



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RICARDO AUGUSTO DE FARIAS FREIRE FILHO

**DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE CANAIS EM DEGRAUS COM
ESCOAMENTO NO REGIME *SKIMMING FLOW*: COMPARAÇÃO ENTRE O
SISCCOH E PLANILHAS ELETRÔNICAS**

Recife
2025

RICARDO AUGUSTO DE FARIAS FREIRE FILHO

**DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE CANAIS EM DEGRAUS COM
ESCOAMENTO NO REGIME *SKIMMING FLOW*: COMPARAÇÃO ENTRE O
SISCCOH E PLANILHAS ELETRÔNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D. Sc. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Coorientador: Prof. D. Sc. Marcus Nóbrega Gomes Júnior.

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Freire Filho, Ricardo Augusto de Farias.

Dimensionamento hidráulico de canais em degraus com escoamento no regime Skimming Flow: comparação entre o SisCCoH e planilhas eletrônicas / Ricardo Augusto de Farias Freire Filho. - Recife, 2025.

71 p : il., tab.

Orientador(a): José Roberto Gonçalves de Azevedo

Coorientador(a): Marcus Nóbrega Gomes Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Descidas escalonadas. 2. Skimming Flow. 3. Hidráulica computacional. 4. Análise quantitativa. 5. Dissipadores de energia. 6. Excel. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de. (Orientação). II. Gomes Júnior, Marcus Nóbrega. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: – Ricardo Augusto de Farias Freire Filho

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: José Roberto Gonçalves de Azevedo

Examinador 1: Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Examinador 2: Elissandra Cheu Pereira do Nascimento

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Dimensionamento hidráulico-hidrológico de canais em degraus com escoamento no regime Skimming Flow: comparação entre o SisCCoH e planilhas eletrônicas.

LOCAL: Apresentação remota.

DATA: 12/02/2025 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 14:00 horas.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com **NOTA: 9,0 (nove)**.

1) (x) aprovado(s) (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 $\leq$ nota $< 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota $< 3,0$)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 12 de dezembro de 2024

Orientador:

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE ROBERTO GONCALVES DE AZEVEDO
Data: 17/02/2025 17:30:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador 1:

Documento assinado digitalmente
gov.br ELISSANDRA CHEU PEREIRA DO NASCIMENTO
Data: 13/02/2025 09:54:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador 2:

Candidato:

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO AUGUSTO DE FARIAS FREIRE FILHO
Data: 17/02/2025 18:45:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br LEIDJANE MARIA MACIEL DE OLIVEIRA
Data: 15/02/2025 05:13:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.
Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

RICARDO AUGUSTO DE FARIAS FREIRE FILHO

**DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE CANAIS EM DEGRAUS COM
ESCOAMENTO NO REGIME *SKIMMING FLOW*: COMPARAÇÃO ENTRE O
SISCCOH E PLANILHAS ELETRÔNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: dia 12/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. D. Sc. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. D. Sc. Marcus Nóbrega Gomes Júnior (Coorientador)
University of Arizona

Prof^a. D. Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. M. Sc. Elissandra Cheu Pereira do Nascimento (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho às minhas mães Maria José e Maria Simodocea, cujos esforços para que eu estudasse foram imensuráveis.

AGRADECIMENTOS

Indubitavelmente, agradeço em primeiro lugar às duas mulheres que me criaram, fizeram parte de toda a minha formação e que ansiaram por este momento mais do que eu mesmo, minhas mães Maria José e Maria Simodocea, muito obrigado por tudo.

Agradeço à minha incrível namorada Letícia Rodrigues por todo incentivo, suporte e compreensão durante a jornada acadêmica, bem como por ter vibrado mais do que eu com a aprovação do mestrado, além de ser um exemplo de profissional e pessoa, é um privilégio dividir a vida com você. Também agradeço aos meus sogros seu Charles e dona Miriam pelo acolhimento e palavras sábias. Meus cunhados Henrique e Lori.

Além disso, agradeço imensamente ao meu professor, orientador e referência José Roberto por ter me apresentado à Hidráulica, passar com tanta paciência e paixão seus ensinamentos. Para quem já viu e elogiou bastante minhas planilhas do Excel, ainda preciso comer muito arroz com feijão para chegar perto dele. O que também se estende às habilidades com calculadoras científicas.

Agradeço também à professora Leidjane pelo imenso carinho e paciência nas cadeiras de Hidrologia e Recursos Hídricos, eu sei que dei muito trabalho, mas valeu muito a pena ter feito cada lista da senhora pelo menos duas vezes, uma manuscrita e outra numa planilha. A senhora é o exemplo perfeito do que é didática e sempre nos lembrou que “quem ama cuida”.

Um agradecimento especial aos meus amigos da escola que estão comigo até hoje, e seus agregados também. Toda vez que eu voltava para Maceió me perguntavam como andava a graduação e diziam para estudar mais. Nicole, Mariana, Mairla, Bia, Thomás e Duarte, obrigado.

Ainda sobre a escola, gostaria de agradecer do fundo do meu coração ao professor Carlos Murakami que foi meu primeiro professor de Matemática e me ensinou que ela é a arte mais bela da vida. Agradecer aos professores Lucas de Stefano, Gabriel, Marcony e Ricardo pelos ensinamentos que me possibilitaram ter entrado na UFPE.

Muita gratidão pelo meu amigo e irmão Luciano que esteve presente durante essa longa jornada, sempre me incentivando e dividindo as angústias da vida de um jovem adulto. Além dele, meus amigos Hudson, Igor e Macs, com os quais convivi no pensionato. Adiciono a essa lista, Lu e Neidinha que cuidavam de todos nós.

Agradecer ao meu amigo de longas datas e que veio do colégio Madalena para UFPE comigo, Lucas. O qual me ajudou bastante inclusive com aulas de programação que foram fundamentais na elaboração deste estudo e permitiram o número enorme de simulações, a pessoa com o raciocínio lógico mais apurado que conheço.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos da TPF com os quais tive oportunidade de trabalhar, em especial aqueles que tive mais contato: Alexson, Maria e Arivânia. Foram dois anos incríveis de muito aprendizado, trabalho e projetos de drenagem que fizeram eu me encantar ainda mais com a área de Recursos Hídricos. Sem dúvidas, o melhor lugar que já trabalhei, tanto pelo conhecimento técnico da equipe, como pelo ótimo tratamento que recebi. Todos foram muito solícitos ao passarem seus conhecimentos.

Nessa longa caminhada, não poderia deixar de agradecer aos amigos que a Engenharia me deu: Gabi, Breno e Cinthia. Os quais dividiram comigo o fardo das incontáveis provas e extensos trabalhos da Área 2 e do CTG. Obrigado por mostrarem que apesar de árdua, a luta vale a pena e que acompanhados de boas pessoas podemos chegar mais longe.

Agradeço imensamente ao meu coorientador pela longa conversa que tivemos sobre estudos, mestrado e ciência no Brasil. Ela foi fundamental para que eu tomasse a decisão de fazer a prova do mestrado e estar finalizando o TCC antes do planejado para poder assumir a vaga no programa de pós-graduação.

Agradeço inclusive ao meu amigo Peu que cuida não só da minha saúde como também da saúde minha família. Além da minha psicóloga Bárbara que foi essencial no processo de suportar e encarar com mais calma não só os desafios do curso, mas da vida como um todo.

Ademais, gostaria de agradecer a minha amiga Vilkia pela torcida para que eu terminasse o curso. Também agradecer ao professor Marcos que foi fundamental na construção deste estudo, chegando até a corrigir o meu TCC nas férias, meu primeiro trabalho acadêmico, sem ele o trabalho não estaria concluído dentro do prazo.

Por fim, agradeço muito a outros professores com quem tive oportunidade de estudar no curso de engenharia: Sylvana, Anderson, Paulo Frassinete, Lourdinha, Wanderli, Gustavo, Sávia, Reuber, Viviane, Silvio, Jucá, Leila, Gisele, Rachel, Antonieta, Andrea, Eduardo, Paulo Marcelo, Paulo Régis, Leonardo Cabral, Americo e Eudes.

É preciso desconfiar sete vezes do cálculo e cem vezes do engenheiro.
(Adaptado de Tahan, 2013).

RESUMO

A inserção de degraus em canais abertos é uma solução amplamente difundida para evitar erosão das paredes dos dispositivos, visto que eles reduzem a energia específica residual na base do vertedouro. Dentre as possíveis classificações, o *Skimming Flow* é caracterizado como um escoamento deslizante ou sobre turbilhões. Para realizar o dimensionamento hidráulico desses dispositivos, utiliza-se o *software* SisCCoH. Ainda que bem estabelecido, o programa apresenta algumas limitações como o tempo de carregamento dos cálculos e a possibilidade de dimensionar uma descida de cada vez. Diante disso, o presente trabalho se propôs a criar uma rotina de cálculos precisa no Excel que tivesse o mesmo embasamento científico robusto e, ainda assim, agregasse mais agilidade ao processo e clareza quanto a todas as variáveis envolvidas no dimensionamento. Os resultados obtidos reforçaram a eficácia do SisCCoH principalmente quanto ao regime de escoamento aproximadamente uniforme, todavia, o regime não uniforme apresentou uma falta de informação relevante: o valor do coeficiente de atrito f . A planilha eletrônica proveniente deste estudo demonstrou a mesma acurácia do *software* para o escoamento quase uniforme e, após tratar as 43.700 simulações feitas no SisCCoH de acordo com a classificação do escoamento, foram aplicadas regressões lineares múltiplas – RLM – que reduziram a diferença entre o programa já estabelecido no mercado e a planilha eletrônica proposta pelo autor. A máxima diferença percentual média para o regime aproximadamente uniforme foi de 0,002, com desvio padrão percentual máximo de 0,013. Por outro lado, após a RLM, o regime não uniforme apresentou diferenças percentuais médias máximas de 0,026, com um desvio padrão de 0,018. Além disso, os resultados das velocidades finais indicaram as maiores diferenças percentuais médias de 0,0007 para o escoamento quase uniforme e 0,0268 para o não uniforme. Logo, entende-se que esta nova ferramenta de dimensionamento apresenta resultados iniciais promissores e pode agregar significativamente à concepção de projetos de drenagem de descidas d'água.

Palavras-chave: descidas escalonadas; *skimming flow*; hidráulica computacional; análise quantitativa; dissipadores de energia; Excel.

ABSTRACT

The insertion of steps in open channels is a widely adopted solution to prevent erosion of the device walls, as they help reduce the residual specific energy at the base of the spillway. Among the possible classifications, *Skimming Flow* is characterized as a sliding flow or a flow over eddies. To perform the hydraulic sizing of these structures, the SisCCoH *software* is extensively used. Although well-established, the program has some limitations, such as the time required to process calculations and the fact that it allows the design of only one descent at a time. Given this, the present study proposes the creation of a precise calculation routine in Excel, based on the same robust scientific principles while offering increased agility in the process and greater clarity regarding all the variables involved in the design. The results obtained reinforced the effectiveness of SisCCoH, particularly concerning the approximately uniform flow regime. However, for the non-uniform regime, a lack of relevant information was observed—specifically, the value of the friction coefficient (f). The spreadsheet developed in this study demonstrated the same accuracy as the *software* for quasi-uniform flow. Additionally, after filtering the 43,700 simulations performed in SisCCoH according to the flow classification, multiple linear regressions were conducted, reducing the discrepancy between the established program and the proposed spreadsheet. The maximum mean percentage difference for the approximately uniform regime was 0.002, with a maximum percentage standard deviation of 0.013. On the Other hand, after the RLM, the non-uniform regime exhibited maximum mean percentage difference of 0.026, with a standard deviation of 0.018. Additionally, the final velocity results indicated the largest mean percentage differences: 0.0007 for the almost uniform flow and 0.0268 for the non-uniform flow. Therefore, this new sizing approach presents promising initial results and has the potential to significantly contribute to the design of downhill drainage projects.

Keywords: stepped spillways; *skimming flow*; numerical hydraulics; quantitative analysis; energy dissipator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Regime de escoamento <i>Skimming Flow</i>	21
Figura 2	Regime de escoamento <i>Nappe Flow</i>	22
Figura 3	Exemplos reais de regimes de escoamento <i>Skimming Flow</i> , <i>Nappe Flow</i> e regime de transição.....	22
Figura 4	Representação esquemática do <i>Skimming Flow</i> tipos A e B para os intervalos do ângulo θ : $19^\circ < \theta \leq 55^\circ$ e $5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ$	24
Figura 5	Limite de classificação do <i>Skimming Flow</i> : tipo A, B ou regime de transição.....	25
Figura 6	Representação dos escoamentos quase uniforme e não uniforme.	26
Figura 7	Variação dos valores da relação H_e/y_c a partir de valores de h_2/y_c e H_{dam}/y_c	27
Figura 8	Análise da tendência dos valores da relação H_e/y_c ao incrementar os valores da relação S/y_c	27
Figura 9	Diferença entre d e d_w	29
Figura 10	Gráfico $f \times S/y_c$	30
Figura 11	Predominância de dissipação de energia para cada intervalo de θ	31
Figura 12	$E_{res}/y_c \times H_{dam}/y_c$	33
Figura 13	Janela de classificação do regime de escoamento em degraus.	53
Figura 14	Exemplo de simulação no módulo <i>Skimming Flow</i> – $B = 0,10$ m.	54
Figura 15	Exemplo de simulação no módulo <i>Skimming Flow</i> – $B = 0,20$ m.	54
Figura 16	Aviso de erro ao ultrapassar o limite superior do <i>Skimming Flow</i>	55
Figura 17	Resolução do aviso de erro.	55
Figura 18	Valor limite da largura do canal para uma dada vazão e comprimento de 4,00 m.	56
Figura 19	Última simulação com altura $S = 0,40$ m.	56
Figura 20	Exemplo de base de dados em <i>Python</i>	57
Figura 21	Janela de classificação do regime de escoamento em degraus.	58
Figura 22	Dados de entrada.	59
Figura 23	Classificação do regime de escoamento.	60
Figura 24	Coeficiente de atrito.	60
Figura 25	Parâmetros finais.	61

Figura 26	Parâmetros aerados.	62
Figura 27	Cavitação.	62
Figura 28	Filtro para identificação de erro da sub-rotina Transformar Texto em Número.	64
Figura 29	Acesso ao regime de escoamento em degraus.	66
Figura 30	Janela de classificação do regime de escoamento em degraus – Parte 1....	67
Figura 31	Janela de classificação do regime de escoamento em degraus – Parte 2....	67
Figura 32	Janela de classificação do regime de escoamento em degraus.	68
Figura 33	Módulo <i>Skimming Flow</i>	69
Figura 34	Módulo <i>Skimming Flow</i> – Relatório.	69
Figura 35	Relatório exportado para o Excel.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quantidade de simulações realizadas no SisCCoH para compor o banco de dados. Simulações separadas de acordo com a altura do degrau.....	37
Tabela 2	Quantidades de simulações separadas de acordo com as classificações de escoamento e tipo de Skimming Flow pela planilha eletrônica do autor....	39
Tabela 3	Média e desvio padrão da diferença percentual das variáveis y_c , f , dW , v_{final} , E_{res} , C_{mean} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, HW , k , La , Ya , Va , V_{cra} . Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento aproximadamente uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.....	40
Tabela 4	Média e desvio padrão da diferença percentual das variáveis y_c , f , dW , v_{final} , E_{res} , C_{mean} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, HW , k , La , Ya , Va e V_{cra} . Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento não uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.....	41
Tabela 5	Indicadores R^2 , erro padrão e F de significação para validação da RLM. Além do número de observações para cada regressão.....	42
Tabela 6	Resultado da RLM para as variáveis dW , v_{final} e E_{res}	44
Tabela 7	Resultado da RLM para a variável f	45
Tabela 8	Média da diferença percentual das variáveis y_c , f , dW , v_{final} , E_{res} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, HW . Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento não uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH	45
Tabela 9	Desvio padrão da diferença percentual das variáveis y_c , f , dW , v_{final} , E_{res} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, HW . Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento não uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.....	46
Tabela 10	Intervalo de vazões.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Coeficiente de medição do fator de atrito
B	Largura do canal
C	Concentração do ar
C_{mean}	Concentração do ar média
D	Coeficiente de medição da concentração de ar média
d	Profundidade de escoamento
d_w	Profundidade representativa do escoamento
$E_{\text{Máx}}$	Energia total no topo da descida escalonada
E_{res}	Energia residual
E_{res}/y_c	Relação da energia residual pela profundidade crítica
$(E_{\text{res}}/y_c)_{U,A}$	Relação da energia residual pela profundidade crítica para o Skimming Flow tipo A
$(E_{\text{res}}/y_c)_{U,B}$	Relação da energia residual pela profundidade crítica para o Skimming Flow tipo B
E_1	Energia total no ressalto hidráulico do último degrau
f	Fator de atrito
$f_{\text{Máx}}$	Fator de atrito máximo
G	Aceleração da gravidade
H_{dam}	Diferença entre as cotas inicial e final da descida ou queda total
H_{dam}/y_c	Relação da queda total pela profundidade crítica
H_e	Altura requerida para escoamento quase uniforme
H_e/y_c	Relação da altura para escoamento uniforme e profundidade crítica
H_w	Altura de referência da parede
h_p	Altura do vértice formado no topo da descida
h_1	Altura supercrítica no topo da descida
h_2	Ressalto formado imediatamente ao final da descida
h_2/y_c	Relação do ressaltado no final da descida e da profundidade crítica
l	Comprimento do degrau
m	Coeficiente de medição da relação E_{res}/y_c
Q	Vazão
Q_s	Vazão do SisCCoH
q_w	Vazão por metro de largura do canal
R^2	Coeficiente de determinação
S	Altura do degrau
S/y_c	Relação da altura do degrau pela profundidade crítica
$(S/y_c)_s$	Limite entre o Skimming Flow e o regime de transição
$(S/y_c)_B$	Limite entre o Skimming Flow tipos A e B
$\bar{u}$	Velocidade principal do escoamento

V_c	Velocidade crítica
V_w	Velocidade média da água
V_1	Velocidade média no topo da descida
V_2	Velocidade média no final da descida
y	Altura normal a partir do fundo do canal
y_c	Profundidade crítica
$y_{0,90}$	Altura normal para $C = 0,90$
ΔE	Variação de perda de energia entre o topo e o final dos degraus
θ	Ângulo do alinhamento das quinas ou simplesmente chamado de ângulo do canal
λ	Coeficiente de pressão no topo da descida
ρ_d	Pressão dinâmica
ρ_w	Densidade da água
τ_0	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	REGIMES DE ESCOAMENTO	21
2.2	<i>SKIMMING FLOW</i>	23
2.2.1	Tipos de <i>Skimming Flow</i> – Tipo A, $19 < \theta \leq 55^\circ$	23
2.2.2	Tipos de <i>Skimming Flow</i> – Tipo A, $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$	24
2.2.3	Tipos de <i>Skimming Flow</i> – Tipo B, $5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ$	24
2.3	DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DO <i>SKIMMING FLOW</i>	25
2.4	ESCOAMENTO QUASE UNIFORME	26
2.5	REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ESCOAMENTO	28
2.6	FATOR DE ATRITO	29
2.6.1	Intervalo I – $\theta < 11,3^\circ$	31
2.6.2	Intervalo II – $11,3^\circ \leq \theta < 30^\circ$	31
2.6.3	Intervalo III – $\theta \geq 30^\circ$	31
2.6.4	Cálculo do Fator de Atrito	32
2.7	ENERGIA RESIDUAL	32
2.8	CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE AR	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	SISCCOH	36
3.2	SIMULAÇÕES ATRAVÉS DE <i>PYTHON</i>	36
3.2.1	Limitações do Algoritmo	37
3.3	PLANILHAS ELETRÔNICAS	38
3.3.1	Excel	38
3.3.2	Tratamento de Dados através do VBA	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	ANÁLISE DA PRECISÃO DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO	40
4.1.1	Escoamento Aproximadamente Uniforme	40

4.1.2	Escoamento Não Uniforme	41
4.2	REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA – RLM	42
4.2.1	RLM A partir do Escoamento Não Uniforme	42
4.3	REANÁLISE do ESCOAMENTO NÃO UNIFORME APÓS UTILIZAÇÃO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	45
4.4	RESULTADOS GERAIS	46
5	CONCLUSÕES.....	48
6	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	49
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A – PREMISAS DAS SIMULAÇÕES NO SISCCOH	52
	APÊNDICE B – SIMULAÇÕES EM <i>PYTHON</i>	57
	APÊNDICE C – PLANILHA ELETRÔNICA PROPOSTA PELO AUTOR	59
	APÊNDICE D – SUB-ROTINAS DO ALGORITMO EM VBA	63
	ANEXO A – PROTOCOLO DE SIMULAÇÃO DO SISCCOH	66

1 INTRODUÇÃO

As barragens no Brasil possuem funções essenciais no desenvolvimento do país como a geração de energia através de hidrelétricas; armazenamento de água para consumo humano, irrigação; além de servir para armazenar resíduos de mineração (Azevedo, 2021). No entanto, associam-se a elas grandes riscos em relação à segurança, por exemplo, o seu rompimento e seus impactos ambientais. Casos marcantes na história nacional foram os desastres de Mariana, 2015 e Brumadinho, 2019, ambos no estado Minas Gerais, cuja intensa atividade mineradora faz com que abrigue 22% das barragens submetidas à Política Nacional de Segurança de Barragens, segundo o Relatório de Segurança de Barragens de 2021.

A Drenagem é uma das áreas de estudo responsável por manter a segurança destes empreendimentos, fazendo-o através de dispositivos como vertedouros, os quais permitem a passagem de água para um ponto à jusante (Arantes; Porto; Botari, 2007). Todavia, principalmente em casos em que há uma grande diferença de cota da crista do vertedouro até a sua base, é possível que esta água escoe em alta velocidade, logo, acumule uma grande quantidade de energia cinética, o que pode causar sérios problemas de cavitação e colapso da estrutura hidráulica (Heller; Pádua; Coelho, 2022).

Uma solução amplamente difundida é a inserção de degraus ao longo do canal, visto que eles reduzem a energia específica residual na base do vertedouro, reduzindo assim consideravelmente o tamanho e o custo da bacia de dissipação necessária, quando comparada com a estrutura usual, o canal liso (Arantes; Porto; Botari, 2007).

Essa estrutura de drenagem apresenta três possíveis classificações quanto ao seu regime de escoamento: *Skimming Flow*, *Nappe Flow* (Horner, 1969 apud Simões; Porto; Schulz, 2009) e *Transition Flow* (Ohtsu; Yasuda, 1997). Atualmente, para determinar e dimensionar o regime do escoamento em degraus, utiliza-se, no Brasil, o *software* público SisCCoH, desenvolvido em parceria pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a empresa Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo averiguar os resultados apresentados pelo SisCCoH quando comparados às equações fundamentadas por Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2004), a partir de simulações teóricas na plataforma do próprio *software*. Além disso, propor uma alternativa acurada, eficiente e, ainda assim, com mais celeridade e acessibilidade ao processo através de planilhas eletrônicas, visto a limitação do SisCCoH em rodar uma simulação de cada vez, o que onera o prazo de entrega de projetos.

Dessa forma, será possível mensurar se o SisCCoH apresenta maior precisão e confiabilidade no dimensionamento hidráulico de canais em degraus no regime *Skimming Flow* em relação a planilhas eletrônicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor uma rotina de cálculos em planilhas eletrônicas para classificação e dimensionamento de escoamentos em degraus no regime *Skimming Flow*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Averiguar a calibração das simulações do *software* SisCCoH para o regime *Skimming Flow* a partir do embasamento teórico de Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2004).
- b) Propor o dimensionamento de descidas em degraus no regime *Skimming Flow* para os escoamentos aproximadamente uniforme e não uniforme, através da utilização de planilhas eletrônicas do Excel, com acurácia.
- c) Mensurar se o SisCCoH apresenta maior precisão e confiabilidade no dimensionamento hidráulico de canais em degraus no regime *Skimming Flow* em relação a planilhas eletrônicas.

1.2 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO

O *software* SisCCoH já se estabeleceu no mercado da Engenharia Civil e tendo em vista o respaldo de instituições de renome como a UFMG e a empresa Pimenta de Ávila, mostrou-se bastante confiável e acessível no dimensionamento de projetos de drenagem.

Ainda assim, dada a crescente demanda por investimentos em drenagem urbana no Brasil, engenheiros necessitam de mais rapidez para atender aos prazos definidos de estudos hidráulicos-hidrológicos. Neste aspecto, a ferramenta de dimensionamento de estruturas hidráulicas com escoamentos em degraus do SisCCoH carece de otimização e opções de simular mais de um dispositivo ao mesmo tempo.

Diante deste contexto, busca-se aperfeiçoar o dimensionamento desses tipos de estruturas hidráulicas a partir de uma ferramenta já consolidada. Para tanto, faz-se necessário a calibração do método e que seja tão acessível quanto o anterior.

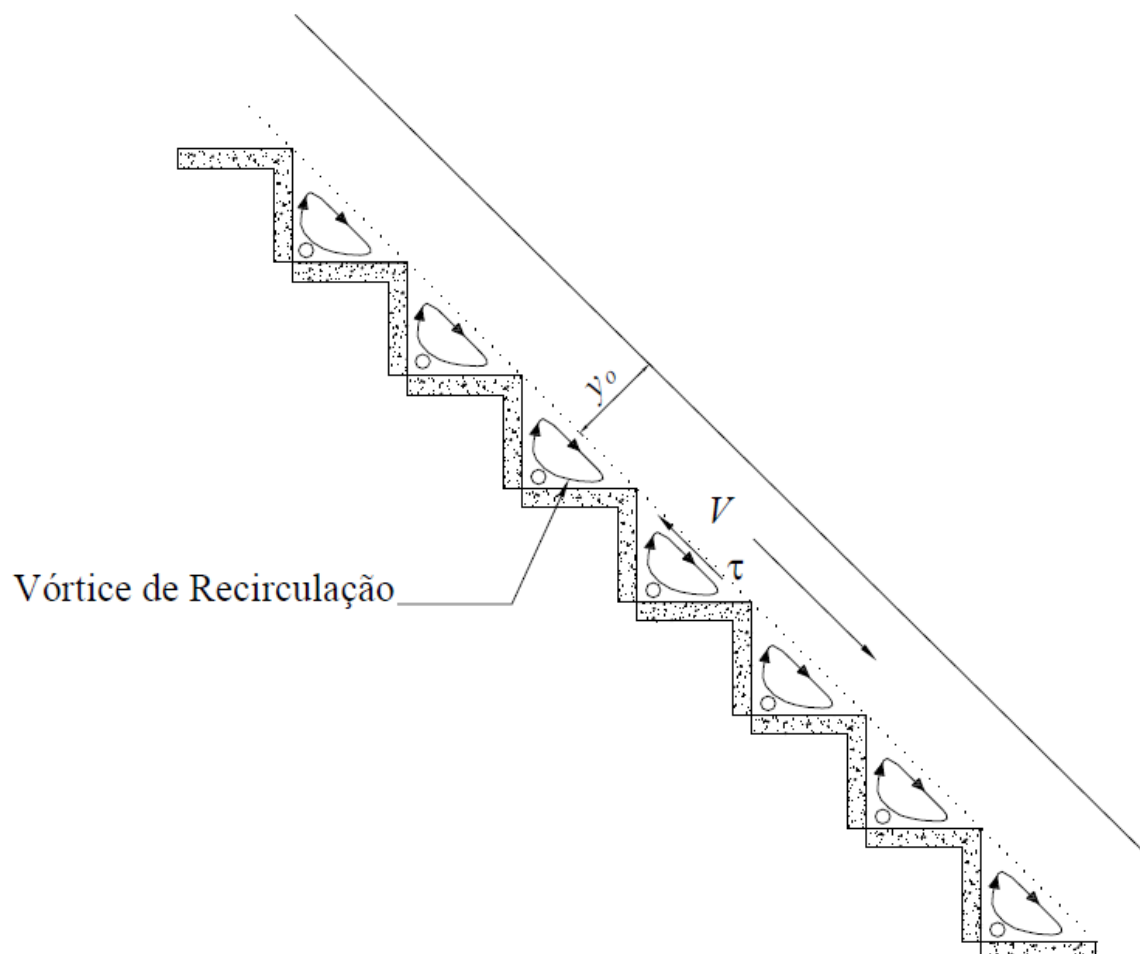
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 REGIMES DE ESCOAMENTO

Horner (1969) propôs duas classificações para os regimes de escoamento em degraus: *Skimming Flow* e *Nappe Flow*, sendo a primeira referente a um escoamento deslizante ou sobre turbilhões, como traduziram Matos e Quintela (1995), já que entre os degraus são formados redemoinhos ou vórtices turbulentos, como na Figura 1; por outro lado, o *Nappe Flow* foi chamado de regime de quedas sucessivas por conta da água atingir cada degrau em queda livre, o que, em muitos casos, gera um ressalto hidráulico.

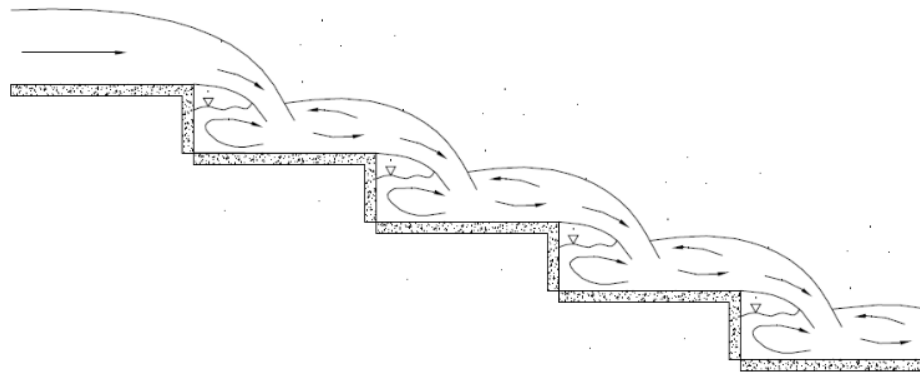
Nesta última categoria, a dissipação de energia pode ocorrer pelo ressalto, pela mistura da queda no degrau ou até mesmo pela dispersão da água no ar em forma de spray (Rajaratnam, 1990). Como demonstrado em detalhes na Figura 2.

Figura 1 - Regime de escoamento *Skimming Flow*.



Fonte: Arantes; Porto; Botari (2007).

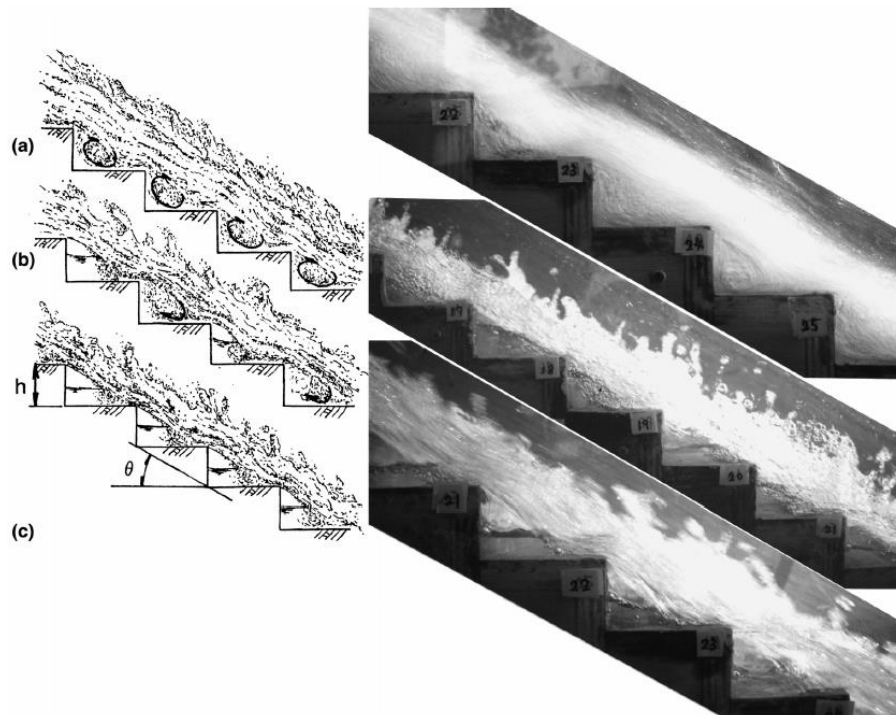
Figura 2 - Regime de escoamento *Nappe Flow*.



Fonte: Arantes; Porto; Botari (2007).

Por fim, Ohtsu; Yasuda (1997) propuseram pela primeira vez a existência de um terceiro regime que se encontrava entre esses outros dois: o de transição. Até então, não havia um consenso sobre as condições de contorno que definiam tal regime, no entanto, observava-se que havia casos em que o escoamento apresentava a formação de vórtices parciais em alguns degraus e bolsões de ar em outros, logo, características do *Skimming* e do *Nappe Flow*, respectivamente (Figura 3). Todavia, só com uma base teórica mais robusta para definir os limites dos escoamentos propostos por Horner (1969) é que foi possível caracterizar o regime de transição.

Figura 3 – Exemplos reais de regimes de escoamento *Skimming Flow*, *Nappe Flow* e regime de transição.



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2001).

Nota: (a). Regime *Skimming Flow*. (b) Regime de transição. (c). Regime *Nappe Flow*.

2.2 SKIMMING FLOW

(Ohtsu, I.; Yasuda; Takahashi, 2004) demonstram que a classificação do regime de escoamento é baseada em algumas variáveis fundamentais: a vazão de escoamento que passa pelos degraus (Q), a largura do canal (B), a altura do degrau ou espelho (S), o comprimento do patamar do degrau (l), o ângulo do alinhamento das quinas ou simplesmente chamado de ângulo do canal (θ), o desnível do trecho (H_{dam}) e a geometria do canal, que será considerada retangular para todos os casos deste estudo. O ângulo θ é calculado a partir da equação (1).

$$\theta = \arctan\left(\frac{S}{l}\right) \quad (1)$$

Em seguida, de acordo com as equações fundamentais da Hidráulica, calcula-se a profundidade crítica y_c com base na equação (2), sendo q a vazão de escoamento por metro de largura do canal (Azevedo *et al.*, 2016; Azevedo Netto; Fernández, 2015; Porto, 2006).

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{(Q/B)^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2)$$

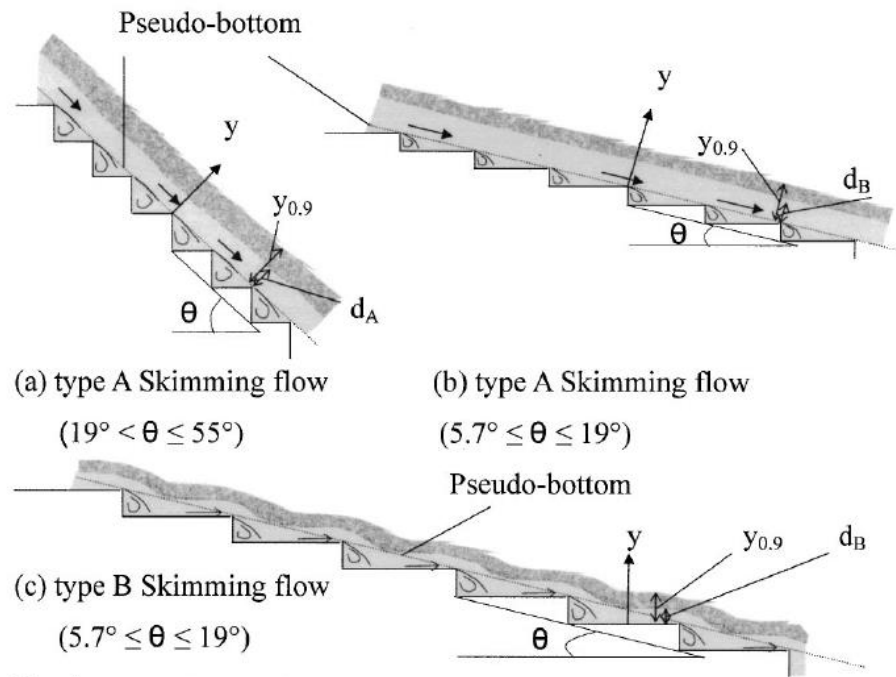
Então, determina-se a relação da altura do degrau pela profundidade crítica S/y_c e, com isso, é possível realizar a classificação do tipo de *Skimming Flow* em A ou B, considerando-se os parâmetros θ e S/y_c . Ainda assim, é possível subdividir o tipo A em dois, de acordo com o intervalo do ângulo θ .

2.2.1 Tipos de *Skimming Flow* – Tipo A, $19^\circ < \theta \leq 55^\circ$

Neste primeiro intervalo, o perfil da superfície da água forma uma região de escoamento quase uniforme e aproximadamente paralela aos pseudofundos formados pelas extremidades dos patamares, como observado na Figura 4.

Ademais, uma propriedade muito importante do escoamento para este intervalo de θ é que sua classificação e perfil de escoamento deslizante independem da relação S/y_c .

Figura 4 – Representação esquemática do *Skimming Flow* tipos A e B para os intervalos do ângulo θ : $19^\circ < \theta \leq 55^\circ$ e $5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ$.



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004).

Nota: (a). Tipo A, *Skimming Flow* $19^\circ < \theta \leq 55^\circ$. (b) Tipo A, *Skimming Flow* $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$. (c). Tipo B, *Skimming Flow* $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$

2.2.2 Tipos de *Skimming Flow* – Tipo A, $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$

Apesar de ainda ser considerado um escoamento *Skimming Flow* tipo A e, com isso, a região de escoamento ainda ser quase uniforme, esta janela com menores valores de θ apresenta uma grande diferença em relação ao intervalo anterior: ela depende do valor de S/y_c .

Para um regime *Skimming Flow* ser considerado tipo A neste pequeno intervalo do ângulo θ , ele precisa apresentar um baixo valor da relação S/y_c .

2.2.3 Tipos de *Skimming Flow* – Tipo B, $5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ$

Por último, o perfil tipo B é parcialmente paralelo aos pseudofundos e apresenta elevados valores de S/y_c para o mesmo intervalo do subtópico 2.2.2.

Ressalta-se que a diferença geométrica entre os dois intervalos de θ . Como pode ser observado na Figura 4 (b) e (c), os patamares l apresentam um maior valor, o que proporciona um menor valor de θ , isto gera um aspecto de que o fluxo está mais horizontal em comparação à Figura 4 (a) que tem um pequeno valor de l e escoamento mais vertical.

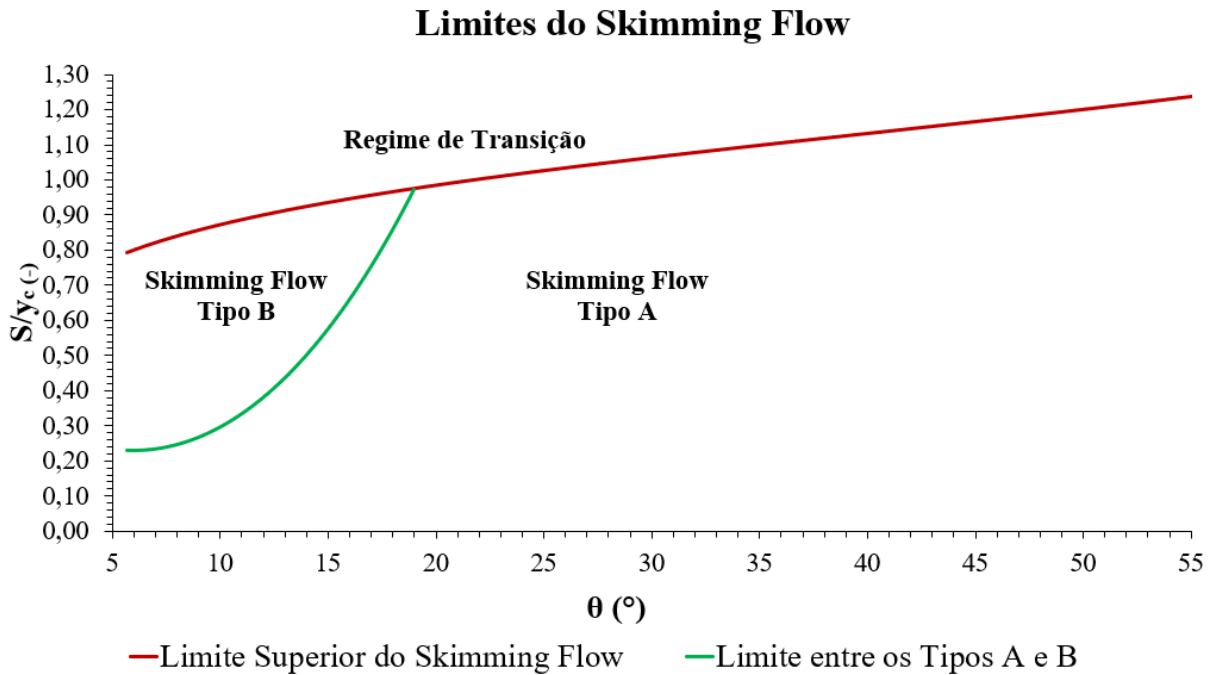
2.3 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DO *SKIMMING FLOW*

O limite entre o *Skimming Flow* e o regime de transição foi determinado por Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2001) e pode ser calculado pela equação (3). Ademais, para diferenciar os tipos A e B do *Skimming Flow*, Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2004) chegaram à equação (4), através de experimentos. Seus resultados estão expostos na Figura 5.

$$\left(\frac{S}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6}(\tan \theta)^{1/6} \quad ; \quad 5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad (3)$$

$$\left(\frac{S}{y_c}\right)_B = 13(\tan \theta)^2 - 2,73 \tan \theta + 0,373 \quad ; \quad 5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ \quad (4)$$

Figura 5 - Limite de classificação do *Skimming Flow*: tipo A, B ou regime de transição.



Fonte: Adaptado de Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004).

Dessa forma, é possível resumir as condições para classificação dos tipos do *Skimming Flow* através das equações (5) a (7).

$$\text{Tipo A, } 19^\circ < \theta \leq 55^\circ \left\{ \begin{array}{l} i. 19^\circ < \theta \leq 55^\circ \\ ii. \frac{S}{y_c} \leq \left(\frac{S}{y_c}\right)_s \end{array} \right. \quad (5)$$

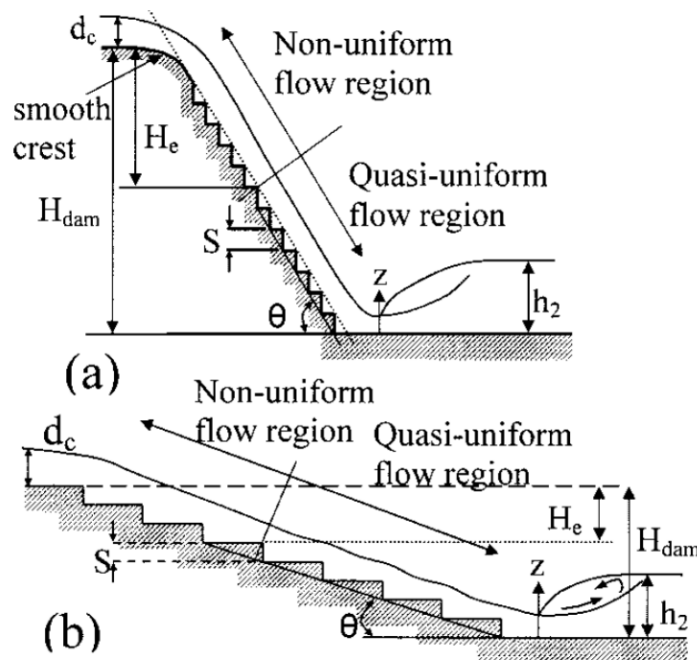
$$\text{Tipo A, } 5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ \left\{ \begin{array}{l} i. 5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ \\ ii. \frac{S}{y_c} \leq \left(\frac{S}{y_c} \right)_B \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\text{Tipo B, } 5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ \left\{ \begin{array}{l} i. 5,7^\circ < \theta \leq 19^\circ \\ ii. \left(\frac{S}{y_c} \right)_B \leq \frac{S}{y_c} \leq \left(\frac{S}{y_c} \right)_S \end{array} \right. \quad (7)$$

2.4 ESCOAMENTO QUASE UNIFORME

A partir da dificuldade de determinar a mudança na profundidade aerada do escoamento, optou-se por mensurar o ressalto formado imediatamente ao final da descida, chamado de h_2 , como ilustrado na Figura 6 (Ohtsu; Yasuda; Takahashi, 2000; Yasuda; Ohtsu, 1999).

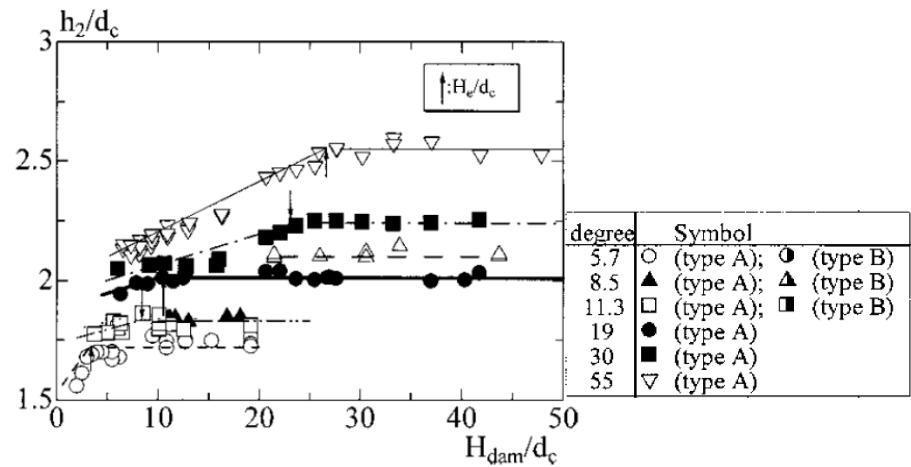
Figura 6 - Representação dos escoamentos quase uniforme e não uniforme.



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004).

Com isso, foi possível determinar um ponto de inflexão que separava nitidamente as regiões quase uniforme e não uniforme. Tal feito foi possível através da comparação gráfica representada na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A partir de um certo valor da relação H_{dam}/y_c , nota-se que os valores da relação h_2/y_c passam a ser constantes.

Figura 7 Variação dos valores da relação H_e/y_c a partir de valores de h_2/y_c e H_{dam}/y_c .



Fonte: Adaptado de Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004).

Nota: na imagem, d_c equivale à profundidade crítica y_c .

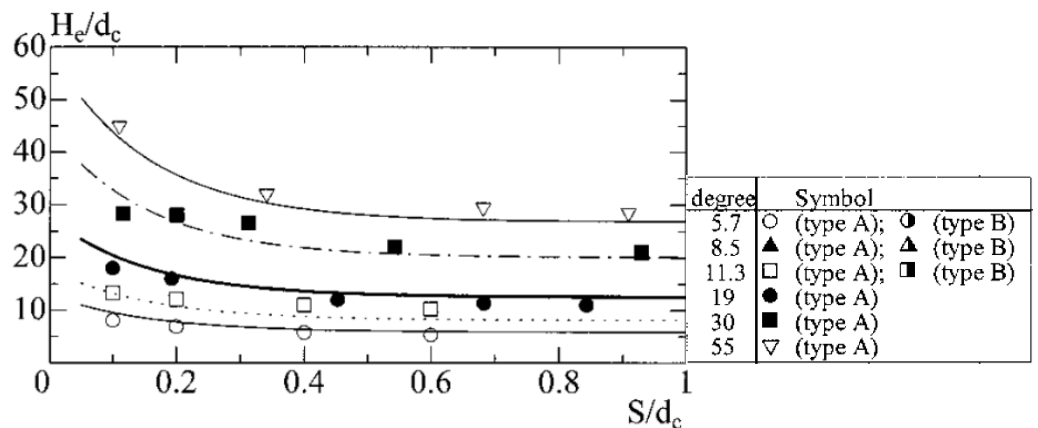
Então, Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2000) determinaram experimentalmente que este ponto pode ser calculado em função de θ e S/y_c , como descrito na equação (8).

$$\frac{H_e}{d_c} = (-1,21 \cdot 10^{-5} \theta^3 + 1,60 \cdot 10^{-3} \theta^2 - 7,13 \cdot 10^{-2} \theta + 1,30)^{-1} \left[5,70 + 6,70 \cdot e^{-6,5 \frac{S}{y_c}} \right] \quad (8)$$

$$5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad ; \quad 0,1 \leq S/y_c \leq (S/y_c)_s \quad ; \quad \theta \text{ em graus e } R^2 = 0,975$$

Por fim, também foi plotado um gráfico de H_e/y_c por S/y_c (Figura 8), do qual pode-se concluir que para $S/y_c > 0,50$, H_e/y_c assume um valor praticamente constante.

Figura 8 – Análise da tendência dos valores da relação H_e/y_c ao incrementar os valores da relação S/y_c .



Fonte: Adaptado de Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004).

Nota: na imagem, d_c equivale à profundidade crítica y_c .

2.5 REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ESCOAMENTO

Para calcular a profundidade representativa do escoamento (d_w), Yasuda; Ohtsu (1999) assumiram que a energia residual do *Skimming Flow* (E_{res}) é igual a energia no pé do ressalto formado ao fim do canal escalonado, E_1 . Somando-se às variáveis mensuráveis em experimentos laboratoriais, chegou-se às equações (9), (10) para *Skimming Flow* tipo A, (11) para *Skimming Flow* tipo B e (12). Desta forma, d_w poderia ser calculada indiretamente.

$$\rho_w q (V_2 - V_1) = \frac{1}{2} \rho_w g h_p h_1 - \frac{1}{2} \rho_w g h_2^2 \quad (9)$$

$$E_1 = E_{res} \Rightarrow \lambda h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = d_w \cos \theta + \frac{V_w^2}{2g} \quad (10)$$

$$E_1 = E_{res} \Rightarrow \lambda h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = d_w + \frac{V_w^2}{2g} \quad (11)$$

$$\lambda = 1 + \frac{1}{\rho_w g q h_1} \int_0^{h_1} \bar{u} p_d dz \quad (12)$$

Onde:

ρ_w é o peso específico da água; $[\rho_w] = \text{N/m}^3$.

V_1 é velocidade média no topo da descida; $[V_1] = \text{m/s}$.

V_2 é a velocidade média no final da descida; $[V_2] = \text{m/s}$.

g é a gravidade; $[g] = \text{m/s}^2$.

h_p é a altura do vértice formado no topo da descida; $[h_p] = \text{m}$.

h_1 é a altura supercrítica no topo da descida; $[h_1] = \text{m}$.

h_2 é o ressalto formado imediatamente ao final da descida; $[h_2] = \text{m}$.

λ é o coeficiente de pressão no topo da descida; $[\lambda] = \text{N/m}^2$.

V_w é a velocidade média da água; $[V_w] = \text{m/s}$.

$\bar{u}$ é a velocidade principal do escoamento; $[\bar{u}] = \text{m/s}$.

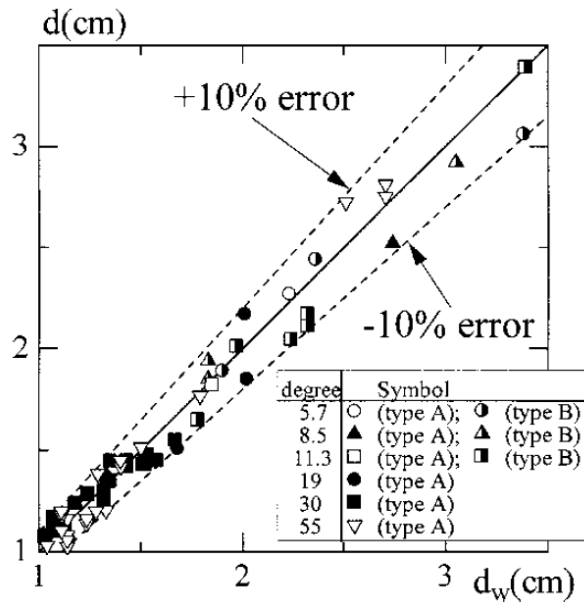
p_d é a pressão dinâmica; $[p_d] = \text{N/m}^2$.

Além disso, a variável d poderia ser calculada com base na medição da taxa de concentração do ar na região de escoamento aerado (C) e na equação (13).

$$d = \int_0^{y_{0,90}} (1 - C) dy = (1 - C_{mean})y_{0,90} \quad (13)$$

Com posse das variáveis d e d_w , faz-se possível mensurar a diferença entre uma e outra para os mesmos dados de entrada, obtendo assim uma diferença de cerca de 10% (Ohtsu, I.; Yasuda; Takahashi, 2004), como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Diferença entre d e d_w .



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004).

2.6 FATOR DE ATRITO

Yasuda; Ohtsu (1999) determinaram o fator de atrito f , equação (14), para regiões quase uniformes, sendo τ_0 a tensão de cisalhamento.

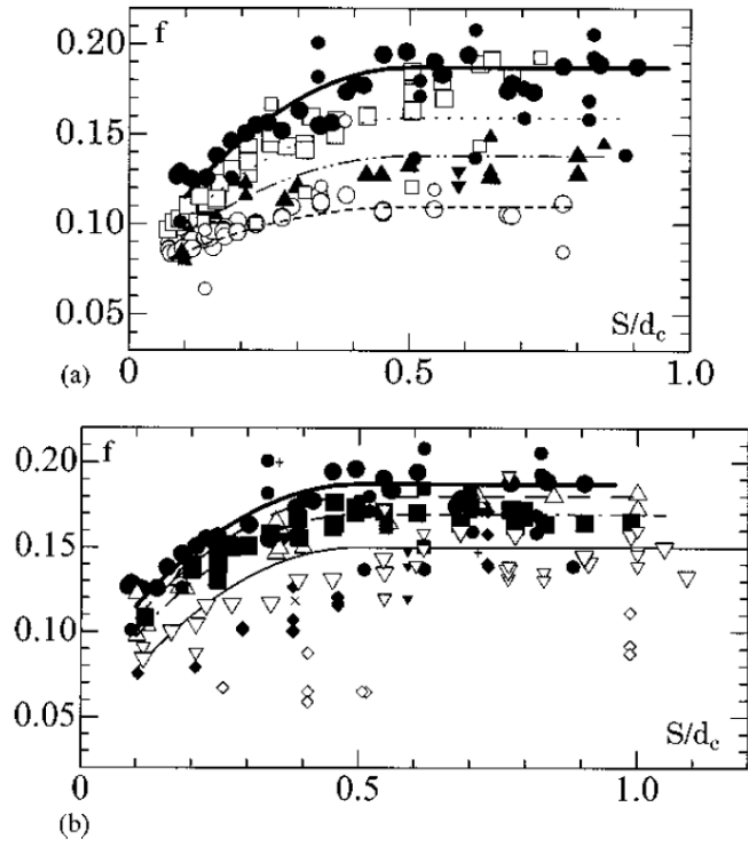
$$f = 4 \cdot \frac{\tau_0}{\frac{1}{2} \rho_w V_w^2}; \quad \tau_0 = \rho_w g d_w \quad \therefore f = 8 \left(\frac{d_w}{d} \right)^3 \sin \theta \quad (14)$$

Com isso, é possível expressar o fator de atrito como uma função de θ e da relação S/y_c , como na equação (15).

$$f = F\left(\theta, \frac{S}{y_c}\right) \quad (15)$$

A partir disso, simulações foram traçadas e observou-se um padrão no comportamento do fator de atrito. Para $S/y_c < 0,50$ e um dado ângulo θ , o valor de f cresce à medida que S/y_c aumenta, chegando em seu máximo quando $S/y_c = 0,50$; em seguida f atinge um valor constante (Ohtsu, I.; Yasuda; Takahashi, 2004). Tal comportamento pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Gráfico $f \times S/y_c$.



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2004).

Nota: (a) $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$. (b) $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$.

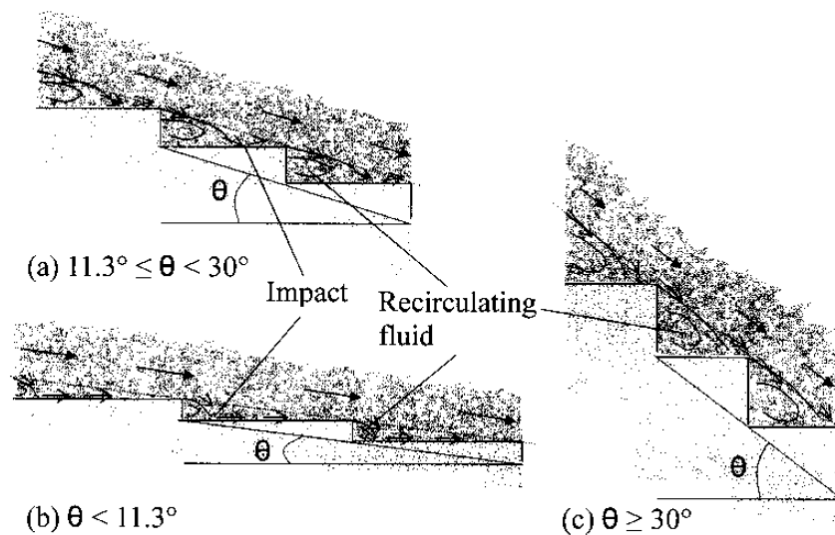
Então, com base nessas informações, observou-se que o comportamento do fluxo principal e da dissipação de energia poderiam ser enquadrados em três intervalos diferentes, cada um representando uma forma preponderante de dissipar energia.

2.6.1 Intervalo I – $\theta < 11,3^\circ$

A energia dissipada devido ao atrito entre o fluxo e o canto da escada aumenta a cada degrau, isto ocorre porque os redemoinhos formados se localizam justamente na quina da descida.

Visualmente, tais conclusões podem ser observadas na Figura 11. Observa-se que quanto menor o ângulo θ , mais próxima da geometria do escoamento *Nappe Flow* fica a escada, logo, inicia-se a formação dos ressaltos e, por consequente, da dissipação de energia da água através dos impactos a cada degrau.

Figura 11 - Predominância de dissipação de energia para cada intervalo de θ .



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2004).

Nota: (a) $11,3^\circ \leq \theta < 30^\circ$. (b) $\theta < 11,3^\circ$. (c) $\theta \geq 30^\circ$.

2.6.2 Intervalo II – $11,3^\circ \leq \theta < 30^\circ$

Este intervalo, por sua vez, apresenta um comportamento intermediário, já que o fluxo principal sempre impacta na borda do degrau, com isso, a energia dissipada pelo impacto é maior do que a dissipada pelos vórtices.

2.6.3 Intervalo III – $\theta \geq 30^\circ$

Por outro lado, a energia dissipada nessa situação é maior na região de recirculação de ar do que por conta do impacto.

2.6.4 Cálculo do Fator de Atrito

Por fim, estabeleceu-se um meio para determinar o valor de f , demonstrado a seguir de acordo com as equações (16) a (18). Sendo A , um coeficiente de medição do fator de atrito.

$$f = f_{M\acute{a}x} - A \left(0,5 - \frac{S}{d_c} \right)^2 \quad ; \quad 0,1 \leq S/d_c \leq 0,5 \quad (16)$$

$$f = f_{M\acute{a}x} \quad ; \quad 0,5 \leq S/d_c \leq \left(S/d_c \right)_s$$

$$A = -1,7.10^{-3}\theta^2 + 6,4.10^{-2}\theta - 0,15$$

$$f_{M\acute{a}x} = -4,2.10^{-4}\theta^2 + 1,6.10^{-2}\theta + 3,2.10^{-2} \quad (17)$$

$$5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ \quad ; \quad R^2 = 0,919$$

$$A = 0,452$$

$$f_{M\acute{a}x} = -2,32.10^{-5}\theta^2 - 2,75.10^{-3}\theta + 0,231 \quad (18)$$

$$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad ; \quad R^2 = 0,835$$

As pesquisas anteriores de Chamani; Rajaratnam (1999), Boes (2000), Yasuda; Chanson (2003) e Ohtsu; Yasuda; Takahashi (2004) demonstram que há uma variação no valor absoluto de f na casa de 0,08, dados θ e relação S/y_c .

2.7 ENERGIA RESIDUAL

Analogamente à hipótese adotada para formular as equações (10) e (11), bem como nelas mesmas, é possível obter indiretamente o valor da energia residual ao fim das descidas escalonadas do regime *Skimming Flow*, chegando-se às equações (19) e (20) para os tipos A e B, respectivamente.

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{U-Tipo A} = \frac{d_w}{y_c} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{y_c}{d_w}\right)^2$$

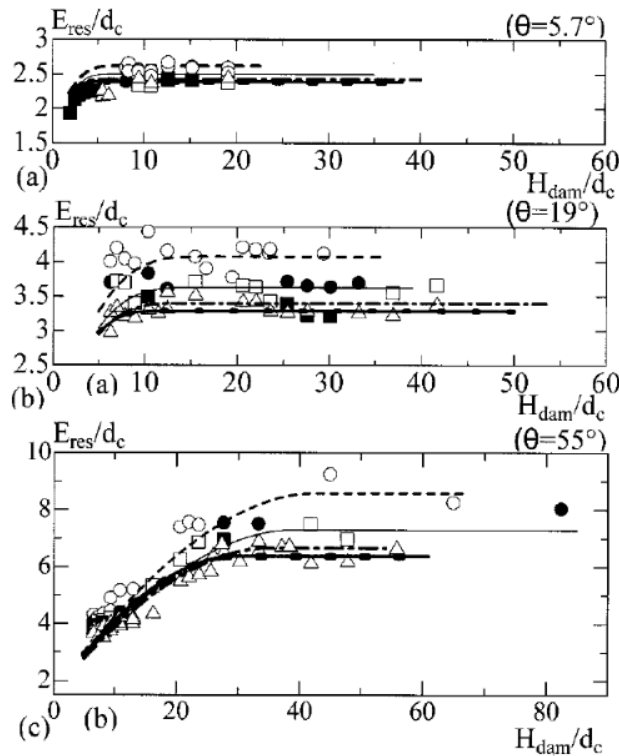
$$\therefore \left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{U-Tipo A} = \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{-2/3}$$

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{U-Tipo B} = \frac{d_w}{y_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{y_c}{d_w}\right)^2$$

$$\therefore \left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{U-Tipo B} = \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{1/3} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{-2/3}$$

Para alguns valores de θ , Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi (2004) plotaram um gráfico de $E_{res}/y_c \times H_{dam}/y_c$, variando ainda os valores de S/y_c . Com isso, chegou-se aos gráficos da Figura 12.

Figura 12 - $E_{res}/y_c \times H_{dam}/y_c$.



Fonte: Ohtsu; Yasuda; Takahashi, (2004).

Nota: (a) $\theta = 5,7^\circ$. (b) $\theta = 19^\circ$. (c) $\theta = 55^\circ$.

Com base nisto, foram obtidas duas conclusões: caso $S/y_c > 0,25$, então S/y_c afeta pouco o valor de E_{res}/y_c ; para regiões quase uniformes ($H_{dam}/y_c \geq H_e/y_c$), E_{res}/y_c e H_{dam}/y_c são independentes.

Todavia, caso o regime de escoamento seja não uniforme ($H_{dam}/y_c < H_e/y_c$), então E_{res}/y_c depende de H_{dam}/y_c , S/y_c e do ângulo θ . Determinou-se seu valor empiricamente e gerou-se as equações (21) a (23).

A diferença entre a variação de energia mensurada experimentalmente e seus valores calculados ficam em torno de uma margem 8% (Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, 2004).

$$\frac{E_{res}}{y_c} = 1,5 + \left[\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right)_u - 1,5 \right] \left[1 - \left(1 - \frac{H_{dam}}{H_e} \right)^m \right] \quad (21)$$

$$5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad ; \quad 0,1 \leq S/y_c \leq (S/y_c)_s \quad ; \quad 5,0 \leq \frac{H_{dam}}{y_c} \leq \frac{H_e}{y_c}$$

$$m = -\frac{\theta}{25} + 4 \quad (22)$$

$$\theta \text{ em graus e } R^2 = 0,938$$

$$\frac{\Delta E}{E_{M\acute{a}x}} = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1,5 y_c} = 1 - \frac{E_{res}}{y_c} \left(\frac{H_{dam}}{y_c} + 1,5 \right)^{-1} \quad (23)$$

$$E_{M\acute{a}x} = H_{dam} + 1,5 y_c \quad ; \quad \Delta E = E_{M\acute{a}x} - E_{res}$$

Onde m é um coeficiente de medição da relação E_{res}/y_c em graus, ΔE é a variação de perda de energia entre o topo e o final do degrau, $E_{M\acute{a}x}$ é a energia total no topo da descida escalonada.

2.8 CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE AR

Boes (2000) e Yasuda; Chanson (2003) determinaram experimentalmente que o valor da concentração média de ar C_{mean} pode ser obtido aproximadamente a partir das equações (24) a (26). Onde D é um coeficiente de medição da concentração de ar média.

$$C_{mean} = D - 0,30e^{-5\left(\frac{S}{d_c}\right)^2 - 4\frac{S}{d_c}} \quad (24)$$

$$D = 0,300$$

$$5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ \quad ; \quad 0,1 \leq S/y_c \leq (S/y_c)_s \quad ; \quad R^2 = 0,692 \quad (25)$$

$$D = -2.10^{-4}\theta^2 + 2,14.10^{-2}\theta - 3,57.10^{-2}$$

$$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad ; \quad 0,1 \leq S/y_c \leq (S/y_c)_s \quad ; \quad R^2 = 0,743 \quad (26)$$

Com base nos pressupostos teóricos e no procedimento de dimensionamento do regime *Skimming Flow* aplicados em canais em degraus apresentado neste capítulo, a Seção 2, a seguir, abordará a metodologia aplicada neste estudo.

3 METODOLOGIA

Esta seção é focada em explicar as nuances da utilização dos *softwares* SisCCoH e Excel neste trabalho: quais funcionalidades foram utilizadas, como isso ocorreu, suas limitações e propostas de melhorias.

Além disso, buscou-se revisar a eficiência dos cálculos do programa da UFMG e da Pimenta de Ávila, comparou-se os resultados gerados com os valores obtidos via planilhas eletrônicas.

3.1 SISCCOH

O dimensionamento de descidas escalonadas através do *software* SisCCoH se baseia nos estudos citados na Seção 2 e numa simplificação referente ao revestimento: ele é desconsiderado, visto que a geometria do escalonamento é mais importante do que a rugosidade do material (Alexandre; Baptista; Barcelos, 2019).

Para tal cálculo, necessita-se dos seguintes dados de entrada: vazão (Q), largura do canal (B), altura (S), comprimento (l) e desnível do trecho (H_{dam}). A utilização correta do programa, bem como as premissas utilizadas estão detalhadas no ANEXO A e APÊNDICE A.

3.2 SIMULAÇÕES ATRAVÉS DE *PYTHON*

Para atingir um número satisfatório de simulações, calcular cada uma individualmente se tornaria inviável, portanto, buscou-se o auxílio da linguagem de programação *Python* (versão 3.13.1) para que elas fossem automatizadas e funcionassem independentes da presença humana, ou seja, simplesmente o computador estar ligado para que os dados de entradas fossem inseridos, as planilhas geradas, salvas e nomeadas de forma organizada.

A base de dados utilizada para alimentar as simulações, bem como a inserção dos valores das cinco variáveis no SisCCoH e a nomenclatura adotada para organizar os arquivos estão detalhadas no APÊNDICE B.

Ademais, o número de simulações totais para cada altura de degrau está demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de simulações realizadas no SisCCoH para compor o banco de dados. Simulações separadas de acordo com a altura do degrau.

Altura S (m)	Quantidade de Simulações
0,40	12.030
0,50	8.736
0,60	6.625
0,70	5.398
0,80	4.350
0,90	3.578
1,00	2.983
Total	43.700

Fonte: Autor (2025)

3.2.1 Limitações do Algoritmo

Apesar de útil, o algoritmo apresentava duas principais limitações: não podia ocorrer nenhum erro durante o processo e o banco de dados era inserido manualmente.

O primeiro fato se dá porque ao ter imprevistos referentes ao limite superior do *Skimming Flow*, aparecia uma janela diferente da rotina pré-estabelecida, esta mensagem de aviso precisaria ser fechada, o que seria feito sem maiores problemas por um humano, no entanto, ela não estava no padrão de simulação comum do dimensionando e, também, os dados de entrada precisariam ser trocados, o que só ocorreria na linha seguinte do código.

Outro exemplo de equívoco ocorria quando a máquina demorava mais do que o normal para processar alguma etapa simples do código, por estar funcionando há mais de 8 horas, por exemplo; como a mudança em um dos cinco dados de entrada, então ao salvar o arquivo .xlsx na pasta, o nome poderia acabar se repetindo, logo, apareceria uma janela de confirmação para substituir o arquivo já existente e, como isto não estava na rotina padrão, acabava por interromper o algoritmo.

3.3 PLANILHAS ELETRÔNICAS

3.3.1 Excel

As planilhas eletrônicas utilizadas foram do *software* Excel 365 (versão 2502) da empresa *Microsoft*. A partir do embasamento científico explicado na Seção 2, criou-se uma metodologia para calcular as mesmas variáveis utilizadas no SisCCoH com o adicional do usuário obter informações extras relevantes para obtenção dos resultados, bem como entender o porquê das classificações do regime de escoamento e de sua quase uniformidade ou não.

Tal fato, advém de o SisCCoH não informar os valores de variáveis como as relações S/y_c , H_e/y_c , H_{dam}/y_c e até mesmo o fator de atrito f , em caso de escoamento não uniforme. Desta forma, o usuário fica aquém de informações cruciais tanto para o dimensionamento como para uma otimização das dimensões da estrutura hidráulica.

Mais detalhes sobre a organização da planilha estão no APÊNDICE C.

3.3.2 Tratamento de Dados através do VBA

Após nomear os arquivos organizadamente em pastas, foi preciso organizar as informações de cada uma das simulações em um único arquivo com a mesma altura do degrau. Para isso, utilizou-se a linguagem de programação da *Microsoft* que pode ser utilizada dentro do Excel, o VBA – *Visual Basic for Applications*.

O algoritmo foi dividido cinco em sub-rotinas: importar dados, alinhar coeficiente de atrito, formatar valores do SisCCoH, transformar texto em número e limpar importação. Os detalhes de cada uma delas podem ser vistos no APÊNDICE D.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como visto na Seção 2, uma condição de contorno importante é o tipo de escoamento, visto que a literatura sugere para escoamento aproximadamente uniforme os cálculos sejam diretos e precisos, enquanto o não uniforme necessita de processos matemáticos baseados em tratamentos estatísticos a partir de formulações empíricas (Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, 2004).

Dessa forma, para melhor análise dos resultados apresentados nas planilhas eletrônicas com relação ao SisCCoH, optou-se por dividir os resultados das 43.700 simulações de acordo com a classificação do escoamento, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidades de simulações separadas de acordo com as classificações de escoamento e tipo de *Skimming Flow* pela planilha eletrônica do autor. Classificações baseadas em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004)

Altura S (m)	Tipo A, $19^\circ < \theta \leq 55^\circ$		Tipo A, $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$		Tipo B, $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$		Total
	Escoamento	Escoamento	Escoamento	Escoamento	Escoamento	Escoamento	
	Quase Uniforme	Não Uniforme	Quase Uniforme	Não Uniforme	Quase Uniforme	Não Uniforme	
0,40	1.246	2.423	486	1.569	5.922	384	12.030
0,50	417	2.758	219	1.373	3.441	528	8.736
0,60	144	2.663	67	1.165	1.975	611	6.625
0,70	16	2.729	9	987	998	659	5.398
0,80	0	2.485	0	807	371	687	4.350
0,90	0	2.290	0	643	51	594	3.578
1,00	0	2.116	0	493	0	374	2.983
Total	1.823	17.464	781	7.037	12.758	3.837	43.700

Fonte: Autor (2025).

4.1 ANÁLISE DA PRECISÃO DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO

4.1.1 escoamento Aproximadamente Uniforme

A seguir, na Tabela 3, estão calculados a diferença de todos os parâmetros fornecidos pelo SisCCoH em relação a planilha eletrônica proposta pelo autor para valores percentuais exclusivamente de escoamentos aproximadamente uniformes.

Tabela 3 - Média e desvio padrão da diferença percentual das variáveis y_c , f , d_w , v_{final} , E_{res} , C_{mean} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, H_w , k , La , Ya , Va , $Vcra$. Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento aproximadamente uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.

Escoamento Aproximadamente Uniforme														
Variável	S = 0,40 m		S = 0,50 m		S = 0,60 m		S = 0,70 m		S = 0,80 m		S = 0,90 m		S = 1,00 m	
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
y_c	0,047	0,128	0,163	0,784	0,038	0,098	0,032	0,020	0,112	1,288	0,032	0,031	-	-
f	0,183	0,102	0,166	0,101	0,142	0,080	0,184	0,067	0,142	0,078	0,144	0,142	-	-
dw	0,098	0,146	0,201	0,776	0,073	0,106	0,063	0,038	0,140	1,290	0,055	0,054	-	-
v_{final}	0,013	0,064	0,074	0,391	0,012	0,049	0,011	0,004	0,056	0,680	0,010	0,011	-	-
E_{res}	0,020	0,126	0,141	0,793	0,016	0,096	0,013	0,009	0,096	1,281	0,014	0,014	-	-
C_{mean}	0,080	0,046	0,094	0,113	0,090	0,042	0,087	0,041	0,087	0,082	0,064	0,064	-	-
$y_{0,90}$	0,068	0,133	0,172	0,740	0,049	0,100	0,045	0,028	0,127	1,267	0,043	0,043	-	-
$v_{0,90}$	0,013	0,065	0,079	0,430	0,012	0,050	0,012	0,007	0,057	0,708	0,011	0,012	-	-
H_w	0,050	0,130	0,157	0,743	0,037	0,098	0,033	0,020	0,114	1,268	0,031	0,031	-	-
k	0,070	0,042	0,055	0,030	0,044	0,021	0,035	0,022	0,029	0,020	0,020	0,019	-	-
La	0,006	0,134	0,136	0,844	0,004	0,103	0,002	0,001	0,091	1,368	0,001	0,001	-	-
Ya	0,068	0,118	0,164	0,691	0,047	0,090	0,042	0,026	0,115	1,158	0,037	0,036	-	-
Va	0,009	0,078	0,082	0,477	0,007	0,059	0,005	0,003	0,059	0,827	0,005	0,005	-	-
$Vcra$	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	-	-

Fonte: Autor (2025).

Então, pode-se verificar que a altura $S = 1,00$ m não apresentou nenhum dimensionamento classificado como escoamento aproximadamente uniforme, segundo o SisCCoH. A média e o desvio padrão da diferença não ultrapassam 0,002 e 0,13,

respectivamente. Logo, entende-se como uma margem bastante pequena, o que corrobora com os estudos de (Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, 2004) com relação à precisão dos cálculos no regime de escoamento aproximadamente uniforme.

Ademais, enfatiza-se a baixa discrepância apresentada pela velocidade final, cujo valor é determinante no dimensionamento hidráulico dessas estruturas, visto que, caso o revestimento utilizado seja de concreto e seu valor ultrapasse 6,0 m/s, isto pode causar algum dano à longevidade das descidas, dessa forma, ela representa uma condição importante para aprovação do projeto (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2001).

4.1.2 Escoamento Não Uniforme

Adiante, a Tabela 4 apresenta a diferença das variáveis calculadas pelo SisCCoH em relação a planilha do Excel proposta neste trabalho, cujos dados são unicamente para valores percentuais de escoamentos não uniformes.

Tabela 4 - Média e desvio padrão da diferença percentual das variáveis y_c , f , d_w , v_{final} , E_{res} , C_{mean} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, H_w , k , La , Ya , Va e $Vcra$. Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento não uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.

Escoamento Não Uniforme														
Variável	S = 0,40 m		S = 0,50 m		S = 0,60 m		S = 0,70 m		S = 0,80 m		S = 0,90 m		S = 1,00 m	
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
y_c	0,033	0,167	0,250	1,036	0,032	0,220	0,043	0,652	0,038	0,495	0,044	0,570	0,021	0,013
f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d_w	6,045	8,997	6,458	9,228	7,088	9,360	8,383	9,970	9,217	10,060	10,361	10,198	12,036	10,283
v_{final}	7,701	13,712	8,428	14,272	9,022	14,167	10,741	15,217	11,803	15,294	13,277	15,498	15,502	15,778
E_{res}	15,225	30,521	16,490	31,146	17,486	30,321	21,014	33,045	22,922	32,743	25,678	32,915	29,913	33,451
C_{mean}	0,095	0,079	0,139	0,349	0,081	0,053	0,084	0,240	0,079	0,123	0,073	0,047	0,072	0,046
$y_{0,90}$	6,037	9,002	6,455	9,241	7,087	9,361	8,380	9,966	9,217	10,060	10,359	10,201	12,038	10,283
$v_{0,90}$	7,702	13,713	8,456	14,295	9,023	14,168	10,739	15,213	11,804	15,295	13,278	15,499	15,503	15,778
H_w	6,032	9,005	6,455	9,242	7,086	9,362	8,379	9,967	9,215	10,061	10,360	10,199	12,037	10,285
k	0,070	0,041	0,057	0,037	0,048	0,027	0,043	0,026	0,031	0,021	0,030	0,023	0,026	0,017
La	0,006	0,178	0,240	1,115	0,008	0,234	0,020	0,690	0,017	0,527	0,025	0,607	0,001	0,001
Ya	0,056	0,157	0,245	0,913	0,050	0,200	0,058	0,591	0,051	0,446	0,055	0,511	0,033	0,025
Va	0,006	0,104	0,138	0,630	0,007	0,137	0,015	0,429	0,013	0,317	0,017	0,360	0,003	0,002
$Vcra$	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000

Fonte: Autor (2025).

Em contrapartida, o escoamento não uniforme apresenta margens bastante discrepantes com média e desvio padrão máximos de 0,299 e 0,334, respectivamente. Além disso, ao analisar a velocidade final, identificou-se valores acima dos 0,15 para ambos os indicadores estatísticos.

Com isso, infere-se que os seguintes parâmetros não apresentaram uma precisão satisfatória: d_w , v_{final} , E_{res} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$ e H_w ; portanto, fez-se necessário um tratamento estatístico que melhore esses valores. Para tal, essa análise será refeita através de regressões lineares múltiplas – RLM.

Por fim, o *software* não disponibilizou os valores do coeficiente de atrito f para escoamentos não uniformes, o que prejudica a análise e inviabiliza a execução da RLM para este parâmetro. Por conseguinte, adotou-se o banco de dados do regime quase uniforme para realizar o tratamento da variável, extrapolando-se assim os resultados para o escoamento não uniforme e depois verificando-se a eficiência de tal medida.

4.2 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA – RLM

4.2.1 RLM A partir do Escoamento Não Uniforme

Inicialmente, demonstra-se na Tabela 5, os indicadores para validação da RLM de cada um dos três parâmetros analisados neste regime. Como o coeficiente de determinação R^2 apresentou como menor valor 0,963, pode-se considerar um resultado bastante satisfatório para este estudo. Somado a isto, tem-se erros padrões baixo e F de significação igual a zero em todos os casos, bem como um elevado número de observações.

Tabela 5 - Indicadores R^2 , erro padrão e F de significação para validação da RLM. Além do número de observações para cada regressão. Dados obtidos através do SisCCoH.

Altura S (m)	Variável	R^2	Erro Padrão	F de Significação	Observações
0,40	d_w	0,9969	0,0231	0,000	4.376
	v_{final}	0,9673	0,2703	0,000	4.376
	E_{res}	0,9836	0,2242	0,000	4.376
0,50	d_w	0,9984	0,0185	0,000	4.659

Fonte: Autor (2025).

Tabela 5 - Indicadores R^2 , erro padrão e F de significação para validação da RLM. Além do número de observações para cada regressão. Dados obtidos através do SisCCoH.

Altura S (m)	Variável	R^2	Erro Padrão	F de Significação	Observações
0,50	V_{final}	0,9741	0,2553	0,000	4.659
	E_{res}	0,9879	0,2113	0,000	4.659
	d_w	0,9987	0,0161	0,000	4.439
0,60	V_{final}	0,9735	0,2467	0,000	4.439
	E_{res}	0,9874	0,2078	0,000	4.439
	d_w	0,9985	0,0169	0,000	4.375
0,70	V_{final}	0,9633	0,2759	0,000	4.375
	E_{res}	0,9827	0,2342	0,000	4.375
	d_w	0,9989	0,0145	0,000	3.979
0,80	V_{final}	0,9656	0,2576	0,000	3.979
	E_{res}	0,9835	0,2226	0,000	3.979
	d_w	0,9991	0,0131	0,000	3.527
0,90	V_{final}	0,9664	0,2440	0,000	3.527
	E_{res}	0,9841	0,2129	0,000	3.527
	d_w	0,9993	0,0112	0,000	2.983
1,00	V_{final}	0,9712	0,2109	0,000	2.983
	E_{res}	0,9862	0,1922	0,000	2.983

Fonte: Autor (2025).

Após a validação da RLM, os resultados obtidos para cada uma das variáveis estão expostos na Tabela 6 e na Tabela 7, sendo a primeira referente à d_w , v_{final} e E_{res} ; já a segunda, somente a f . Pode-se dizer que o tratamento estatístico foi realizado em função dos parâmetros descritos nas equações (27) e (28).

$$d_w = v_{final} = E_{res} = F(y_c, q, \theta) \quad (27)$$

$$f = F(\theta, y_c, d_w, E_{res}) \quad (28)$$

As equações acima foram obtidas a partir de manipulações algébricas baseadas em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004).

Tabela 6 - Resultado da RLM para as variáveis d_w , v_{final} e E_{res} . Dados obtidos através do SisCCoH para escoamentos não uniformes.

Altura S (m)	Variável	y_c (m)	q (m ³ /s.m)	θ (graus)	Interseção
0,40	d_w (m)	0,2924	0,0319	- 0,0027	0,0845
0,50		0,3087	0,0297	- 0,0026	0,0705
0,60		0,3227	0,0282	- 0,0026	0,0590
0,70		0,3431	0,0260	- 0,0022	0,0327
0,80		0,3239	0,0293	- 0,0023	0,0421
0,90		0,3134	0,0314	- 0,0023	0,0433
1,00		0,3127	0,0322	- 0,0022	0,0330
0,40	v_{final} (m/s)	4,7507	- 0,4225	0,0443	3,2838
0,50		4,4415	- 0,3784	0,0443	3,4689
0,60		4,1256	- 0,3410	0,0449	3,6880
0,70		4,1903	3,6282	- 0,2815	0,0390
0,80		3,7034	- 0,3000	0,0399	4,1935
0,90		3,6320	- 0,2982	0,0388	4,3504
1,00		3,3859	- 0,2738	0,0348	4,7352
0,40	E_{res} (m)	3,4488	- 0,1681	0,0312	- 0,1946
0,50		3,3208	- 0,1539	0,0309	- 0,0895
0,60		3,1380	- 0,1340	0,0312	0,0469
0,70		2,8394	- 0,1019	0,0263	0,3970
0,80		2,9325	- 0,1219	0,0270	0,3806
0,90		3,3859	- 0,2738	0,0348	4,7352
1,00		2,8284	- 0,1231	0,0232	0,7112

Fonte: Autor (2025).

Tabela 7 - Resultado da RLM para a variável f . Dados obtidos através do SisCCoH para escoamentos aproximadamente uniformes.

Altura S (m)	Variável	θ (graus)	y_c (m)	d_w (m)	E_{res} (m)	Interseção
0,40	f (-)	0,0046	2,3021	- 3,0429	- 0,3186	0,1035
0,50		0,0051	2,4098	- 3,1507	- 0,3388	0,0974
0,60		0,0048	2,3311	- 3,0780	- 0,3227	0,1017
0,70		0,0019	1,6757	- 2,4145	- 0,1988	0,1370
0,80		0,0236	3,0231	- 2,8341	- 0,6262	- 0,0766
0,90		- 0,0056	- 0,4522	0,0065	0,1570	0,2397
1,00		-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2025).

4.3 REANÁLISE DO ESCOAMENTO NÃO UNIFORME APÓS UTILIZAÇÃO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A partir das novas fórmulas obtidas na RLM e destrinchadas na Tabela 6 e na Tabela 7, recalculou-se a precisão da planilha unicamente para o regime não uniforme, visto que o regime aproximadamente uniforme apresentou resultados satisfatórios.

Os novos valores obtidos estão demonstrados na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 8 - Média da diferença percentual das variáveis y_c , f , d_w , v_{final} , E_{res} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, H_w . Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento não uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.

Escoamento Não Uniforme – Após Regressão Linear Múltipla									
Altura S (m)	Média	y_c	f	d_w	v_{final}	E_{res}	$y_{0,90}$	$v_{0,90}$	H_w
0,40	$\bar{x}$	0,033%	-	4,499%	2,683%	4,277%	4,496%	4,993%	4,495%
0,50	$\bar{x}$	0,241%	-	3,607%	2,380%	3,763%	3,585%	3,656%	3,585%
0,60	$\bar{x}$	0,032%	-	2,674%	2,268%	3,564%	2,672%	2,727%	2,673%
0,70	$\bar{x}$	0,043%	-	2,616%	2,554%	4,185%	2,613%	2,643%	2,613%
0,80	$\bar{x}$	0,038%	-	2,242%	2,389%	3,874%	2,241%	2,248%	2,239%
0,90	$\bar{x}$	0,040%	-	2,224%	2,434%	4,013%	2,224%	2,257%	2,222%
1,00	$\bar{x}$	0,021%	-	1,514%	1,828%	3,006%	1,512%	1,521%	1,512%

Fonte: Autor (2025).

Tabela 9 - Desvio padrão da diferença percentual das variáveis y_c , f , d_w , v_{final} , E_{res} , $y_{0,90}$, $v_{0,90}$, H_w . Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004), para escoamento não uniforme e todas as alturas, a partir do SisCCoH.

Escoamento Não Uniforme – Após Regressão Linear Múltipla									
Altura S (m)	Desvio Padrão	y_c	f	d_w	v_{final}	E_{res}	$y_{0,90}$	$v_{0,90}$	H_w
0,40	σ	0,167%	-	5,383%	1,702%	2,725%	5,379%	7,489%	5,372%
0,50	σ	1,018%	-	3,645%	1,632%	2,595%	3,626%	4,411%	3,629%
0,60	σ	0,220%	-	2,470%	1,543%	2,429%	2,467%	2,781%	2,467%
0,70	σ	0,652%	-	2,353%	1,682%	2,833%	2,323%	2,488%	2,324%
0,80	σ	0,495%	-	1,809%	1,646%	2,747%	1,802%	1,848%	1,800%
0,90	σ	0,526%	-	1,948%	1,875%	3,149%	1,941%	2,045%	1,940%
1,00	σ	0,013%	-	1,225%	1,430%	2,451%	1,226%	1,265%	1,225%

Fonte: Autor (2025).

Então, verifica-se uma drástica redução na diferença percentual, especialmente na energia residual E_{res} que apresentou o maior valor de discrepância: 0,299 de média e 0,334 de desvio padrão, reduzindo para 0,042 e 0,314, respectivamente.

Sublinha-se a importância, mais uma vez, de que a velocidade final não ultrapassou os 0,026 de média e 0,018 de desvio padrão e, assim como o restante dos parâmetros, apresentou um desempenho superior em comparação à Tabela 4.

4.4 RESULTADOS GERAIS

Portanto, de acordo com o exposto acima, a planilha eletrônica apresentou resultados bastante satisfatórios para o regime de escoamento aproximadamente uniforme do *Skimming Flow*, quando comparados aos valores obtidos pelo SisCCoH.

Neste quesito, destaca-se que a média e o desvio padrão da diferença entre a planilha eletrônica e o *software* não excederam 0,002 e 0,013, respectivamente. Ademais, a velocidade final se mostrou precisa, com valores máximos de 0,0007 para a média e 0,0068 para o desvio padrão, como demonstrado na Tabela 3.

Por outro lado, em uma análise inicial, o escoamento não uniforme do *Skimming Flow* apresentou resultados insatisfatórios, visto que a média e o desvio padrão máximo foram de 0,299 e 0,334, respectivamente. Ou seja, a planilha eletrônica não se mostrou precisa no

dimensionamento hidráulico das descidas com degraus em regime não uniforme (análise inicial).

No entanto, para solucionar tal imprecisão, utilizou-se a técnica de análise de dados da regressão linear múltipla para, a partir das 43.700 simulações realizadas, criar-se um ajuste adequado para obter uma fórmula que calculasse as variáveis imprecisas: d_w , v_{final} , E_{res} e f .

Então, separando cada RLM por altura S , obteve-se valores bastantes elevados para os coeficientes de determinação R^2 , erros padrões baixos e F de significação iguais a zero para todas as análises; o que indica que o método foi fidedigno ao representar a amostra. Em seguida, os valores dos coeficientes foram demonstrados na Tabela 6 e na Tabela 7.

Por fim, uma segunda análise foi realizada após a aplicação da RLM demonstrando um grande avanço na precisão dos dados, com a diferença percentual máxima da média entre os métodos caindo de 0,299 para 0,049 e o desvio padrão percentual de 0,334 para 0,074. Além disso, a velocidade final também apresentou melhoras, reduzindo a média e o desvio padrão de 0,155 para 0,026 e de 0,157 para 0,018, em porcentagem, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Diante do exposto, infere-se que o presente trabalho alcançou resultados satisfatórios dentro daquilo que se propôs: contribuir para o melhor dimensionamento de descidas escalonadas com regime de escoamento *Skimming Flow*, através de rotinas de cálculos.

Por conseguinte, entende-se que a calibração do *software* SisCCoH se mostrou bastante precisa quando comparada às formulações propostas por Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004); especialmente no que tange o regime de escoamento aproximadamente uniforme, cujas delimitações estão bem definidas.

Em contrapartida, o escoamento não uniforme apresentou maior dispersão de resultados, ainda assim, dentro de uma margem aceitável, já que os próprios pesquisadores que embasaram a teoria científica demonstraram menores valores de R^2 para este regime.

Ademais, a planilha eletrônica proposta neste estudo conseguiu abranger todos os tipos de classificações do *Skimming Flow*: tipos A e B, escoamentos quase uniformes e não uniformes.

Além disso, foi realizada uma calibração deveras robusta, uma vez que, o número de simulações para tal foi de 43.700, trabalhando-se assim com todas as classificações e casos possíveis do *Skimming Flow*.

Todavia, ressalta-se que inicialmente os resultados da acurácia da planilha só foram tidos como aceitáveis para o regime aproximadamente uniforme. Enquanto isso, o escoamento não uniforme precisou passar por um tratamento estatístico de RLM para, dessa forma, torná-lo mais preciso. Esta ferramenta de previsão de tendência só pôde ser utilizada por conta do elevado número de dimensionamentos, os quais estabeleceram um amplo banco de dados que, somados à confiabilidade do *software* trouxeram mais precisão à planilha.

6 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- a) Sugere-se a expansão do banco de dados utilizada neste trabalho através de incrementos ainda menores nas variáveis de entrada para obter uma precisão ainda maior no tratamento estatístico.
- b) Recomenda-se a utilização de mais linguagens de programação como SQL, além de maior utilização do *Python* para que o processamento e precisão dos cálculos sejam ainda melhores.
- c) Estimula-se a realização de um estudo com adoção de mais um parâmetro de entrada no dimensionamento: a declividade. Dessa forma, ele se tornaria mais complexo e, principalmente, mais fidedigno à realidade.
- d) Instiga-se a realização de um estudo análogo a esse, porém, focado no regime de escoamento *Nappe Flow*.
- e) Aconselha-se um a pesquisa de uma maneira de melhorar calcular os parâmetros do regime *Skimming Flow* para escoamentos não uniforme. Mais especificamente, uma forma mais clara de mensurar os parâmetros h_p e h_2 .
- f) Recomenda-se testar o produto deste trabalho (planilha) em grupos de engenheiros civil que utilizam o *software* SisCCoH para avaliar o ganho de tempo e percepção social dos engenheiros.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens 2021**. Brasília, Brasil: ANA, 2022.

ALEXANDRE, Gladstone Rodrigues; BAPTISTA, Márcio Benedito; BARCELOS, Josiane Marinho. **Manual Técnico do SisCCoH**. Belo Horizonte: Pimenta de Ávila Consultoria e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR UFMG, 2019.

ARANTES, Eudes José; PORTO, Rodrigo de Melo; BOTARI, Alexandre. Dissipação de energia em vertedouros em degraus via CFD. [s. l.], 2007. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/151/284c697e8bf63d7ad0b35695f595fb96_04fe94f21266f51f396793e11cd939bb.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

AZEVEDO, Felipe Oliveira da Silva. Desenvolvimento de plataforma digital como instrumento de segurança de barragem: estudo de caso na Barragem do Cobre-Bahia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/34233>. Acesso em: 14 jan. 2025.

AZEVEDO, José Roberto Gonçalves de *et al.* **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2016.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNÁNDEZ, Miguel Fernández y. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2015.

BOES, Robert M. Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow. *In: HYDRAULICS OF STEPPED SPILLWAYS*. [S. l.]: CRC Press, 2000.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, Nallamuthu. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 4, p. 361–368, 1999.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DE 01/HID-002 - Projeto de Drenagem**. São Paulo: DER-SP, 2001.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto. **Abastecimento de água para consumo humano**. 3. ed. [S. l.]: Editora UFMG, 2022. v. 2

HORNER, Michael William. **An analysis of flow on cascades of steps**. 1969. PhD Thesis - University of Birmingham, [s. l.], 1969.

MATOS, Jorge Saldanha Gonçalves; QUINTELA, Antônio de Carvalho. Descarregadores de cheias em degraus: posição actual da avaliação da dissipação de energia. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 11, p. 65–71, 1995.

OHTSU, Iwao; YASUDA, Youichi. Characteristics of flow condition on stepped channels. **The 27th Cong. of IAHR, Water Resources Engineering, Div./ASCE. San Francisco, USA, 1997**, [s. l.], 1997. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571417125547278592>. Acesso em: 8 jan. 2025.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 130, n. 9, p. 860–869, 2004.

OHTSU, Iwao; YASUDA, Youichi; TAKAHASHI, Masayuki. Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 130, n. 9, p. 860–869, 2004.

OHTSU, Iwao; YASUDA, Youichi; TAKAHASHI, Masayuki. **Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways-Discussion**. [S. l.]: ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017-2398 USA, 2000.

OHTSU, Iwao; YASUDA, Youichi; TAKAHASHI, Masayuki. Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 127, n. 6, p. 522–524, 2001.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC, 2006.

RAJARATNAM, Nallamuthu. Skimming Flow in Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 116, n. 4, p. 587–591, 1990.

SIMÕES, André Luiz Andrade; PORTO, Rodrigo de Melo; SCHULZ, Harry Edmar. Uma síntese acerca de estudos em hidráulica de canais e vertedores em degraus. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande**, [s. l.], 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/download/113642898/Art_1_2009_1_Simoes_Porto_e_Schulz_SB_RH.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

TAHAN, Malba. **O Homem que Calculava**. 83. ed. Rio de Janeiro: Editora Record, 2013.

YASUDA, Youichi; CHANSON, Hubert. Micro-and macro-scopic study of two-phase flow on a stepped chute. [s. l.], 2003. Disponível em: <https://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/reprints/iahr031.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

YASUDA, Youichi; OHTSU, Iwao. Flow Resistace of Skimming Flows in Stepped Channels. In: , 1999. **Proceeding of 28th IAHR Congress**. [S. l.]: Session of B14 (CD ROM), 1999. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572261549105607808>. Acesso em: 8 jan. 2025.

APÊNDICE A – PREMISAS DAS SIMULAÇÕES NO SISCCOH

Altura do Degrau – S

Dentre todas as variáveis alteradas, essa foi a que sofreu menos mudanças por conta de seu impacto nos parâmetros principais S/y_c e θ . Então, adotou-se 0,40 m inicialmente por não ser um valor baixo e atingir lentamente o limite de simulação com as variações estabelecidas.

Vazão – Q

Optou-se por não trabalhar com uma vazão tão baixa, então as simulações iniciaram em 1,00 m³/s e foram incrementadas em 0,10 m³/s até chegar a 2,00 m³/s. Em seguida, aumentou-se para 0,20 m³/s o incremento até atingir os 3,00 m³/s, conforme Tabela 10.

Ao chegar neste limite, alterava-se o valor da altura do degrau, que foi a última variável a sofrer alguma mudança em seu valor inicial.

Tabela 10 - Intervalo de vazões.

Vazão – Q _s (m ³ /s)
1,00
1,10
1,20
1,30
1,40
1,50
1,60
1,70
1,80
1,90
2,00
2,20
2,40
2,60
2,80
3,00

Fonte: Autor (2025)

Comprimento do Patamar do Degrau – l

O comprimento passou por um intervalo maior de valores: começou em 0,30 m e aumentou de 0,10 m até chegar em 4,00 m.

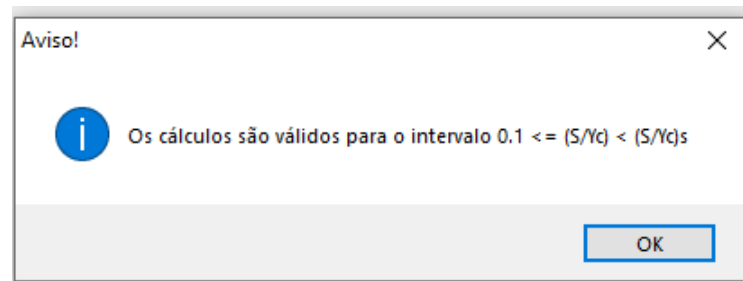
Largura do Canal – B

Análoga à variável anterior, a largura começou em 0,10 m e teve incrementos de 0,10 m até o limite do *software* $(S/y_c)_s$, estabelecido pela equação (3).

Como a largura B é inversamente proporcional à profundidade crítica y_c , então quanto maior o valor de B , menor o de y_c . Dessa forma, à medida que a altura S permanecia fixa, ao diminuir y_c , o valor da relação S/y_c aumentava até chegar num ponto em que $S/y_c > (S/y_c)_s$.

Quando isso acontecia, o SisCCoH mostrava uma janela de aviso dizendo que os cálculos só são válidos para o intervalo $0,1 \leq S/y_c < (S/y_c)_s$ e o dimensionamento não rodava até que novos dados de entrada fossem inseridos, como na Figura 13. Neste caso, aumentava-se o valor do comprimento em 0,10 m e reiniciava-se o valor da largura em 0,10 m.

Figura 13 - Janela de classificação do regime de escoamento em degraus.



Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Desnível do Trecho – H_{dam}

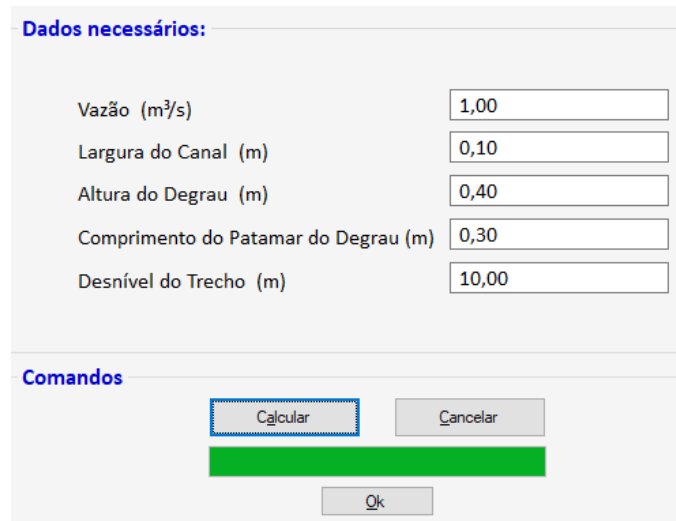
Esta foi a única das cinco variáveis do módulo *Skimming Flow* (Figura 33) que permaneceu inalterada durante todo o trabalho, visto que sua influência seria exclusivamente na relação H_{dam}/y_c , a qual serve para estabelecer se o escoamento é quase uniforme ou não uniforme, caso $H_{dam}/y_c \geq H_e/y_c$ ou $H_{dam}/y_c < H_e/y_c$, respectivamente, conforme equação (8).

Ademais, o número elevado de simulações fez com que ambas as classificações fossem alcançadas durante os processamentos. Com isso, seu valor adotado foi de 10,00 m.

Exemplo de Incrementos nas Variáveis Simuladas

Primeira simulação demonstrada na Figura 14.

Figura 14 - Exemplo de simulação no módulo *Skimming Flow* – $B = 0,10$ m.



Dados necessários:

Vazão (m^3/s)	1,00
Largura do Canal (m)	0,10
Altura do Degrau (m)	0,40
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	0,30
Desnível do Trecho (m)	10,00

Comandos

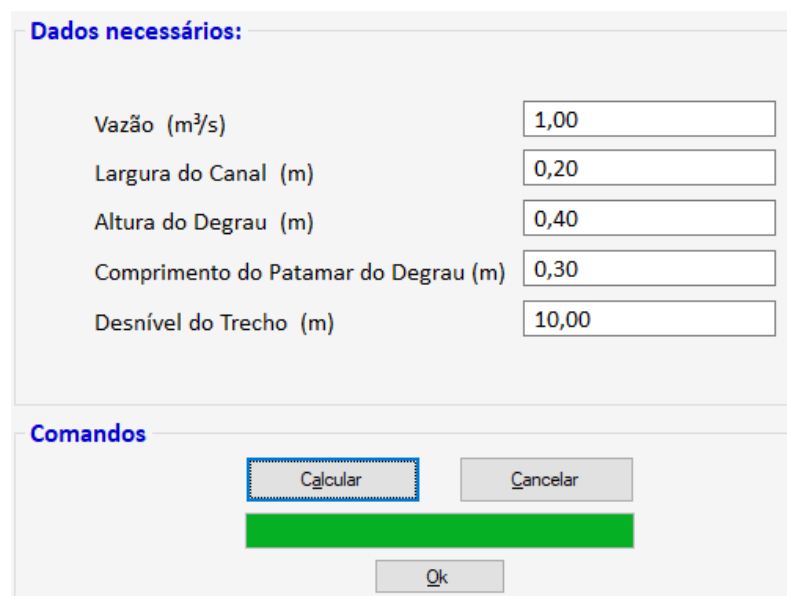
Calcular Cancelar

Ok

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Após os cálculos carregarem, gera-se uma planilha que é salva numa pasta para posterior tratamento de dados. Em seguida, acrescenta-se 0,10 m à largura, Figura 15.

Figura 15 - Exemplo de simulação no módulo *Skimming Flow* – $B = 0,20$ m.



Dados necessários:

Vazão (m^3/s)	1,00
Largura do Canal (m)	0,20
Altura do Degrau (m)	0,40
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	0,30
Desnível do Trecho (m)	10,00

Comandos

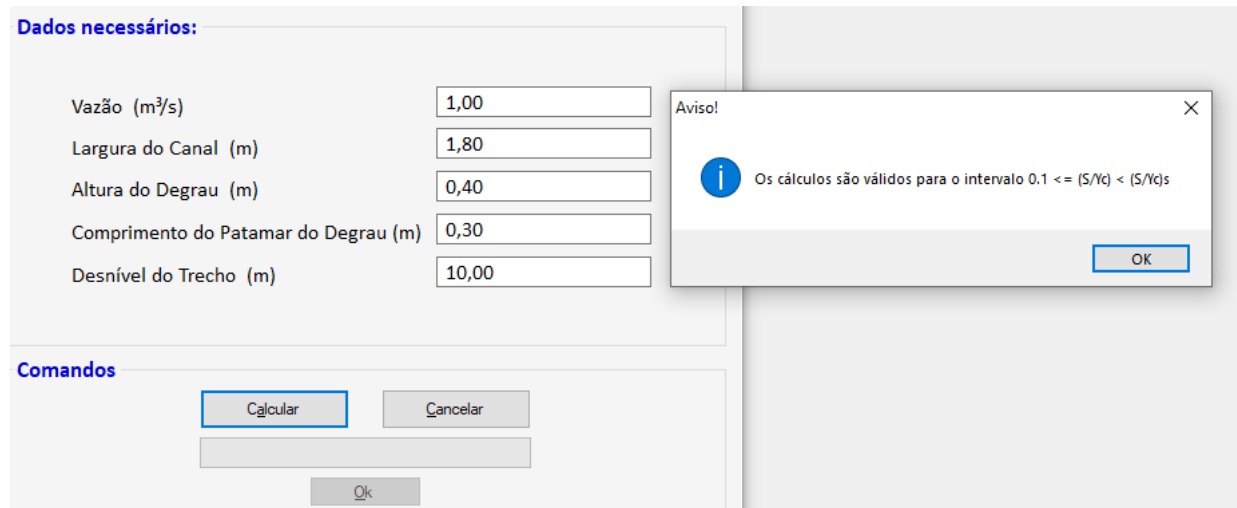
Calcular Cancelar

Ok

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Dessa forma, segue-se até 1,70 m de largura. No entanto, ao apertar em calcular com 1,80 m, a mensagem de erro aparece (Figura 16). Neste caso, destaca-se o fato de que a barra verde de carregamento nem começa a subir.

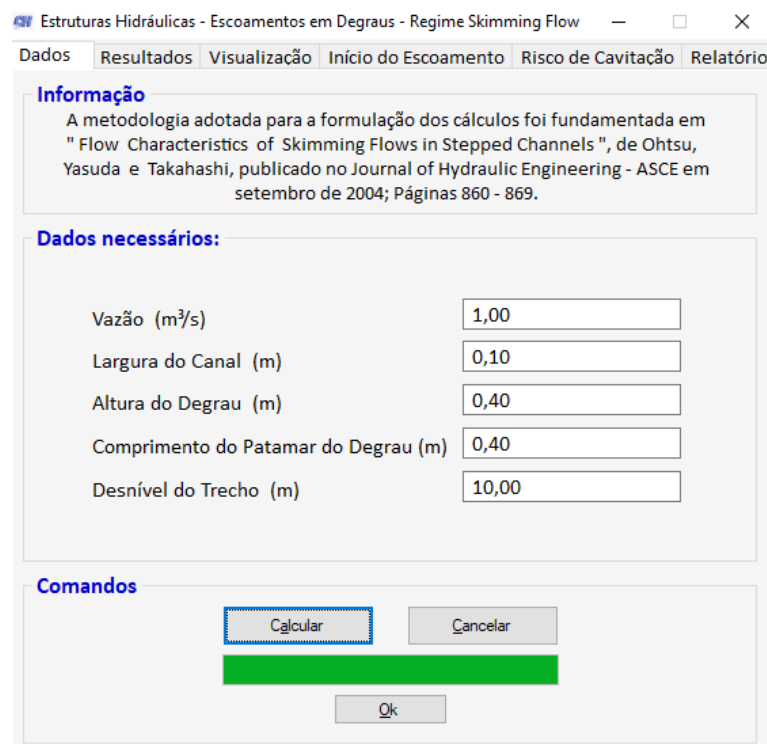
Figura 16 - Aviso de erro ao ultrapassar o limite superior do *Skimming Flow*.



Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Aumenta-se o comprimento em 0,10 m e a largura volta a ter o valor de 0,10 m, Figura 17.

Figura 17 - Resolução do aviso de erro.



Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Este critério segue até o comprimento do patamar chegar no valor de 4,00 m e largura atingir o valor limite permitido, Figura 18.

Figura 18 - Valor limite da largura do canal para uma dada vazão e comprimento de 4,00 m.

Estruturas Hidráulicas - Escoamentos em Degraus - Regime Skimming Flow

Dados | Resultados | Visualização | Início do Escoamento | Risco de Cavitação | Relatório

Informação
A metodologia adotada para a formulação dos cálculos foi fundamentada em "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels", de Ohtsu, Yasuda e Takahashi, publicado no Journal of Hydraulic Engineering - ASCE em setembro de 2004; Páginas 860 - 869.

Dados necessários:

Vazão (m³/s)

Largura do Canal (m)

Altura do Degrau (m)

Comprimento do Patamar do Degrau (m)

Desnível do Trecho (m)

Comandos

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Quando isso acontece, a vazão é incrementada e os valores iniciais do comprimento e largura são retomados e o processo é repetido até chegar na vazão de 3,00 m³/s com patamar de 4,00 m e largura máxima, neste caso, 2,60 m, Figura 19.

Figura 19 - Última simulação com altura $S = 0,40$ m.

Estruturas Hidráulicas - Escoamentos em Degraus - Regime Skimming Flow

Dados | Resultados | Visualização | Início do Escoamento | Risco de Cavitação | Relatório

Informação
A metodologia adotada para a formulação dos cálculos foi fundamentada em "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels", de Ohtsu, Yasuda e Takahashi, publicado no Journal of Hydraulic Engineering - ASCE em setembro de 2004; Páginas 860 - 869.

Dados necessários:

Vazão (m³/s)

Largura do Canal (m)

Altura do Degrau (m)

Comprimento do Patamar do Degrau (m)

Desnível do Trecho (m)

Comandos

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

APÊNDICE B – SIMULAÇÕES EM *PYTHON*

Base de Dados

Com o intuito de inserir os dados de entrada automaticamente, criou-se um banco de dados em formato de matriz com n linhas e cinco colunas, cada linha representava uma simulação e tinha o seguinte formato: ['{valor[0]}', '{valor[1]}', '{valor[2]}', '{valor[3]}', '{valor[4]}']; cujas variáveis eram vazão Q , largura B , altura S , comprimento l e desnível H_{dam} , respectivamente, como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Exemplo de base de dados em *Python*.

```
[ "2,60" , "1,00" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,10" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,20" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,30" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,40" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,50" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,60" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,70" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,80" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "1,90" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "2,00" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "2,10" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "2,20" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
[ "2,60" , "2,30" , "0,40" , "4,00" , "10,00" ],
```

Fonte: Autor (2025).

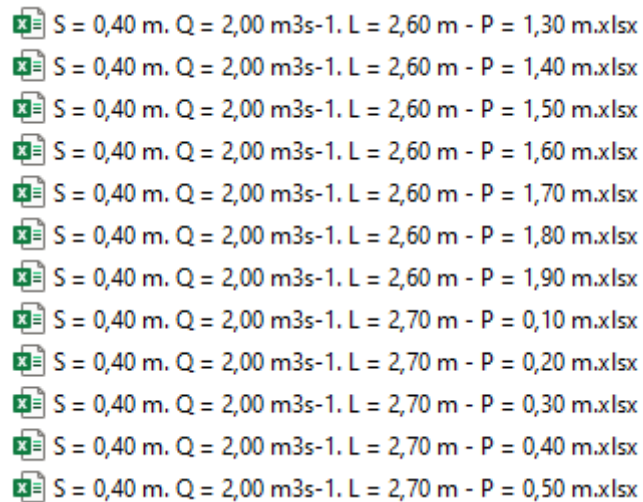
Inserção dos Dados de Entrada

A partir de um algoritmo em *Python* e do auxílio de algumas bibliotecas foi possível determinar uma sequência de comandos em que, uma vez que o módulo de *Skimming Flow* estivesse aberto (Figura 33), seria possível mover o mouse para coordenadas x e y de cada dado de entrada, apagar o que estava escrito e inserir as informações do banco de dados. Com isso, a máquina realizava a ordem de comandos mostrada da Figura 33 até a Figura 35.

Nomenclatura dos Arquivos

Os arquivos eram nomeados neste formato: “S = {valor[2]} m. Q = {valor[0]} m³s⁻¹. L = {valor[3]} m - P = {valor[1]} m”, como demonstrado na Figura 21.

Figura 21 - Janela de classificação do regime de escoamento em degraus.



	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,30 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,40 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,50 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,60 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,70 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,80 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,60 m - P = 1,90 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,70 m - P = 0,10 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,70 m - P = 0,20 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,70 m - P = 0,30 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,70 m - P = 0,40 m.xlsx
	S = 0,40 m. Q = 2,00 m ³ s ⁻¹ . L = 2,70 m - P = 0,50 m.xlsx

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE C – PLANILHA ELETRÔNICA PROPOSTA PELO AUTOR

Dados de Entrada

Os dados de entrada são iguais aos do SisCCoH.

Figura 22 - Dados de entrada.

Dados de Entrada					
Estrutura	Vazão	Largura do Canal	Altura do Degrau	Comprimento do Patamar do Degrau	Desnível do Trecho
	Q	B	S	l	H _{dam}
	(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
DCD-8926	2,60	1,50	0,40	1,00	10,00
DCD-8927	2,60	1,60	0,40	1,00	10,00
DCD-8928	2,60	1,70	0,40	1,00	10,00

Fonte: Autor (2025).

Classificação do Regime de Escoamento

Inseriu-se na planilha informações referentes às relações usadas na classificação do regime de escoamento: S/y_c , $(S/y_c)_s$, $(S/y_c)_B$, H_e/y_c , H_{dam}/y_c ; bem como explicitou os resultados dessas análises, por exemplo, o tipo de *Skimming Flow*.

Figura 23 - Classificação do regime de escoamento. Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004)

Classificação do Regime de Escoamento									
Ângulo do alinhamento das quinas		Profundidade Crítica	Relação S/y_c	Limite Superior do Skimming Flow	Limite entre A e B no Skimming Flow	Relação H_e/y_c	Relação H_{dam}/y_c	Classificação	
θ		y_c	S/y_c	$(S/y_c)_s$	$(S/y_c)_B$	H_e/y_c	H_{dam}/y_c	Regime	Intervalo de θ
(rad)	(°)	(m)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		Intervalo de $(S/y_c)S$
0,381	21,801	0,674	0,593	1,001	1,361	15,35	14,83	Escoamento Não Uniforme	$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$
0,381	21,801	0,646	0,619	1,001	1,361	15,29	15,49	Escoamento Aproximadamente Uniforme	$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$
0,381	21,801	0,620	0,645	1,001	1,361	15,24	16,12	Escoamento Aproximadamente Uniforme	$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$

Fonte: Autor (2025).

Coeficiente de Atrito f

Neste tópico, o autor acrescentou à planilha informações como profundidade o coeficiente A, o de atrito e o de atrito máximo para todos os dimensionamentos e não somente para os que apresentarem regime quase uniforme como no SisCCoH;

Figura 24 - Coeficiente de atrito. Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004)

Coeficiente de Atrito - f		
Área Molhada	Coeficiente de Atrito Máximo	Coeficiente de Atrito
A	$f_{Máx}$	f
(m ²)	(-)	(-)
0,452	0,1821	0,1821
0,452	0,1821	0,1821
0,452	0,1821	0,1821

Fonte: Autor (2025).

Parâmetros Finais

A única informação diferente que é fornecida para o usuário é o valor de d .

Figura 25 - Parâmetros finais. Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004)

Parâmetros Finais			
Profundidade Representativa do Escoamento	Velocidade Final do Escoamento	Energia Residual	Coefficiente d
d_w (-)	V_{final} (m/s)	$E_{ru,A}$ (m)	d (-)
0,2658	6,4941	2,415	0,3358
0,2546	6,3559	2,314	0,3358
0,2445	6,2288	2,222	0,3358

Fonte: Autor (2025).

Parâmetros Aerados

O diferencial aqui consiste em fornecer o número de Froude rugoso.

Figura 26 - Parâmetros aerados. Cálculos baseados em Ohtsu, Iwao; Yasuda; Takahashi, (2004)

Parâmetros Aerados							
Concentração Média de Ar	Profundidade Aerada do Escoamento	Velocidade do Escoamento Aerado	Altura de Referência da Parede	Rugosidade na Superfície da Calha	Número de Froude Rugoso	Posição no Início da Aeração	Profundidade no Início da Aeração
C_{med}	$Y_{0,90}$ (m)	$V_{0,90}$ (m/s)	H_w (m)	k (m)	f (-)	La (m)	Ya (m)
0,331	0,502	6,127	0,703	0,371	4,012	8,983	0,355
0,332	0,503	5,961	0,704	0,371	3,761	8,579	0,341
0,333	0,503	5,807	0,705	0,371	3,540	8,216	0,329

Fonte: Autor (2025).

Cavitação

No último tópico em comum com o SisCCoH, a ocorrência de cavitação, não há nenhuma diferença entre os parâmetros exibidos, sendo inclusive, a velocidade crítica de cavitação a mesma para todas as simulações.

Figura 27 - Cavitação.

Cavitação	
Velocidade no Início da Aeração	Velocidade Crítica de Cavitação
V_a (m/s)	V_{cra} (m/s)
6,358	17,771
6,220	17,771
6,094	17,771

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE D – SUB-ROTINAS DO ALGORITMO EM VBA

Importar Dados

Ela permitia selecionar uma pasta da máquina, abrir cada um dos arquivos .xlsx que estivessem nela, no caso, as simulações do SisCCoH, extrair as informações desses arquivos, enfileirar uma simulação ao lado da outra, depois reorganizar de forma que ficassem os resultados de cada arquivo por linha em ordem alfabética de cada planilha.

Alinhar Coeficiente de Atrito

Como dito na

Com base nos pressupostos teóricos e no procedimento de dimensionamento do regime *Skimming Flow* aplicados em canais em degraus apresentado neste capítulo, a Seção 2, a seguir, abordará a metodologia aplicada neste estudo.

METODOLOGIA, nem sempre o valor do coeficiente de atrito é informado pelo SisCCoH, portanto, algumas planilhas vinham com uma linha a menos e, com isso, ao utilizar a sub-rotina de importar dados, elas não ficavam exatamente alinhadas, o que impossibilitava o funcionamento da próxima sub-rotina.

Formatar Valores do SisCCoH

Esta rotina era fundamental para organização do grande volume de dados, visto que ele transformava a ordem fornecida no SisCCoH na sequência exata de copiar e colar na planilha proposta pelo autor.

Transformar Texto em Número

Além disso, um tratamento de dados foi adicionado, visto que muitas células vinham como texto e não número, o que dificultava sua trabalhabilidade. Ademais, algumas questões de formatação como utilizar um ponto no lugar da vírgula eram corrigidas, inclusive a ausência de vírgula.

Por fim, ainda foi possível adicionar filtros que exibiam uma cor diferente caso o valor da variável não estivesse em ordem, por exemplo, se houvesse algum arquivo com os mesmos dados de entrada, ou até mesmo pulasse algum valor de largura, incrementando 0,20 m ao invés de 0,10 m, Figura 28.

Figura 28 - Filtro para identificação de erro da sub-rotina Transformar Texto em Número.

Q	B	S	l	H _{dam}	θ	y _c	f	d _w	V _{final}
2,00	0,70	0,40	2,50	10,00	9,090	0,941	0,141	0,453	6,308
2,00	0,80	0,40	2,50	10,00	9,090	0,860	0,142	0,416	6,016
2,00	0,90	0,40	2,50	10,00	9,090	0,795	0,143	0,385	5,779
2,00	1,00	0,40	2,50	10,00	9,090	0,742	0,143	0,358	5,580
2,00	1,10	0,40	2,50	10,00	9,090	0,696	0,143	0,336	5,405
2,00	1,20	0,40	2,50	10,00	9,090	0,657	0,143	0,317	5,251
2,00	1,30	0,40	2,50	10,00	9,090	0,623	0,143	0,301	5,113
2,00	1,40	0,40	2,50	10,00	9,090	0,593	0,143	0,286	4,988
2,00	1,50	0,40	3,90	10,00	5,856	0,566	0,111	0,291	4,578
2,00	1,60	0,40	2,50	10,00	9,090	0,542	0,143	0,262	4,771
2,00	1,70	0,40	2,50	10,00	9,090	0,521	0,143	0,252	4,675
2,00	1,80	0,40	2,50	10,00	9,090	0,501	0,143	0,242	4,587

Fonte: Autor (2025).

ANEXO A – PROTOCOLO DE SIMULAÇÃO DO SISCCOH

Há duas possibilidades de iniciar o dimensionamento de degraus no SisCCoH, caso o usuário precise classificar o regime de escoamento, ele terá de seguir o caminho “Estruturas Hidráulicas > Escoamento em Degraus > Regime de Escoamento em Degraus” (Figura 29). Caso ele já saiba qual a classificação do escoamento, pode clicar diretamente nos botões “Regime Skimming Flow” ou “Regime Nappe Flow”.

Figura 29 - Acesso ao regime de escoamento em degraus.

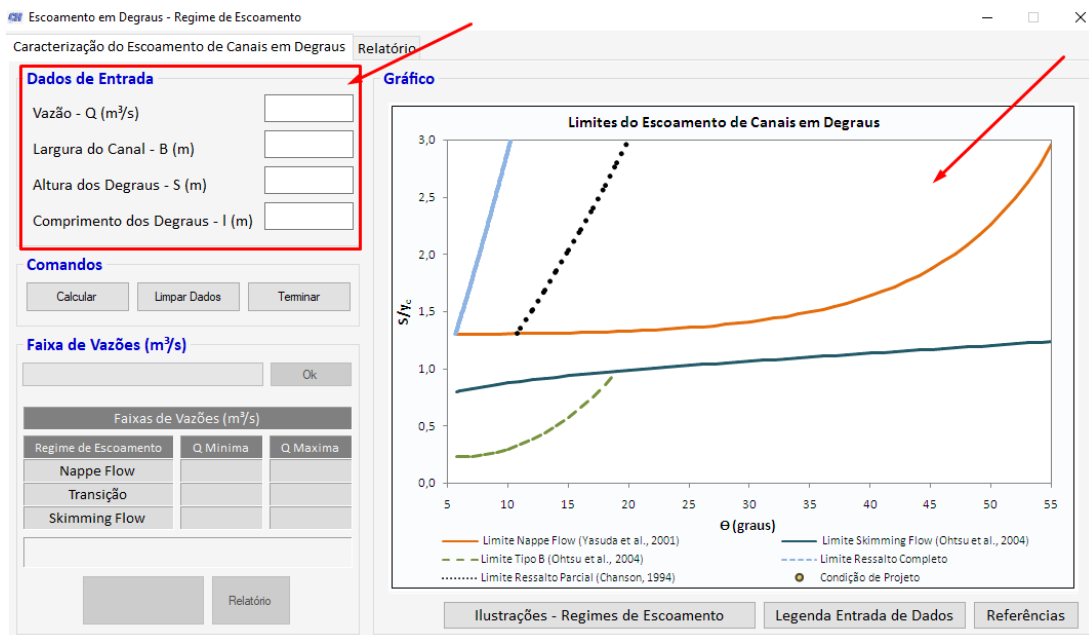


Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Classificação do Regime de Escoamento

Para a primeira hipótese do item anterior, ao clicar em “Regime de Escoamento em Degraus” aparecerá uma janela onde é possível visualizar o gráfico com os limites de cada classificação de escoamento à direita e alguns espaços à esquerda para inserção dos dados de entrada, que são: vazão Q , largura do canal B , altura dos degraus S e comprimento dos degraus l , tais símbolos são adotados pelo próprio *software* (Figura 30).

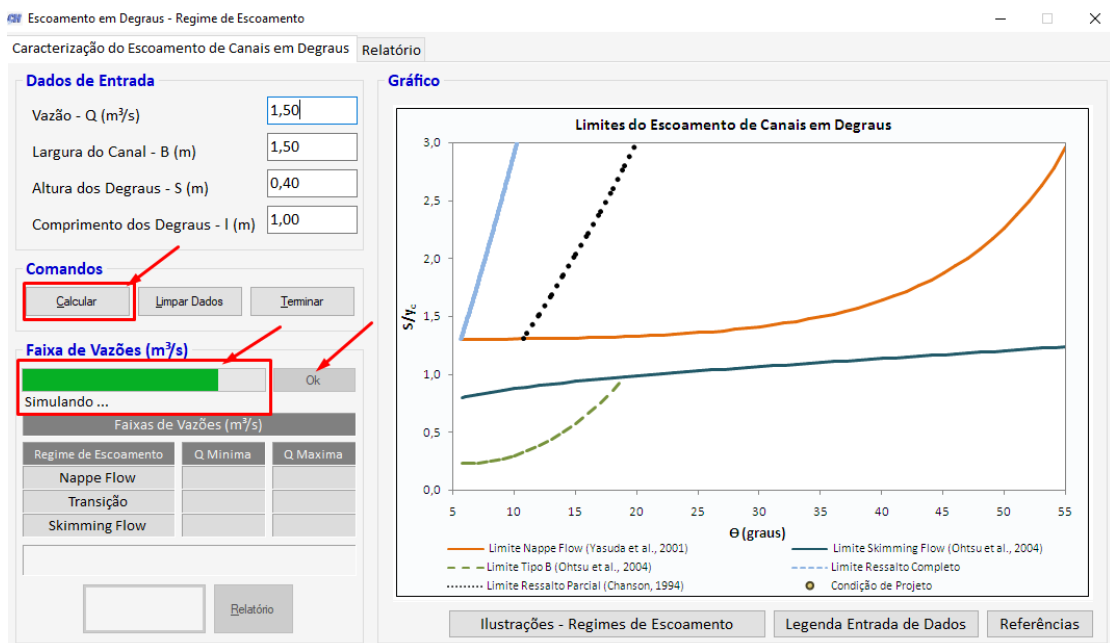
Figura 30 - Janela de classificação do regime de escoamento em degraus – Parte 1.



Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Após inserir os quatro dados de entrada é preciso clicar em “Calcular”, em seguida, uma barra verde indicará o progresso das contas e crescerá logo abaixo da legenda “Faixa de Vazões (m³/s)”, da direita para esquerda em direção ao botão “Ok” que ficará liberado assim que o processo for finalizado (Figura 31).

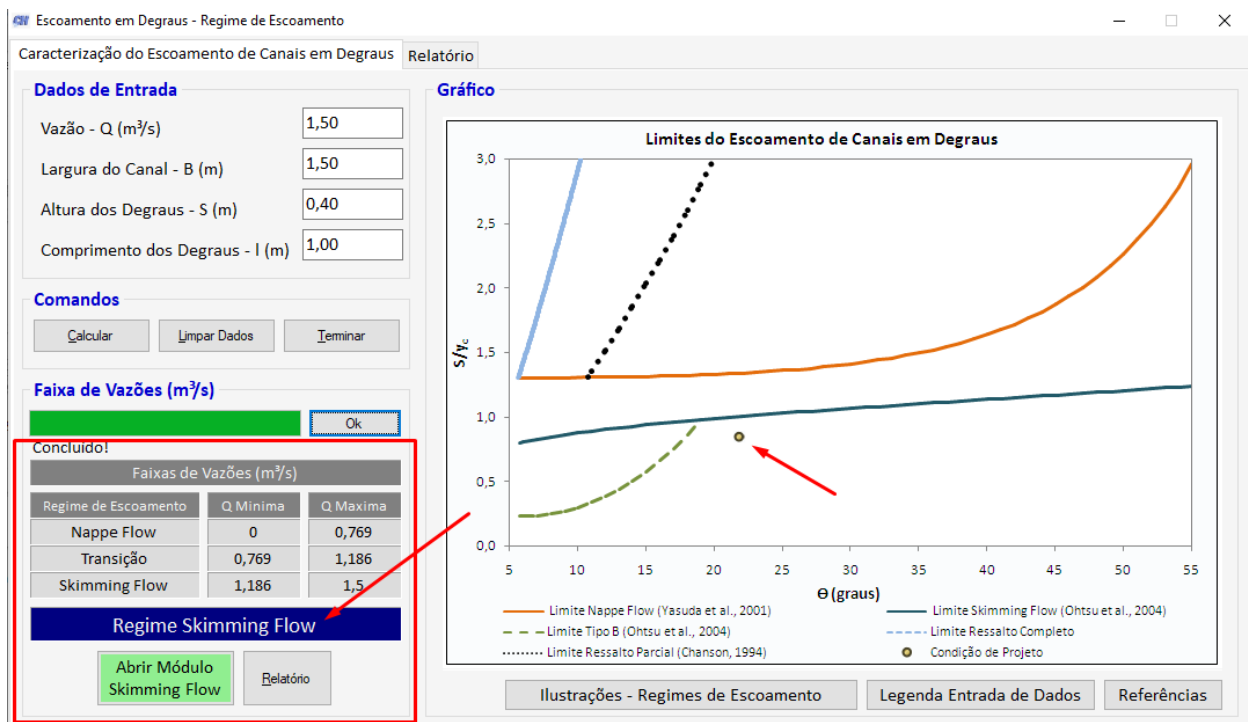
Figura 31 - Janela de classificação do regime de escoamento em degraus – Parte 2.



Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Então aparecerá uma circunferência preenchida de amarelo indicando a condição do projeto, como escrito na legenda. Além disso, os limites de vazão de cada uma das três classificações. Por fim, aparecerá um botão verde escrito “Abrir Módulo Skimming Flow” ou laranja com os dizeres “Abrir Módulo Nappe Flow”, caso o escoamento não tenha se enquadrado no regime de transição. (Figura 32). Neste estudo, trabalhou-se estritamente com o regime *Skimming Flow*.

Figura 32 - Janela de classificação do regime de escoamento em degraus.



Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Módulo *Skimming Flow*

Esta é a janela final de dimensionamento do escoamento em degraus. Ao abri-la, as quatro informações iniciais se repetem, mais um espaço é aberto para o usuário informar o desnível do trecho e, por fim, apertar em “Calcular” uma última vez (Figura 33).

Figura 33 - Módulo *Skimming Flow*.

Informação

A metodologia adotada para a formulação dos cálculos foi fundamentada em "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels", de Ohtsu, Yasuda e Takahashi, publicado no Journal of Hydraulic Engineering - ASCE em setembro de 2004; Páginas 860 - 869.

Dados necessários:

Vazão (m^3/s) 1,50

Largura do Canal (m) 1,50

Altura do Degrau (m) 0,40

Comprimento do Patamar do Degrau (m) 1,00

Desnível do Trecho (m) 10,00

Comandos

Calcular Cancelar

Ok

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Com isso, as abas Resultados, Visualização, Início do Escoamento, Risco de Cavitação e Relatório ficam disponíveis. Bem como a funcionalidade de exportar o relatório para o Excel, Figura 34 e Figura 35.

Figura 34 - Módulo *Skimming Flow* – Relatório.

Relatório:

SisCCoH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos
Estruturas Hidráulicas - Escoamentos em Degrau - Regime Skimming Flow

Dados de Entrada	
Vazão (m^3/s)	1,50
Largura do Canal (m)	1,50
Altura do Degrau (m)	0,40
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	1,00
Desnível do Trecho (m)	10,00

Resultados	
Parâmetros Hidráulicos	
Ângulo com a Horizontal (graus)	21,801
Vazão ($\text{m}^3/\text{s.m}$)	1
Profundidade Crítica (m)	0,467
Concentração Média de Ar	0,226

Comandos

Exportar para Excel Terminar

Aviso!

Deseja exportar o relatório para uma planilha do Excel?

Sim Não

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).

Figura 35 - Relatório exportado para o Excel.

Salvamento Automático Pasta1 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Desenhar Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Automatizar Desenvol

Colar Times New Roman 12 A⁺ A⁻ N I S Fonte Área de Transferência

Alinhamento Números

Quebrar Texto Automaticamente Mesclar e Centralizar

A1 SisCCoH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	SisCCoH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos										
2	Escoamento em Degraus - Regime Skimming Flow										
3											
4	Dados de Entrada										
5	Vazão (m³/s)						1,50				
6	Largura do Canal (m)						1,50				
7	Altura do Degrau (m)						0,40				
8	Comprimento do Patamar do Degrau (m)						1,00				
9	Desnível do Trecho (m)						10,00				
10											
11	Resultados										
12	Escoamento aproximadamente uniforme - Tipo A										
13	Ângulo com a Horizontal (graus)						21.801				
14	Vazão (m³/s.m)						1				
15	Profundidade Crítica (m)						0,467				
16	Concentração Média de Ar						0,336				
17	Coefficiente de Atrito						0,182				
18											
19	Dados para dimensionamento										
20	Profundidade Aerada do Escoamento (m)						0,277				
21	Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)						3.608				
22	Profundidade Final do Escoamento (m)						0,184				
23	Velocidade Final do Escoamento (m/s)						5,43				
24	Energia Residual (m)						1.674				
25	Altura de Referência da Parede (m)						0,388				
26											
27	Cálculo do Ponto de Início do Escoamento Aerado										
28	Altura da rugosidade do degrau - k (m)						0,371				
29	Posição do Início da Aeração - LA (m)						6.069				
30	Profundidade do Início da Aeração - Ya (m)						0,256				
31											
32	Risco de Cativação										
33	Velocidade no Início da Aeração - Va (m/s)						3.903				
34	Velocidade Crítica de Cavitação no Início da Aeração - Vcra (m/s)						17.771				

Planilha1

Fonte: SisCCoH (versão 1.1).