pré-implantação da usina com uma condição de pós-implantação.

Para tal, um modelo foi desenvolvido considerando um declive descendente aplicando um fluxo d'água em uma série de células. Foi definido que cada célula possuiria apenas um painel, sendo esta separada em três seções: *wet*, *dry* e *spacer* (Figura 1). A região *dry* (seca) é a área diretamente abaixo dos painéis, que permanece protegida da exposição direta da chuva. Conforme o painel se movimentava horizontalmente maior é o deflúvio que escoava pelo painel e precipitava diretamente no solo, essa é considerada a região *wet* (úmida). A região *spacer* (espaçamento) se refere ao espaçamento considerado para o trânsito dos veículos de manutenção.

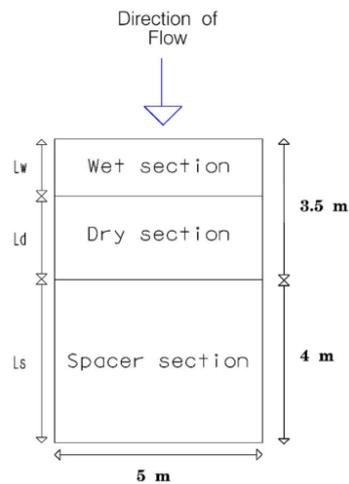


Figura 1 – Regiões *wet*, *dry* e *spacer* em uma única célula. Fonte: Cook & McCuen, 2013.

Em uma condição de pré-implantação a região *dry* não recebe precipitação direta, no entanto conforme o fluxo de água se forma, as regiões subsequentes de cada painel recebem contribuição da célula anterior. Logo, uma região *dry* não é seca e desta forma foi modelada para possuir uma taxa de infiltração.

O trabalho de Cook e McCuen (2013) utilizou este modelo para variar as diferentes características relacionadas ao conjunto que compõe a usina solar, concluindo que a adição de painéis solares em campos preenchidos com grama não afeta em demasia os volumes de escoamento superficial, tempo de pico e vazão. No entanto com a alteração do uso do solo para solo nu ou revestido com cascalho a resposta hidrológica se altera consideravelmente, aumentando a vazão em aproximadamente 72%. Os autores indicam que para casos de usinas onde o solo for exposto deverão ser realizadas medidas para controlar o escoamento superficial excedente das condição pós-implantação.

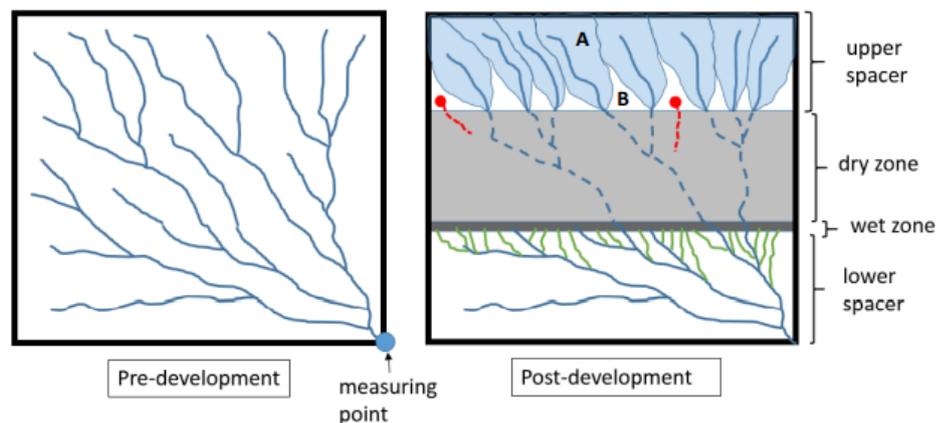
Edalat (2017) também avaliou as diferenças na resposta hidrológica de regiões de instalação de usina solares. O autor através modelagem hidrológica no *software* HEC-HMS delimitou cenários de pré-implantação e pós-implantação variando sua parametrização.

A partir de uma região de estudo teórica, se assumiu que a área é drenada por um único sistema de drenagem natural até uma região a jusante, localizada na porção sudeste da usina. Assim, aplicando a metodologia de distribuição do escoamento superficial de Cook e McCuen (2013), mas com a diferença que regiões de instalação de placas são impermeáveis (Figuras 2 e 3).

Essa premissa foge das condições naturais ao passo que despreza a capacidade de infiltração das áreas abaixo dos painéis. Logo, os resultados obtidos nesta pesquisa para as condições de pós-implantação possuíam escoamento superficial superestimado. No entanto, para suprir as limitações da premissa adotada foi variada a inclinação do painel para que quando fosse voltado a uma direção na qual o escoamento embaixo das placas fosse favorecido.

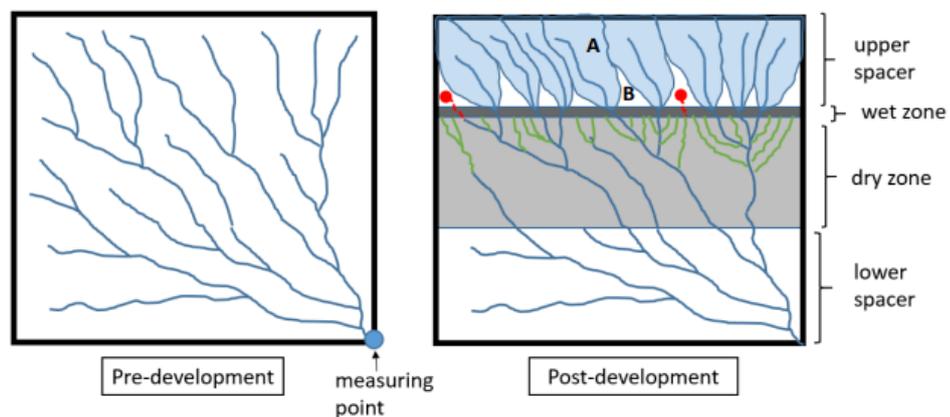
Como parte da parametrização, além de variar as inclinações dos painéis, foi avaliada a variação da capacidade de infiltração do solo através do processo preparação do *site*. Este, consiste na compactação do solo e remoção da camada vegetal para as ações da obra.

Figura 2 - Metodologia pré e pós-implantação (painéis no eixos leste-oeste, voltados ao sul).



Fonte: Edalat, 2017.

Figura 3 - Metodologia pré e pós-implantação (painéis no eixos leste-oeste, voltados ao norte)



Fonte: Edalat, 2017.

Como resultado da tese de Edalat (2017), a resposta hidrológica da área de estudo para a instalações das placas é pequena em comparação a condições de pré e pós-implantação da usina, indo de encontro com o estudo de Cook e McCuen (2013), chegando a apenas 0,9% de aumento de pico de vazão.

No entanto, o volume de escoamento superficial é sensível às práticas de preparação do *site*, devido as alterações de rugosidade e compactação do solo, podendo chegar a 2% de aumento, conforme a Tabela 1 indica.

Tabela 1 – Comparação dos impactos hidrológicos da instalação de placas solares. Fonte: Edalat, 2017.

Parameters	Peak flow (%)	Peak flow time (%)	Runoff volume (%)
Panel installation	0.9	0.3	0.4
Site preparation	1.2	0.6	2

No Brasil, não existem normativas ou guia de projetos para usina solares, muito menos regulamentações ambientais que contemplem a exigência de recuperação do revestimento vegetal do solo.

Neste cenário, as construtoras realizam a raspagem do solo e mantem o solo exposto após a implantação da usina. Esta metodologia, como enaltecem os estudos supracitados, é potencialmente perigosa na carência de um sistema de drenagem eficaz.

### 2.1.3 Erosão do Solo em Vertentes

A erosão dos solos é definida como um processo decorrente do rompimento do equilíbrio existente entre vegetação, solo e clima, oriundo de elementos naturais ou antrópicos (Lal, 1990). Ela ocorre continuamente sobre a superfície terrestre e pode suceder em três fases relacionadas à remoção, ao transporte e à deposição do material removido, submetida ao equilíbrio entre as forças de desagregação e resistência do material em ser erodido (Fendrich, 1997; Guerra, 2008; Morgan, 2005).

Segundo Guerra (2015) e Morgan (2005), os solos são sistema abertos que, devido à dinâmica de fluxo de ganho e perda de energia é perceptível que as ações humanas desenvolvidas sobre as vertentes têm ocasionado impactos ambientais *on site* e *off site*, evidenciando a magnitude dos danos, como a diminuição da fertilidade

natural, bem como a redução de água no solo decorrente da formação de ravinas e voçorocas.

A erosão pode ser classificada de acordo com o agente responsável pelo processo, tipo ou origem e pela natureza da erosão. Denominada de geológica (submetida às condições naturais ou não perturbada) e/ou erosão acelerada (decorrente do aumento das taxas de erosão sobre a erosão geológica ou normal), oriundas do rompimento do equilíbrio do ambiente pelas atividades antrópicas (Camapum de Carvalho et al., 2006; Fendrich, 1997; Rocha, 2012).

### 2.1.3.1 *Fatores Controladores da Erosão*

Segundo Lal (1990) a complexidade da erosão dos solos é fruto da interdependência e inter-relação entre os fatores atuantes: a exemplo dos fatores climáticos, que interferem diretamente na erodibilidade dos solos, que submetidos a condições diferentes de temperaturas e umidade apresentam graus distintos de susceptibilidade à erosão. Ao mesmo tempo a topografia interfere na erosividade por meio da sua influência na pluviosidade e velocidade do escoamento superficial.

#### 2.1.3.1.1 Erosividade

Os fatores climáticos que interferem na erosão dos solos são: a precipitação, a velocidade do vento, o balanço hídrico, as temperaturas médias anuais e sazonais. A erosividade é a capacidade da chuva em causar erosão pela desagregação e transporte das partículas do solo, ocasionada pelo impacto direto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial da água juntamente com as partículas desagregadas (Guerra, 2008; Lal, 1990; Selby, 2005; Wischmeier; Smith, 1965).

#### 2.1.3.1.2 Erodibilidade

A erodibilidade diz respeito a susceptibilidade do solo aos processos erosivos. É uma propriedade intrínseca dos solos, e influenciada pela textura, estrutura, permeabilidade, matéria orgânica, PH dos solos, minerais de argila e óxidos de ferro e alumínio (Guerra, 2008; Lal, 1990).

De acordo com Selby (2005) a erodibilidade é a vulnerabilidade de um solo à erosão devido as condições de chuva e pode ser dividido mediante as características dos solos (composição química e física) e manejo (tratamento do solo, manejo etc.). É a resistência do solo frente ao desprendimento e transporte das partículas (Lal, 1990; Morgan, 2005; Wischmeier; Smith, 1965), e ocorre mediante a ação de duas forças opostas, a força motriz do agente de erosão e a força de resistência do solo.

#### 2.1.3.1.3 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal é essencialmente dependente dos fatores climáticos como as chuvas e temperaturas, bem como do solo, derivado da rocha intemperizada, responsável pela configuração topográfica (Selby, 2005). Os fatores controladores são elucidados didaticamente de forma individual, não obstante, no processo erosivo eles têm ação conjunta, exercendo maior ou menor influência na perturbação do equilíbrio do solo (Lal, 1990).

A vegetação utiliza o solo como suporte para o seu desenvolvimento, absorção de nutrientes, ao mesmo tempo que fornece matéria orgânica e proteção contra impactos das gotas de chuva por meio da diminuição das tensões de cisalhamento (Guerra, 2008; Lane; Shirley; Singh, 1988; Selby, 2005).

A cobertura vegetal é capaz de conferir maior rugosidade aos solos, atuando como agente dissipador da energia proveniente das gotas de chuva, melhorando as taxas de infiltração e reduzindo conseqüentemente a velocidade do escoamento superficial, protegendo o solo contra erosão hídrica de diversas maneiras (Guerra, 2008; Morgan, 2005; Selby, 2005)

#### 2.1.3.1.4 Manejo dos Solos

De acordo com Guerra (2008) as práticas conservacionistas são fundamentais para a diminuição do escoamento superficial. Nesse contexto, as ações que permitem a diminuição da energia cinética da chuva, o aumento da infiltração e o armazenamento de água no solo são fundamentais no controle dos processos erosivos e, por conseguinte na minimização da degradação dos solos (Pereira; Rodrigues, 2022).

### 2.1.3.2 *Processos Hidrológicos em Talvegues*

Os processos hidrológicos na vertente se tornam atuantes através dos mecanismos de infiltração da água no solo, armazenamento e escoamento em superfície e subsuperfície (Guerra 2008; Selby, 2005). É baseado no conhecimento dos processos atuantes na dinâmica hidrogeomorfológica, como o *splash*, o *runoff* e o *piping* que se torna possível o entendimento da ação da água nas suas diversas formas erosivas (Pereira; Rodrigues, 2022).

#### 2.1.3.2.1 *Splash*

Erosão por embate, splash, denominada de erosão por salpicamento, respingo, também entre os sulcos e interril, de acordo com Lal (1990), é oriunda da energia do impacto das gotas de chuvas no solo, desintegrando os agregados, interferindo na porosidade e conseqüentemente no aumento do escoamento superficial devido à formação de crostas (Fendrich, 1997; Guerra, 2015; Lal, 1990; Morgan, 2005).

#### 2.1.3.2.2 *Runoff*

O escoamento superficial, *runoff*, acontece de maneira difusa, mas pode se tornar concentrado à medida que tem continuidade espacial e temporal. Nos estágios evolutivos do processo erosivo a interação do splash com o runoff é capaz de acelerar ainda mais o destacamento do solo (detachment), quanto maior a turbulência do fluxo, maior a capacidade erosiva (Guerra, 2008; Morgan, 2005).

Por conseguinte, técnicas simples de manejo podem reduzir a ocorrência de erosão por ravinamento, como a implementação de barragens, construção de bolsões de captação do escoamento superficial e o cultivo em curvas de nível (Poesen *et. al.*, 2003; Rodrigues, 2014).

#### 2.1.3.2.3 *Piping*

A erosão por *piping* é oriunda do fluxo subsuperficial e ocorre em todas as formas de vertentes (Lal, 1990). Os pipes, denominados também de túneis são

canais abertos pelo escoamento subsuperficial com diâmetros variados. São originados através do próprio intemperismo, que submetido a circunstâncias geoquímicas e hidráulicas específicas possibilitam a dissolução e carreamento de partículas no interior dos solos (Guerra, 2008).

#### 2.1.3.3 Tipos de Erosão

A erosão causada pela água e seus fatores controladores pode caracterizar diversas formas de manifestação na superfície do terreno.

##### 2.1.3.3.1 Erosão Laminar

A erosão laminar, ou em lençol (*sheet erosion*) compreende a remoção de camadas de solos de forma mais ou menos uniforme sobre a superfície de uma área, resultante do escoamento superficial na forma de fluxo laminar delgado ou turbulento e distribui-se pela encosta de maneira anastomosada, sem a delimitação de canais (Guerra, 2008; Lal, 1990; Morgan, 2005).

É um processo difícil de ser observado devido à sutileza da sua manifestação no terreno. A sua percepção ocorre em consequência do aparecimento das raízes, decréscimo na produtividade e marcas nas plantas rasteiras salientando que o solo foi arrastado (Bertoni e Lombardi Netto, 2012; Fendrich, 1997; Morgan, 2005).

##### 2.1.3.3.2 Erosão Linear

A erosão linear é decorrente do escoamento superficial concentrado, e divide-se em três tipos: sulcos, ravinas e voçorocas. A interação entre os mecanismos envolvidos no estabelecimento dos processos e a possibilidade de associação entre as formas, intrincam a conceituação dessas feições exclusivamente por sua morfologia e localização na paisagem (Poesen; Vandaele; Wesemael, 1996).

###### 2.1.3.3.2.1 Sulcos

Rodrigues (2014) descreve os sulcos e ravinas como incisões de pouca profundidade, geometricamente alongadas, manifestadas no solo em função dos fluxos hídricos concentrados conforme a rugosidade do terreno, comumente em áreas desprovidas de cobertura vegetal, em terras agricultáveis, pastagens e estradas.

#### 2.1.3.3.2.2 Ravinas

Para Guerra (2015) e Lal (1990) as ravinas são incisões nas encostas, resultante da evolução dos estágios *sheet erosion* para o *rill erosion* provenientes da concentração do *runoff*, podendo representar o estágio inicial de um processo erosivo mais violento.

De acordo com Pereira e Rodrigues (2022), enquanto o processo evolutivo da erosão ocorrer exclusivamente pela dinâmica associada ao escoamento superficial, seja ele laminar ou concentrado, a forma resultante será sempre uma ravina, independentemente da sua profundidade ou extensão. A própria complexidade em considerar a dimensão da feição é considerada como um atributo classificatório.

#### 2.1.3.3.2.3 Voçorocas

A voçoroca é proveniente de um processo morfogenético que pode causar desequilíbrio ao meio ambiente (Camapum De Carvalho *et al.* 2006). A perda de solo, o assoreamento de canais fluviais e fundo de vales, a supressão da vegetação devido à incisão erosiva, as modificações hidrodinâmicas na área condicionam danos socioeconômicos e ambientais imensuráveis (Albuquerque e Vieira, 2014).

A voçoroca corresponde ao estágio mais avançado da feição erosiva, na qual necessita de maiores empenhos para a sua contenção e elevado custo de recuperação da área degradada. Além da erosão superficial, o aprofundamento dessa feição no solo pode atingir o lençol freático e desencadear as surgências de água, e conseqüentemente o carreamento dos sedimentos e o aparecimento de vazios no interior do solo (Camapum De Carvalho *et al.* 2006; IPT, 1989).

De acordo com Pereira e Rodrigues (2022), as voçorocas são desenvolvidas através de antigas cicatrizes formadas pelos movimentos de massa, pelo

aprofundamento de sulcos e ravinas, pela formação dos dutos, mediante a atuação concomitante dos diferentes mecanismos típicos da morfogênese da vertente, atuantes em diversas escalas temporais e espaciais, tendo como base o próprio sistema hidrogeomorfológico.

Portanto, as alterações antrópicas no equilíbrio do solo, quando expostas à variável temporal resultam em processos erosivos. Logo, são necessárias medidas mitigatórias de controle de erosão, tal qual a proposta neste trabalho.

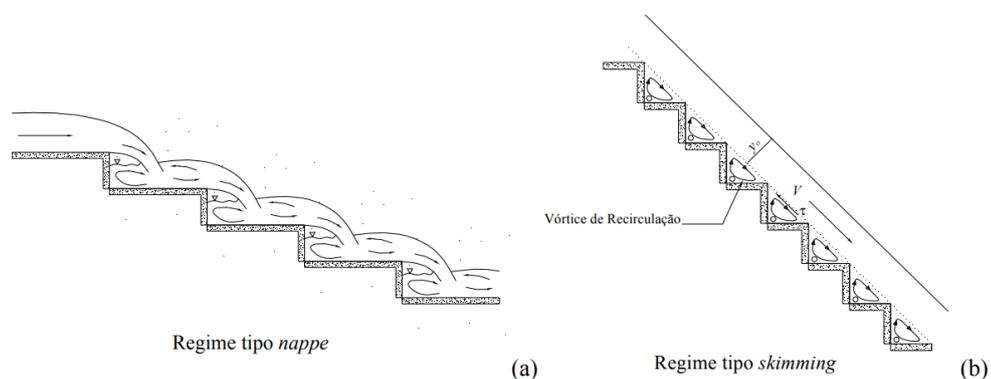
## 2.2 DESCIDAS D'ÁGUA EM DEGRAUS

Segundo Guo (2009) quando canais possuem declividade elevada para sua condição de projeto, o escoamento tende a produzir velocidades elevadas e turbulência, podendo potencialmente provocar a erosão do leito do canal. Então para mitigar a degradação dos canais, são usualmente projetadas estruturas em degraus para criar um alteamento no nível do canal a montante e uma bacia de dissipação a jusante Tomaz (2014).

### 2.2.1 Regimes de Escoamento em Degraus

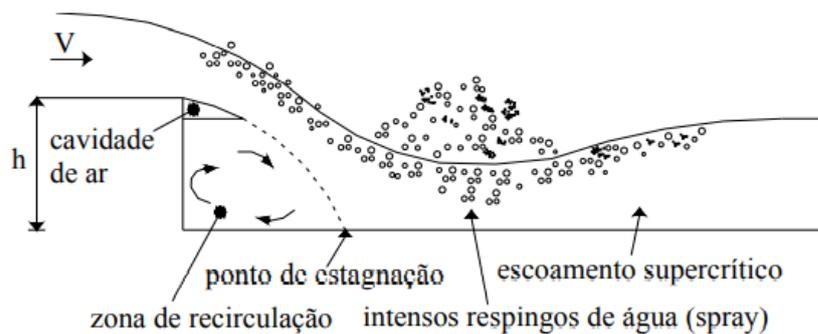
Sorensen (1985) concluiu que ocorrem dois tipos distintos de escoamentos em função da vazão, o primeiro denominado de escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*) (Figura 4a), para vazões menores e escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*) (Figura 4b) para as vazões maiores.

Figura 4 - Esquema de *nappe flow* (a) e de *skimming flow* (b). Fonte: Adaptado de CHANSON, 2002.



Ohtsu e Yasuda (1997) determinaram um terceiro regime de escoamento como regime de transição (Fig. 5). Trata-se de um escoamento intermediário entre o escoamento em quedas sucessivas e o deslizante sobre turbilhões. Suas características são divergentes dos dois anteriormente descobertos, do ponto de vista da formulação matemática aos dados experimentais.

Figura 5 – Regime de escoamento do tipo de transição. Fonte: Adaptado de CHANSON, 2002.



### 2.2.1.1 Regime de Escoamento em Quedas Sucessivas (*Nappe Flow*)

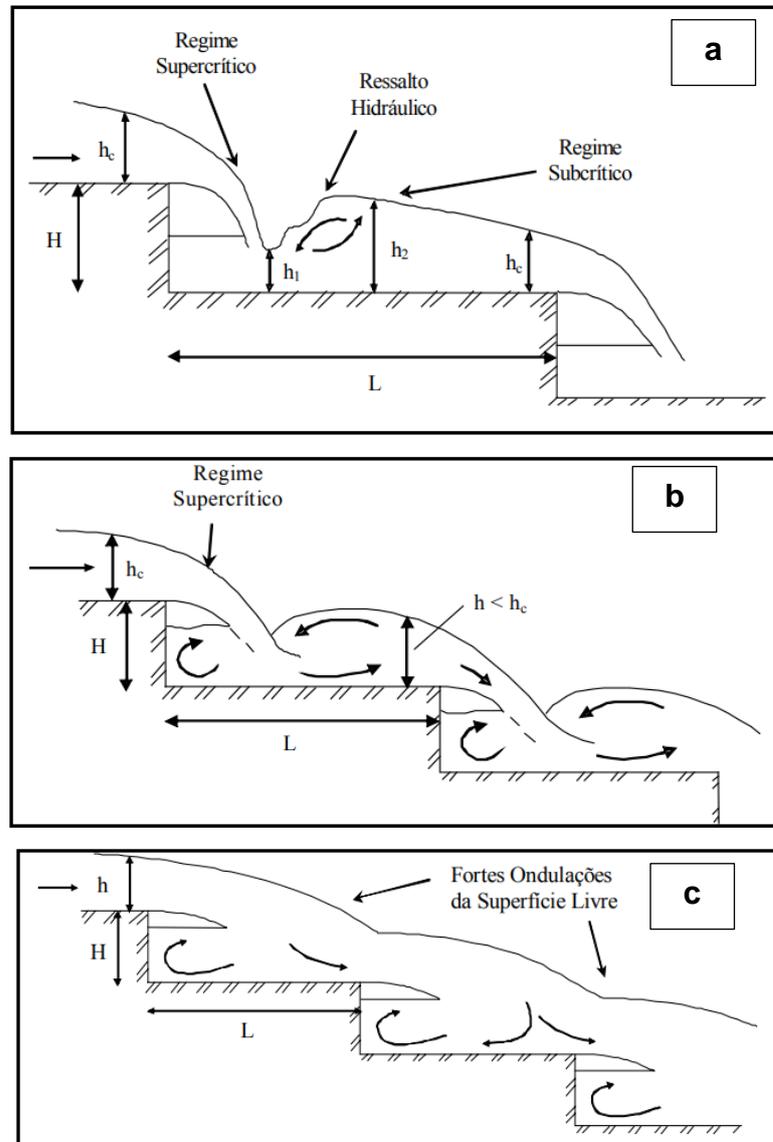
No regime de escoamento em quedas sucessivas, a queda total é dividida em inúmeras pequenas quedas livres. A água prossegue em uma série de mergulhos de um degrau a outro. O escoamento em cada degrau atinge o degrau abaixo com um jato em queda livre, seguido por um ressalto hidráulico em muitos casos.

A energia dissipada ocorre pela dispersão do jato no ar, pela mistura do jato no degrau e com a formação ou desenvolvimento de um ressalto hidráulico no degrau (Rajaratnam, 1990). Para um regime de escoamento tipo *nappe*, os degraus precisam ser relativamente grandes. Esta situação não é sempre possível, mas pode ser aplicada em vertedores ou canais com pouca inclinação ou em pequenos riachos canalizados.

Chanson (1994), subdividiu esse regime de escoamento em três tipos (Figura 6):

- a) Ressalto plenamente desenvolvido – NA1;
- b) Ressalto parcialmente desenvolvido – NA2;
- c) Sem formação de ressalto – NA3;

Figura 6 – Subdivisões dos escoamentos em quedas sucessivas. (a) impacto total do jato com formação do ressalto hidráulico, (b) impacto do jato e formação parcial do ressalto hidráulico e (c) impacto do jato sem formação do ressalto hidráulico.



#### 2.2.1.1.1 Impacto total do jato com formação de ressalto hidráulico – NA1

O jato proveniente de um degrau anterior, realiza o impacto total no piso, formando um ressalto hidráulico completo ao longo do seu comprimento. Desta forma o regime supercrítico passa para subcrítico dissipando energia, seguindo o escoamento até o degrau subsequente.

A partir de resultados de outros autores Chanson (1994a), parametrizou o alcance do jato e o comprimento do ressalto, estabelecendo os limites para ocorrência do escoamento com formação completa do ressalto hidráulico:

$$\frac{y_c}{H} \leq 0,0916 \left(\frac{H}{L}\right)^{-1,276}, \quad (1)$$

onde  $H$  e  $L$  são, respectivamente, a altura e comprimento do degrau e  $y_c$  é a profundidade crítica do escoamento. A equação 36 foi desenvolvida para o intervalo de  $0,2 \leq H/L \leq 6$ .

#### 2.2.1.2 *Impacto total do jato sem formação de ressalto hidráulico – NA2*

O jato proveniente de um degrau anterior, realiza o impacto total no piso, no entanto a ausência de comprimento no degrau faz com que não se forme ressalto, seguindo o escoamento até o degrau subsequente.

#### 2.2.1.3 *Impacto parcial do jato – NA3*

O jato proveniente de um anterior, não realiza o impacto total no piso, uma vez que as características geométricas do degrau não permitem a sua interceptação, seguindo o escoamento até o degrau subsequente.

Neste tipo de escoamento não há uma seção de controle, sendo o número de Froude maior que a unidade ao longo de todo o degrau. Cabe destacar, que a região a jusante do impacto do jato se torna altamente aerada e o escoamento apresenta característica tridimensionais, sendo possível notar ondas de choque, Chanson (2002).

##### 2.2.1.3.1 Critérios de ocorrência do escoamento em quedas sucessivas

Diversos autores estudaram o comportamento de escoamentos em degraus através de modelos experimentais reduzidos e adaptação de curvas. No entanto, a previsão de ocorrência de escoamentos de maneira geral é de complexa parametrização matemática, levando a um determinado grau de erro nas expressões encontradas.

Chanson (1993), a partir de obras de vertedouros em degraus e dados de outros autores, sugere condições de verificação para o escoamento em quedas sucessivas:

$$\tan \alpha = \frac{H}{L} < 0,20 \text{ e } \frac{y_c}{H} < \frac{1}{3}, \quad (2)$$

onde:  $\alpha$  é o ângulo de inclinação do paramento de jusante do vertedouro com a horizontal.

Estudando calhas com declividade de  $5^\circ$  a  $55^\circ$  Ohtsu *et al.* (2001) determinaram uma expressão para início de escoamento em quedas sucessivas:

$$\frac{H}{y_c} = 0,57(\tan \alpha)^3 + 1,3. \quad (3)$$

A partir de uma base maior de dados Chanson (2001) analisou os limites de escoamento e propôs uma nova equação admitindo um regime de transição. Neste novo estudo o autor validou relações de  $H/L$  entre 0,05 e 1,70;

$$\frac{y_c}{H} = 0,89 - 0,4 \left( \frac{H}{L} \right). \quad (4)$$

Fael e Pinheiro (2003), determinaram a partir de modelo físicos reduzidos, com relações de  $H/L$  variáveis entre 0,2 e 0,5, degraus de 5 cm e vazão específica máxima de  $0,066 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , a condição de ocorrência de um escoamento em quedas sucessivas:

$$\frac{y_c}{H} \leq 0,125 \left( \frac{H}{L} \right)^{-1,313}. \quad (5)$$

#### 2.2.1.4 Regime de Escoamento em Transição

O regime de escoamento de transição opera entre os escoamentos de quedas sucessivas e deslizante sobre turbilhões.

Segundo Dai Prá (2004), o que se sabe é que para pequenas vazões ocorre o regime em quedas sucessivas (nappe flow) e para grandes vazões o regime deslizante sobre turbilhões (skimming flow). No entanto, a caracterização do regime de transição é menos refinada e não se adere a regressões com dados experimentais.

Ohtsu e Yasuda (1997) apresentaram o conceito do escoamento de transição delimitado, principalmente, pelas intensas flutuações hidrodinâmicas, não pela exclusividade da faixa de vazões.

O escoamento de transição é caracterizado pela recirculação de água entre degraus e normalmente por uma pequena cavidade de ar próxima a face superior do espelho do degrau. Além dessas características, nota-se um ponto de estagnação que divide o escoamento em duas regiões ao longo do piso do degrau: região de escoamento rotacional e região com intensos respingos d'água. Ainda assim, ao longo do piso do degrau ocorre a desaceleração do escoamento supercrítico (Figura 5), Chanson (2002).

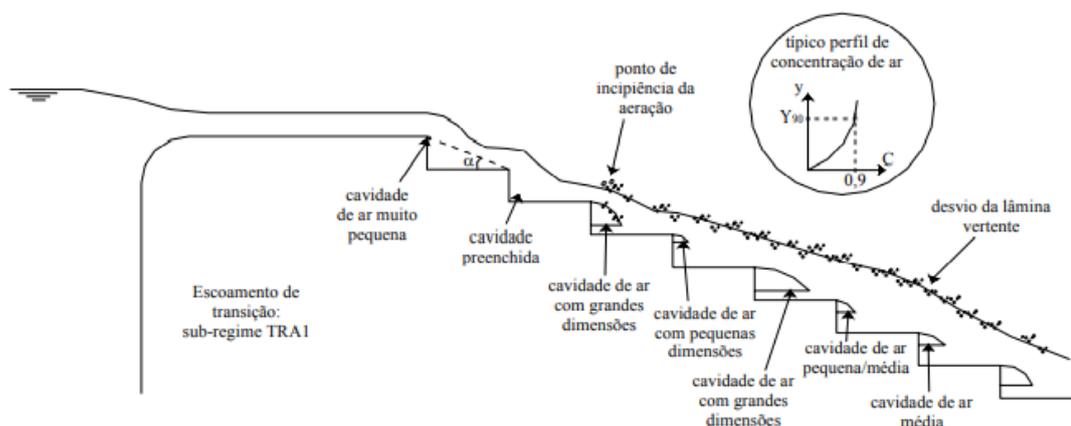
O estudo de Chanson e Toombes (2004), exclusivo para escoamentos de transição, a partir de dados experimentais para canais de angulações e alturas diferentes determinou critérios para ocorrência do regime, descrição física do escoamento, distribuição de velocidades e propriedades do escoamento bifásico.

Portanto, de acordo com o estudo dos autores para uma determinada seção de calha em degraus, medições e escoamento bifásico ar-água, sugere-se a existência de dois sub-regimes de transição.

#### 2.2.1.4.1 Sub-regime de transição primário – TRA1

Neste sub-regime (Figura 7) Chanson e Toombes (2004), observaram que a partir de um ponto de incipiência de aeração ocorre uma alternância irregular entre cavidades de ar grandes e pequenas, sendo a partir desse ponto o início de um desvio da lâmina vertente nos degraus a jusante. A descrição dos autores nota ainda a existência de *spray* em até 1,25 metros além da altura dos muros laterais.

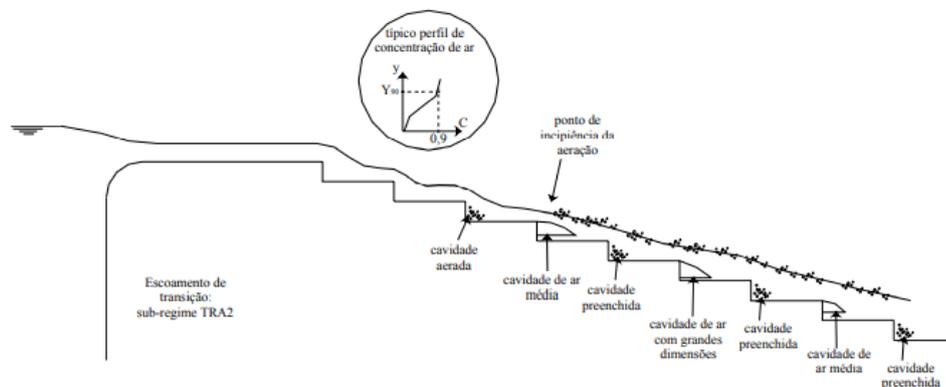
Figura 7 – Escoamento em transição, sub-regime primário TRA1. Fonte: CHANSON e TOOMBES (2004).



### 2.2.1.4.2 Sub-regime de transição secundário – TRA2

O segundo sub-regime (Figura 8) definido pelos autores também apresenta alternância irregular de cavidades de ar além dos degraus com cavidades preenchidas, sendo o seu comportamento de aeração similar ao escoamento deslizante sobre turbilhões.

Figura 8 - Escoamento em transição, sub-regime secundário TRA2. Fonte: CHANSON e TOOMBES (2004).



O trabalho de Chanson e Toombes (2004) desenvolveu limites para localizar o regime de transição. Assim, foram propostas as expressões para limite superior e para limite inferior.

$$\frac{y_c}{H} > 0,9174 - 0,381 \left( \frac{H}{L} \right) \text{ para } 0 < \frac{H}{L} < 1,7 - \text{limite inferior e} \quad (6)$$

$$\frac{y_c}{H} < \frac{0,9821}{\left( \frac{H}{L} + 0,388 \right)^{0,384}} \text{ para } 0 < \frac{H}{L} < 1,5 - \text{limite superior.} \quad (7)$$

### 2.2.1.5 Regime de Escoamento Deslizante em Turbilhões (Skimming Flow)

O escoamento deslizante sobre turbilhões, em descidas ou vertedouros em degraus, ocorre para maiores vazões na escala hierárquica. Seu comportamento de deslocamento entre degraus é coerente, deslizando sobre os degraus, com dissipação de energia através do fluido recirculante preso entre eles.

A linha externa, ligando os vértices superiores dos degraus, forma um pseudofundo sob o qual o escoamento desliza. Abaixo desta linha, um vórtice

recirculatório se desenvolve e é mantido pelo cisalhamento com a água que passa sobre os degraus.

Nos primeiros degraus do vertedouro, o escoamento é liso e não ocorre o carreamento de ar. Em alguns degraus mais abaixo o escoamento é caracterizado pela existência do carreamento de ar e dos vórtices aprisionados. A dissipação de energia no escoamento parece ser aumentada pela transferência de momento para o escoamento recirculatório Chanson (2015).

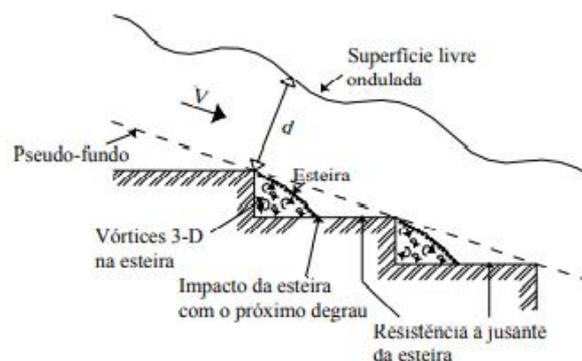
Chanson (2002), por meio de trabalhos anteriores próprios, estabelece três sub-regimes do regime de escoamento deslizante sobre turbilhões:

- a) Escoamento com recirculação instável e com interferência esteira – degrau (*wake-step interference*) – SK1;
- b) Escoamento com circulação instável e com interferência esteira – esteira (*wake-wake interference*) – SK2;
- c) Escoamento com recirculação estável (*recirculating cavity flow*) – SK3;

#### 2.2.1.5.1 Escoamento com recirculação instável e com interferência esteira – degrau (*wake-step interference*) – SK1

A superfície livre apresenta ondulações. Este sub-regime de escoamento (Figura 9) ocorre em menores declividades, onde são formadas cavidades alongadas abaixo do pseudofundo, que impossibilitam a formação de um vórtice estável. São formadas esteiras tridimensionais instáveis que atuam isoladamente em cada degrau gerando uma força de arrasto causada por interferência esteira-degrau.

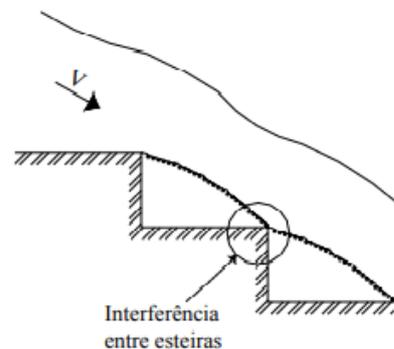
Figura 9 - Recirculação instável com interferência esteira-degrau - SK1. Fonte: CHANSON (2002).



### 2.2.1.5.2 Escoamento com circulação instável e com interferência esteira – esteira (*wake-wake interference*) – SK2

Este sub-regime se forma em declividades maiores de  $12^\circ$  a  $15^\circ < \alpha < 15^\circ$  a  $25^\circ$ , onde a extremidade a jusante de cada esteira interfere na próxima esteira e as forças de arrasto são pequenas. Assim, a superfície livre é menos ondulada (Figura 10).

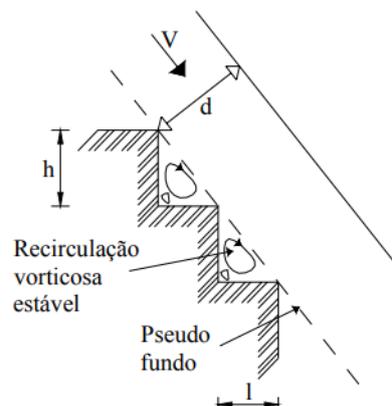
Figura 10 – Recirculação instável com interferência esteira-esteira – SK2. Fonte: CHANSON (2002).



### 2.2.1.5.3 Escoamento com recirculação estável (*recirculating cavity flow*) – SK3

Em declividades maiores, a dimensão reduzida dos degraus proporciona a formação de cavidades menores que favorecem a formação de vórtices estáveis abaixo do pseudofundo. A manutenção dos vórtices é essencial para a dissipação de energia (Figura 11).

Figura 11 – Escoamento com recirculação estável – SK3. Fonte: CHANSON (2002).



#### 2.2.1.5.4 Critérios de ocorrência do escoamento deslizante sobre turbilhões

A mudança de regime de escoamento pode ser verificada com a alteração de declividade e aumento da vazão. Os estudos dirigidos a escoamento em degraus determinaram limites superiores e inferiores para a sua ocorrência, como discutido nos itens anteriores. Isso também foi realizado para escoamento deslizante sobre turbilhões através de dados experimentais e regressões.

Chanson (1994b), propôs através do limite da profundidade crítica associada à geometria um critério para ocorrência do regime deslizante sobre turbilhões. Assim, o valor calculado se trata de um limite inferior para ocorrência do regime:

$$\frac{y_c}{H} = 1,057 - 0,465 \left( \frac{H}{L} \right). \quad (8)$$

Posteriormente Chanson (2001), refez seus estudos utilizando as proposições a respeito de escoamento de transição, determinando uma nova expressão para limite inferior:

$$\frac{y_c}{H} = 1,2 - 0,325 \left( \frac{H}{L} \right). \quad (9)$$

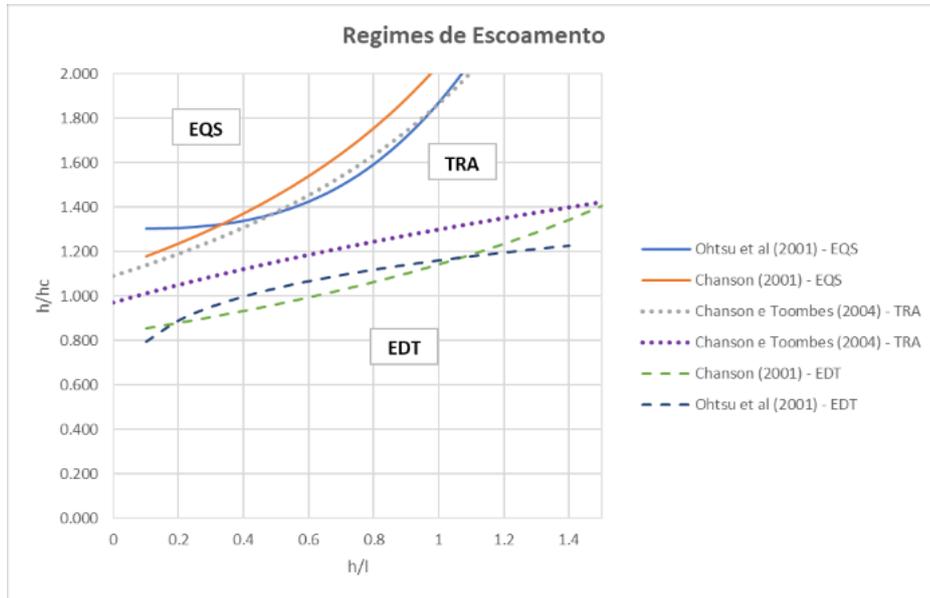
As equações de Chanson foram determinadas sob condições de  $H/L$  de 0,05 e 1,7.

Ohtsu *et al* (2001), desenvolveu um limite inferior para escoamento deslizante sobre turbilhão:

$$\frac{H}{y_c} = 1,16(\tan \alpha)^{0,165}. \quad (10)$$

A partir das expressões de ocorrência dos regimes de escoamento em degraus podemos formar uma caracterização global dos limites superiores ou inferiores (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Regimes de escoamento



## 2.2.2 Aeração do Escoamento

O fenômeno de aeração consiste na incorporação do ar da atmosfera na mistura do escoamento, resultando em uma aparência branca, agitada e com superfície livre mal definida.

O processo de aeração do escoamento é essencial para a dissipação de energia. Em um regime deslizante a fricção da água na superfície livre com atmosfera, a partir do atingimento da camada limite, se inicia o processo de incorporação de ar no escoamento, Chanson (2015).

Pegram *et al* (1999), descrevem o processo de aeração pela entrada de ar nas camadas inferiores e por gotas d'água nas camadas superiores. Essa descrição vai de encontro com o conceito de concentração de ar, proposto por Straub e Anderson (1958), onde a partir do fundo da calha esta aumenta de um valor finito até um valor assintótico de 100% na superfície livre.

### 2.2.2.1 Posição de Início de Aeração

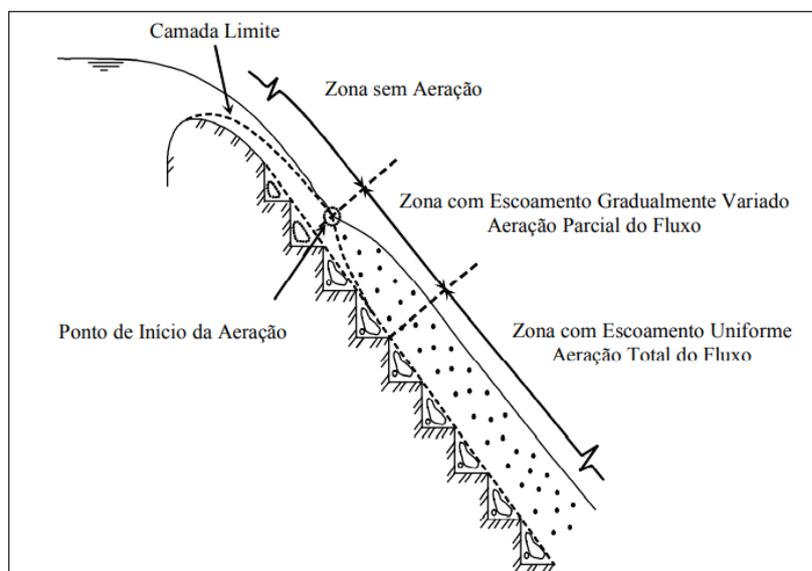
O início da aeração ocorre quando a energia cinética do escoamento é superior aos efeitos da tensão superficial. Mesmo com a ocorrência desta condição o escoamento não se torna aerado, para que isso ocorra a camada limite deve estar completamente desenvolvida, Gangadjarajah *et al.* (1970).

Chanson (1993) propôs que a aeração no escoamento em degraus ocorre em três zonas (Figura 12 - Regiões do escoamento sobre em vertedouro em degraus. Fonte: Adaptado CHANSON (1993).):

- Zona sem aeração do fluxo: a partir do início da descida d'água ou vertedouro se desenvolve a camada limite até romper a superfície, indicando o ponto de início de aeração.
- Zona de escoamento gradualmente variado: a partir do ponto de início de aeração se forma uma região de mistura não homogênea de água e ar, de concentração de ar e profundidade variáveis e ascendentes.
- Zona de escoamento uniforme: essa região é caracterizada aeração total do escoamento, onde a concentração de ar, profundidade e velocidade não variam ao longo dos degraus.

Outros autores como Sorensen (1985) e Tozzi (1992) avaliaram escoamentos em degraus em modelos físicos e observaram o aumento da profundidade ao longo da calha.

Figura 12 - Regiões do escoamento sobre em vertedouro em degraus. Fonte: Adaptado CHANSON (1993).



Bauer (1954) *apud* Campbell *et al* (1965) avaliando calhas com declividades de 20°, 40° e 60°, com uma fina malha disposta sobre a calha simulando a rugosidade do concreto, estabeleceu que a razão entre a espessura da camada limite e a distância longitudinal a partir do início do seu desenvolvimento:

$$\frac{\delta}{L_p} = 0,080 \left( \frac{L_p}{k_r} \right)^{-0,233} \quad (11)$$

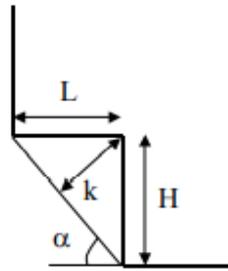
onde  $\delta$  é a espessura da camada limite,  $L_p$  sendo a distância longitudinal a partir do início do desenvolvimento da camada limite e  $k_r$  é rugosidade específica de uma calha lisa.

Tozzi (1992) propõe a mesma equação de Campbell *et al* (1965), para caracterização da posição de aeração, no entanto sugere a alteração da rugosidade específica pela altura de rugosidade nos degraus.

$$\frac{\delta}{L_A} = 0,080 \left( \frac{L_A}{k} \right)^{-0,233}, \quad (12)$$

onde  $L_A$  é a posição do início da aeração e  $k = H \cos \alpha$ , sendo H altura do degrau e  $\alpha$  declividade da calha.

Figura 13 - Detalhe de um degrau típico.



Chanson (1994b) propôs a posição do início de aeração e a profundidade de escoamento neste ponto, para descidas com declividades de 27° a 52°.

$$\frac{L_A}{k} = 9,8(\sin \alpha)^{0,08}(Fr^*)^{0,71} e \quad (13)$$

$$\frac{y_A}{k} = \frac{0,40}{(\sin \alpha)^{0,04}} (Fr^*)^{0,71}, \quad (14)$$

onde  $Fr^*$  é o número de *froude* em termos de rugosidade  $k$ , este pode ser definido por:

$$Fr^* = \frac{q}{\sqrt{gk^3 \sin \alpha}}, \quad (15)$$

onde  $q$  é a vazão específica e  $g$  a aceleração da gravidade.

Iguacel e Garcia (1999) definem a posição de início de aeração como sendo o degrau onde a presença de bolhas de ar é constante na rugosidade formada abaixo do pseudofundo:

$$\frac{L'}{H} = 5,6 \left( \frac{q}{H\sqrt{gH}} \right)^{0,8}, \quad (16)$$

onde  $L'$  é altura média do degrau de início de aeração.

Chanson e Toombes (2002a) em observações experimentais com uma calha de 21,8° de declividade e degraus de 10cm de altura, notaram a presença de bolhas de ar na região limitada entre os degraus e o pseudofundo em um ou dois degraus acima do ponto de início de aeração. Assim, determinaram equação para o ponto de início válida para declividades de 16° a 22° e  $Fr^* < 3,8$ :

$$\frac{L_A}{k} = Fr^* \frac{12,34}{(\sin a)^{0,0796}} \quad (17)$$

Sanagiotto (2003) assume a posição de início de aeração como a região de estabilidade dos vórtices recirculatórios aerados, formados pela rugosidade dos degraus. Assim, determinou equação para o ponto de início válida para vazões específicas de 0,03 a 0,7 m<sup>3</sup>/s/m e declividade 1V:0,75H.

$$\frac{L_A}{k} = 9,7721(Fr^*)^{0,7014} e \quad (18)$$

$$\frac{y_A}{k} = 0,3965(Fr^*)^{0,5975} \quad (19)$$

#### 2.2.2.2 Concentração de Ar

O fenômeno de incorporação de ar no escoamento varia conforme o desenvolvimento do fluxo. Desta forma, a concentração de ar (C), razão entre o volume de ar e o volume total da mistura ar-água, também varia (Simões, 2008);

$$C = \frac{Vol_{ar}}{Vol_{ar} + Vol_{\acute{a}gua}} \quad (20)$$

Outra componente importante para escoamentos bifásicos é a profundidade equivalente (d).

$$d = \int_0^{d_{90}} (1 - C) dy, \quad (21)$$

onde em um eixo  $y$  orientado para cima e perpendicular ao pseudofundo e  $d_{90}$  é a profundidade de escoamento aerado correspondente a uma concentração de ar igual a 90%.

A partir de seção transversal retangular, pode-se determinar uma componente física da profundidade equivalente. Assim, determinados uma profundidade fictícia composta apenas por água.

$$d = (1 - \bar{C})d_{90}, \quad (22)$$

onde  $\bar{C}$  corresponde à concentração de ar média independente de uma profundidade de escoamento.

Para estudos de pressões, curvas de cavitação e velocidades finais de escoamento diversos autores se utilizam de equações de previsão da concentração de ar. (Valero, Daniel; Bung, 2016).

No entanto, tendo em vista as dificuldades encontradas nos processos de medição de velocidades em fluxos aerados, seja por tubos de Pitot-Prandtl, micromolinetes ou anemometria, Chanson (1989) propôs o cálculo de velocidade média do fluxo através da equação da continuidade, tomando como referência a profundidade equivalente de água em um escoamento aerado.

Straub e Anderson (1958) determinaram a concentração média de ar para escoamentos uniformes através de uma lei dependente da vazão específica e declividade do canal. Assim a partir desta lei ASCE (1961) propôs a equação:

$$\bar{C} = 0,743 \log \left( \frac{\sin \alpha}{q^{1/5}} \right) + 0,876 \text{ para } q \text{ dado em } \left( \frac{cfs}{ft} \right). \quad (23)$$

Chamani e Rajaratnam (1999) a partir de medições em modelos físicos reduzidos, determinaram a equação empírica para a concentração média em regime de escoamento deslizante sobre turbilhões com aeração total:

$$\bar{C} = 0,93 \log \left( \frac{(\sin \alpha)^{0,1}}{q^{0,3}} \right) + 1,05 \text{ para } q \text{ dado em } \left( \frac{L}{\frac{s}{m}} \right). \quad (24)$$

Matos (2000) propôs que uma equação que é função da altura do vertedouro e da altura crítica de escoamento:

$$\bar{C} = 0,62 - \frac{55,9}{\left( \frac{H_v}{y_c} \right)^2} \text{ para } \frac{H_v}{y_c} \text{ entre } 10 \text{ e } 100. \quad (25)$$

Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004), desenvolveram uma equação para concentração média de ar para escoamento quase-uniforme. Nos seus estudos em diferentes configurações concluíram que a concentração é função de um adimensional  $y/y_c$  e da declividade de descida;

$$\bar{C} = D - 0,30 \exp \left[ -5 \left( \frac{y}{y_c} \right)^2 - 4 \frac{y}{y_c} \right], \quad (26)$$

onde  $D$  é o parâmetro adimensional gerado a partir dos ajustes. Sendo  $D = 0,30$  para  $5,7^\circ \leq \alpha \leq 19^\circ$  e  $0,1 \leq \frac{y}{y_c} \leq \left( \frac{y}{y_c} \right)_{onset}$ . O termo  $\left( \frac{y}{y_c} \right)_{onset}$  consiste no limiar inferior do escoamento deslizante em turbilhões. Caso  $D$  não cumpra os intervalos citados, esta passa a depender exclusivamente da declividade, dado por:

$$D = -2x10^{-4}\alpha^2 + 2,14x10^{-2}\alpha - 3,57x10^{-2}. \quad (27)$$

### 2.2.3 Dissipação de Energia

A dissipação de energia é o principal fator de se optar pelo desenho de uma descida d'água em degraus, uma vez que o objetivo é diminuir a energia residual a jusante, mitigando a erosão nos taludes e aumentando o seu nível de segurança.

#### 2.2.3.1 Fator de Resistência

A relação de dissipação de energia com fator de resistência (atrito) de Darcy-Weisbach ( $f$ ) foi proposta por alguns autores, através da consideração de um fluxo uniforme e profundidade constante na região de fluxo completamente aerado. No entanto, o escoamento uniforme proposto pelos autores deve ser devidamente verificado, uma vez que em regime de escoamento deslizante em turbilhões o comprimento do degrau não favorece a formação de um fluxo uniforme.

Rajaratnam (1990) definiu o coeficiente de resistência a partir de equação de quantidade de movimentado considerando o escoamento plenamente desenvolvido após os primeiros degraus. O coeficiente definido foi relacionado com o fator de resistência pela razão de 1/4;

$$c_f = \frac{f}{4} = \frac{2y_n^3 g \sin \alpha}{q^2}, \quad (28)$$

onde  $y_n$  é profundidade de escoamento uniforme,  $g$  é aceleração da gravidade e  $q$  é vazão específica.

Stephenson (1991) também utilizou o fator de resistência de Darcy-Weisbach, sendo equacionado a partir da equação geral dos escoamentos turbulentos rugosos:

$$f = \left( 1,14 + 2 \log \left( \frac{4y}{k} \right) \right)^{-2}. \quad (29)$$

Chanson (1993) propôs a utilização da equação universal da perda de carga para equacionar o fator de resistência em escoamentos não aerados, no entanto, se tornou a equação em função do diâmetro hidráulico ( $D_h$ ). Caso o escoamento for aerado, deve-se utilizar a profundidade relativa de escoamento, ao invés da profundidade normal;

$$f = \frac{8gy_n^2 \sin \alpha D_h}{q^2}. \quad (30)$$

Em adição ao seu estudo Chanson (1994b) propõe um ajuste na equação para escoamentos gradualmente variados, região onde o escoamento uniforme não está plenamente desenvolvido:

$$f = \frac{8gy_n^2 \sin \alpha}{q^2} \frac{D_h}{4} \frac{\Delta H}{\Delta S}, \quad (31)$$

onde  $\Delta H$  é a perda de carga total ao longo de uma distância longitudinal  $\Delta S$ .

Chanson (1994b) analisou dados experimentais de outros autores e concluiu que o fator de resistência independe do número de Reynolds do escoamento, sendo função apenas da rugosidade relativa ( $D_h/k$ ). O autor também definiu uma equação para fator de resistência de descidas d'água com declividade menor que  $12^\circ$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,42 \ln \left( \frac{D_h}{k} \right) - 1,25. \quad (32)$$

Tozzi (1992) realizou estudos em modelos reduzidos de vertedouros com declividade de 1V:0,75H, variando rugosidades relativas de 5 a 60mm e para 4 vazões específicas entre 86,1 e 201,4 L/s/m. Além destes, foram realizados experimentos para declividade de 1V:6,69H, para as mesmas vazões específicas, mas para valores de rugosidade relativa de 19,8 e 39,6mm.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,16 + 1,24 \log \left( \frac{y}{k} \right) \text{ para } \frac{y}{k} > 1,8; \alpha = 53^\circ \text{ e } 5 \leq k \leq 60\text{mm} \text{ e} \quad (33)$$

$$f = 0,163 \text{ para } \frac{y}{k} \leq 1,8; \alpha = 8,5^\circ \text{ e } 19,8 \leq k \leq 39,6\text{mm}. \quad (34)$$

Chamani e Rajaratnam (1999) determinaram um equacionamento para o coeficiente de resistência (razão de 1/4 com o fator de resistência) em vertedouros em degraus, a partir de um modelo empírico elaborado de dados experimentais de calhas de  $51,34^\circ$  e  $59^\circ$ . Os autores variaram degraus de alturas de 125 a 31,25mm e vazões específicas de 0,07 e 0,21 m<sup>3</sup>/s/m;

$$\frac{1}{\sqrt{c_f}} = 3,85 \log \left( \frac{y}{k} \right) + 3,53. \quad (35)$$

Chanson *et al* (2002) compilou os dados e resultados experimentais de diversos autores, chegando à conclusão de que os fatores de resistência principais são: 0,105, 0,17 e 0,30. Os autores afirmam que a rugosidade proporcionada pelos degraus contribui para o arrasto gerado no pseudofundo, contribuindo para a resistência ao escoamento. Este processo se deve a formação dos vórtices tridimensionais entre os degraus e o pseudofundo, gerando movimentações turbulentas que induzem a dissipação viscosa durante a troca irregular do fluido com a corrente livre, mantendo assim a recirculação e a dissipação de energia (Matos *et al* 1999).

A partir destas afirmações Chanson *et al* (2002) definiu a dissipação de energia em escoamento em degraus como a transferência da quantidade de movimento no escoamento deslizante sobre turbilhões.

$$\xi \left( \frac{V}{\sqrt{gy_n}}; \rho \frac{Vy_n}{\mu}; \frac{g\mu^4}{\rho\sigma^3}; \bar{C}; \frac{y_n}{H}; \frac{B}{H}; \alpha; \frac{k}{H} \right) = 0, \quad (36)$$

onde  $V$  consiste na velocidade média de escoamento,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $y_n$  é a profundidade de escoamento,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\sigma$  é tensão superficial,  $\bar{C}$  é concentração média de ar no escoamento,  $H$  é altura do degrau,  $B$  é a largura da calha,  $\alpha$  declividade do paramento de jusante e  $k$  é altura de rugosidade.

Na equação 36 o primeiro termo é número de Froude, o segundo é o número de Reynolds, o terceiro é o número de Morton, o quarto é a concentração média de ar e os demais são características geométricas da estrutura.

Chanson *et al* (2002) em seu estudo apresenta uma metodologia para o fator de resistência em escoamento deslizante sobre turbilhões a partir da tensão tangencial limite, onde obtiveram um valor igual a 0,20.

### 2.2.3.2 Dissipação de Energia

Sorensen (1985) através de ensaios em modelos físicos reduzidos de vertedouros em degraus, com declividade de 1V:0,78H, degraus de 2,44 cm e vazões específicas variáveis entre 0,006 m<sup>3</sup>/s/m e 0,144 m<sup>3</sup>/s/m., avaliou a dissipação de energia no pé do vertedouro através da variação de velocidade de escoamento. Neste estudo foi verificado que a energia cinética na descida d'água em degraus foi de 6 a 12% daqueles obtidos em uma calha lisa.

Rajaratnam (1990), baseando-se nos dados de Sorensen (1985), propôs a análise da dissipação de energia através da comparação entre calhas lisas e em degraus:

$$\Delta E' = E'_r - E_r, \quad (37)$$

onde  $E'_r$  é a energia residual na base do vertedouro de calha lisa e  $E_r$  é a energia residual na base do vertedouro com calha em degraus:

$$E_r = E'_r = y_0 + \frac{V^2}{2g}, \quad (38)$$

onde  $y_0$  é o nível da água na base do vertedouro.

$$\frac{\Delta E'}{E_r'} = \frac{(1-A) + \frac{F_r'^2}{2} + \frac{(A^2-1)}{A^2}}{1 + \frac{F_r'^2}{2}} \quad (39)$$

O parâmetro adimensional  $A$  é função dos coeficientes de resistência das calhas lisa ( $c_f'$ ) e degraus ( $c_f$ ). Assim, foram estes foram estimados sendo 0,0065 e 0,18 para as condições do ensaio aplicado por Rajaratnam (1990).

Stephenson (1991), assumindo um escoamento uniforme, sugeriu utilizar a equação universal da perda de carga para determinar a dissipação de energia em degraus, criando um equacionamento que relaciona a perda de carga e altura do vertedouro:

$$\frac{\Delta E_V}{H_v} = \frac{H_v - E_r}{H_v} = 1 - \left( \frac{4S}{f} + 1 \right) \left( \frac{f}{8S} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{y_c}{H_v} \right), \quad (40)$$

onde  $\Delta E_V$  é a diferença entre a altura do vertedouro  $H_v$  e a energia específica residual na base da calha em degraus  $E_r$ ,  $S$  é a declividade da linha de energia específica dada por  $S = q^2/8gh^3$  e  $f$  é fator de resistência.

O autor também afirma que a dissipação de energia aumenta até o ponto em que a altura de escoamento sobre a calha é em torno de 1/3 a altura crítica do escoamento, sendo o aumento a partir deste ponto pouco significativo.

Peyras *et al* (1992) analisaram os escoamentos em gabiões em modelos reduzidos com declividades de 1V:1H, 1V:2H e 1V:3H e com vazões específicas de 0,7 m<sup>3</sup>/s.m e 2,8 m<sup>3</sup>/s.m. A parte deste estudo, propuseram uma equação empírica para a dissipação de energia em função da declividade e número de Froude:

$$\frac{\Delta E}{H_v} = \frac{E_m - E_r}{H_v} = 1 - 4,195 \left( \frac{q^2}{gH_v^3} \right)^{0,526}, \quad (41)$$

onde  $\Delta E$  é a diferença de energia disponível na crista representada por  $E_m = H_v + 1,5y_c$  e a energia residual na base  $E_r = y_0 + V^2/2g$ .

Chanson (1993), avaliou a dissipação de energia para um escoamento em quedas sucessivas com formação de ressalto hidráulico no piso, relacionando a dissipação de energia com a energia máxima disponível a montante:

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \frac{0,54 \left( \frac{y_c}{H} \right)^{0,275} + 1,715 \left( \frac{y_c}{H} \right)^{-0,55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_v}{y_c}} \quad (42)$$

Para escoamento deslizante em turbilhões Chanson (1993) utilizou a premissa que o escoamento apresenta características uniformes ao longo da

descida d'água, assim, avaliou a perda de energia total do escoamento com dados experimentais de Sorensen (1985);

$$\frac{\Delta E}{H_m} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{1}{3}} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} + \frac{H_v}{y_c}} \quad (43)$$

Tozzi e Brighetti (1993) propuseram uma metodologia para a determinação da superfície livre de água no escoamento, para assim, equacionara dissipação de energia. Utilizando o método das diferenças finitas é possível determinar as profundidades não aeradas do escoamento;

$$H_M = H_J + \bar{i}_e \Delta l, \quad (44)$$

onde  $H_M$  e  $H_J$  são a energia total do escoamento a montante e jusante, respectivamente,  $\bar{i}_e$  é a declividade média da linha de energia e  $\Delta l$  é a distância ao longo da descida d'água entre as seções de montante e jusante.

A declividade média da linha de energia pode ser avaliada pela equação 45:

$$i_e = \frac{f q^2}{8 g y^3}. \quad (45)$$

Assim como resultado, a energia residual imediatamente a jusante do vertedouro pode ser estimada, pela equação utilizando as profundidades calculadas pelo método das diferenças finitas:

$$E_r = y_0 + \alpha_1 \frac{q^2}{2 g y^2}, \quad (46)$$

onde  $\alpha_1$  corresponde ao coeficiente de Coriolis, adotado como 1,10.

Chamani e Rajaratnam (1994) equacionaram a dissipação de energia para vertedouros em degraus em regimes em quedas sucessivas utilizando o conceito de perda de carga média por degrau. A partir desta premissa Horner (1969) estudou estruturas com 8 a 30 degraus e razões  $H/L$  entre 0,421 e 0,842 e propôs a equação 48.

$$\varphi = [0,30 - 0,35(H/L)] - \left[0,54 + 0,27 \left(\frac{H}{L}\right)\right] \log \left(\frac{y_c}{H}\right) e \quad (47)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{\left\{(1-\varphi)^N \left[1 + 1,5 \left(\frac{y_c}{H}\right)\right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\varphi)^i\right\}}{N + 1,5 \left(\frac{y_c}{H}\right)}, \quad (48)$$

onde  $N$  é o número de degraus,  $E_0$  é a energia específica no pé do vertedouro desconsiderando as perdas de carga e  $\varphi$  é a perda de carga média no degrau.

Outros autores também avaliaram a dissipação de energia em descidas d'água em degraus tais como Rice e Kadavy (1996), Pegram *et al* (1999), Povh (2000) e Sanagiotto (2003). Como resultado verifica-se a maior eficiência da dissipação de energia para escoamentos aerados do que os não aerados, além disso o aumento do tamanho do degrau gera maiores percentuais de dissipação.

#### 2.2.4 Pressões Atuantes nos Degraus

As pressões atuantes nos degraus podem gerar cavitação na estrutura de concreto e foram estudadas por algumas pesquisas em vertedouros e descidas d'água. É fundamental controlar a ocorrência de cavitação, principalmente na zona de fluxo não aerado, onde a velocidade é maior, mas também na zona de fluxo aerado, onde se formam pressões flutuantes nos espelhos e patamares das macro-rugosidades.

Tozzi (1992) através de medições de pressões médias, utilizando piezômetros convencionais em calhas de declividade de 53,53° para quatro diferentes alturas rugosidade 10, 20, 30 e 60 mm, detectou pressões médias positivas no final do piso do degrau, na região de impacto do fluxo. Além disso, foram verificadas pressões negativas no espelho do degrau, causadas pelos vórtices recirculatórios.

Partindo dos dados analisados, Tozzi (1992) propôs adimensionalizar as pressões pela energia cinética do escoamento, assim para determinadas relações de  $y/k$  foram plotadas curvas de probabilidade de ocorrência de pressões negativas de 1% até 10%.

$$K = \frac{p/\gamma}{V^2/2g}, \quad (49)$$

onde  $K$  é a pressão média negativa no espelho dos degraus,  $p$  é a pressão média e  $\gamma$  é o peso específico da água.

Olinger (2001), estudou uma descida d'água em degraus com declividade de 1V:0,75H. Observou que as pressões adimensionais ( $K$ ) médias negativas no espelho dos degraus independem do número de Froude ( $Fr$ ) do escoamento. Já as pressões instantâneas negativas aumentam proporcionalmente com o aumento da velocidade do escoamento. Já as pressões adimensionais médias positivas, na

extremidade do piso do degrau, apresentam comportamento bem definido de acordo com o respectivo número de Froude.

De acordo com Olinger (2001), a região não aerada é mais suscetível à cavitação do que a região aerada. Isso se deve devido a capacidade da região aerada absorver impacto com o colapso das bolhas de ar. O autor elaborou faixas limites de risco de cavitação comparando as velocidades médias de fluxo e relações  $y/k$ , para pressões na ordem de -9,5 m.c.a. associadas a probabilidade de ocorrência de 1 a 2%.

Sanagiotto (2003) avaliou pressões médias ao longo de vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H, com diferentes alturas de rugosidade relativa (18, 36 e 54 mm), utilizando piezômetros convencionais e transdutores. Como resultado foi verificado o aumento das pressões médias positivas no piso dos degraus com o aumento altura de rugosidade.

As pressões médias máximas foram verificadas nas posições mais externas do piso, variando de -0,014 a 0,455 m.c.a. Já as pressões mínimas foram encontradas próximas da interface do espelho com o pseudofundo, variando de -0,062 a 0,245 m.c.a.

Xu *et al* (2015) a partir de calhas em degraus, avaliou diferentes combinações de altura de espelhos, de 2,5, 5 e 10 centímetros, com 24 e 48 degraus, com o objetivo de avaliar a formação das três zonas de aeração e verificar a ocorrência de pressões negativas.

De acordo com os resultados obtidos, a região de maior risco de cavitação é a região de fluxo não aerado. Além disso, as pressões negativas máximas se encontram na porção superior do espelho e as pressões positivas máximas se encontram nas extremidades dos degraus. Como solução para a cavitação nesta região mais suscetível os autores avaliaram a utilização de aeradores.

### 2.3 DINÂMICA DOS FLÚIDOS COMPUTACIONAL

O dimensionamento de estruturas hidráulicas por muitas vezes se utiliza de equações empíricas, formadas de experimentação para modelos específicos ou de equações analíticas, geradas da simplificação de modelos teóricos. Como resultado, muitas estruturas acabam sendo superdimensionadas ou ainda subdimensionadas.

A partir desta problemática nasce a modelagem numérica de fluidos ou dinâmica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD segundo a literatura inglesa). Este ramo da mecânica dos fluidos busca através de modelos numéricos e algoritmos prever o comportamento de um fluido, com o auxílio do computador.

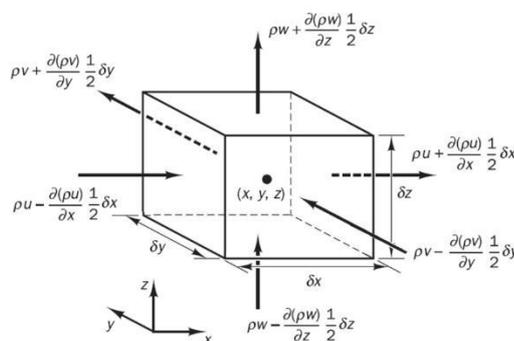
Nota-se a grande dificuldade de implementação de tal metodologia, uma vez que os modelos comportamentais dos fluidos necessitam de grande capacidade de processamento. Atualmente, apesar dos avanços, o mercado de engenharia hidráulica ainda não possui estrutura computacional para realizar tais modelagens.

### 2.3.1 Princípios Governantes

As equações matemáticas que regem o fluxo tridimensional de um fluido são expressões limitadas pelas leis da conservação da física:

- Lei da conservação da massa: não há perda de massa em uma trajetória de uma partícula infinitesimal;
- Lei da conservação da quantidade de movimento (segunda Lei de Newton: a variação de quantidade de movimento é igual a soma da resultante de forças que atuam em uma partícula de fluido);
- Lei da conservação da energia (primeira lei da termodinâmica): a taxa de mudança de energia é igual a soma da taxa de adição de calor e do trabalho realizado em uma partícula fluida;

Figura 14 - Fluxo mássico em uma partícula infinitesimal de fluido.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

### 2.3.1.1 Conservação da massa

A taxa de variação de massa numa partícula infinitesimal de um fluido é igual a taxa líquida de fluxo mássico neste elemento:

$$\frac{\partial(\delta x \delta y \delta z)}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial y} \delta x \delta y \delta z. \quad (50)$$

Assim, o fluxo mássico através de uma face de um elemento é dado pelo produto da densidade, área e componente normal da velocidade nesta face.

Realizando o balanço do fluxo mássico pelo elemento, com a finalidade de se obter o resultado líquido da variação da massa para equiparar com a taxa de variação de massa da partícula, chegamos à equação tridimensional da conservação da massa para um fluido compressível:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (51)$$

Fluidos como a água podem ser considerados incompressível, desta forma a massa específica pode ser considerada constante:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (52)$$

### 2.3.1.2 Conservação da quantidade de movimento

A partir da segunda lei de Newton, pode-se afirmar que para um fluido em escoamento, a variação da quantidade de movimento da partícula é igual à soma de todas as forças atuantes na partícula.

Nota-se que uma partícula submetida a um estado tripla de tensões é simétrica (Figura 15a), logo as equações são similares variando apenas seus eixos de atuação. Neste trabalho será apresentada a variação de quantidade de movimento na direção “x” por unidade de volume da partícula:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (53)$$

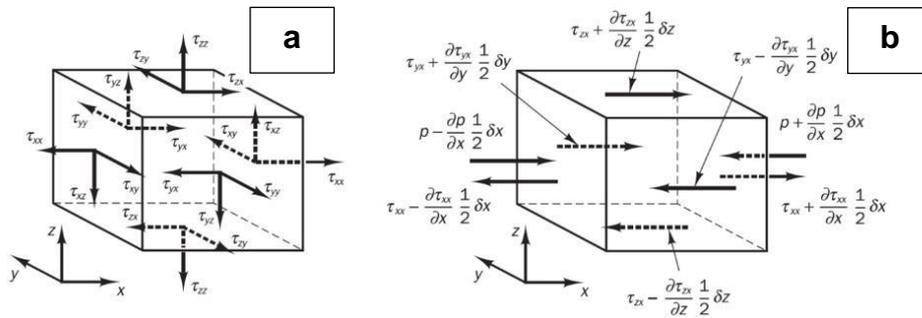
As forças atuantes em uma partícula fluida são as forças de superfície (pressão e forças viscosas) e forças de corpo (gravidade, centrífuga, Coriolis e eletromagnética). Podemos equacionar as forças de superfície em separado na

equação de conservação do momento, dessa forma as forças de corpo são incluídas como termos de origem.

A força resultante em uma face é o produto da tensão pela área da respectiva face, logo podemos escrever a força total por unidade de volume de fluido devido as tensões de superfície na direção x como (Figura 15b):

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z}. \quad (54)$$

Figura 15 - Componentes de tensão em todas as faces de uma partícula, (a) em todas as direções (b) na direção x.



As forças de corpo, como enunciado anteriormente, podem ser incluídas no equacionamento pela definição de uma fonte de momento na direção x por unidade de volume e por unidade de tempo. Logo, equação do momento em nas três direções:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx}; \quad (55)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{My}; \quad (56)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + S_{Mz}. \quad (57)$$

### 2.3.2 Equações de Navier-Stokes para fluidos Newtonianos

A lei de conservação do momento em um volume de controle infinitesimal possui incógnitas relacionadas com as forças de superfície, representadas por tensões viscosas. Os equacionamentos utilizados para simular o comportamento de fluidos se utilizam da introdução de modelos de tensão viscosa, usualmente

representada como função da taxa de deformação local ou apenas taxa de deformação.

Os gases e líquidos são isotrópicos. Em escoamentos tridimensionais as taxas de deformação podem ser expressas em nove componentes, sendo três componentes de deformação linear alongada e seis componentes de deformação linear por cisalhamento:

$$S_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; S_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; S_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad (58)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); S_{yz} = S_{zy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \quad (59)$$

$$S_{xz} = S_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right).$$

Ainda, nas condições de fluxo tridimensional, o fluido está sujeito a uma deformação volumétrica dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \mathbf{u}. \quad (60)$$

Fluidos Newtonianos, possuem tensões viscosas proporcionais às taxas de deformação, assim de acordo com forma tridimensional da lei de viscosidade de Newton, para fluidos incompressíveis, existem duas constantes de proporcionalidade: a primeira viscosidade (dinâmica),  $\mu$ , relacionada a deformações lineares e a segunda viscosidade,  $\eta$ , relacionada a deformações volumétricas. De acordo com Schlichting (1979) a proporção entre a viscosidade volumétrica e linear é de  $-2/3$ . Logo podemos reescrever as equações tensões viscosas a partir das taxas de deformação e seus coeficientes de proporcionalidade, resultando em nove componentes:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \text{div } \mathbf{u}; \\ \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \eta \text{div } \mathbf{u}; \\ \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \eta \text{div } \mathbf{u}; \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right); \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (61)$$

Portanto, a partir das deduções de conservação de momento e tensões viscosas podemos formular a equação de Navier-Stokes completa, para fluidos compressíveis e de viscosidade variável.

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx}; \\
\rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \eta \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My}; \\
\rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \eta \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + S_{Mz}.
\end{aligned} \tag{62}$$

Nota-se que as variações em viscosidade e deformação volumétrica, no modelo que foi equacionado, geram um esforço de cálculo enorme e que conseguem muito processamento dos computadores. Desta forma, podemos trabalhar com simplificações da equação de Navier-Stokes assumindo condições de contorno para o fluido. No caso deste trabalho o fluido em questão é água, que pode ser considerado como incompressível e com viscosidade constante.

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\nabla u) + S_{Mx} \\
\rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \operatorname{div}(\nabla v) + S_{My} \\
\rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \operatorname{div}(\nabla w) + S_{Mz}
\end{aligned} \tag{63}$$

Para cálculos via CFD as equações primárias de escoamento de fluidos incompressíveis são adaptadas para um novo formato padrão, em função de uma variável de interesse  $\Phi$ :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \operatorname{div}(\Phi \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(\Gamma(\nabla \Phi)) + S_{\Phi}, \tag{64}$$

onde os termos se referem a: variação temporal, advectivo, difusivo e fonte, respectivamente.

Esse equacionamento possui capacidade numérica para representar diferentes equações de conservação, alterando apenas as três componentes da equação, variável  $\Phi$ , coeficiente de difusão  $\Gamma$  e o termo de fonte  $S$ .

No entanto, por mais que a equação geral do escoamento seja amplamente reproduzida em modelagens via CFD, até o momento, não existe solução analítica.

Logo, para sua devida solução devemos nos utilizar de métodos de discretização, tais como o método de elementos finitos (MEF), o método de volumes finitos (MVF) e o método de diferenças finitas (MDF).

### 2.3.3 Modelos de Turbulência

Durante o escoamento de um fluido, uma partícula qualquer pode assumir deslocamento linear e/ou sofrer rotações nas suas trajetórias por meio de vórtices e deslocamento irregular. Esse estado do escoamento é denominado de turbulência, e para tal, devemos criar modelos numéricos para reproduzir esse comportamento nas modelagens.

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por campos de velocidades flutuantes. A combinação do escoamento e quantidade de movimento, de energia e de concentração, gera flutuações das quantidades transportadas. Estas variações podem ser de pequena escala e com alta frequência tornando a modelagem numérica computacional dispendiosa. Assim, uma alternativa para sua modelagem é se utilizar de modelos numéricos para criar médias temporais ou até manipulação para remover essas flutuações de pequena escala. No entanto, cada modelo modificado adiciona variáveis desconhecidas, gerando a necessidade de se criarem modelos de turbulência que ajustem essas novas variáveis para termos conhecidos. (CFX, 2004).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), podemos dividir os modelos de turbulência em três grupos maiores, com subdivisões:

- Modelos das Equações Médias de Reynolds (RANS)
  - Modelo  $k - \varepsilon$  (Padrão);
  - Modelo  $k - \varepsilon$  (RNG);
  - Modelo  $SST - k - \omega$ ;
- Modelo de Simulação de Grandes Escalas “Large Eddy Simulation” (LES).
- Simulação Numérica Direta (DNS – Direct Numerical Simulation).

### 2.3.3.1 Modelos das Equações Médias de Reynolds (RANS)

As equações de conservação básicas de Navier-Stokes podem ser modificadas para representar uma variação média de uma variável, formando um modelo de equações médias. Esse novo modelo equaciona um produto de velocidades flutuantes em diferentes direções, gerando a viscosidade turbulenta.

Assim, aplicando a decomposição de Reynolds escrevemos os valores instantâneos como uma variação randômica em torno de valores médios:

$$\vec{u} = \bar{u} + u', \quad (65)$$

onde  $\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \vec{u}. dt$  componente média e  $u'$  componente variável no tempo.

A partir desta decomposição podemos reescrever as equações Navier-Stokes e gerar as equações de Reynolds:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad e \quad (66)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} x \bar{u}) = \text{div}(\tau - \overline{\rho u' x u'}) + S_M, \quad (67)$$

onde  $\tau = \mu \text{div}(\bar{u})$  é o tensor de tensões molecular e  $S_M$  é o termo fonte da equação de momento.

Novamente, para simulações via CFD, reescrevemos a equação média de Reynolds em termos de uma variável  $\Phi$ :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma(\nabla \Phi) - \overline{\rho u' \Phi}) + S_\Phi, \quad (68)$$

onde os termos se referem a: variação temporal, advectivo, difusivo e fonte, respectivamente.

A aplicação analítica das equações médias de Reynolds não altera a conservação do movimento. No entanto, a aparição do termo  $-\overline{u' x u'}$ , conhecido como tensor de Reynolds, que representa a influência das flutuações turbulentas no fluxo médio. Este termo adicional, desequilibra o equacionamento ao passo que existem mais variáveis que equações, ocasionando o problema de fechamento matemático da turbulência. Como solução para esse problema são introduzidos modelos numéricos para avaliar o tensor de Reynolds.

Na metodologia estatística clássica são empregadas duas classes de modelos: modelos de viscosidade turbulenta e modelos de fechamento de segunda ordem. Os modelos de viscosidade turbulenta relacionam a tensão de Reynolds com

uma função da viscosidade turbulenta e do tensor taxa de deformação do escoamento médio. Os modelos de fechamento de segunda ordem resolvem versões simplificadas do tensor de Reynolds utilizando vários tipos de aproximações e hipóteses.

O modelo padrão  $k - \varepsilon$  é baseado em duas equações, uma para energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para taxa de dissipação dessa energia ( $\varepsilon$ ), foi o primeiro modelo, implementado por Launder e Spalding (1972 *apud* Salmasi e Samadi 2018).

Bayon *et al.* (2018) e Al-hashimi, Madhkiim e Nahi (2017) compararam os três diferentes modelos de turbulência mais adequados para descidas d'água, sendo os modelos  $k - \varepsilon$  (padrão),  $k - \varepsilon$  (RNG) e 'SST-k- $\omega$ ' como mais consistentes para modelagem numérica do escoamento em degraus.

Além dos trabalhos de Bayon *et al.* (2018) e Al-hashimi, Madhkiim e Nahi (2017) que os compararam explicitamente para estruturas de escoamento em degraus, diversos outros autores utilizaram tais modelos em descidas ou vertedouros em degraus. Portanto pode-se referenciar a afirmação com os trabalhos de Medhi *et al.* (2019), Zhan, Zhang e Gong (2016), Bentalha e Habi (2019), Bennet *et al.* (2018) e Salmasi e Samadi (2018).

#### 2.3.3.1.1 Modelo $k - \varepsilon$ (padrão)

O modelo  $k - \varepsilon$  (padrão), desenvolvido por Launder e Spalding (1972), é um modelo semiempírico baseado nas equações de transporte para  $k$  (energia cinética turbulenta) e  $\varepsilon$  (taxa de dissipação de energia cinética turbulenta). A equação do modelo de transporte para  $k$  é derivada da equação exata de Navier-Stokes, enquanto a equação de transporte para  $\varepsilon$  foi desenvolvida por solução física.

A dedução do modelo  $k - \varepsilon$  parte da premissa que o escoamento é completamente turbulento, e que os efeitos da viscosidade molecular são desprezíveis. Assim, o modelo  $k - \varepsilon$  (padrão) só válido para escoamentos completamente turbulentos.

Assim, a energia cinética e a taxa dissipação de energia são obtidas das equações de transporte a seguir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M e \quad (69)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (70)$$

Para turbulências homogêneas temos:

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}, \quad (71)$$

onde  $\nu$  é viscosidade cinemática do fluido.

Nestas equações,  $G_k$  representa geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média.  $G_b$  é a geração de energia cinética turbulenta devido às flutuações de velocidade.  $Y_M$  representa a contribuição na taxa de dissipação total devido a variação volumétrica para o caso compressível.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  são constantes.  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.

A viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (72)$$

onde  $C_u$  é constante.

As constantes enunciadas foram determinadas a partir de experimentos para variações de escoamentos em dutos e superfícies livres por Launder e Spalding (1972):

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_{2\varepsilon} = 1,92, C_u = 0,09, \sigma_k = 1,0 \text{ e } \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

### 2.3.3.1.2 Modelo $k - \varepsilon$ (RNG)

O modelo  $k - \varepsilon$  (RNG) de turbulência também é derivado das equações instantâneas de Navier-Stokes, usando um procedimento chamado de “renormalização de grupo” (RNG). A derivação analítica resulta em um modelo com constantes, termos e equações diferentes do modelo padrão:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (73)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_e, \quad (74)$$

onde  $\alpha_k$  e  $\alpha_\varepsilon$  são o inverso do número de Prandtl turbulento, para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.

A viscosidade efetiva ( $\mu_{eff}$ ) é equacionada em uma equação diferencial para viscosidade turbulenta:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon}\mu}\right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}-1+C_v}} d\hat{v}, \quad (75)$$

onde  $\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$  e  $C_v \approx 100$ .

A partir da integração da equação da viscosidade efetiva obtemos uma nova equação de transporte efetivo em função do número de Reynold efetivo (Escala de Vórtice), permitindo assim na modelagem numérica obter maior estabilidade em escoamentos com baixo número de Reynolds. Para números de Reynolds altos, levando ao limite da equação, temos:

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (76)$$

onde  $C_u = 0,0845$ , derivado a partir da teoria da renormalização em grupo.

O cálculo dos parâmetros inverso do número de Prandtl,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$ , são avaliados a partir da derivação analítica da teoria RNG.

$$\left|\frac{\alpha-1,3929}{\alpha_0-1,3929}\right|^{0,6321} \left|\frac{\alpha-2,3929}{\alpha_0-2,3929}\right|^{0,3679} = \frac{\mu}{\mu_{eff}}, \quad (77)$$

onde  $\alpha_0 = 1,0$ . Levanto o número de Reynolds ao seu limite, temos  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1,393$ .

A equação do modelo  $k-\varepsilon$  (RNG) se difere do modelo padrão essencialmente pela adição do termo  $R_\varepsilon$ . Este termo pode ser avaliado pela equação:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1-\frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1+\beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad (78)$$

onde  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$ ,  $\eta_0 = 4,38$  e  $\beta = 0,012$ .

Rearranjando a equação do modelo  $k-\varepsilon$  (RNG) para a o termo  $\varepsilon$ , substituindo o termo  $R_\varepsilon$  pela sua equação, podemos avaliar as variações obtidas pela adição deste termo em relação ao modelo  $k-\varepsilon$  (padrão).

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (79)$$

onde  $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_u \rho \eta^3 (1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\beta \eta^3}$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1,42$  e  $C_{2\varepsilon} = 1,68$ , derivados analiticamente.

Com a variação da taxa de pressão ( $\eta$ ) para valores baixos e moderados o termo ajustado  $C_{2\varepsilon}^*$  se mantém próximo do valor de  $C_{2\varepsilon}$  do modelo  $k - \varepsilon$  (padrão). Para valores grandes da taxa de pressão, a menor distribuição de  $\varepsilon$ , reduz a energia cinética turbulenta e a viscosidade efetiva, resultando em uma viscosidade turbulenta menor que a do modelo padrão. Desta forma, o modelo  $k - \varepsilon$  (RNG), se mantém mais estável para escoamentos rápidos forçados com tensões rápidas.

#### 2.3.3.1.2.1 Modelagem da Geração de Energia Cinética Turbulenta

O termo  $G_k$ , representado nas equações para ambos os modelos  $k - \varepsilon$ , padrão e RNG, possui equacionamento idêntico e poder ser definido por:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}. \quad (80)$$

#### 2.3.3.1.2.2 Efeito da flutuação na turbulência

O termo  $G_b$ , representado nas equações para ambos os modelos  $k - \varepsilon$ , está presente para atribuir nas equações as contribuições geradas pelas flutuações de velocidade no escoamento. A geração de turbulência para esse caso pode ser avaliada por:

$$G_{ij} = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \left( g_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (81)$$

onde  $Pr_t$  é o número de Prandtl turbulento para energia e  $g_i$  é a componente gravitacional na direção  $i$ . O coeficiente de expansão térmica ( $\beta$ ) é definido por:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p. \quad (82)$$

#### 2.3.3.1.3 Modelo SST - $k - \omega$

O modelo de turbulência SST  $k - \omega$  é equacionado pela energia cinética turbulenta ( $k$ ) e pela taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta ( $\omega$ ).

Em escoamentos onde há a formação de camada limite, o modelo  $k - \omega$  é superior ao modelo  $k - \varepsilon$  na aproximação do escoamento viscoso nas paredes, além

disso possui sucesso em problemas com gradiente adverso de pressão. No entanto o modelo  $k - \omega$  padrão necessita de uma condição diferente de zero na corrente livre, sendo o resultado da simulação sensível a esse valor (Menter, 1992). Essa problemática não está presente no modelo  $k - \varepsilon$  segundo experimentos de Cazalbou *et al* (1993).

Desta forma, a fim de construir um modelo robusto, o modelo SST procura atrelar as particularidades de cada modelo à verificação da região viscosa perto de paredes com a independência de condição de contorno na corrente livre. Para tal, o modelo  $k - \varepsilon$  é reescrito em função de  $\omega$ , assim os modelos  $k - \omega$  e  $k - \varepsilon$  (transformado) são multiplicados por uma função de mistura ( $F_1$ ) e somados.

A função de mistura é igual a 1 na extremidade interna da camada limite turbulenta e igual a zero na extremidade externa da camada. Desta forma pode-se avaliar a energia cinética turbulenta ( $k$ ) pela taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta ( $\omega$ ), a partir das equações de Menter *et al* (2003).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \widetilde{G}_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad e \quad (83)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (84)$$

Nota-se na comparação das duas equações a existência de um termo extra na equação da taxa de dissipação específica, conhecido como termo de difusão cruzada. Menter (1992) introduziu este para reduzir a dependência do modelo com a corrente livre. A difusão cruzada em escoamentos livres aumenta a dissipação de energia turbulenta.

A função de mistura ( $F_1$ ) pode ser avaliada pela equação:

$$F_1 = \tanh\{arg_1^4\}, \quad (85)$$

onde  $arg_1$ :

$$arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500v}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right], \quad (86)$$

onde  $y$  é a distância até a parede,  $\beta^*$  e  $\sigma_{\omega 2}$  constantes empíricas e  $CD_{k\omega}$  consiste na parte positiva do termo de difusão cruzada, avaliado por:

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10} \right), \quad (87)$$

onde  $\sigma_d$  também é uma constante empírica.

A viscosidade turbulenta é definida a partir da hipótese de Bradshaw (1967), onde em escoamentos em camada limite as tensões de Reynolds são proporcionais à energia cinética turbulenta:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; SF_2)}, \quad (88)$$

onde  $a_1$  é uma constante empírica igual a 0,3,  $S$  é módulo do tensor deformação do escoamento médio  $S_{ij}$  definido nas equações abaixo e  $F_2$  é a função de mistura para viscosidade turbulenta no modelo SST.

$$|S_{ij}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} e \quad (89)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad (90)$$

A função de mistura para viscosidade turbulenta no modelo SST ( $F_2$ ) é avaliada pela equação:

$$F_2 = \tanh\{arg_2^2\} e \quad (91)$$

$$arg_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500v}{y^2 \omega}\right). \quad (92)$$

#### 2.3.3.1.3.1 Modelagem da Geração de Energia Cinética Turbulenta

No modelo SST a geração de energia cinética turbulenta é limitada para mitigar o acúmulo de turbulência em regiões de estagnação:

$$\widetilde{G}_k = \min(v_t S^2; 10\beta^* k \omega). \quad (93)$$

No modelo SST  $k - \omega$  a constantes empíricas pela ponderação das constantes dos modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  padrão. Assim supondo  $\phi$  uma constante do modelo SST e  $\phi_1$  e  $\phi_2$  constantes dos modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  (Tab.2), respectivamente, temos:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2. \quad (94)$$

Tabela 2 - Coeficientes empíricos do modelo SST  $k - \omega$ .

Constante ( $\phi$ )	$\phi_1$	$\phi_2$
$\beta$	0,075	0,0828
$\beta^*$	0,09	0,09
$\sigma_k$	0,5	1,0
$\sigma_\omega$	0,5	0,856
$\sigma_d$	0,856	0,856
$\alpha$	5/9	0,44

### 2.3.3.2 *Simulação Numérica Direta (DNS – Direct Numerical Simulation).*

A simulação numérica direta consiste em resolver as equações completas de Navier-Stokes, para todos os pontos de uma malha, durante todo o espaço temporal definido e todas as dimensões de escoamento.

No entanto, os escoamentos turbulentos são tridimensionais e transientes, gerando um conjunto de vórtices que variam em escala dimensional e de tempo, logo a discretização deve ser extremamente refinada levando a um esforço computacional elevado. Desta forma, é gerado um grande custo computacional, esbarrando na praticidade de resolver este problema de engenharia.

Apesar das limitações a DNS resolve as equações de Navier-Stokes sem necessidade de parametrizações, constituindo uma ferramenta importante de análises qualitativa e quantitativa, para simulações de escoamentos turbulentos (Martinez, 2006).

Silvestrini (2003) afirma que a DNS deve ser interpretada como uma ferramenta de pesquisa, análoga a um experimento de laboratório a partir da qual pode-se obter informações importantes para a simulação do movimento turbulento.

### 2.3.3.3 *Modelo de Simulação de Grandes Escalas “Large Eddy Simulation” (LES).*

Os modelos de simulação em grandes escalas ou *Large Eddy Simulation* (LES) estão situados, em nível de técnicas de simulação, entre as equações médias e as simulações numéricas diretas, vindo de encontro as dificuldades encontradas nos demais métodos.

Nesta metodologia, são aplicadas equações de filtro para separar os eventos em escalas maiores, os grandes vórtices, das pequenas estruturas de turbulência. Assim, o número de graus de liberdade é reduzido permitindo a simulação com um menor número de Reynolds em comparação a um modelo DNS.

O modelo resolve as equações instantâneas de Navier-Stokes para os eventos em grande escala e os eventos de pequena escala, considerados isotrópicos e menos dependente das condições de contorno física, são modelados com equações algébricas simples conhecidas como modelagem submalhas.

De acordo com Silvestrini (2003), em LES as pequenas escalas são pobremente resolvidas de forma que sua principal finalidade seja extrair energia das grandes escalas, gerando uma cascata de energia. Do ponto de vista das flutuações das variáveis, a técnica resolve, em princípio, todas enquanto a modelagem RANS parametriza as flutuações em valores médios.

#### **2.3.4 Métodos para discretização numérica**

A solução analítica das equações de Navier-Stokes só existe para escoamentos ideais e simples. Para soluções de escoamentos reais, devemos nos utilizar de aproximações algébricas que possam ser resolvidas por métodos numéricos. De acordo com Ferziger e Peric (2002) os métodos de discretização algébricas de equações integro-diferenciais mais utilizados são:

- Método das diferenças finitas;
- Método dos elementos finitos;
- Método dos volumes finitos;

O Método das Diferenças Finitas é o mais antigo para solução das equações primárias. Acredita-se ter sido introduzido por Euler no século XVIII. Exige pouco recurso computacional para solução de escoamentos. Uma grande limitação é o uso exclusivo em geometrias bem estruturadas (Ferziger e Peric, 2002).

No Método dos Elementos Finitos (MEF), geralmente é usado o método de *Galerkin* de resíduos ponderados. Neste método, as equações governantes são integradas sobre um elemento ou volume após serem multiplicadas por uma função de peso. As variáveis dependentes são representadas no elemento por uma função, que pode ser da mesma forma que a função peso. As malhas são triangulares para elementos em 2D e tetraédricas para elementos em 3D. A principal vantagem, bem como a principal desvantagem dos elementos finitos, é que é uma abordagem matemática difícil de colocar qualquer significado físico nos termos das equações algébricas (Campera, 2020).

O Método dos Volume Finitos (MVF) foi introduzido na década de 1970 por McDonal, MacCormack e Paullay e consiste em todo método que obtém sua equação aproximada a partir de um balanço de massa no volume de controle (Osses, 2023).

No Método dos Volumes Finitos, as equações governantes são integradas sobre um volume ou célula, assumindo uma variação linear em partes das variáveis dependentes ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ,  $T$ ). Usando essas integrações, equilibram-se essencialmente os fluxos através dos limites dos volumes individuais. O fluxo é calculado no ponto médio entre os nós discretos do domínio. Portanto, deve-se calcular um fluxo entre todos os nós vizinhos do domínio. Em uma malha estruturada regular (o mesmo número de divisões em qualquer direção), esse cálculo de fluxo é bastante direto. Em uma malha irregular (como em uma malha tetraédrica gerada automaticamente), esse cálculo levará a uma quantidade altíssima de fluxos e a um grande esforço de contabilidade para garantir que todos os fluxos tenham sido calculados corretamente. Esse fato faz com que o MVF utilize, preferencialmente, malhas cúbicas regulares (Campera, 2020).

Segundo trabalho de Shoja, Nikpour e Sadeghi (2013), que trabalharam com simulação numérica do escoamento em vertedouros em degraus, visando avaliar a diferença entre o MEF e o MVF na medição da energia total dissipada, os autores encontraram 1,26% e 2,85% de erro via modelagem com volumes finitos e elementos finitos, respectivamente. Os autores concluíram que os dois métodos são aceitáveis para simulação do escoamento nessas estruturas, com ressalvas às malhas adequadas para crista e melhores testes com estruturas maiores que 9 degraus com espelho  $h > 0,1$  metros. Esse foi o único trabalho comparativo dos métodos encontrado na literatura para estruturas em degraus.

### **2.3.5 Modelos Multifásicos**

Em problemas onde ocorre a interface de diferentes fluidos, deve-se utilizar algum modelo numérico para representar a interação dos mesmos. Em escoamentos em degraus, objeto de estudo deste trabalho, a superfície livre de escoamento da água está em interação direta com o ar, que como previamente discutido gera processos de aeração essenciais para a dissipação de energia.

Estes modelos são divididos em modelos multifásicos euleriano-euleriano e euleriano-lagrangeano. Os modelos euleriano-euleriano representam de duas ou mais fases de escoamento pelo método de Euler, onde as determinações de características do campo do escoamento são representadas em função do tempo,

tanto na superfície de controle e no volume de controle. Já os modelos multifásicos euleriano-lagrangeanos representam uma das fases na forma de Euler e a outra na forma de Lagrange. A forma de Lagrange, segundo Roma (2006), consiste em isolar um sistema e estudar o comportamento individual de cada molécula ou partícula desse sistema.

Os modelos multifásicos euleriano-euleriano podem ser divididos em dois outros grupos de modelos, os homogêneos e os não-homogêneos. No modelo homogêneo as equações representativas do escoamento são resolvidas de forma compartilhada para todos os fluidos, assim a quantidade e equações resolvidas é menor, logo para um dado escoamento as quantidades transportadas são iguais para todas as fases. Já o modelo não-homogêneo cada fluido possui um sistema de equações representativas e sua interface é calculada por um termo de transferência.

Dentre os modelos multifásicos homogêneos a teoria do escoamento de superfície livre é a aplicação mais comum (CFX, 2004). Segundo Bayon *et al* (2018) o método à superfície livre mais utilizado, em soluções numéricas de CFD, é o método *volume of fluid* (VOF). Esse método de abordagem Euleriana do controle de um volume de fluido foi desenvolvido por Hirt e Nichols (1981). Por meio desse recurso é possível simular a interface entre gases e líquidos. Essa capacidade é essencial para modelagem de fenômenos de fluxo recorrentes na engenharia. Cada volume infinitesimal possui um parâmetro de controle que varia de zero até um, significando ausência de líquido quando é nulo e preenchimento completo quando é igual a unidade inteira.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA OBRA

A Usina Fotovoltaica Caldeirão Grande 2, situada na cidade de Caldeirão Grande, PI, foi realizada pelo consórcio ELASTRI/ARAXÁ e entregue para a detentora do projeto em 2022. A capacidade instalada de geração da usina é de 252 MWp, que segundo dados da contratante é suficiente para suprir a demanda de 500mil habitantes.

Figura 16 - Localização da UFV Caldeirão Grande 2.



Fonte: ARAXÁ, 2022.

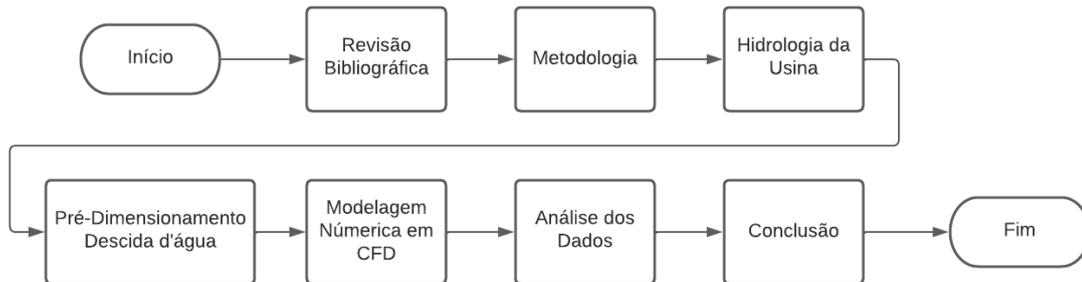
#### 3.2 FLUXO DO TRABALHO

O processo de geração de energia fotovoltaica, em usinas de grande porte, gera alterações na hidrologia da região de implantação, afetando os sistemas de interceptação e infiltração do ciclo hidrológico, ocasionando um aumento no escoamento superficial.

Portanto, se faz necessário sistema de drenagem superficial para controlar e proteger as áreas internas e externas da nova configuração hidrológica.

Visando alcançar os objetivos elencados no item 1.2, foi elaborada metodologia de abordagem quantitativa com finalidade de dimensionar descida d'água a jusante de usina fotovoltaica. Desta forma foi realizado fluxo metodológico indicado na Figura 17.

Figura 17 - Fluxo do trabalho.



### 3.2.1 Hidrologia da usina

Esta seção do trabalho visa compreender as características hidrológicas da usina fotovoltaica e a resposta hidrológica gerada pela sua implantação. Para tal serão verificados os relatórios e memoriais de cálculo de projeto, fornecidos pela projetista, com o objetivo de avaliar a vazão que descarregará no talvegue, oriunda do sistema de drenagem.

Além disso, este caracterizará geometricamente o talvegue, estabelecendo suas limitações, inclinações e cotas. Logo, a partir disso podemos definir e pontuar os locais de descida d'água e propor uma geometria que se adeque ao terreno natural.

### 3.2.2 Pré-dimensionamento

A modelagem numérica via CFD pode ser dispendiosa conforme o tamanho da malha e as condições de contorno aplicadas, desta forma para acelerar o processo de otimização da estrutura final será realizado um pré-dimensionamento da descida d'água.

Para tal será utilizado o software livre *System for Calculations of Hydraulic Components* (SisCCoH), desenvolvido pelo Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Este configura uma ferramenta computacional que permite o dimensionamento de diversos componentes hidráulicos, tais como: condutos forçados, canais em calha lisa, canais em degraus, canais em enrocamento, curvas em canais, confluência em canais, bacias de dissipação, bueiros, dentro outros.

O SisCCoH dimensiona o escoamento em degraus baseado em estudos empíricos, utilizando em seu algoritmo as equações dos autores indicadas na revisão bibliográfica sobre descidas d'água em degraus. Desta forma, a ferramenta permite de forma ágil verificar o regime de escoamento, aeração e dissipação de energia, contribuindo para a escolha da geometria da escada.

Uma simplificação da metodologia é a desconsideração do tipo do material do canal em degraus, visto que dissipação de energia neste escoamento é mais influenciada pelas características do degrau que a rugosidade do material (Ávila, 2019).

### **3.2.3 Modelagem Numérica via CFD**

Para a modelagem numérica via CFD, em especial para escoamentos sobre degraus, o melhor caminho é utilizar algum *software* robusto de CFD, uma vez que para tal tipo de escoamento a ação das turbulências, aeração e escoamento multifásico necessita de modelos numéricos capazes de representar o comportamento do fluxo com eficácia.

Atualmente existem diversos *softwares* CFD's no mercado com aplicação em várias áreas da engenharia, tais como: estruturas, transporte de calor, eletromagnetismo e mecânica dos fluidos.

#### **3.2.3.1 Escolha do Software**

O problema a ser solucionado neste trabalho envolve mecânica dos fluídos e para este tipo os principais *softwares* no mercado são:

- CFX®;
- FLUENT®;
- Flow-3D®;

- Flow-Hydro®;
- OpenFOAM®;

Para escolha do *software*, dentre estes listados, foi avaliado: a sua capacidade de resolver o problema de acordo os modelos de turbulência escolhidos, interface, tempo de licença educacional e aderência do mercado pelo software.

Assim, o *software* escolhido foi o Ansys Fluent® o qual possui distribuição no Brasil através da empresa ESSS e fornece 12 meses de licença estudantil com uma interface intuitiva.

### 3.2.3.2 *Etapas de Modelagem*

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), as etapas de uma modelagem via CFD seguem três etapas principais:

- Pré-processamento;
- Processamento;
- Pós-processamento;

Esta etapa pode ser vista como a base para toda a modelagem, uma vez que nela o modelo físico do problema é consolidado. Inicialmente uma geometria da descida d'água pode ser importada para o *software* a partir de outros programas específicos de modelagem 3D ou até elaborada no mesmo. Em sequência devemos atribuir à essa geometria os materiais constituintes, fornecendo ao software capacidade de compreender as rugosidades.

Numa próxima etapa deve ser estabelecida uma malha onde as equações serão resolvidas. Segundo Ferziger e Peric (2002), a malha é a divisão do domínio geral em pequenas unidades, sejam elementos ou células. A literatura sobre escoamentos em degraus sugere que para o método de volumes finitos as células sejam cúbicas regulares e triangulação. A definição da malha é etapa essencial para definir o tempo de processamento e a qualidade dos resultados, deve ser trabalhada a otimização destes fatores para que o processo não seja dispendioso.

Por fim, devem ser atribuídas as condições de contorno ao modelo geométrico para que o *software* compreenda as superfícies de entrada e saída de fluxo e indicando qual parcela do domínio é sólida.

A etapa de processamento consiste na própria resolução do problema pelo *software*, podendo ser bastante morosa levando de 5 a 10 dias em trabalhos de escoamento robustos. A convergência e estabilidade do modelo é verificada a cada interação e caso verificado algum erro a simulação não é concluída indicando a necessidade de ajusta na malha, passo de tempo, modelo de turbulência, entre outros. Por estes fatores, é importante que seja realizada a etapa de pré-dimensionamento e pré-processamento com cuidado reduzindo a possibilidade de não convergência.

A etapa de pós-processamento consiste na análise dos resultados e comparando os valores obtidos com o pré-dimensionamento e a própria literatura. Versteeg e Malalasekera (2007) afirmam que cada vez mais os *softwares* são capazes de conferir uma representação fidedigna do escoamento.

## **4 ANALÍSE E DIMENSIONAMENTO**

### **4.1 HIDROLOGIA DA USINA**

O dimensionamento de estruturas hidráulicas começa com a definição de uma vazão de projeto. Neste trabalho não será apresentado os passos da modelagem hidrológica da bacia de contribuição, que descarrega no talvegue em questão, uma vez que os objetivos numéricos do trabalho se resumem a modelagem em CFD.

Desta forma os dados de entrada da modelagem foram obtidos a partir dos relatórios hidrológicos e hidráulicos fornecidos pela ARAXÁ ENGENHARIA. Empresa do setor de engenharia consultiva, que possui 10 anos de experiência em projetos de usinas solares de grande porte e realizou 25% dos projetos solares no Brasil nos últimos 5 anos, conforme dados internos da empresa.

#### **4.1.1 Estudo Hidrológico e Hidráulico**

A resposta hidrológica gerada pela implantação da usina fotovoltaica, em especial na capacidade de geração de escoamento superficial, foi avaliada a partir da definição de dois cenários temporais, um de pré-implantação e outro de pós-implantação.

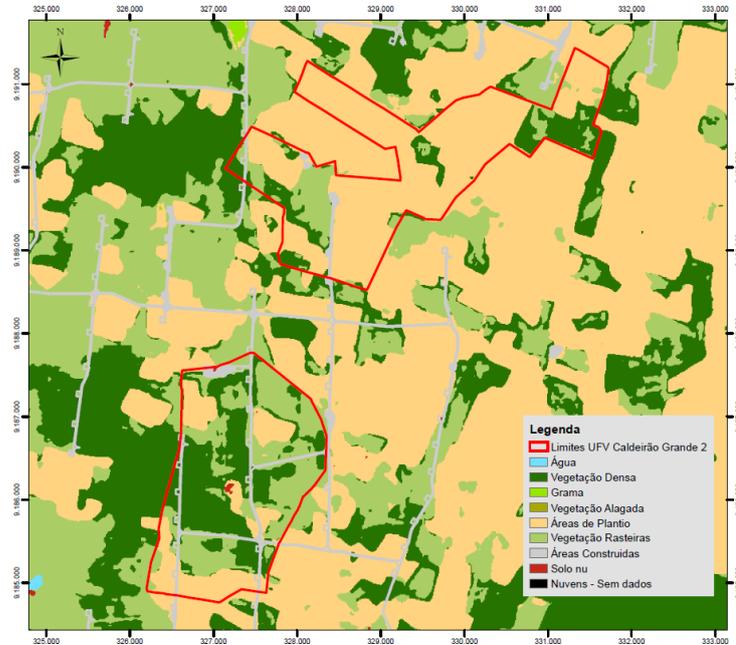
A metodologia aplicada para determinar a capacidade de infiltração do terreno partirá da base de dados da ANA (2018). O conjunto de dados foi elaborado a partir de geoprocessamento, através do cruzamento de informações de uso do solo e características geológicas. Desta forma, para todas as bacias otocodificadas foram determinados valores médios de Curve Number (CN).

A partir do CN médio das bacias de contribuição pode-se definir a capacidade de infiltração do solo no momento de pré-implantação. Já para o cenário de pós-implantação o CN é definido através de tabelas usuais da literatura estimando o seu valor em relação as características do uso do solo.

Para avaliar as alterações no terreno da UFV, foram utilizadas imagens de classificação do uso do solo disponibilizadas pelo estudo global da Esri (2022), onde foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, com precisão de 10 metros. A partir

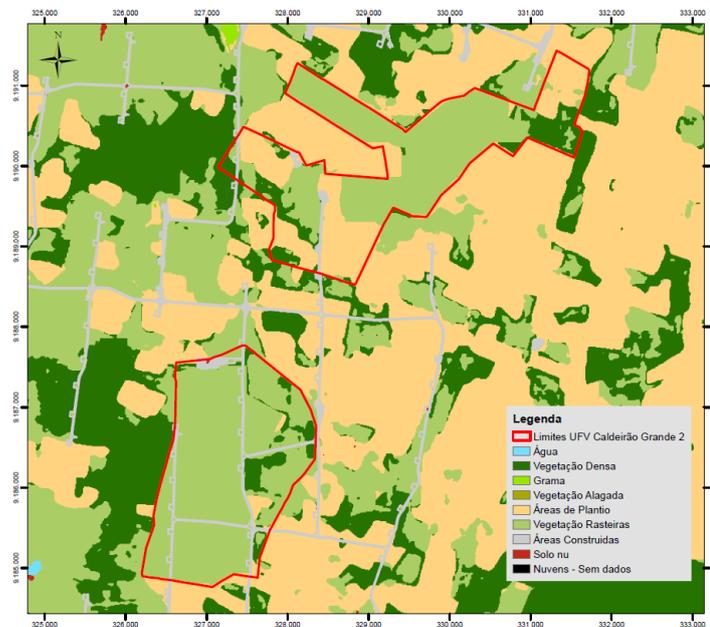
destas, são compostos os cenários estipulados: pré-implantação, com o ambiente natural (Figura 18) e pós-implantação, que retrata a fase de consolidação da camada vegetal após a implantação da usina (Figura 19).

Figura 18 - Uso do solo na região da UFV, pré-implantação.



Fonte: ARAXÁ, 2022

Figura 19 - Uso do solo na região da UFV, pós-implantação.

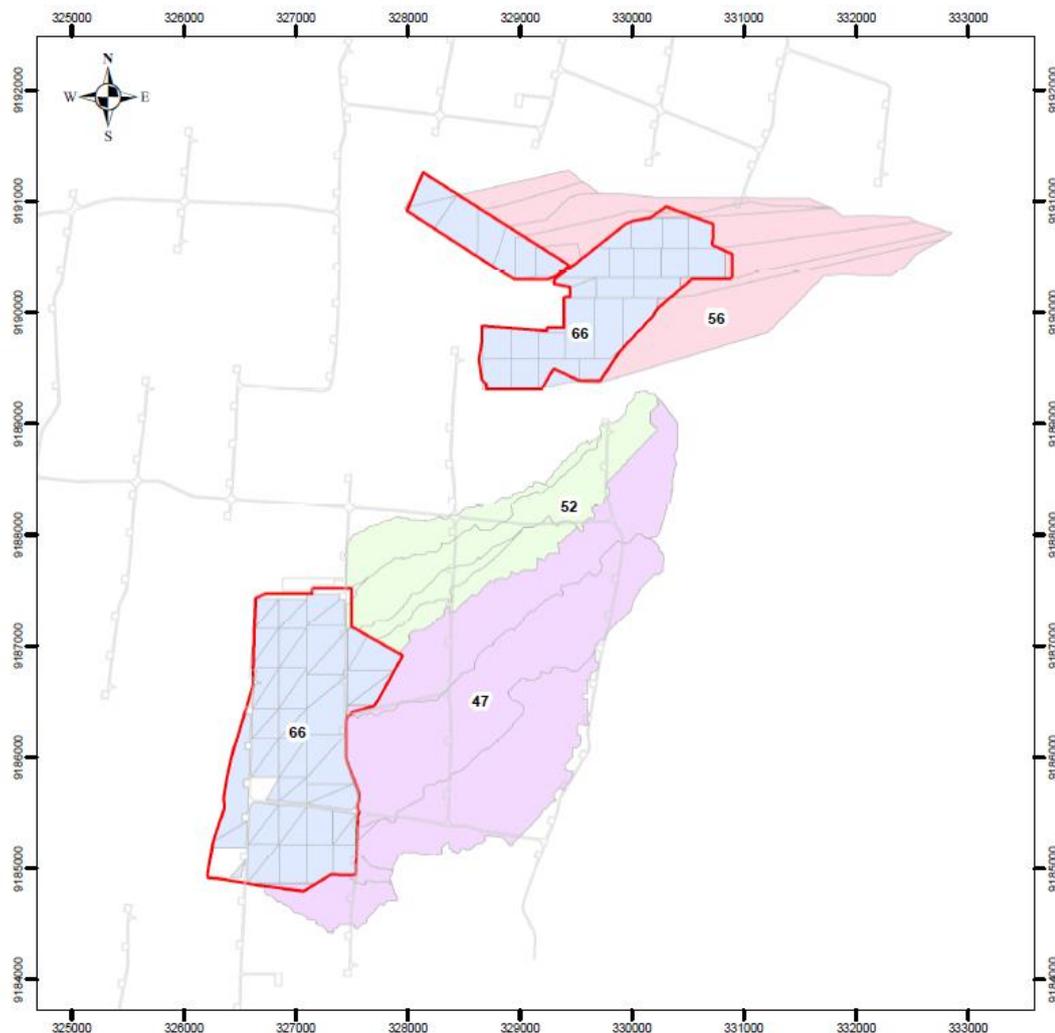


Fonte: ARAXÁ

Nota-se que, diferente dos estudos de Cook & McCuen (2013) e Edalat (2017) o uso do solo no pós-implantação é composto por vegetação rasteira configurando um ambiente com maior capacidade de infiltração do que o solo exposto.

Assim, a partir deste estudo estabeleceu uma relação de *curve number* (Figura 20), que representasse estas mudanças a nível de infiltração do solo. As bacias de contribuição externas possuem o CN de pré-implantação, uma vez que não serão antropizadas e as bacias de contribuição interna (delimitadas pela cerca da UFV) possuem um CN de 66, utilizado em projeto para representar as alterações no uso do solo.

Figura 20 - Curve Number ajustado, pós-implantação.

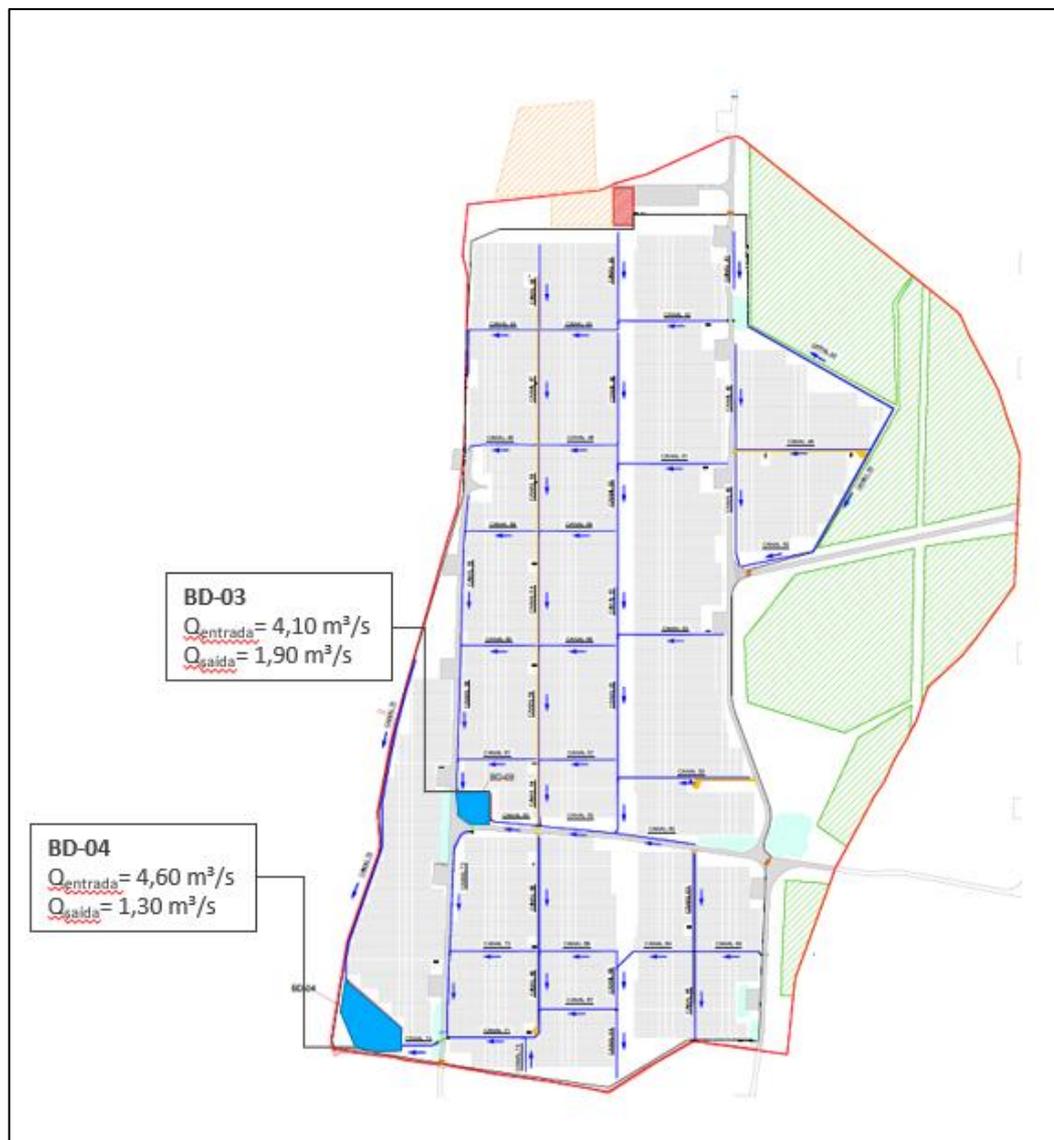


Fonte: ARAXÁ, 2022.

#### 4.1.2 Sistema de Drenagem e Vazão de Projeto

Como solução de projeto para a nova configuração hidrológica do *site* foi proposto um sistema de macrodrenagem. Conforme a Figura 21 ilustra, este sistema é composto por canais e bacias de retenção, coleta os deflúvios de projeto advindos das áreas externas e internas, direcionando-os até áreas de acúmulo, com dispositivos de controle de vazão, reduzindo o pico de vazão do hidrograma.

Figura 21 - Sistema de drenagem proposto.

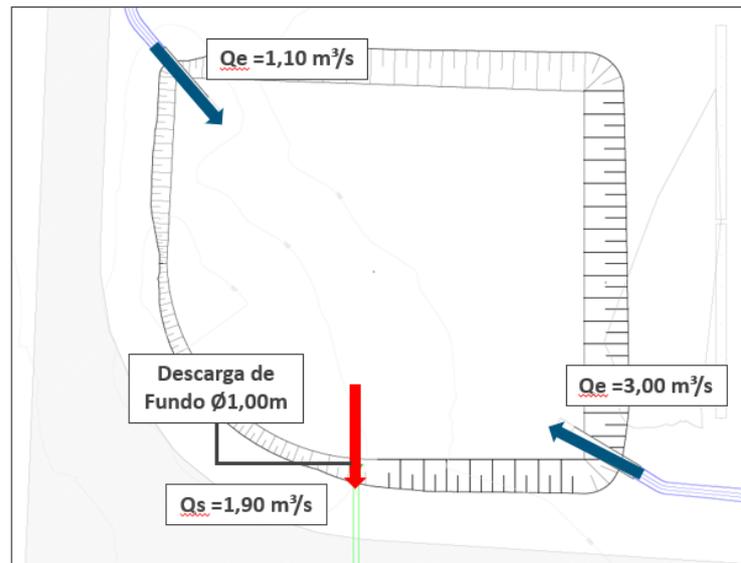


Fonte: ARAXÁ, 2022

Assim foram propostas duas bacias de retenção ao longo do escoamento do parque, que em projeto foram denominadas BD-03 e BD-04. A primeira (Figura 22)

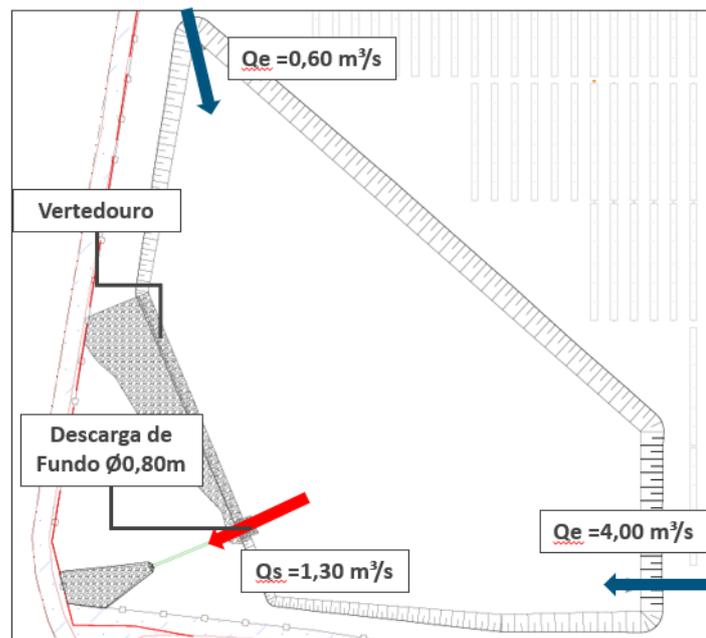
recebe a maior parcela das contribuições externas e tem como objetivo reduzir o pico para que a vazão na porção inferior do sistema de drenagem seja menor e necessitando então de estruturas menores. Já a segunda (Figura 23) tem como objetivo restituir os deflúvios de forma controlada à jusante.

Figura 22 - Detalhe de projeto da BD-03.



Fonte: ARAXÁ, 2022.

Figura 23 - Detalhe de projeto da BD-04.



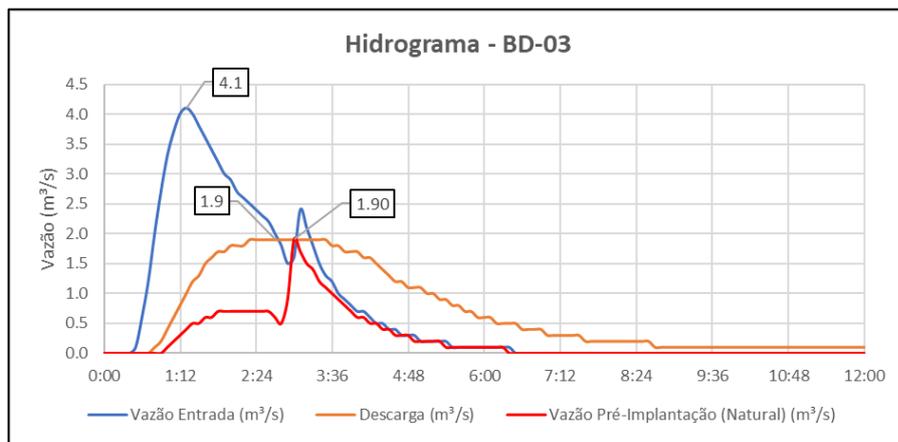
Fonte: ARAXÁ, 2022.

A composição deste sistema, segundo dimensionamentos da ARAXÁ, é capaz de descarregar vazões similares as condições pré-implantação da usina fotovoltaica atenuando processos erosivos no talvegue.

No entanto, por mais que se trate de vazões similares, o fluxo no cenário pós-implantação é concentrado e duradouro (Gráfico 3), o que pode gerar instabilidade no solo, logo é proposta a execução de descida d'água.

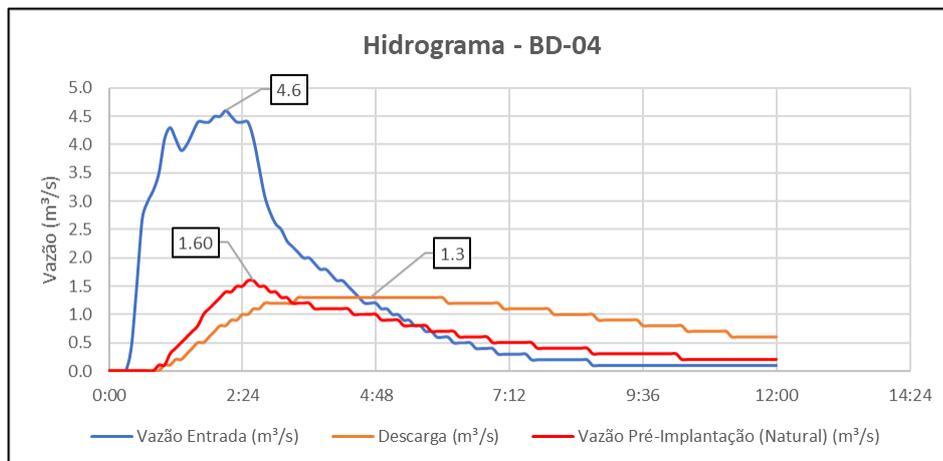
Assim, para o dimensionamento da estrutura de intervenção no talvegue será utilizado o hidrograma afluente da descarga de fundo da BD-04 como ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 2 - Hidrograma BD-03.



Fonte: ARAXÁ, 2022.

Gráfico 3 - Hidrograma BD-04.



Fonte: ARAXÁ, 2022.

### 4.1.3 Caracterização do Talvegue

O talvegue, objeto de estudo deste trabalho, está localizado imediatamente a jusante da usina fotovoltaica (Figura 24), sendo estabelecido em áreas da prefeitura da cidade de Caldeirão Grande do Piauí.

Seu alinhamento acompanha trecho de acesso rural à uma comunidade vizinha e se encontra esculpido em solo arenoso dando espaço para pedregulhos de diâmetros variados. Conforme enaltecido na revisão bibliográfica sobre erosão, este processo é natural e pode ou não ser agravado pela ação antrópica, no caso deste a erosão natural já é avançada e o projeto da usina fotovoltaica garante que, dentro dos seus limites, as condições naturais são mantidas. Portanto, a condição natural do talvegue é de erosão linear com formação de ravina.

Figura 24 - Talvegue a jusante da BD-04.



Fonte: Araxá, 2022.

A partir topografia obtida por levantamento por drone, foi estabelecido perfil longitudinal na calha do talvegue para verificar as áreas de grandes desníveis e

inclinações. Assim, dentro deste perfil pode-se estabelecer o greide da descida d'água e propor os locais de escadas hidráulicas.

O alinhamento do talvegue e perfil foram traçados no software Civil 3D, que permite trabalhar com a modelagem de elementos em 3D e projeto de obras de infraestrutura. Desta forma, partindo da premissa de estabelecer o canal na calha da ravina existente até o ponto mais a jusante, que coincide com bacia de retenção construída pelo município, utilizada para irrigação, o alinhamento proposto possui 887,30 metros totalizando 44 estacas (Figura 25).

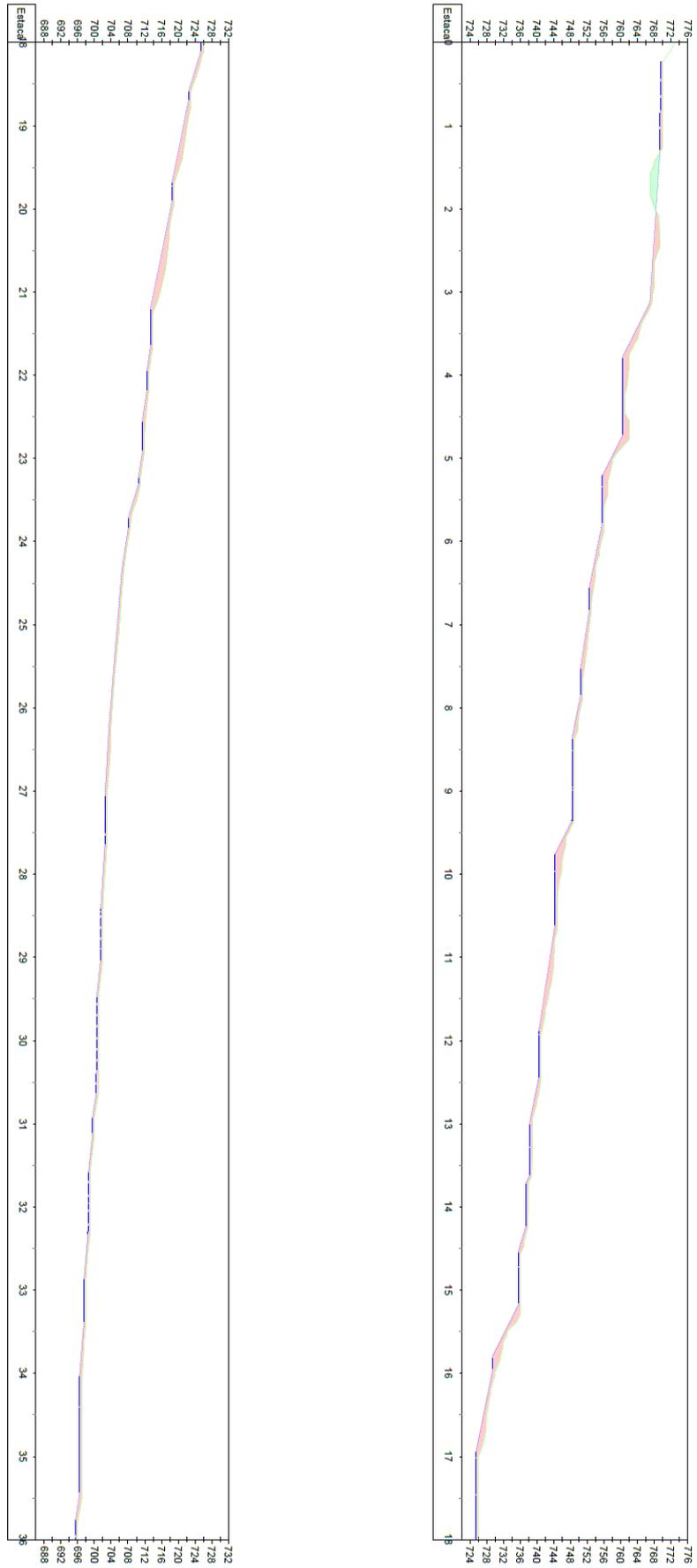
Figura 25 - Alinhamento talvegue.



O perfil longitudinal gerado aponta um desnível de 84 metros com variações de trechos em alta declividade intercalados com platôs (Figura 26). São estes trechos inclinados que atrelados a vazão de projeto podem atingir velocidades altas e causar regimes de transição ocasionando assim danos a calha do talvegue acelerando o processo de erosão linear

Nota-se também a formação de pequenos platôs após os trechos de alta inclinação, esse tipo de formação pode ocorrer por erros de interpolação da malha triangular da topografia ou pela execução da infraestrutura do acesso que acompanha parcialmente o alinhamento do talvegue. Este tipo de relevo propicia a execução de escadas intercaladas com canais planos e/ou descidas rápidas.

Figura 26 - Perfil longitudinal no alinhamento do talvegue.



Logo, adotando como premissa executiva foi verificada hidraulicamente qual a maior declividade aceitável para que o escoamento em um canal retangular não ultrapasse a velocidade máxima admissível para o concreto. Esta verificação pode ser realizada com a aplicação da equação de Manning e adotando como velocidade máxima de 5 m/s, proposta por Azevedo Netto e Araújo (1998).

A equação de Manning é uma fórmula empírica que estima a velocidade média de um líquido fluindo em um canal aberto. No entanto, esta equação também pode ser utilizada para o cálculo das variáveis de fluxo no caso de fluxo em condutos parcialmente cheios, pois eles também possuem uma superfície livre como a de fluxo em canal aberto.

Todo o fluxo nos chamados canais abertos é impulsionado pela gravidade. O equacionamento desses fluxos foi apresentado pela primeira vez pelo engenheiro francês Philippe Gauckler em 1867 e posteriormente reajustado pelo engenheiro irlandês Robert Manning em 1890. Assim no dimensionamento hidráulico dos dispositivos de drenagem foi utilizada a fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{2/3} \cdot \sqrt{I} < V_c , \quad (95)$$

onde,  $V$  é a velocidade de escoamento,  $n$  é rugosidade de Manning,  $Rh$  é o raio hidráulico da seção,  $I$  declividade do canal e m/m e  $V_c$  é a velocidade crítica de escoamento adotada em 5,00 m/s.

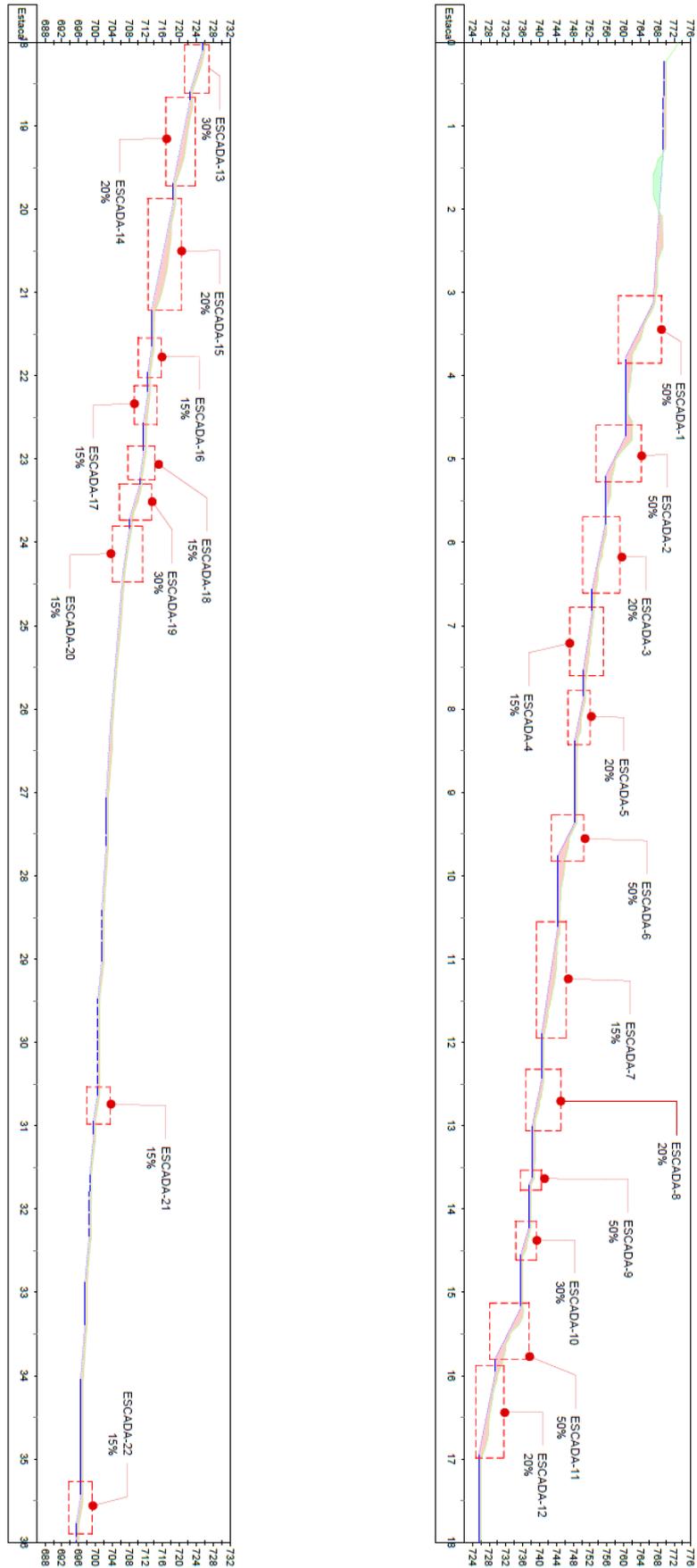
Para associar o escoamento a sua respectiva vazão pode-se partir da equação de Manning associando-a à equação da continuidade, obtendo:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I}. \quad (96)$$

Para fins de determinar a declividade crítica, partiu-se de uma seção retangular com 2,00 metros de largura e 0,5 cm de altura, com a sua inclinação e lâmina d'água variadas parametricamente. Como dado referência para o escoamento foi fixada a vazão máxima do hidrograma de saída da BD-04, avaliada em 1,30 m<sup>3</sup>/s.

Como resultado desta avaliação obteve-se que a declividade crítica para este escoamento é de 10%. Logo, qualquer declividade superior a esta deverá ser avaliada e proposta escada hidráulica, com a finalidade de reduzir a velocidade de escoamento.

Figura 27 – Perfil longitudinal ao longo do talvegue com as escadas hidráulicas propostas.



Partindo dos critérios estabelecidos foi proposto greide do fundo da descida d'água resultando em 22 trechos com necessidade de estruturas hidráulicas para o escoamento em degraus, sendo estes divididos em 4 declividades: 15%, 20%, 30% e 50% em relação ao seu respectivo paramento de jusante (Figura 27). A Tabela 3 indica os trechos que necessitam de escadas hidráulicas.

Tabela 3 – Resumo dos trechos com necessidade de escada hidráulica.

Escada	Declividade	Desnível	Dimensões Escadas		Número de Degraus
	(%)	(m)	S	L	
ESC-01	50%	6.44	0.50	1.00	13.00
ESC-02	50%	4.91	0.50	1.00	10.00
ESC-03	20%	3.11	0.20	1.00	16.00
ESC-04	15%	2.09	0.15	1.00	14.00
ESC-05	20%	2.02	0.20	1.00	10.00
ESC-06	50%	4.06	0.50	1.00	8.00
ESC-07	15%	3.85	0.15	1.00	26.00
ESC-08	20%	2.18	0.20	1.00	11.00
ESC-09	50%	0.87	0.50	1.00	2.00
ESC-10	30%	1.91	0.30	1.00	6.00
ESC-11	50%	6.02	0.50	1.00	12.00
ESC-12	20%	4.01	0.20	1.00	20.00
ESC-13	30%	3.00	0.30	1.00	10.00
ESC-14	20%	3.99	0.20	1.00	20.00
ESC-15	20%	5.12	0.20	1.00	26.00
ESC-16	15%	0.89	0.15	1.00	6.00
ESC-17	15%	1.02	0.15	1.00	7.00
ESC-18	15%	0.97	0.15	1.00	6.00
ESC-19	30%	2.44	0.30	1.00	8.00
ESC-20	15%	1.54	0.15	1.00	10.00
ESC-21	15%	0.94	0.15	1.00	6.00
ESC-22	15%	0.95	0.15	1.00	6.00

Visto que, para a condição de escoamento os trechos possuem a mesma vazão crítica de referência, avaliar cada trecho em singular torna-se dispendioso e redundante. Logo, serão avaliados aqueles trechos cuja energia potencial seja maior e conseqüentemente mais crítica.

Portanto, são tomados 4 trechos de referência para pré-dimensionamento e simulação via CFD, conforme a Tabela 4 indica.

Tabela 4 - Trechos de escada hidráulica de referência.

Escada	Declividade	Desnível	Dimensões Escadas		Número de Degraus
	(%)	(m)	S	L	
ESC-01	50%	6.44	0.50	1.00	13.00
ESC-07	15%	3.85	0.15	1.00	26.00
ESC-13	30%	3.00	0.30	1.00	10.00
ESC-15	20%	5.12	0.20	1.00	26.00

## 4.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESCADAS HIDRÁULICAS

Estabelecidas as condições de projeto das escadas hidráulicas seu pré-dimensionamento se dará a partir do *software* SisCCoH, que realiza o dimensionamento através das metodologias empíricas discutidas no item de revisão bibliográfica sobre descidas d'água em degraus. Em especial são utilizadas as formulações propostas por Chanson (1994), Ohtsu *et al* (2001) e (2004).

A interface do programa é simples e apresenta três módulos para escoamento em degraus, o primeiro para classificação do regime de escoamento, o segundo para dimensionamento no regime *nappe flow* e o terceiro para dimensionamento no regime *skimming flow*.

Inicialmente será verificado o regime de escoamento para cada configuração de escada. Como dados de entrada o SisCCoH requer apenas as dimensões do espelho, patamar e largura do degrau e a vazão de escoamento. Uma vez que as dimensões de altura e comprimento do degrau foram fixadas para melhor atender o terreno natural, a largura das escadas é parametrizada para atender algum dos regimes, em detrimento do regime de transição, podendo ser revisada posteriormente com a verificação do escoamento no módulo do regime.

Os Gráficos 4 a 7 apresentam o resultado para a verificação do escoamento em cada escada típica. As larguras foram, dentro do possível padronizadas para mitigar possíveis contrações ou expansões no escoamento, que podem gerar mais turbulência.

A Tabela 5 indica as larguras e respectivas verificações do regime de escoamento para as escadas típicas.

Gráfico 4 – Regime de escoamento para Escada-01.

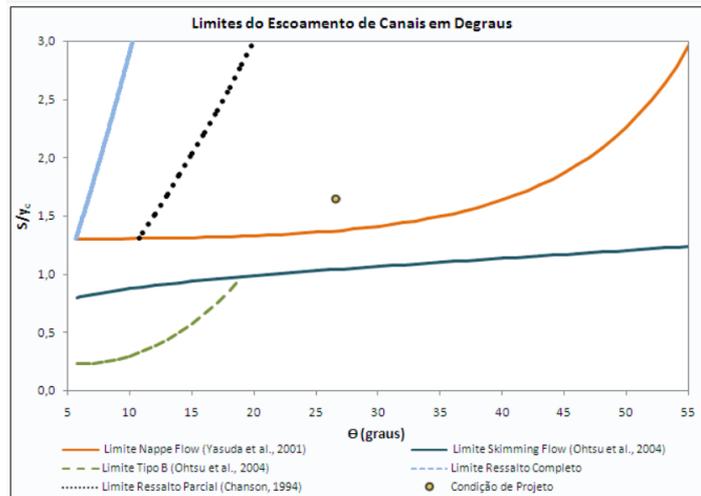


Gráfico 5 - Regime de escoamento para Escada-07.

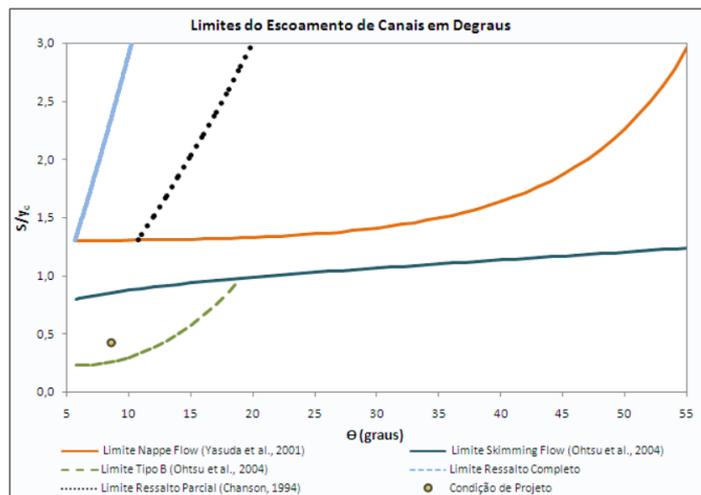


Gráfico 6 - Regime de escoamento para Escada-13

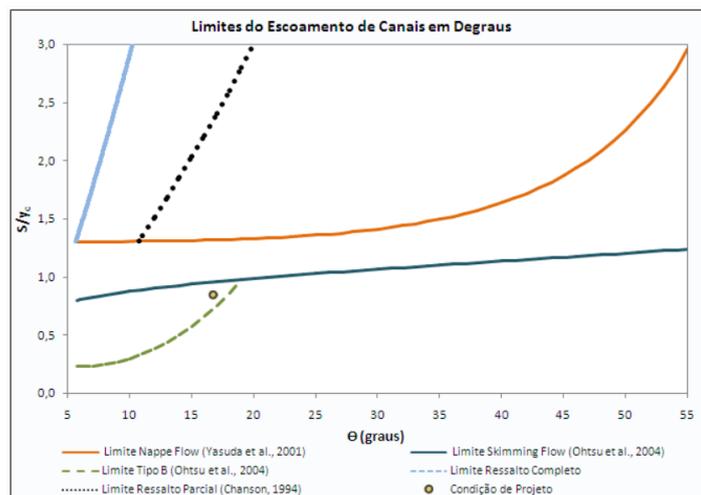


Gráfico 7 – Regime de escoamento para Escada-15.

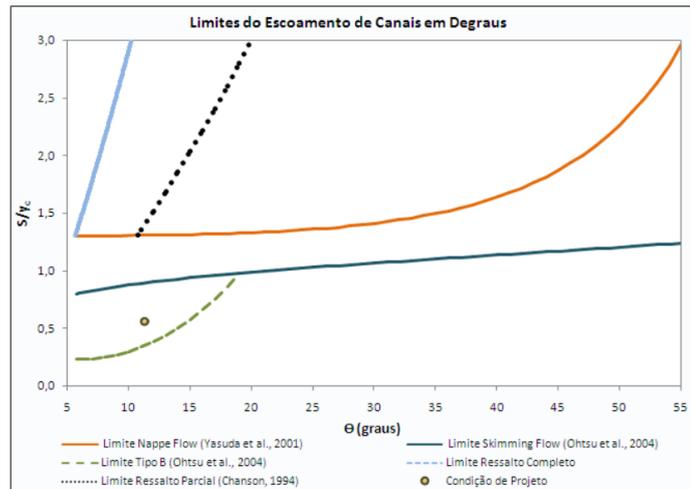


Tabela 5 – Largura e verificação do regime de escoamento para as escadas típicas.

Escada	Dimensões Escadas			Regime Esc.
	S	L	B	
ESC-01	0.50	1.00	2.50	Nappe Flow
ESC-07	0.15	1.00	2.00	Skimming Flow
ESC-13	0.30	1.00	2.00	Skimming Flow
ESC-15	0.20	1.00	2.00	Skimming Flow

Como resultado desta parametrização inicial, nota-se que o aumento da largura para o escoamento de maior declividade, Escada-01 com 50%, leva a regime de quedas sucessivas, no entanto com o decréscimo da largura é obtido regime de transição. Nos demais escoamentos as declividades podem ser consideradas moderadas o aumento da largura mantém o regime deslizante sobre turbilhões, enquanto o decréscimo leva à regime de transição.

Portanto, nas etapas seguintes serão verificadas as condições de escoamento nos módulos específicos de cada regime, buscando analisar, essencialmente, a dissipação de energia e velocidade final de escoamento.

#### 4.2.1 Dimensionamento Escadas em Regime de Quedas Sucessivas

O módulo de dimensionamento do SisCCoH para regime *nappe flow* necessita, além das informações geométricas, o desnível e quantidades de degraus. Isso se deve aos cálculos de dissipação de energia que, no regime de quedas

sucessivas, pode ser avaliado degrau a degrau, uma vez que existe a formação de queda no piso do degrau posterior, podendo ou não formar ressalto hidráulico.

Das escadas típicas apenas uma se encontra no regime em questão. A Tabela 6 representa o seu dimensionamento.

Tabela 6 – Dimensionamento escada-01 – regime *nappe flow*.

<b>Escada com 50% de declividade</b>	
<b>Escoamento em Degraus - Regime Nappe Flow</b>	
<b>Dados de Entrada</b>	
Vazão - Q (m <sup>3</sup> /s)	1.30
Largura do Canal - B (m)	2.50
Altura dos Degraus - S (m)	0.50
Comprimento dos Degraus - l (m)	1.00
Desnível do Trecho - Hd (m)	6.50
Número de Degraus	13.00
<b>Resultados</b>	
<b>Parâmetros Hidráulicos</b>	
Ângulo com a Horizontal (graus)	26.57
Vazão (m <sup>3</sup> /s.m)	0.52
Profundidade Crítica (m)	0.30
Número de Queda	0.22
<b>Dados para Dimensionamento</b>	
Comprimento de Queda (m)	1.43
Comprimento do Ressalto (m)	2.86
Altura da Parede (m)	0.78
Energia Residual (m)	1.32
Energia Dissipada (m)	5.63
Energia Máxima (m)	6.95
Eficiência (%)	81.03
Profundidade Final do Escoamento (m)	0.11
Velocidade Final (m/s)	4.88
Froude Final	4.77

Inicialmente o *software* avalia as características básicas do escoamento, determinando profundidade crítica e vazão específica. Como este regime pode ser considerado bem-comportado pode-se analisar o escoamento em degraus em conjunto de degrau anterior e posterior avaliando a sua queda e comprimento de ressalto e este procedimento que o SisCCoH adota. Logo é avaliado o número de queda (*Drop Number*) e calculado o comprimento de queda e ressalto.

Portanto, vemos que o comprimento da queda e do ressalto é maior que o comprimento do degrau, assim, podemos classificar este regime de quedas sucessivas como do tipo NA3, onde não há impacto no degrau e não há formação de ressalto.

A dissipação de energia foi considerável com eficiência de 81%, ou seja, da energia total 81% foi dissipada durante o escoamento em degraus. Além disso, a

velocidade final de escoamento foi de 4,88 m/s, estando abaixo dos 5,00 m/s propostos como critério de verificação.

#### 4.2.2 Dimensionamento Escadas em Regime Deslizante sobre Turbilhões

O módulo de dimensionamento do SisCCoH para regime *skimming flow* necessita, além das informações geométricas da escada, o desnível do trecho. Diferente do regime de escoamento anterior, este possui a formação de turbilhões e zonas de aeração que vão contribuir para a dissipação de energia, logo o escoamento como um todo é analisado. As tabelas a seguir indicam o dimensionamento para as escadas típicas.

Tabela 7 - Dimensionamento Escada-07 - regime *skimming flow*.

<b>Escada com 15% de declividade</b>	
<b>Escoamento em Degraus - Regime Skimming Flow</b>	
<b>Dados de Entrada</b>	
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	1.30
Largura do Canal (m)	2.00
Altura do Degrau (m)	0.15
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	1.00
Desnível do Trecho (m)	3.90
<b>Resultados</b>	
Ângulo com a Horizontal (graus)	8.53
Vazão (m <sup>3</sup> /s.m)	0.65
Profundidade Crítica (m)	0.35
Concentração Média de Ar	0.28
Coeficiente de Atrito	0.14
<b>Dados para dimensionamento</b>	
Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0.24
Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)	2.75
Profundidade Final do Escoamento (m)	0.17
Velocidade Final do Escoamento (m/s)	3.81
Energia Residual (m)	0.91
Altura de Referência da Parede (m)	0.33
<b>Cálculo do Ponto de Início do Escoamento Aerado</b>	
Altura da rugosidade do degrau - k (m)	0.15
Posição do Início da Aeração - LA (m)	6.13
Profundidade do Início da Aeração - Ya (m)	0.24

Inicialmente o software, a partir dos dados entrada, avalia os parâmetros hidráulicos do dimensionamento. No entanto, diferente do escoamento em regime de

quedas sucessivas é avaliada a concentração médias de ar e coeficiente de atrito. Estes são essenciais para avaliar a dissipação de energia no escoamento, conforme amplamente discutido no capítulo de revisão bibliográfica.

A classificação do tipo de escoamento deslizante sobre turbilhões (SK1, SK2 e SK3) não é possível nesta etapa de pré-dimensionamento, uma que vez, necessita de informação mais detalhada da interação das recirculações e o pseudofundo. Tal classificação poderá ser observada durante as simulações via CFD.

No entanto, podemos classificar o escoamento de acordo com a sua posição de aeração. Para a Escada-07 (15% de declividade) temos a posição de início com 6,13 metros, sendo que ao todo são 26 metros de comprimento de escada, portanto a zona de aeração já está totalmente desenvolvida e o escoamento encontra-se em regime uniforme. A velocidade final de escoamento de 3,81 m/s é inferior ao limite máxima admissível proposto.

Tabela 8 - Dimensionamento Escada-15 - regime skimming flow.

<b>Escada com 20% de declividade</b>	
<b>Escoamento em Degraus - Regime Skimming Flow</b>	
<b>Dados de Entrada</b>	
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	1.30
Largura do Canal (m)	2.00
Altura do Degrau (m)	0.20
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	1.00
Desnível do Trecho (m)	5.20
<b>Resultados</b>	
Ângulo com a Horizontal (graus)	11.31
Vazão (m <sup>3</sup> /s.m)	0.65
Profundidade Crítica (m)	0.35
Concentração Média de Ar	0.29
Coeficiente de Atrito	0.16
<b>Dados para dimensionamento</b>	
Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0.23
Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)	2.81
Profundidade Final do Escoamento (m)	0.16
Velocidade Final do Escoamento (m/s)	3.98
Energia Residual (m)	0.97
Altura de Referência da Parede (m)	0.32
<b>Cálculo do Ponto de Início do Escoamento Aerado</b>	
Altura da rugosidade do degrau - k (m)	0.20
Posição do Início da Aeração - LA (m)	5.57
Profundidade do Início da Aeração - Ya (m)	0.23

Para a Escada-15 (20% de declividade), a posição de início de aeração está em 5,57 metros, sendo ao todo 26 metros de comprimento de escada, logo o escoamento aerado está completamente desenvolvido em regime uniforme. A velocidade final de escoamento obtida foi de 3,98 m/s que está inferior ao limite de 5 m/s proposto.

Tabela 9 - Dimensionamento Escada-13 - regime skimming flow.

<b>Escada com 30% de declividade</b>	
<b>Escoamento em Degraus - Regime Skimming Flow</b>	
<b>Dados de Entrada</b>	
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	1.30
Largura do Canal (m)	2.00
Altura do Degrau (m)	0.30
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	1.00
Desnível do Trecho (m)	3.00
<b>Resultados</b>	
Ângulo com a Horizontal (graus)	16.70
Vazão (m <sup>3</sup> /s.m)	0.65
Profundidade Crítica (m)	0.35
Concentração Média de Ar	0.30
<b>Dados para dimensionamento</b>	
Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0.22
Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)	3.01
Profundidade Final do Escoamento (m)	0.15
Velocidade Final do Escoamento (m/s)	4.30
Energia Residual (m)	1.10
Altura de Referência da Parede (m)	0.30
<b>Cálculo do Ponto de Início do Escoamento Aerado</b>	
Altura da rugosidade do degrau - k (m)	0.29
Posição do Início da Aeração - LA (m)	4.88
Profundidade do Início da Aeração - Ya (m)	0.21

Para a Escada-13 (30% de declividade), a posição de início de aeração fica a 4,88 metros do início do escoamento, sendo ao todo 10 metros de comprimento de escada. Para esta configuração, pode-se admitir que o escoamento não está completamente aerado e encontra-se em regime não uniforme. A velocidade final de escoamento foi obtida 4,30 m/s, que é inferior ao limite proposto.

Portanto, o pré-dimensionamento contribuiu para a definição de parâmetros geométricos e de escoamento para as escadas típicas, que servirão de balizadores à simulação via CFD, ao passo que todo resultado da simulação poderá ser comparado com os dados obtidos nesta seção. No entanto, nota-se que o pré-

dimensionamento é realizado em cima de experimentos empíricos, que assumem determinadas condições experimentais, podendo se provar divergentes durante a simulação, ou seja, poderão ser notados valores diferentes. Uma análise não invalida a outra, apenas se complementam em prol do dimensionamento da estrutura final.

Quanto à extrapolação do pré-dimensionamento das escadas em modelos típicos, a análise de estruturas críticas permitiu validar configurações geométricas que hidraulicamente poderão ser aplicadas às demais. No entanto, em futuro projeto executivo, as estruturas consideradas não críticas poderão ser avaliadas para otimizar sua geometria em busca eficiência financeira.

A partir das geometrias encontradas foram modeladas as escadas em 3D, utilizando o *software* Civil 3D, com objetivo de adiantar o processo de modelagem geométrica que será utilizada na simulação via CFD e visualizar a estrutura final obtida.

#### 4.3 MODELAGEM NÚMERICA EM CFD

A modelagem numérica das escadas hidráulicas foi realizada dentro da plataforma Ansys utilizando o *solver* de escoamentos de flúidos chamado Fluent.

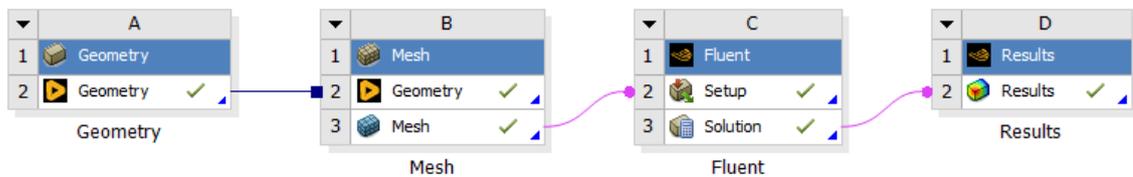
A plataforma Ansys funciona através de módulos nos quais cada módulo possui uma função específica dentro do fluxo de modelagem, ou seja, são diversos softwares com finalidades distintas que podem ser combinados dentro de uma plataforma central. Esta é denominada Ansys Workbench, um software que centraliza as ações e permite a organização do fluxo de modelagem.

Conforme ilustrado na Figura 26, a modelagem de escoamentos de fluidos envolve um fluxo de simulação numérica é descrito pelos seguintes passos:

- Pré-processamento - Geometria: modelagem em 3D do volume de controle da modelagem, dentro do sistema Ansys foi utilizado o *software* Discovery.
- Pré-processamento - Malha: geração da malha de células, dentro do sistema Ansys foi utilizado o *software* Mesh.
- Processamento - *Solver*: atribuição das condições de contorno, variáveis gerais e resolução numérica em volumes finitos, dentro do sistema Ansys foi utilizado o *software* Fluent.

- Resultados: análise dos resultados e geração de esquemáticas com a variáveis calculadas, dentro do sistema Ansys foi utilizado o *software* Results – CFD Post

Figura 28 - Fluxo de modelagem criado no Ansys Workbench.



#### 4.3.1 Pré-processamento - Geometria

O processo de modelagem da geometria é comum para todas as escadas tipo. Dentro da plataforma Ansys Discovery é possível esboçar a geometria da escada de forma 2D e posteriormente combinar os elementos e extrudá-la para formar um modelo 3D.

É importante compreender que nesta etapa se está modelando a região de escoamento do fluido e não a escada de forma estrutural. As Figuras 29 e 30 indicam as vistas isométricas dos modelos gerados.

Figura 29 - Modelos 3D das Escadas com 50% e 30%, respectivamente.

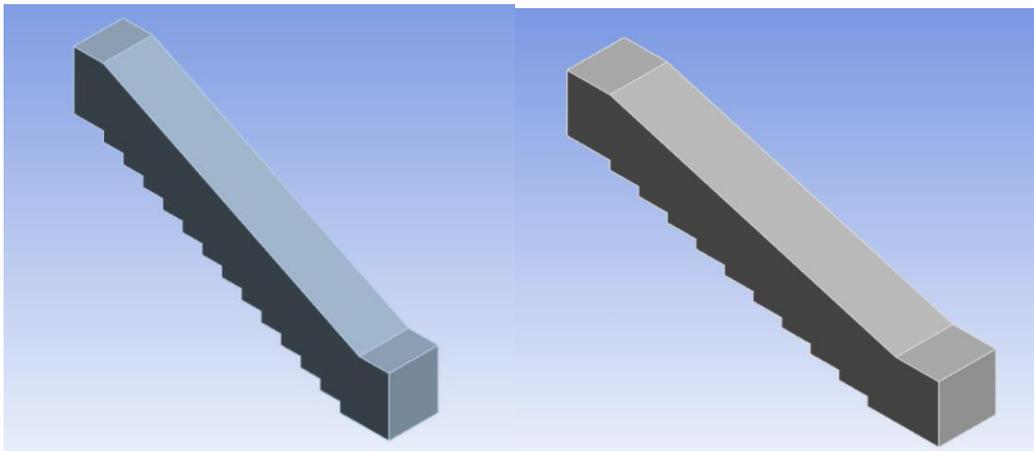
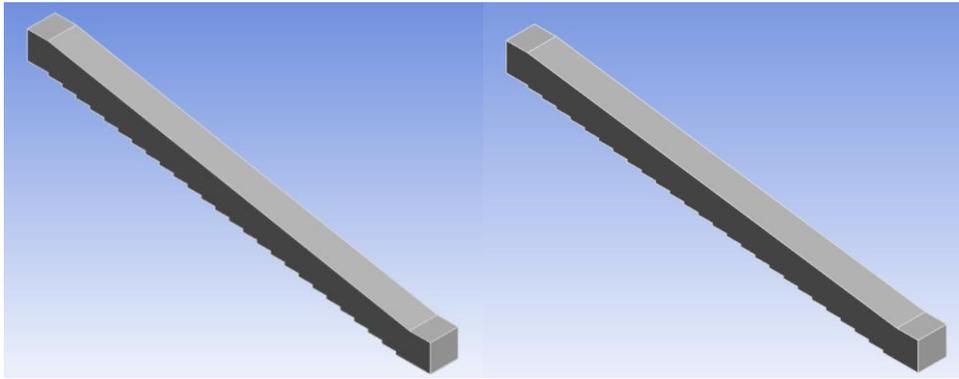


Figura 30 - Modelos 3D das Escadas com 20% e 15%, respectivamente.



#### 4.3.2 Pré-processamento - Malha

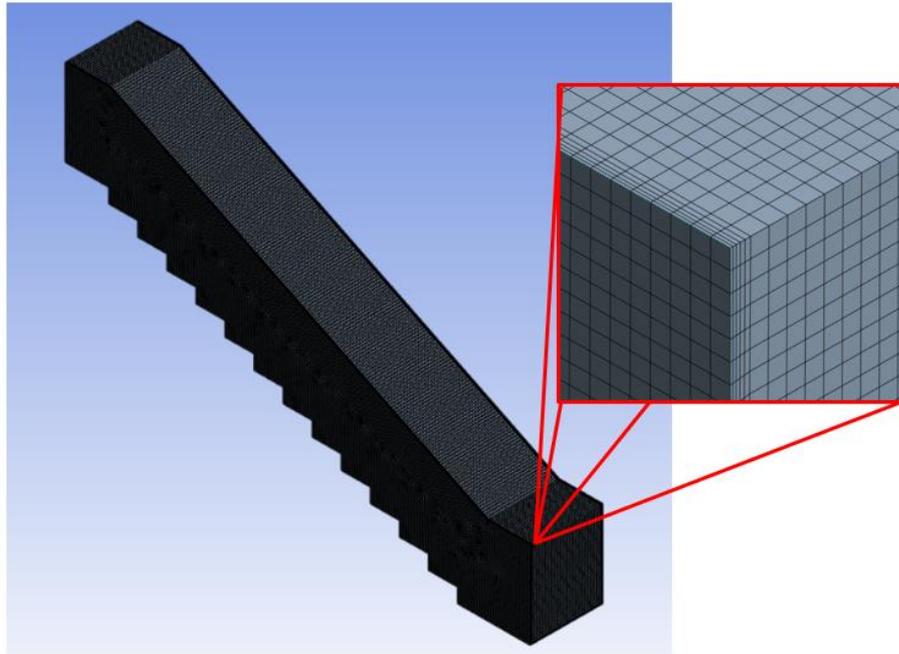
A construção da malha é automática dentro da plataforma de *mesh* do sistema do Ansys, no qual existem ferramentas que nos permitem ajustar e refinar a malha em torno das áreas de maior gradiente hidráulico.

A licença educacional limita o número máximo de células para 504 mil. Por mais que esse valor pareça alto, a escala de dimensão das escadas faz com esse valor seja rapidamente atingido.

Desta forma, como metodologia para a geração da malha computacional foi aplicado método de geração de malha próprio do Ansys Mesh chamado de *multizone*. Este método faz uma decomposição automática da geometria em regiões de malha estruturada e malha não estruturada. Assim, é possível gerar uma malha puramente hexaédrica, onde a geometria permitir, e preencher as regiões mais complicadas com malha não estruturada.

Além disso, um simples refinamento da malha foi aplicado a partir da função *inflation* (Figura 31), que gera uma maior discretização das células nas faces selecionadas. Portanto, nas faces de parede e degrau das escadas foi aplicada a *inflation* gerando mais 5 camadas de células nessas regiões.

Figura 31 - Detalhe da malha computacional nas escadas.



De modo geral, a limitação de células na licença estudantil impediu a maior discretização da malha em torno dos degraus o que limitará a análise e definição dos regimes de escoamento, mas não impedirá de se verificar a variação de gradiente de velocidade. Assim, a geração da malha em cada escada variou apenas em relação a espessura da malha, a Tabela 10 a seguir indica os dados principais de cada malha gerada.

Tabela 10 – Dados das malhas computacionais geradas.

Escada	Tamanho da Célula (m)	Número de Células	Número de Nós
Escada 50%	0.08	396.136	1643779
Escada 30%	0.06	383776	402960
Escada 20%	0.08	395410	418704
Escada 15%	0.08	382570	405216

#### 4.3.3 Processamento – Solver

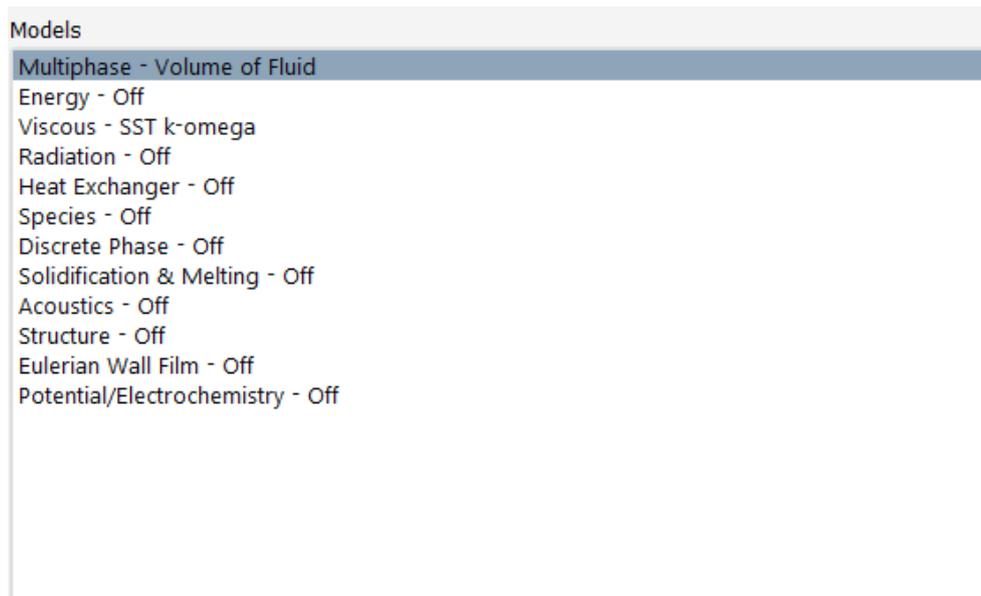
A resolução de modelos numéricos de fluidos dentro da plataforma Ansys ocorre no módulo Fluent, este possui ferramentas para simulações em regimes permanentes e transientes de fluidos em geral.

A modelagem de todas as escadas tipo possuem as mesmas condições de contorno e configurações. Inicialmente dentro do *software* definimos as condições gerais da simulação, onde é definido o tipo de regime de tempo e direção de ação da gravidade, como padrão foi utilizado regime permanente com a gravidade igual  $9,81 \text{ m/s}^2$  na direção “y”.

Na sequência definimos os modelos que serão cálculos durante a simulação, no caso deste trabalho para atingir o objetivo de verificação hidráulica das escadas apenas serão utilizados os modelos de multifase e viscosidade.

O modelo multifase adotado foi o homogêneo *Volume of Fluid* com duas fases (ar e água) e com coeficiente de tensão superficial de  $0,072 \text{ N/m}$ . Já o modelo de viscosidade foi adotado o *SST – k –  $\omega$*  utilizando os coeficientes padrão do modelo.

Figura 32 - Janela de determinação dos modelos cálculo.

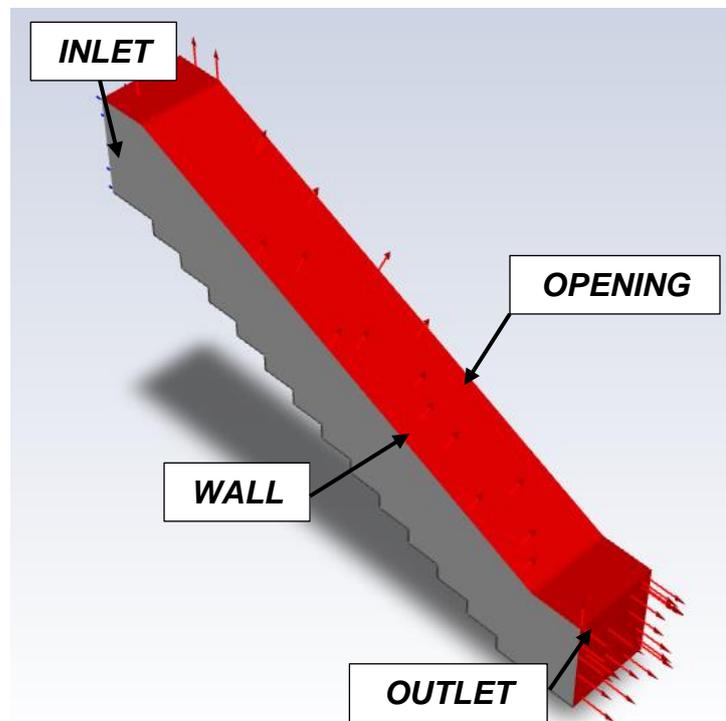


A definição das condições de contorno segue a nomeação de regiões da etapa de geração da malha e atribui tipo de condição. Foram definidas quatro condições de contorno, ilustradas na Figura 4:

- Entrada (inlet): é a face no qual é inserido o volume de fluidos dentro do sistema. Para as simulações foi considerada como condição de entrada um fluxo de massa atrelado a um determinado nível de água. Assim a fase equivalente a água entra no sistema com  $1300 \text{ kg/s}$  a um nível de  $0,104\text{m}$  para a Escada de 50% e  $0,27\text{m}$  para as demais. Não foi considerado fluxo de massa para a fase do ar.

- Aberto (opening): a face do topo do domínio foi considerada como uma abertura, onde foi atribuída condição de saída de pressão. Portanto, como a abertura se dá para atmosfera não foi atribuído nenhum valor inicial.
- Parede (wall): para as paredes do sistema foi considerado que estas estarão estáticas e foi atribuído modelo de rugosidade padrão.
- Saída (outlet): na face de saída, a jusante da escada, foi atribuída condição de saída de pressão, que se dá para atmosfera então não foi atribuído nenhum valor.

Figura 33 - Esquemático das condições de contorno.



Além destas configurações iniciais, o *software* permite adotar valores iniciais para as variáveis a serem calculadas, como velocidade nas 3 direções de escoamento, pressão e taxa de dissipação de energia turbulenta, com o objetivo de agilizar a convergência dos resultados. No entanto, não foram utilizados valores iniciais no presente trabalho.

#### 4.3.4 Pós-processamento – Manipulação dos Resultados

Após a convergência do resultado de acordo com os parâmetros e condições de contorno impostas à simulação, a plataforma Ansys fornece um módulo para manipulação dos resultados de forma gráfica.

Portanto, foram criadas visualizações que permitissem verificar e validar a simulação de acordo com os valores de referência da simulação. Assim, para a análise dos resultados foram criadas as seguintes visualizações gráficas:

- Corte longitudinal do perfil de velocidade no plano XY da escada.
- Corte transversal do perfil de velocidade no plano YZ da escada.
- Corte transversal da concentração de água no plano YZ da escada.
- Corte longitudinal da concentração de água nos planos XY da escada.

Importante salientar que, o equacionamento de captura da superfície livre por meio do método VOF, determina a faixa possível dessa variável de 0 até 1. Na medida em que zero representa o volume de controle completamente preenchido por ar e 1 a total ocupação por fluido (água neste caso). O valor médio de 0,5 é considerado como o valor de referência para a interface de ar e água, superfície do fluido, no qual devem ser tomados os valores representativos do escoamento. (AUTODESK®, 2019).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da manipulação dos resultados obtidos na modelagem numérica das escadas hidráulicas podemos avaliar a coerência da simulação em comparação ao nosso pré-dimensionamento e verificar possíveis otimizações na estrutura da escada.

Para cada simulação será observado:

- Regime de escoamento em degraus;
- Profundidade final do escoamento;
- Velocidade final do escoamento;
- Altura de referência da parede da escada;
- Dissipação de energia;
- Concentração de ar;

### 5.1 RESULTADOS – ESCADA 50%

As Figuras 31 a 34 ilustram os resultados obtidos com a simulação CFD para a escada com 50% de declividade.

Figura 34 – Velocidade – Plano XY – Escada 50%.

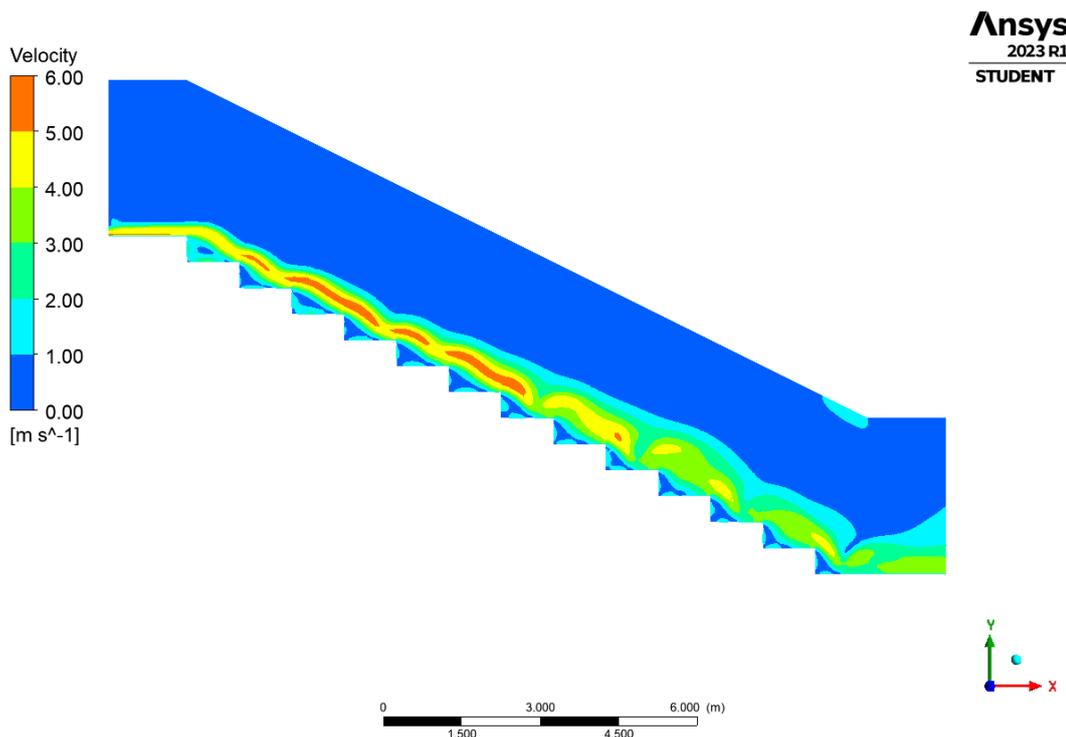


Figura 35 – Velocidade - Plano YZ- Escada 50%.

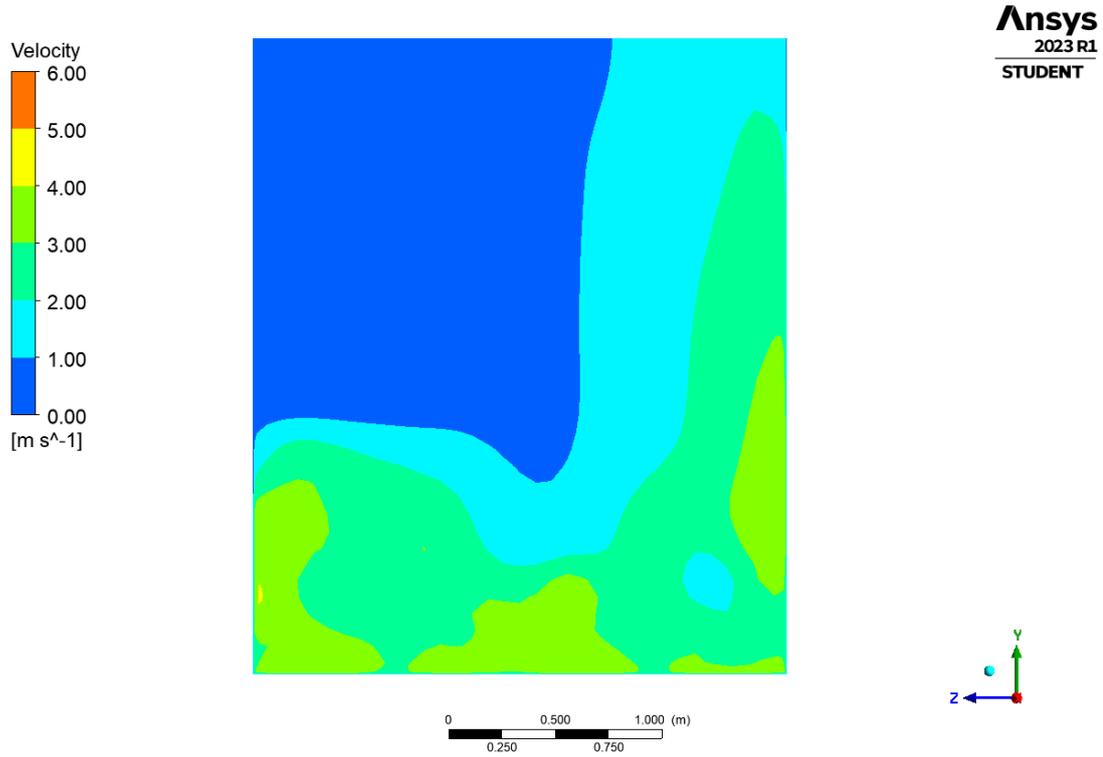


Figura 36 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 50%.

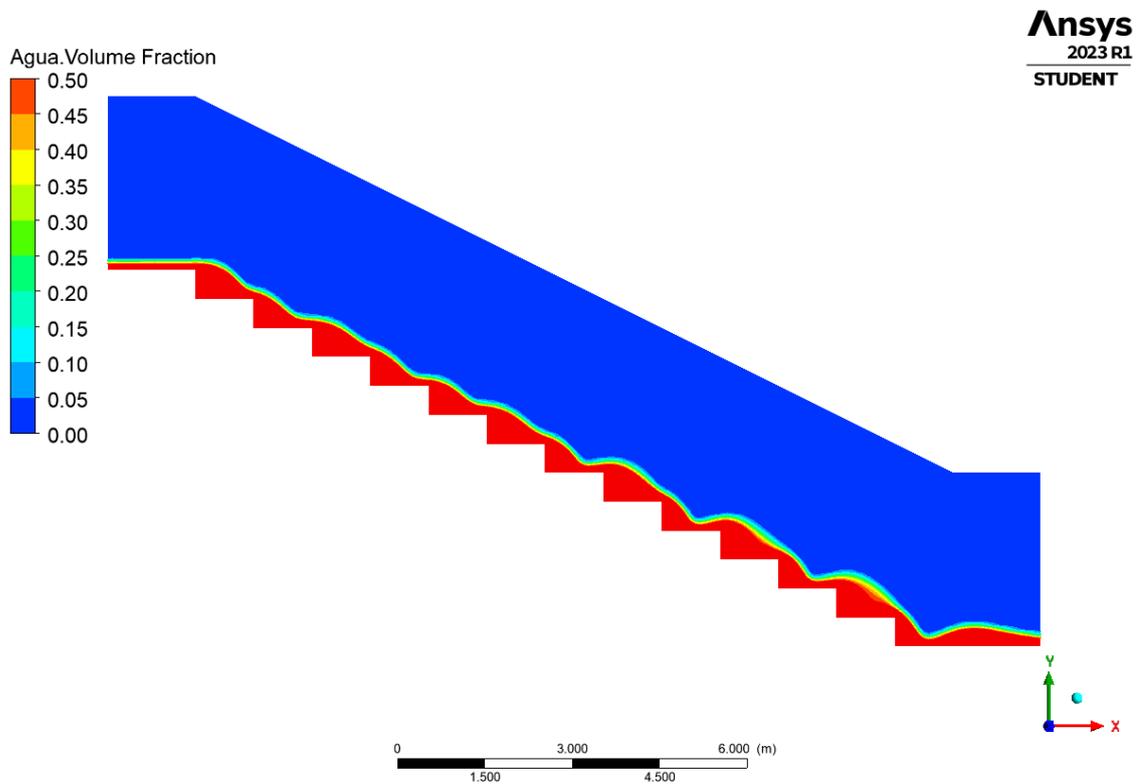
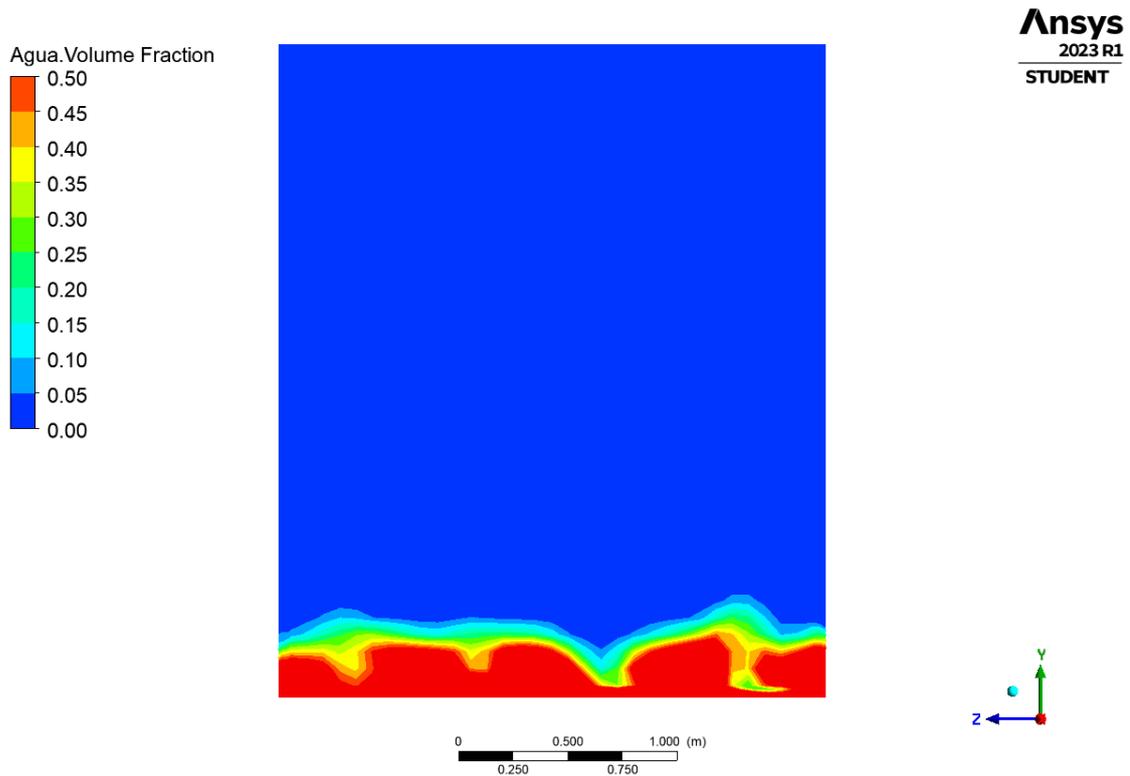


Figura 37 - Concentração da fração de água – Plano YZ – Escada 50%



O pré-dimensionamento para Escada 50% apontou um regime de escoamento de quedas sucessivas do tipo NA-3, caracterizado pelo não formação do ressalto hidráulico e o impacto parcial no degrau. A simulação via CFD indica a formação do regime NA-3, como pode ser visto na Figura 36, onde a superfície livre está bastante ondulada pela formação das quedas sem impacto total.

No entanto, a simulação não apresentou a formação de cavidade de ar no topo do espelho do degrau, que é situação característica do regime. Isso deve-se especialmente pela geração de malha da simulação, visto que a limitação de células impede um maior detalhamento desta região que dificulta a formação destas regiões na simulação.

A velocidade final encontrada é aproximadamente 28% menor (Tabela 11), isso se deve essencialmente pelo equacionamento do pré-dimensionamento, que se utiliza do *drop number* do escoamento, proveniente de modelo empírico, para avaliar as demais variáveis. De qualquer modo, os valores encontrados de profundidade final estão próximos do calculado, indicando que a continuidade da simulação, ou seja, conservação da massa.

A Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados da simulação CFD para a escada com declividade de 50%.

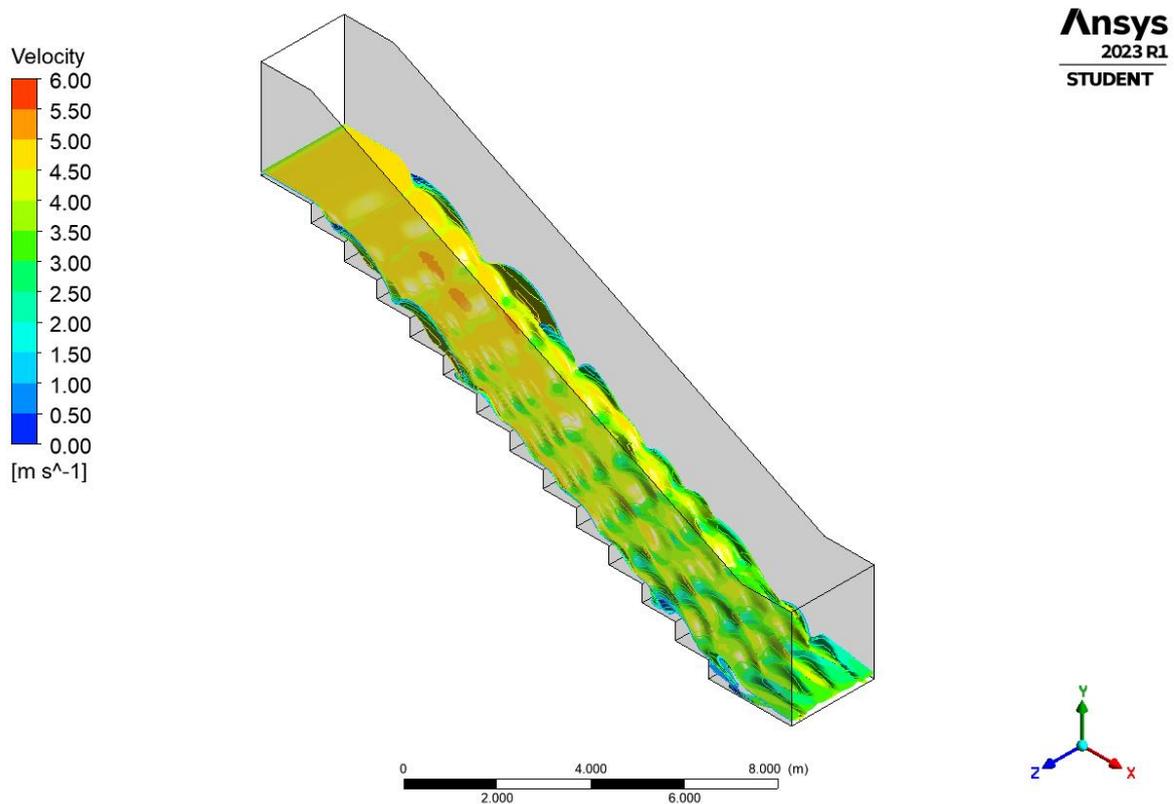
Tabela 11 - Resumo dos resultados Escada 50%.

Variáveis	Resultados Escada 50%	
	Pré-dimensionamento	CFD
Velocidade Final	4.88	3.52
Profundidade Final	0.11	0.12
Altura de Referência da Parede	0.78	0.66

O valor de referência para a altura da parede na simulação foi aproximadamente 15% menor que o calculado. Isto é vantajoso para o projeto e pode ser considerado como uma otimização, uma vez que 10 cm de altura de parede ao longo das escadas com declividade de 50% pode corresponder a um resultado financeiro positivo.

A Figura 38 representa o escoamento em três dimensões:

Figura 38 - Vista isométrica do escoamento – Escada 50%.



## 5.2 RESULTADOS – ESCADA 30%

As Figuras 35 a 38 ilustram os resultados obtidos com a simulação CFD para a escada com 30% de declividade.

Figura 39 – Velocidade – Plano XY – Escada 30%.

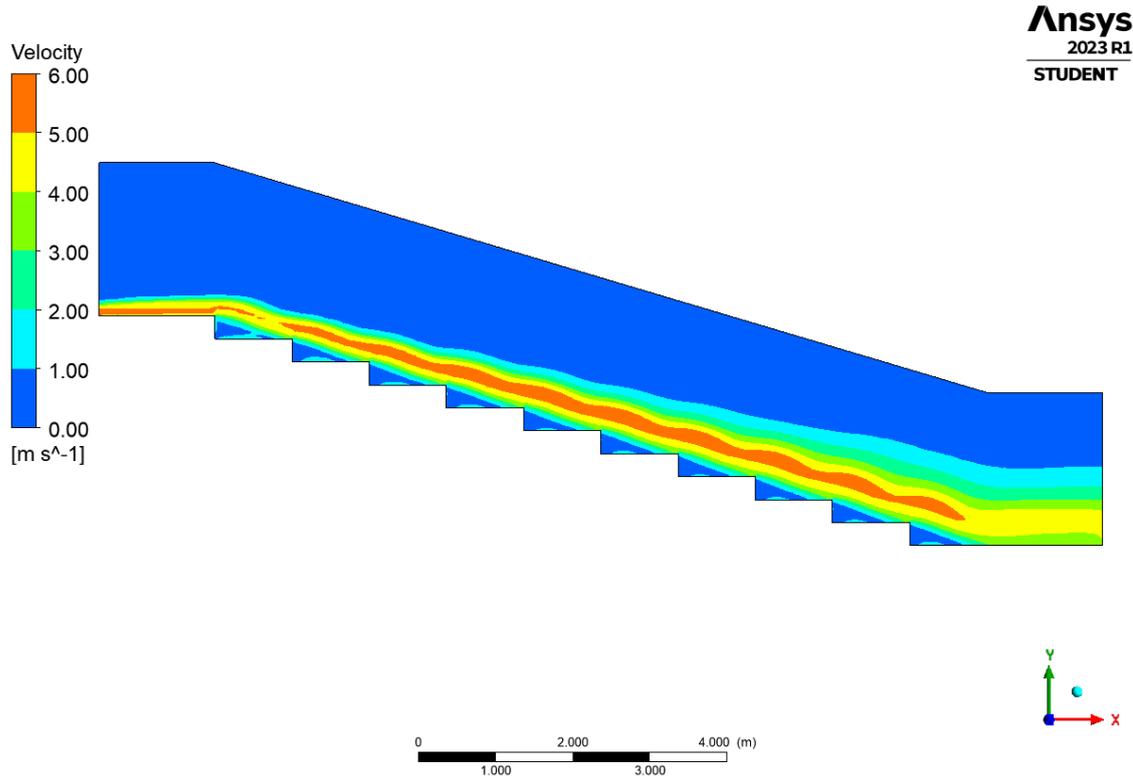


Figura 40 – Velocidade – Plano YZ - Escada 30%.

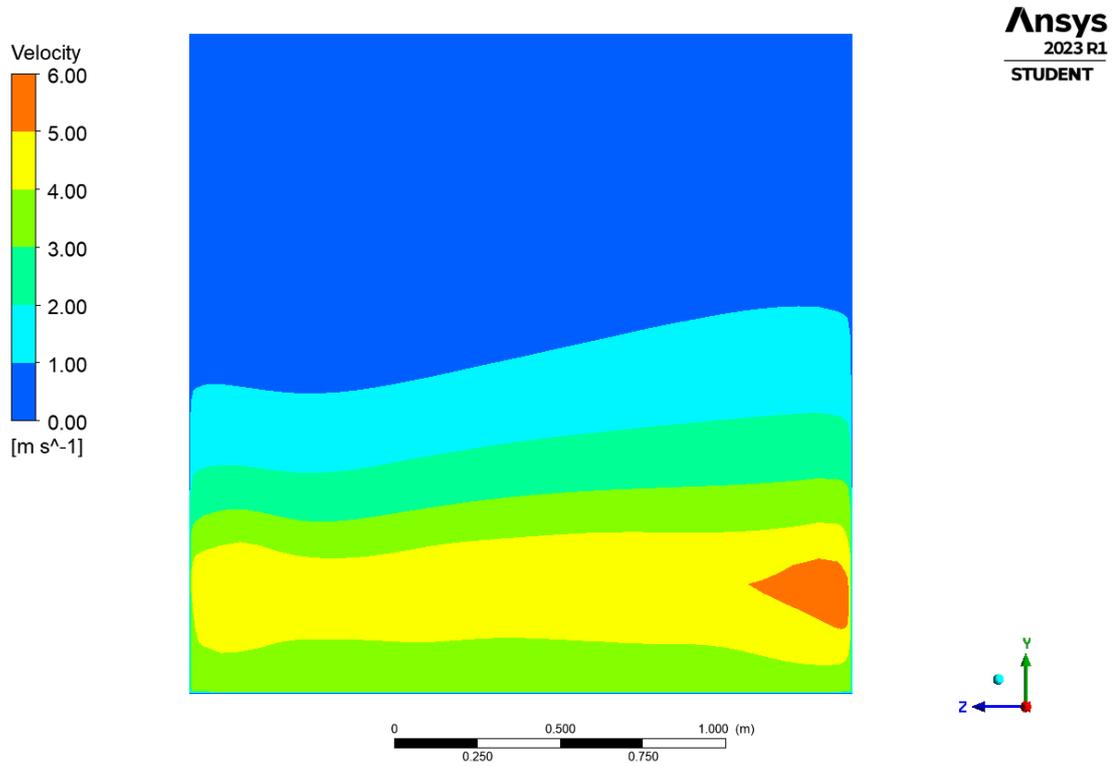


Figura 41 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 30%.

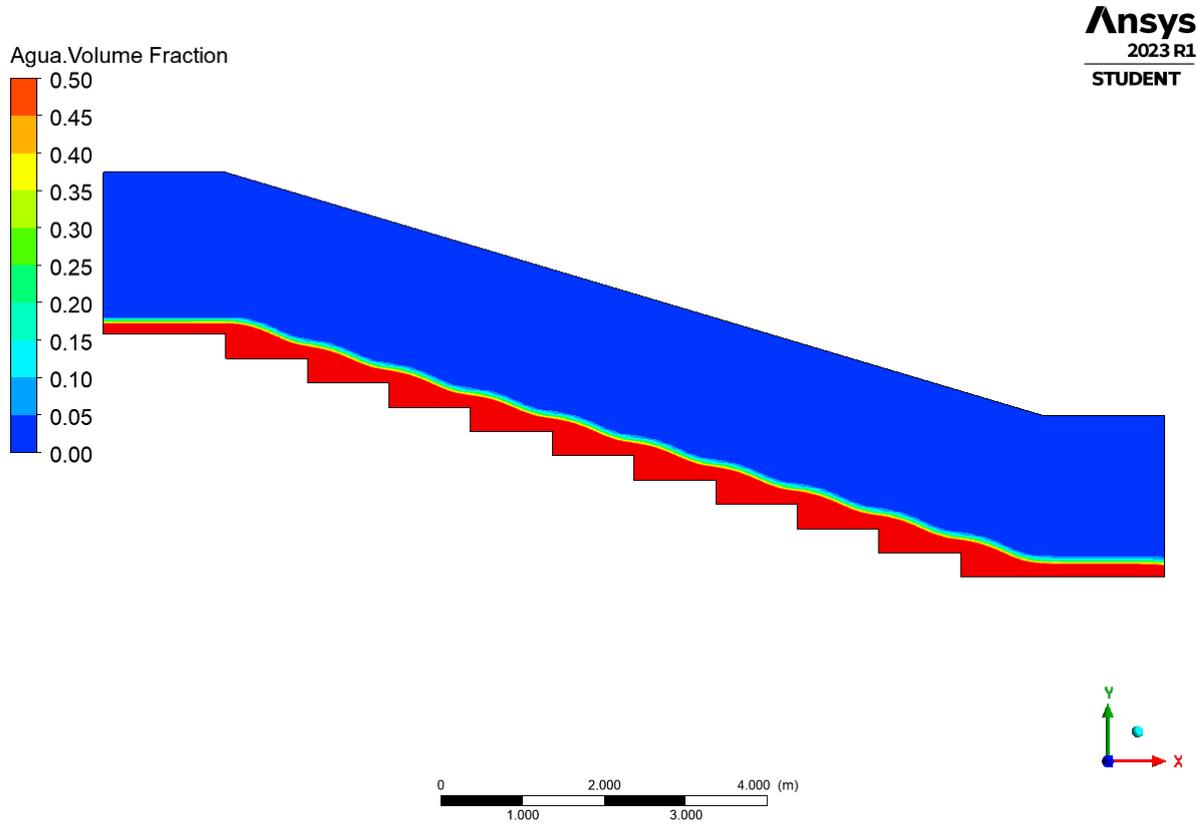
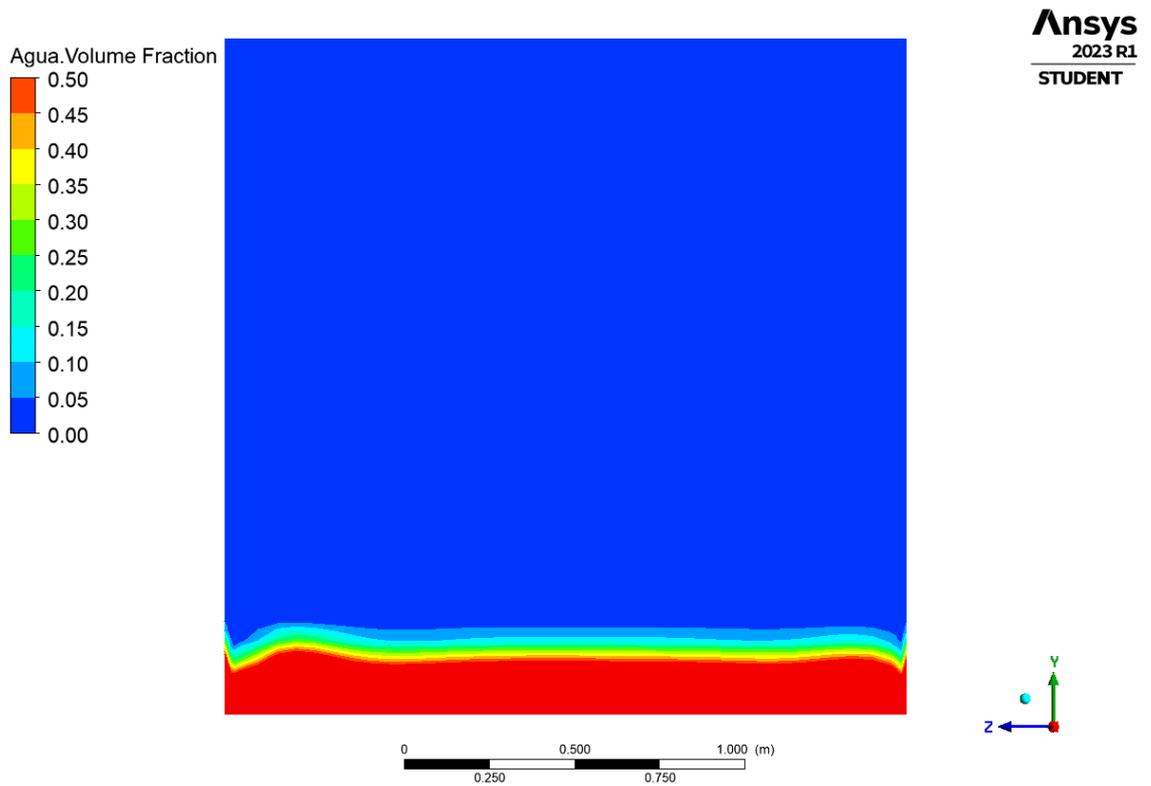


Figura 42 - Concentração da fração de água – Plano YZ– Escada 30%



O pré-dimensionamento para Escada 30% apontou um regime de escoamento deslizante entre turbilhões sem descrição de tipo, caracterizado pelo escoamento se desenvolver ao dos turbilhões formados nos degraus. A simulação via CFD indica a formação do regime SK-1, como pode ser visto na Figura 39, onde a superfície livre está ondulada e há a formação das recirculações.

A velocidade final encontrada é aproximadamente 5% menor (Tabela 12), isso se deve pelo equacionamento do pré-dimensionamento, que se utiliza das equações empíricas de Chanson (1994), Ohtsu *et al* (2001) e (2004). De qualquer modo, os modelos empíricos são fundamentados por modelos físicos bem parametrizados, logo se espera uma divergência nos resultados, mas com uma margem menor.

A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados da simulação CFD para a escada com declividade de 30%.

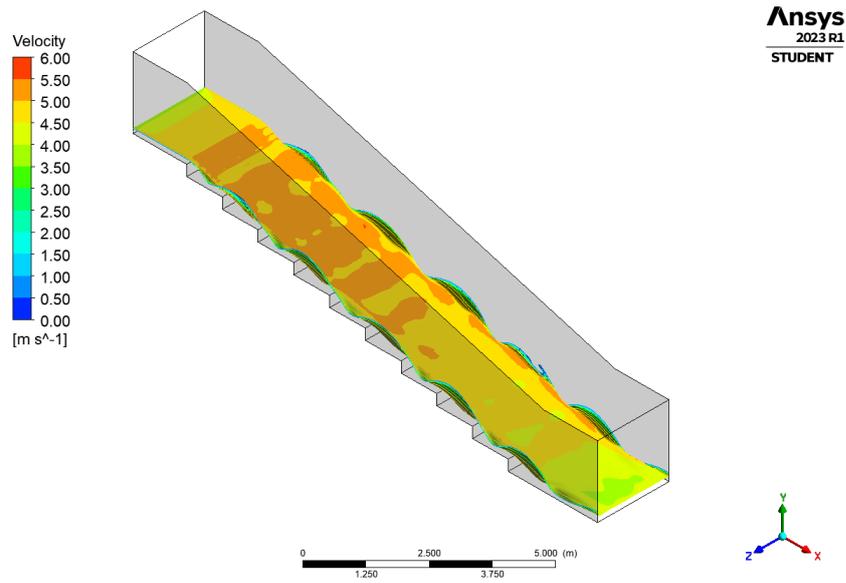
Tabela 12 – Resumo dos resultados Escada 30%.

Variáveis	Resultados Escada 30%	
	Pré-dimensionamento	CFD
Velocidade Final	4.30	4.07
Profundidade Final	0.15	0.17
Altura de Referência da Parede	0.30	0.31

Os valores encontrados de profundidade final estão próximos do calculado, indicando que a continuidade da simulação, ou seja, conservação da massa. O valor de referência para a altura da parede na simulação foi aproximadamente 3% maior que o calculado, muito próximo do calculado.

A Figura 43 representa o escoamento em três dimensões:

Figura 43 - Vista isométrica do escoamento – Escada 30%.



### 5.3 RESULTADOS – ESCADA 20%

As Figuras 39 a 42 ilustram os resultados obtidos com a simulação CFD para a escada com 20% de declividade.

Figura 44 – Velocidade – Plano XY – Escada 20%.

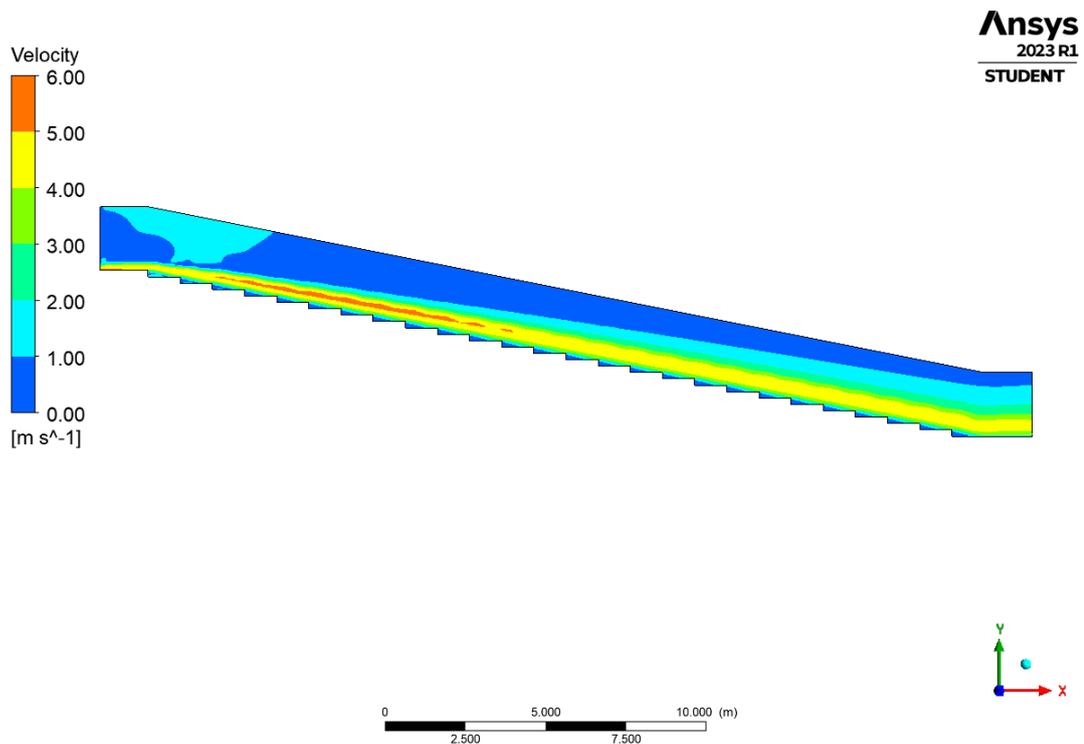


Figura 45 – Velocidade – Plano YZ - Escada 20%.

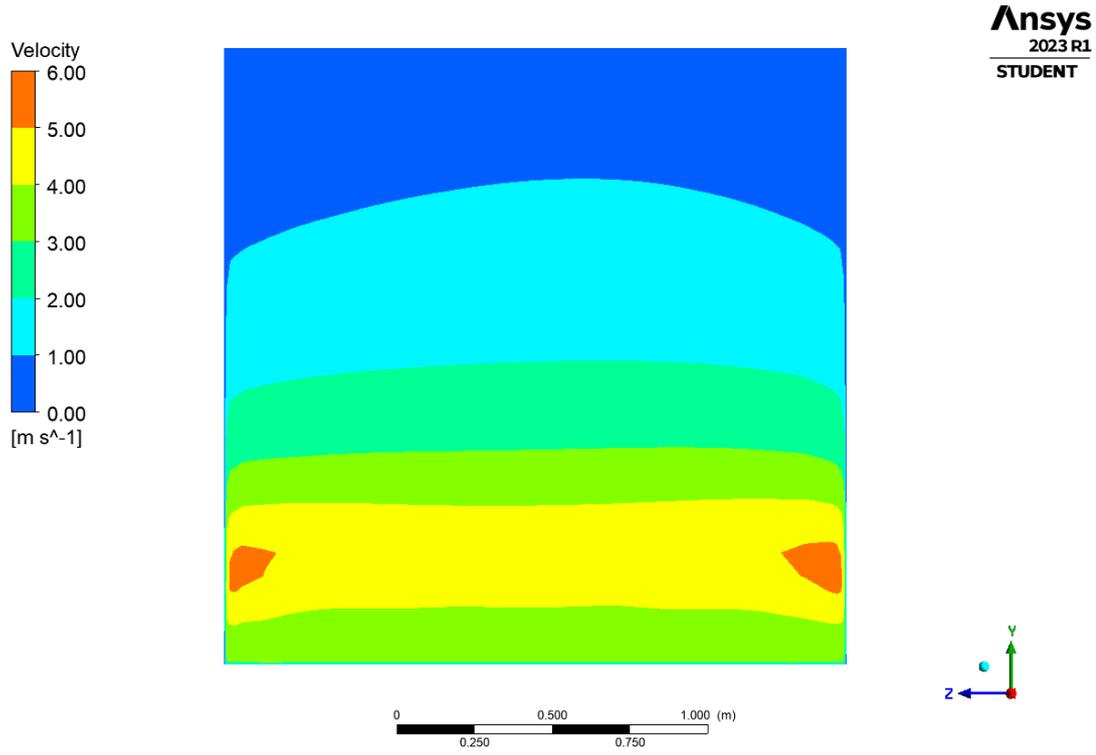


Figura 46 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 20%.

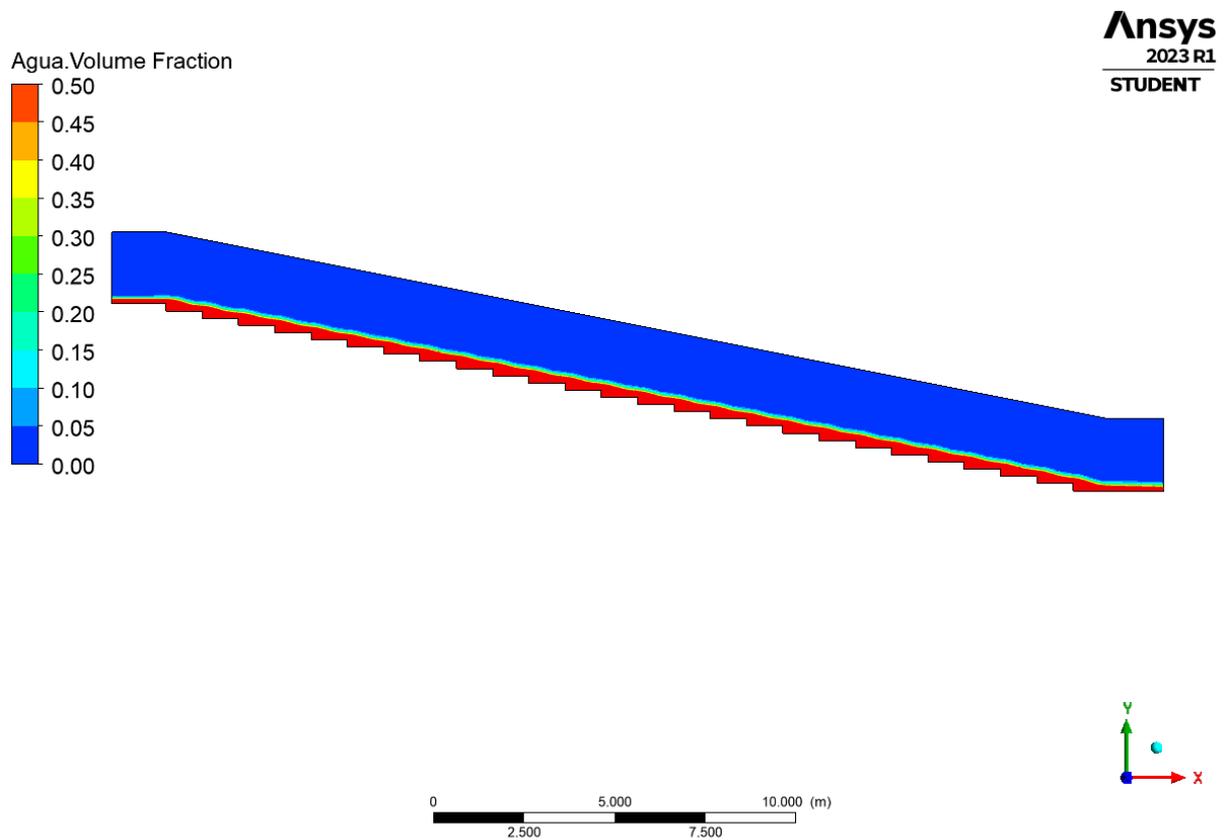
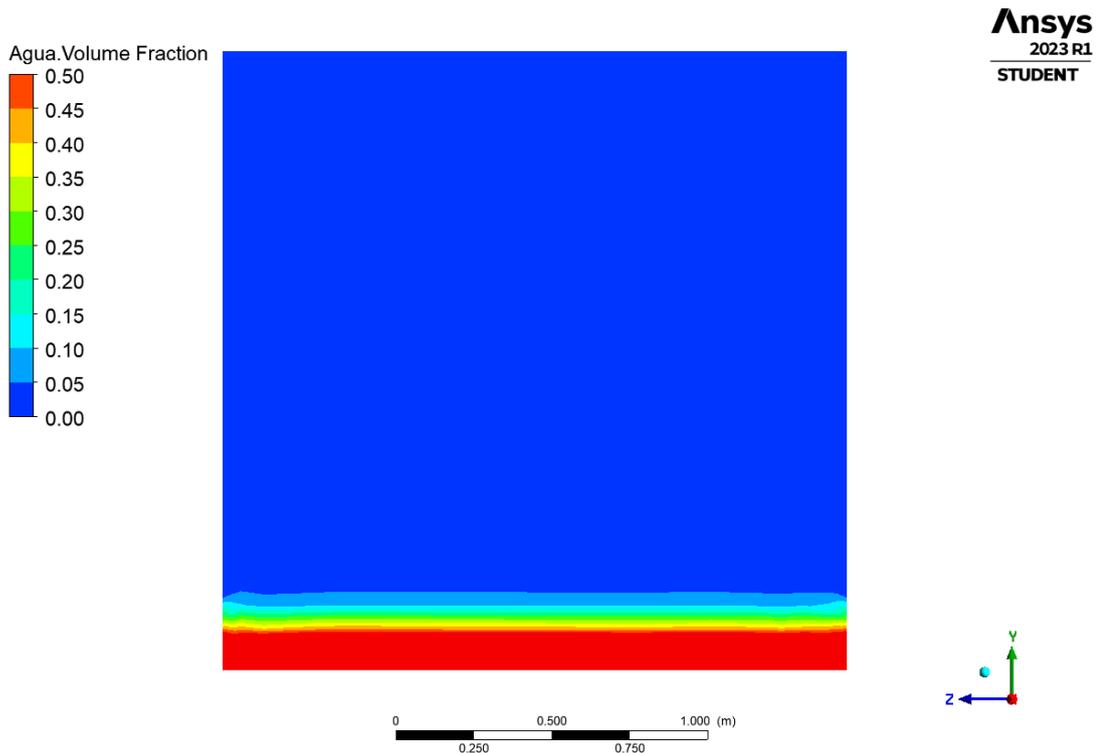


Figura 47 - Concentração da fração de água – Plano YZ– Escada 20%.



O pré-dimensionamento para Escada 20% apontou um regime de escoamento deslizante entre turbilhões sem descrição de tipo, caracterizado pelo escoamento se desenvolver ao dos turbilhões formados nos degraus. A simulação via CFD indica a formação do regime SK-1, como pode ser visto na Figura 44, onde a superfície livre está ondulada e há a formação das recirculações.

A velocidade final encontrada é aproximadamente 5% menor (Tabela 13), isso se deve pelo equacionamento do pré-dimensionamento conforme já explicitado. Os valores encontrados de profundidade final estão próximos do calculado, indicando que a continuidade da simulação, ou seja, conservação da massa. O valor de referência para a altura da parede na simulação foi aproximadamente 18% maior que o calculado, indicando a necessidade criar uma parede maior para evitar o *spray* excessivo e extravasamento.

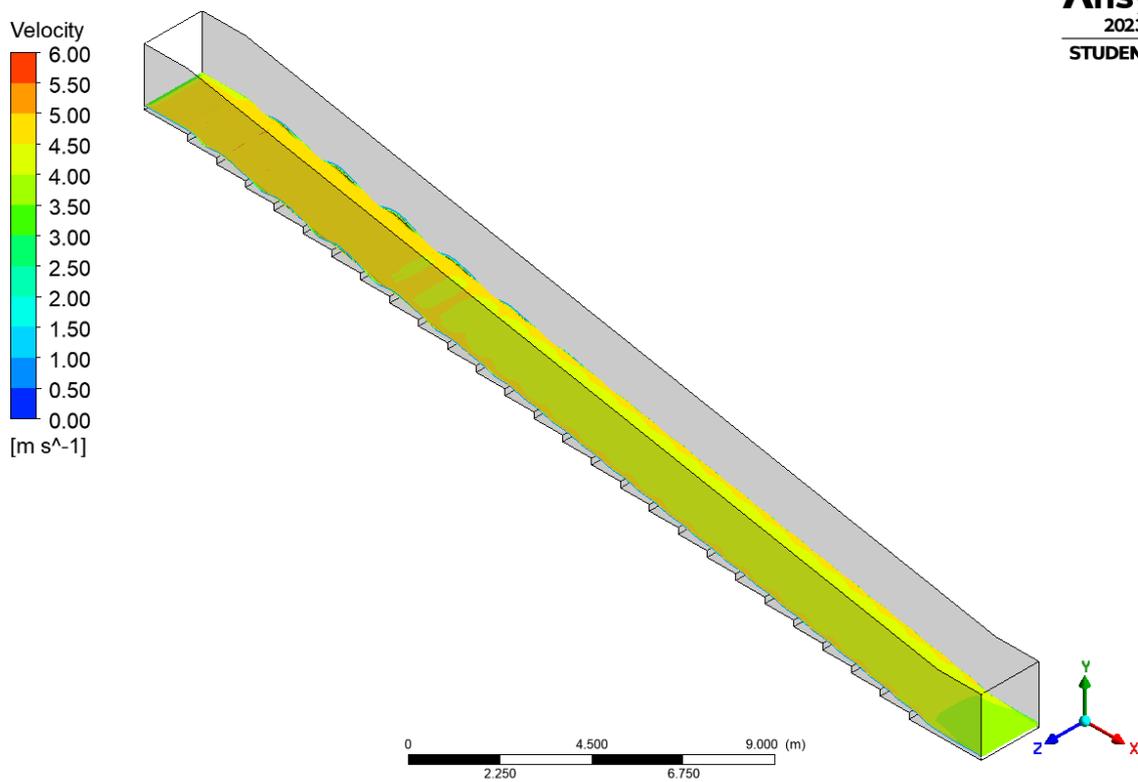
A Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados da simulação CFD para a escada com declividade de 20%.

Tabela 13 - Resumo resultados Escada 20%.

Variáveis	Resultados Escada 20%	
	Pré-dimensionamento	CFD
Velocidade Final	3.98	3.79
Profundidade Final	0.16	0.19
Altura de Referência da Parede	0.32	0.38

A Figura 48 representa o escoamento em três dimensões:

Figura 48 - Vista isométrica do escoamento – Escada 20%.



#### 5.4 RESULTADOS – ESCADA 15%

As Figuras 43 a 46 ilustram os resultados obtidos com a simulação CFD para a escada com 15% de declividade.

Figura 49 – Velocidade – Plano XY – Escada 15%.

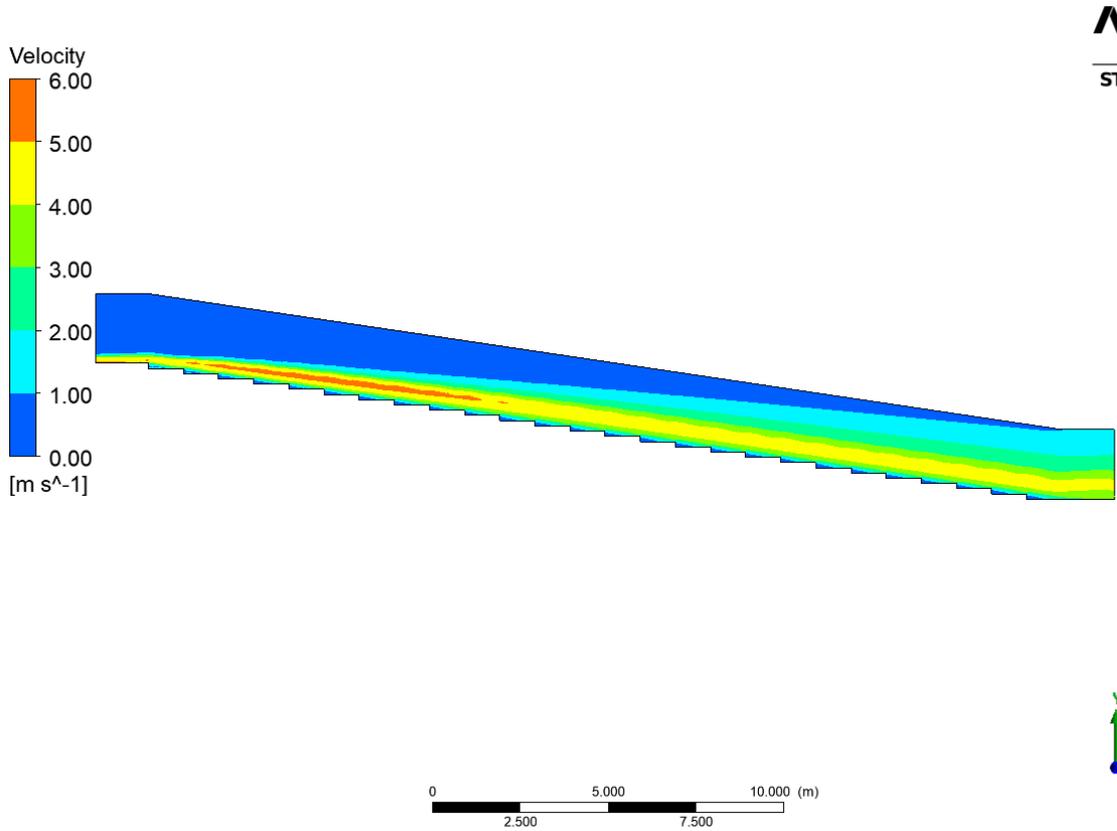


Figura 50 – Velocidade – Plano YZ - Escada 15%

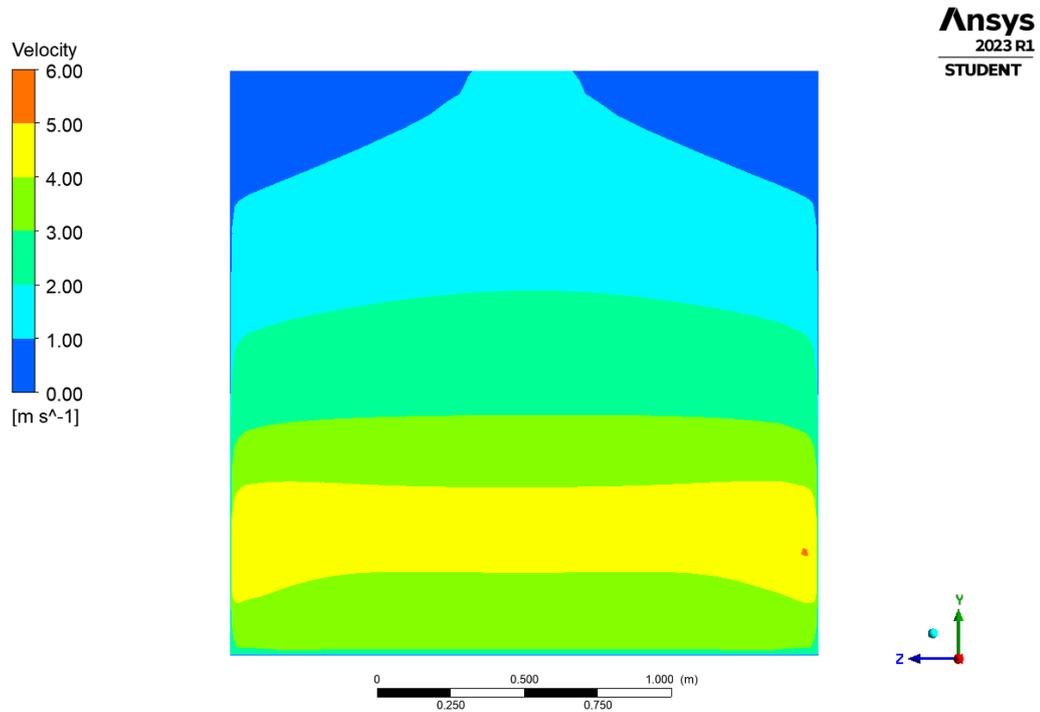


Figura 51 - Concentração da fração de água – Plano XY – Escada 15%

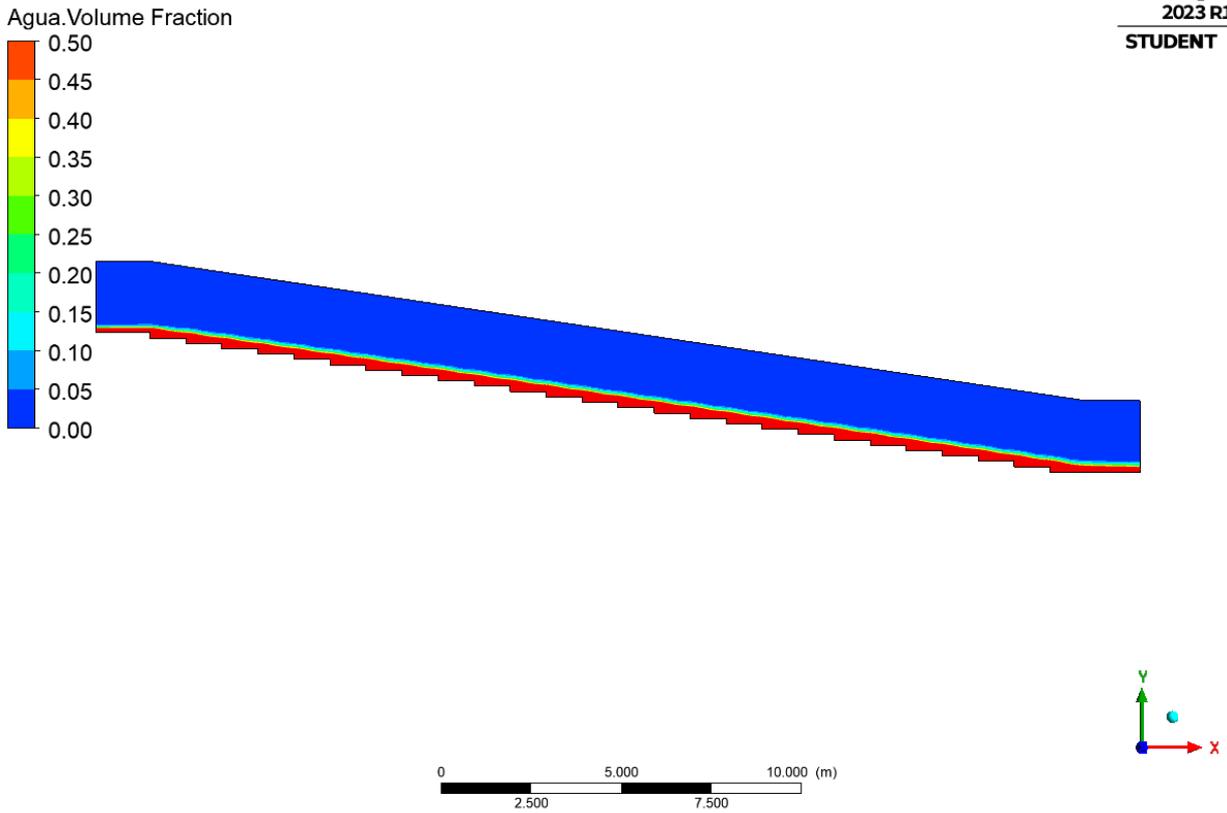
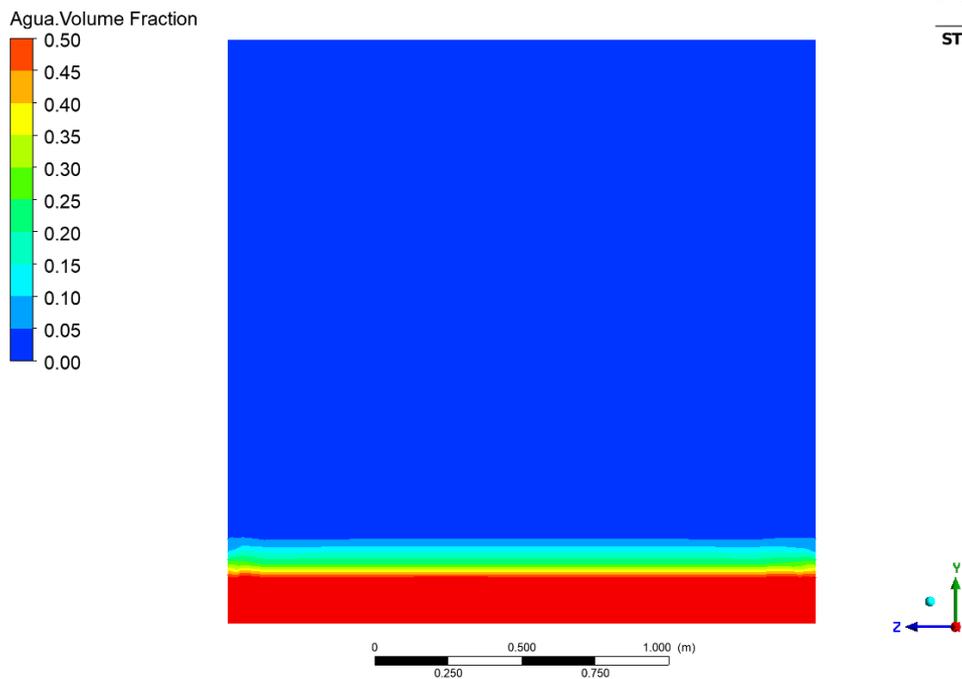


Figura 52 - Concentração da fração de água – Plano YZ – Escada 15%



O pré-dimensionamento para Escada 15% apontou um regime de escoamento deslizante entre turbilhões sem descrição de tipo, caracterizado pelo escoamento se desenvolver ao dos turbilhões formados nos degraus. A simulação via CFD indica a formação do regime SK-1, como pode ser visto na Figura 49, onde a superfície livre está ondulada e há a formação das recirculações.

A velocidade final encontrada é aproximadamente 5% menor (Tabela 14), isso se deve pelo equacionamento do pré-dimensionamento conforme já explicitado. Os valores encontrados de profundidade final estão próximos do calculado, indicando que a continuidade da simulação, ou seja, conservação da massa. O valor de referência para a altura da parede na simulação foi aproximadamente 19% maior que o calculado, indicando a necessidade criar uma parede maior para evitar o *spray* excessivo e extravasamento.

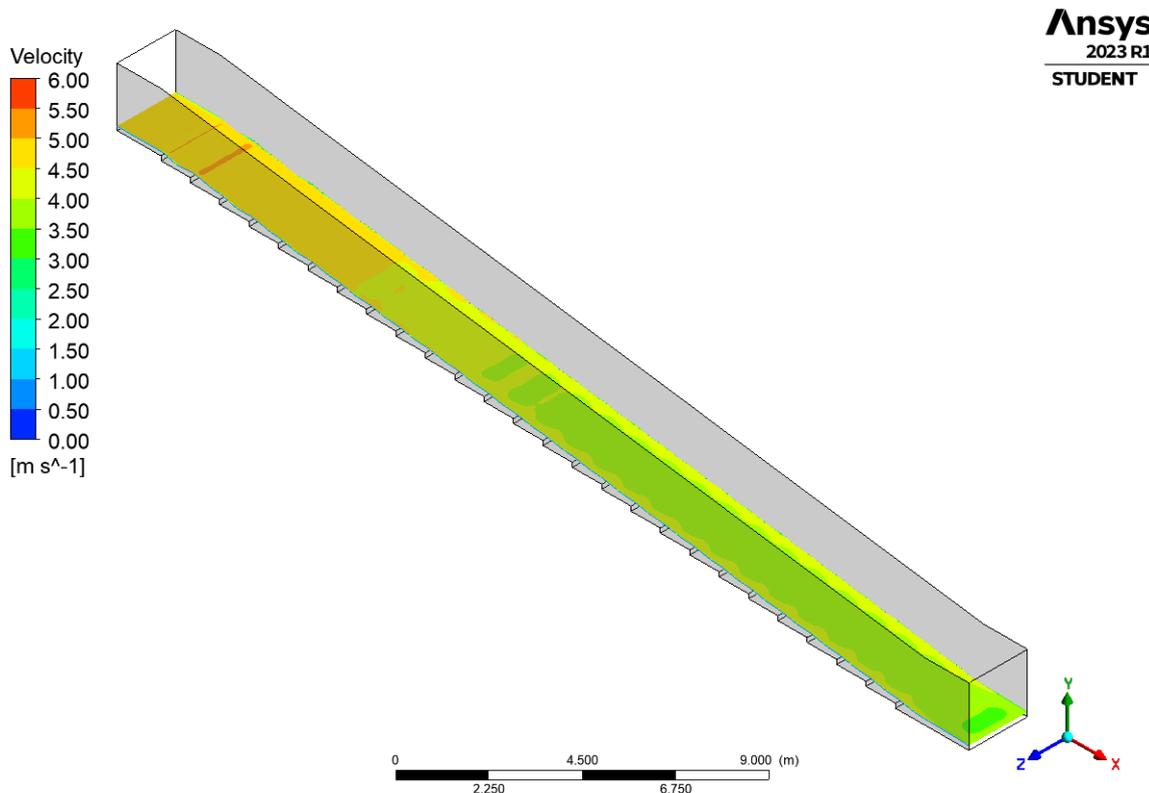
A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados da simulação CFD para a escada com declividade de 15%.

Tabela 14 – Resumo resultados Escada 15%.

Variáveis	Resultados Escada 15%	
	Pré-dimensionamento	CFD
Velocidade Final	3.81	3.61
Profundidade Final	0.17	0.19
Altura de Referência da Parede	0.33	0.39

A Figura 53 representa o escoamento em três dimensões:

Figura 53 - Vista isométrica do escoamento – Escada 15%.



A Tabela 15 seguir apresenta o resumo geral dos resultados obtidos nas simulações via CFD e os desvios com o pré-dimensionamento.

Tabela 15 – Resultados simulação e desvios.

Escada	Velocidade Final (m/s)		Profundidade Final (m)		Altura de Referência da Parede (m)	
	Valor	Desvio	Valor	Desvio	Valor	Desvio
Escada 50%	3.52	-28%	0.12	9%	0.66	-15%
Escada 30%	4.07	-5%	0.17	13%	0.31	3%
Escada 20%	3.79	-5%	0.19	19%	0.38	18%
Escada 15%	3.61	-5%	0.19	12%	0.39	19%

## 6 CONCLUSÃO

O crescimento da busca por fontes de energia renovável, gerou um aquecimento no mercado de energia solar, em especial as usinas de grande porte. No entanto, o processo construtivo dessas pode potencialmente gerar impactos nas áreas dentro e fora da usina.

O principal agente desses impactos é o escoamento superficial gerado pela chuva, que devido a compactação do solo e remoção da camada vegetal possui seu volume aumentado. Esse aumento de escoamento, gera um fluxo maior dentro e fora da usina, acelerando processos erosivos e transporte de sedimentos.

Os estudos apresentados mostraram que a prática de raspagem e manutenção do solo exposto eleva a vazão em 72%, mas que o revestimento do solo com camada vegetal contribui para a recuperação da infiltração, reduzindo assim a resposta hidrológica da usina.

Como alternativa para a resposta hidrológica da região de implantação existe a construção de sistema de drenagem com objetivo de coletar e conduzir os deflúvios de projeto para regiões a jusante da obra. Esse sistema não necessariamente se restringe a ela podendo propor estruturas hidráulicas nas áreas adjacentes, como no talvegue analisado no presente estudo de caso.

Nota-se que não há publicações a respeito de sistemas de drenagem de usinas solares no contexto Brasil e pouquíssimas publicações no contexto mundial. É de suma importância a discussão do tema dentro em meio acadêmico para fomentar estudos e metodologias sobre o tema.

Além disso, no Brasil não existem normativas que apresentem diretrizes para projetos de infraestrutura solar, portanto o compartilhando de estudos de caso é essencial para o segurança ambiental desses projetos.

Analisando o talvegue a jusante da usina de Caldeirão Grande do Piauí, PI nota-se sua característica natural de erosão linear, desta forma a vazão efluente da UFV poderá intensificá-la a curto prazo. Como alternativa as este processo foi proposto sua canalização até atingir cota a jusante do planalto.

No entanto, avaliando seu perfil longitudinal verifica-se um grande desnível com pontos de declividade acentuada, que elevarão a velocidade de escoamento acima de um limite controlado, causando cavitação e potencial transbordamento devido a formação de regime de transição.

Portanto, avaliou-se a possibilidade de utilizar escadas hidráulicas como alternativa para vencer as grandes declividades e velocidades na descida d'água. A ferramenta chave para validação destas estruturas foi a modelagem via CFD, onde utilizando do *software* Ansys Fluent simulou-se o escoamento da água pelas escadas típicas através das equações governantes e modelos de turbulência adequados.

A simulação do escoamento gerou resultados coerentes com o nível de detalhamento do problema e com valores finais próximos dos pré-dimensionamentos. Logo a utilização das escadas hidráulicas para dissipação de energia ao longo da descida d'água é eficiente limitando o regime de escoamento e controlando a velocidade dentro do limite imposto de 5 m/s.

Além disso, a modelagem dinâmica de fluidos mostra-se uma ferramenta forte para a solução de problemas robustos de hidráulica, fornecendo resultados visuais e possibilitando otimizações de projeto, como a redução da altura da parede das escadas.

Para problemas com vazões menores e velocidades controladas a utilização de equacionamentos mais simples, como os utilizados no *software* SisCCoH, se mostrou muito eficiente em relação ao custo de trabalho x resultado trazendo mais confiabilidade para a utilização desta ferramenta no dia a dia.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

O tema decorrido neste trabalho possui margem para a elaboração de novos estudos complementando o assunto e decorrendo em outras disciplinas da engenharia. Desta forma, sugere-se os seguintes tópicos:

- Avaliação da dissipação de energia no contexto geral da descida d'água via CFD, utilizando modelos de turbulência adequados como o LES, verificando o efeito do grupo total de escadas.
- Utilizar os resultados da simulação via CFD para construir modelo em elementos finitos da estrutura da escada, modelando assim as estruturas para receber o carregamento dinâmico da água.
- A utilização dos resultados de pressão nos degraus pode ainda ser estudada para avaliar a tecnologia da composição do concreto, para que seja adequada ao fluxo evitando cavitações.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. R. C.; VIEIRA, A. F. S. G. Erosão dos Solos na Amazônia. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. (Org). **Degradação dos Solos no Brasil**. 1ªed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, p. 223-260, 2014.
- AL-HASHIMI, S. A. M.; MADHLOOM, H. M.; NAHI, T. N. Experimental and Numerical Simulation of Flow Over Broad Crested Weir and Stepped Weir Using Different Turbulence Models. **Journal of Engineering and Sustainable Development**, v. 21, n. 02, p. 28–45, 2017.
- AMANM; SOLANGI; HOSSAINMS; BADARUDIN; JASMON; MOKHLIS; BAKAR; KAZI. A review of safety, health and environmental (SHE) issues of solar energy system Renew. Sustain. **Energy Rev.** 41 1190–204, 2015.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). Aerated Flow in Open Channels. Committee on Air Entrainment in Open Channels, Committee on Hydromechanics. **Journal of Hydraulics Division**. Proceedings of the ASCE, Nova Iorque, v. 87, n.HY3, p. 73-86, 1961.
- ANA. **Produção de base vetorial com o Curve Number (CN) para BHO 2014 (BHO\_CN)**. São Paulo: Ana, 2018.
- ANEEL. **Dados Abertos - Agência Nacional de Energia Elétrica estatísticas**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/>. Acesso em: 24 nov. 2022.
- ARANTES, E. J. Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via cfd. 2007. 178 f. **Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- AUTODESK®. **Autodesk® CFD**. Disponível em: <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2023/ENU/>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- ÁVILA, Pimenta de. **Manual Técnico do Programa SisCCoH**. Belo Horizonte: EHR UFMG, 2019.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 1998.
- BARNARD; AGNAOU; BARBIS. Two-dimensional modeling to simulate stormwater flows at photovoltaic solar energy sites. **Journal Water Manage**. Model. 25, 2017.
- BAUER. Turbulent Boundary on Steep Slopes. **Transactions, ASCE**, v. 119, paper 1212, 1954.

- BAYON, A.; TORO, J.; BOMBARDELLI, F.; MATOS, J.; LOPEZ, P. Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 19, n. October 2017, p. 137–149, 2018.
- BENNETT, P.; CHESTERTON, J.; NEEVE, D.; UCUNCU, M.; WEARING, M.; JONES, S. **Use of CFD for modelling spillway performance. Dams and Reservoirs**, v. 28, n. 2, p. 62–72, 2018.
- BENTALHA, C.; HABI, M. Free surface profile and inception point as characteristics of aerated flow over stepped spillway: Numerical study. **Journal of Water and Land Development**, v. 42, n. 1, p. 42–48, 2019.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª edição. São Paulo: Ícone, 2012, 335 p.
- BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v3. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003. pg. 877 – 1436: il.
- Bradshaw, P. (1967). **The turbulence structure of equilibrium boundary layers. Journal of Fluid Mechanics**, 29(4), 625-645. doi:10.1017/S0022112067001089
- CAMAPUM DE CARVALHO. J. et al. In: CAMAPUM DE CARVALHO. J. et al (Org) **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. 1ª ed. Brasília: Editora Finatec, p.39-91, 2006.
- CAMPBELL; COX; BOYD. Bondary Layer Development and Spillway Energy Losses. **Journal of the Hydraulic Division, ASCE**, p. 149-163, mai, 1965.
- CAMPERA, Felipe Ângelo Neves. Estudo De Uma Descida De Água Modular Por Meio De Modelo Físico Reduzido E Cfd. 2020. 158 f. **Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia**, UFMG, Belo Horizonte, 2020.
- CAZALBOU; SPALART; BRADSHAW. **On the Behavior of 2-Equation Models at the Edge of a Turbulent Region**. *Physics of Fluids*, 6(5):1797-1804, 1993.
- CFX. **CFX 5 Solver Theory**. Ansys Canada Ltda, Waterloo, Ontario, Canada. p. 250. 2004.
- CHAMANI; RAJARATNAM. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, Nova Iorque, p.361-368, abr, 1999.
- CHAMANI; RAJARATNAM. Jet Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, Nova Iorque, v. 120, p. 254-259, 1994.

- CHANSON. **Energy Dissipation in Hydraulic structures**. Boca Raton, FL, United States: CRC Press, 2015.
- CHANSON. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipation. **Dam Engineering**, v. 11, n.4, p. 205-242, 2001.
- CHANSON. Hydraulics of Nappe Flow Regime Above Stepped Chutes and Spillways. **Journal Of Hydraulic Engineering**. Nova Iorque, p. 445-460. jan, 1994a.
- CHANSON. Hydraulics of Skimming Flows Over Stepped Channels and Spillways. **Australian Civil Engineering Transactions**, p. 69-76, 1994b.
- CHANSON. Stepped Spillway Flow and Air Entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, p. 422-435. jun, 1993.
- CHANSON. Study of Air Entrainment and Aeration Devices. **Journal Of Hydraulic Research, IAHR, Delft**, v. 27, n. 3, p. 422-435, jun, 1989.
- CHANSON. The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways. **The Netherland: A. A. Balkema Publishers**, 2002.
- CHANSON; TOOMBES. Experimental Investigation of Air Entrainment in Transition and Skimming Flows down a Stepped Chute. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v.29, p. 145-156, 2002a.
- CHANSON; TOOMBES. Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways: The transition flow. **Journal Of Hydraulic Research**, p. 43-54, 2004.
- CHANSON; YASUDA; OHTSU. Flow Resistance in Skimming Flows in Stepped Spillways and its Modelling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, p. 809-819, 2002.
- CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYNS, Larry W. **APPLIED HYDROLOGY**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- COOK; MCCUEN. Hydrologic response of solar farms. **Journal Hydrology Engineering**. 18 536–41, 2013
- DAI PRÁ. Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. **Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- EDALAT, Mohammad Masih. **Remote sensing of the environmental impacts of utility-scale solar energy plants**. 2017. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Unlv, Las Vegas, 2017.

FAEL; PINHEIRO. Escoamentos em Quedas Sucessivas. Condições de Ocorrência e Energia Residual. **Associação Portuguesa de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 1, p. 39-50, 2003.

FARIA, T. M. G. A. **Modelação numérica de escoamentos sobre descarregadores em degraus**. 2014. 92 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

FENDRICH, R. Erosão Urbana. In: FENDRICH, R. et al. (Org). **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4ª ed. Curitiba. Champagnat, p. 15-50, 1997.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.

GANGADJARIAH; LAKSHAMANA RAO; SEETHARAMIAH. Inception and Entrainment in Self-Aerated flows. **ASCE Journal of Hydraulics Division**, v. 96, p. 1549-1565, 1970

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.S; BOTELHO, R. G. M. (Org). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 10ª ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, p. 17-55, 2015.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. 8ª ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, p. 149-209, 2008.

GUO, JAMES C. Y. **Drop height for channel erosion control**. Prof. de Engenharia civil da Universidade do Colorado localizada em Denver, 2009.

HERNANDEZ et al. **Techno-ecological synergies of solar energy for global sustainability**. Nat. Sustain. 2 560–8, 2019.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981

HORNER. An Analysis of Flow on Cascades of Steps. **Tese (Dourado) – University of Birmingham**, UK, 1969.

IGUACEL; GARCIA. Aliviaderos Escalonados. Comienzo de la Aireación Natural. Disipación de Energia em la Rápida. **Revista Ingeniería Civil**, Centro de Estudos e Técnicas Aplicadas, n.113, Espanha.

- JACOBSON; DELUCCHI. Providing all global energy with wind, water, and solar power: I. Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. **Energy Pol.** 39 1154–69, 2011.
- LAL, RATTAN. **Soil Erosion In The Tropics: Principles e Management**. McGraw-Hill, United States of America, 1990. 580p.
- LANE, L. J.; SHIRLEY, E. D.; SINGH, V. P. Modelling erosion on hillslopes. In: ANDERSON, M. G. (Org). **Modelling Geomorphological Systems**, Chichester, UK, John Wiley Sons Ltd. p. 287-307, 1988.
- LAUNDER; SPALDING. **Lectures in Mathematical Models of Turbulence**. Academic Press, London, England, 1972.
- MALISKA C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Editora Livros Técnicos e Científicos, 2004, 474 p.
- MARTINEZ. **Transição à Turbulência na Camada de Mistura Estavelmente Estratificada utilizando Simulação Numérica Direta e Simulação de Grandes Escalas**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 152, 2006.
- MATOS. Characteristics of Skimming flow over stepped spillways – Discussion. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, Nova Iorque, p. 865-869, nov, 2000.
- MATOS; SÁNCHEZ; QUINTELA; DOLZ. Characteristic Depth and Pressure profiles in Skimming Flow over Stepped Spillways. **Internacional Congress IAHR, 28**. Graz, Austria, aug, 1999.
- MEDHI, B. J.; SINGH, A.; THOKCHOM, A. K.; MAHAPATRA, S. Experimental and computational study on flow over stepped spillway. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 33, n. 5, p. 2101–2112, 2019.
- MENTER. **Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models For Engineering Applications**, AIAA Journal, 32(8):1598-1605, 1994.
- MENTER; KUNTZ; LANGTRY. **Tem Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model**, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 625-632, 2003.
- MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA. **Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos**. Rio de Janeiro: Geo Uerj, 2010.
- MOORE-O'LEARY; HERNANDEZ; JOHNSTON; ABELLA; TANNER; SWANSON; KREITLER; LOVICH. **Sustainability of utility-scale solar energy—critical ecological concepts** Front. Ecol. Environ. 15 385–94, 2017.

- MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3ª ed. Oxford – UK. Blackwell Publishing Ltd, 2005.
- NARUNA, Dias Galas. **Uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes**. Universidade Anhembi Morumbi -Trabalho de Conclusão de Curso. São Paulo, 2006
- OHTSU; YASUDA. Characteristics of flow conditions on stepped channels. **Congress-Internacional Association For Hydraulic Research**. São Francisco, p. 583-588. jan. 1997.
- OHTSU; YASUDA; TAKAHASHI; CHAMANI; RAJARATNAM. Onset of skimming flow onde stepped spillways. **Journal Of Hydraulic Engineering**, p. 522-524, 2001.
- OLINGER. Contribuição ao Estudo da Distribuição de Pressões nos Vertedouros em Degraus. **Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo**. São Paulo: USP, 2001.
- OSMAR, F. M. Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H. 2016. 84 f. **Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- OSSES, Juan. **O método dos volumes finitos**. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>. Acesso em: 27 fev. 2023.
- OTSHU; YASUDA; TAKAHASHI. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, p. 860-869, 2004.
- PEGRAM; OFFICER; MOTTRAM. Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. **Journal Of Hydraulic Engineering**, p. 500-510, mai, 1999.
- PERAZZOLI, Débora Lia; GOBBI, Eduardo Felga; TIEPOLO, Gerson Maximo. Proposta de critérios norteadores e requisitos mínimos para licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 333-344, mar. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020187883>.
- PEREIRA, Juliana Sousa; RODRIGUES, Silvio Carlos. EROSÃO POR VOÇOROCAS: ESTADO DA ARTE. In: CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio de et al. **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. Brasília: Ich-Unb, 2022. p. 503-529.
- PEYRAS; ROYET; DEGOUTTE. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, Nova Iorque, p. 707-717, mai, 1992.

- POESEN, J. et al. 2003. **Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs**. Catena. Amsterdam. v. 50 (2-4): p.91-133. Jan. 2003.
- POESEN, J. W.; VANDAELE, K.; VAN WESEMAEL, B. **Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands**. In: Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives, (Exeter Symposium) [S.l.: s.n, 1996] p. 251-266.
- POVH. Avaliação da Energia Residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxo em regime skimming flow. **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná**. Curitiba, PR, 2000.
- RAJARATNAM. Skimming Flow in Stepped Spillways. **Journal Of Hydraulic Engineering**. Nova Iorque, p. 587-591. abr, 1990.
- REZENDE, André Luiz Tenório. **Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**. 2009. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2009.
- RICE; KADAVY. Model Study of Roller Compacted Concrete Stepped Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, Nova Iorque, v. 122, p. 292-297, jun, 1996.
- ROCHA, E. A. V. **Processos de Voçorocamento na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Vai Vem (Ipameri-GO)**. 2012, 171 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- RODRIGUES, S. C. Degradação dos solos no Cerrado. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. (Org). **Degradação dos Solos no Brasil**. 1ªed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, p. 51-85, 2014.
- ROMA, W. **Fenômenos de Transporte para Engenharia**. Editora Rima. 2006.
- SALMASI, F.; SAMADI, A. **Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways**. Applied Water Science, v. 8, n. 8, p. 1–11, 2018.
- SANAGIOTTO, D. **Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SCHLICHTING, H. **Boundary-layer Theory**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1979.
- SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. 2ª.ed Oxford, New York, 2005. 451. P.

SHOJA, F.; NIKPOUR, M. R.; SADEGHI, H. Determination of Energy Dissipation in Stepped Spillways Using Finite Element and Finite Volume Methods. **Journal of Civil Engineering and Urbanism**, v. 3, n. 4, p. 150–155, 2013.

SILVESTRINI JH. Simulação Numérica Direta e de Grandes Escalas de escoamentos Transicionais e Turbulentos. In: **Coleção Cadernos de Turbulência**. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM. Rio de Janeiro. Vol. 2, Cap. 1, p. 1–81, 2003.

SIMÕES. Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus Metodologias dimensionais para pré-dimensionamento. 2008. 286 f. **Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21072008-141151/pt-br.php>>.

SORENSEN. Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. **Journal Of Hydraulic Engineering**. Nova Iorque, p. 1461-1472. dez, 1985.

STEPHENSON. Energy dissipation down stepped spillways. **Water, Power & Dam Construction**, p. 27-30, 1991.

STRAUB; ANDERSON. Experiments on self-aerated flow in open channels. **Journal of Hydraulic Division, ASCE Proc. ASCE**, v.87, p. 1890-1 a 1890-35, 1958.

TOMAZ, P. (2014). **Curso de Manejo de Águas Pluviais** Capítulos 18 e 74.

TOZZI, M. J. **Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus**. 1992. 302 f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

TOZZI; BRIGHETTI. Energia Residual no pé de vertedouros com degraus. **Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos**. Rio de Janeiro: ABRH, v. 11, p. 49-61, dez, 1993.

TUCCI e BELTRAME. **Infiltração e armazenamento no solo**: In: TUCCI. Hidrologia: ciência e aplicação, 2ª Ed., Porto Alegre. Rio Grande do Sul (RS). Editora Universidade, p.335-372, 2000.

TUCCI. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª Ed., Porto Alegre. Rio Grande do Sul (RS). Editora Universidade. 2000. 943p.

US Energy Information Administration (EIA) 2020 U.S. **Energy Information Administration (EIA)—Data. Monthly Energy Review (US Energy Information Administration)**

<https://eia.gov/totalenergy/data/browser/index.php?tbl=T10.06#/?f=M%start=200001>.

- VALERO, DANIEL; BUNG. Development of the interfacial air layer in the non-aerated region of high-velocity spillway flows. Instabilities growth, entrapped air and influence on the self-aeration onset. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 84, p. 66–74, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.012>>.
- VERSTEEG, H. . K.; MALALASEKERA, W. An **Introduction to the computational fluid dynamics**. 2. ed. London: Pearson, 2007.
- VIANNA, M. R.; BRAZ, M. DA G.; SILVA, E. F. DA S. IX-019- **Desempenho hidráulico de dissipadores contínuos em degraus e sua relação com o ressalto hidráulico: estudo de caso e recomendações para trabalho experimental**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2013, Goiânia. Anais. 2013, Goiânia: ABES, 2013.
- WISCHMEIER, V. H.; SMITH, D. D. **Predicting Rainfall – Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil conservation**. 49. p. Department of Agriculture, 1965.
- XU, W. L.; LUO, S. J.; ZHENG, Q. W.; LUO, J. Experimental study on pressure and aeration characteristics in stepped chute flows. **Science China Technological Sciences**, v. 58, n. 4, p. 720–726, 2015.
- YAVARI, Rouhangiz; ZALIWCIW, Demetrius; CIBIN, Raj; MCPHILLIPS, Lauren. Minimizing environmental impacts of solar farms: a review of current science on landscape hydrology and guidance on stormwater management. **Environmental Research: Infrastructure and Sustainability**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 032002, 8 ago. 2022. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/2634-4505/ac76dd>.
- ZHAN, J.; ZHANG, J.; GONG, Y. Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, v. 6, n. 3, p. 139–142, 2016.