

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Múcio Eurico Correa Ribeiro

**Modelagem Física da Utilização de Soleiras entre Trechos Liso e em Degraus em uma
Descida de Água: Uma Análise Fotográfica**

Belo Horizonte
2023

Múcio Eurico Correa Ribeiro

Modelagem Física da Utilização de Soleiras entre Trechos Liso e em Degraus em uma Descida de Água: Uma Análise Fotográfica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Edna Maria de Faria Viana

Coorientador: Jorge Luiz Zegarra Tarqui

Belo Horizonte
2023

R484m

Ribeiro, Múcio Eurico Correa.

Modelagem física da utilização de soleiras entre trechos liso e em degraus em uma descida de água [recurso eletrônico] : uma análise fotográfica / Múcio Eurico Correa Ribeiro. – 2023.

1 recurso online (183 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Edna Maria de Faria Viana.

Coorientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 176-183.

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Teses. 3. Canais (Engenharia hidráulica) – Teses. 4. Modelagem física – Teses. 5. Água – Escoamento – Velocidade – Teses. I. Viana, Edna Maria de Faria. II. Tarqui, Jorge Luis Zegarra. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Modelagem Física da Utilização de Soleiras Entre Trechos Liso e Em Degraus Em Uma Descida de Água:
Uma Análise Fotográfica"

MÚCIO EURICO CORREA RIBEIRO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Edna Maria de Faria Viana

Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui - Coorientador

Prof. José Carlos Cesar Amorim

Prof. Maurício Dai Prá

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof^a. Edna Maria de Faria Viana

Coordenadora

Orientadora

Belo Horizonte, 22 de junho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos Cesar Amorim, Usuário Externo**, em 22/06/2023, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 23/06/2023, às 14:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Dai Prá, Usuário Externo**, em 23/06/2023, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Membro**, em 29/06/2023, às 10:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 29/01/2025, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2394270** e o código CRC **BBBC58BB**.

*Dedico este trabalho a todos aqueles que
não apenas olham, mas também gostam
de olhar e, assim, aprendem a ver.*

AGRADECIMENTOS

A você leitor, que tomou parte do seu tempo para ler estas palavras escritas sobre água e ar. Fiz este texto na intenção de compartilhar com você parte do que pude estudar nestes dois anos e meio de mestrado. Não o fiz apenas na intenção de obter o título de Mestre em Recursos Hídricos.

Ao meu pai, Jeremias, por todo esforço para me impulsionar até aqui, pelo exemplo de pessoa, simpatia e pelo seu otimismo. Você me fez acreditar que tudo daria certo no final.

Ao meu irmão, Miguel, sempre presente e disposto a tudo em prol de me ajudar. Você me fez perceber o quanto é bom ter um amigo que confiará em você até quando nem você confiaria em si mais.

À Deborah, por me estimular, fiscalizar e motivar nos momentos de desânimo e cansaço, e por me cobrar sempre. Obrigado por me mostrar que toda boa dupla é feita de equilíbrio, você é o meu.

À dupla Elza e Isaías, que me acolheu como família e me amparou nas outras tarefas da vida quando eu precisei. Esse trabalho também é fruto do tempo de vocês que me foi doado.

Ao colega Pedro, pelas conversas sobre este trabalho. Nunca senti falta de alguém para debater engenharia, física, matemática e estatística (que não é matemática) depois da graduação.

Ao colega Felipe Campera, por ter iniciado a jornada de experimentos nesse mesmo modelo há mais de dois anos e compartilhado de tão bom grado de parte do que trilhou em seus estudos.

A todos os colegas de profissão, em especial Marcus Cruz, que sempre confiou em mim e me mostrou que não há estímulo maior que ouvir de alguém “eu confio em você”, e Dr. Ricardo Junho, em quem eu vi que o estudo e o aprendizado são coisas nobres, nunca podem ser tirados de nós e nunca têm um ponto final.

A toda DF+ Engenharia, nas pessoas dos diretores André, Maíra e Othávio, que me propiciaram um ambiente de trabalho saudável o suficiente para conciliar a vida profissional com as vidas acadêmica e pessoal. Também a duas das maiores referências profissionais e pessoais que essa empresa me proporcionou conhecer, professor Mário e Felipe.

À equipe de Recursos Hídricos da DF+ Engenharia, por todas as perguntas e respostas e as perguntas sem respostas que nós nos fizemos nesses anos. Dúvidas nos transportam, certezas nos enraízam.

À minha banca avaliadora, Dr. Maurício Dai Prá e Dr. José Carlos Amorim. Dividi com vocês parte dos dois dos melhores dias da minha vida acadêmica até então: o 1º Simpósio FluHidros, onde os conheci, e o dia da avaliação deste trabalho, no qual as discussões sobre minha pesquisa mostraram-me que o que fiz valeu a pena, pois fiz vocês se debruçarem de verdade sobre a mensagem que quis trazer neste documento.

À fluidíssima trindade: Dr. Aloysio Saliba, Dra. Edna Viana e Dr. Jorge Tarqui pelas discussões sobre o assunto, pela confiança em meu trabalho, pelo acompanhamento e pela disponibilidade em ajudar. Pelo interesse no tema desde o início, por entenderem que há alunos escoam mais livres e por aceitarem se aventurar nesses caminhos em degraus e com obstáculos sem se preocupar em perder a energia de aprender algo novo.

Eternamente à minha mãe, Gilca, que riscou do meu vocabulário uma palavra que ela me ensinou a deixar de usar: ~~DESISTIR~~...

“Quando uma pessoa descobre a verdade sobre algo e a estabelece com grande esforço, então, ao examinar suas descobertas com mais cuidado, muitas vezes percebe que aquilo que se esforçou tanto para descobrir poderia ter sido percebido com muita facilidade. Pois a verdade tem a propriedade de não estar tão profundamente encoberta como muitos pensaram; na verdade, seus sinais brilham intensamente em vários lugares, e há muitos caminhos pelos quais chegar a ela.”

Galileo di Vincenzo Bonaiuti de Galilei

“A crença de que existe apenas uma verdade e de que você próprio está em posse dela é a raiz de todos os males do mundo.”

Max Born

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise experimental dos efeitos da mudança brusca de declividade em um canal em modelo físico reduzido. A mudança brusca de declividade em um canal, de menor para maior declividade, pode ocasionar o descolamento do fluxo, originando um jato que atinge o segundo trecho com potencial de ocasionar dano a estrutura.

Neste trabalho são conduzidos dois experimentos utilizando-se de um canal localizado no Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade federal de Minas Gerais (CPH-UFMG). O canal é composto por três trechos, sendo um primeiro trecho em degraus (26°), seguido de um trecho horizontal liso, terminando em um novo trecho em degraus (26°). O primeiro experimento testa de diferentes vazões e avalia o efeito da alta velocidade do escoamento no segundo trecho em degraus. Já o segundo experimento, também envolvendo várias vazões, explora os efeitos da utilização de uma soleira no trecho horizontal para diminuir a velocidade do escoamento e impedir o descolamento do escoamento no início do segundo trecho em degraus.

Para o entendimento dos fenômenos que envolvem a ocorrência do jato e o controle do escoamento por soleira, são apresentados os parâmetros da modelagem física. Todos os dados do escoamento são obtidos por meio de filmagem. É apresentada uma proposta de tratamento dos dados por meio de análises de visão computacional, em especial relacionadas à biblioteca OpenCV, em linguagem de programação Python.

Por meio dos códigos desenvolvidos, é possível extrair das filmagens os parâmetros necessários para análise qualitativa e quantitativa dos jatos de descolamento no primeiro experimento e do efeito da utilização de soleiras na transição entre trechos de diferentes declividades. A utilização da visão computacional para a obtenção dos parâmetros do escoamento esbarra em algumas limitações, como a não obtenção da carga piezométrica e da velocidade, mas se mostram de grande utilidade na verificação da operação dos modelos reduzidos.

Com base nas equações de movimento balístico, é possível prever a trajetória do jato com base na velocidade de entrada do jato. As metodologias aqui apresentadas mostram como é possível prever o ponto de impacto do jato e avaliar as suas consequências.

Com a utilização de soleiras, é possível impedir a ocorrência dos jatos. No entanto, a utilização das soleiras promove a ocorrência do ressalto hidráulico a montante. Os resultados indicam que, a partir de determinada vazão, a recirculação do ressalto se propaga até a região sobre a soleira, gerando um jato no escoamento.

Por fim, são discutidos os parâmetros de modelagem física relacionados ao controle do escoamento por outras soleiras e as relações experimentais necessárias para guiar os próximos estudos e dimensionamentos de soleiras em mudanças de direção vertical bruscas.

Palavras-chave: Modelagem Física. Escoamento em Degraus. Ressalto Controlado por Soleiras. Quedas Singulares. Visão Computacional.

ABSTRACT

This work presents an experimental analysis of the sudden slope changes effects in a chute using physical modeling. A sudden slope changes from lower to higher slope in a chute can cause the flow detaching from the surface, occurring a jet flow that reaches the floor above with potential to cause damage to the structure.

In this work, two experiments are made using an experimental acrylic flume located at the Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade federal de Minas Gerais (CPH-UFMG). The flume is made up of three stretches, the first stretch is a stepped chute (26°), followed by a smooth horizontal stretch, ending in a new stepped chute (26°). The first experiment uses different flow rates and evaluates the effect of high flow speed in the entrance of the second stepped chute. Also using various flow rates, the second experiment explores the effects of using an end sill in the horizontal section to reduce flow speed and prevent flow detachment at the second chute.

The physical modeling parameters to understand the occurrence of the jet and the control of flow through the sill are presented. All flow data is obtained by flow video recording. For data processing through computer vision analysis, a technique is proposed using OpenCV library, in Python coding language.

Using the codes developed, it is possible to extract from the footage the necessary parameters for qualitative and quantitative analysis of the detachment jets in the first experiment and the effect of sills in the second experiment. The use of computer vision to obtain the flow parameters faces some limitations, such as not obtaining the flow piezometric head and velocity, but they prove to be very useful in verifying the operation of physical models.

Based on the ballistic equations of motion, it is possible to predict the trajectory of the jet based on the incoming speed of the flow. The methodologies presented shows how it is possible to predict the point of impact of the jet and evaluate its consequences.

With the use of end sills, it is possible to prevent the occurrence of jets. However, the use of sills promotes the occurrence of hydraulic jump on the horizontal stretch. The results indicate that for higher flow rates the recirculation of the hydraulic jump ends just above the end sill, generating a new flowing jet.

Finally, the physical modeling parameters related to the control of flow by using other sills and the experimental relationships are discussed, looking forward to guide future studies and sills design in sudden slope changes.

Keywords: Physical modelling. Stepped Chute Flow. Hydraulic Jump Controlled by Sill. Straight Drop. Computer Vision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– a) Localização do extravasor da Barragem Gold Creek, em Brisbane, Austrália; b) Extravasor em operação em 02/05/2015, evento de 162 mm.....	28
Figura 2 – Descida em degraus da barragem de contenção de cheias Hinze, em Gold Coast, Austrália.	29
Figura 3 - Descida em degraus em canal periférico de uma pilha de rejeitos em construção.....	30
Figura 4 - Drenagem lateral de barragem de mineração: descida de água em três trechos.	30
Figura 5 – Transições de declividades em uma descida de água em modelo reduzido.	31
Figura 6 – Modelo estudado e variáveis envolvidas na ocorrência do jato entre trecho liso e em degraus.	32
Figura 7 – Modelo estudado e variáveis envolvidas no controle por soleira entre trecho liso e em degraus.	32
Figura 8 – Conceito de carga hidráulica e perda de carga entre duas seções.....	36
Figura 9 – Esquema comparativo da perda de energia em canais com e sem degraus.	38
Figura 10 - Comparação entre a evolução da linha de energia em a) calha lisa, b) em degraus e do tamanho da bacia necessária em cada situação para atender à mesma condição no ponto B.....	39
Figura 11 – Dois principais regimes de escoamento em degraus.	39
Figura 12 - Limites dos regimes de escoamento em degraus propostos por Chanson <i>et al.</i> (2015).	40
Figura 13 – <i>Nappe Flow</i> : Extravasor da Barragem Opuha, no rio Opuha em Canterbury – Nova Zelândia.	42
Figura 14 – Detalhe do escoamento de água com arrasto de ar em degraus em laboratório (fotografias inclinadas) – <i>Skimming Flow</i>	42
Figura 15 – <i>Skimming Flow</i> : Vertedouro da Barragem da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, rio Jacuí, Rio Grande do Sul, Brasil.	42
Figura 16 <i>Nappe Flow</i> na barragem Chichester, no rio Chichester, Austrália.	42

Figura 17 - Ilustração da região aerada de um escoamento em canal aberto e as diferentes formas de ar na mistura ar-água observadas. A esquerda, um perfil típico da concentração de ar ao longo da profundidade do escoamento.....	43
Figura 18 – Representação esquemática do escoamento com base nas quantidades de água e ar, além do perfil de concentrações e velocidades de ar.....	43
Figura 19 – a) Características do fluxo em regime <i>Nappe Flow</i> ; b) Extravaseiro da Barragem Lahontan operando em <i>Nappe Flow</i> , Rio Carson, Nevada – EUA.	45
Figura 20 – a) Esquema representativo do salto no degrau; b) variação da profundidade aerada y_{90} ao longo do degrau; c) concentração de ar ao longo do degrau.	46
Figura 21 – Tipos de escoamento no regime <i>Transition Flow</i>	47
Figura 22 – Velocidades e concentração de ar ao longo de uma descida em degraus de 22° de inclinação no regime <i>Transition Flow</i> para várias vazões (yc/h).....	49
Figura 23 – a) Características do escoamento em <i>Skimming Flow</i> ; b) imagem do escoamento em modelo reduzido.	50
Figura 24 – Variáveis envolvidas na análise das características do regime <i>Skimming Flow</i>	51
Figura 25 – Relação entre a profundidade de equilíbrio, profundidade crítica e tamanho do degrau. Cada dupla de linha e pontos representa uma declividade testada.	51
Figura 26 – Variação da concentração média com a relação entre o tamanho do degrau e a profundidade crítica. Cada dupla de linha e pontos representa uma declividade testada.....	52
Figura 27 – Variáveis de cálculo da dissipação de energia para os principais regimes de escoamentos em degraus.	53
Figura 28 – Variações e distribuição do valor de f com o tamanho relativo da cavidade $h \cos(\theta) Dh$	56
Figura 29 – Fator de atrito em função de variáveis relacionadas ao escoamento: a) relações de Boes e Hager (2003) com as variáveis θ , Dh e k (altura da rugosidade, $h/\tan(\theta)$); b) relações encontradas por Ohtsu <i>et al.</i> (2004) com as variáveis h/yc para vários de ângulos θ (cada linha).	57
Figura 30 – a) Barragem Paradise, rio Burnett, Queensland, Austrália; b) Barragem Les Olivettes, rio Peyne, Olivettes, França; c) Barragem Hinze, rio Nerang, Queensland, Austrália.	60

Figura 31 – a) Barragem Upper Stillwater, “córrego” Rock Creek, Utah, EUA; b) Barragem Siah-Bishe, rio Chalus, Mazandaran, Irã.	60
Figura 32 – Modelo e protótipo do canal de drenagem superficial em Smithfield, Hong Kong.	61
Figura 33 – Detalhe da operação da mudança de direção na estrutura.	61
Figura 34 – Dissipador de energia por salto de Ski: a) esquema representativo; b) exemplo da Barragem Wivenhoe, rio Brisbane, Queensland, Austrália.	62
Figura 35 – Aeradores de canais extravasores: a) representação esquemática da atuação do aerador; aerador em modelo reduzido b) com declividade de entrada e c) sem declividade de entrada.	62
Figura 36 – Exemplos de jatos como estruturas extravasores de queda livre: a) Barragem Morrow Point, rio Colorado, Cimarron, EUA; b) Barragem Irapé, rio Jequitinhonha, Grão Mogol, Brasil; c) Barragem Stausee Gibidum, rio Massa, Naters, Suíça.	63
Figura 37 – Variáveis envolvidas no cálculo da trajetória do descolamento do jato.	64
Figura 38 – a) condição de projeto para o salto de ski; b) condição de vazão baixa, com profundidade de jusante provocando um ressalto hidráulico.	65
Figura 39 – Canal extravasor com bacia de dissipação por ressalto hidráulico da Barragem Limestone no Long Spruce Generating System, rio Nelson - Canadá.	66
Figura 40 – Ressalto hidráulico a jusante da San Antony Falls no rio Mississipi, Minneapolis – Minnessota (EUA).	67
Figura 41 – Ressalto hidráulico e suas variáveis em modelo reduzido na Universidade de Brisbane, Queensland, Austrália.	67
Figura 42 – Ressalto hidráulico em laboratório e em modelo numérico.	67
Figura 43 – Variáveis envolvidas na ocorrência do ressalto hidráulico.	68
Figura 44 – Correlação entre a Equação de Bélanger (23) e testes experimentais com várias vazões em 6 diferentes canais, apresentado por Peterka (1978), para ressaltos “naturais”.	69
Figura 45 – Perfis adimensionais da evolução do ressalto hidráulico em função da variável $hj = (y_2 * -y_1)$ e do Fr_1	71
Figura 46 – Condições de jusante e suas consequências para o posicionamento do ressalto hidráulico a jusante de um canal rápido.	72
Figura 47 – Variações das bacias de dissipação recomendadas em função do número de Froude da entrada.	73

Figura 48 – Comparação dos comprimentos do ressalto para diferentes tipos de bacia de dissipação em função do número de Froude do início do ressalto.....	74
Figura 49 – Comparação entre as variáveis envolvidas no ressalto para: a) ressalto natural e b) ressalto controlado por uma soleira. O obstáculo diminui tanto o comprimento quanto a profundidade conjugada a jusante necessária para o equilíbrio do ressalto.	74
Figura 50 – Tipos de obstáculo de controle de ressalto: a) degrau positivo, b) soleira e c) degrau negativo.....	75
Figura 51 – Variáveis que envolvem o ressalto com a presença de uma soleira terminal.....	75
Figura 52 – Tipos de ressalto em função da condição de jusante (todos apresentam a mesma condição de montante): a) Tipo A; b) Tipo B; c) Tipo B-mínimo; d) Tipo C; e) Ondulação do escoamento acima da soleira.	77
Figura 53 – Ilustração esquemática do extravasor <i>Ski-Jump-Stepped</i> (QIAN <i>et al</i> , 2016).	78
Figura 54 – Ocorrência de descolamento do escoamento após o trecho em bacia de dissipação de um modelo de canal extravasor <i>Ski-Jump-Stepped</i>	79
Figura 55 – Correlação entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds em uma esfera.	82
Figura 56 – Ábaco de Moody adaptado para aplicação em canais abertos.	83
Figura 57 – Exemplos de ponteiros de detecção de fase: a) e b) medidores de fase resistivos, c) e d) medidores de fase de fibra ótica.	85
Figura 58 – Exemplo de variação de sinal detectado pela ponteira resistiva ao longo do tempo, com uma queda na tensão medida pela ponteira quando entra em contato com uma bolha de ar.....	85
Figura 59 – Variações da medição da concentração de ar para uma descida com declividade 2H:1V para um escoamento com razão $y_{ch}=1,33$ (<i>Skimming Flow</i>). Destaca-se as elevações ao longo do degrau em que se tem C=90% de ar.	86
Figura 60 – Variações dos perfis de concentração de ar e linhas de iso-concentração de ar em uma queda singular.....	86
Figura 61 – Obtenção da velocidade em um ponto: a) detecção de bolhas no escoamento na elevação y, b) definição do Δt entre os sinais pela correlação variações de fase em c_1 e c_2 ; c) definição da velocidade no ponto y.	88

Figura 62 – Perfil de velocidades adimensionais ao longo de uma cavidade no regime <i>Skimming Flow</i> .	88
Figura 63 – Perfil de velocidades em jatos em queda livre.	89
Figura 64 – Perfil de velocidades adimensionais em um ressalto hidráulico.	89
Figura 65 – Medidores de detecção de fase em operação em escoamentos aerados.	89
Figura 66 – Exemplo de medição da superfície de água com sensor ultrassônico.	90
Figura 67 – Exemplo de: a) Medições de nível de água realizadas em um único ponto ao longo do tempo, b) compilação das medições não tratadas ao longo de todos os 40 pontos no escoamento.	91
Figura 68 – Exemplos de fotografias de aparatos experimentais: a) Ondas de choque cruzadas em contração de canal; b) e c) teste em modelo reduzido de extravasor em degraus de paredes convergentes, modelo do protótipo da Barragem Nakasujigawa, Japão; d) e e) ressalto hidráulico em laboratório.	92
Figura 69 – Obtenção da concentração de ar em ressalto hidráulico por meio de filmagens.	92
Figura 70 - Quadros a esquerda: a) imagem obtida para análise, b) tratamento dado para determinação do contraste entre o fundo e o escoamento, c) determinação dos limites do escoamento, d) normalização em relação ao degrau. Quadros a direita: linha cinza = relação entre a lâmina de água medida y e o y_{90} ; região azul = y/y_c ; linhas vermelhas (de cima pra baixo) = y_{99}/y_c , y_{90}/y_c , y_{75}/y_c .	93
Figura 71 – Sequências do processamento das imagens- a) Imagem retirada do vídeo; b) Obtenção da intensidade média de cada pixel; c) Imagem binária; d) obtenção dos pixels de intensidade mínima; e) obtenção dos pixels de intensidade máxima; f) Obtenção dos contornos dos objetos; g) Exclusão de objetos com menos de 80 pixels nos componentes; h) imagem da borda sobreposta à imagem inicial; i) superfície média encontrada em comparação com outros autores; j) vários perfis médios ao longo do tempo simulado.	94
Figura 72 – Ilustração do método <i>Optical Flow</i> utilizando dois pixels e dois <i>frames</i> com exemplo: Esq. Identificação do brilho em cada pixel (apresentados apenas dois elementos como exemplo); Dir. identificação da posição mesmo elemento no <i>frame</i> seguinte.	95
Figura 73 – Campo de velocidades adimensionais obtido por meio do <i>Optical Flow</i> .	96

Figura 74 – Exemplo de um frame obtido de filmagem (esq.) e campos de velocidade obtidos para análise de múltiplos frames (dir.). Velocidades em mm/s.	96
Figura 75 – Medidas de velocidade na superfície da água por meio de flutuador para uma vazão e a correlação entre velocidades finais medidas para várias vazões.	97
Figura 76 – Processamento de imagem para detecção de fração de vazios: Passos de exclusão de imagens captadas em segundo plano.	97
Figura 77 – Método de captação da superfície livre por meio da composição de uma câmera rápida e um sensor LIDAR.	99
Figura 78 – Superfície construída com base nas detecções de superfície feitas com medição conjunta de câmeras rápidas e LIDAR.	99
Figura 79 – a) Modelo físico de canal extravasor liso seguido de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico; b) superfície livre instantânea obtida por meio de LIDAR.	100
Figura 80 – a) Soleira de controle de escoamento no córrego Manly, Sidney, Austrália, e seções de controle para aplicação do LIDAR; b) superfícies livre da água e do fundo do córrego obtidas com a aplicação do LIDAR na região da soleira.	100
Figura 81 – Medidas do canal utilizado nos experimentos.	102
Figura 82 – Elementos externos da estrutura em estudo no aparato experimental	103
Figura 83 – Classificação dos regimes de escoamento para as vazões nos experimentos feitas.	105
Figura 84 – Posição de um dos tripés utilizados para aquisição dos dados.	106
Figura 85 – Regiões de captura utilizadas para a aquisição de dados por fotografia e vídeo.	108
Figura 86 – Exemplo de captação de lâmina de água indesejada devido ao posicionamento da câmera.	109
Figura 87 – Exemplo de imagem capturada para análise da ocorrência do ressalto na região de captura a partir do Região IV. As setas azuis destacam pontos da descida que deveriam concordar com a malha de 10cmX10cm.	109
Figura 88 – Aplicação do algoritmo proposto por Canny (1981) na detecção de bordas.	110
Figura 89 – Passos da obtenção da lâmina de água: 1) frame normal; 2) filtro preto e branco; 3) filtro borrado; 4) resultado da aplicação do algoritmo de Canny (1981); 5) bordas projetadas na imagem original.	111
Figura 90 – Exemplo de Espectro de Linhas de Água obtido em um vídeo.	112

Figura 91 – Exemplo de distribuição das intensidades de pixel obtidas pela detecção de bordas.	112
Figura 92 – Detecção da lâmina ao final do primeiro trecho em degraus: Qual a correlação entre as profundidades detectadas por vídeo e a profundidade aerada teórica y_{90} ?	115
Figura 93 – Desenvolvimento do escoamento ao longo do Experimento 1: Qual a condição de entrada do jato? Qual a sua trajetória?	115
Figura 94 – Sequência de análise do impacto do jato em canais com mudanças de direção.	116
Figura 95 – Desenvolvimento do escoamento ao longo do Experimento 2.....	117
Figura 96 – Sequência de análise da ocorrência de ressaltos a montante de soleiras em descidas com mudança de direção.	118
Figura 97 – Comportamentos esperados para o ressalto hidráulico de acordo com a condição imposta pela soleira.	119
Figura 98 – Comprimentos relativos do ressalto e da recirculação em função do número de Froude da condição inicial do ressalto: Onde se localizarão as condições testadas no experimento 2?	120
Figura 99 – Variações das fotografias (em mesma posição e em momentos distintos) em função do tempo de fechamento do obturador da câmera para três diferentes regiões.	124
Figura 100 – Reprodução da Figura 85: Regiões de captura utilizadas para a aquisição de dados por fotografia e vídeo.....	125
Figura 101 – Experimento 1 – Condições de chegada no final do primeiro trecho em degraus. Fotos obtidas com a câmera na Região I, tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/1000 s.	126
Figura 102.1 – Experimento 1 – Valores de y_c/h testados na descida na Região II. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.	128
Figura 103.1 – Experimento 2 – Valores de y_c/h testados na descida na Região II. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.	131
Figura 104 – Experimento 1 - Valores de y_c/h testados na descida no Ponto III. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.	134
Figura 105 – Esquema da aeração de jatos em queda e dois exemplos das análises de jatos nos experimentos.....	135

Figura 106 – Experimento 2 - Valores de y_c/h testados na descida na Região III. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.	136
Figura 107 – Experimento 2: Valores de y_c/h testados na Região IV. Fotografias feitas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.	137
Figura 108 – Comparação entre as condições com e sem soleira testadas para as vazões mais altas testadas.	139
Figura 109 – Sistema cartesiano utilizado para a apresentação dos resultados.	140
Figura 110.1 – Variações de lâminas obtidas para as vazões testadas sem soleira. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.	141
Figura 111.1 – Variações de lâminas obtidas para as vazões testadas com soleira. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.	144
Figura 112 – Detecções de borda na região do final do primeiro trecho em degraus. Vídeo com resolução de 1080x1920px, 120fps.	146
Figura 113 – Comparação entre as condições do espectro da lâmina em $x=0\text{cm}$ e os valores teóricos para y_{90} e y_{90}/y_c	147
Figura 114 – Representação da possível relação entre y_{90} e as superfícies detectadas pela técnica de vídeo.	148
Figura 115 – Velocidades no ponto $x=0\text{cm}$, obtidas com base na concentração de ar estimada, comparadas com a literatura e dados experimentais.	149
Figura 116 – Perfil de velocidades em um jato.	151
Figura 117 – Exemplo de obtenção das trajetórias dos jatos para uma vazão simulada. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.	151
Figura 118 – Coordenadas adimensionais dos jatos obtidas para maior concentração de detecção de lâminas para o jato superior e inferior.	152
Figura 119 – Velocidades obtidas das trajetórias dos jatos e velocidades estimadas para o final do primeiro trecho em degraus.	153
Figura 120 – Relação entre as vazões testadas e as profundidades medidas na iminência do jato.	154
Figura 121 – Relação entre a lâmina medida acima da soleira e a profundidade crítica.	156
Figura 122 – Observações na região da soleira - $y_c/s=0,624$: Ressalto afogado; $y_c/s=0,861$: Aeração até próxima da soleira; $y_c/s=1,114$: Escoamento totalmente aerado, recirculação até próxima da soleira e início do descolamento a jusante da	

soleira; $y_c/s=1,544$: Escoamento totalmente aerado, recirculação até próxima da soleira, descolamento total a jusante da soleira.	157
Figura 123 – Relação entre a condição imposta pela soleira e a profundidade y^*_2 conjugada de um ressalto natural.	157
Figura 124 – Detecções de lâmina em uma região do ressalto hidráulico com base nas filmagens feitas no Ponto IV.	159
Figura 125 – Perfis médios (maior concentração) do ressalto hidráulico em função das vazões testadas (y_c/s): (verde – ressaltos afogados), (marrons – ressaltos completos), (azuis – ressalto com jato acima da soleira).	159
Figura 126 – Posição do início e final do ressalto com base nas elevações máximas e mínimas das lâminas detectadas.	160
Figura 127 – Relações entre comprimentos propostos por diversos autores para o ressalto hidráulico natural (azul) e para recirculação (vermelho), além dos comprimentos de ressaltos em bacias de dissipação com blocos Tipo II e Tipo III (Peterka, 1974), e os dados experimentais deste trabalho. Destaque para os valores da razão y_c/s para os dados do Experimento 2.	161
Figura 128 – Relação entre a razão altura da soleira s e a profundidade do escoamento no início do ressalto <i>versus</i> o número de Froude. Destaque para os valores de y_c/s e a classificação visual das ocorrências do ressalto.	162
Figura 129 – Evolução do perfil detectado da recirculação com base nas profundidades definidas. Em verde: ressalto afogado; em marrom: ressalto completo; em azul: jato acima da soleira.	163
Figura 130 – Resumo das observações e análises feitas para o Experimento 2: a) Ressalto afogado pelo nível de jusante; b) recirculação do ressalto (rolo) se desenvolvendo completamente; c) recirculação (rolo) ocorrendo incompleta, limitada à soleira, gerando um jato a jusante da soleira.	164
Figura 131 – Exemplo de concordância em curva horizontal.	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações para determinação do comprimento total do ressalto (L_j^*).	70
Tabela 2 – Formulações para a determinação do comprimento de recirculação do ressalto (L_r^*).	70
Tabela 3 – Classificação dos experimentos realizados.	104
Tabela 4 – Configurações de câmera traseira do aparelho utilizado.....	106
Tabela 5 – Variáveis da análise do primeiro trecho em degraus.....	114
Tabela 6 – Variáveis experimentais e teóricas analisadas no modelo.	120
Tabela 7 – Sequência de apresentação da classificação visual.....	125
Tabela 8 – Condições estimadas na posição de início do ressalto e estimativa da condição conjugada a jusante necessária para o ressalto natural.	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$B = B$ = Largura do canal;

$C = C$ = Coeficiente de atrito da equação de Chèzy;

$C_{AR} = C_{média} = C_{MÉDIA}$ = Concentração média de ar no escoamento;

$D_h = D_h$ = Diâmetro hidráulico do escoamento (4 vezes o raio hidráulico);

$f = f$ = Fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach;

fps = frames por segundo, quantidade de imagens obtidas por segundo de filmagem;

$Fr = Fr$ = Número do Froude do escoamento;

$g = g$ = Aceleração da gravidade (9,81m/s²);

$h = h$ = Altura dos degraus;

$H = H$ = Carga total do escoamento (energia do escoamento, em metros);

$H_1 = H_1$ = Altura do primeiro trecho em degraus;

$H_2 = H_2$ = Altura do segundo trecho em degraus;

$H_e = H_e$ = Altura necessária para o escoamento se tornar uniforme;

$H_{res,n.u.} = H_{res,n.u.}$ = Energia residual do escoamento não uniforme;

$H_{res} = H_{res}$ = Energia residual do escoamento;

$L_j^* = L_j^*$ = Comprimento do ressalto;

$L_r^* = L_r^*$ = Comprimento da recirculação do ressalto;

$L = L$ = Comprimento do trecho horizontal entre os trechos;

$l = l$ = Comprimento dos degraus;

$L_b = L_b$ = Comprimento recomendado da bacia de dissipação;

$L_s = L_s$ = Distância da soleira até a origem;

$n = n$ = Coeficiente de atrito da equação de Manning;

$NA = NA$ = Escoamento em regime *Nappe Flow*;

$R = R$ = Raio hidráulico do escoamento;

$Re = Re$ = Número de Reynolds do escoamento;

$S = S$ = Declividade da linha de energia;

$s = s$ = Altura da soleira testada;

$SK = SK$ = Escoamento em regime *Skimming Flow*;

$TR = TR$ = Escoamento em regime *Transition Flow* (regime de transição);

$v = v$ = Velocidade do escoamento;

$v_{0,inf} = v_{0,inf}$ = Velocidade na parte inferior no início do jato;

$v_{0,sup} = v_{0,sup}$ = Velocidade na parte superior no início do jato;

$v_0 = v_0$ = Velocidade média na entrada do jato;

$v_c = v_c$ = Velocidade crítica do escoamento (número de Froude igual a 1);

$v'_B = v'_B$ = Velocidade a jusante de uma estrutura lisa;

$v''_B = v''_B$ = Velocidade a jusante de uma estrutura em degraus;

$v_{final} = v_{final}$ = Velocidade do escoamento no final do primeiro trecho em degraus;

$x = x$ = Coordenada ao longo do eixo horizontal, medido a partir do final do último degrau do primeiro trecho em degraus;

$y^*_2 = y^*_2$ = Profundidade a jusante do ressalto hidráulico “natural” (sem obstáculos);

$y = y$ = Coordenada ao longo do eixo vertical, medido a partir do final do último degrau do primeiro trecho em degraus;

$y_0 = y_0$ = Profundidade do escoamento aerado no final dos degraus;

$y_1 = y_1$ = Profundidade do escoamento aerado no início do ressalto;

$y_2 = y_2$ = Profundidade do escoamento aerado no final do ressalto;

$y_{90} = y_{90}$ = Profundidade do escoamento em que há 90% de ar escoando;

$y_b = y_b$ = Profundidade do escoamento aerado no início do jato livre;

$y_c = y_c$ = Profundidade crítica do escoamento;

$y_s = y_s$ = Profundidade do escoamento aerado acima da soleira;

$y_w = y_w$ = Profundidade equivalente do escoamento sem o ar incorporado;

$y_x = y_x$ = Profundidade do escoamento aerado medida na posição x (x);

$y_{final} = y_{final}$ = Profundidade do escoamento aerado ao final do primeiro trecho em degraus;

$y'_A = y'_A$ = Profundidade do escoamento a montante de uma descida;

$y'_B = y'_B$ = Profundidade do escoamento a jusante de uma descida lisa;

$y''_B = y''_B$ = Profundidade do escoamento a jusante de uma descida em degraus;

$\alpha = \alpha$ = Fator de correção da energia cinética devido a perfil não uniforme de velocidades;

$\theta = \theta$ = Ângulo da descida;

$\theta_0 = \theta_0 =$ Ângulo do canal a montante do jato;

$\mu = \mu =$ viscosidade da água;

$\pi = \pi =$ Fatores adimensionais de modelagem física;

$\rho = \rho =$ Massa específica da água;

$\Delta H' = \Delta H' =$ Perda de energia em uma descida lisa (m); e

$\Delta H'' = \Delta H'' =$ Perda de energia em uma descida em degraus.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
2	OBJETIVOS	33
2.1	Objetivo Geral	33
2.2	Objetivos Específicos	33
3	REVISÃO DA LITERATURA	34
3.1	Energia do Escoamento e os Canais Abertos	35
3.1.1	Energia do Escoamento	35
3.1.2	Escoamento Uniforme	37
3.1.3	Energia nos Canais em Degraus	38
3.2	Escoamento em Degraus	39
3.2.1	Limites dos Regimes	40
3.2.2	Características do Escoamento	41
3.2.2.1	Aeração	41
3.2.2.2	<i>Nappe Flow</i>	44
3.2.2.3	<i>Transition Flow</i>	47
3.2.2.4	<i>Skimming Flow</i>	49
3.2.3	Dissipação de Energia e Escoamento Uniforme	53
3.2.3.1	<i>Nappe Flow</i>	54
3.2.3.2	<i>Skimming Flow</i>	55
3.2.4	Mudanças de Declividade em Canais em Degraus	59
3.3	Jatos de Escoamento em Quedas	62
3.4	Ressalto Hidráulico	66
3.4.1	Características do Ressalto	67
3.4.2	Condições de Jusante de Controle do Ressalto	72
3.4.3	Ressaltos Controlados por Obstáculos	73
3.5	Extravasoires do tipo <i>Ski-Jump-Stepped</i>	77
3.6	Modelagem Física e a Medição do Escoamento	80
3.6.1	Análise Dimensional	80
3.6.2	Métodos de Medição Intrusiva	83
3.6.2.1	Medição da Concentração de Ar	85
3.6.2.2	Medição de Velocidade	87
3.6.3	Métodos de Medição não Intrusiva	90

3.6.3.1	Medição por Ultrassom	90
3.6.3.2	Medidas Fotográficas	91
3.6.3.3	Medidas com LIDAR.....	98
4	METODOLOGIA	101
4.1	Aparato Experimental.....	102
4.2	Experimentos Realizadas	103
4.3	Obtenção dos Dados	105
4.4	Tratamento dos Dados.....	109
4.4.1	Análise das Imagens	110
4.4.2	Espectro de Linhas de Água	111
4.4.3	CPH-ViFA.....	113
4.5	Análise das Variáveis e Modelagem Física.....	113
4.5.1	Condição ao Final do Primeiro Trecho em Degraus.....	113
4.5.2	Experimento 1 – Análise Sem Soleira	115
4.5.3	Experimento 2 – Análise Com Soleira.....	117
4.5.4	Resumo das Variáveis de Interesse	120
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	123
5.1	Parte I - Classificação Visual	123
5.1.1	Região I – A condição de entrada no trecho horizontal	126
5.1.2	Região II – Segundo trecho em degraus sem e com soleira atuando a montante	127
5.1.3	Região III – Detalhes da condição de entrada no segundo trecho em degraus	133
5.1.4	Região IV – O efeito da utilização da soleira no trecho horizontal	137
5.1.5	Comentários Gerais da Utilização das Soleiras	138
5.2	Parte II - Distribuição dos Níveis de Água nos Experimentos.....	139
5.2.1	Experimento 1	140
5.2.2	Experimento 2	144
5.3	Parte III – Análises das Correlações da Modelagem Física.....	146
5.3.1	Análise da Condição Final do Primeiro Trecho	146
5.3.2	Experimento 1 – Análise Sem Soleira	149
5.3.2.1	Relação Entre as Velocidades, Vazões e as Trajetórias dos Jatos	150
5.3.2.2	Relação Entre as Velocidades Estimadas pelas Trajetórias e as Velocidades no Pé da Descida.....	152
5.3.2.3	Definição da Profundidade de Saída do Jato.....	154

5.3.3	Experimento 2 – Análise Com Soleira	155
5.3.3.1	Condição de Jusante	155
5.3.3.2	Desenvolvimento do Ressalto	158
5.3.3.3	Comprimento e o Tipo de Soleira	161
5.3.3.4	Perfil da Recirculação	163
5.3.3.5	Considerações Finais das Análises do Experimento 2	163
6	CONCLUSÕES	165
6.1	Dimensionamento de Soleiras em Trechos de Mudança de Declividade	166
6.1.1	Determinação da Condição de Chegada no Início do Trecho Liso	166
6.1.2	Verificação do Jato	167
6.1.3	Dimensionamento e Posicionamento da Soleira	168
6.1.4	Alternativa à Utilização de Soleiras	169
6.2	Aquisição de Dados	170
7	RECOMENDAÇÕES	173
7.1	Medição do Escoamento	173
7.2	Experimentos	173
8	REFERÊNCIAS	175

1 INTRODUÇÃO

Descidas em degraus são estruturas utilizadas há milhares de anos como formas de conduzir o fluxo de canais através de taludes com grandes declividades. O vertedouro em degraus mais antigo que se tem notificado está localizado na Grécia e data de 1300 A.C. No entanto, segundo Chanson (1996), essas primeiras utilizações de degraus se deram como forma de estabilização dos taludes e não como formas de dissipação da energia do escoamento.

A Barragem Gold Creek, localizada em Brisbane, Austrália, é relatada como a primeira utilização de um canal projetado com degraus para dissipação de energia (CHANSON e WHITMORE, 1998). A estrutura consiste em um vertedouro em soleira livre de 55 m de largura, com degraus de 1,50 m de altura e 4,00 m de comprimento, projetado pelo engenheiro John B. Henderson e construída em 1895. A Figura 1 apresenta a estrutura e seu extravasor.

Figura 1– a) Localização do extravasor da Barragem Gold Creek, em Brisbane, Austrália; b) Extravasor em operação em 02/05/2015, evento de 162 mm.



Fonte: a) Adaptado de (Google Earth Pro, 2018) Gold Creek Dam. Coordenadas 27,46°S e 152,88° L; b) Acervo digital prof. Dr. Hubert Chanson, acesso em 22/05/2023.

Os degraus interferem na dissipação de energia, diminuindo as velocidades do escoamento nas estruturas. Portanto, o uso dos degraus se deu devido às grandes velocidades que podem ser atingidas pelo escoamento em determinadas inclinações, causando danos ao material utilizado na estrutura.

Após a adoção do concreto compactado a rolo (CCR) como material de construção, o número de estruturas em degraus como vertedouros vem aumentando nas últimas cinco décadas (BOES e HAGER, 2003). Na Figura 2 é apresentado um exemplo de vertedouro em degraus construído em CCR.

Figura 2 – Descida em degraus da barragem de contenção de cheias Hinze, em Gold Coast, Austrália.



Fonte: Acervo digital prof. Dr. Hubert Chanson, acesso em 30/01/2022.

A utilização dos degraus, no entanto, não se restringe às calhas de vertedouros de barragens. Grande parte dos projetos que envolvem a drenagem de taludes faz a utilização de degraus em canais para o aumento da dissipação de energia do escoamento proveniente das estruturas à montante até as estruturas à jusante. São exemplos de utilização de escadas as estruturas de drenagens de mineração, como pilhas de rejeito ou estéril, além de barragens, apresentadas na Figura 3 e na Figura 4.

Figura 3 - Descida em degraus em canal periférico de uma pilha de rejeitos em construção.



Fonte: Autor, em 24/10/2019.

Figura 4 - Drenagem lateral de barragem de mineração: descida de água em três trechos.



Fonte: Autor, em 14/11/2021.

O escoamento sobre canais em degraus apresenta certa complexidade, com grande turbulência e arrasto de ar incrementados pelos degraus. Relações obtidas de métodos experimentais são as que mais se aplicam na determinação dos parâmetros do escoamento em descidas em degraus, embasando o dimensionamento das mais diversas estruturas de drenagem em degraus (HAGER *et al* 2020; CHANSON, 2015; CHANSON, 2002).

Contudo, os modelos já desenvolvidos para o cálculo desses parâmetros são definidos para determinadas faixas de vazão, geometrias e condições de entrada do fluxo nos degraus estabelecidas. Em geral, as condições dos modelos reduzidos e

protótipos estudados são de reservatórios a montante da descida em degraus (CHANSON, H., 2006).

Nota-se, na Figura 3 na Figura 4, que as descidas possuem trechos lisos entre trechos em degraus com mudanças bruscas de declividade, acompanhando a topografia local. Nesses casos, a condição de entrada do fluxo no segundo trecho em degraus não se dá de maneira controlada, como os modelos reduzidos encontrados na literatura. Um fenômeno já observado em protótipos e modelos reduzidos na transição de declividades é o descolamento do fluxo dos degraus, com alto potencial de dano a jusante, como apresentado na Figura 5.

O modelo da Figura 5 foi construído em escala de 1:20 baseando-se em um protótipo no qual foram observados danos na parte do canal atingida pelo jato descolado. São necessários, portanto, o estudo em modelos reduzidos e modelos numéricos desse tipo de estrutura, de forma que se possa entender as variáveis envolvidas e, caso necessário, propor mudanças no dimensionamento e análise de tais estruturas.

Figura 5 – Transições de declividades em uma descida de água em modelo reduzido.



O presente trabalho traz uma análise da transição entre trechos em degraus em um modelo físico reduzido, com o qual é analisada e proposta a adoção de soleiras entre trechos, como apresentado na Figura 6 e na Figura 7.

Figura 6 – Modelo estudado e variáveis envolvidas na ocorrência do jato entre trecho liso e em degraus.

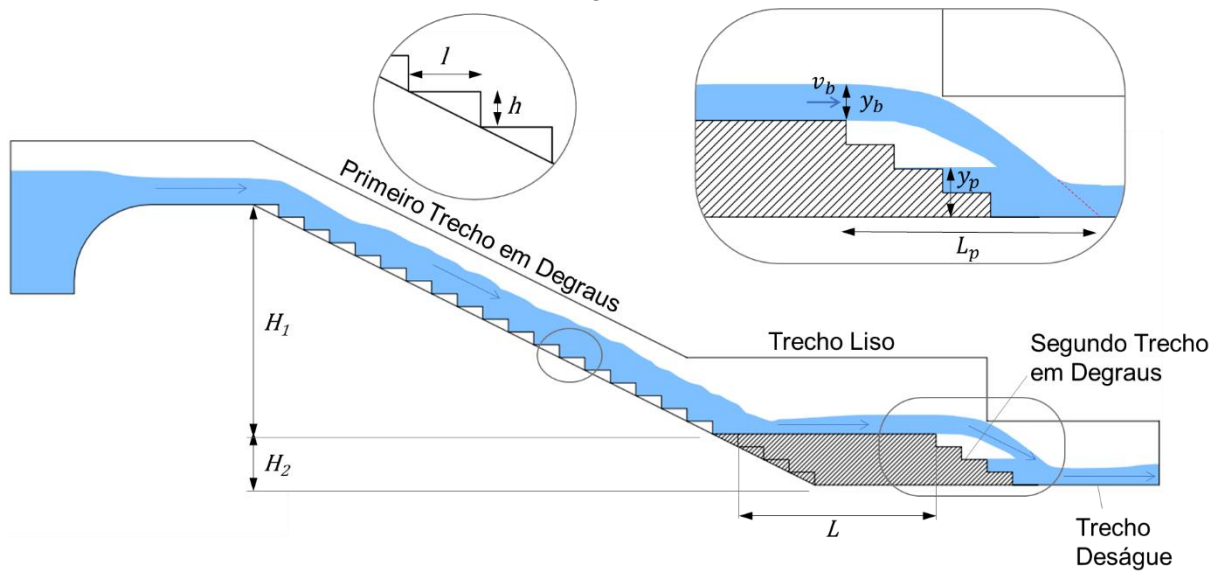
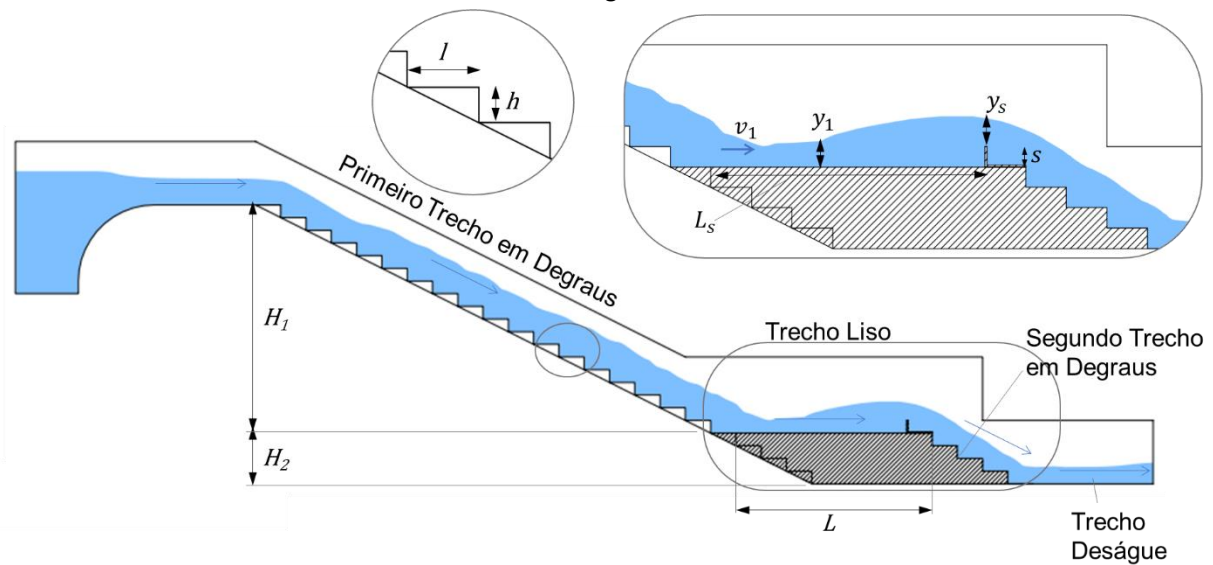


Figura 7 – Modelo estudado e variáveis envolvidas no controle por soleira entre trecho liso e em degraus.



Ao longo do presente estudo, convencionou-se a utilização das variáveis apresentadas na Figura 6 e na Figura 7, além daquelas relacionadas ao escoamento em si, para facilitar a compreensão das formulações utilizadas. Dessa forma, diversas referências bibliográficas utilizadas tiveram suas variáveis adaptadas em equações e figuras para unificar as nomenclaturas visando fluidez na leitura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar, por investigação experimental, os efeitos da mudança brusca de declividade em canais em degraus e os efeitos da utilização de soleiras nas transições entre trechos lisos horizontais e em degraus de descidas de água.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o escoamento nas transições de declividade por meio de aparato experimental, propondo as relações entre as variáveis que envolvem os fenômenos estudados;
- Desenvolver métodos de captura e tratamento da superfície da água por meio fotográfico (vídeo); e
- Avaliar o efeito da adoção de uma soleira no trecho liso na entrada do segundo trecho em degraus através dos dados obtidos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Para o desenvolvimento do presente estudo, fez-se necessária a análise de variadas áreas na literatura da engenharia hidráulica. Portanto, esta revisão da literatura é dividida em cinco itens, a saber:

Energia do Escoamento: O estudo do comportamento do escoamento em canais requer uma compreensão da energia envolvida nesse processo. A energia é a variável fundamental que governa o escoamento e desempenha um papel crucial na determinação das características hidráulicas.

Escoamento em Degraus: O fluxo em degraus é uma configuração comumente encontrada em canais inclinados. Neste item são apresentados os estudos visando compreender principalmente a condição de chegada do fluxo no início do trecho liso dos experimentos, a jusante do primeiro trecho em degraus.

Jatos em Quedas: O estudo dos jatos em quedas representa um problema recorrente em diversos contextos hidráulicos. Compreender os mecanismos que regem esse tipo de escoamento é necessário para determinar quando um jato se torna problemático a uma transição de declividade.

Ressalto Hidráulico: A utilização de soleiras em canais é uma prática comum em diversas aplicações hidráulicas. Neste trabalho é explorada a utilização de uma soleira visando impedir a ocorrência do jato na transição entre trechos. Ela pode provocar a ocorrência do fenômeno conhecido como ressalto hidráulico, que é caracterizado por uma mudança abrupta nas propriedades do escoamento, com implicações significativas para o comportamento hidráulico.

Fundamentos de Modelagem Física: Uma abordagem comumente utilizada para compreender o comportamento dos escoamentos em canais é a modelagem física. Essa técnica permite replicar, em escala reduzida, os fenômenos que ocorrem em canais reais, proporcionando uma base sólida para análises e previsões. Neste item, são apresentados os princípios fundamentais da modelagem física aplicada a canais, explorando suas metodologias, limitações e os resultados aplicáveis obtidos por meio dessa abordagem.

3.1 Energia do Escoamento e os Canais Abertos

3.1.1 Energia do Escoamento

Na obra *Hydrodinamica* (BERNOULLI, 1738), através do diagrama de forças em um elemento de fluido, Daniel Bernoulli pôde derivar os termos necessários para a composição da energia total do elemento, chegando ao que seria mais tarde conhecido como a Equação de Bernoulli (1):

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = H \quad (1)$$

Em que:

- z representa a distância vertical até o datum (m);
- $\frac{p}{\gamma}$ representa a carga de pressão (m), razão entre a pressão ao qual o fluido está submetido (p) e o peso específico do fluido (γ);
- $\frac{v^2}{2g}$ representa a energia cinética (m), correspondente à razão entre o quadrado da velocidade (v) do escoamento e duas vezes o valor da aceleração da gravidade (g);
- H representa a energia total do escoamento no elemento em análise, ou carga hidráulica total (m).

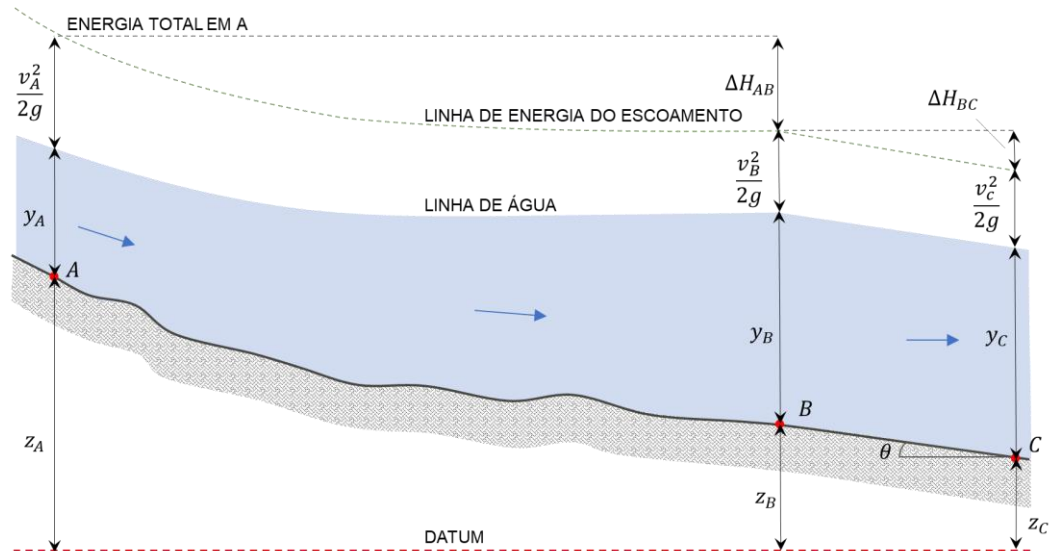
Chaudhry (2008) traz um histórico da equação, apresentando que Leonard Euler já havia derivado a relação encontrada por Bernoulli, chegando a um resultado para casos mais generalizados.

A equação é de grande utilidade nos estudos de engenharia por permitir analisar o comportamento da energia do fluido movendo-se de um ponto A até um ponto B, como ilustrado na Figura 8. A utilização da equação passa pela necessidade de que as linhas de corrente do fluxo se mantenham paralelas, não sendo possível a aplicação do conceito da equação de Bernoulli em escoamentos bruscamente variados (como ressalto hidráulico, discutido no item 3.4) (WHITE, 2011).

Na análise de canais abertos (rios, córregos, canais de drenagem urbana, vertedouros e descidas em degraus), a parcela $\frac{p}{\gamma}$ corresponde à chamada profundidade

característica do fluido (y) (em condutos forçados corresponde à pressão à qual a tubulação está submetida).

Figura 8 – Conceito de carga hidráulica e perda de carga entre duas seções.



O dimensionamento e análise de canais abertos consiste em quantificar as características do escoamento (y e v) por meio do dimensionamento da perda de energia (ΔH) entre as seções do trecho em análise. A quantificação das perdas é, portanto, o desafio a ser enfrentado por engenheiros hidráulicos no dimensionamento e verificação de canais.

Na abordagem da energia em canais, é importante considerar a relação entre as duas parcelas de energia presentes: a energia cinética e a energia piezométrica. Essa relação é expressa pelo número de Froude, que descreve a razão entre as forças exercidas por cada uma dessas energias. O número de Froude pode ser interpretado como a proporção entre a carga cinética e a carga piezométrica em um escoamento. Quando o escoamento tem carga cinética maior que a piezométrica, o escoamento é dito torrencial ou supercrítico, quando a carga piezométrica é maior, o escoamento é dito fluvial ou subcrítico. O cálculo do número de Froude (Fr) pode ser feito pela equação (2):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (2)$$

Em que:

- Fr representa o número de Froude;
- v representa a velocidade média do escoamento (m/s);
- g representa a aceleração da gravidade (m/s²);
- y representa a profundidade hidráulica do escoamento (m).

É importante ressaltar que o número de Froude tem suas origens nas análises de comportamento da velocidade de barcos frente a comprimento de ondas, ou da relação entre as forças cinéticas e gravitacionais em um corpo imerso no escoamento ou no recipiente¹.

3.1.2 Escoamento Uniforme

Para trechos suficientemente longos de canal, com condições constantes de seção e declividade, o escoamento entra em equilíbrio com as perdas de energia e não ocorrem mais variações de velocidade e profundidade médias. Diz-se então que o escoamento se encontra em regime uniforme (Figura 8: $\Delta H_{BC} = z_B - z_C$, $v_B = v_C$, $y_B = y_C$). Para canais abertos, Yen (2002) lista as três principais equações ((3), (4) e (5)) utilizadas para quantificar a velocidade uniforme:

$$v = \left(\frac{8g}{f}\right)^{1/2} \cdot R^{1/2} \cdot S^{1/2} \quad \text{Equação de Darcy-Weisbach}^2 \quad (3)$$

$$v = C \cdot R^{1/2} \cdot S^{1/2} \quad \text{Equação de Chézy} \quad (4)$$

$$v = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{R^{1/6}} \cdot R^{1/2} \cdot S^{1/2} \quad \text{Equação de Manning} \quad (5)$$

¹ West (2017) traz um histórico sobre a relação do início dos estudos de William Froude e o desenvolvimento de alguns dos maiores navios construídos no século XIX. Hager e Castro-Orgaz (2016) buscaram razões históricas para a utilização do número de Froude na hidráulica de canais abertos, encontrando evidências que De Saint-Venant (1871) e Boussinesq (1877) reportaram a importância da aplicação da razão entre a velocidade do escoamento e a celeridade da onda (número de Froude) para escoamentos. Weber (1919) apresentou a o “número de Froude” como uma relação para canais, levando a utilização dessa nomenclatura na hidráulica de canais abertos.

² A equação em sua forma mais comum é: $\Delta H = f \cdot \frac{L}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}$, considerando $\frac{\Delta H}{L} = S$ com L = comprimento do trecho em análise, pode-se facilmente derivar a equação (3).

Em que:

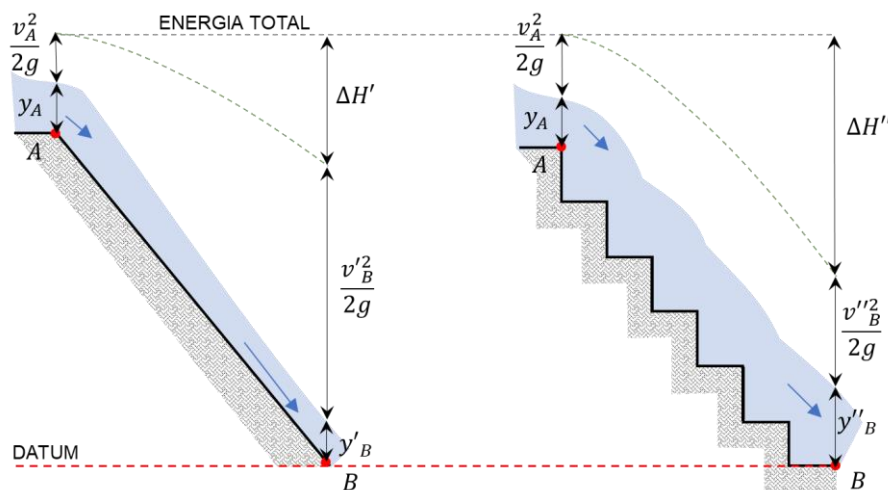
- g representa a aceleração da gravidade (m/s^2);
- R o raio hidráulico do escoamento (razão entre a área da seção transversal e o perímetro de contato com o fundo do canal, em m);
- S a declividade da linha de energia ($\text{sen}(\theta)$, em m/m). Para canais em regime uniforme, a declividade da linha de energia corresponde à declividade do próprio canal.

Os fatores f , C e n variam de acordo com o material do canal, são chamados fator de atrito, coeficiente de Chèzy e coeficiente de Manning, respectivamente. Destes fatores, apenas f é adimensional, sendo, por esse motivo, preferencial nas análises em canais abertos, (CHANSON, 2004), como é discutido no item 3.6.1.

3.1.3 Energia nos Canais em Degraus

É comum a utilização de degraus no fundo de canais inclinados devido a sua capacidade de incremento na perda de energia do escoamento. (Figura 9). No caso de escoamento em degraus, diversas equações foram propostas para o dimensionamento da perda de energia do escoamento.

Figura 9 – Esquema comparativo da perda de energia em canais com e sem degraus.



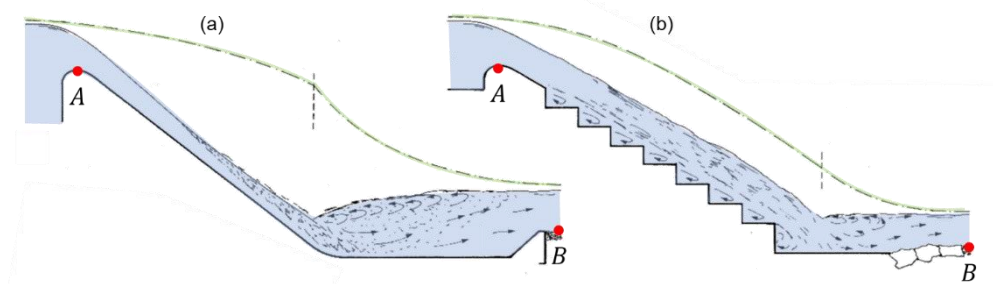
O escoamento em degraus não promove apenas um incremento da perda de energia do escoamento, mas diversos efeitos que o diferenciam do escoamento em canais

lisos, como a intensa aeração, vórtices de recirculação e jatos de impacto do escoamento (CHANSON, 1996). Tais efeitos são descritos no item a seguir.

3.2 Escoamento em Degraus

A presença dos degraus no escoamento promove uma perda de energia contínua ao longo da calha (HAGER *et al*, 2020). A Figura 10 apresenta uma comparação entre a linha de energia em uma calha lisa e de uma calha em degraus. Com a presença dos degraus, a necessidade da dissipação de energia na bacia a jusante (a partir da linha vertical) é diminuída pela maior declividade da linha de energia na Figura 10 (b), diminuindo os custos de implantação da bacia de dissipação.

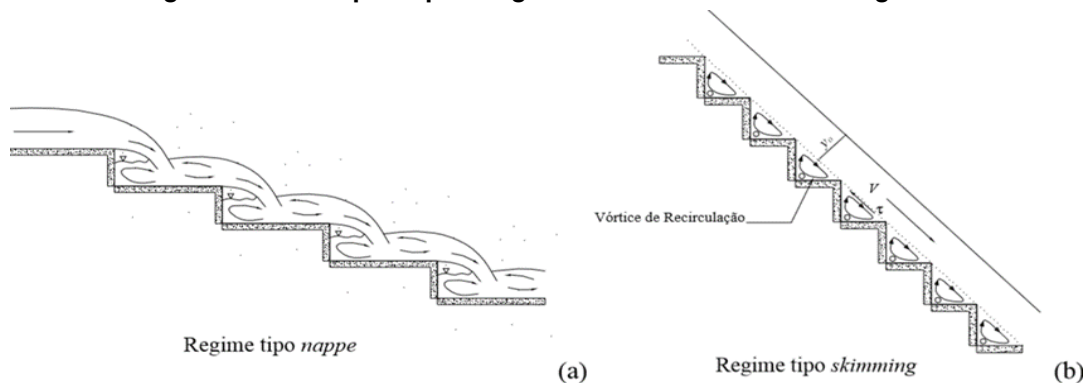
Figura 10 - Comparação entre a evolução da linha de energia em a) calha lisa, b) em degraus e do tamanho da bacia necessária em cada situação para atender à mesma condição no ponto B.



Fonte: Adaptado de Hager *et al.*, 2020).

Sorensen (1986) observou que, para diferentes vazões, havia diferentes características de escoamentos nos degraus. A Figura 11 apresenta esquematicamente os dois tipos de escoamento inicialmente identificados. Os regimes possuem diferentes mecanismos de escoamento e dissipação de energia e são analisados de maneira distinta.

Figura 11 – Dois principais regimes de escoamento em degraus.



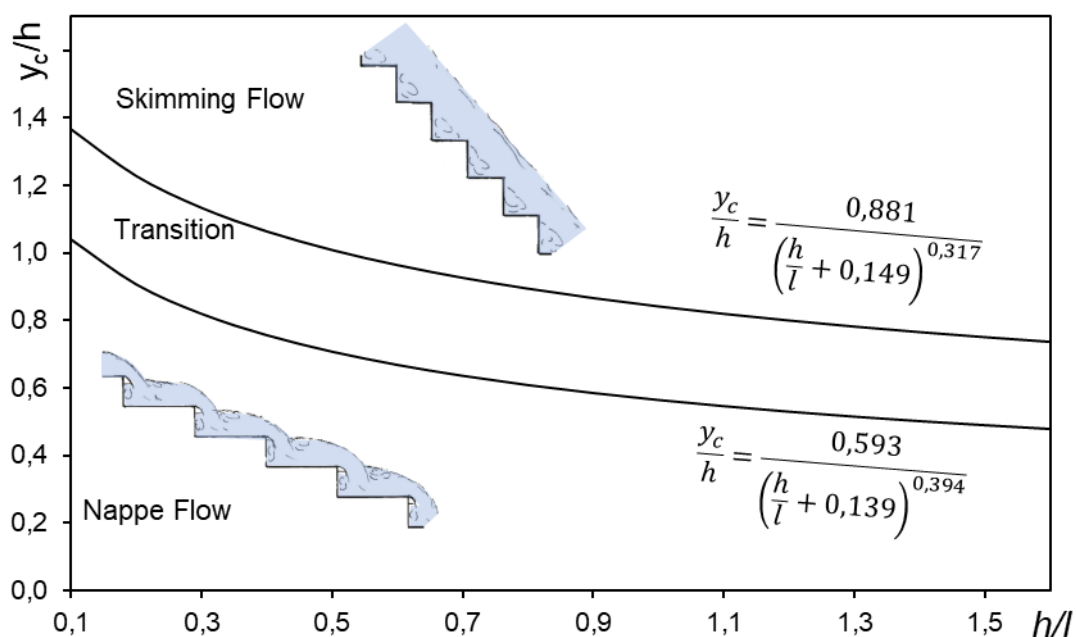
Fonte: Arantes (2007).

3.2.1 Limites dos Regimes

O escoamento em degraus pode ser caracterizado em três diferentes regimes principais, como compilado por Chanson (2015): *Skimming Flow*, *Nappe Flow* e *Transition Flow*. O primeiro se caracteriza pelo escoamento do fluido sobre turbilhões de água em recirculação entre os degraus, formando-se um pseudo-fundo de canal liso, como mostrado na figura anterior. O segundo caracteriza-se pela ocorrência de diversas quedas sucessivas do escoamento, nas quais observa-se o comportamento individual das quedas na dissipação da energia. O último regime é caracterizado pela transição entre os dois anteriores, no qual são observadas grandes variações da linha de água, com fortes influências dos degraus na lâmina e variações abruptas de nível (CHANSON e TOOMBES, 2004).

O regime de escoamento pode ser definido com base na razão entre a profundidade crítica y_c e a altura dos degraus h , além da tangente do ângulo de declividade do canal (razão entre h e o patamar do degrau l) (CHANSON *et al.*, 2015; OHTSU *et al.*, 2004; BOES e HAGER, 2003; OHTSU, 2001), como apresentado na Figura 12. A variável y_c/h representa a variação da vazão e é utilizada ao longo desse estudo para identificar a vazão do escoamento em análise.

Figura 12 - Limites dos regimes de escoamento em degraus propostos por Chanson *et al.* (2015).



Fonte: Baseado em Chanson *et al.* (2015) e Hager *et al.* (2020).

A ocorrência do regime *Skimming Flow* se dá em declividades e vazões específicas maiores quando comparado com os outros regimes, apresentando relativamente um escoamento mais controlado (CHANSON, H. *et al.* 2002). O regime *Nappe Flow* ocorre em vazões específicas menores e, apesar de por vezes ser mais eficiente para dissipação de energia (FRIZELL e SVOBODA, 2012), muitas vezes exige canais largos ou baixas declividades para poder ocorrer, gerando estruturas de grande porte para implantação. Portanto, o regime *Skimming Flow* é o mais utilizado no dimensionamento de canais de drenagem superficial e canais extravasores.

Entre os dois regimes de escoamento, o escoamento encontra-se em uma fase de transição (*Transition Flow*), com a ocorrência de quedas singulares (*Nappe Flow*) entre alguns degraus e o deslizamento sobre a recirculação (*Skimming Flow*) em outros.

Os regimes podem ainda ser subdivididos dentro da classificação entre *Skimming Flow* (SK), *Nappe Flow* (NA) e *Transition Flow* (TR), sendo possível classificar em: tipo SK-A e SK-B (OHTSU *et al.*, 2004); NA-1, NA-2 e NA-3 (CHANSON, 2002); além de TR-1 e TR-2 (CHANSON e TOOMBES, 2004). No entanto, como o foco deste trabalho é a modelagem das soleiras entre os trechos liso e em degraus. Não se mostra necessário o detalhamento das subdivisões entre os regimes nos degraus para o entendimento dos processos envolvendo a operação das soleiras.

3.2.2 Características do Escoamento

3.2.2.1 Aeração

Devido às altas velocidades que o fluido atinge nas descidas em degraus, comumente ocorre o fenômeno da aeração, o arrasto do ar no entorno para dentro do escoamento, alterando as suas características (CHANSON, 1988). O escoamento passa a ter uma certa concentração de ar arrastado e passa a ser o escoamento não apenas de água, mas de uma mistura água-ar.

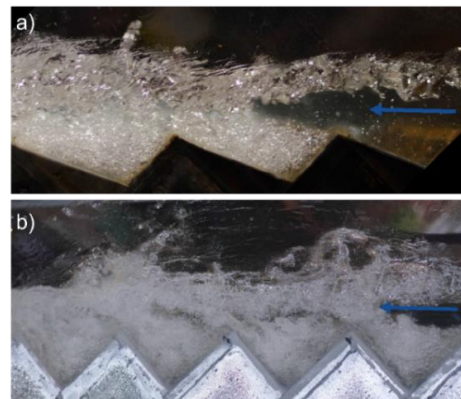
Da Figura 13 até a Figura 16 são apresentadas algumas estruturas em escoamento em degraus.

Figura 13 – *Nappe Flow*: Extravasor da Barragem Opuha, no rio Opuha em Canterbury – Nova Zelândia.



Fonte: Chanson (2006).

Figura 14 – Detalhe do escoamento de água com arrasto de ar em degraus em laboratório (fotografias inclinadas) – *Skimming Flow*.



Fonte: Arosquipa Nina et al. (2022).

Figura 15 – *Skimming Flow*: Vertedouro da Barragem da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, rio Jacuí, Rio Grande do Sul, Brasil.



Fonte: Matos e Meireles (2014).

Figura 16 *Nappe Flow* na barragem Chichester, no rio Chichester, Austrália.

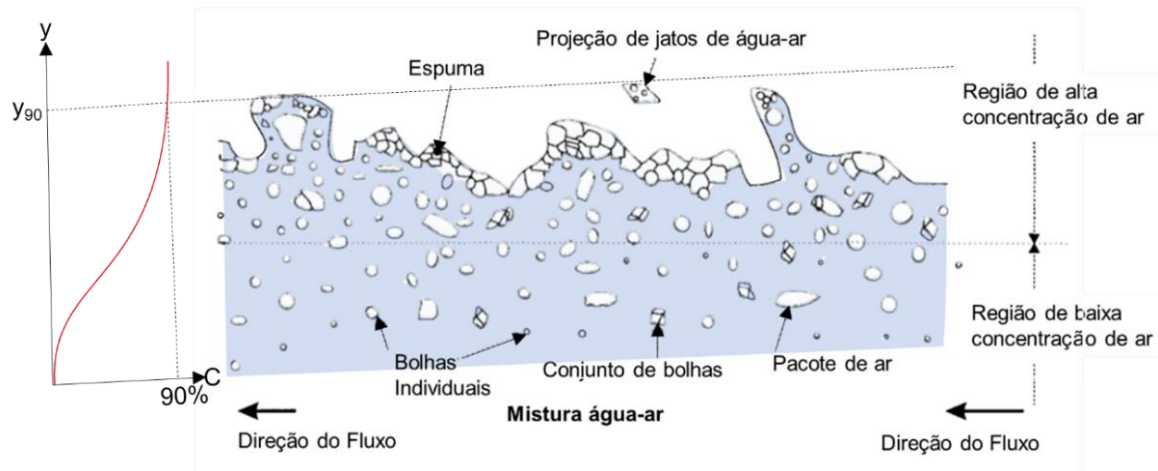


Fonte: Chanson et al. (2015).

Nas Figura 15 e na Figura 16 é visível o ponto de aeração do fluxo, notando-se que na primeira ocorre no final do vertedouro, enquanto no segundo ocorre no meio dos degraus. Já na Figura 13, a aeração ocorre próxima da soleira e não é visível na fotografia.

Algumas importantes definições a respeito da aeração são necessárias para o entendimento das formulações da literatura. A Figura 17 apresenta o escoamento aerado e algumas de suas estruturas, além do comportamento da relação entre ar e água (concentração de ar = C). ao longo da profundidade.

Figura 17 - Ilustração da região aerada de um escoamento em canal aberto e as diferentes formas de ar na mistura ar-água observadas. A esquerda, um perfil típico da concentração de ar ao longo da profundidade do escoamento.

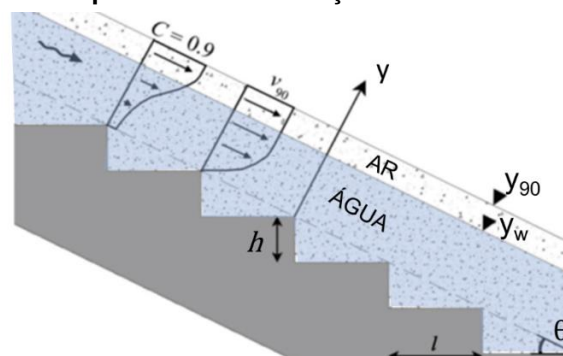


Fonte: Adaptado de Chanson (1996).

A elevação em que se tem 90% de ar escoando é usualmente considerada o limite do escoamento aerado e a sua obtenção é discutida no item 3.6.2. Segundo Chanson (1995), a profundidade característica foi apresentada como limite para o escoamento aerado por Cain (1978), Chanson (1988) Wood (1991) devido ao fato de o escoamento se comportar como uma mistura homogênea abaixo dessa profundidade. Para essa profundidade, a aplicação da equação da continuidade para a determinação da vazão do foi satisfatória segundo os autores, mostrando a coerência da sua utilização.

Uma outra representação útil do escoamento para fins de *design* e verificação é a separação de toda a parcela de ar escoando da água, como apresentado na Figura 18. Para uma região em equilíbrio, a razão entre o volume de ar e o volume de água escoando pode ser chamada de “concentração média de ar” no escoamento.

Figura 18 – Representação esquemática do escoamento com base nas quantidades de água e ar, além do perfil de concentrações e velocidades de ar.



Fonte: Adaptado Hager *et al.* (2020).

Logo, tem-se uma variação da quantidade de ar ao longo do perfil do escoamento (Figura 17), variando de poucas bolhas de ar até 90% (em $y=y_{90}$), e há também uma relação entre o total de ar e o total da mistura água-ar em escoamento, sendo ambas denominadas “concentração de ar”. Buscando evitar a confusão, alguns autores utilizam a nomenclatura “fração de vazios” (*void fraction*) para a concentração ao longo do perfil e “concentração média” para a razão entre as quantidades totais (CHANSON, 2002b; TOOMBES, 2002; BOES e HAGER, 2003; CHANSON *et al.* 2002).

Neste trabalho, é importante o entendimento e utilização da “concentração média” de ar escoando, pois representa um importante parâmetro no entendimento dos tipos de escoamento em degraus, como descrito a seguir.

Uma vez que, em geral, as descargas medidas (quantidade de vazão prevista, vazão fornecida pelo sistema de bombeamento, vazão medida em estações fluviométricas) são baseadas apenas na quantidade de água em volume pelo tempo, a separação das profundidades de mistura água e ar (y_{90}) e apenas de água (y_w) torna-se útil para fins de modelagem do escoamento. Ressalta-se que y_w é uma profundidade representativa e obtida de maneira indireta ($y_w = y_{90} * (1 - C_{média})$) (CHANSON, 1996).

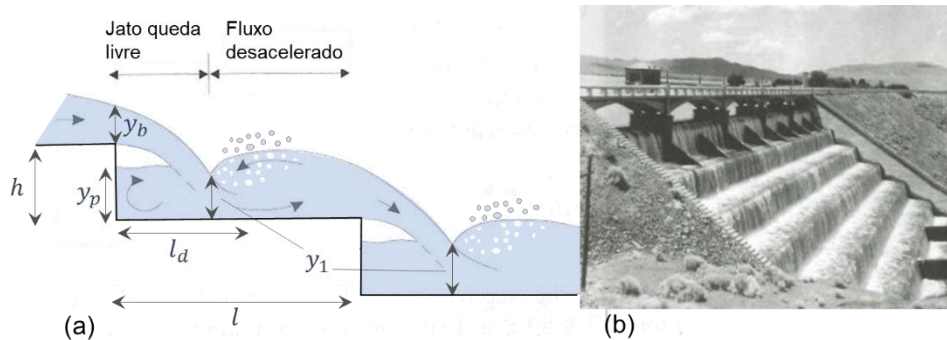
3.2.2.2 *Nappe Flow*

O regime *Nappe Flow* é caracterizado pela queda de água no limite do degrau e seu choque com o patamar seguinte, gerando um acúmulo de água atrás do jato com uma região de recirculação de água (CHANSON, 2002). A Figura 19 apresenta algumas características do fluxo em regime *Nappe Flow*.

Sendo as variáveis (relacionadas as profundidades hidráulicas, sem incorporação de ar no escoamento):

- y_b a profundidade na iminência da queda;
- y_p a profundidade da recirculação entre o jato e espelho do degrau;
- l_d o ponto de impacto do jato baseado no limite superior do jato; e
- y_1 a profundidade a jusante do jato.

Figura 19 – a) Características do fluxo em regime *Nappe Flow*; b) Extravasor da Barragem Lahontan operando em *Nappe Flow*, Rio Carson, Nevada – EUA.



Fonte: a) Adaptado de Chanson (2002); b) cortesia de USBR para Chanson (2002) (imagem invertida verticalmente).

O ressalto hidráulico no patamar do degrau pode ocorrer, ocorrer parcialmente ou não ocorrer, a depender da condição do comprimento do patamar l (sub-regimes NA-1, NA-2 e NA-3, respectivamente). Para o regime NA-3, a profundidade y_1 é observado ao longo de todo o patamar.

Chanson (2002) faz um resumo das análises disponíveis na literatura para as 4 variáveis, porém para uma queda singular e não para uma descida com vários degraus. Para variável y_1 , o autor traz as seguintes relações:

$$\frac{y_1}{y_c} = \frac{\sqrt{2}}{\frac{1,5}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h}{y_c} + \frac{3}{2}}} \quad \text{White (1943)} \quad (6)$$

$$\frac{y_1}{h} = 0,54 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1,275} \quad \text{Rand (1955)} \quad (7)$$

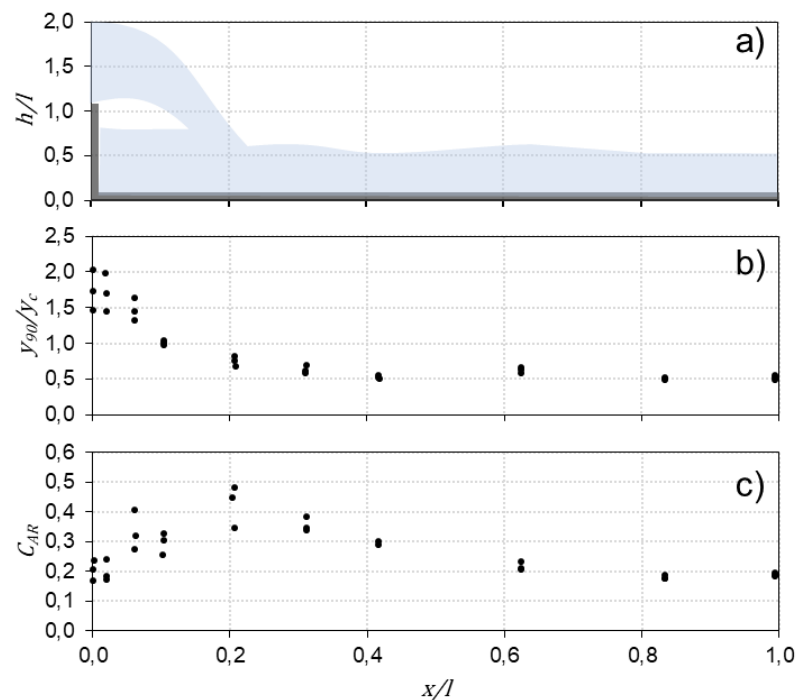
$$\frac{y_1}{h} = 0,625 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1,326} \quad \text{Chanson (1995)} \quad (8)$$

A equação (6) é uma solução analítica para a perda de energia em uma queda com a utilização da Conservação da Quantidade de Movimento (2ª Lei de Newton), a equação (7) é uma derivação de dados experimentais e a equação (8) é um resultado da equação (6) para a premissa de que $y_b = 0,715y_c$ (CHANSON, 2002). Chanson (2002) indica que, para extravasores em degraus em regime *Nappe Flow*, a equação (7) é a mais adequada, enquanto Rajaratnam e Chamani (1995) avaliaram

erros nas premissas de White (1943) e a inadequação da utilização da equação proposta.

Já para uma análise da aeração do escoamento, Chanson (2002) e Chanson e Toombes (2002) apresentaram a variação de profundidades aeradas e concentração de ar média ao longo do escoamento em uma descida para três vazões testadas para utilização como critérios de design, reproduzida na Figura 20. Não foram encontradas na literatura referências explícitas para a concentração de ar no final do jato em uma queda no regime *Nappe Flow*.

Figura 20 – a) Esquema representativo do salto no degrau; b) variação da profundidade aerada y_{90} ao longo do degrau; c) concentração de ar ao longo do degrau.



Fonte: b) e c) Dados de Chanson (2002) e Chanson e Toombes (2002).

Para os experimentos apresentados o final do degrau tem-se uma relação de $y_{90}/y_c=0,5$ e uma concentração média de ar de 20%, para todas as vazões testadas, bem como concentrações médias de 50% de ar na região do impacto do jato a jusante.

Com base na concentração média de ar arrastado pelo fluxo, pode-se estimar a profundidade aerada do fluxo com base na equação (9):

$$y_{90} = \frac{y_w}{1 - C_{MÉDIA}} \quad (9)$$

3.2.2.3 Transition Flow

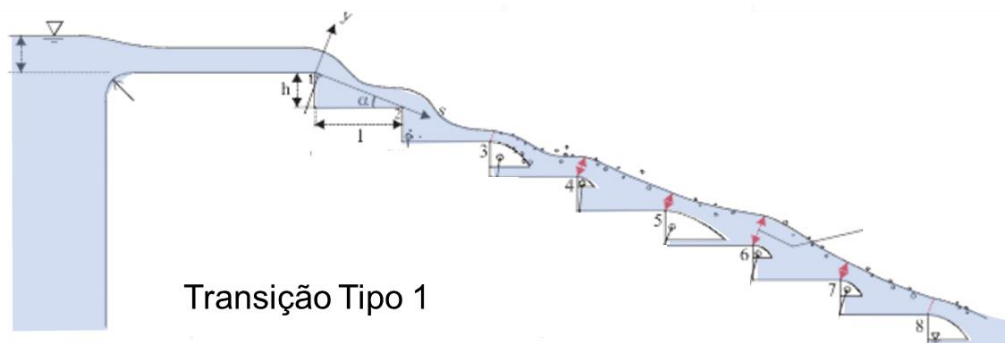
A transição entre os regimes *Skimming Flow* e *Nappe Flow* possui características próprias e ao longo do tempo tornou-se uma área bem caracterizada na classificação dos regimes, como mostrado na Figura 12. No entanto, apesar da grande quantidade de trabalhos com caracterização da ocorrência do fluxo como *Transition Flow*, não se tem uma caracterização clara das características do fluxo na literatura.

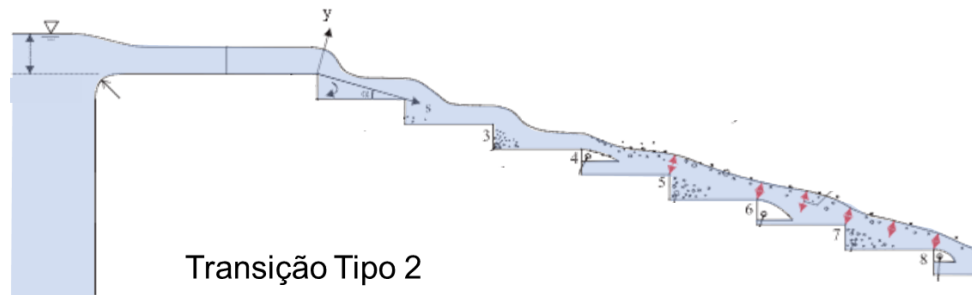
Os estudos de Chanson e Toombes (2004) foram focados exclusivamente no regime de transição e suas características. Os autores descrevem o regime como um fluxo que exibe grandes ejeções de água a jusante do ponto de aeração, com aparência caótica. No regime, podem ser visualizadas os saltos do jato de água entre os degraus, mas eles não se mostram regulares como no *Nappe Flow*.

Chanson e Toombes (2004) observaram a ocorrência de cavidades de ar atrás dos jatos de queda ao longo do mesmo fluxo para simulações em transição mais próximas do regime *Nappe Flow*, indicando que a condição da ocorrência do jato varia de degrau a degrau, ora “saltando” um degrau e ora não. Para vazões mais altas, mais próximas do regime *Skimming Flow*, foi observada a ocorrência de algumas cavidades completamente preenchidas entre os degraus enquanto outras ainda apresentavam a ocorrência do jato sobre o degrau.

A Figura 21 apresenta a diferença entre os sub-regimes.

Figura 21 – Tipos de escoamento no regime *Transition Flow*.





Fonte: Adaptado de Chanson e Toombes (2004).

Anteriormente, Chanson (2002) havia descrito o regime em função das características médias dos experimentos realizadas para velocidade e concentração de ar no final do trecho em degraus com base em vários testes para diferentes vazões, como mostrado na Figura 22. O autor destaca que, devido à alta variabilidade do fluxo, o dimensionamento para a vazão de projeto no regime de transição deve ser evitado. Sendo assim, quando ocorresse do regime de transição durante a operação da estrutura, ela estaria apta a comportar vazões maiores.

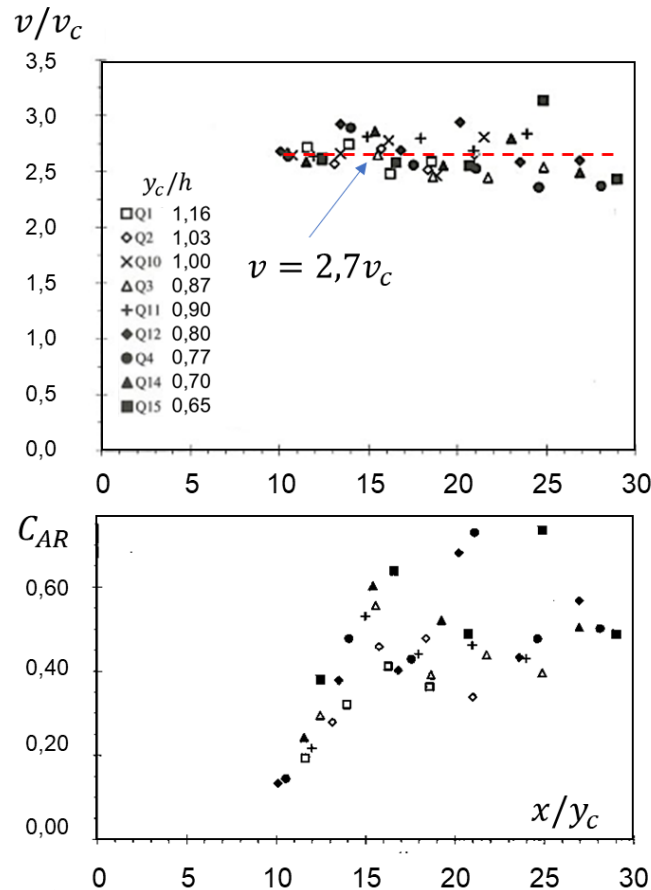
Já Kramer e Chanson (2018) apresentaram um estudo de 4 vazões dentro do regime de transição, para as quais puderam obter a concentração média de ar no escoamento na faixa de 45% à 69%, a depender da vazão simulada em uma descida com 100% de declividade ($h/l = 1$), enquanto Felder e Chanson (2015) apresentaram para uma vazão de $y_c/h = 0,83$ valores de velocidade na ordem de 2,66 m/s.

Nenhum dos autores, no entanto, apresentou explicitamente as variáveis de cálculo para verificação ou design de escoamento em transição. No entanto, Chanson (2002) apresentou as variações de concentração de ar e de velocidade ao longo de uma descida longa com inclinação de 22° (Figura 22).

Para todas as configurações testadas, aparenta-se haver uma velocidade ao longo da descida de um valor próximo de 2,7 vezes a velocidade crítica v_c , segundo o autor. Já para a aeração, é possível notar que a aeração passa a acontecer no local da descida em que a relação entre a distância a partir da crista x e a profundidade crítica do escoamento y_c é da ordem de 10. No entanto, não há um padrão de comportamento estabelecido, uma vez que ora o jato cai por um degrau e ora “passa direto” do degrau

seguinte. Pode ser notado no gráfico que para uma mesma vazão, a concentração média aumenta e diminuiu ao longo do trecho compreendido entre $15 < x/y_c < 30$.

Figura 22 – Velocidades e concentração de ar ao longo de uma descida em degraus de 22° de inclinação no regime *Transition Flow* para várias vazões (y_c/h).



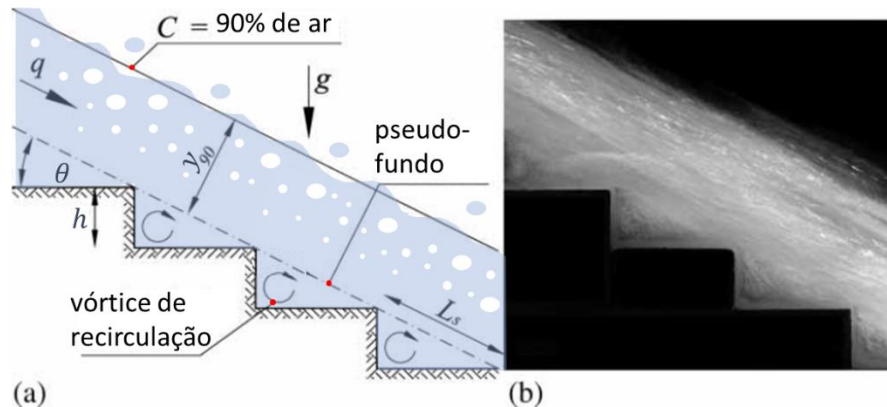
Fonte: Adaptado de Chanson (2002).

3.2.2.4 *Skimming Flow*

O regime *Skimming Flow* se caracteriza pelo escoamento ocorrendo sobre um “pseudo-fundo”, com a formação de recirculação de água entre as cavidades. Em geral, ocorre uma grande aeração (arrasto do ar para dentro do escoamento), devido às maiores declividades e/ou maiores vazões específicas que o fluxo está submetido no regime (BUNG, 2011).

A Figura 23 apresenta as principais característica do escoamento em *Skimming Flow*. Nota-se que, na fotografia apresentada, não é possível distinguir as bolhas de ar inseridas no escoamento devido a velocidade do escoamento e o tempo de fechamento do obturador da câmera, como é discutido no item 3.6.3.

Figura 23 – a) Características do escoamento em *Skimming Flow*; b) imagem do escoamento em modelo reduzido.



Fonte: Adaptado de Bung (2011).

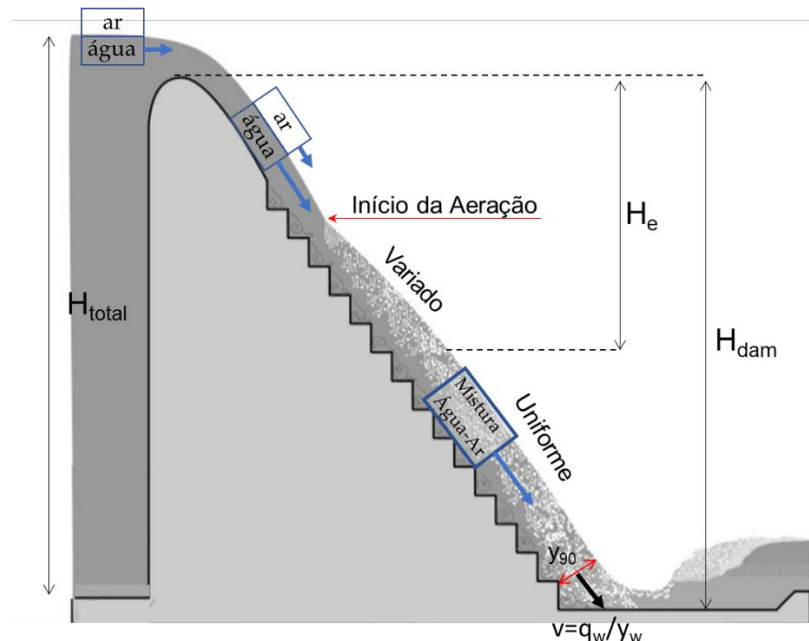
Ao contrário da literatura para os outros dois regimes de escoamento em degraus, a literatura sobre escoamentos em regime *Skimming Flow* é vasta e sua integral revisão e descrição foge do escopo deste trabalho, que tem o enfoque no efeito direto no trecho horizontal da utilização de uma soleira em um trecho horizontal entre dois trechos em degraus.

Boes e Hager (2003), Ohtsu *et al* (2004), Gonzalez e Chanson (2007) e Bung (2011) são exemplos de autores que apresentaram guias para o dimensionamento e verificação de estruturas em degraus. A literatura brasileira também apresenta os estudos de vários autores, com especial destaque para as pesquisas da Universidade de São Paulo (USP) de Tozzi (1992), Arantes (2007), Simões (2008), Simões (2012) e Nóbrega (2018), além das pesquisas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com os trabalhos de Teixeira (2003), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), entre outros.

Para o presente trabalho, é dado um foco maior na metodologia apresentada por Ohtsu *et al* (2004) para a avaliação do primeiro trecho em degraus, uma vez que a maior parte das estruturas em degraus com as singularidades de curvas horizontais e verticais são dimensionadas com base no aplicativo computacional SisCCoH (Sistema de Cálculo de Componentes Hidráulicas), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica (EHR) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que baseia seus cálculos de regime *Skimming Flow* na metodologia supracitada.

Ohtsu *et al* (2004) definem grande parte das variáveis utilizadas como funções do ângulo do canal, θ , e da razão y_c/h . A Figura 24 apresenta as principais variáveis de interesse.

Figura 24 – Variáveis envolvidas na análise das características do regime *Skimming Flow*.



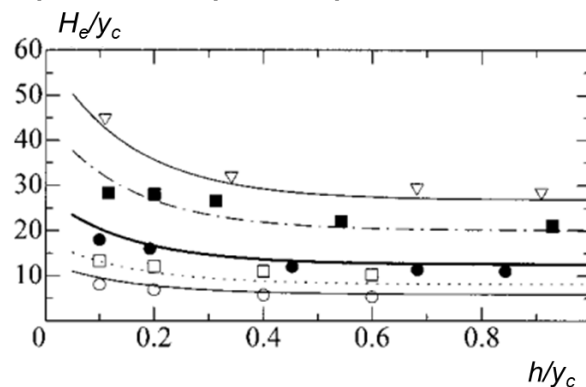
Fotne: Adaptado de Simões (2012)

A distância vertical a partir da elevação da crista, H_e , para que o escoamento atinja o fluxo uniforme é apresentada na equação (10):

$$\frac{H_e}{y_c} = \frac{5,7 + 6,7e^{-6,5h/y_c}}{(-1,21 \cdot 10^{-5}\theta^3 + 1,6 \cdot 10^{-3}\theta^2 - 7,13 \cdot 10^{-2}\theta + 1,3)} \quad (10)$$

Ajustada pelos dados apresentados na Figura 25, com θ em graus.

Figura 25 – Relação entre a profundidade de equilíbrio, profundidade crítica e tamanho do degrau. Cada dupla de linha e pontos representa uma declividade testada.



Fonte: Ohtsu *et al* (2004).

O valor da profundidade de equilíbrio é proporcional a vazão, de forma que quanto maior a vazão, maior a profundidade necessária para atingir o fluxo uniforme. Nota-se que é possível que a altura necessária para equilíbrio do fluxo uniforme seja maior que a altura disponível da descida H_{dam} . Nesses casos, o fluxo final não se encontra em regime uniforme.

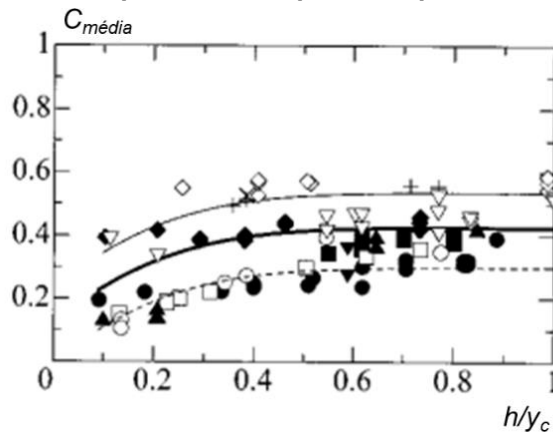
Já a concentração média de ar no escoamento, apresenta um comportamento assintótico com a diminuição da vazão (aumento de $\frac{h}{y_c}$), como apresentado na Figura 26.

Os ajustes apresentados remetem às relações apresentadas na equação (11):

$$C_{MÉDIA} = D - 0,3 \cdot e^{\left[-5\left(\frac{h}{y_c}\right)^2 - 4\frac{h}{y_c}\right]} \quad (11)$$

Com:	$D = 0,3$	Para $5,7^\circ < \theta < 19^\circ$
	$D = -2,0 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 2,14 \cdot 10^{-2} \theta - 3,57 \cdot 10^{-2}$	Para $19^\circ < \theta < 55^\circ$

Figura 26 – Variação da concentração média com a relação entre o tamanho do degrau e a profundidade crítica. Cada dupla de linha e pontos representa uma declividade testada.



Fonte: Ohtsu et al (2004).

Novamente, com base na concentração média de ar arrastado pelo fluxo, pode-se estimar a profundidade aerada do fluxo com base na equação (9):

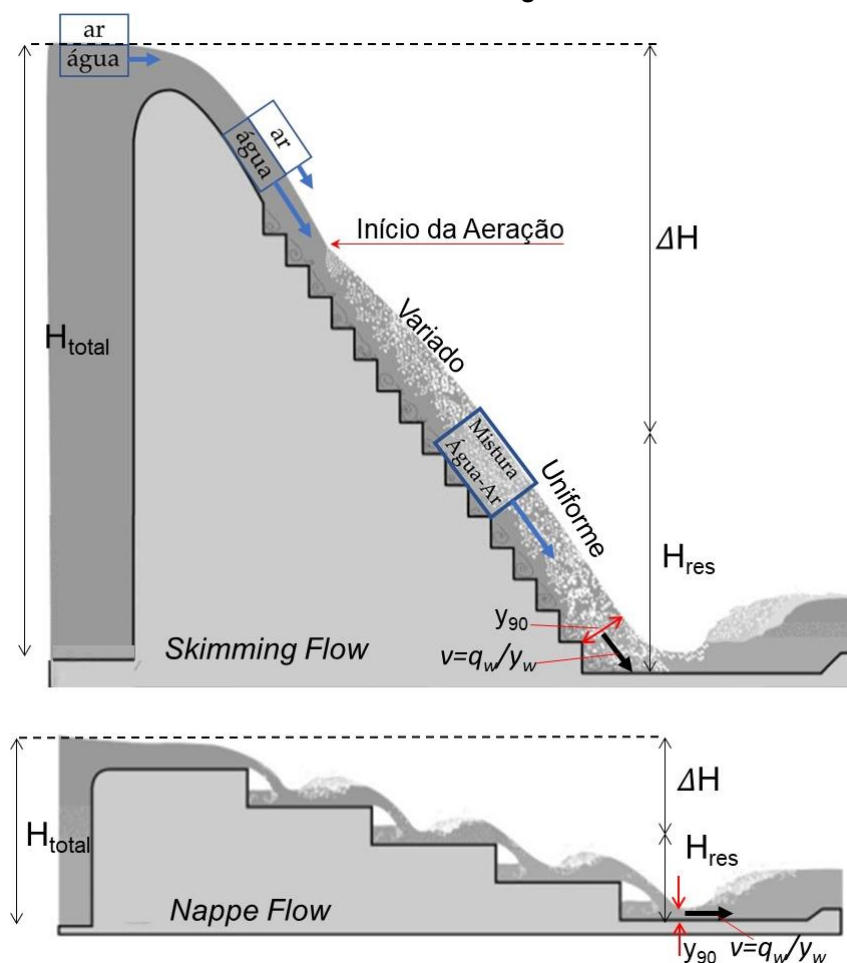
$$y_{90} = \frac{y_w}{1 - C_{MÉDIA}} \quad (9)$$

A profundidade equivalente de água do fluxo, y_w , deve ser obtida com base na dissipação de energia do fluxo, como abordado a seguir.

3.2.3 Dissipação de Energia e Escoamento Uniforme

A dissipação de energia é a principal característica a ser dimensionada em análises de escoamentos em degraus, haja visto que o principal objetivo da sua implantação é incrementar a dissipação de energia. De maneira geral, para qualquer um dos regimes de escoamento, a quantificação da dissipação da energia passa pela aplicação da análise da variação da energia entre as seções do reservatório e final do escoamento, como apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Variáveis de cálculo da dissipação de energia para os principais regimes de escoamentos em degraus.



Fonte: Adaptado de Simões (2012).

A relação entre as variáveis pode ser expressa pelas equações (12) e (13):

$$H_{res} = H_{total} - \Delta H \quad (12)$$

$$H_{res} = y_w + \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Para canais em *Transition Flow*, a definição das características do escoamento y_w e v permite obter a energia residual diretamente, assumindo-se uma velocidade de $2,7v_c$ ao final dos degraus e uma concentração de are de 50%, por exemplo. No entanto, destaca-se que há uma pequena quantidade de estudos que buscaram obter tais características, como destacado por Chanson e Toombes (2004).

Para o regime *Skimming Flow*, após atingir o escoamento uniforme, os valores de y_w e v tornam-se constantes. Para o regime *Nappe Flow*, após sucessivas quedas o escoamento também apresenta um equilíbrio, mantendo constantes as variáveis do escoamento. (CHANSON, 2002).

A seguir, são apresentadas as quantificações das perdas de energias ΔH para cada um dos dois regimes.

3.2.3.1 *Nappe Flow*

A dissipação de energia do regime *Nappe Flow* se dá, principalmente, por meio da ocorrência do choque com o patamar do degrau a jusante (RAJARATNAM, 1990). Os degraus atuam de maneira individual no fluxo, de forma que a dissipação pôde ser analisada com base no efeito individual de cada degrau.

Partindo do princípio de que cada degraus dissipa uma parcela β da energia no degrau anterior, Chamani e Rajaratnam (1995) encontraram relações entre o número de degraus (N), a energia dissipada (ΔH), a altura do degrau (h) e a profundidade crítica (y_c), como apresentado na Equação (14):

$$\frac{\Delta H}{H} = 1 - \frac{\left\{ (1 - \beta)^N \left[\left(1 + 1,5 \frac{y_c}{h} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \beta)^i \right\}}{N + 1,5 \frac{y_c}{h}} \quad (14)$$

Em que H representa a energia total do escoamento e β um parâmetro baseado na forma dos degraus, incluindo o comprimento do patamar (l), como apresentado na Equação (15):

$$\beta = \left(0,30 - 0,35 \frac{h}{l}\right) - \left(0,54 - 0,27 \frac{h}{l}\right) \cdot \log_{10} \left(\frac{y_c}{h}\right) \quad (15)$$

Portanto, a dissipação de energia relativa à energia total $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)$ aumentaria com o aumento do número de degraus. Chanson (2002) apresenta que, com o aumento do número de degraus, a dissipação tende para uma taxa de dissipação constante, atingindo o que seria um “escoamento uniforme” para o *Nappe Flow* em termos de dissipação de energia.

Com base em experimentos, o Chanson (1994) derivou a relação apresentada na equação (16):

$$\frac{\Delta H}{H_{total}} = 1 - \frac{0,54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0,275} + \frac{3,43}{2} \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0,275}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{y_c}} \quad (16)$$

Como a formulação apresentada na equação (15) não especifica as condições do escoamento, e Chanson (2015) apresenta que a equação (16) foi testada com sucesso em todos os sub-regimes do escoamento em *Nappe Flow*, esta segunda foi adotada no presente estudo para avaliação da energia dissipada ao final do primeiro trecho em degraus.

3.2.3.2 *Skimming Flow*

Para o regime *Skimming Flow* a dissipação de energia acontece pela tensão de cisalhamento entre o fluxo principal e a cavidade de recirculação (Figura 23) (CHANSON, 2015). Portanto, para a dissipação de energia ocorrer em seu máximo potencial, é necessário que o fluxo atinja o regime uniforme (CHANSON e GONZALEZ, 2006).

O cálculo da dissipação de energia pode ser feito por meio da utilização do fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach (3) para um trecho em regime de escoamento uniforme. A variável ΔH pode ser apresentada como função da altura H_{dam} desde a

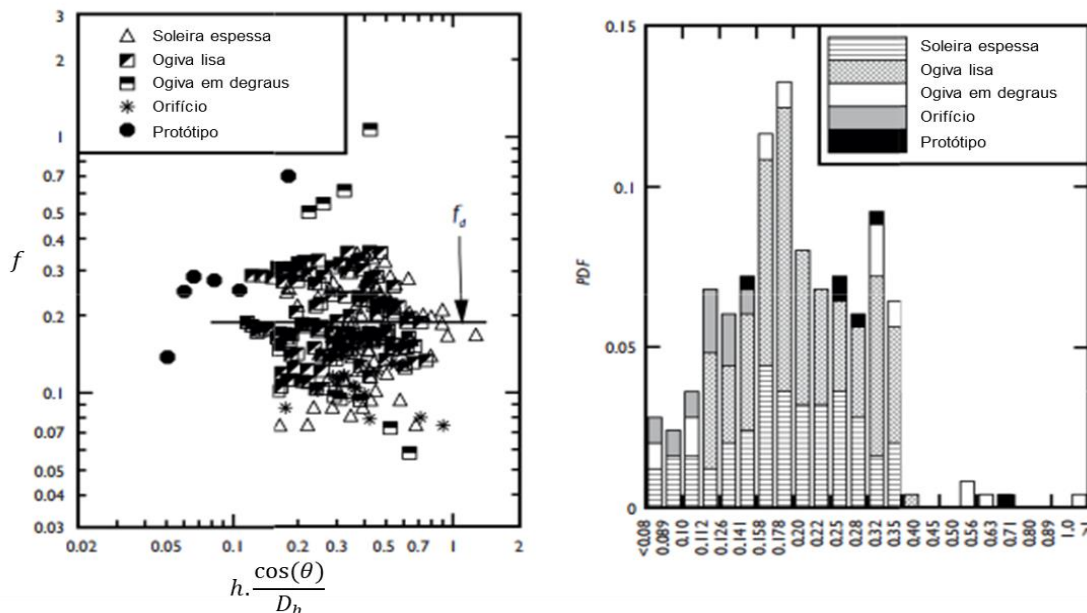
crista do canal até o ponto em análise, como apresentado na formulação analítica para a perda de energia da Equação (17):

$$\frac{\Delta H}{H_{dam} + \frac{3}{2}y_c} = \frac{\left(\frac{f}{8 \cdot \sin(\theta)}\right)^{1/3} + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f}{8 \cdot \sin(\theta)}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{y_c}} \quad (17)$$

Em que θ representa o ângulo do canal e α o coeficiente de correção da energia cinética devido à variação da velocidade ($\alpha = 1,1$).

A determinação de f é um tema ainda em aberto na engenharia de canais em degraus. Foi observado que seu valor varia de acordo com as condições de entrada do fluxo e as configurações dos degraus. Chanson (2006) traz uma análise de 249 dados de escoamento em degraus observados em protótipos e modelos reduzidos (Figura 28), mostrando que não há uma concordância clara entre o fator de atrito e as dimensões relativas da cavidade ($h \frac{\cos(\theta)}{D_h}$), em que D_h representa o diâmetro hidráulico do escoamento (dobro da razão entre a área de água e o perímetro do escoamento).

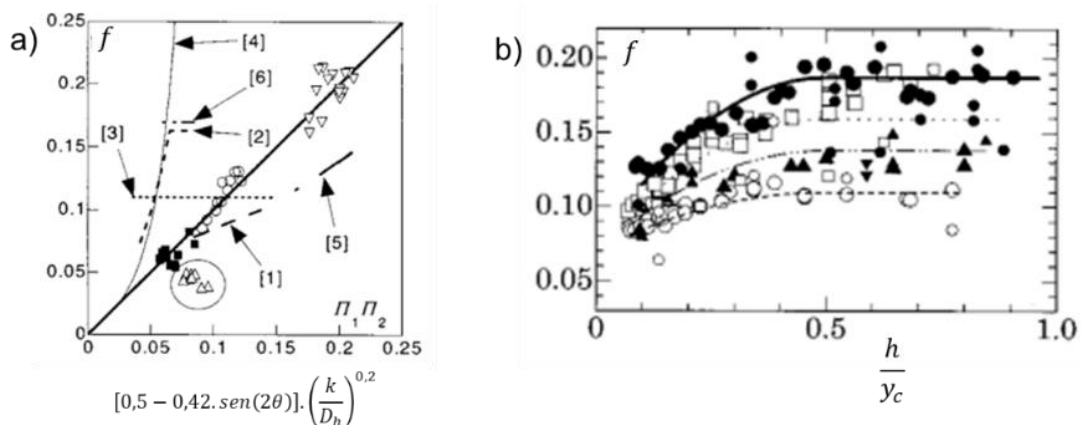
Figura 28 – Variações e distribuição do valor de f com o tamanho relativo da cavidade $h \frac{\cos(\theta)}{D_h}$.



Fonte: Adaptado de Chanson *et al.* (2015).

Alguns estudos experimentais obtiveram êxito na determinação de f com base em outros parâmetros adimensionais, como apresentado por Boes e Hager (2003) e Ohtsu *et al.* (2004), reproduzido na Figura 29.

Figura 29 – Fator de atrito em função de variáveis relacionadas ao escoamento: a) relações de Boes e Hager (2003) com as variáveis θ , D_h e k (altura da rugosidade, $h/\tan(\theta)$); b) relações encontradas por Ohtsu *et al.* (2004) com as variáveis h/y_c para vários de ângulos θ (cada linha).



Fonte: a) adaptado de Boes e Hager (2003), b) adaptado de Ohtsu *et al.* (2004).

Boes e Hager (2003) buscaram incorporar toda a variabilidade das condições de aeração e declividade do fluxo no fator de atrito por meio da correlação apresentada no eixo das abcissas ($\pi_1 \cdot \pi_2$, em que $\pi_1 = 0,5 - 0,42 \sin(2\theta)$ e $\pi_2 = \left(\frac{k}{D_h}\right)^{0,2}$). Os autores comparam as relações estabelecidas por eles com alguns estudos (pontos na Figura 29 (a)) e com algumas relações estabelecidas por outros autores (curvas de 1 a 6 no mesmo gráfico), argumentando que as variáveis propostas explicam bem todos os dados analisados, enquanto as demais propostas de outros autores não.

Já Ohtsu *et al.* (2004) analisaram os fatores de atrito em função de h/y_c (razão inversamente proporcional à vazão), obtendo valores variados para as variações de ângulo do canal estudado. Portanto, cada curva apresentada na Figura 29 (b) representa um ângulo de canal de testes.

Após as publicações, foram publicados os comentários do prof. Hubert Chanson acerca da não consideração dos efeitos de condição de entrada nos experimentos de Boes e Hager (2003) e da utilização de Ohtsu *et al.* (2004) apenas de dados

produzidos pelos próprios autores e não de demais experimentos. Os autores publicaram revisões dos dados e discussões das suas aplicabilidades entre eles (OHTSU *et al.*, 2005; BOES e HAGER, 2003b).

Por fim, Chanson *et al.* (2015) recomendam a utilização do ábaco da Figura 28 como guia para o dimensionamento das estruturas em degrau, utilizando-se preferencialmente um valor próximo de f de 0,20. Boes e Hager (2003b) reanalisaram a relação obtida com novos dados e concluíram que há uma boa correlação entre os dados e os fatores apresentados, mesmo para diferentes condições de entrada do fluxo, recomendando seu uso para fins de dimensionamento. Já Ohtsu *et al.* (2005) recomendam a utilização da relação encontrada entre o fator de atrito, os ângulos de canais testados e a variável $\frac{h}{y_c}$, que são equações polinomiais que deram origem às linhas apresentadas na Figura 29.

Como já exposto, apesar de um tema aberto na engenharia hidráulica, o presente trabalho não visa analisar a adequação das metodologias de dimensionamento de canais em degraus. Detalha-se, a seguir, a metodologia proposta por Ohtsu *et al.* (2004) para o cálculo da perda de energia no escoamento em degraus (incorporada ao *software* SisCCoH).

Para o cálculo do fator de atrito, Ohtsu *et al.* (2004) propuseram:

$$f = f_{max} = A \left(0,5 - \frac{h}{y_c} \right)^2 \quad (18)$$

Com: $f_{max} = -4,2 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 1,6 \cdot 10^{-2} \theta + 3,2 \cdot 10^{-1}$ e

$A = -1,7 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 6,4 \cdot 10^{-2} \theta - 1,5 \cdot 10^{-1}$ Para $5,7^\circ < \theta < 19^\circ$

Com: $f_{max} = -2,32 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 2,75 \cdot 10^{-3} \theta + 2,31 \cdot 10^{-1}$ e

$A = 0,452$ Para $19^\circ < \theta < 55^\circ$

Os dados foram ajustados para os dados apresentados na Figura 29 b), com θ em graus.

Quando não atingido o escoamento uniforme (Equação (10)), os autores recomendam a determinação da energia residual para o escoamento não uniforme ($H_{res,n.u.}$) como função da energia residual uniforme H_{res} , correspondente ao apresentado na equação (19):

$$\frac{H_{res,n.u.}}{y_c} = 1,5 + \left[\frac{H_{res}}{y_c} - 1,5 \right] \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{H_{dam}}{H_e} \right)^m \right) \quad (19)$$

Com

$$m = \frac{\theta}{25} + 4$$

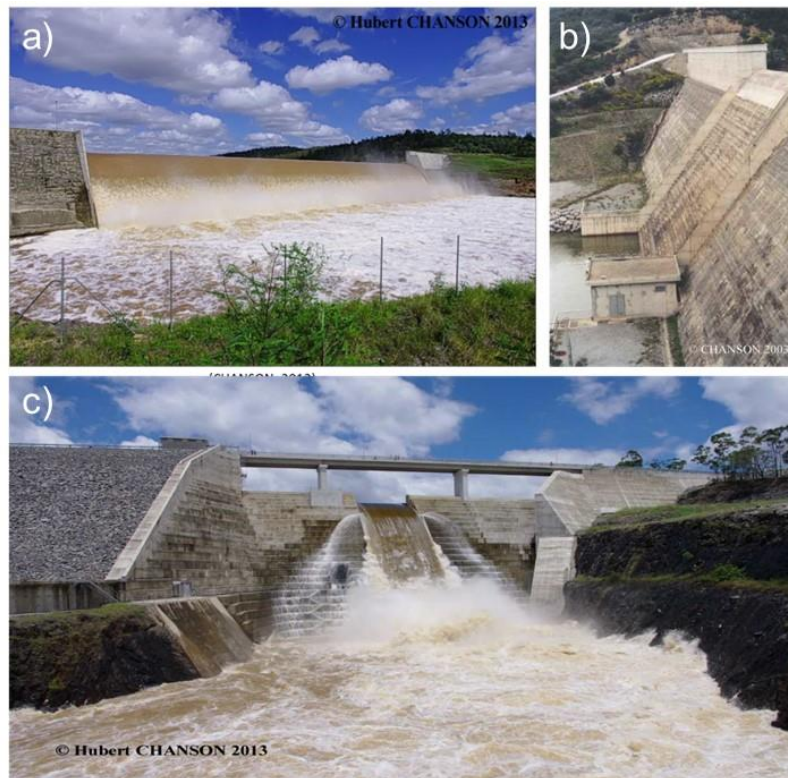
3.2.4 Mudanças de Declividade em Canais em Degraus

Como apresentado, a utilização dos canais em degraus como dissipadores de energia surgiu com a necessidade de se escoar grandes vazões de cheia e diminuir as estruturas de dissipação a jusante. Como a principal utilização se deu em barragens de concreto, é comum que se tenha o extravasor como estrutura principal, ou, ao menos, implantado em conjunto com a seção da barragem. Como apresentado nas Figura 30.

Para grandes barragens, em alguns casos especiais, as estruturas em degraus possuem pequenas variações de declividade ao longo da calha em degraus, como apresentado na Figura 31.

Tehrani *et al.* (2022) apresentam um estudo do aumento das pressões devido à diminuição de declividades brusca com base em um modelo de laboratório. Os autores demonstram a ocorrência de uma sobre-elevação na região da mudança de declividade com uma grande sobrepressão. Não são estudadas mudanças

Figura 30 – a) Barragem Paradise, rio Burnett, Queensland, Austrália; b) Barragem Les Olivettes, rio Peyne, Olivettes, França; c) Barragem Hinze, rio Nerang, Queensland, Austrália.



Fonte: Acervo digital Prof. Hubert Chanson, acesso em 03/11/2022.

Figura 31 – a) Barragem Upper Stillwater, “córrego” Rock Creek, Utah, EUA; b) Barragem Siah-Bishe, rio Chalus, Mazandaran, Irã.



Fonte: Tehrani *et al.* (2022).

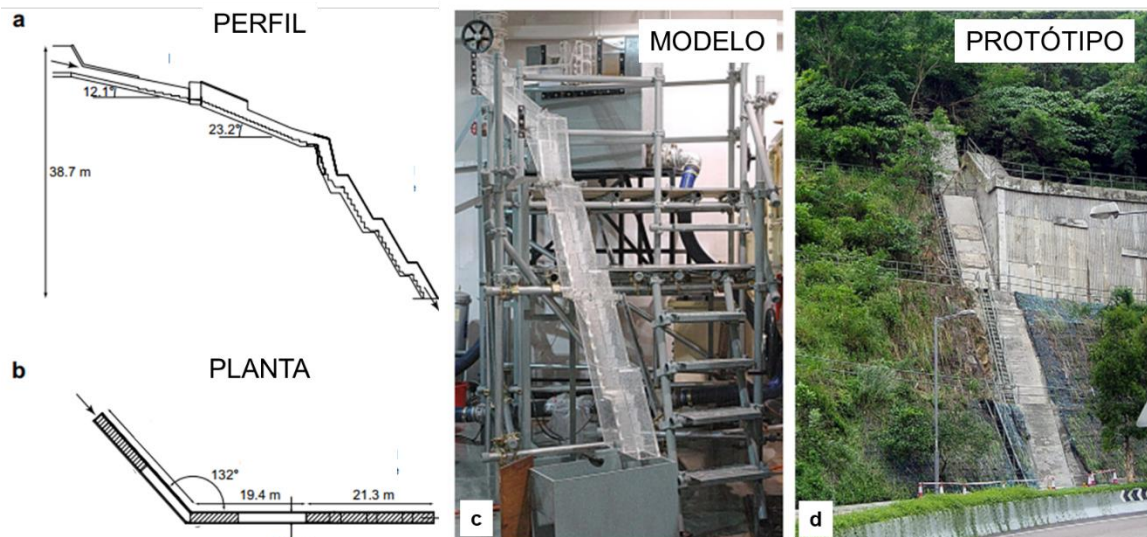
de declividade menor para maior declividade, como apresentado neste estudo.

Yu *et al.* (2008) apresentaram uma análise de canais com curvas verticais e horizontais, baseado em uma estrutura de drenagem superficial em Smithfield, Hong Kong. A necessidade dos estudos surgiu depois de problemas enfrentados durante um evento extremo em 2005. A Figura 32 mostra o aparato experimental e o protótipo.

A estrutura possui cobertura nas regiões de mudanças de direção, o que evita o transbordamento do fluxo, como constatado no estudo, com a cobertura funcionando como defletor para o fluxo, como apresentado na Figura 33. O estudo de Yu *et al* (2008) recomendou ainda a ampliação da cobertura devido à ocorrência de transbordamento registrada.

O estudo evidencia o problema das mudanças bruscas de direção em canais, tanto horizontais quanto verticais. Porém, o estudo não coletou informações quantitativas do modelo, sendo feita apenas uma análise dos efeitos da adoção da cobertura e dos bloqueios do canal no escoamento.

Figura 32 – Modelo e protótipo do canal de drenagem superficial em Smithfield, Hong Kong.



Fonte: Adaptado de Yu *et al* (2008).

Figura 33 – Detalhe da operação da mudança de direção na estrutura.

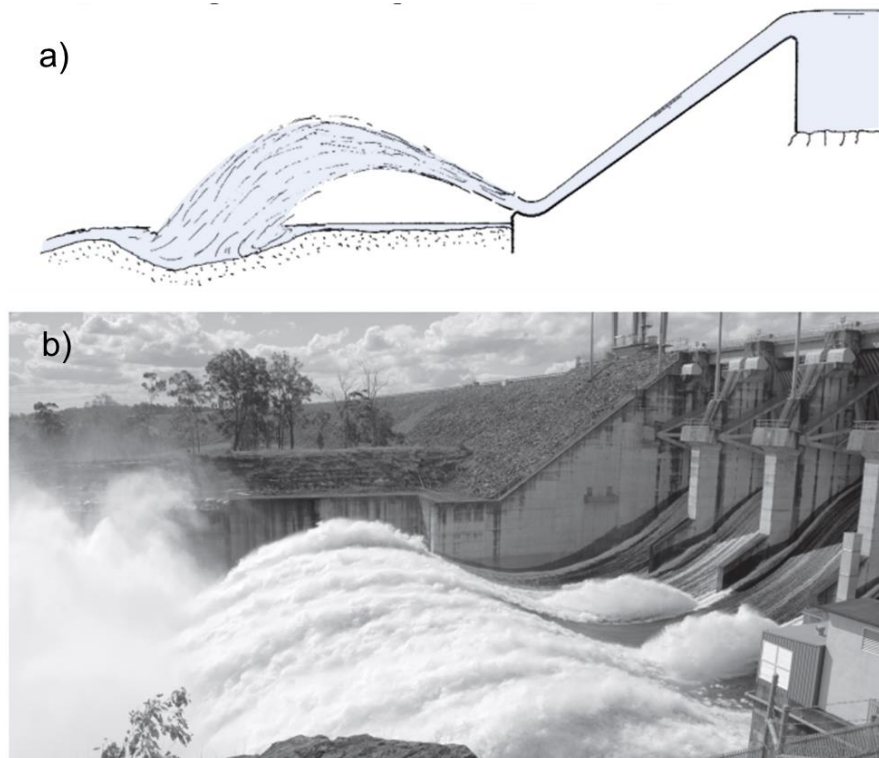


Fotne: Adaptado de Yu *et al* (2008).

3.3 Jatos de Escoamento em Quedas

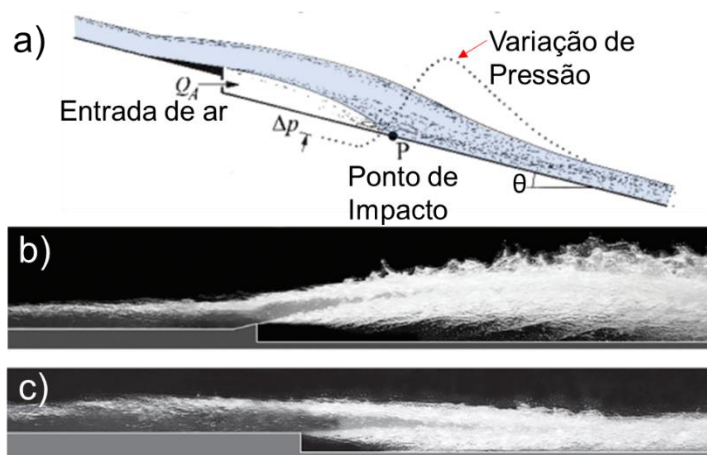
Apesar de apresentada como a situação problema a ser analisada neste trabalho, jatos são, por vezes, projetados em estruturas hidráulicas, como dissipações por saltos de ski, vertedouros de queda livre, estruturas aeradoras. Da Figura 34 até a Figura 36 são apresentadas algumas estruturas com a ocorrência de jatos projetados.

Figura 34 – Dissipador de energia por salto de Ski: a) esquema representativo; b) exemplo da Barragem Wivenhoe, rio Brisbane, Queensland, Austrália.



Fontes: a) Hager *et al* (2020); b) Chanson (2015).

Figura 35 – Aeradores de canais extravasores: a) representação esquemática da atuação do aerador; aerador em modelo reduzido b) com declividade de entrada e c) sem declividade de entrada.



Fonte: Adaptado de Hager *et al* (2020).

Na obra *Design of Small Dams* (USBR, 1987) é apresentada uma metodologia de cálculo da projeção de jatos de escoamentos livres baseada no movimento de balística de corpos arremessados sofrendo ação da aceleração da gravidade. A metodologia consiste em utilizar toda a energia específica do escoamento prestes a entrar em movimento de jato como carga cinética de partida do jato.

Figura 36 – Exemplos de jatos como estruturas extravasores de queda livre: a) Barragem Morrow Point, rio Colorado, Cimarron, EUA; b) Barragem Irapé, rio Jequitinhonha, Grão Mogol, Brasil; c) Barragem Stausee Gibidum, rio Massa, Naters, Suíça.



Fonte: a) Acervo USBR, acesso em 22/05/2023; b) Da Silva (2014); c) Usuário Ppr na Wikipedia Alemã, acesso em 22/05/2023.

Wahl *et al.* (2008) discutiram a coerência da fórmula apresentada na obra supracitada, argumentando que a utilização de toda a energia específica como equivalente à velocidade de saída do jato levaria ao superdimensionamento da velocidade inicial e do jato, o que os autores confirmam com dados observados em protótipos Wahl *et al.* (2008). Os autores apresentam uma proposta de correção da metodologia, utilizando apenas a velocidade do fluxo prestes a entrar em movimento como influente na trajetória, resultando na seguinte trajetória apresentada na equação (20):

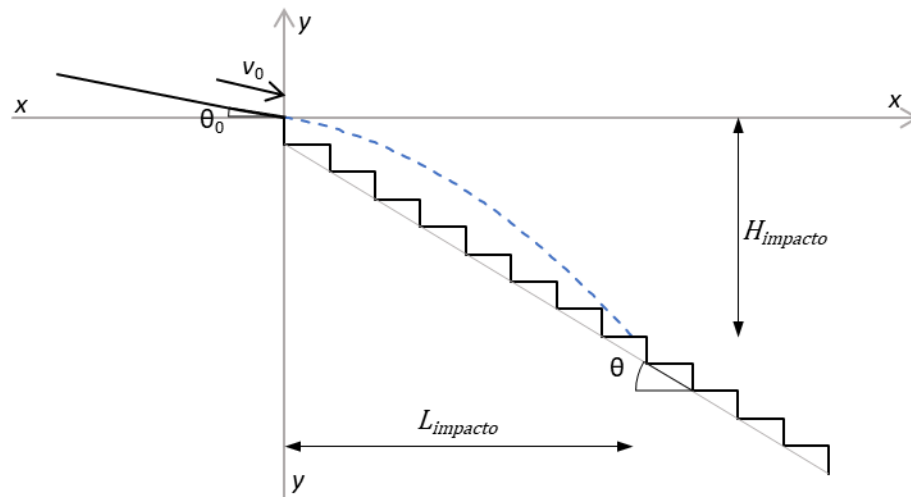
$$Y = -X \cdot \tan(\theta_0) - \frac{g \cdot X^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \theta_0} \quad (20)$$

Em que:

- Y representa as coordenadas do jato em relação ao eixo vertical (m);
- X representa as coordenadas do jato em relação ao eixo horizontal (m);
- θ_0 é o ângulo formado entre a horizontal e a direção da velocidade na entrada do canal;
- v_0 é a velocidade do escoamento prestes a entrar e movimento de jato (m/s).

A Figura 37 ilustra as variáveis envolvidas no cálculo da trajetória do jato, ilustrada a partir de um esboço de uma estrutura em degraus a jusante do lançamento do jato.

Figura 37 – Variáveis envolvidas no cálculo da trajetória do descolamento do jato.



Considerando-se uma descida de declividade θ , com uma velocidade de entrada inclinada em θ_0 , o ponto do ponto de impacto do jato, definido por $L_{impacto}$ e $H_{impacto}$ em função das condições de entrada do fluxo poderia ser explicitada na equações (21) e (22) obtidas a partir da equação da trajetória (20):

$$L_{impacto} = \frac{(tg(\theta) - tg(\theta_0)) \cdot 2}{g} v_0^2 \cdot \cos^2(\theta_0) + l/2 \quad (21)$$

$$H_{impacto} = L_{impacto} \cdot tg(\theta) + \frac{gL_{impacto}^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2(\theta_0)} \quad (22)$$

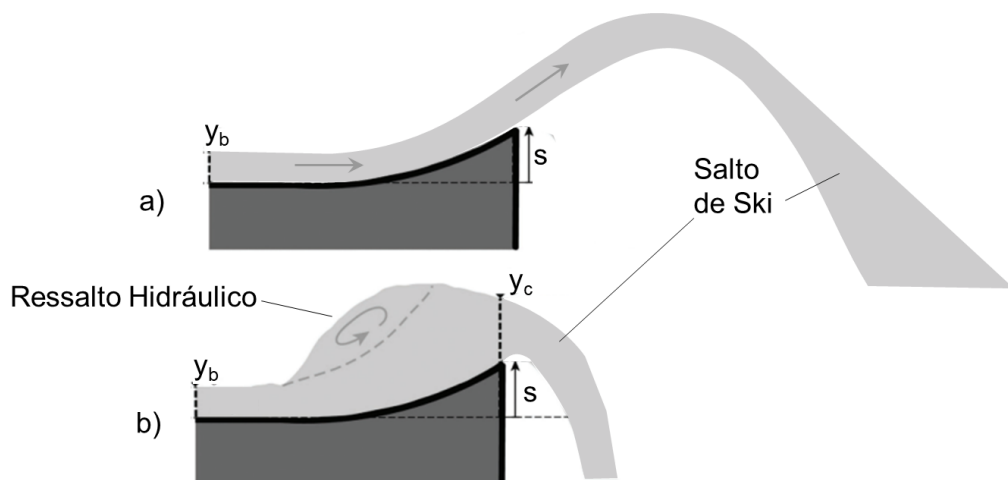
Para condições de entrada horizontais ($\theta_0=0^\circ$), a Equação (20) se reduz à segunda parcela, com o termo $\cos^2\theta_0=1$.

Hager *et al* (2020) apresentam que as equações derivadas do movimento balístico para jatos, como mostrado anteriormente, negligenciam as interações do jato com o ar e a desintegração do próprio jato. Os autores argumentam que o efeito é presenciado de maneira mais pronunciada em velocidades de saída do jato altas (da ordem de 13 m/s).

Os autores alertam ainda sobre a possibilidade de que as rampas projetadas para a ocorrência do salto de ski, que tem suas dimensões feitas relacionadas à vazão de projeto, podem promover uma condição que gera um ressalto hidráulico logo antes da saída do jato. A Figura 38 a) apresenta a condição de projeto, enquanto a Figura 38 b) apresenta a condição de vazão mais baixa, que promove um ressalto hidráulico na região da rampa do salto de ski, diminuindo o efeito do salto de ski.

O presente trabalho tenta explorar justamente tal ocorrência do ressalto hidráulico na parte lisa do canal, visando evitar o jato que ocorreria na entrada do segundo trecho em degraus.

Figura 38 – a) condição de projeto para o salto de ski; b) condição de vazão baixa, com profundidade de jusante provocando um ressalto hidráulico.



Fonte: Adaptado de Hager *et al* (2020).

3.4 Ressalto Hidráulico

Quando o escoamento passa do regime supercrítico para o regime subcrítico, acontece o chamado fluxo bruscamente variado, com a ocorrência do fenômeno do ressalto hidráulico.

O ressalto hidráulico é o recurso básico mais usado para dissipar o excesso de energia cinética a jusante de um vertedouro. Ele corresponde a um descontínuo e turbulento fluxo em canais livres. Segundo Hager *et al.* (2020), as principais características do ressalto hidráulico são:

- Fluxo extremamente turbulento;
- Pulsações na região do ressalto;
- Arrasto de ar no pé do ressalto e liberação de ar no fim;
- Geração de *spray* de escoamento e produção de som;
- Dissipação de energia devido à produção de turbulência;
- Potencial erosivo e geração de ondas a jusante.

Da Figura 39 até a Figura 42 são apresentadas algumas imagens de ressaltos hidráulicos atuando como dissipadores de energia e sua modelagem física.

Figura 39 – Canal extravasor com bacia de dissipação por ressalto hidráulico da Barragem Limestone no Long Spruce Generating System, rio Nelson - Canadá.



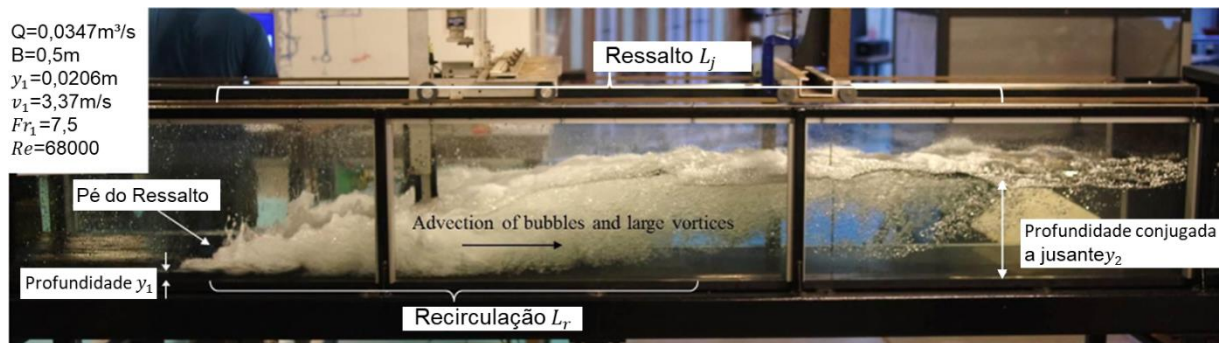
Fonte: Adaptado de Hager *et al.* (2020).

Figura 40 – Ressalto hidráulico a jusante da San Antony Falls no rio Mississippi, Minneapolis – Minnessota (EUA).



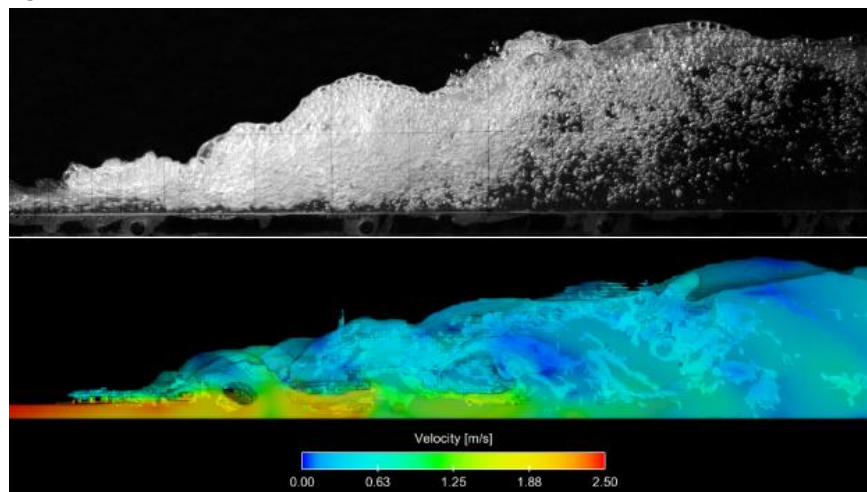
Fonte: Por Wahkeenah na Wikipedia (Em inglês), em abril, 2001. (Domínio público).

Figura 41 – Ressalto hidráulico e suas variáveis em modelo reduzido na Universidade de Brisbane, Queensland, Austrália.



Fonte: Adaptado de Hang e Chanson (2015).

Figura 42 – Ressalto hidráulico em laboratório e em modelo numérico.



Fontes: Fotografia de Valero *et al.* (2018); modelo de Bayon *et al.* (2016).

3.4.1 Características do Ressalto

O ressalto hidráulico pode ser caracterizado de forma analítica, considerando-se a conservação da quantidade de movimento entre a seção inicial e a seção final do

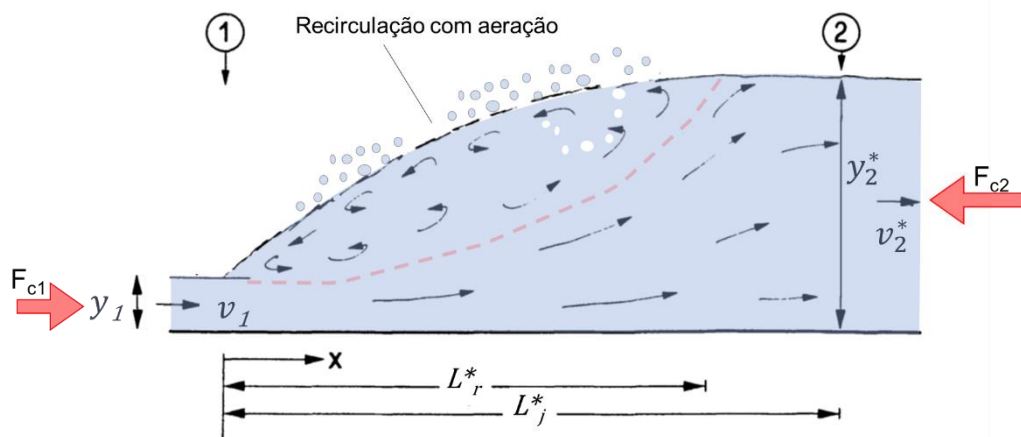
ressalto. Como destacado anteriormente, o fato de as linhas de corrente não se encontrarem paralelas ao longo do fluxo impossibilita a utilização da Equação de Bernoulli para caracterização do ressalto.

Bélanger (1841, *apud* CHANSON *et al.*, 2015) foi o primeiro a derivar a equação de equilíbrio entre as forças envolvidas no ressalto hidráulico, apresentadas na Figura 43. As relações entre as profundidades do ressalto podem ser obtidas por meio da aplicação do princípio da conservação da quantidade de movimento (equilíbrio entre as forças atuantes) entre as seções inicial (1) e final (2) do ressalto.

A relação entre as profundidades que compõem o ressalto hidráulico é apresentada na equação (23):

$$\frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (23)$$

Figura 43 – Variáveis envolvidas na ocorrência do ressalto hidráulico.



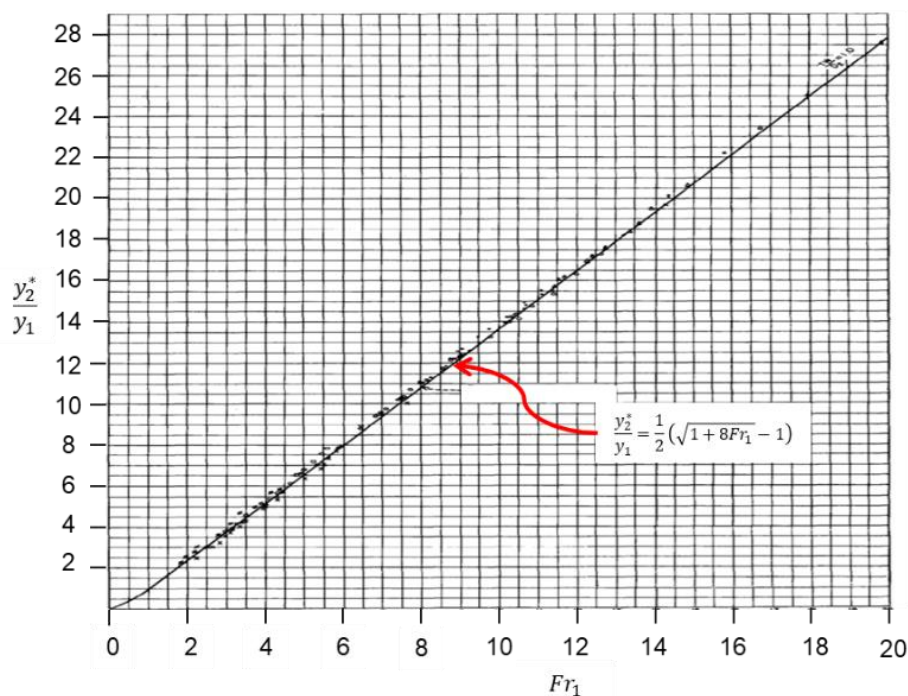
Fonte: Adaptado de Hager (1992).

Em que Fr_1 representa o número de Froude na seção de entrada do escoamento. Tal relação analítica, derivada no século XIX por Jean-Baptiste Bélanger, apresenta forte correlação com dados medidos em laboratório (BRADLEY e PETERKA (1957); RAJARATNAM (1967), CHANSON (2015), HAGER (1992)), como apresentado na Figura 44.

Já o comprimento do ressalto é definido do início da recirculação até o ponto onde o fluxo se estabiliza sem aeração, enquanto o comprimento da recirculação é a distância a partir do início do ressalto na qual é visualizada recirculação do escoamento (HAGER, 1993). As variáveis L_r^* e L_j^* , em geral, são definidas por meio de relações experimentais e várias relações são encontrados na literatura, podendo obter-se em função da profundidade conjugada do ressalto y_2^* , da profundidade inicial do ressalto y_1 e/ou do número de Froude da condição de entrada (Fr_1).

Hager *et al* (1990) e Conterato (2022) apresentam equações para a determinação do comprimento total do ressalto e para a determinação do tamanho da região de recirculação (rolo do ressalto), que são apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2.

Figura 44 – Correlação entre a Equação de Bélanger (23) e testes experimentais com várias vazões em 6 diferentes canais, apresentado por Peterka (1978), para ressalto “naturais”.



Fonte: Adaptado de Peterka (1978).

Da equação (24) até a equação (26), somadas às equações (28) e (29), nota-se que há grandes diferenças entre as formulações disponíveis na literatura, sendo todas as relações obtidas a partir da diferença entre as profundidades y_2 e y_1 , mas diferentes entre si.

Já nas formulações para o dimensionamento da região de recirculação (rolo) do ressalto, nota-se que há uma maior variação das dependências para o cálculo, sendo

algumas dependentes da profundidade a montante, da sua profundidade conjugada e/ou do número de Froude a montante do ressalto.

Tabela 1 – Formulações para determinação do comprimento total do ressalto (L_j^*).

Fonte	Fórmula	
Riegel e Beebe (1917)	$L_j^* = 5. (y_2^* - y_1)$	(24)
Aravin (1935)	$L_j^* = 5,4. (y_2^* - y_1)$	(25)
Elevatorski (1959)	$L_j^* = 6,9. (y_2^* - y_1)$	(26)
Hager (1992)	$L_j^* = y_1 \left[220. \operatorname{tgh} \left(\frac{Fr_1 - 1}{20} \right) \right]$	(27)
Marques <i>et al</i> (1997)	$L_j^* = 8,5. (y_2^* - y_1)$	(28)
Teixeira (2003)	$L_j^* = 8. (y_2^* - y_1)$	(29)
Simões (2008)	$L_j^* = y_2^* \cdot \frac{Fr_1^2 - 81,85. Fr_1 + 61,13}{-0,62 - 10,71. Fr_1}$	(30)

Tabela 2 – Formulações para a determinação do comprimento de recirculação do ressalto (L_r^*).

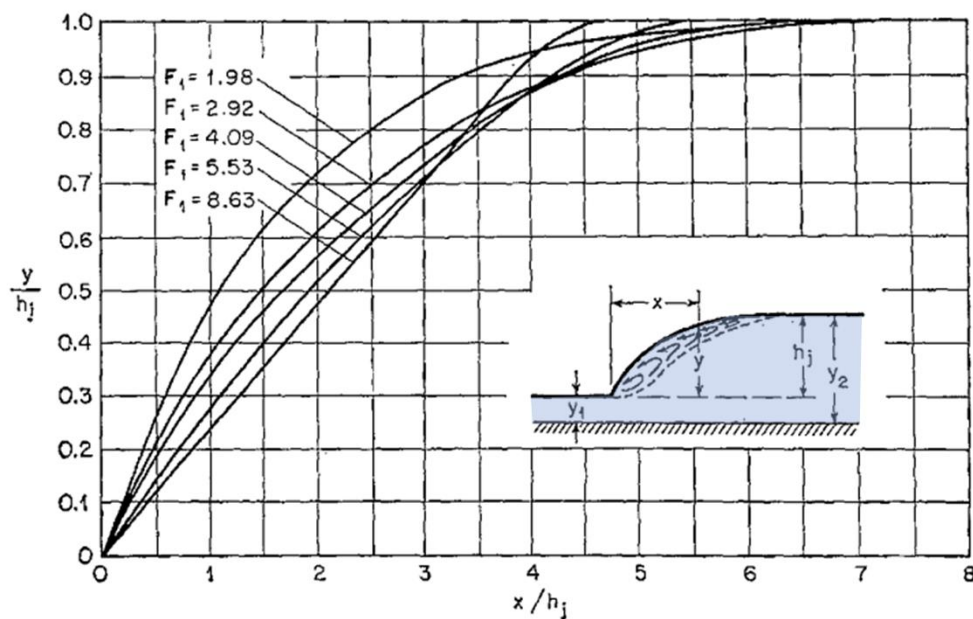
Fonte	Fórmula	
Safranez (1929)	$L_r^* = 6. y_1. Fr_1$	(31)
Pietkowski (1932)	$L_r^* = 5,9. y_1. Fr_1$	(32)
Douma (1942) (<i>apud</i> Conterato, 2022)	$L_r^* = 3. y_2^*$	(33)
Peterka (1984)	$L_r^* = 4,5. y_2^*$ para $4,5 < Fr_1 < 9$	(34)
Hager (1992)	$L_r^* = y_1 \left[-12 + 160. \operatorname{tgh} \left(\frac{Fr_1}{20} \right) \right]$ para $\frac{y_1}{B} < 0,1$	(35) ³
	$L_r^* = y_1 \left[-12 + 100. \operatorname{tgh} \left(\frac{Fr_1}{12,5} \right) \right]$ para $0,1 < \frac{y_1}{B} < 0,7$	(36) ⁴

³ B representa a largura da base do canal em metros.

Fonte	Fórmula	
Marques <i>et al</i> (1997)	$L_r^* = 6 \cdot (y_2^* - y_1)$	(37)

Outra característica do ressalto hidráulico é o perfil de seu desenvolvimento desde a profundidade inicial y_1 até a profundidade final y_2^* . Chow (1959) apresenta uma análise de perfis de desenvolvimento de ressaltos hidráulicos em função do número de Froude do escoamento no início do ressalto, como apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Perfis adimensionais da evolução do ressalto hidráulico em função da variável $h_j = (y_2^* - y_1)$ e do Fr_1 .



Fonte: Adaptado de Chow (1959).

Já Hager (1992) apresentou uma relação entre as variáveis para o perfil do ressalto hidráulico (ao longo dos eixos y e x) como apresentado na equação:

$$\frac{y - y_1}{y_2^* - y_1} = \tanh\left(1.5 \cdot \frac{x}{L_r^*}\right) \quad (38)$$

Destaca-se que a equação anterior leva em conta as variações de Fr_1 por meio da consideração do comprimento da recirculação L_r^* do ressalto, que, por sua vez, é função do Fr_1 (Tabela 2).

As formulações apresentadas até então foram obtidas de estudos nos quais a condição de jusante propicia uma formação de um ressalto “natural”.

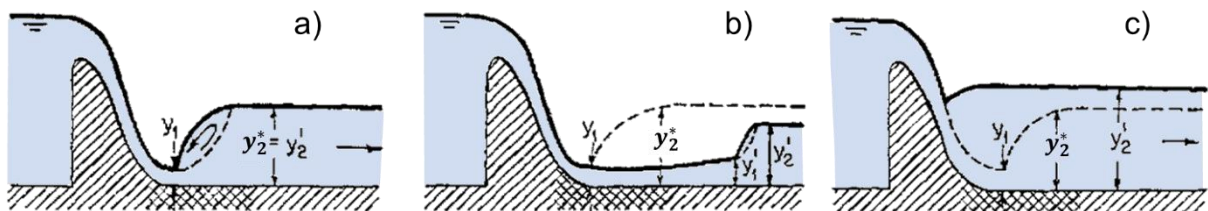
Henderson (1966) e Hager (2020) afirmam que o ressalto em sua condição natural (Figura 43) dificilmente ocorre de maneira espontânea em estruturas projetadas. A seguir, são apresentadas as consequências de condições a jusante diferentes daquelas de equilíbrio “natural” para o ressalto.

3.4.2 Condições de Jusante de Controle do Ressalto

O ressalto hidráulico necessita de condições de jusante que propiciem a ocorrência da profundidade y_2^* para o equilíbrio das forças. Para condições de jusante que não promovem a ocorrência do ressalto, Chow (1959) apresenta uma análise da movimentação do ressalto em duas possibilidades de movimentação do ressalto, como apresentado na Figura 46.

A Figura 46 a) apresenta a condição de ocorrência do ressalto natural, explorada anteriormente, em que a profundidade de jusante y_2' coincide exatamente com a condição y_2^* esperada para equilíbrio do ressalto pela equação (23).

Figura 46 – Condições de jusante e suas consequências para o posicionamento do ressalto hidráulico a jusante de um canal rápido.



Fonte: Adaptado de Chow (1959).

Já para a condição apresentada na Figura 46 b), a profundidade de jusante y_2' é inferior a profundidade y_2^* . O escoamento se desenvolve a partir do pé da descida até que a profundidade do fluxo se desenvolva do y_1 até y_1' , condição que atenderia à equação (23) com y_2' . Dessa forma o ressalto se desloca para jusante da estrutura, tendo suas características diferentes daquela previsto na condição anterior (altera-se os valores a serem utilizados para as variáveis y_1 e Fr_1 na Tabela 1 e na Tabela 2 por y_1' e Fr_1').

Já a Figura 46 c) apresenta a condição contrária: quando a profundidade de jusante y_2' é superior a profundidade de equilíbrio y_2^* . Nesse caso, a profundidade de jusante “afoga” o ressalto no pé da descida.

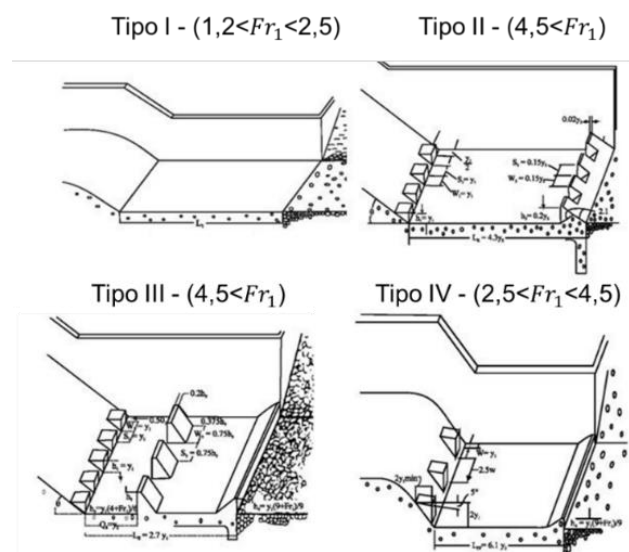
Portanto, a condição de jusante promove alterações na ocorrência e posicionamento do ressalto hidráulico a jusante de uma descida. Como a condição de jusante é de grande variabilidade em condições naturais, uma prática comum na engenharia é a utilização de obstáculos no interior da bacia de dissipação que podem promover seu controle e alteração das três grandezas relacionadas à forma de ocorrência do ressalto (y_2^* , L_r^* e L_j^*).

3.4.3 Ressaltos Controlados por Obstáculos

Peterka (1978) estudou diferentes configurações de bacia de dissipação por ressalto hidráulico, sendo quatro delas apresentadas na obra *Design of Small Dams* (1987). A utilização de cada um dos tipos visa otimizar a dissipação de energia, minimizando o comprimento do ressalto L_j . Para baixos números de Froude na condição de entrada ($<1,2$), os autores alegam que não há necessidade de obstáculos, sendo possível prever as características do ressalto com as equações (23) e aquelas apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2.

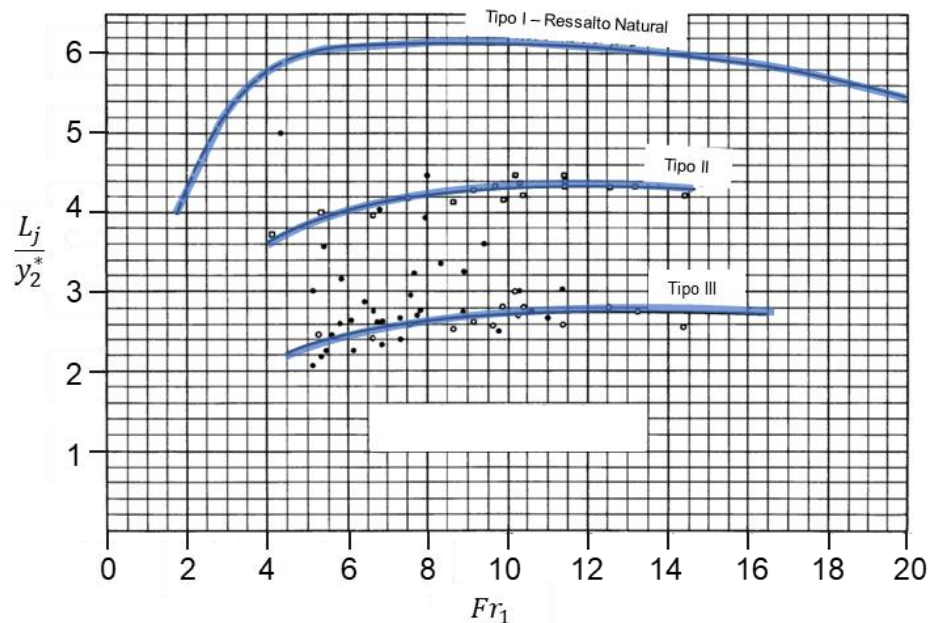
A Figura 47 ilustra as bacias de dissipação apresentadas nas obras, enquanto a Figura 48 apresenta a comparação entre os comprimentos do ressalto L_j para diferentes tipos de bacia em função do número de Froude do início do ressalto.

Figura 47 – Variações das bacias de dissipação recomendadas em função do número de Froude da entrada.



Fonte: Adaptado de USBR (1987).

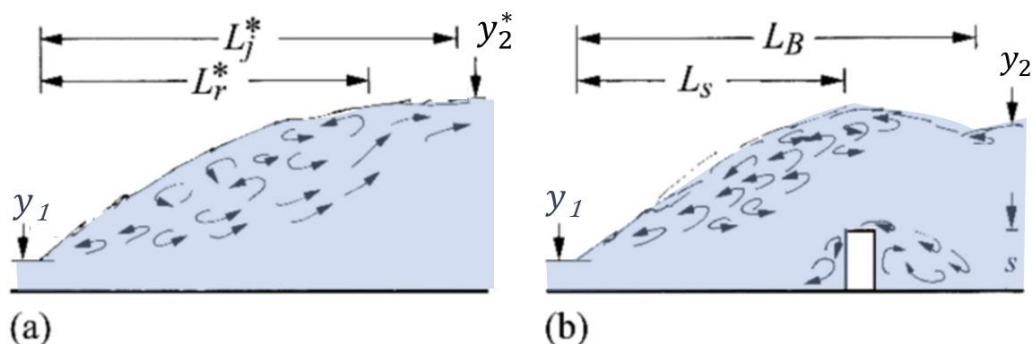
Figura 48 – Comparação dos comprimentos do ressalto para diferentes tipos de bacia de dissipação em função do número de Froude do início do ressalto.



Fonte: Adaptado de Peterka (1978).

Em extravasores de barragens de pequeno porte é comum a utilização de soleiras terminais. Tais soleiras são obstáculos verticais, posicionados a partir da entrada do escoamento, à uma distância L_s , diminuindo os valores das variáveis relacionadas à ocorrência de um ressalto sem obstáculos (Figura 43), como apresentado na Figura 49.

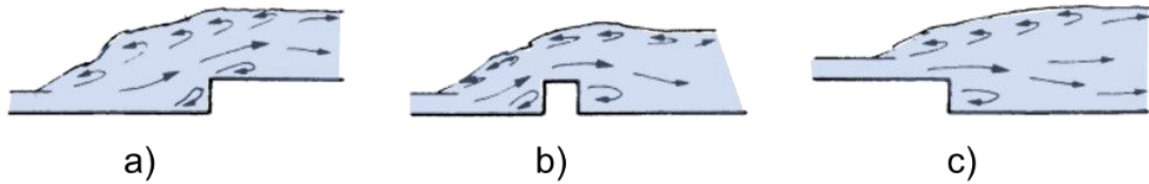
Figura 49 – Comparação entre as variáveis envolvidas no ressalto para: a) ressalto natural e b) ressalto controla por uma soleira. O obstáculo diminui tanto o comprimento quanto a profundidade conjugada a jusante necessária para o equilíbrio do ressalto.



Fonte: Hager et al (2020).

Hager (1998) apresenta obstáculos mais simples que aqueles apresentados por Peterka (1978), resumidos em três tipos, como mostrado na Figura 50.

Figura 50 – Tipos de obstáculo de controle de ressalto: a) degrau positivo, b) soleira e c) degrau negativo.

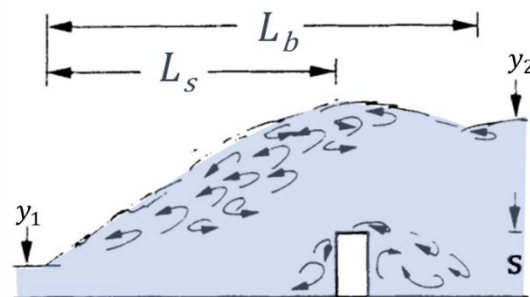


Fonte: Adaptado de Hager (1992).

Neste trabalho, foi feita a análise da utilização de uma soleira entre os trechos de descida estudados (Figura 50 b)). Para ressalto controlado por soleiras, Hager e Li (1992), baseando-se nos experimentos de Hager e Bretz (1986), apresentaram a relação entre as profundidades conjugadas com e sem a soleira (y_2 e y_2^*), o tamanho da soleira s e as razões entre a distância da soleira e o comprimento da recirculação em um ressalto natural (L_s e L_r^*) da equação (39),:

$$y_2 = y_2^* - 0,7s^{0,7} + 3s \left(1 - \frac{L_s}{L_r^*}\right)^2 \quad (39)$$

Figura 51 – Variáveis que envolvem o ressalto com a presença de uma soleira terminal.



Fonte: Adaptado de Hager (1992).

A utilização da soleira reduz tanto a profundidade a jusante, quanto o comprimento do ressalto, quando comparados com os valores de ressalto naturais. O comprimento total bacia recomendada L_b depende do comprimento do ressalto completo L_j^* sem condições de controle, como apresentado na equação (40):

$$\frac{L_b}{L_j^*} = \frac{s}{L_s} \left(1 - \frac{L_s}{L_r^*}\right)^2 \quad (40)$$

É necessário, primeiramente, caracterizar o ressalto sem a interferência da soleira (natural), para posterior obtenção do valor de L_b de forma a se conformar com a condição de jusante y_2 .

Os autores recomendam a otimização e o limite para os valores de soleira apresentados nas equações (41) e (42):

$$\frac{s_{ótimo}}{y_1} = 1 + \frac{1}{200} Fr_1^{2,5} \quad \text{para } 3 < Fr_1 < 10 \quad (41)$$

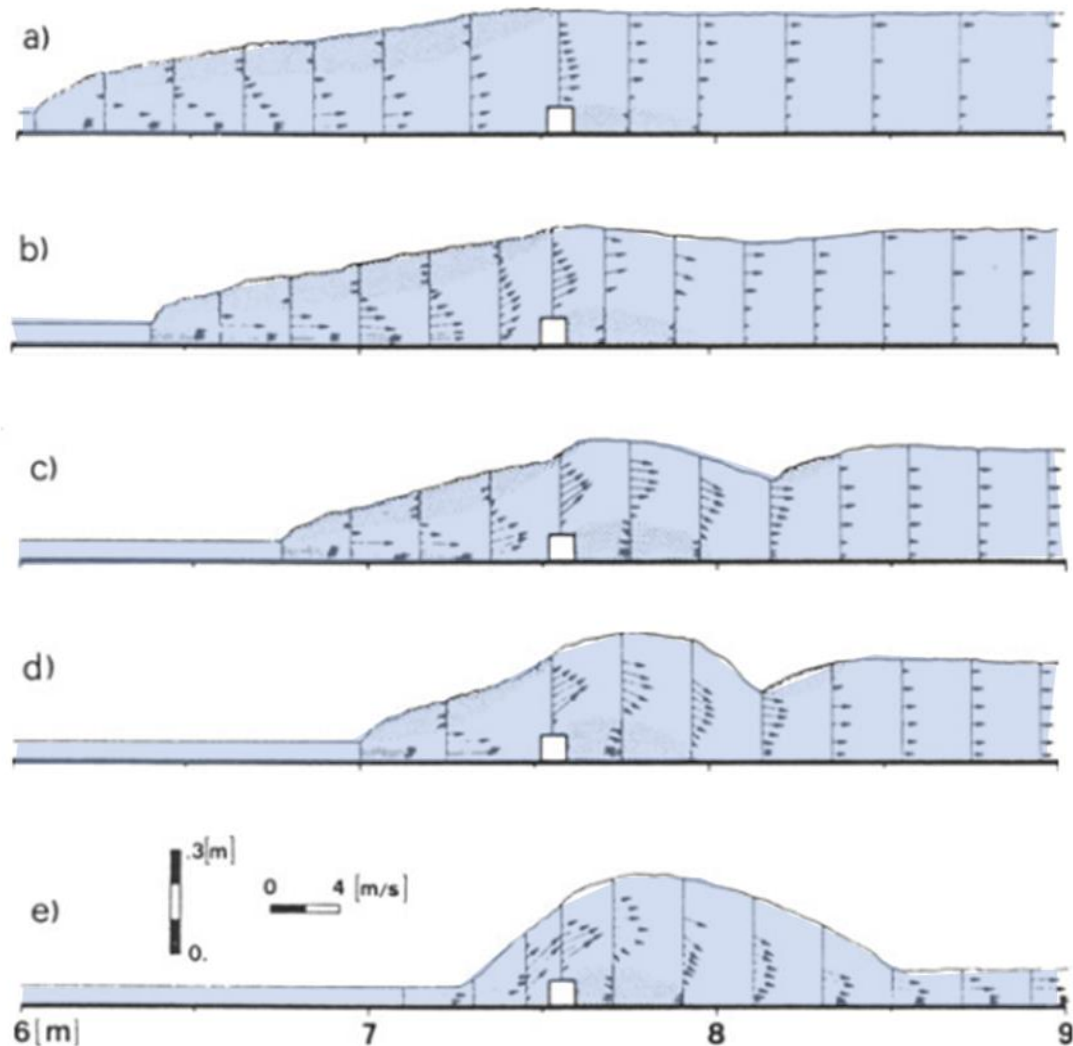
$$\frac{s_{máximo}}{y_1} = \frac{1}{6} Fr_1^{5/3} \quad (42)$$

Como as condições de jusante dificilmente são atendidas para todas as curvas de vazão possíveis em uma estrutura (CHOW, 1959; HAGER 1992), é importante fazer uma análise da aceitabilidade da variação do nível de jusante em relação ao nível esperado para o ressalto.

Hager (1992) apresenta cinco tipos diferentes de ocorrências de ressalto controlado por soleira com base no nível de água a jusante, como mostrado na Figura 52. Considerando-se que todas as figuras apresentam ressaltos com a mesma condição inicial (Fr_1), nota-se uma grande diferença no desenvolvimento do ressalto em função da condição de nível de água a jusante.

Para o ressalto tipo A, a recirculação (L_r) termina logo na seção da soleira. Diminuindo um pouco a profundidade do escoamento a jusante, o início do ressalto se move para jusante e são observadas velocidades altas acima da soleira, no denominado ressalto tipo B. Essa diminuição pode se dar até que haja a ocorrência de um novo ressalto, no chamado tipo B-mínimo. Quando o escoamento se desprende da soleira e se choca com o piso a jusante dela, tem-se o ressalto tipo C. Por fim, quando as condições de jusante são críticas ou supercríticas, ocorre uma interferência no escoamento do tipo “onda”, que promove uma perda de energia no escoamento, mas não o desenvolvimento de um ressalto hidráulico. O autor, no entanto, não indica parâmetros para a correlação entre as condições de jusante e os tipos de ressalto.

Figura 52 – Tipos de ressalto em função da condição de jusante (todos apresentam a mesma condição de montante): a) Tipo A; b) Tipo B; c) Tipo B-mínimo; d) Tipo C; e) Ondulação do Escoamento acima da soleira.



Fonte: Hager (1992).

A análise da condição de jusante é fundamental para a avaliação da ocorrência do ressalto hidráulico. O ressalto em sua formulação “natural”, apresentado no item 3.4.1, apenas ocorre quando as condições de jusante do escoamento propiciam o equilíbrio entre a profundidade de início do ressalto (y_1 e v_1) e de jusante (y_2 e v_2), o que é raro nas análises de engenharia. Portanto, torna-se importante as ocorrências de ressalto em condições de jusante adversas, como apresentado neste trabalho, no qual a condição a jusante da soleira é uma nova descida em degraus.

3.5 Extravadores do tipo *Ski-Jump-Stepped*

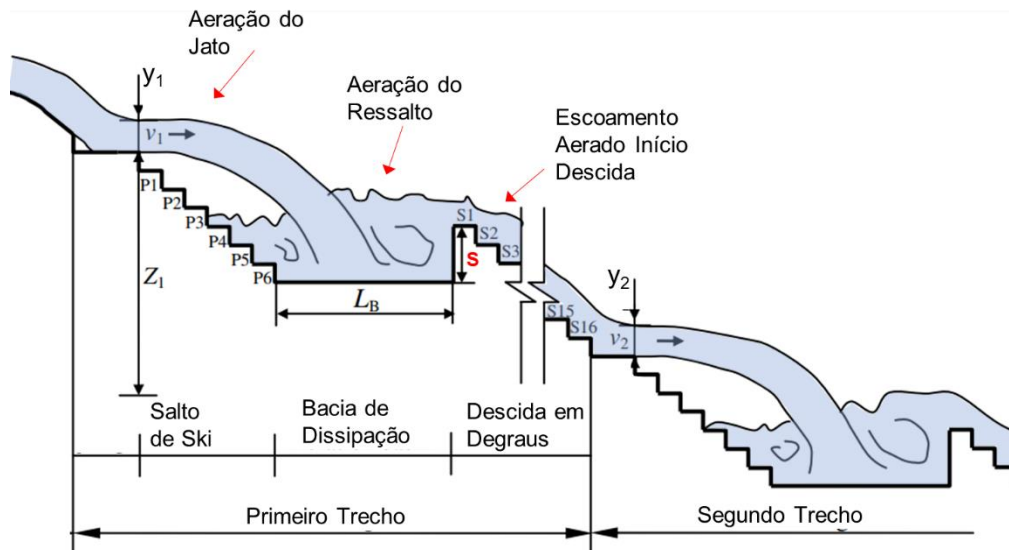
Utilizando-se dos três tipos de escoamentos explorados até aqui neste trabalho, Qian *et al* (2016) apresentaram um conceito inovador para a resolução do problema de

ocorrência de cavitação em extravasores. A cavitação ocorre em escoamentos não aerados, correspondendo a mudança de fase pontual da água em escoamento para vapor e a posterior “implosão” da bolha de vapor, causando danos ao canal. Sabe-se que há um limite de vazão específica (razão entre a vazão e a base da seção do canal) para o início da ocorrência de cavitação (HAGER *et al*, 2020), devido à não aeração do escoamento nos trechos iniciais dos vertedouros em altas vazões (ex. Figura 15).

Portanto, buscando promover o aumento da aeração do escoamento, Quin *et al* (2016) propuseram a utilização de extravasores com trechos em saltos de ski e bacias de dissipação seguidos de trechos em degraus ao longo do extravasor. A este tipo de extravasor, que usa do salto de ski e da bacia de dissipação ao longo da estrutura ao invés do final da estrutura, deu-se o nome de *Ski-Jump-Stepped*.

A Figura 53 apresenta o conceito os tipos de escoamentos explorados até aqui, o salto de ski escapando ao primeiro trecho em degraus, a utilização de uma bacia de dissipação anterior ao segundo trecho em degraus, com uma soleira de tamanho S entre a bacia a descida.

Figura 53 – Ilustração esquemática do extravasor *Ski-Jump-Stepped* (QIAN *et al*, 2016).



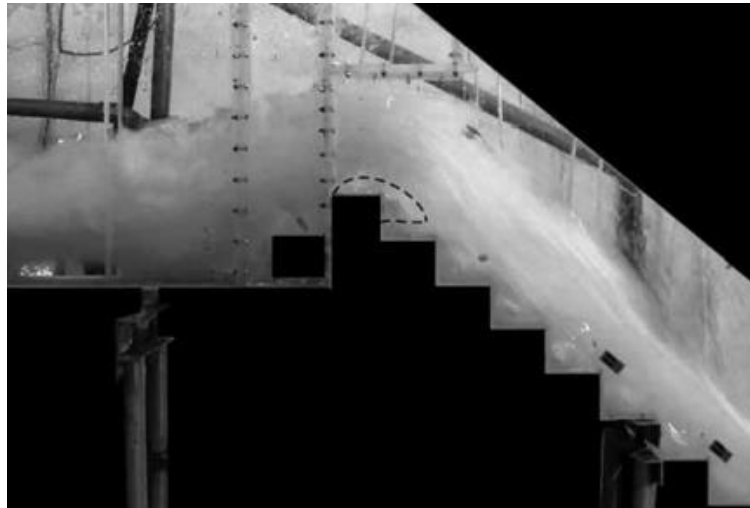
Fonte: Adaptado de Qian *et al* (2016).

Os canais extravasores *Ski-Jump-Stepped* não apenas proporcionam maior aeração, mas também maior dissipação de energia que os canais equivalentes com declividades únicas em degraus (WU *et al*, 2020). No entanto, ambos estudos

destacam a ocorrência de efeitos colaterais, como desgaste da estrutura no ponto de impacto dos jatos e descolamento do escoamento acima da soleira.

Zhou *et al* (2022) investigaram a ocorrência do descolamento do escoamento acima da soleira (Figura 54), condição que é discutida também neste trabalho (item 5.1.2). Os autores propuseram uma correlação para determinação da vazão a partir da qual ocorreria o descolamento do escoamento na soleira, mas a correlação mostrou-se matematicamente inconsistente e não foi possível utilizá-la neste trabalho.

Figura 54 – Ocorrência de descolamento do escoamento após o trecho em bacia de dissipação de um modelo de canal extravasor *Ski-Jump-Stepped*.



Fonte: Zhou (2022).

Os estudos em extravasores do tipo *Ski-Jump-Stepped* ainda não foram documentados em estruturas reais, sendo estudados em laboratórios em modelos reduzidos. Os estudos com os extravasores *Ski-Jump-Stepped*, assim como a análise do escoamento em degraus, a análise do escoamento em jatos e a análise do ressalto hidráulico, baseiam-se nas diversas relações proveniente de modelos físicos, com formulações obtidas a partir dos dados coletados nestes modelos.

A seguir, são feitas considerações a respeito da prática da modelagem física, técnica necessária para o estudo da utilização de soleiras nas mudanças de direção de canais em degraus, buscando evitar a ocorrência de jatos entre os trechos.

3.6 Modelagem Física e a Medição do Escoamento

3.6.1 Análise Dimensional

Para problemas de engenharia nos quais há variáveis que se correlacionam de maneira não previsível analiticamente, é necessário obter tais correlações por meio de experimentos. Segundo Fox *et al.* (2011) correlação entre essas variáveis obtidas da experimentação pode ser feita de maneira direta entre as variáveis de interesse, ou por meio de manipulações matemáticas de suas correlações, buscando correlações homogêneas.

Tomando o exemplo apresentado em Fox *et al.* (2011): Para uma esfera dentro de um fluido em escoamento, determinar qual a relação da força aplicada na esfera pela água com a velocidade do escoamento. Testando-se várias vazões, obtendo as suas velocidades (V), e medindo-se a força na esfera (F), pode-se criar uma relação direta como a equação (43):

$$F = \omega \cdot V^\varphi \quad (43)$$

No qual ω e φ são coeficientes de ajuste dos dados. Nota-se que velocidade e força não têm dimensões iguais (kg.m/s² e m/s no Sistema Internacional, respectivamente) e que ω e φ “carregam” em si o efeito de várias outras variações, que vão do tamanho da esfera à natureza do líquido. Logo, o ajuste obtido atenderia à situação analisada, mas a mudança de qualquer variável, ou da escala da análise, invalida sua utilização. Tal correlação é chamada de não homogênea (variáveis F e V não têm as mesmas unidades de medida).

A manipulação matemática para a obtenção de relações homogêneas é parte da chamada de Análise Dimensional. Segundo White (2010), a Análise Dimensional é um método para reduzir o número e a complexidade das variáveis experimentais que afetam um dado fenômeno físico.

Nesse contexto, o chamado teorema Pi de Buckingham, introduzido por Buckingham em 1914 foi o marco para a análise dimensional, apesar de inicialmente as análises serem apresentadas por Leonhard Euler em 1765 e o princípio da homogeneidade ter sido apresentado por Fourier em 1822 (WHITE, 2011).

O teorema Pi trata da análise das variáveis envolvidas no problema e das suas dimensões (comprimento em metros, tempo em segundos, massa em kg e temperatura em Kelvin, por exemplo), de forma a entender como as tais variáveis “anulam” suas dimensões. O Teorema diz que em um problema com N elementos, que em conjunto possuem n dimensões diferentes, pode-se esperar que haja $N-n$ relações adimensionais que explicam o fenômeno (WHITE, 2011).

As relações adimensionais são chamadas pelo autor de números π . No exemplo da força atuando na esfera em um escoamento, as variáveis envolvidas poderiam ser:

- Força atuando na esfera (F) (massaXcomprimento/tempo²)
- Massa específica do líquido (ρ) (massa/comprimento³);
- Velocidade do escoamento (V) (comprimento/tempo);
- Diâmetro da esfera (D) (comprimento); e
- Viscosidade do líquido (μ) (comprimento²/tempo).

Portanto, com $N=5$ variáveis e $n=3$ dimensões (massa, comprimento e tempo), espera-se que haja duas relações adimensionais (as variáveis π) que representem a variação da força que atua na esfera em função da mudança de fluido, diâmetro da esfera, velocidade do escoamento.

Segundo uma abordagem apresentada por Cheng (2009), apresentada da equação (44) à (46), as variáveis π e sua relação podem ser descritas por:

$$\pi_1 = \frac{F}{\rho \cdot V^2 \cdot D^2} = C_D \rightarrow \text{coeficiente de arrasto da esfera (adimensional)} \quad (44)$$

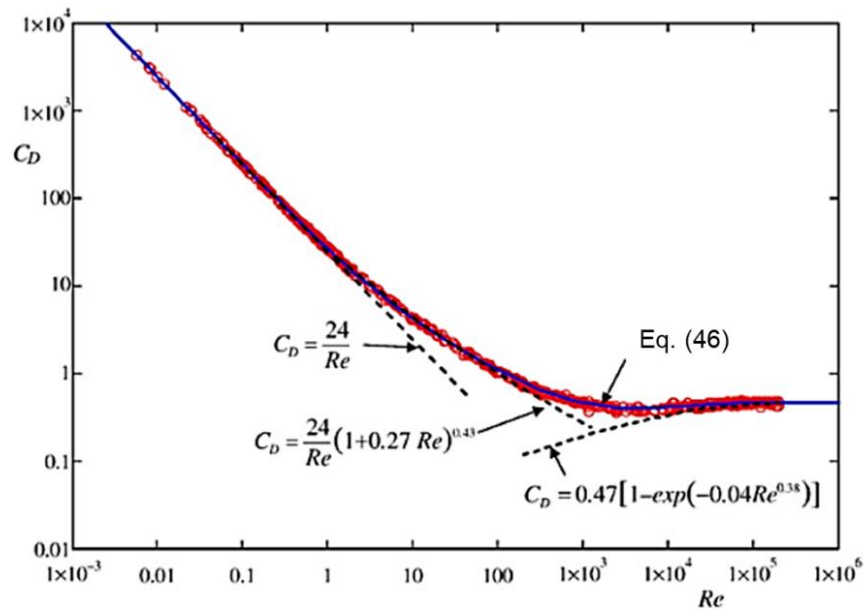
$$\pi_2 = \frac{\rho \cdot V \cdot R}{\mu} = Re \rightarrow \text{número de Reynolds (adimensional)} \quad (45)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,27Re)^{0,43} + 0,47 \left[1 - e^{-0,04Re^{0,38}} \right] \rightarrow \text{Cheng (2009)} \quad (46)$$

As correlações foram derivadas de dados experimentais, como apresentado na Figura 55. Nota-se que para qualquer diâmetro, viscosidade, velocidade e massa específica

do líquido pode-se determinar o coeficiente de arrasto da esfera e, conseqüentemente, a força atuando na esfera.

Figura 55 – Correlação entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds em uma esfera.



Fonte: Adaptado de Cheng (2009).

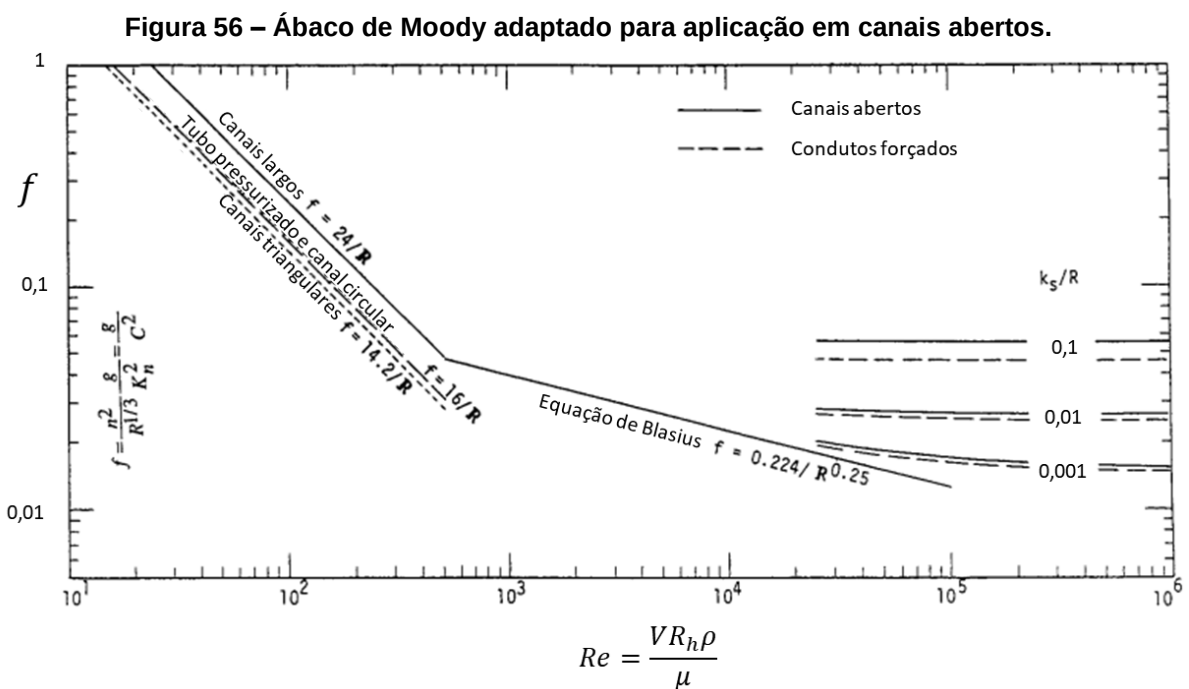
A adimensionalização das variáveis envolvidas em um fenômeno é uma estratégia que permite a generalização dos resultados em diferentes escalas de estruturas, permitindo transpor os resultados de modelos reduzidos para protótipos.

Na modelagem física de fenômenos de escoamento como o ressalto hidráulico, o jato de um escoamento aerado, o deslizamento da mistura água-ar sobre o pseudo-fundo do regime *Skimming Flow*, as características de equilíbrio do regime *Nappe Flow* ou a determinação do fator de atrito f , é necessária a realização de experimentos e posterior análise dimensional dos fenômenos para obtenção das correlações entre elas.

Praticamente todas as formulações apresentadas neste trabalho são fruto de análise dimensional e obtidas de dados em modelos reduzidos e protótipos. Como citado no item 3.1, o fator de atrito f apresenta uma forma preferencial de análise da resistência em canais em degraus (canais artificiais de maneira geral), principalmente por ser um fator adimensional (CHANSON, 2004).

Utilizando um fator adimensional, pode-se evitar algumas incoerências de utilização de relações de escala. A Figura 56 apresenta a relação entre o fator de atrito e as características de rugosidade do material do canal apresentadas por Yen (2002) (adaptação do Ábaco de Moody⁴). O autor argumenta que o fator n da equação de Manning engloba as variações de turbulência e escala da rugosidade do material, sendo ideal para calibração em trechos de canais naturais com medições realizadas.

Como apresentado anteriormente, para a quantificação das perdas de energia em canais em degraus com a ocorrência de deslizamento do escoamento (*Skimming Flow*), as formulações disponíveis na literatura baseiam-se na relação entre o fator de atrito f e as configurações de rugosidade impostas pelos degraus ao fluxo (Figura 28 e Figura 29).



3.6.2 Métodos de Medição Intrusiva

A obtenção das correlações entre os dados passa primeiro pela medição de tais dados nos modelos. No caso dos modelos reduzidos de escoamentos aerados, um outro

⁴ O Ábaco de Moody é a representação gráfica da relação entre o fator f , o grau de turbulência do escoamento (representado pelo número de Reynolds $Re = \frac{VR_h \rho}{\mu}$) e a relação entre o tamanho da rugosidade do material K_s e o raio hidráulico R_h . O Ábaco foi publicado por Moody (1944) baseado nos trabalhos de Pigott (1933) e Nikuradse (1930) com medições em condutos forçados.

desafio é enfrentado devido à presença de ar no escoamento. A presença de ar muda as características do escoamento, em especial seu peso específico e, conseqüentemente, a dinâmica de equilíbrio das forças atuantes, além das flutuações de lâmina de água.

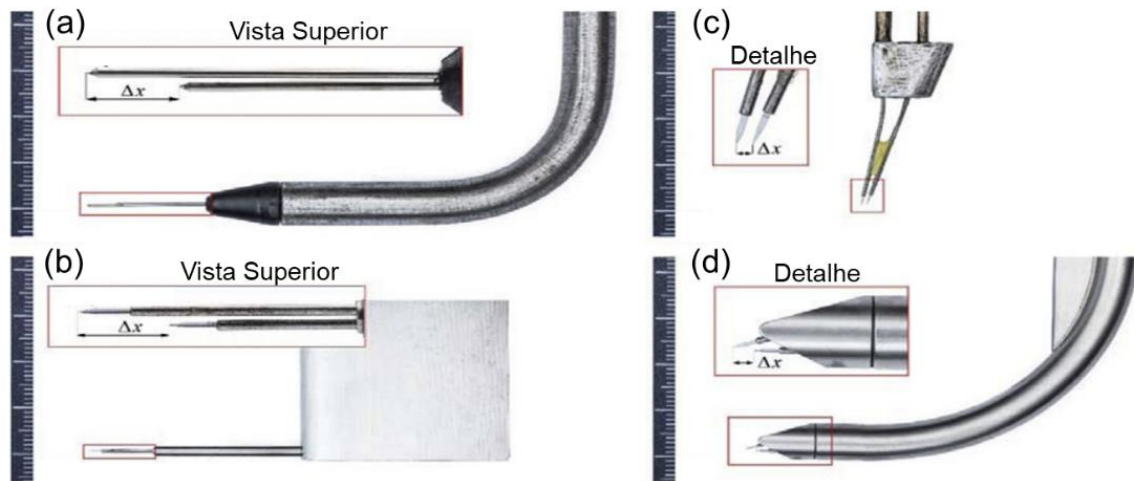
Em escoamentos em degraus e em ressaltos hidráulicos, tem-se a presença de uma grande turbulência do fluxo, com grandes flutuações de velocidade e pressão em um mesmo ponto ao longo do tempo (BATCHELOR, 2004), que contribuem para uma grande aeração do fluxo. Portanto, há uma intensa alteração da lâmina de água ao longo do tempo, de maneira que medições pontuais em modelos reduzidos são de difícil determinação (SIMÕES, 2012). A medição com ponteiras ou régua das profundidades do escoamento comumente pode levar a grandes incertezas devido a não medição da quantidade de ar incorporada ao fluido.

Chanson (2020) apresenta o histórico das medições de quantidade de ar em misturas água-ar, tendo seu início com Ehrenberger (1926, *apud* CHANSON, 2020). Apesar da longa data de medição da concentração de ar em escoamentos, o seu desenvolvimento como instrumento de medição de escoamentos aerados se deu em definitivo a partir da década de 80, com a introdução das ponteiras de detecção de fase.

As ponteiras permitem a detecção da fase do escoamento (água ou ar) no ponto em contato com a ponteira. Elas podem ter dois funcionamentos em seus princípios: detecção de resistividade ou detecção de refração (fibra ótica). As ponteiras resisitivas são circuitos inseridos no escoamento que “fecham” e “abrem” a conexão de acordo com a presença ou não de água em contato com a ponta. Já as ponteiras baseadas na refração medem o quanto da luz emitida é refratada entre as duas parcelas da ponteira (BOES *et al*, 2019; HAGER *et al*, 2020)

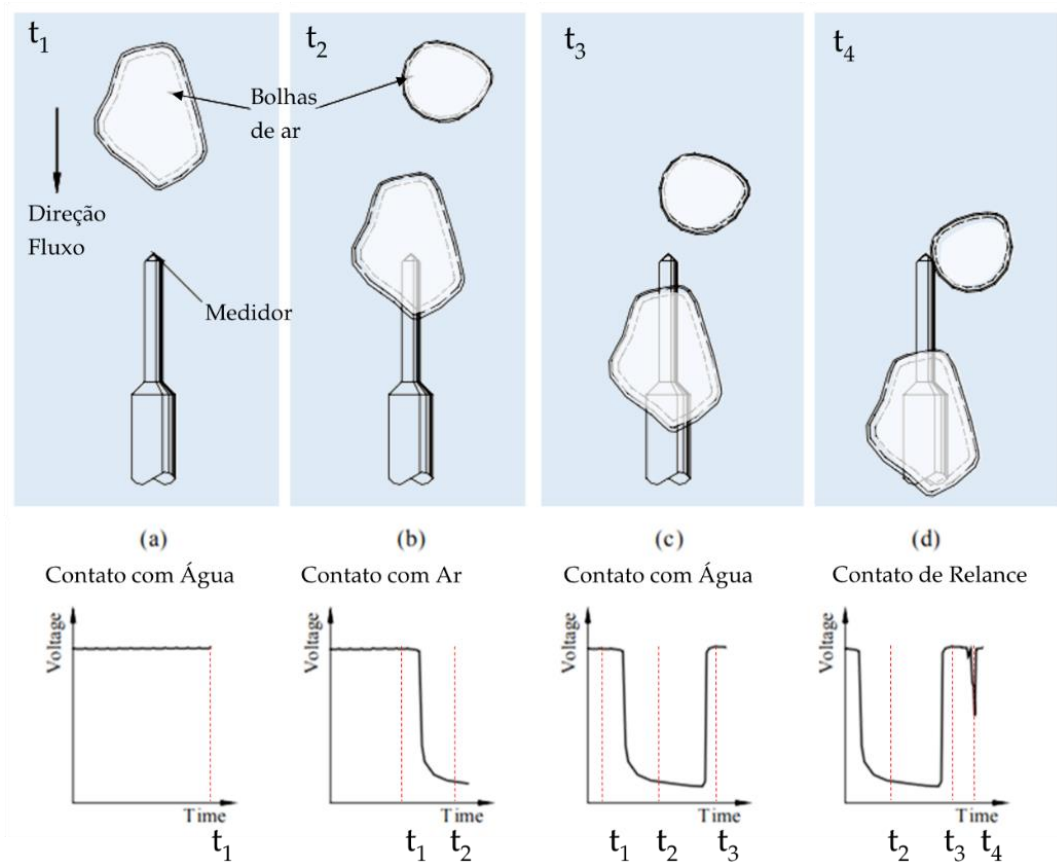
A Figura 57 apresenta modelos de ponteiras medidoras, enquanto a Figura 58 apresenta um exemplo de sinal obtido por uma das ponteiras.

Figura 57 – Exemplos de ponteiros de detecção de fase: a) e b) medidores de fase resistivos, c) e d) medidores de fase de fibra ótica.



Fonte: Adaptado de Boes *et al.* (2019).

Figura 58 – Exemplo de variação de sinal detectado pela ponteira resistiva ao longo do tempo, com uma queda na tensão medida pela ponteira quando entra em contato com uma bolha de ar.



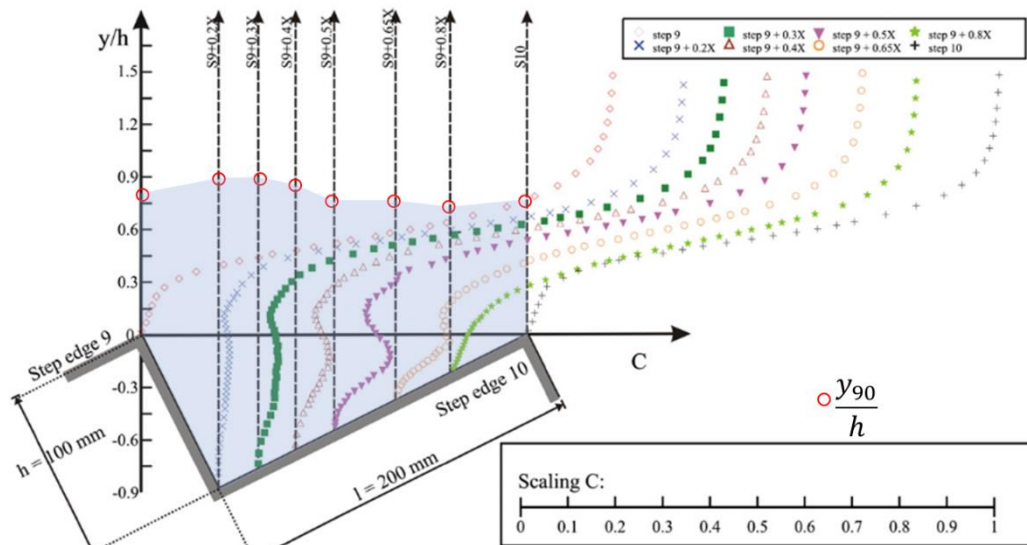
Fonte: Adaptado de Toombes (2002).

3.6.2.1 Medição da Concentração de Ar

Com as variações de sinal em um ponto ao longo de um certo tempo de exposição da ponteira ao escoamento, é possível obter a chamada “concentração de ar” daquele

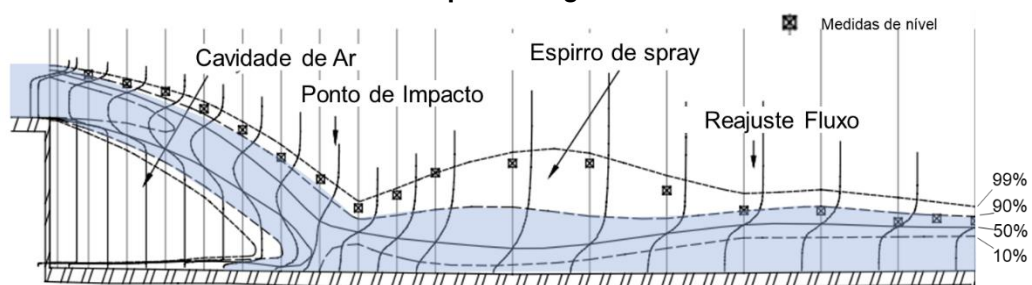
ponto medido. Alguns autores (CHANSON, 2002b; TOOMBES, 2002; BOES e HAGER, 2003; CHANSON *et al.* 2002), usam o termo “índice de vazios ao longo do tempo”, já que a medida é pontual e não volumétrica. Com medidas ao longo do perfil do escoamento é possível obter o perfil de concentração de ar de um escoamento aerado, como apresentado na Figura 59 e na Figura 60.

Figura 59 – Variações da medição da concentração de ar para uma descida com declividade 2H:1V para um escoamento com razão $\frac{y_c}{h}=1,33$ (Skimming Flow). Destaca-se as elevações ao longo do degrau em que se tem $C=90\%$ de ar.



Fonte: Adaptado de Felder e Chanson (2011).

Figura 60 – Variações dos perfis de concentração de ar e linhas de iso-concentração de ar em uma queda singular.



Fonte: Adaptado de Toombes (2002).

Nas figuras, nota-se que há um padrão da distribuição de ar ao longo do perfil do escoamento aerado, com uma mudança brusca na concentração de ar no entorno da região em que $C=50\%$. É comum a utilização do limite de 90% de concentração de ar previsto nas análises como o limiar do escoamento (lâmina de água) (CHANSON, 1995). Tal profundidade é chamada de profundidade aerada, y_{90} , e usada como guia

para dimensionamento das paredes dos extravasores dimensionados (BOES e HAGER, 2003; OHTSU *et al.*, 2004; CHANSON e GONZALEZ, 2006).

Nota-se também que, acima da elevação y_{90} , o perfil da concentração de ar aumenta de maneira bem menos acentuada, de forma que aproximadamente $2.y_{90} = y_{99}$, resultado da grande quantidade de respingos na região de *spray*. Destaca-se ainda a maior aderência entre os dados medidos de nível aos valores de y_{99} nos espirros do *spray* a jusante do impacto, que se dá devido às ondas de choque (CHANSON e TOOMBES, 2004).

Neste trabalho, não foi possível desenvolver os medidores intrusivos para utilização na pesquisa. No entanto, o funcionamento dos medidores é apresentado visando inteirar o leitor das técnicas mais precisas de detecção do escoamento aerado.

3.6.2.2 Medição de Velocidade

A medição da velocidade no escoamento aerado não é feita por meios diretos, de forma que são utilizados os dados de concentração de ar para a estimativa da velocidade. Como pode ser notado nos modelos da Figura 57, alguns modelos têm duas pontas para medição, uma adiantada e outra atrasada. Para um mesmo ponto, a coleta de dados apresentada na Figura 58 ocorre duas vezes, porém, com um atraso entre os sinais (TOOMBES, 2002).

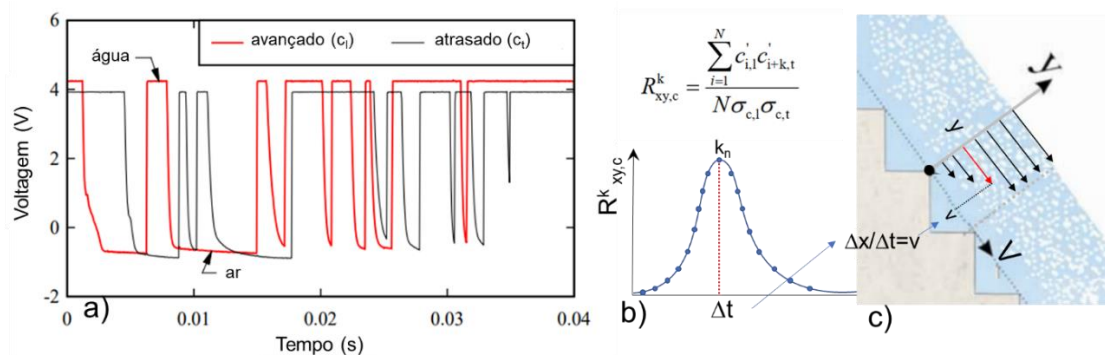
O atraso Δt entre os sinais é definido por meio do tempo que apresenta a melhor correlação entre os dados. Como a distância entre a captação dos sinais é a distância entre as pontas de prova (Δx na Figura 57), tem-se a velocidade no ponto em análise por $v = \Delta x / \Delta t$.

Com múltiplas medições, é possível compor um perfil de velocidades do escoamento, como apresentado na Figura 62, na Figura 63 e na Figura 64. Alguns exemplos de aparelho de medição em operação são apresentados na Figura 65.

Os medidores de fase são os mais precisos instrumentos para a medição do escoamento bifásico (CHANSON, 2020), sendo os parâmetros necessários para a sua utilização bem estabelecidos na literatura, sintetizados em Felder e Chanson (2015). Uma crítica a sua utilização é que fornecem velocidade e concentração de ar pontuais

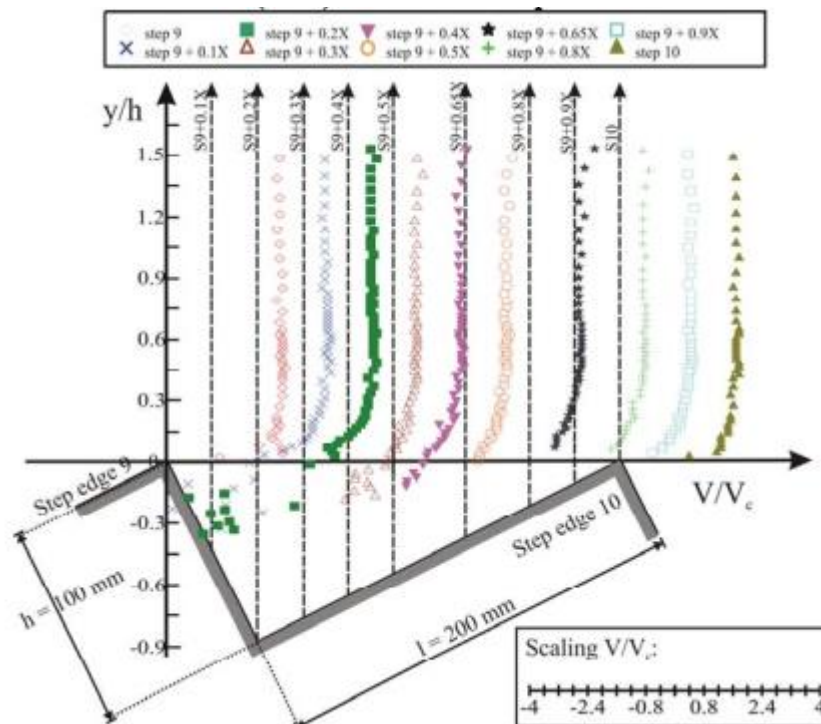
com base em uma aquisição de dados que leva cerca de 45 s, não fornecendo, portanto, valores instantâneos de concentração de ar e velocidade. A turbulência para tais medições é obtida de maneira indireta.

Figura 61 – Obtenção da velocidade em um ponto: a) detecção de bolhas no escoamento na elevação y, b) definição do Δt entre os sinais pela correlação variações de fase em c_1 e c_2 ; c) definição da velocidade no ponto y.



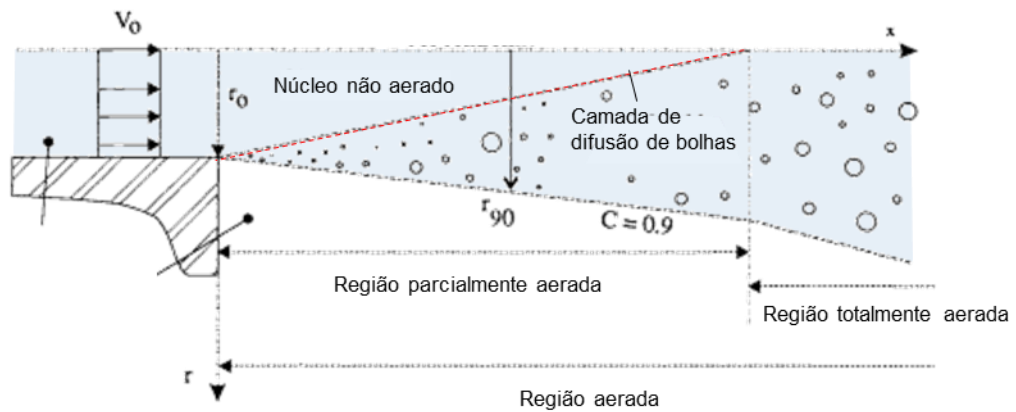
Fontes: a) Whang e Chanson (2016) e c) Adaptado de Simões (2012).

Figura 62 – Perfil de velocidades adimensionais ao longo de uma cavidade no regime *Skimming Flow*.



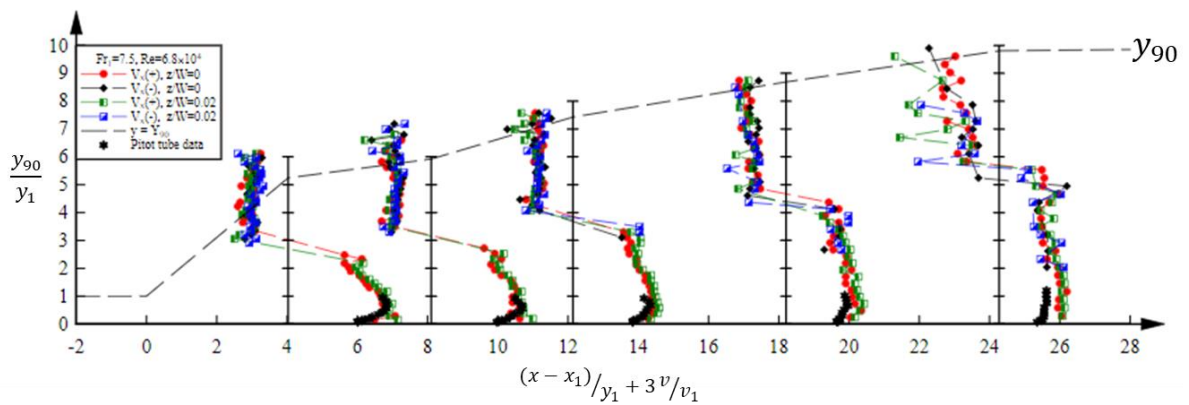
Fonte: Feldeer e Chanson (2011).

Figura 63 – Perfil de velocidades em jatos em queda livre.



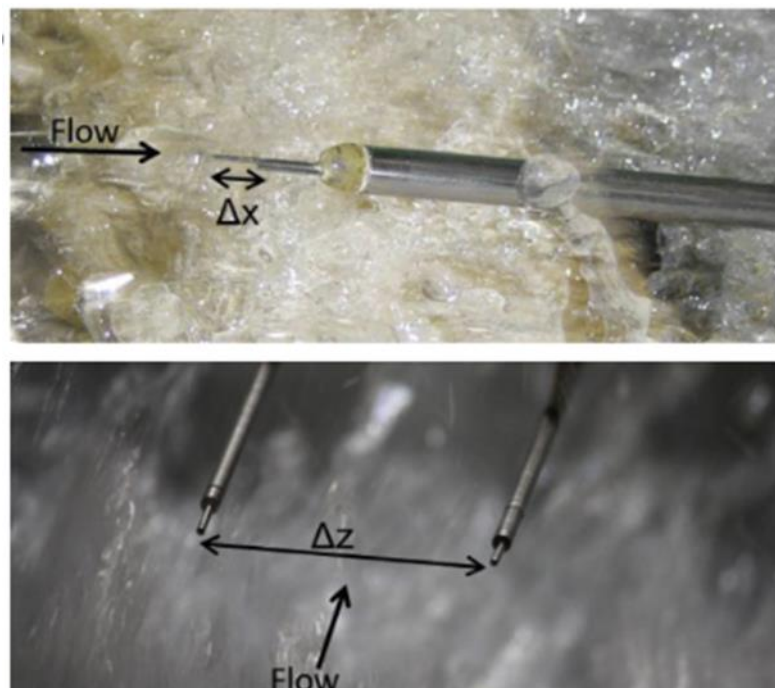
Fonte: Adaptado de Chanson (1995).

Figura 64 – Perfil de velocidades adimensionais em um ressalto hidráulico.



Fonte: Wang e Chanson (2015).

Figura 65 – Medidores de detecção de fase em operação em escoamentos aerados.



Fonte: Felder e Chanson (2015).

3.6.3 Métodos de Medição não Intrusiva

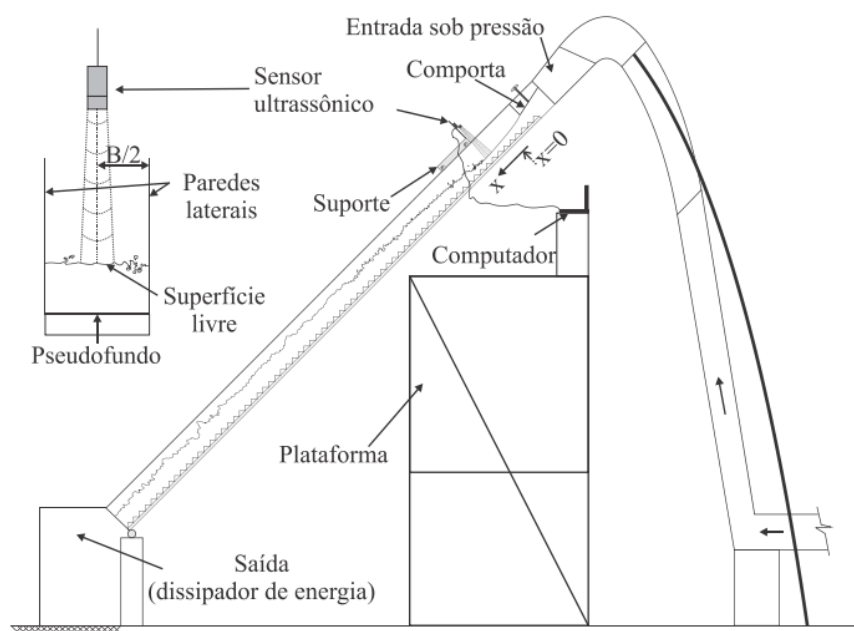
Com o avanço dos estudos em modelagem física, novas técnicas de medição foram e vem sendo exploradas nas práticas de laboratório. Dentre elas, destaca-se a utilização de aparelhos de ultrassom, medição por meio fotográfico e a utilização da técnica *Light Detection and Raging* (LIDAR). Neste trabalho são exploradas as medições fotográficas, mas as demais opções são revisadas para inteirar o leitor das possíveis técnicas de medição do escoamento.

3.6.3.1 Medição por Ultrassom

A medição por ultrassom consiste em medir a reflexão da onda de som a partir de um aparelho posicionado acima do escoamento. O instrumento permite a aquisição da variação da chamada “rugosidade” da superfície de água (KILLEN, 1968; *apud* BUNG, 2013). Bung (2013) apresentou comparações entre as medições intrusivas e medições por meio de ultrassom, mostrando que a superfície rugosa da água obtida por meio de ultrassom fica localizada acima dos limites determinados pelo y_{90} .

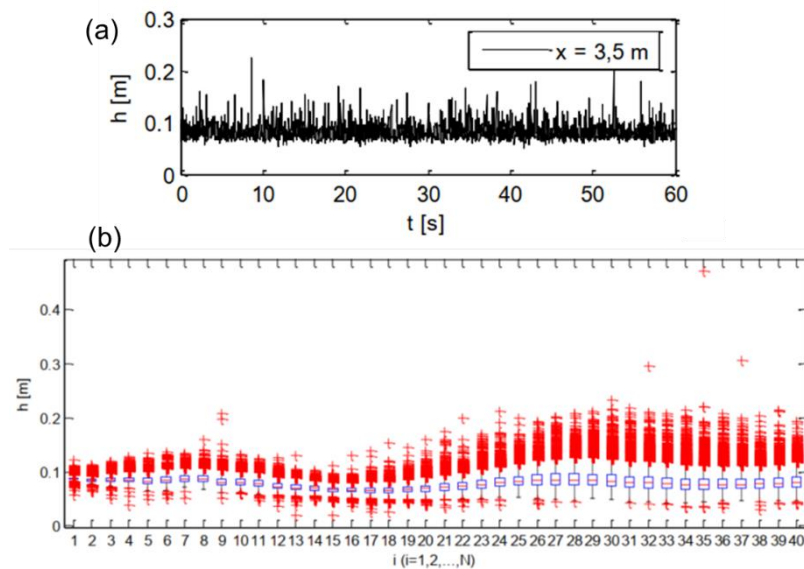
A Figura 66 apresenta um exemplo de medição da superfície de água com ultrassom, utilizada por Simões (2012), enquanto a Figura 67 apresenta os resultados das medições realizadas pelo autor.

Figura 66 – Exemplo de medição da superfície de água com sensor ultrassônico.



Fonte: Simões (2012).

Figura 67 – Exemplo de: a) Medições de nível de água realizadas em um único ponto ao longo do tempo, b) compilação das medições não tratadas ao longo de todos os 40 pontos no escoamento.



Fonte: Simões (2012).

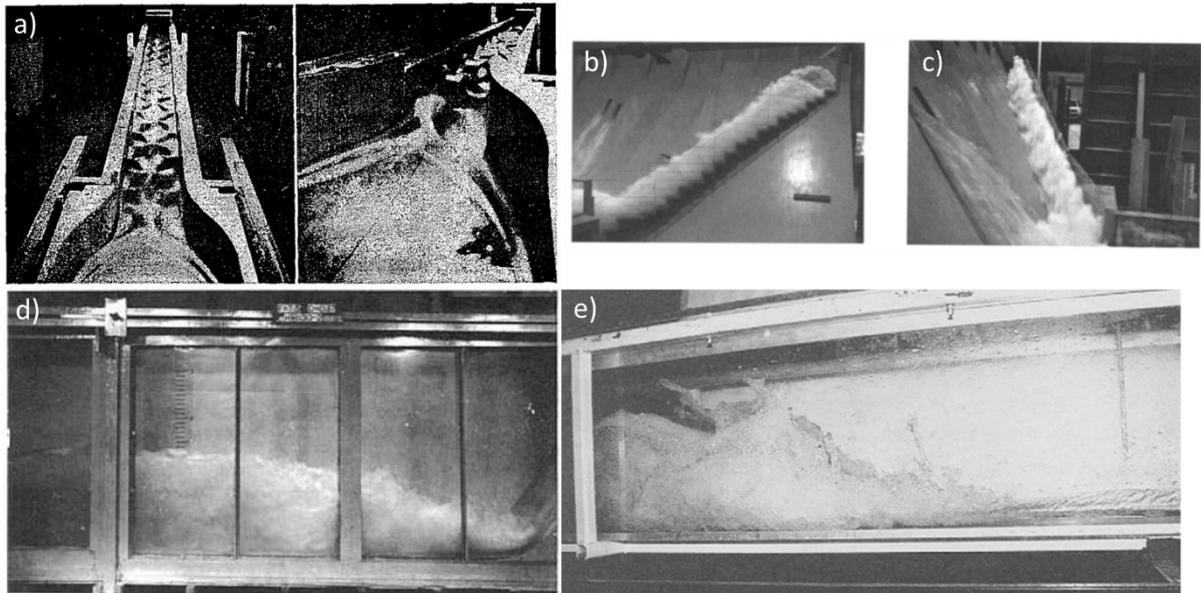
3.6.3.2 Medidas Fotográficas

Os meios fotográficos de análise de escoamento são utilizados em experimentos desde meados do século passado, passando por diversas análises experimentais, como as apresentadas por Chow (1959), Peterka (1974), Chanson (1988), USBR (1987). No entanto, as fotografias são utilizadas em caráter qualitativo, e não quantitativo (Figura 68).

Bung (2013) apresenta que, no final dos anos 90, as análises quantitativas por meios fotográficos ganharam relevância e aplicabilidade, devido ao maior acesso a câmeras de alta resolução e capacidade de processamento de softwares em geral. Leandro *et al.* (2012) apresentaram uma análise das flutuações do ressalto hidráulico por meio fotográfico que, mesmo diante de uma baixa taxa de fotos por segundo (5 *fps*), mostrou uma grande flutuação da superfície do ressalto.

Posteriormente, Leandro *et al.* (2014) apresentaram uma técnica de obtenção dos índices de vazios por meio da opacidade do pixel filmado que, apesar de promissora, depende da calibração com medidores intrusivos (Figura 69).

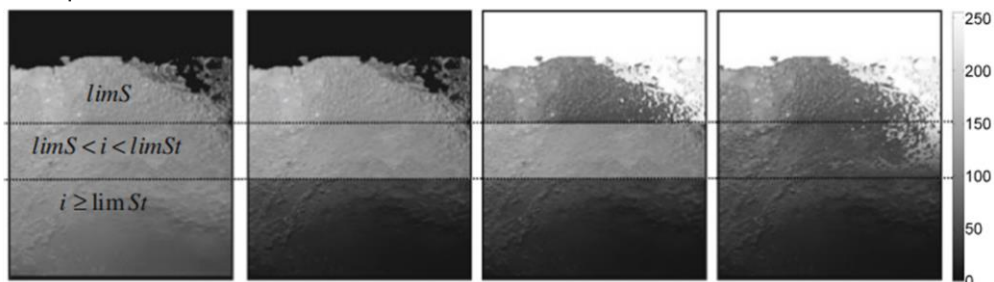
Figura 68 – Exemplos de fotografias de aparatos experimentais: a) Ondas de choque cruzadas em contração de canal; b) e c) teste em modelo reduzido de extravasor em degraus de paredes convergentes, modelo do protótipo da Barragem Nakasujigawa, Japão; d) e e) ressalto hidráulico em laboratório.



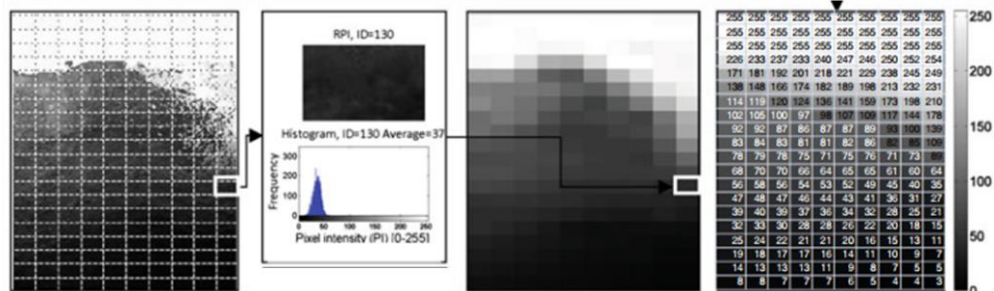
Fontes: a) Chow (1959); b) e c) Minor e Hager (2000); d) Peterka (1984); e) Chanson (1995).

Figura 69 – Obtenção da concentração de ar em ressalto hidráulico por meio de filmagens.

Pré-processamento:



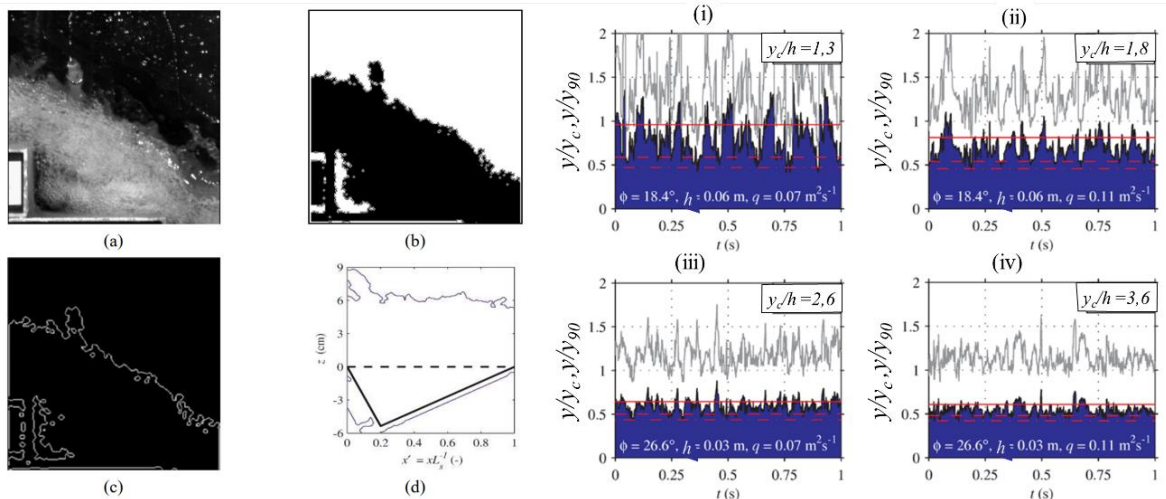
Tratamento dos dados:



Fonte: Adaptado de Leandro *et al.* (2014).

Para medições de linha de água, Bung (2013) apresentou uma comparação entre métodos de medição com ultrassom, medidor de concentração intrusivo e identificação automática de linha de água por meios computacionais. O autor encontrou valores de superfície da linha de cerca de 50% maior que a profundidade y_{90} , como apresentado na Figura 70.

Figura 70 - Quadros a esquerda: a) imagem obtida para análise, b) tratamento dado para determinação do contraste entre o fundo e o escoamento, c) determinação dos limites do escoamento, d) normalização em relação ao degrau. Quadros a direita: linha cinza = relação entre a lâmina de água medida y e o y_{90} ; região azul = y/y_c ; linhas vermelhas (de cima pra baixo) = y_{99}/y_c , y_{90}/y_c , y_{75}/y_c .



Fonte: Adaptado de Bung (2013).

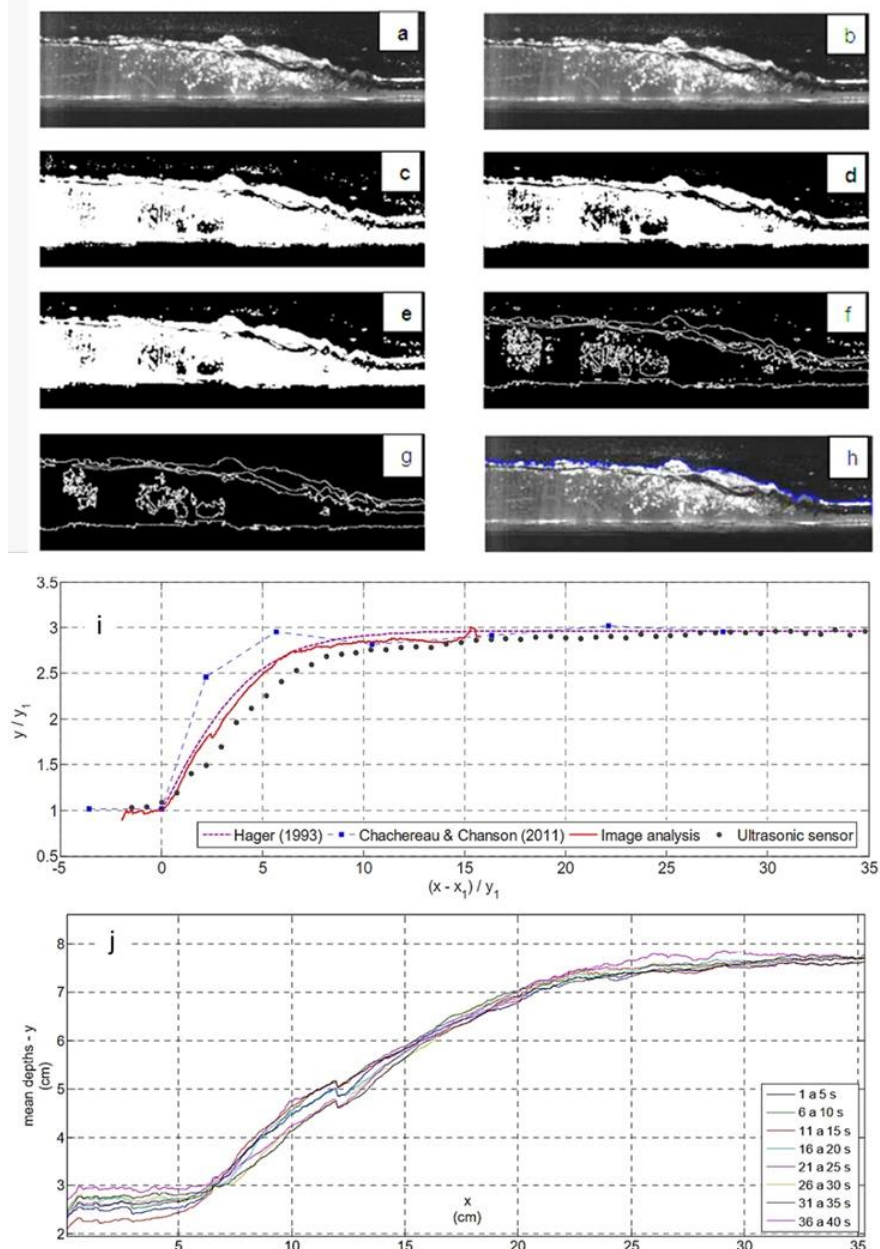
Já Nóbrega *et al* (2014) usaram uma análise da intensidade dos pixels para determinar a ondulação da superfície do ressalto hidráulico. Os resultados obtidos apresentaram coerência com medidas feitas com ultrassom por outros autores. Os autores utilizaram-se de um código em MatLab que não se mostrou de fácil aplicação ao público em geral. Os resultados são apresentados na Figura 71.

No que diz respeito à velocidade, desde os anos 1990, são usadas técnicas de obtenção da velocidade de elementos por meio de filmagens (SVEEN (2004)), especialmente com o rastreamento de partículas no escoamento filmado, chamado *Particle Image Velocimetry* (PIV, ou velocimetria de partículas por imagem, em tradução livre). Os códigos da técnica baseiam-se em identificar as partículas em um escoamento, iluminadas por laser externo ao escoamento, e rastreá-las ao longo das fotografias sequenciais (vídeos).

A técnica foi adaptada para o escoamento aerado, no qual apresenta-se uma grande quantidade de bolhas de ar (Figura 14 e Figura 17). A técnica que ficou conhecida como *Bubble Image Velocimetry* (BIV, ou velocimetria por imagem de bolhas). No entanto, apesar da técnica se adaptar bem ao escoamento aerado turbulento, típico do ressalto hidráulico e do escoamento em degraus, ela apresentou uma subestimação dos valores de velocidade devido a medição ser feita principalmente

em bolhas em contato com a parede do escoamento filmada (BUNG e VALERO, 2016).

Figura 71 – Sequências do processamento das imagens- a) Imagem retirada do vídeo; b) Obtenção da intensidade média de cada pixel; c) Imagem binária; d) obtenção dos pixels de intensidade mínima; e) obtenção dos pixels de intensidade máxima; f) Obtenção dos contornos dos objetos; g) Exclusão de objetos com menos de 80 pixels nos componentes; h) imagem da borda sobreposta à imagem inicial; i) superfície média encontrada em comparação com outros autores; j) vários perfis médios ao longo do tempo simulado.



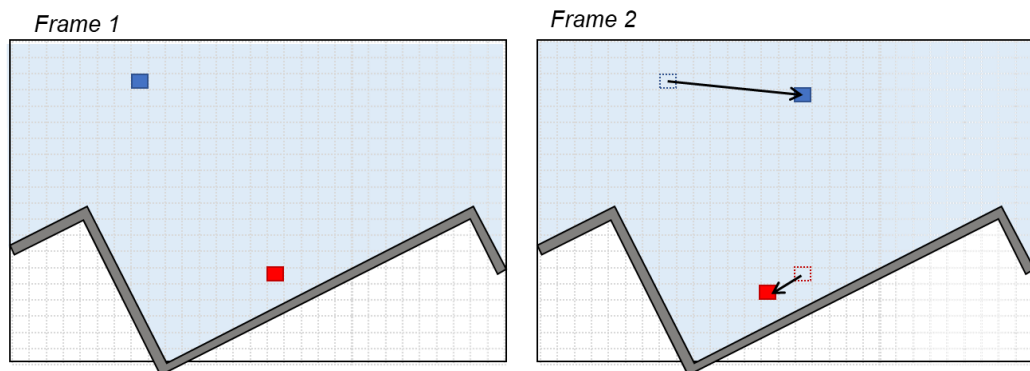
Fonte: Adaptado de Nóbrega *et al* (2014).

Bung (2011) apresentou uma técnica de obtenção da velocidade do escoamento por meio de filmagens baseada na chamada “conservação do brilho do pixel”. A técnica

consiste em assumir que o brilho do “elemento” no pixel do escoamento se conserva entre dois frames de vídeo. Dessa forma pode-se usar técnica de correlação cruzada entre dois frames consecutivos para a obtenção da localização do mesmo “elemento” no frame seguinte. É obtido um vetor de deslocamento do elemento, como apresentado na Figura 72. A partir do deslocamento do elemento de água, pode-se obter a velocidade daquele ponto do escoamento naquele momento, utilizando o tempo entre os dois frames.

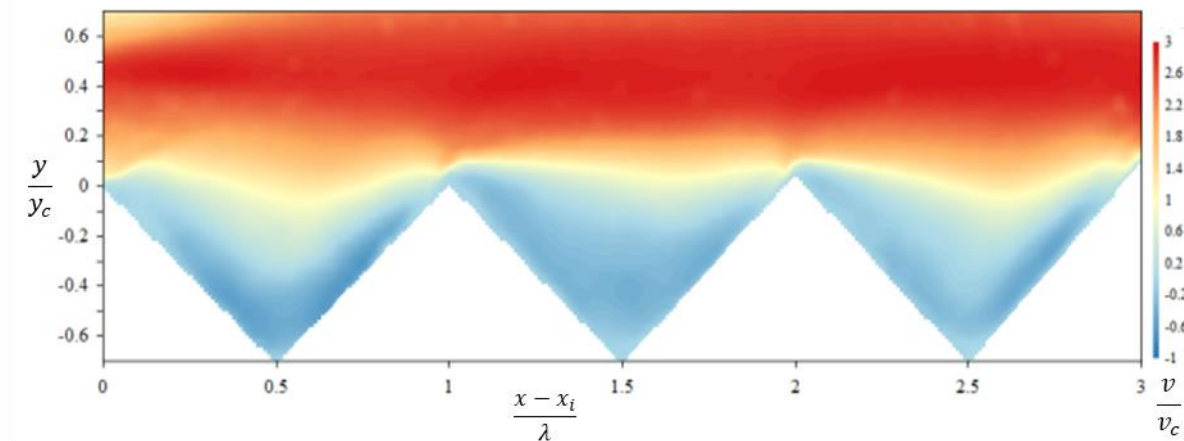
Tal técnica ficou conhecida como *Optical Flow* (OF) e esse procedimento pode ser aplicado a todos os pixels de todos os frames do vídeo. Nota-se que consiste em uma técnica computacionalmente cara, uma vez que analisa todos os pixels de todos os frames de escoamento, buscando as melhores correlações entre eles.

Figura 72 – Ilustração do método *Optical Flow* utilizando dois pixels e dois frames com exemplo: Esq. Identificação do brilho em cada pixel (apresentados apenas dois elementos como exemplo); Dir. identificação da posição mesmo elemento no frame seguinte.



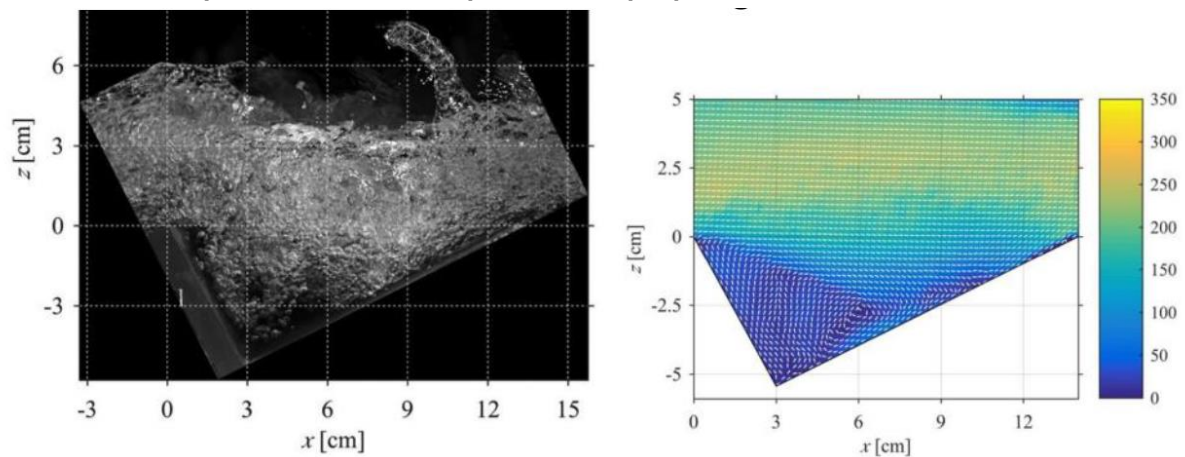
Bung e Valero (2016) e Zhang e Chanson (2018) aplicaram o *Optical Flow* em conjunto com a utilização de medição intrusiva simultânea e obtiveram correlações consideradas boas entre as medidas. Os resultados da aplicação do OF são apresentados na Figura 73 e na Figura 74. Destaca-se que a metodologia já era usada para medidas de velocidade em outros tipos de aplicações, sendo sua aplicação para escoamentos hidráulicos rápidos uma ampliação das possibilidades de velocimetria por imagem.

Figura 73 – Campo de velocidades adimensionais obtido por meio do *Optical Flow*.



Fonte: Zhang (2017).

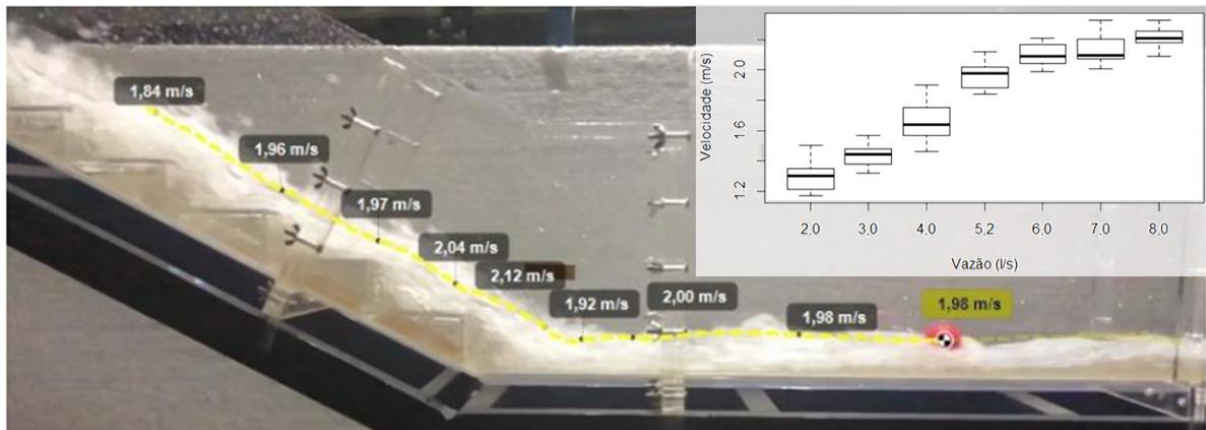
Figura 74 – Exemplo de um frame obtido de filmagem (esq.) e campos de velocidade obtidos para análise de múltiplos frames (dir.). Velocidades em mm/s.



Fonte: Bung e Valero (2016).

Campera (2020), utilizando a mesma estrutura em degraus deste trabalho, fez o uso de um flutuador para medição das velocidades do escoamento na região da descida (Figura 75), com rastreamento feito por meio da utilização de vídeos e do *software* Kinovea (baseando na técnica utilizada por Ribeiro (2018)). O *software* foi desenvolvido para análises de movimentos humanos em atividades físicas e é programado com a biblioteca OpenCV, discutida no item 4.4. O autor obteve resultados compatíveis com os previstos pelas formulações apresentadas por Ohtsu *et al.* (2004) (equações (17) a (20)) e obtidos por modelagem numérica.

Figura 75 – Medidas de velocidade na superfície da água por meio de flutuador para uma vazão e a correlação entre velocidades finais medidas para várias vazões.

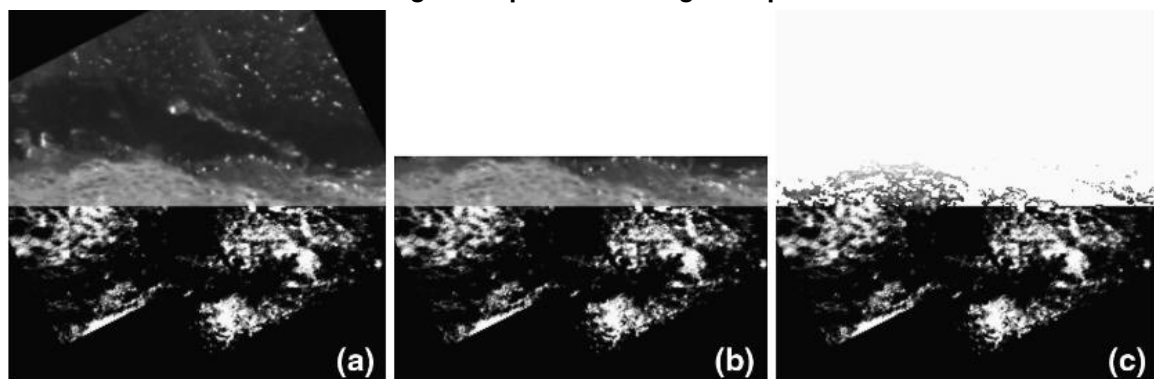


Fonte: Adaptado de Campera (2020).

Logo, as medidas fotográficas quantitativas já têm sido utilizadas para a caracterização do escoamento aerado. Este trabalho visa também trazer alguns implementos nessa área.

No entanto, as medições por câmera têm o empecilho de utilizar-se apenas das imagens capturadas em uma vista do perfil do escoamento ou em uma vista em planta. Dessa forma, efeitos tridimensionais da superfície não são capturados e podem gerar capturas indesejadas, como discutido no item 4.3. Porém, os métodos de detecção da superfície do escoamento têm sido aprimorados na detecção do primeiro plano da figura⁵, como apresentado por Leandro *et al* (2014) e reproduzido na Figura 76.

Figura 76 – Processamento de imagem para detecção de fração de vazios: Passos de exclusão de imagens captadas em segundo plano.



Fonte: Leandro *et al* (2014).

⁵ Cita-se como outro exemplo os *softwares* de videoconferência, com capacidade de detecção de *background* em tempo real para composição de planos de fundo de imagens.

Tais técnicas minimizam os efeitos de detecção de lâminas em segundo plano, mas devem ser sempre pontos de atenção no que diz respeito a obtenção da superfície livre do escoamento por meio de vídeo.

Dois outros grandes empecilhos na utilização de medição fotográfica de velocidades são a necessidade de aparelhos com boa resolução temporal (número de fotos por segundo) e espacial (número de pixels por imagem), que podem tornar a aplicação das técnicas inviáveis devido ao tempo de processamento de muitas informações.

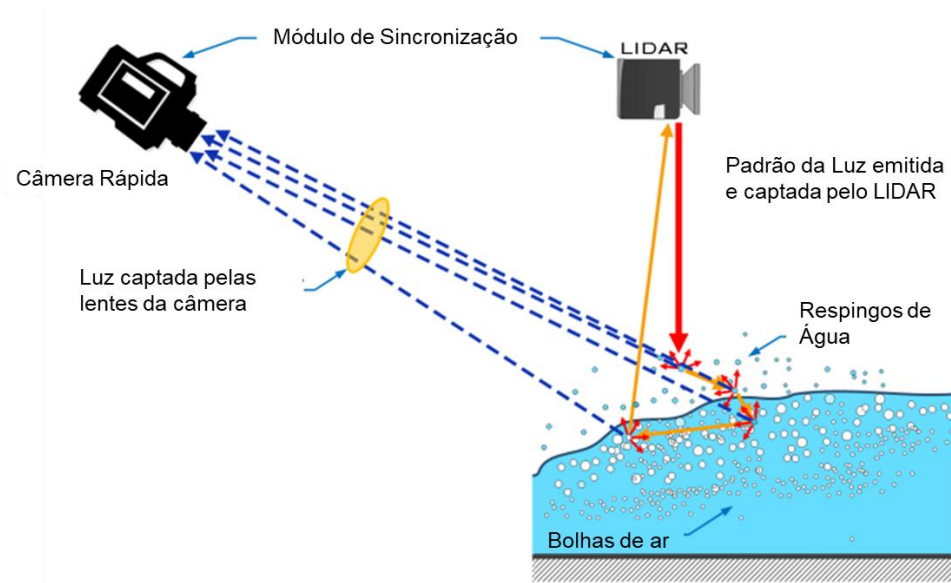
3.6.3.3 Medidas com LIDAR

A metodologia mais recente aplicada aos escoamentos livres consiste na utilização da técnica chamada *Light Detection and Ranging* (LIDAR). A técnica consiste em utilizar um aparelho emissor e detector de luz, capaz de reconhecer o tempo de viagem da luz emitida e posteriormente refletida até o sensor. Com base no tempo, pode-se obter as distâncias do objeto em análise (LI, 2022; RAK *et al*, 2023).

Para aplicação em escoamentos turbulentos e rápidos, as medições com LIDAR se mostram vantajosas pela sua capacidade de obter dados com frequências de cerca de centenas de milhares de vezes por segundo, promovendo uma obtenção da superfície do escoamento instantânea (RAK *et al*, 2023). A Figura 77 apresenta o exemplo de obtenção de dados por meio de LIDAR em conjunto com uma câmera rápida, enquanto a Figura 78 apresenta um exemplo de detecção feita em escoamento com características tridimensionais.

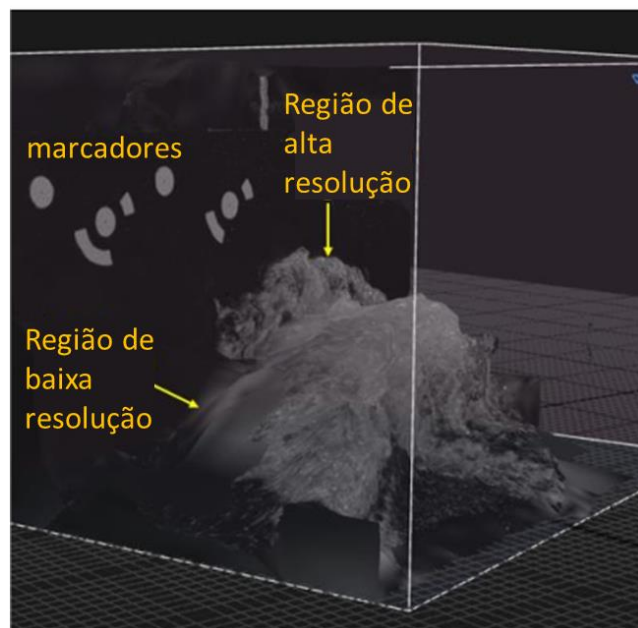
Li (2022) utilizou-se de técnicas de LIDAR para medições de escoamentos em laboratório e em um córrego na cidade de Sidney (Austrália). O autor chegou à conclusão de que as medições com LIDAR são de extrema utilidade na medição das variações de lâmina em escoamentos turbulentos e muito aerados (o LIDAR necessita da aeração do fluxo para poder detectar a superfície livre).

Figura 77 – Método de captação da superfície livre por meio da composição de uma câmera rápida e um sensor LIDAR.



Fonte: Adaptado de Rak *et al* (2023).

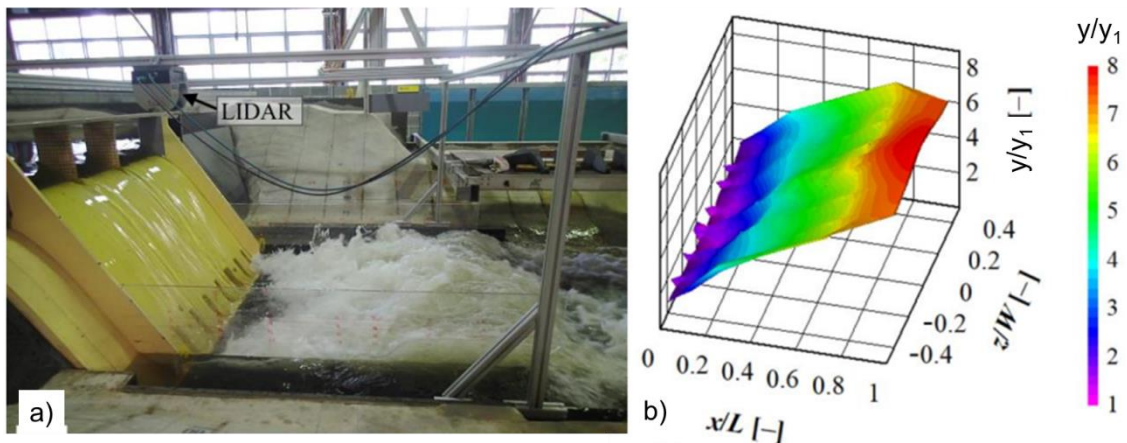
Figura 78 – Superfície construída com base nas detecções de superfície feitas com medição conjunta de câmeras rápidas e LIDAR.



Fonte: Adaptado de Rak *et al* (2023).

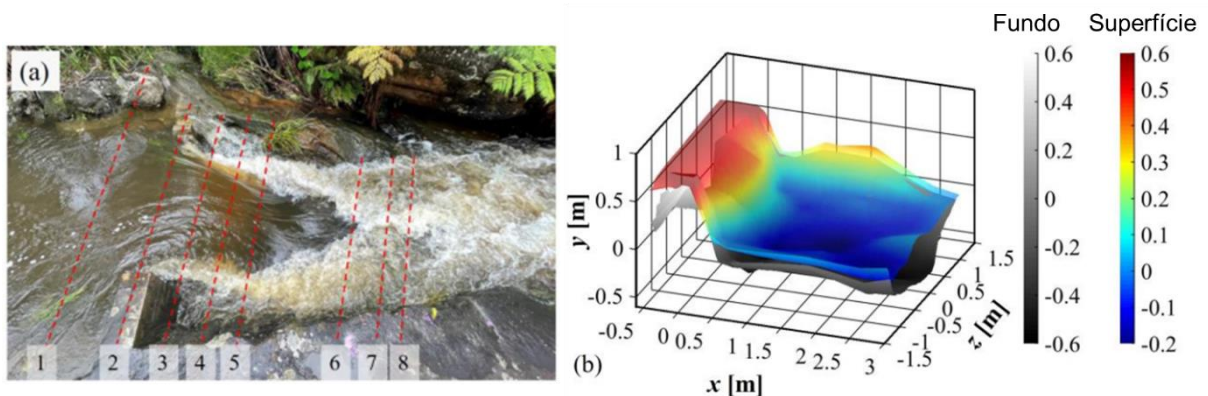
Com as medidas realizadas o autor foi capaz de reproduzir superfícies livres do escoamento instantâneas para o ressalto hidráulico em laboratório e em condições naturais, como apresentado na Figura 79 e na Figura 80.

Figura 79 – a) Modelo físico de canal extravasor liso seguido de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico; b) superfície livre instantânea obtida por meio de LIDAR.



Fonte: Adaptado de Li (2022).

Figura 80 – a) Soleira de controle de escoamento no córrego Manly, Sidney, Austrália, e seções de controle para aplicação do LIDAR; b) superfícies livre da água e do fundo do córrego obtidas com a aplicação do LIDAR na região da soleira.



Fonte: Adaptado de Li (2022).

A detecção com LIDAR promove a melhor resolução espacial e temporal da detecção da superfície livre de água. Porém, a técnica não fornece as características internas do fluxo, como campos de velocidade e concentração de ar, fundamentais na análise do comportamento da energia do fluxo, por exemplo.

Portanto, nota-se que todas as técnicas, intrusivas e não intrusivas, apresentam deficiências em relação a obtenção dos dados do escoamento em análise. No entanto, a utilização de técnicas combinadas pode fornecer informações ricas para o estudo do comportamento do fluido.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho, é explorada apenas a medição do escoamento por meios fotográficos. Os planos de trabalho iniciais envolviam a utilização de instrumentos intrusivos para sua comparação com os dados obtidos por meios fotográficos. No entanto, devido ao tempo disponível para a execução dos estudos, decidiu-se focar apenas nas medições fotográficas e utilizar as medições intrusivas como uma sequência para a pesquisa.

São apresentadas as técnicas de captura e análises necessárias para o desenvolvimento dos códigos utilizados na interpretação das imagens e obtenção das correlações experimentais. Faz-se a ressalva para a ausência de informações sobre a concentração de ar no escoamento e sua velocidade, que impossibilita a caracterização da linha de energia. Na aplicação da equação (1), ter-se-ia as relações apresentadas na equação (47) e na equação (48):

$$z + \frac{p}{\gamma_{mistura}} + \frac{v^2}{2g} = H \quad (47)$$

$$v = Q_{\text{água}} / A_{\text{água}} = Q_{\text{mistura}} / A_{\text{mistura}} \quad (48)$$

Em que:

- $\gamma_{mistura}$ é o peso específico da mistura água-ar em escoamento (kN/m³);
- $Q_{\text{água}}$ é a vazão de água fornecida pela bomba (m³/s);
- $A_{\text{água}}$ é a área da seção transversal de água⁶ em escoamento (m²);
- Q_{mistura} é a vazão de mistura, água e ar arrastado, em escoamento (m³/s);
- A_{mistura} é a área da seção transversal da mistura em escoamento (m²).

Como explorado anteriormente, a profundidade medida por métodos fotográficos não corresponde à determinada concentração de ar, estando entre as profundidades y_{90} e y_{99} (BUNG, 2013). Mesmo que correspondesse, não seria possível saber a quantidade de ar arrastado pelo escoamento com os métodos aqui propostos.

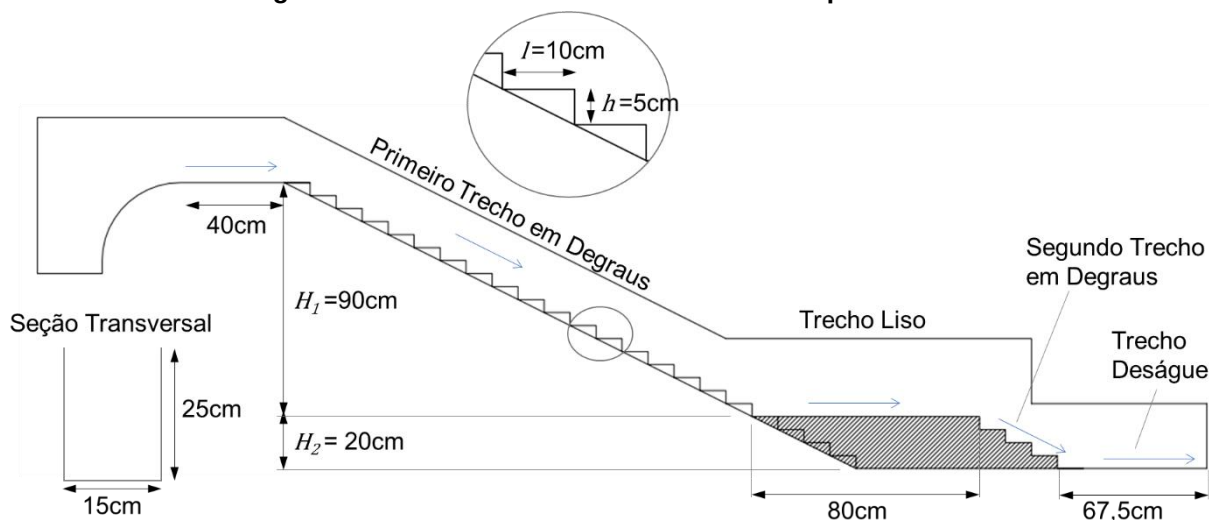
⁶ Deve ser descontada a parcela de ar escoando, a bomba fornece apenas água para o escoamento.

No entanto, os procedimentos para a obtenção da lâmina de água para a caracterização dos efeitos da utilização de soleiras entre os trechos liso e em degraus apresentam parte de um avanço para as medições de escoamentos em laboratório e em campo.

4.1 Aparato Experimental

O aparato experimental encontra-se instalado no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH), no *campus* Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais. Trata-se de um canal em acrílico com seção constante de 15 cm de largura e 25 cm de altura, com declividade de 2H:1V e degraus de 10 cm de patamar e 5 cm de espelho. O canal possui 22 degraus no total, com uma altura de 110 cm, divididos em dois trechos em degraus, de 18 e 4 degraus respectivamente, separados por um trecho horizontal de 80 cm. A jusante do segundo trecho em degraus, tem-se um trecho final que deságua no tanque de 67,5 cm de comprimento. O canal é apresentado na Figura 81.

Figura 81 – Medidas do canal utilizado nos experimentos.



A alimentação do escoamento se dá por uma caixa tranquilizadora a montante, de largura igual à do canal (visando evitar efeitos de contração), patamar inferior de 25 cm, preenchida com material pétreo para tranquilizar a chegada e saída do escoamento da caixa. A aproximação do escoamento até os degraus se dá por um canal de aproximação de 40 cm de comprimento, configurando o que seria uma aproximação em soleira espessa do escoamento.

A caixa tranquilizadora é alimentada por um conjunto de bomba e tubulação de recalque, acoplado a um inversor de frequência. Para auxiliar na coleta das filmagens, foi utilizado um sistema de iluminação de corrente contínua, com holofotes operando sem oscilação de corrente. A Figura 82 apresenta o sistema de experimento como um todo.

Figura 82 – Elementos externos da estrutura em estudo no aparato experimental



O aparato montado buscou reproduzir uma mudança de direção simples, entre um trecho liso horizontal e um segundo trecho em degraus a jusante, bem como uma soleira que consistiu em um degrau negativo no final do trecho horizontal. O aparato não reproduz necessariamente uma estrutura real (protótipo), sendo buscada a análise geral dos efeitos da mudança de direção e da adoção da soleira.

4.2 Experimentos Realizadas

Foram realizados dois testes distintos:

- Experimento 1: transição entre o trecho liso e o trecho em degraus livre;
- Experimento 2: presença de uma soleira vertical de 5 cm de altura, 10 cm a montante do primeiro degrau do trecho seguinte (a soleira adotada corresponde a um degrau “invertido” antes do início do segundo trecho).

Os experimentos foram realizados dia 8 de novembro de 2022 (experimento 1 - 17:00 até as 20:00) e dia 12 de dezembro de 2022 (experimento o 2 – 11:00 até 00:00). A iluminação utilizada impede a percepção da diferença de luminosidade no laboratório devido a variação dos horários dos experimentos.

Para os dois experimentos, foram variadas as frequências do inversor e monitoradas as vazões registradas no medidor de vazão, conforme apresentado na Tabela 3. As vazões foram testadas de forma crescente ao longo do dia, aguardando-se o tempo mínimo de 5 minutos entre a mudança de frequência do inversor e o início das medições para fins de estabilização da vazão. A única exceção foi a vazão de 0,84 l/s do experimento 2, que foi testada depois da vazão de 13,05 l/s para avaliar o efeito da soleira em baixas vazões.

Tabela 3 – Classificação dos experimentos realizados.

Experimento	Vazão Medida (l/s)	y_c (m) (calculado)	y_c/h	h/l	Classificação
1 Sem Soleira	1,12	0,018	0,357	0,500	NA
	2,70	0,032	0,642	0,500	NA
	4,70	0,046	0,929	0,500	TR
	4,95	0,048	0,961	0,500	TR
	6,85	0,060	1,194	0,500	SK
	8,65	0,070	1,395	0,500	SK
	10,35	0,079	1,572	0,500	SK
	11,06	0,082	1,643	0,500	SK
	13,08	0,092	1,837	0,500	SK
	15,25	0,102	2,035	0,500	SK
2 Com Soleira	0,84	0,015	0,295	0,500	NA
	1,14	0,018	0,361	0,500	NA
	4,20	0,043	0,861	0,500	TR
	4,80	0,047	0,942	0,500	TR
	5,50	0,052	1,031	0,500	TR
	6,40	0,057	1,141	0,500	SK
	8,00	0,066	1,324	0,500	SK
	10,10	0,077	1,546	0,500	SK
	11,65	0,085	1,701	0,500	SK
	13,05	0,092	1,834	0,500	SK

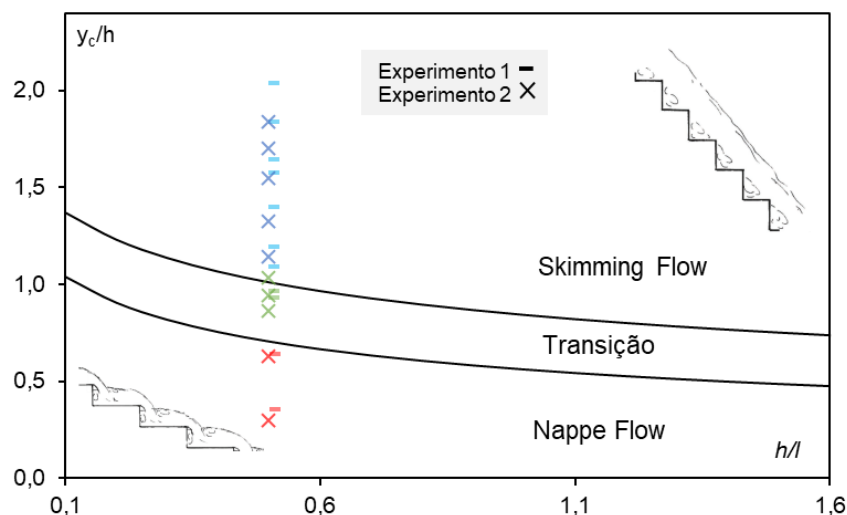
$$y_c = [Q^2 / (B^2 \cdot g)]^{1/3}$$

NA = *Nappe Flow*; TR = *Transition Flow*; SK = *Skimming Flow*.

A variação das vazões visou gerar uma amplitude de valores que compreendesse os três tipos de escoamento identificados na literatura para o primeiro trecho em degraus

e que atingissem o limite de capacidade do sistema de bombeamento utilizado. Os tipos de regimes do escoamento para as diferentes vazões estão apresentados na Figura 83.

Figura 83 – Classificação dos regimes de escoamento para as vazões nos experimentos feitos.



Fonte: Regimes conforme Figura 12.

Destaca-se a presença de frestas nas duas laterais da soleira, que não se encontram com as paredes do canal. Tal medida foi adotada não apenas pela facilidade de implantação da soleira no aparato, mas também pelo experimento de uma situação de campo em que não é desejável que haja um reservatório permanente em uma estrutura de drenagem superficial ou extravasora de barramento.

4.3 Obtenção dos Dados

A obtenção dos dados foi feita por meio da utilização do sistema de câmeras de um *smartphone*, com a utilização de dois tripés posicionados a frente da estrutura, como apresentado na Figura 84.

O aparelho utilizado para a aquisição de dados foi o *smartphone* modelo *Xiaomi Mi Note 10 Pro*, desenvolvido pela *Xiaomi Technology Co.*, equipado com um sistema de câmeras traseiras com as configurações listadas na Tabela 4.

Duas importantes informações vêm das configurações do aparelho, a resolução da imagem da câmera e a taxa de frames por segundo (fps) capturada. A primeira diz respeito à qualidade do dado obtido, uma vez que a imagem é composta por *pixels*,

quanto mais *pixels*, maior a resolução. Já a segunda diz respeito ao que se pode chamar de densidade temporal de dados. Quanto maior a quantidade de frames por segundo, mais fácil é a captura do movimento.

Figura 84 – Posição de um dos tripés utilizados para aquisição dos dados.



Tabela 4 – Configurações de câmera traseira do aparelho utilizado.

Características	
Resolução das Câmeras Traseiras (5)	108 Mp; 12 Mp; 5 Mp; 20 Mp; 2 Mp
Resolução Máxima	12000 x 9000 pixels (108 Mp)
Sensores (4)	(1/1,33"); (1/2,55"); (1/3"); (1/5")
Tamanho da Abertura do Obturador	(F1.69); (F2); (F2); (F2.2); (F2.4)
Zoom Ótico	Até 50x
Resolução Vídeos Vel. Normal	4k (2160p)
fps de Gravação Vel. Normal	30 fps
Resolução Gravação Slow Motion 1	Full HD (1080p)
fps de Gravação Slow Motion 1	120 fps
Resolução Gravação Slow Motion 2	HD (720p)
fps de Gravação Slow Motion 2	240 fps
Resolução Gravação Ultra Slow Motion	HD (720p)
fps de Gravação Ultra Slow Motion (máx. 3s)	960 fps

A visão humana possui uma resolução de interpretação de frames de no mínimo 15 fps (frequências inferiores são vistas como imagens “espaçadas”) e máxima de 30 fps (frequências superiores implicam em uma interpretação das imagens sobrepostas) (CHEN e THROPP, 2007). Vídeos em *slow motion* são gravados em

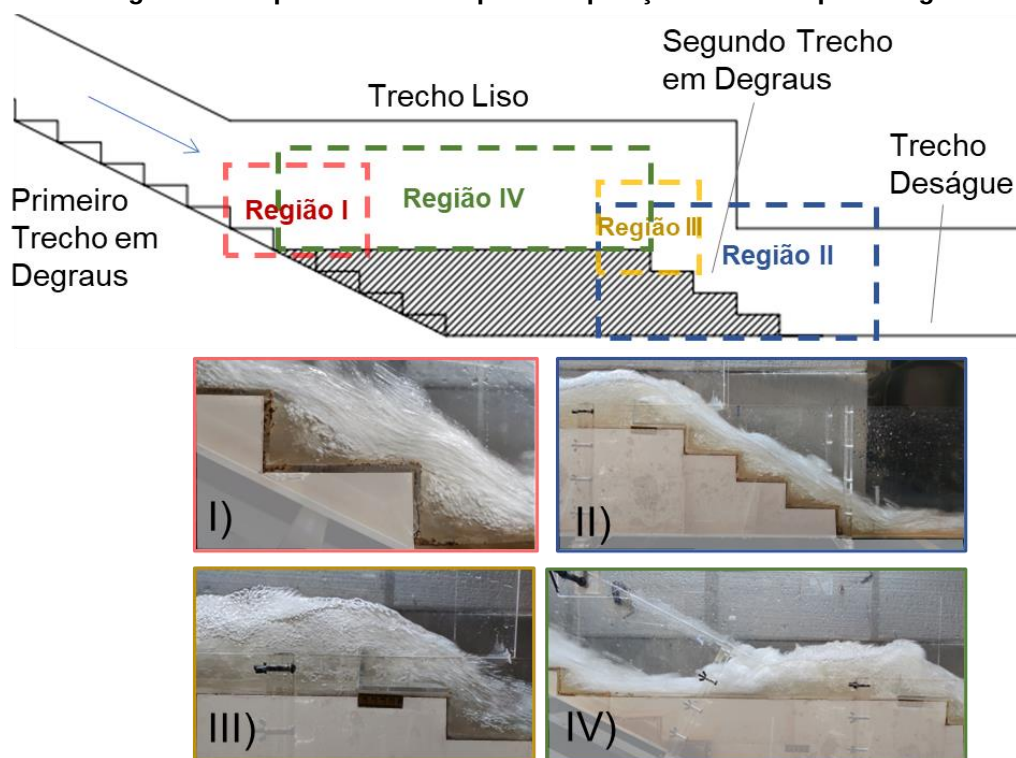
frequências superiores (120 fps, 240 fps ou superiores) e reproduzidos em 30 ou 60 fps. Destaca-se que imagens reproduzidas acima dos 60 fps, como a resposta de muitas telas de dispositivos eletrônicos, ajudam na composição da percepção do movimento como um todo (CLAYPOOL e CLAYPOOL, 2009).

Para captura de escoamentos turbulentos, com grande variação da lâmina de água, uma boa resolução temporal (fps) e espacial (número de pixels) é desejada. No geral, tais valores tem ordens inversas de variação, como mostrado na Tabela 4, sendo que o aumento da resolução espacial diminui a taxa de frames e vice-versa, devido às limitações de *software* e *hardware*.

As filmagens foram obtidas com quatro diferentes enfoques, como descrito a seguir e apresentado na Figura 85:

- I) Região da transição do primeiro trecho em degraus para o trecho liso: buscando caracterizar a condição de saída dos degraus, analisada apenas a condição sem soleira pelo fato de a soleira não alterar o escoamento até essa região para todas as vazões (discutido no item 5.1.1);
- II) Região da segunda descida: buscando capturar o salto do jato no experimento 1 e os efeitos da soleira no jato nos degraus do segundo trecho no experimento 2;
- III) Região do início do escoamento no segundo trecho em degraus: buscando entender a condição de entrada do jato no experimento 1 e a condição de escoamento com a soleira no experimento 2;
- IV) Região do meio do trecho liso: buscando a caracterização do possível ressalto devido ao controle exercido pela soleira, analisada apenas no experimento 2.

Figura 85 – Regiões de captura utilizadas para a aquisição de dados por fotografia e vídeo.

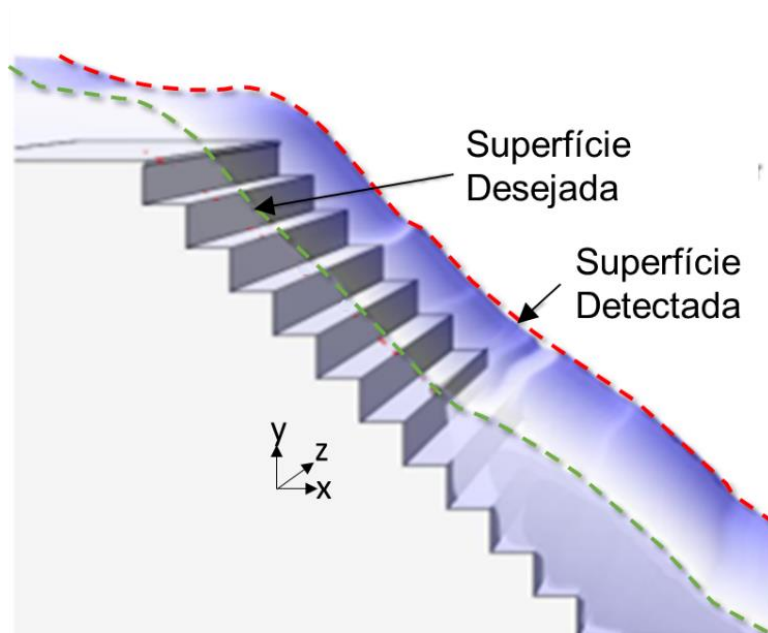


As regiões não foram enumeradas de montante para jusante para facilitar as discussões sobre o efeito da utilização das soleiras, analisando inicialmente a condição de chegada do fluxo (I), seguida do efeito no segundo trecho em degraus (II), a região do início do jato ou da soleira (III) e posteriormente o trecho liso (IV).

Uma vez que o objetivo do trabalho é obter a chamada “rugosidade da superfície de água” por meio da via visão computacional, as posições da câmera foram planejadas visando evitar captações distorcidas. As distorções, que podem ocorrer principalmente em enquadramentos mais abertos (filmagens mais distantes), podem dificultar a identificação da lâmina por meios computacionais, como apresentado na Figura 86.

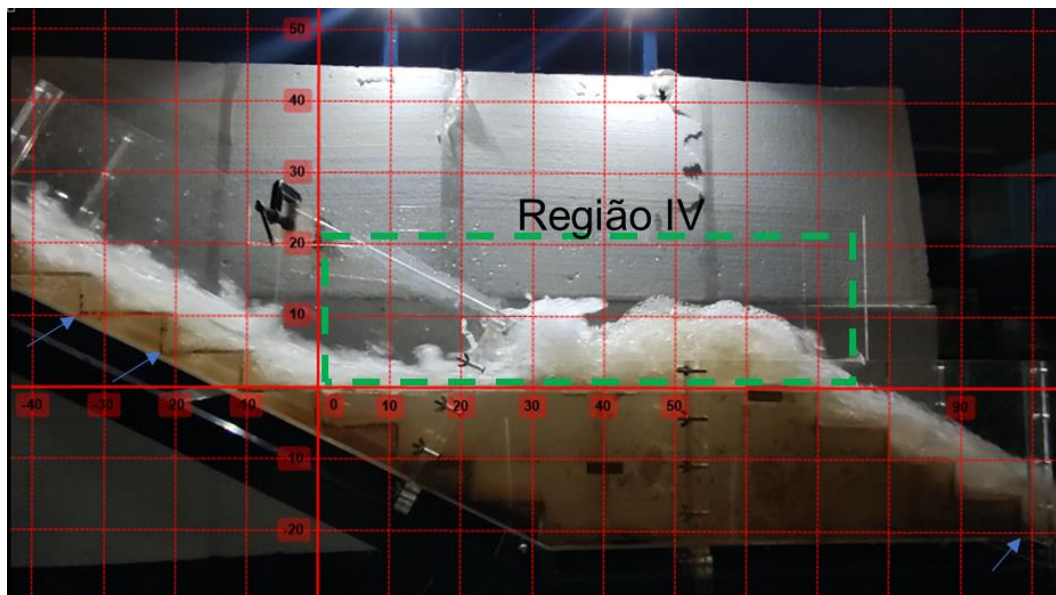
Visando evitar tal tipo de distorção, todos os enfoques dos pontos supracitados foram feitos com base no enquadramento da região de interesse centralizada no vídeo, como mostrado na Figura 87. Nota-se uma pequena distorção da imagem nas regiões de borda das fotos, nas quais os degraus não se encontram alinhados com as marcações apresentadas.

Figura 86 – Exemplo de captação de lâmina de água indesejada devido ao posicionamento da câmera.



Fonte: Adaptado de Zhang (2017).

Figura 87 – Exemplo de imagem capturada para análise da ocorrência do ressalto na região de captura a partir do Região IV. As setas azuis destacam pontos da descida que deveriam concordar com a malha de 10cmX10cm.



4.4 Tratamento dos Dados

Uma imagem digital é composta por elementos mínimos, chamados *pixels*. Cada *pixel* carrega três informações de intensidade de cor: vermelha, verde e azul (sistema *Red Green Blue* - RGB), em conjunto, diversos *pixels* compõem uma imagem digital com suas diversas cores. Computadores armazenam imagens na forma de uma matriz, em

que cada pixel é um elemento na matriz, com posição (i, j) e um vetor com a intensidade de cada uma das cores em RGB, variando de 0 até 255 (sistema 8 bits) para aquele pixel na posição (i, j) .

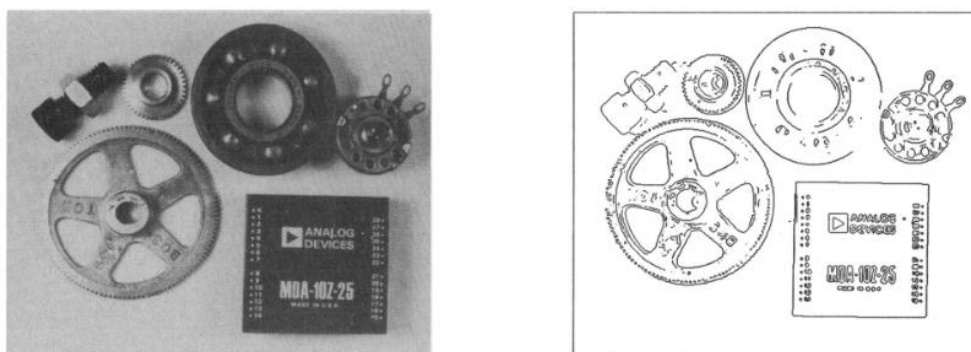
Portanto, o tratamento e armazenamento de dados foi feito com base na manipulação matemática dessas matrizes.

4.4.1 Análise das Imagens

Após a obtenção dos dados, foi feita a implementação de um código em linguagem *Python* com a utilização da biblioteca *OpenCV* (Open Source Computer Vision Library). A biblioteca foi desenvolvida originalmente pela *Intel*, nos anos 2000, e conta com mais de 350 algoritmos de visão computacional.

Para a obtenção das superfícies de água para as vazões testadas, foi feita a aplicação do algoritmo proposto por Canny (1981), já incorporada na biblioteca *OpenCV*. O algoritmo permite a obtenção das bordas principais de uma imagem, como apresentado na Figura 88.

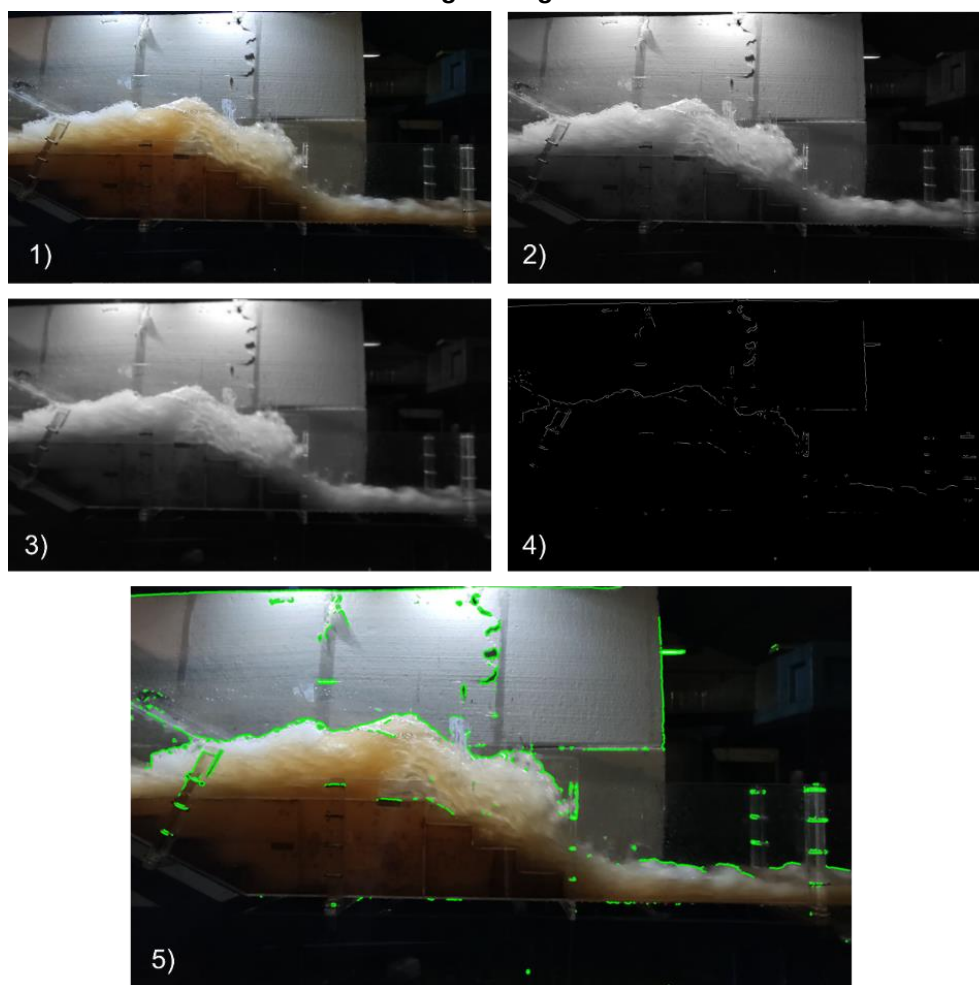
Figura 88 – Aplicação do algoritmo proposto por Canny (1981) na detecção de bordas.



Fonte: Canny (1981).

Para a aplicação do algoritmo, é necessária a transformação da imagem em preto e branco e de um filtro “opaco” na imagem, aumentando a capacidade de detecção do código (BRADSKI, 2000), como apresentado na Figura 89.

Figura 89 – Passos da obtenção da lâmina de água: 1) frame normal; 2) filtro preto e branco; 3) filtro borrado; 4) resultado da aplicação do algoritmo de Canny (1981); 5) bordas projetadas na imagem original.



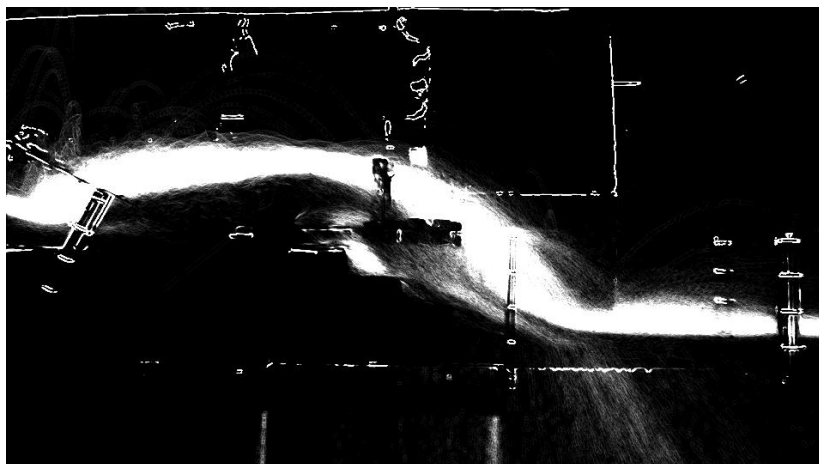
Nota-se que, para o frame apresentado como exemplo, a linha de água obtida não é contínua. No entanto, como vídeos são imagens apresentadas repetidamente, aplicando-se os procedimentos a todos os frames dos vídeos, obtém-se a posição da linha de água ao longo de todo vídeo e variando de posição no quadro explorado.

4.4.2 Espectro de Linhas de Água

Com base em todos os frames de linha de água obtidos (Figura 89 (4)), foi feita a soma das imagens com o código implementado, dividindo-se pelo número total de frames. A soma das imagens consiste na soma das matrizes que representam as imagens resultantes, de forma que a matriz resultante da soma apresenta nas intensidades dos pixels ao longo do tempo do vídeo todo. A intensidade de cada pixel, de 0 a 255, representa o percentual de vezes que no pixel foi identificada uma borda.

A imagem obtida apresenta o “espectro” de permanência da posição da Linha de Água em cada pixel, ou a média de luminosidade do pixel ao longo do vídeo. Um exemplo é apresentado na Figura 90.

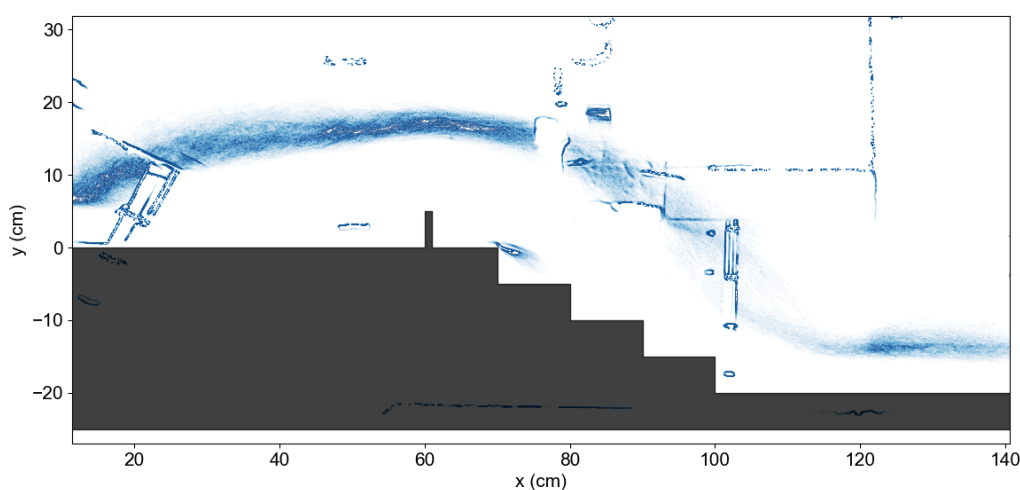
Figura 90 – Exemplo de Espectro de Linhas de Água obtido em um vídeo.



As bordas que identificadas ao longo de todo o vídeo apresentam brilho mais intenso (linhas dos painéis e das conexões do canal em acrílico), enquanto as bordas variáveis da lâmina de água têm intensidade mais baixa, relativa ao número de vezes que uma borda foi identificada naquele pixel.

Filtrando-se os valores da matriz com intensidade superior à 25 (o valor foi estabelecido por tentativa e erro) e plotando-se os demais valores de intensidade de pixel em função da posição, pode-se obter a distribuição apresentada na Figura 91.

Figura 91 – Exemplo de distribuição das intensidades de pixel obtidas pela detecção de bordas.



4.4.3 CPH-ViFA

O código desenvolvido para as análises está disponível na plataforma GitHub para avaliação em demais pesquisas de análise de permanência de movimento, no seguinte endereço:

<https://github.com/MucioRibeiro/CPH-ViFA>

Foi dada à ferramenta o nome CPH-ViFA (Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos – *Video Flow Analysis*), que se encontra disponibilizada em sua versão 0.0.0 na data da elaboração deste documento.

Pretende-se estender as capacidades da ferramenta, incorporando meios de análise estatística dos resultados de permanência, inclusão de uma interface de usuário, análise em tempo real da captura por meio de dispositivos conectados a computadores, análise de estabilidade das medidas ao longo do tempo e análises de velocidade por meio do método *Optical Flow* (Figura 72 e Figura 73).

4.5 Análise das Variáveis e Modelagem Física

Nesse item são apresentadas as bases teóricas para a análise do jato ao final do trecho horizontal (Experimento 1) e do ressalto hidráulico (Experimento 2), discutidas no Capítulo 3. São apontadas as variáveis possíveis de se medir com as técnicas apresentadas e discutidas as suas limitações.

4.5.1 Condição ao Final do Primeiro Trecho em Degraus

Os dois experimentos conduzidos têm o primeiro trecho em degraus como condição a montante do trecho de maior interesse, o trecho horizontal. A perda de energia no primeiro trecho em degraus é dada em função da vazão, da declividade do canal e da geometria dos degraus, como apresentado no item 3.2.3. Por não haver interferência da utilização ou não da soleira no primeiro trecho, entende-se que a condição ao final da descida deverá ser a mesma nos dois experimentos.

As formulações para determinação da perda de energia no trecho em degraus variam de acordo com o regime do escoamento que, por sua vez, varia com a vazão. Como a Figura 83 mostra, os experimentos realizados abrangeram os três regimes de

escoamento em degraus apresentados na literatura. Para estimativa da perda de energia e das variáveis envolvidas na caracterização do escoamento, considerou-se as formulações apresentadas na Tabela 5, diferentes para cada regime de escoamento.

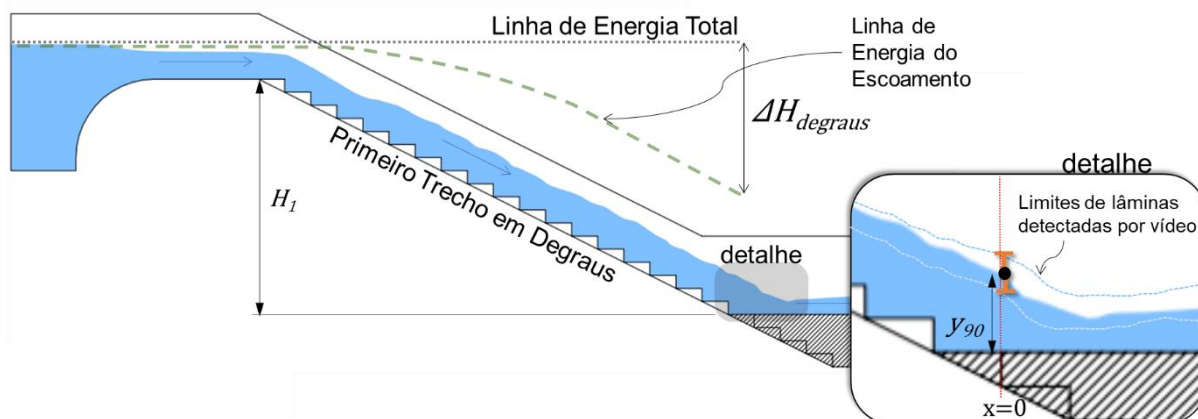
Tabela 5 – Variáveis da análise do primeiro trecho em degraus.

Regime	Variável	Dimensionamento	Fonte
Nappe Flow	$C_{média}$	0,5	Baseado em Chanson e Toombes (2004) ¹
	$H_{residual}$	Eq. (16)	Chanson (1994)
	y_w	Eq. (7)	Rand (1955)
	y_{90}	$y_{final}/(1-C_{média})$	-
	V_{final}	q/y_w	-
Transition Flow	$C_{média}$	0,5	Baseado em Chanson (2002) ²
	V_{final}	$2,7v_c$	Baseado em Chanson (2002) ²
	y_{final}	q/V_{final}	-
	y_{90}	$y_{final}/(1-C_{média})$	-
	$H_{residual}$	$y_{final} + (V_{final})^2/(2g)$	-
Skimming Flow	H_e	Eq (10)	Ohtsu et al (2004)
	f	Eq (18)	Ohtsu et al (2004)
	$H_{residual}$	Eq (17) e Eq (19)	Ohtsu et al (2004)
	y_{final}	$(f/(8.\text{sen}(\theta).y_c^3))^{1/3}$	Yasuda e Ohtsu (1999)
	V_{final}	q/V_{final}	-
	$C_{média}$	Eq (11)	Ohtsu et al (2004)
	y_{90}	$y_{final}/(1-C_{média})$	-

¹ Figura 20; ² Figura 22

Com base nas medições realizadas, é possível detectar a variação da lâmina de água ao longo do tempo. Pode-se, então, comparar a profundidade da superfície detectada com a profundidade aerada do escoamento, buscando entender se há relação entre a lâmina detectada por vídeo e o limite do escoamento aerado teórico, y_{90} como apresentado na Figura 92.

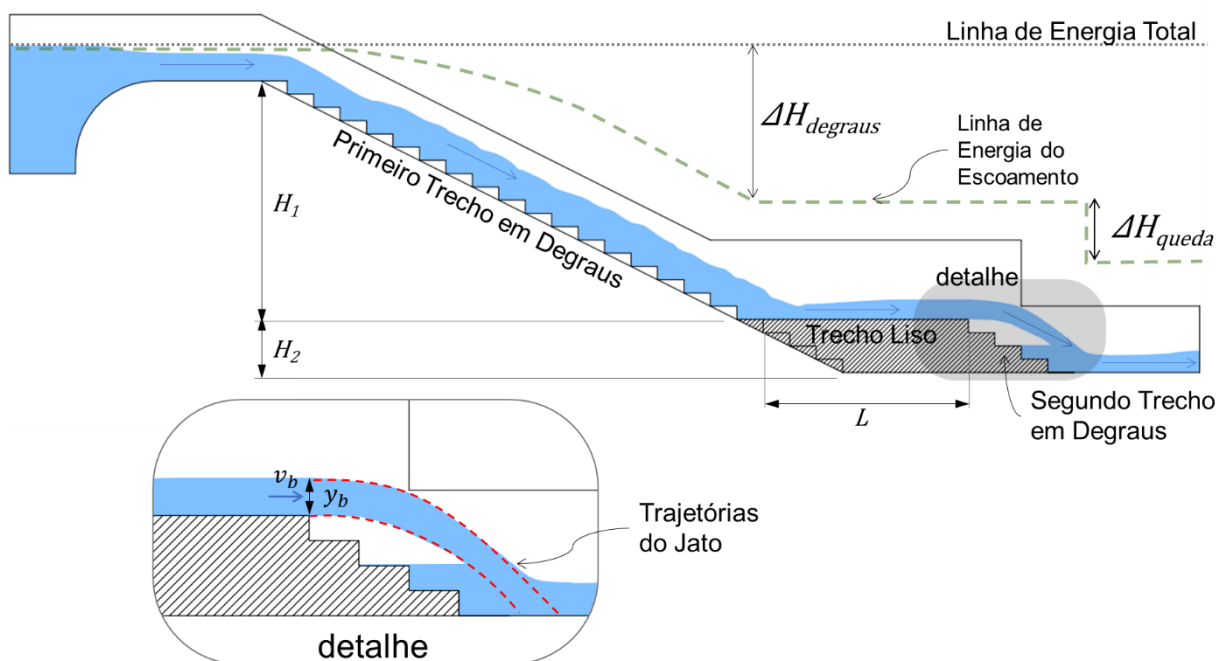
Figura 92 – Detecção da lâmina ao final do primeiro trecho em degraus: Qual a correlação entre as profundidades detectadas por vídeo e a profundidade aerada teórica y_{90} ?



4.5.2 Experimento 1 – Análise Sem Soleira

A Figura 93 apresenta uma análise do desenvolvimento esperado para o escoamento no Experimento 1.

Figura 93 – Desenvolvimento do escoamento ao longo do Experimento 1: Qual a condição de entrada do jato? Qual a sua trajetória?

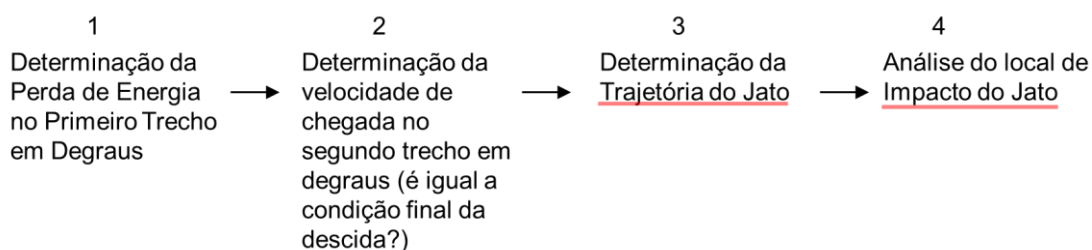


Apesar de o escoamento sofrer perdas de energia no primeiro trecho em degraus, chega no início do segundo trecho em degraus com uma alta energia, que pode fazer com que haja o descolamento do escoamento do canal. Ao se descolar do canal, o escoamento se dá como um jato, que se choca com o trecho horizontal final e perde

energia devido ao impacto (ΔH_{queda}). A utilização de soleira em mudanças de declividade visa impedir tal impacto e possíveis danos a jusante da estrutura.

A trajetória do jato é função da velocidade e ângulo de início do escoamento (tratado no item 3.3). Com o objetivo de se estudar a ocorrência dos jatos, a sequência de análise pode ser resumida na Figura 94. Destaca-se na figura as medições feitas nesse trabalho.

Figura 94 – Sequência de análise do impacto do jato em canais com mudanças de direção.



Analisando os passos apresentados na Figura 94 e de posse dos dados obtidos por meio fotográfico, pode ser feita uma análise da trajetória do jato (passo 3), de forma a se estimar qual a velocidade de chegada geraria tal trajetória (passo 2).

Para a trajetória do jato, o item 3.3 traz a relação apresentada a seguir para o cálculo da trajetória do jato:

$$Y = -X \cdot \operatorname{tg}(\theta_0) - \frac{g \cdot X^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \theta_0} \quad (20)$$

Em que:

- Y representa as coordenadas do jato em relação ao eixo vertical (m);
- X representa as coordenadas do jato em relação ao eixo horizontal (m);
- θ_0 é o ângulo formado entre a horizontal e a direção da velocidade na entrada do canal;
- v_0 é a velocidade do escoamento prestes a entrar e movimento de jato (m/s).

Como $\theta_0 = 0^\circ$ nos experimentos conduzidos, pode-se eliminar o primeiro termo após a igualdade. Logo que é esperada uma variação da trajetória em função da variação da vazão, a variável y_c pode ser utilizada na adimensionalização da equação (20), resultando em:

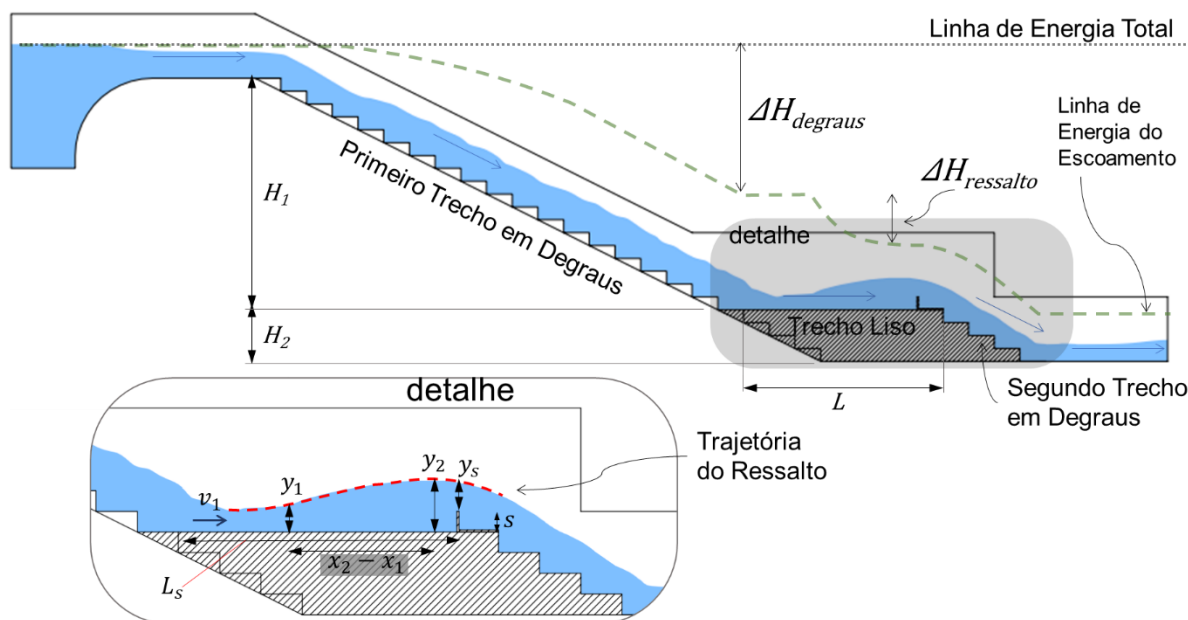
$$\frac{Y}{y_c} = -\frac{g \cdot}{2v_0^2 \cdot y_c} X^2 \quad (49)$$

Portanto, é esperado que as trajetórias dos jatos adimensionalizados sejam representados pela equação (49). De posse da equação, é possível derivar a velocidade v_0 para comparação com as velocidades estimadas para o final do primeiro trecho em degraus (passos 2 e 1 na Figura 94).

4.5.3 Experimento 2 – Análise Com Soleira

Já para o Experimento 2, como apresentado na Figura 95, é esperado que a presença da soleira provoque a ocorrência de um ressalto hidráulico no trecho liso do canal.

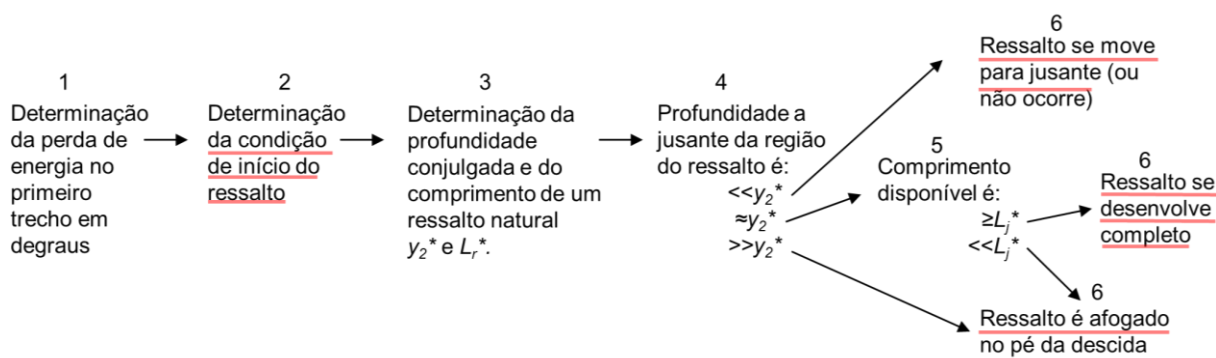
Figura 95 – Desenvolvimento do escoamento ao longo do Experimento 2.



O ressalto depende de várias condições para que se desenvolva plenamente, como tratado no item 3.4. O comprimento do ressalto ($x_2 - x_1$) em relação ao espaço disponível para sua ocorrência L_s e as profundidades de água no início e no final do ressalto (y_1 e y_2) têm influência no tipo e na ocorrência do ressalto hidráulico (Tabela

1). O estudo da ocorrência do ressalto de maneira analítica se daria segundo resumido na Figura 96.

Figura 96 – Sequência de análise da ocorrência de ressalto a montante de soleiras em descidas com mudança de direção.



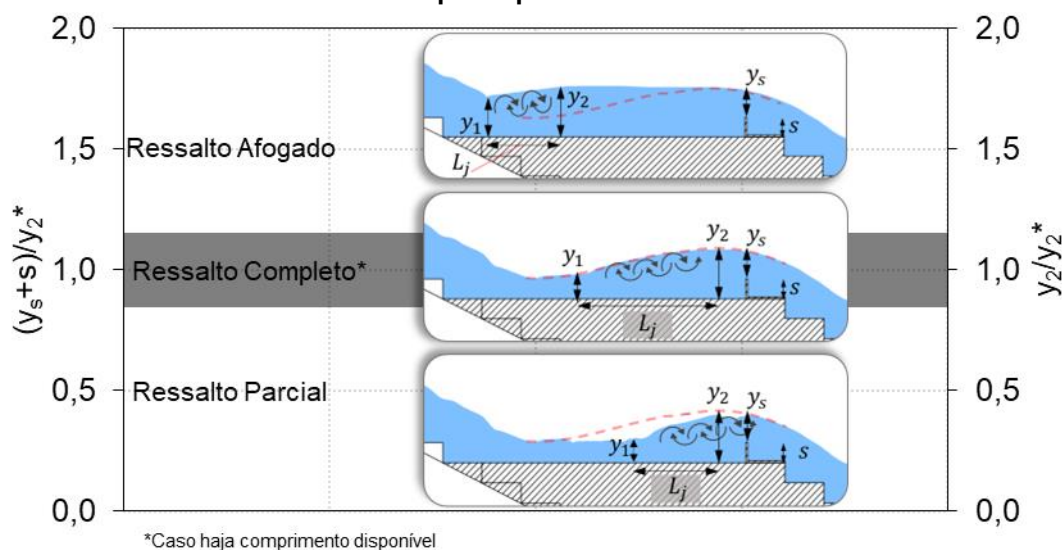
Destaca-se que, pelos meios fotográficos adotados, é possível fazer a caracterização do desenvolvimento do ressalto (passo 6) e sua comparação com as condições esperadas para ressalto completamente desenvolvidos (tratado no item 3.4.1). É possível determinar a posição de início do ressalto (x_1) e a curvatura do seu desenvolvimento (a profundidade y_1 do início do ressalto pode ser estimada, mas não obtida diretamente, uma vez que se espera o escoamento bastante aerado no início do ressalto no pé de uma descida).

Usualmente, obstáculos verticais exercendo controle sobre o escoamento, exercem o chamado controle de seção crítica, com o escoamento ocorrendo com energia mínima (crítica) acima da soleira. Dessa forma, entende-se que a profundidade do escoamento acima da soleira deve ser próxima à profundidade crítica (y_c), de forma que a condição a jusante (passo 4) deverá ser próxima de um valor de $y_c + s$.

Portanto, inicialmente, pode-se determinar a profundidade conjugada y_2^* para um ressalto com as condições de entrada y_1 e Fr_1 estimadas⁷. Posteriormente, pode-se verificar a correlação entre o escoamento acima da soleira y_s e a profundidade crítica y_c , além da comparação desse valor com a profundidade y_2^* , como ilustrado na Figura 97.

⁷ No item 5.3.1 é discutida a estimativa dos parâmetros no final do primeiro trecho.

Figura 97 – Comportamentos esperados para o ressalto hidráulico de acordo com a condição imposta pela soleira.

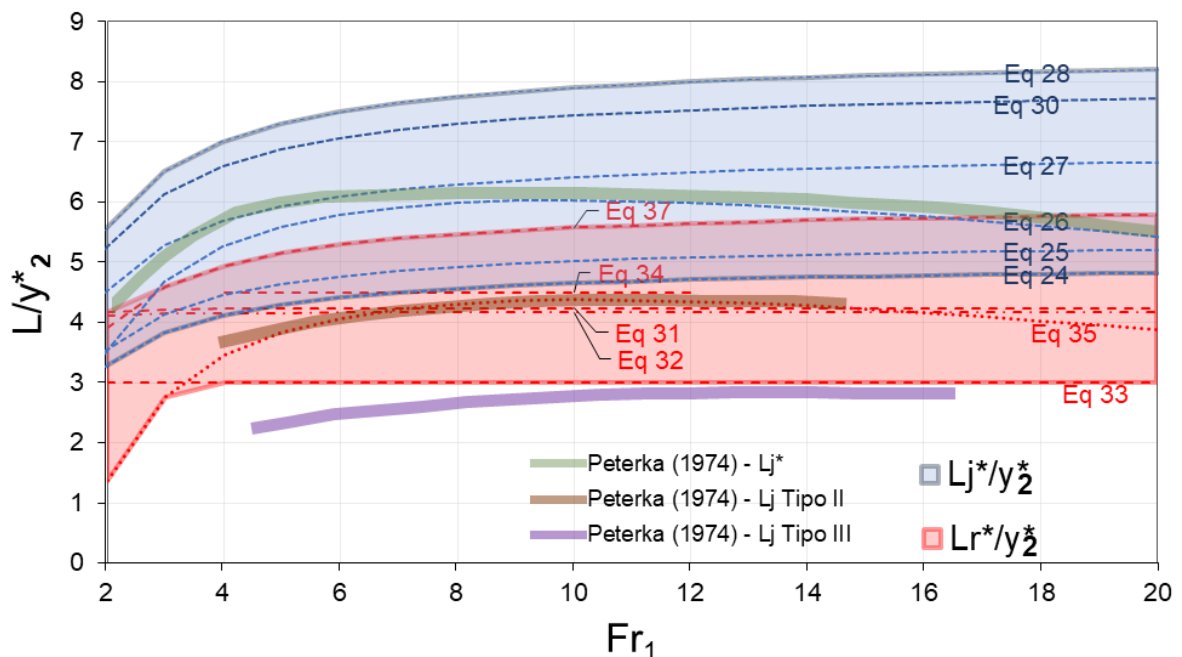


Há uma certa faixa de aceitabilidade da ocorrência do ressalto natural, não sendo estritamente necessária a condição de jusante igual a profundidade conjugada ($y_s + s = y_2^*$) para que o ressalto ocorra (PETERKA, 1974). No entanto, não foi encontrada na literatura uma clara definição da aceitabilidade dessa divergência na condição de jusante.

Após análise da profundidade, é necessária a verificação da disponibilidade de espaço no trecho horizontal para conter o comprimento do ressalto (passo 5). Nota-se na Tabela 1 e na Tabela 2 que há uma grande variedade de formulações para a determinação do comprimento do ressalto em si (L_j^*) e da região de recirculação (L_r). Por isso, foi feita uma compilação gráfica das formulações nas tabelas, apresentada na Figura 98, com os comprimentos L_j^* e L_r relativos à profundidade do ressalto natural y_2^* apresentados em função do número de Froude a montante do ressalto.

Após identificadas por meios fotográficos o ponto inicial e final do ressalto (x_1 e x_2), pode-se avaliar qual a relação obtida entre a distância ($x_1 - x_2$) e y_2^* e/ou a profundidade de água na soleira $y_s + s$. Dessa forma, é possível avaliar se o comprimento dos ressaltos obtidos está de acordo com os de ressaltos controlados por obstáculos.

Figura 98 – Comprimentos relativos do ressalto e da recirculação em função do número de Froude da condição inicial do ressalto: Onde se localizarão as condições testadas no experimento 2?



Fonte: Formulações do comprimento do ressalto natural: Tabela 1; Formulações do comprimento da recirculação: Tabela 2; Formulações de ressaltos com obstáculos: Peterka (1974) (Figura 48).

4.5.4 Resumo das Variáveis de Interesse

A Tabela 6 resume as variáveis de interesse e as variáveis necessárias para as análises nesta modelagem física com base nas análises apresentadas anteriormente.

Tabela 6 – Variáveis experimentais e teóricas analisadas no modelo.

Local	Análise	Quantificação	Variável	Variáveis Necessárias para Análise
Primeiro Trecho Descida em Degraus (Tabela 5)	Tipos de Escoamento	Visual / Calculado	SK, NA, TR	$Q, h, l, B, y_c, v_c, H_{total}, \theta$
	Profundidade Aerada Final	Detectado* / Calculado	y_{90}	
	Velocidade Final	Calculado	v_{final}	
	Profundidade de Água Final	Calculado	y_{final}	
	Concentração de Ar	Calculado	$C_{média}$	
Trecho Horizontal sem Soleira (Exp. 1)	Trajetória do Jato	Detectado / Calculado	Perfil Superfície Livre	$v_0, \theta_0, y_{final}, v_{final}$
Trecho Horizontal com Soleira (Exp. 2)	Condição Inicial Ressonho	Calculado	y_1, v_1	y_{final}, v_{final}
	Condição Jusante Ressonho	Calculado	y_2, v_2	Fr_1, s, y_c

Local	Análise	Quantificação	Variável	Variáveis Necessárias para Análise
	Comprimento do Ressalto	Calculado	L_r e L_j	Fr_1, y_1, y_2
	Desenvolvimento do Ressalto	Detectado / Calculado	Perfil Superfície Livre	Fr_1, y_1, y_2

*A “detecção” da profundidade aerada y_{90} final do fluxo é discutida no item 5.3.

Em que:

- SK, NA, TR representam os regimes de escoamento *Skimming Flow*, *Nappe Flow* e *Transition Flow*, respectivamente;
- y_{90} representa a profundidade aerada do escoamento no final do primeiro trecho (m);
- y_{final} (m) e v_{final} (m/s) representam a velocidade e a profundidade de água (sem ar) no final do primeiro trecho;
- Q representa a vazão de água do canal (m³/s);
- h e l representam a altura e o comprimento dos degraus e B representa a base do canal (m);
- y_c (m) e v_c (m/s) representam a profundidade e a velocidade críticas do escoamento;
- H_{total} representa a carga hidráulica total do escoamento (m);
- θ representa o ângulo de inclinação do primeiro trecho;
- $C_{média}$ representa a concentração média de ar no final da descida;
- v_0 (m/s) e θ_0 representam a velocidade e o ângulo de entrada do jato do escoamento;
- y_1 e y_2 representam as profundidades inicial e final do ressalto (m);
- v_1 e v_2 representam as velocidades inicial e final do ressalto (m);
- Fr_1 representa o número de Froude do escoamento no início do ressalto;
- s representa a altura da soleira utilizada (m); e
- L_r e L_j representam o comprimento da recirculação do ressalto e do ressalto em si, respectivamente (m).

No capítulo seguinte, são apresentados os dados obtidos dos dois experimentos, com e sem soleira, e trabalhados os dados com base nas relações apresentadas neste item. São apresentadas as correlações entre as variáveis para análises dos

fenômenos da Dissipação da Energia no Primeiro Trecho em Degraus, Ocorrência do Descolamento do Escoamento por Meio de um Jato no Experimento 1 e Ocorrência de um Ressalto Hidráulico no Trecho Horizontal no Experimento 2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões são apresentados em três partes:

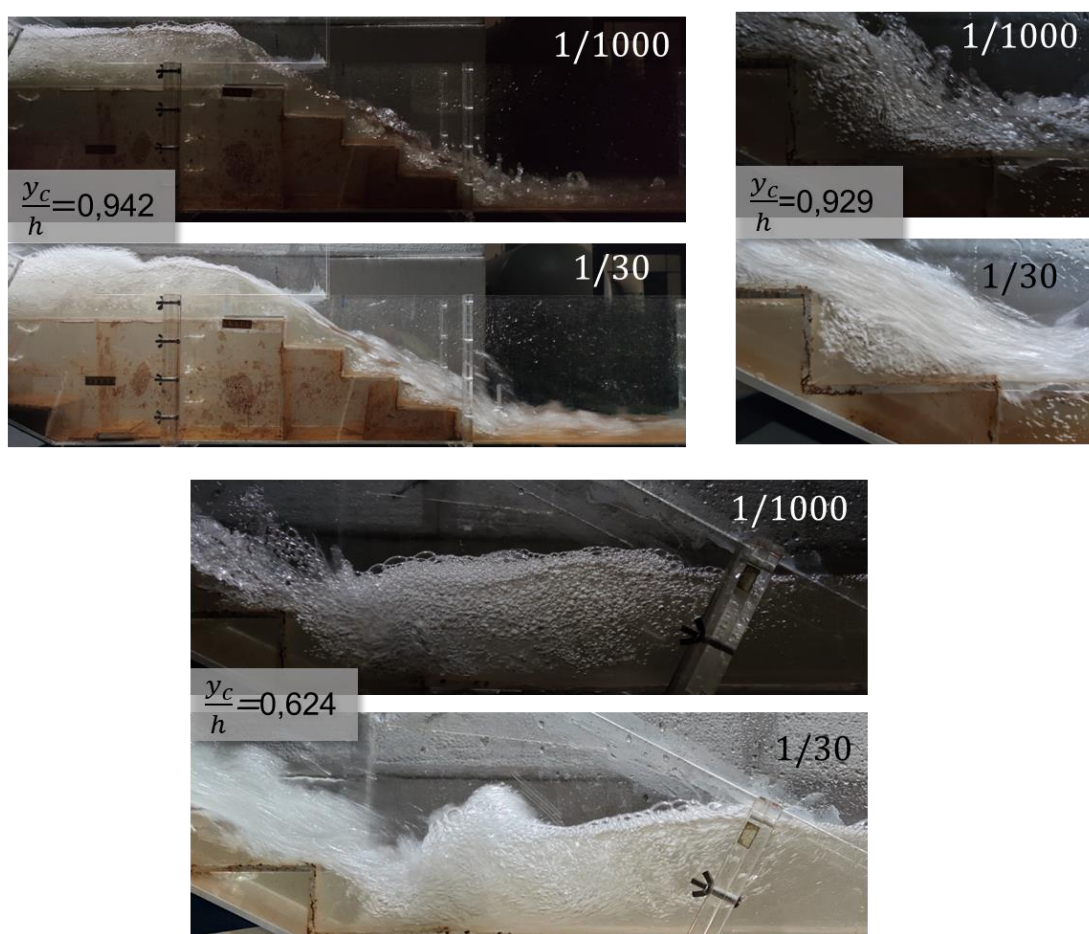
- I) Inicialmente são apresentados os registros feitos por fotografias e vídeos, com intuito de apresentar uma análise qualitativa do efeito da utilização de soleiras. Tal análise visa facilitar a classificação visual dos efeitos no escoamento do aumento de vazão, da utilização ou não da soleira e por pontos de aquisição de dados, regiões I, II, III e IV, seguindo essa ordem de apresentação dos resultados.
- II) Na segunda parte são apresentados os resultados das análises feitas por meio de tratamento computacional dos vídeos. Os resultados são apresentados em termos de permanência da lâmina de água detectada ao longo do tempo, buscando-se obter um comportamento médio do escoamento, mesmo diante da turbulência do fluxo. A apresentação dos resultados visa apenas a apresentação dos dados coletados de maneira geral para cada uma das vazões dos dois experimentos.
- III) Na terceira parte são realizadas as análises dos dados coletados de variação da superfície de água ao longo do tempo para os experimentos com e sem soleira entre trechos. Tal estudo visa embasar a adoção de variáveis e suas correlações para a análise dos jatos e aplicação de soleiras.

5.1 Parte I - Classificação Visual

Para a classificação visual, foram utilizadas fotografias do escoamento, pois as câmeras em geral apresentam resolução melhor em fotos quando comparadas aos vídeos. Para as análises, foram utilizadas as configurações do tempo de fechamento do obturador da câmera de 1/1000 s e de 1/30 s. Objetos muito velozes podem ser capturados como borrões com tempo de fechamento do obturador grande, uma vez que são capturados em diferentes posições. O tempo de fechamento do obturador está relacionado a quantidade de luz que entra no dispositivo de captura, sendo as imagens obtidas com o tempo de obturação menor, mais escuras e vice-e-versa.

Analisando-se imagens com tempo de fechamento do obturador baixos, é possível notar que o escoamento aerado, visto como o escoamento “branco” (por vezes referenciado como *White Waters* na literatura em inglês), é na verdade um conjunto de bolhas de ar arrastadas e aprisionadas no escoamento como apresentado na Figura 99 (representado esquematicamente na Figura 17).

Figura 99 – Variações das fotografias (em mesma posição e em momentos distintos) em função do tempo de fechamento do obturador da câmera para três diferentes regiões.



A percepção humana se assemelha mais ao tempo de fechamento maior do obturador (1/30s), não sendo possível a olho nu distinguir as bolhas no escoamento, mas sim um conjunto opaco em movimento.

Como discutido no início do capítulo, a sequência de apresentação dos dados seguiu a ordem de aumento de vazão, seguido do efeito da soleira e, por fim, pontos de aquisição de dados, como resumido na Figura 101 e na Tabela 7.

Figura 100 – Reprodução da Figura 85: Regiões de captura utilizadas para a aquisição de dados por fotografia e vídeo.

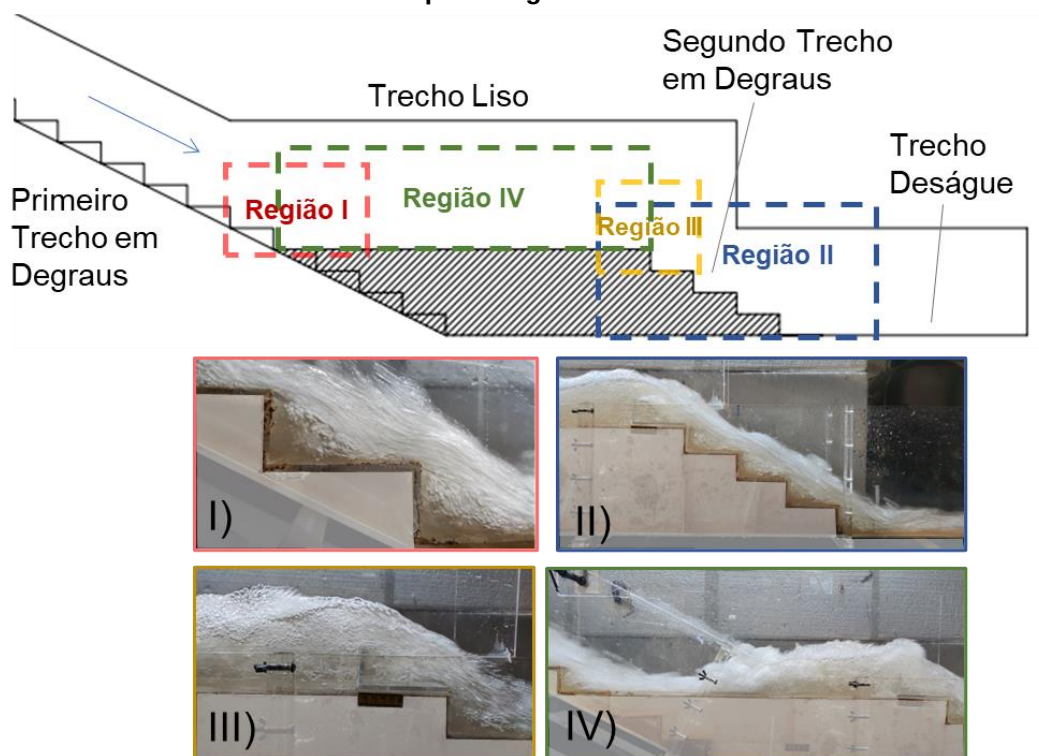


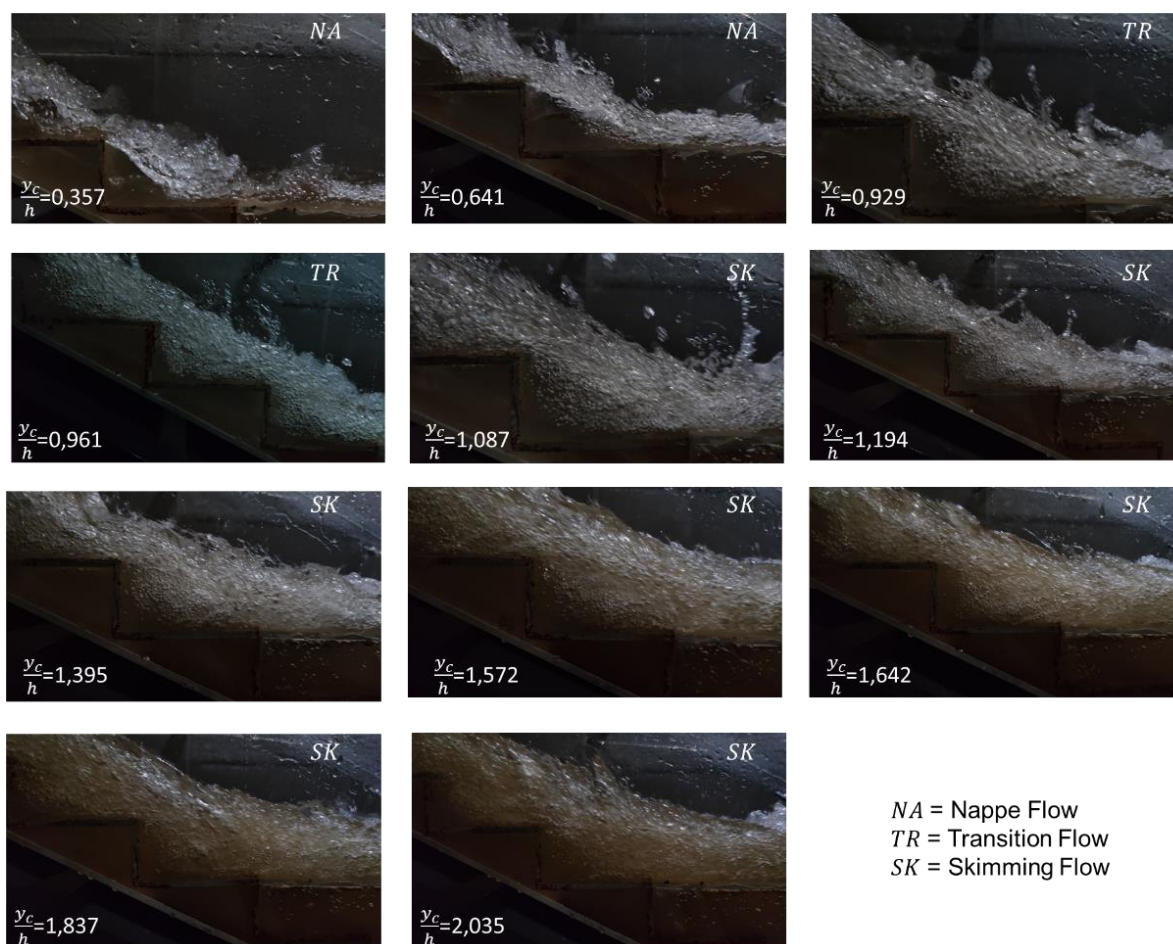
Tabela 7 – Sequência de apresentação da classificação visual.

REGIÃO I	
Experimento 1	Experimento 2
Menor Vazão → Maior Vazão	-
Figura 101	Não Realizada
REGIÃO II	
Experimento 1	Experimento 2
Menor Vazão → Maior Vazão	Menor Vazão → Maior Vazão
Figura 102	Figura 103
REGIÃO III	
Experimento 1	Experimento 2
Menor Vazão → Maior Vazão	Menor Vazão → Maior Vazão
Figura 104	Figura 106
REGIÃO IV	
Experimento 1	Experimento 2
-	Menor Vazão → Maior Vazão
Não realizada	Figura 107

5.1.1 Região I – A condição de entrada no trecho horizontal

A partir das imagens obtidas no Região I (Figura 85), pode-se avaliar a condição de chegada do escoamento no início do trecho liso, apresentado na Figura 101. As imagens do Região I foram obtidas durante a Experimento 1, pois a presença da soleira provocou o afogamento das três primeiras vazões testadas no Experimento 2. Para as demais vazões o comportamento da chegada foi o mesmo para ambas os experimentos.

Figura 101 – Experimento 1 – Condições de chegada no final do primeiro trecho em degraus. Fotos obtidas com a câmera na Região I, tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/1000 s.



Para os escoamentos classificados em *Nappe Flow*, há uma grande aeração ao final dos 18 degraus do primeiro trecho, sendo possível visualizar a cavidade aprisionada abaixo da queda do escoamento. Nos escoamentos classificados na transição, tem-se o preenchimento da cavidade entre o jato de queda e o degrau. Nota-se que,

quanto maior a vazão já no regime *Skimming Flow*, mais estabilizado o escoamento se mostra (com menos projeções de bolhas e menor deformação da lâmina), como esperado segundo a literatura. Para as três últimas vazões testadas ocorreu o arrasto de material particulado do tanque de alimentação, de forma que o escoamento entre as bolhas se apresenta com coloração marrom.

Em relação à visualização das bolhas internas ao escoamento, é possível notar que ficam menos definidos os contornos das bolhas quanto maior a vazão. Tal observação encontra-se coerente com o aumento de velocidade esperado para maiores vazões (Figura 75), que dificulta a obtenção de uma imagem estática da bolha, mesmo com um tempo de fechamento do obturador baixo.

No entanto, além da opacidade das bolhas, é possível perceber que nas cinco últimas vazões analisadas aparenta ocorrer uma diminuição da quantidade de bolhas no escoamento, que pode indicar uma diminuição da aeração. Apesar de contraintuitivo, conforme o escoamento tem um aumento de vazão, o ponto de aeração máxima se posiciona cada vez mais a jusante (Figura 24), sendo possível não ter sido atingido o escoamento uniforme a aeração máxima para as últimas vazões.

5.1.2 Região II – Segundo trecho em degraus sem e com soleira atuando a montante

Na Figura 102 são apresentadas as condições do escoamento no segundo trecho dos experimentos realizadas sem a presença da soleira. A carga cinética que o escoamento possui no final do primeiro trecho em degraus não tem grande dissipação no trecho horizontal, chegando na mudança de direção com uma alta velocidade. O escoamento segue em movimento de jato no início do segundo trecho, como previsto.

Pode ser notada a forma parabólica do jato do escoamento (equação (20)), com o ponto de impacto posicionado cada vez mais a jusante. Nota-se também o jato com direcionamento mais horizontal no ponto de impacto quanto maior a vazão analisada, ainda de acordo com a trajetória parabólica prevista, acelerado pela gravidade.

A partir da valores de vazão com y_c/h 1,395, o jato tem impacto no trecho de deságue do aparato experimental, com o escoamento se assemelhando a uma queda singular do *Nappe Flow* (Figura 13). Para as vazões com valores de y_c/h acima de 1,395, após

o impacto do jato no trecho de deságue, foram observadas as ondas de choque na parede lateral no deságue devido ao comportamento tridimensional do jato em escoamento com entrada supercrítica (CHANSON e TOOMBES, 2004).

Figura 102.1 – Experimento 1 – Valores de y_c/h testados na descida na Região II. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.

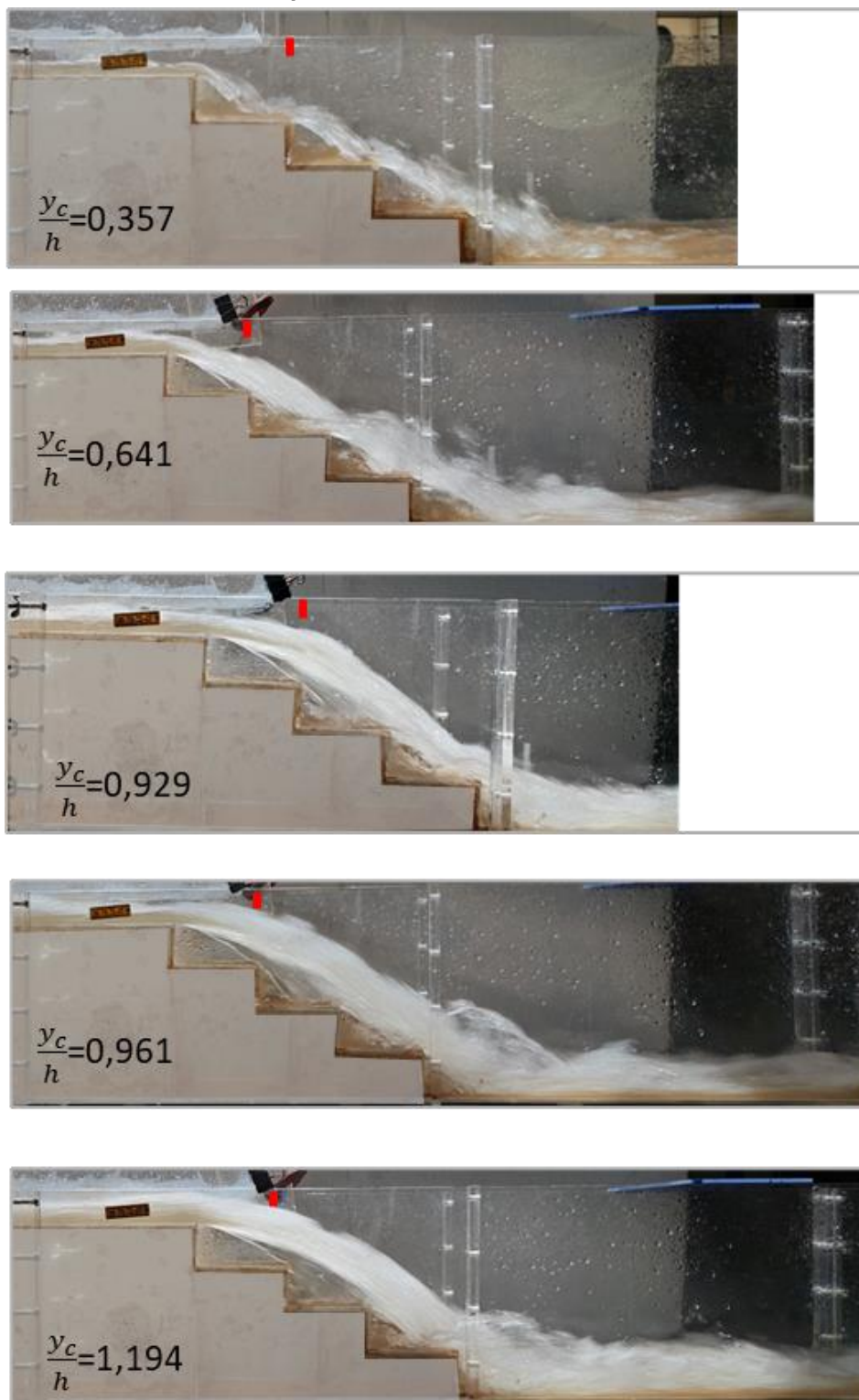
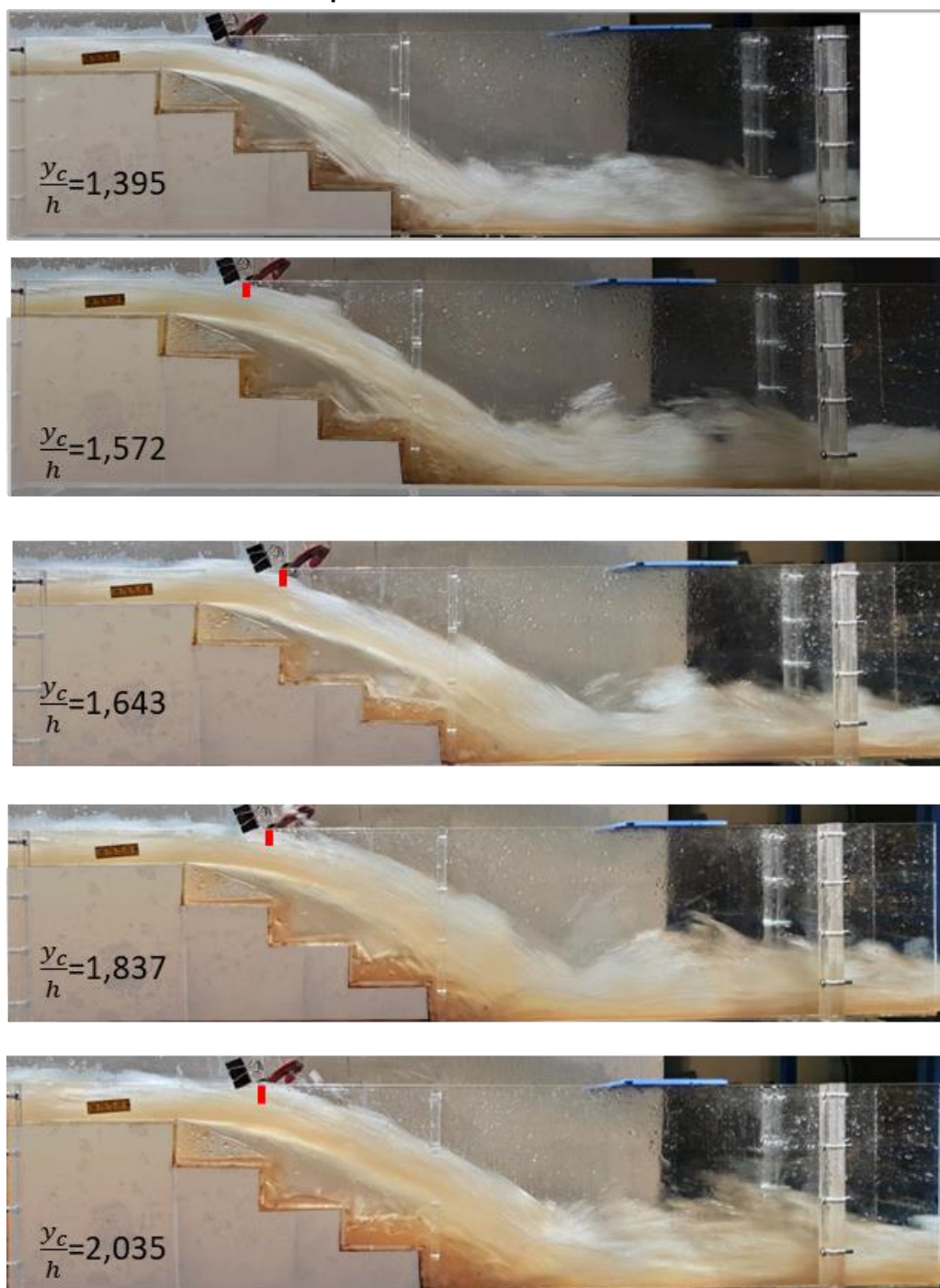


Figura 102.2 – Experimento 1 – Valores de y_c/h testados na descida na Região II. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.



Com exceção da vazão mais baixa testada, com y_c/h de 0,357, nota-se que há uma grande aeração no jato, resultante do arrasto do ar no entorno ao longo da trajetória e do ganho de velocidade.

O objetivo da utilização dos degraus no design de estruturas hidráulicas é a dissipação da energia pelas quedas sucessivas nos degraus (*Nappe Flow*) ou pelo deslizamento e perda de energia sobre os degraus (*Skimming Flow*). A utilização das soleiras teve como objetivo forçar uma condição na entrada do segundo trecho em degraus que evite um escoamento supercrítico no início do segundo trecho, provocando o contato entre o escoamento e os degraus.

Na Figura 103 são apresentados os resultados para a Experimento 2, com a presença da soleira, para as vazões testadas.

Apenas entre as vazões mais baixas nos Experimentos 1 e 2 (relação y_c/h de 0,295 e 0,357) houve pouca diferença entre o comportamento com e sem soleira no segundo trecho, ambas em regime *Nappe Flow*. Para todas as demais, a presença da soleira promove o contato do escoamento com os degraus e consequente maior dissipação de energia e condução do fluxo.

A partir da vazão com $y_c/h=1,324$ ocorre um descolamento do escoamento atrás da soleira, com o escoamento acima do obstáculo ocorrendo como um novo jato. Quando comparadas a Figura 102 e a Figura 103, nota-se que esse jato que ocorre sobre a soleira tem um alcance inferior em relação ao jato que ocorre sem a soleira.

Quanto maiores as vazões observadas, maiores as perturbações notadas no escoamento na região da soleira e do jato, o que é mais bem explorado nas análises computacionais de vídeo.

Figura 103.1 – Experimento 2 – Valores de y_c/h testados na descida na Região II. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.

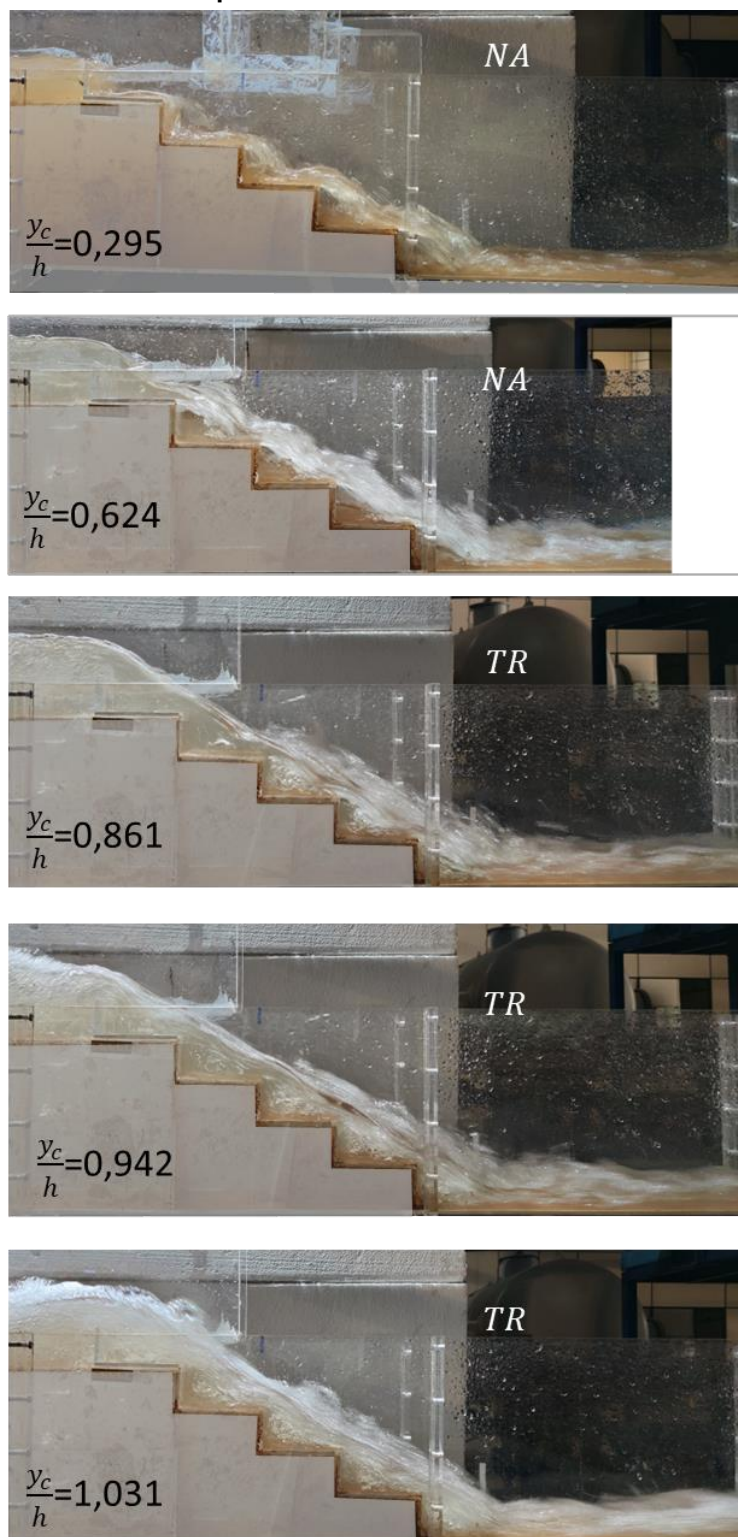
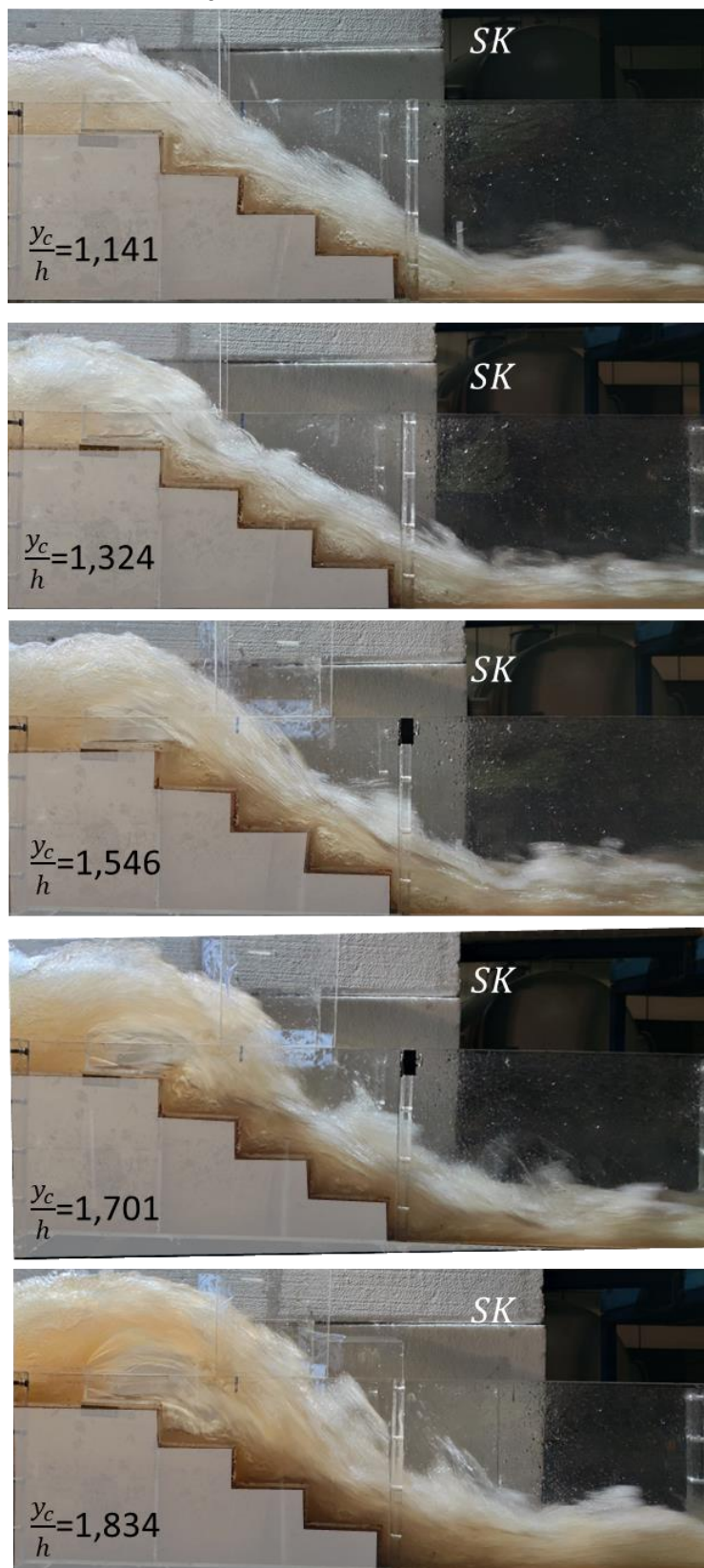


Figura 103.2 – Experimento 2 – Valores de y_c/h testados na descida na Região II. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.



5.1.3 Região III – Detalhes da condição de entrada no segundo trecho em degraus

Na Figura 104 são apresentadas as vazões testadas para a Experimento 1, sem a utilização de soleira, obtidas na Região III.

Nas imagens, foi realçada com edição uma marcação de caneta azul existente nas paredes de acrílico do canal para facilitar a visualização da variação da trajetória do jato em função da vazão. É possível identificar a evolução do jato para um início de trajetória mais vertical com o aumento da vazão, corroborando com o esperado para uma maior velocidade horizontal de início (Equação (20)). A profundidade na iminência da ocorrência do jato tem um aumento com o incremento da vazão, mas é pouco perceptível entre vazões consecutivas.

Para a vazão mais baixa, com valores de y_c/h de 0,357, o jato não ultrapassa o primeiro degrau e é notada pouca aeração quando comparado com a condição de chegada no final do primeiro trecho em degraus (apresentado no item 5.1.1), indicando a expulsão no trecho liso do ar arrastado na primeira descida. Para a vazão com $y_c/h=0,641$, nota-se a aeração no jato e sua desintegração no contato com o segundo degrau, mecanismo de dissipação de energia do regime *Nappe Flow*.

Desde a vazão com $y_c/h=0,641$ até a vazão com $y_c/h=1,194$ tem-se a formação de uma camada do jato mais baixa na parede de acrílico do canal, resultado da tensão superficial entre a água e o acrílico. Tal efeito não é esperado em protótipos construídos em outros materiais, devido a efeitos de escala e tensão superficial entre a parede e a água.

Analisando-se o núcleo dos jatos, é possível observar a formação da aeração completa do jato como um todo conforme referenciado na literatura. Nota-se a aeração ocorrendo em ambos os sentidos do jato, até o desenvolvimento pleno da camada limite do jato. Porém, a aeração da parte inferior do jato é notadamente menor que a superior, como ilustrado na Figura 105.

Figura 104 – Experimento 1 - Valores de y_c/h testados na descida no Ponto III. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.

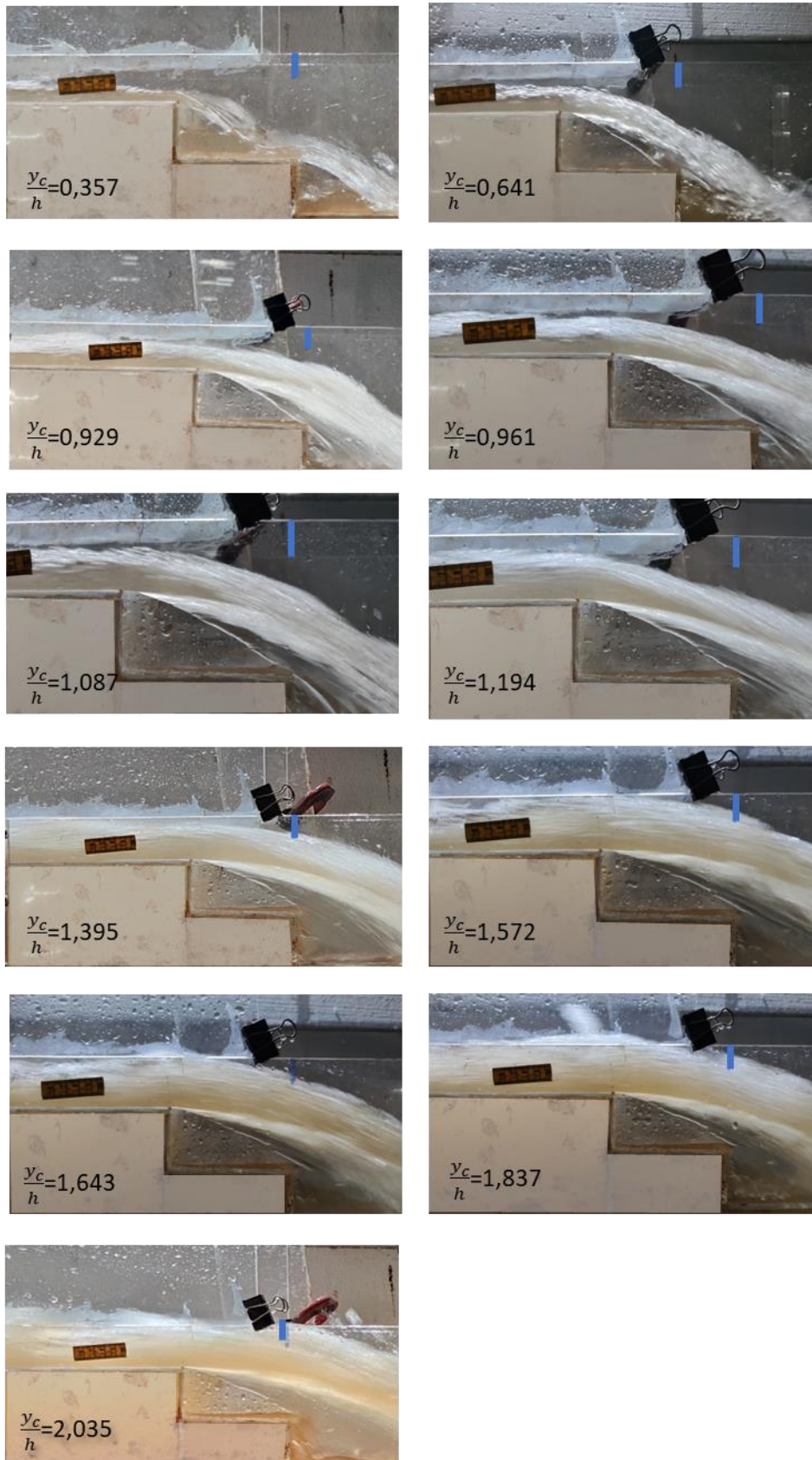
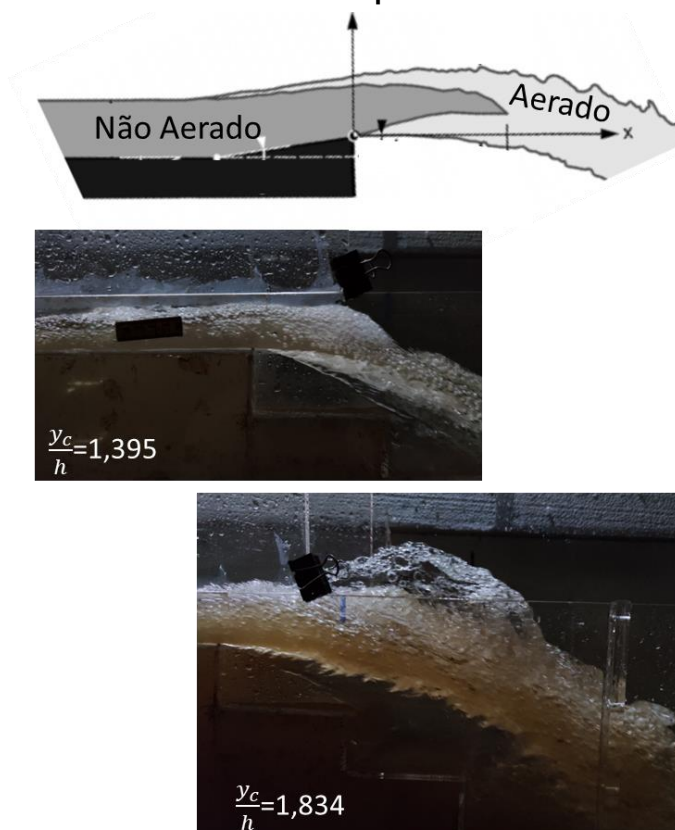


Figura 105 – Esquema da aeração de jatos em queda e dois exemplos das análises de jatos nos experimentos.

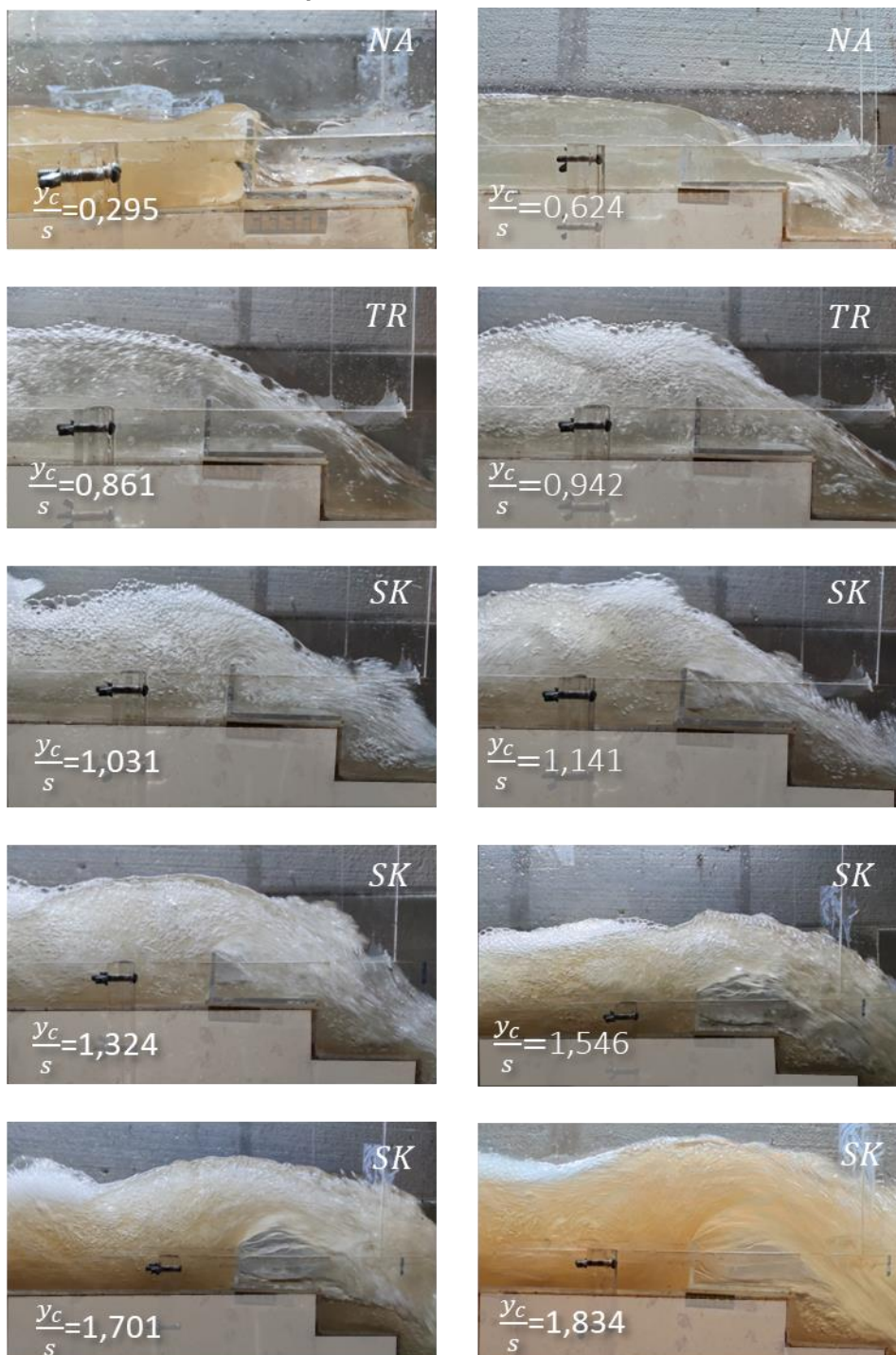


Fonte: Ilustração adaptada de Pfster *et al* (2011).

Já na Figura 106 são apresentados os valores de y_c/h das vazões testadas para a Experimento 2, com a utilização da soleira, também na Região III.

Para a vazão com $y_c/h=0,295$, nota-se que a água flui praticamente apenas pelas aberturas nas laterais da soleira, de forma que não é possível ver a passagem da água por cima dela. Para a vazão com $y_c/h=0,624$ há uma queda abrupta da água após a soleira, com a soleira funcionando como um controle de todo o escoamento a montante, similar a operação de uma soleira delgada em um sistema extravasor. Para as duas vazões mais baixas não foi notada a aeração do fluxo na região da soleira. Para a vazão com $y_c/h=0,861$ é visível a aeração da superfície do fluxo, mas não de toda coluna de água, o que apenas é visível a partir da vazão com $y_c/h=0,942$.

Figura 106 – Experimento 2 - Valores de y_c/h testados na descida na Região III. Fotografias tiradas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.



O escoamento começa a ter um descolamento da face de jusante da soleira a partir da vazão com $y_c/h = 1,141$ e ocorre em todas as demais vazões superiores. A trajetória do jato acima da soleira, principalmente a partir da vazão com $y_c/h = 1,546$, se difere dos jatos observados no experimento realizada sem soleiras pelo fato de não começar o movimento no ponto máximo da parábola, mas antes dele. Dessa forma, entende-

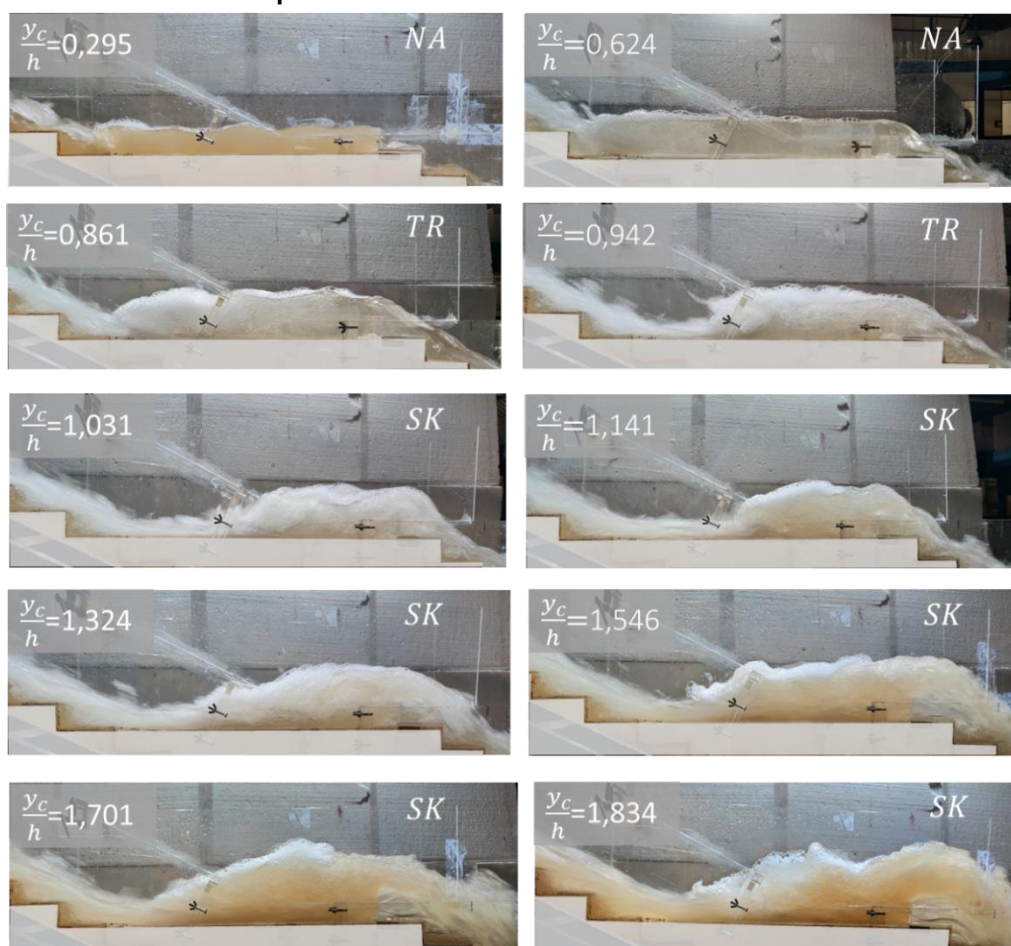
se que os vetores de velocidade do fluxo acima da soleira têm direção diagonal e não paralelo ao fundo para as condições das maiores vazões.

Novamente, é possível observar que há uma possível diminuição da aeração do fluxo a partir da vazão de 1,546. Como discutido no item 5.1.1, tal diminuição é um provável reflexo da não aeração máxima do fluxo na descida e da natureza do ressalto que ocorre, como discutido a seguir, na análise da Região IV.

5.1.4 Região IV – O efeito da utilização da soleira no trecho horizontal

A Figura 107 apresenta as razões y_c/h para as vazões testadas para a Região IV com a utilização de soleira entre os trechos.

Figura 107 – Experimento 2: Valores de y_c/h testados na Região IV. Fotografias feitas com tempo de fechamento do obturador de 1/30 s.



É novamente notado o efeito destacado na análise da Região I, na qual foi possível constatar o início do arrasto de sólidos do sistema de alimentação com o

escurecimento do escoamento para vazões com y_c/h acima de 1,500, aproximadamente. Os sólidos continuaram presentes na análise da menor vazão, feita posteriormente à maior vazão.

Em relação ao comportamento do fluxo, com exceção da menor vazão, ocorreu a formação do ressalto hidráulico a montante da soleira. Para a vazão com $y_c/h = 0,624$, a soleira gera afogamento do pé da descida nas duas primeiras vazões (motivo pelo qual a análise da condição de chegada foi feita apenas para a experimento 1).

O ressalto é formado no pé da descida para a vazão de $y_c/h=0,861$ e passa a se posicionar cada vez mais a jusante até a vazão com $y_c/h=1,141$. A partir dessa vazão, o ressalto volta a se posicionar mais a montante. O comportamento não linear do ressalto pode estar relacionado às condições do início do ressalto e de passagem sobre a soleira, gerando instabilidade no equilíbrio do escoamento. O não desenvolvimento completo do ressalto pode gerar algumas das instabilidades observadas no novo jato, como discutido em mais detalhes no item 5.3.3. É notada a ondulação gerada na região da soleira para a vazão de $y_c/h=1,834$, que é analisada mais profundamente com a aplicação de visão computacional.

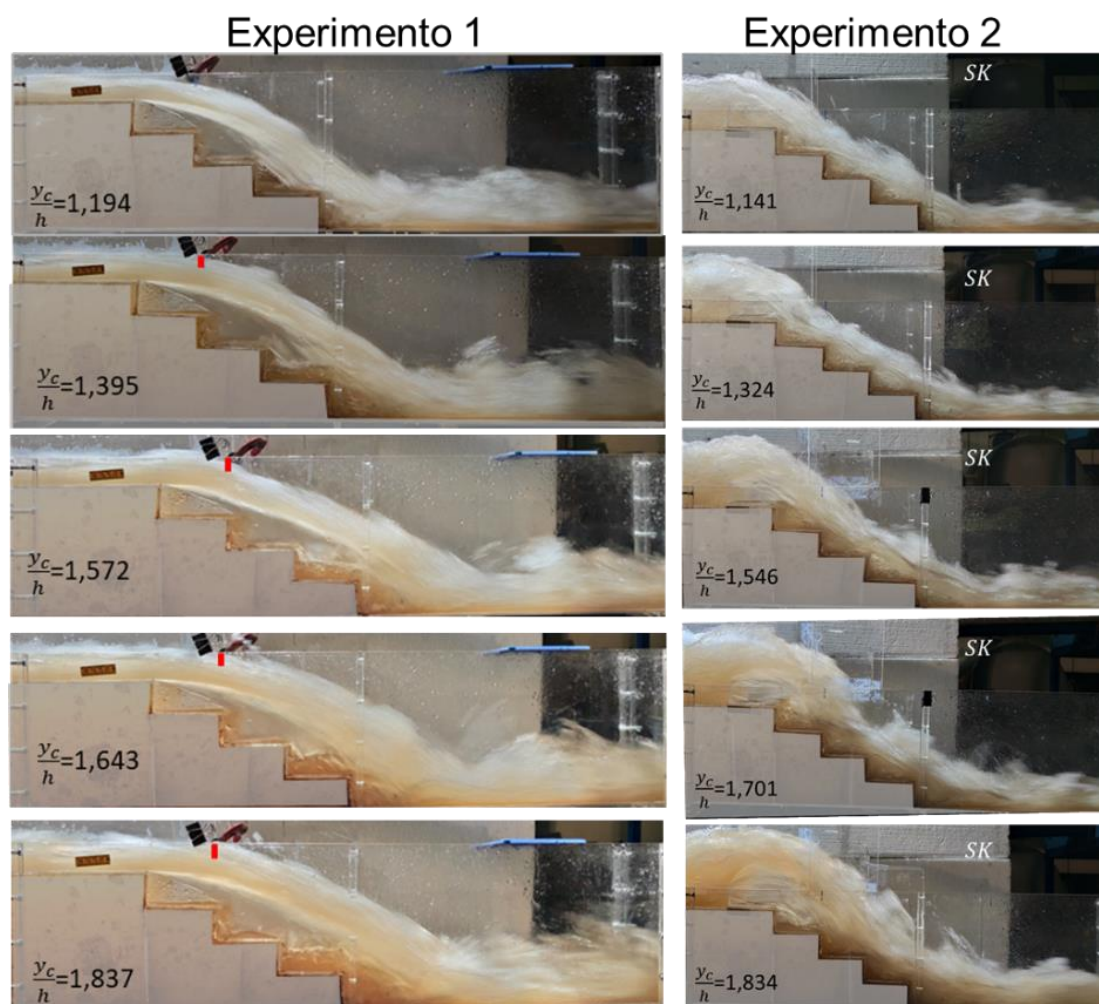
5.1.5 Comentários Gerais da Utilização das Soleiras

Inicialmente, destaca-se que foi testado um trecho com apenas quatro degraus a jusante devido a impossibilidades de implantação de outra configuração no laboratório. A intenção inicial do estudo era desenvolver análises para dois trechos de alturas idênticas, um a montante do outro. Dessa forma, poder-se-ia avaliar o alcance do jato no Experimento 1 e avaliar as consequências do choque do jato no restante do escoamento em uma estrutura longa (com vários trechos horizontais e em degraus alternados), além da comparação das energias finais do trecho inicial e do segundo trecho com a utilização de soleiras.

No entanto, com os quatro degraus testados, é possível ver que o jato da Experimento 1 tem um potencial de alcance proporcional a vazão simulada, que “escaparia” do contato com a descida de quatro degraus a partir da vazão com y_c/h de aproximadamente 1,5 (Figura 108). Para os experimentos com soleiras, nota-se que ela cumpre seu papel de proporcionar uma condição de entrada no segundo

trecho que promove o contato do escoamento com os degraus, mesmo ocorrendo também um jato, mas acima da soleira, para vazões mais altas.

Figura 108 – Comparação entre as condições com e sem soleira testadas para as vazões mais altas testadas.



A seguir são apresentadas as análises quantitativas das medições por vídeo realizadas.

5.2 Parte II - Distribuição dos Níveis de Água nos Experimentos

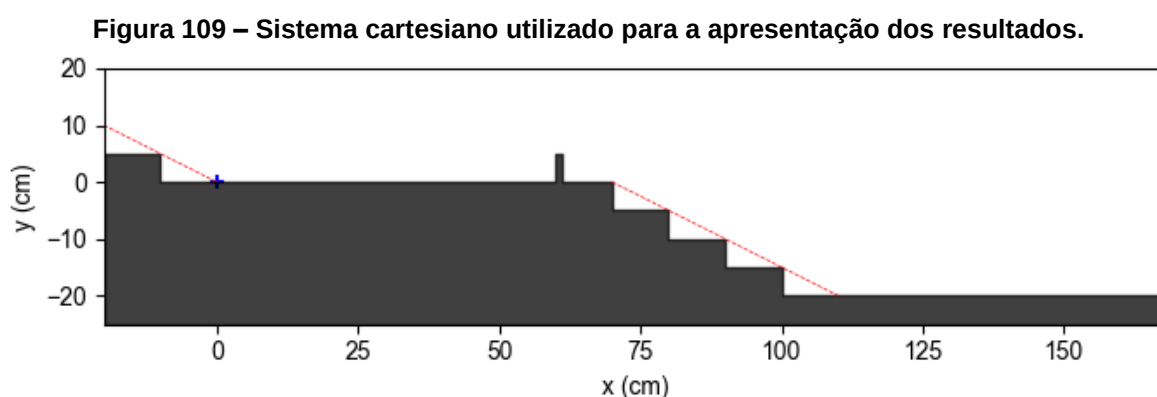
A partir das técnicas apresentadas no item 4.4, foram processados os vídeos gravados em *slow motion*, com 120 fps de resolução temporal e com 1080x1920 pixels de resolução espacial. Como pode ser notado na Tabela 4, o aparelho utilizado permite a utilização de outras resoluções temporais e espaciais, como por exemplo 960 fps com 720x1280 pixels de resolução do quadro. No entanto, por limites de processamento do dispositivo, os vídeos em *ultra slow motion* (960 fps)

gravam apenas por 10 segundos, sendo apenas os 3 segundos finais em *ultra slow motion*.

Já os vídeos em 240 fps, apesar de não apresentarem limitação de tempo de gravação, apresentam resolução de 720x1280 pixels. Portanto, foram escolhidos os vídeos de 120 fps e 1080x1920 pixels, buscando otimizar as relações entre resolução da imagem obtida e resolução temporal que propicie a análise da variação da lâmina (do ressalto, principalmente) sem grande necessidade de espaço para armazenamento ou muito tempo de processamento no código.

É importante ressaltar que outras configurações de vídeo podem e devem ser testadas para a análise nos próximos passos da pesquisa.

Para a apresentação dos resultados, foi utilizado como ponto de origem do sistema cartesiano ponto localizado no encontro do final do primeiro trecho em degraus com o trecho horizontal, como mostrado na Figura 109.



5.2.1 Experimento 1

A Figura 110 apresenta imagens obtidas da medição da ocorrência do jato para as várias vazões medidas. Notou-se a coerência entre as medidas mesmo sendo feitas em pontos diferentes, com luminosidade diferentes e obtidas de maneira automática. Entende-se que o aplicativo desenvolvido se mostrou eficiente.

Algumas medidas se mostraram pequenas discordâncias devido à distorção de borda esperada e discutida anteriormente. Para as análises realizadas nos itens 5.3.1 até 5.3.3, são excluídas as lâminas das regiões distantes dos enfoques.

Figura 110.1 – Variações de lâminas obtidas para as vazões testadas sem soleira. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.

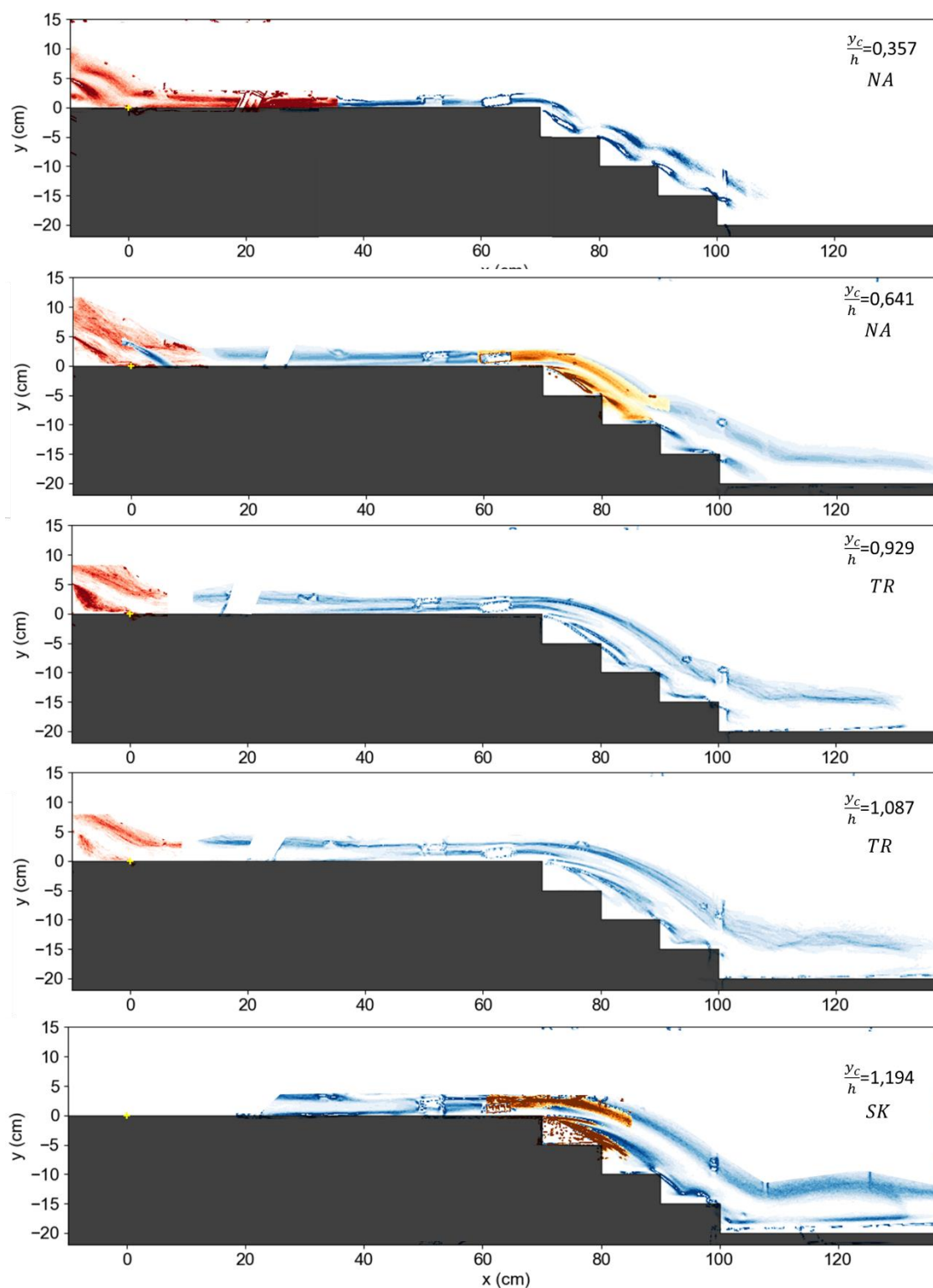
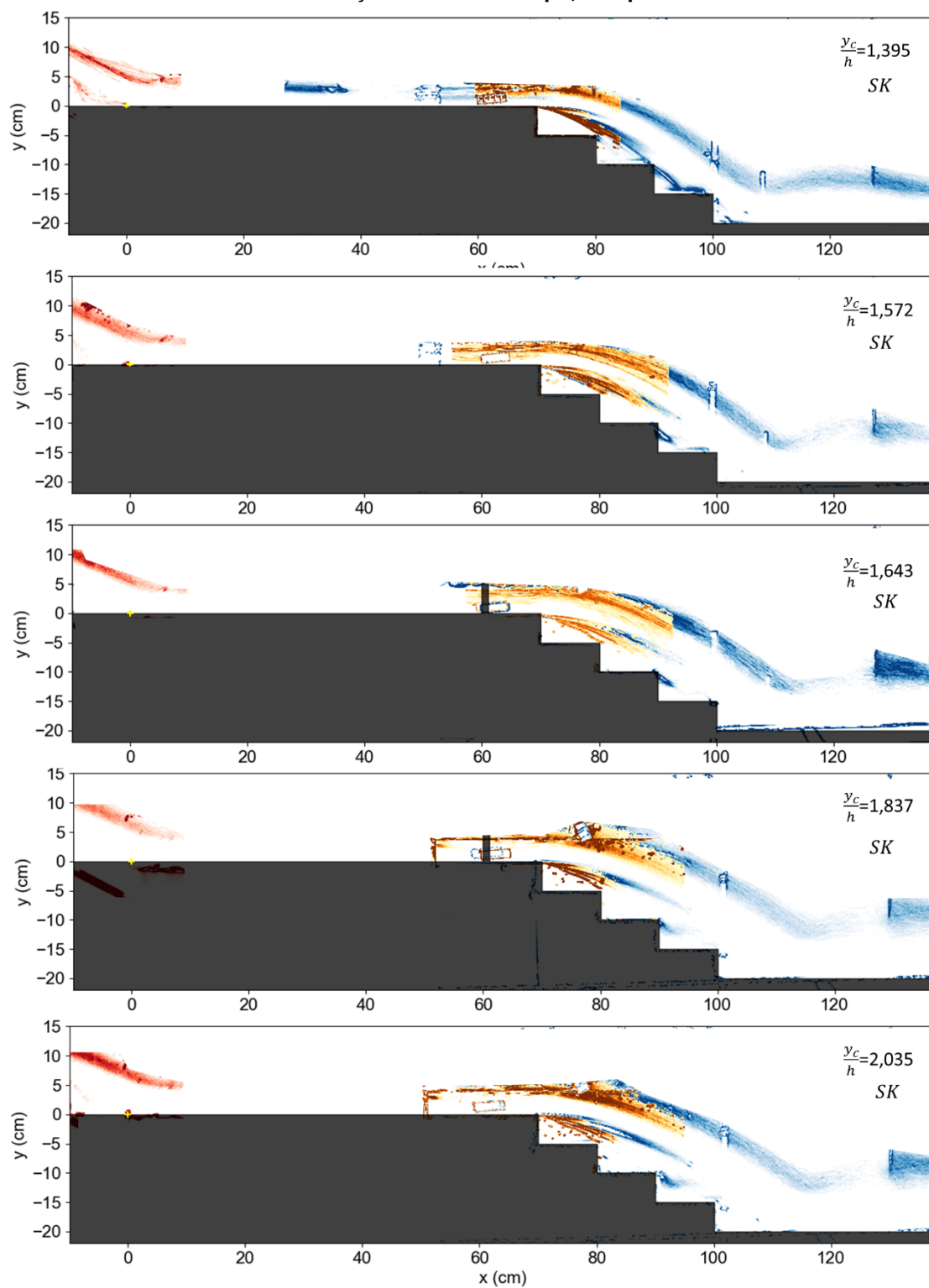


Figura 110.2 – Variações de lâminas obtidas para as vazões testadas sem soleira. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.



As imagens foram filmadas em momentos diferentes, com variação da posição dos tripés e dos enquadramentos. Isso pode ser notado nas imagens do item anterior, nas quais o enquadramento não se repete exatamente para todas as regiões filmadas. No entanto, com a técnica de referenciamento utilizada, as imagens obtidas mostram-se, na maioria das vezes, perfeitamente sobrepostas para filmagens em locais diferentes (representado pelas diferentes cores dos mapas de detecção).

Apesar das pequenas distorções entre as filmagens notadas, entende-se que não há prejuízo nas análises. Uma vez que cada variável a ser analisada possui uma filmagem específica para aquela região, o valor utilizado como válido para as análises é aquele obtido pela filmagem específica para a região em enfoque.

5.2.2 Experimento 2

Na Figura 111 são apresentadas as variações de lâmina utilizadas para a avaliação do experimento com soleiras.

Figura 111.1 – Variações de lâminas obtidas para as vazões testadas com soleira. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.

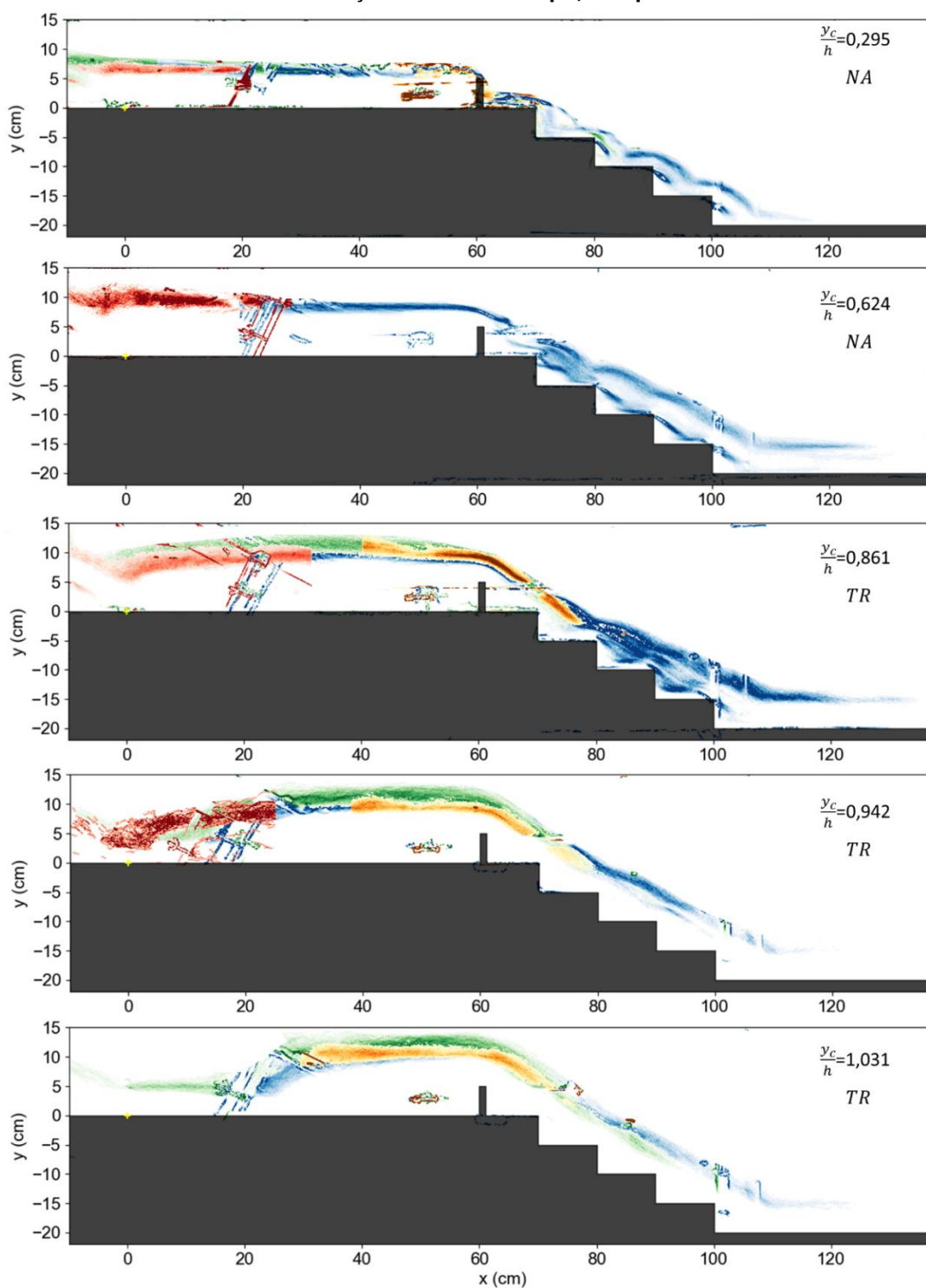
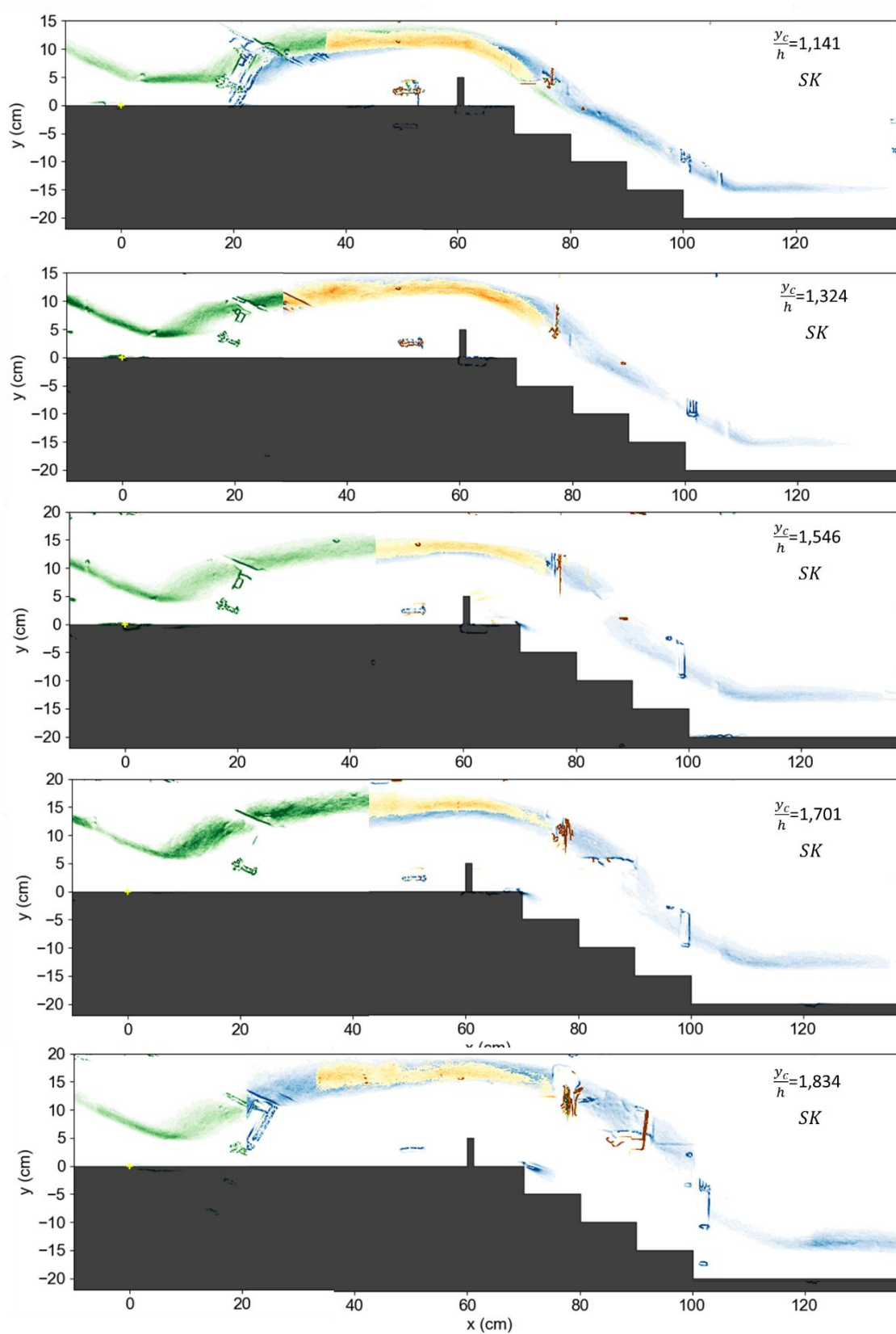


Figura 111.2 – Variações de lâminas obtidas para as vazões testadas com soleira. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.



Novamente nota-se uma concordância entre filmagens feitas em diferentes visadas para uma mesma vazão testada. Pequenas distorções são notadas na região central do ressalto entre as filmagens da Região II (amarela) e da Região I (verde), sendo que a medição em verde é a que é válida para a região central do canal, pois foca no trecho horizontal (vide Figura 85).

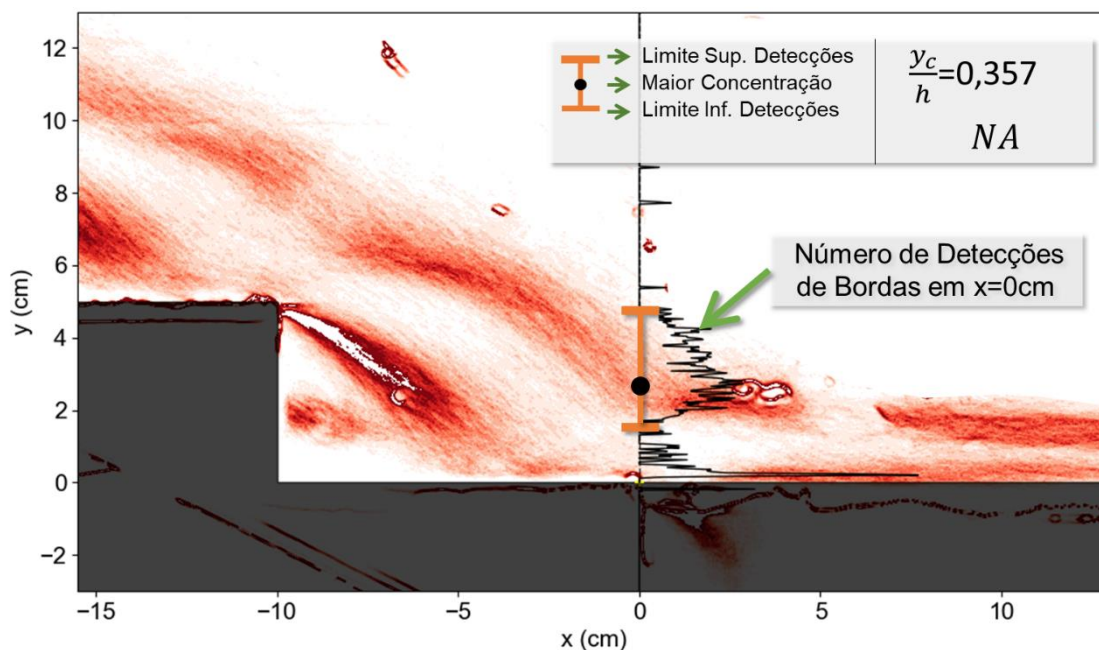
Nota-se a detecção de algumas estruturas componentes do canal interferem nas detecções de lâmina. Porém, entende-se que tal interferência não prejudica as análises a serem conduzidas na próxima parte deste capítulo.

5.3 Parte III – Análises das Correlações da Modelagem Física

5.3.1 Análise da Condição Final do Primeiro Trecho

Para análise da condição de chegada do fluxo depois do primeiro trecho em degraus, os dados foram obtidos com base na distribuição de bordas (superfícies de água) detectadas. A Figura 112 mostra um exemplo de determinação de bordas limite e da elevação de maior concentração de bordas obtida.

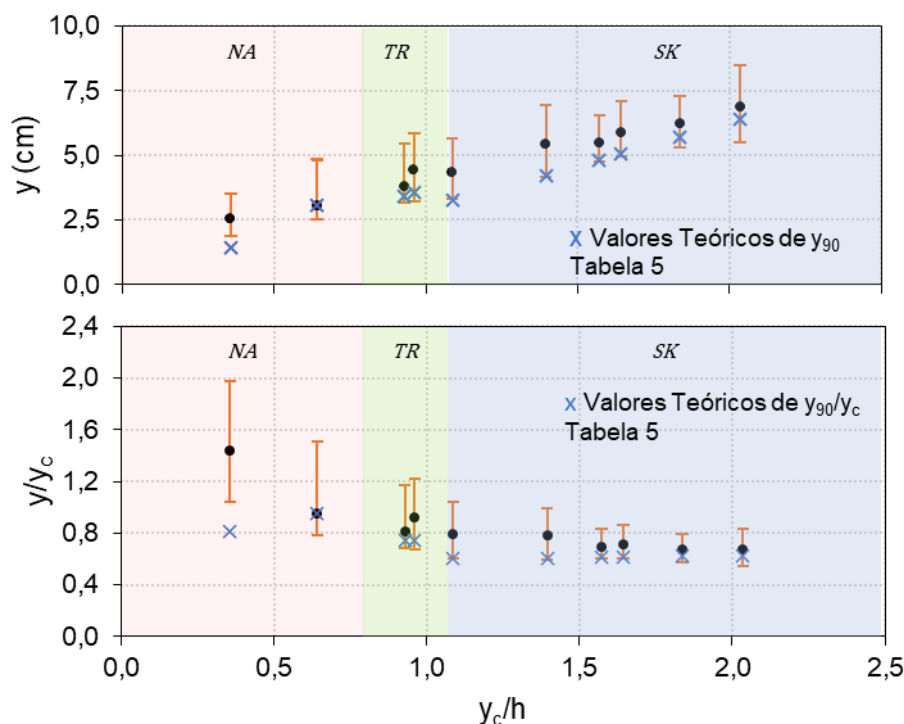
Figura 112 – Detecções de borda na região do final do primeiro trecho em degraus. Vídeo com resolução de 1080x1920px, 120fps.



Algumas medições feitas não foram utilizadas pela má qualidade dos resultados, mas a grande maioria gerou dados de qualidade similar, mesmo em condições distintas.

Utilizando-se as formulações apresentadas no item 3.2, além das medições realizadas, pode-se obter as seguintes relações de profundidade aerada no final do primeiro trecho, apresentada na Figura 113.

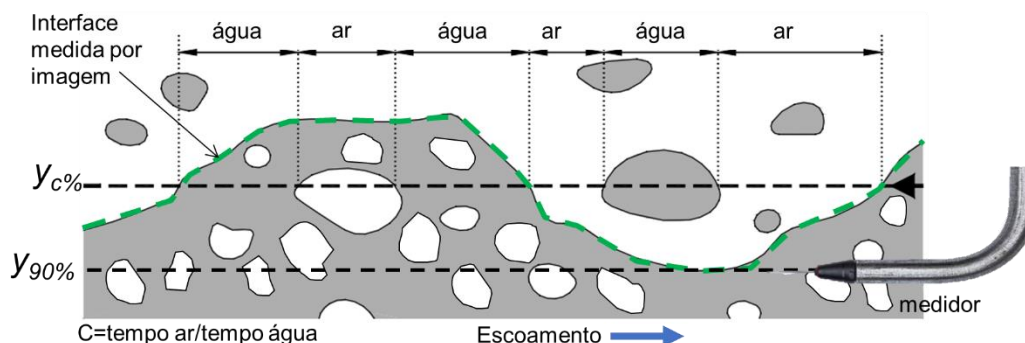
Figura 113 – Comparação entre as condições do espectro da lâmina em $x=0\text{cm}$ e os valores teóricos para y_{90} e y_{90}/y_c .



Nota-se que a amplitude da variação da lâmina detectada tem valor aproximadamente constante, independente da vazão simulada, tendo as lâminas detectadas seus valores evoluindo em escala linear com a vazão simulada. Quando analisada em termos adimensionais, relativizando as lâminas com a profundidade crítica, nota-se o comportamento exponencial das lâminas detectadas.

Nota-se ainda que os valores previstos na literatura concordam com o limite inferior do espectro das lâminas de água. Tal constatação está de acordo com as observações feitas por Bung (2013) (Figura 70) na comparação entre as profundidades y_{90} e o limite inferior das lâminas obtidas por vídeo, assim como no presente trabalho. Tal fato indica que a detecção mínima da lâmina por vídeo pode ter certa correspondência direta com a profundidade onde encontra-se 90% de concentração de ar, comumente utilizada como limite do escoamento e guia para dimensionamento das paredes. A Figura 114 ilustra as correlações feitas.

Figura 114 – Representação da possível relação entre y_{90} e as superfícies detectadas pela técnica de vídeo.



Fonte: Adaptado de Toombes (2004).

Como discutido no início deste capítulo, as medidas visuais de detecção de bordas não permitem a obtenção da velocidade do escoamento. No entanto, dada a correlação apresentada entre a profundidade medida por vídeo e a profundidade aerada y_{90} pela literatura disponível, fez-se uma análise expedita para estimativa das velocidades no atual estudo.

Assumiu-se que as relações apresentadas por Ohtsu *et al.* (2004), Chanson (2002) e Chanson e Toombes (2004) para determinação da concentração de ar são válidas para os experimentos⁸, obtendo as concentrações apresentadas na Figura 115. Com base na correlação, é possível obter a profundidade equivalente de água y_w , descontando-se a aeração, e, conseqüentemente, a velocidade média do escoamento com base na equação da conservação da massa (Equação (9)).

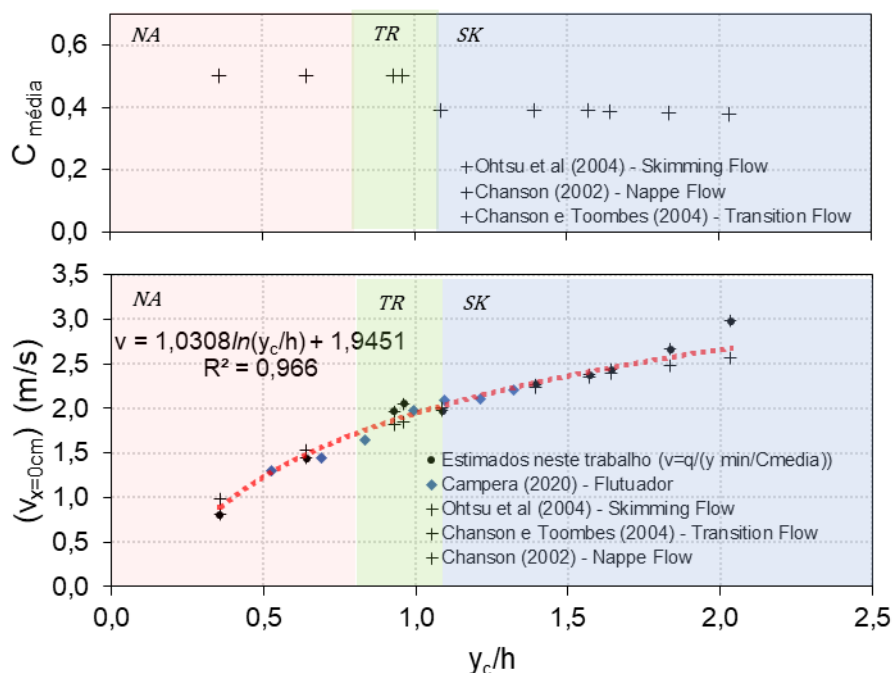
Apesar de não ter sido medida a velocidade diretamente, a sua estimativa por meio da consideração da lâmina mínima detectada equivalente ao y_{90} no final da descida apresentou boa concordância com a literatura e com as medidas com flutuador utilizadas por Campera (2020), que trabalhou nessa mesma estrutura experimental, com os 22 degraus contínuos.

Portanto, a velocidade final esperada do primeiro trecho em degraus pode ser determinada pela correlação apresentada na Figura 115 e na Equação (50). Ressalta-

⁸ As concentrações de ar no escoamento são menos sensíveis à variação dos parâmetros das equações que as velocidades segundo algumas das metodologias encontradas na literatura (item 3.2.2).

se que tal correlação é válida para a aplicação no presente estudo. Ela não representa uma generalização aplicável à outras estruturas.

Figura 115 – Velocidades no ponto $x=0\text{cm}$, obtidas com base na concentração de ar estimada, comparadas com a literatura e dados experimentais.



$$v = 1,0308 \cdot \ln\left(\frac{y_c}{h}\right) + 1,9451 \quad (50)$$

Pode-se usar a equação (50) para a obtenção do número de Froude ao final da descida, como apresentado na equação (51).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{9,81 \cdot \frac{Q}{B \cdot v}}} \quad (51)$$

5.3.2 Experimento 1 – Análise Sem Soleira

De posse da análise do comportamento do primeiro trecho em degraus, pode-se correlacionar as condições de montante com a ocorrência do jato na entrada do segundo trecho em degraus. Conforme apresentado no item 3.3, a trajetória do jato é dependente exclusivamente da velocidade e ângulo de entrada do fluxo quando

desconsiderados os efeitos secundários de resistência do ar e da incorporação de ar ao fluxo do jato.

5.3.2.1 Relação Entre as Velocidades, Vazões e as Trajetórias dos Jatos

Assumindo-se que apenas a velocidade no ponto de início do jato, $v_b = v_{Exp1, x=0,7m}$, influi na sua trajetória, foi feita uma adimensionalização da trajetória com base na profundidade crítica do escoamento, como apresentado nas equações (52) e (53), além da Figura 116:

$$\frac{y}{y_c} = \left(\frac{q^2}{v_{b,sup}^2 \cdot y_c^2} \right) \cdot \left[\frac{x}{y_c} \right]^2 + \left(\frac{y_b}{y_c} \right) \quad (52)$$

$$\frac{x}{y_c} = \left(\frac{q^2}{v_{b,inf}^2 \cdot y_c^2} \right) \cdot \left[\frac{x}{y_c} \right]^2 \quad (53)$$

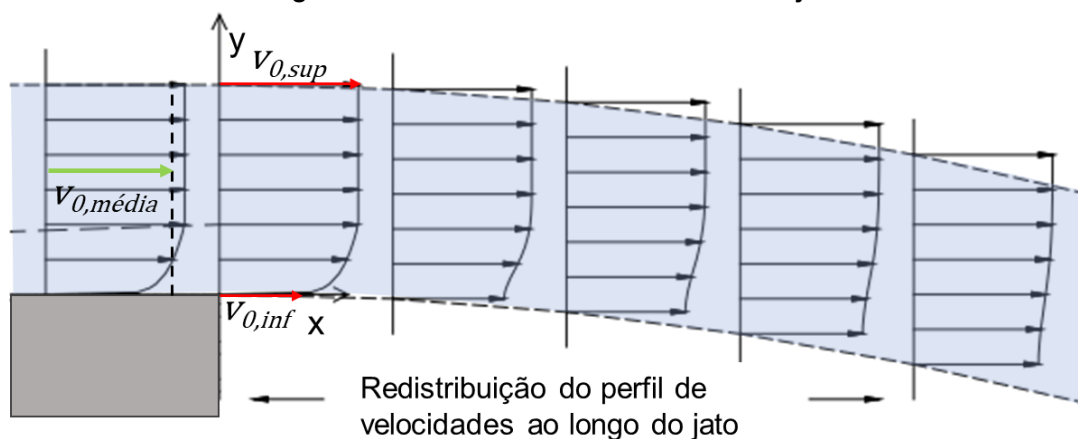
Em que:

- y representa a coordenada vertical ao longo da trajetória (m);
- q representa a vazão específica (m²/s);
- $v_{0,sup}$ representa a velocidade superior no início do jato (m/s);
- $v_{0,inf}$ representa a velocidade inferior no início do jato (m/s);
- y_0 representa a profundidade do fluxo no início do jato (m).

Os parâmetros apresentados entre os parêntesis seriam as constantes de uma equação do segundo grau do tipo $Y=A.X^2+C$, sendo $C=0$ na equação (53).

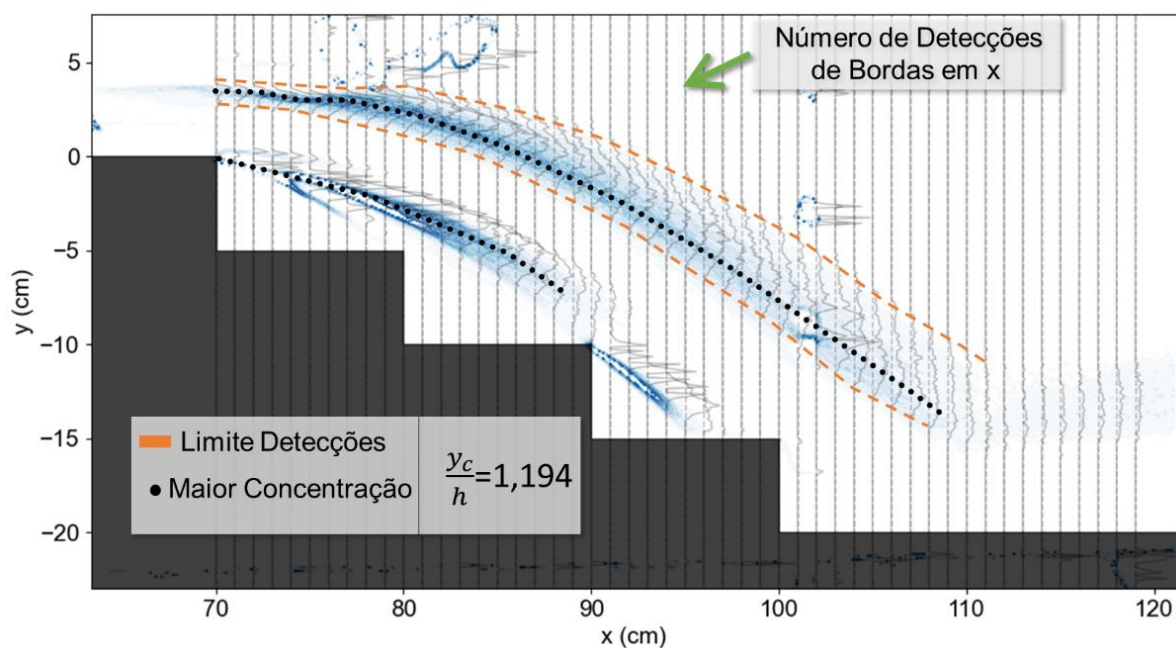
De maneira similar àquela realizada na análise da obtenção das profundidades no ponto $x=0$ cm, as dimensões do jato foram obtidas com base nas detecções de lâmina realizadas, como apresentado na Figura 117, utilizando-se como auxílio a plotagem do número de detecções em forma de curva vertical a cada centímetro ao longo do eixo x

Figura 116 – Perfil de velocidades em um jato.



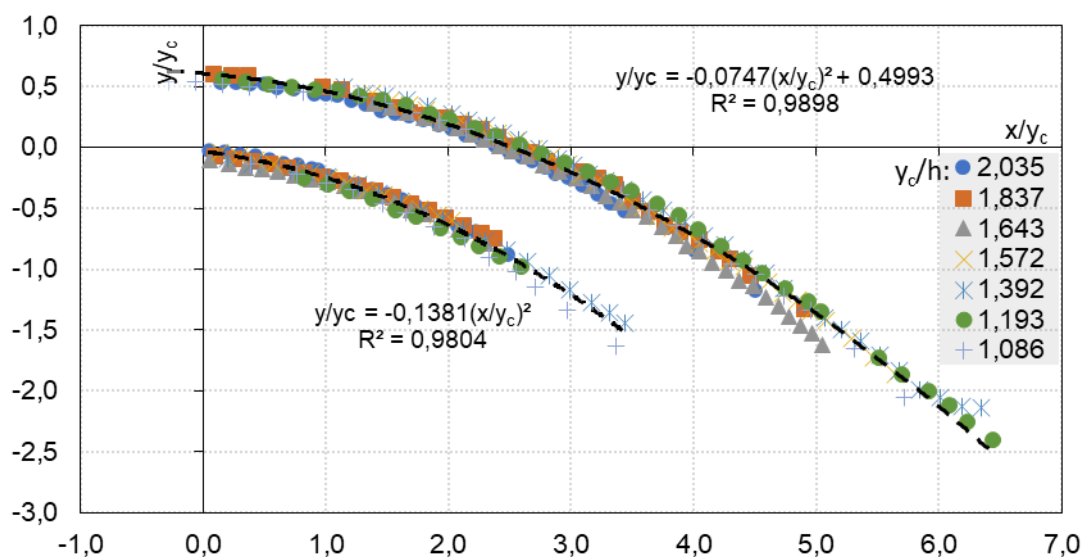
Fonte: Adaptado de Toombes (2002).

Figura 117 – Exemplo de obtenção das trajetórias dos jatos para uma vazão simulada. Vídeos com resolução de 1080x1920px, 120fps.



Com base na análise de sete das vazões utilizadas no Experimento 1, obteve-se a relação entre as coordenadas adimensionais dos jatos apresentada na Figura 118.

Figura 118 – Coordenadas adimensionais dos jatos obtidas para maior concentração de detecção de lâminas para o jato superior e inferior.



Nota-se que há uma concordância de todos os dados com a correlações obtidas para as equações de parábola. O valor dos coeficientes da parábola dos jatos pode ser expresso na seguinte forma apresentada da equação (54) até a equação (56):

$$\left(\frac{q^2}{v_{b,sup}^2 \cdot y_c^2} \right) = 0,0747 \quad (54)$$

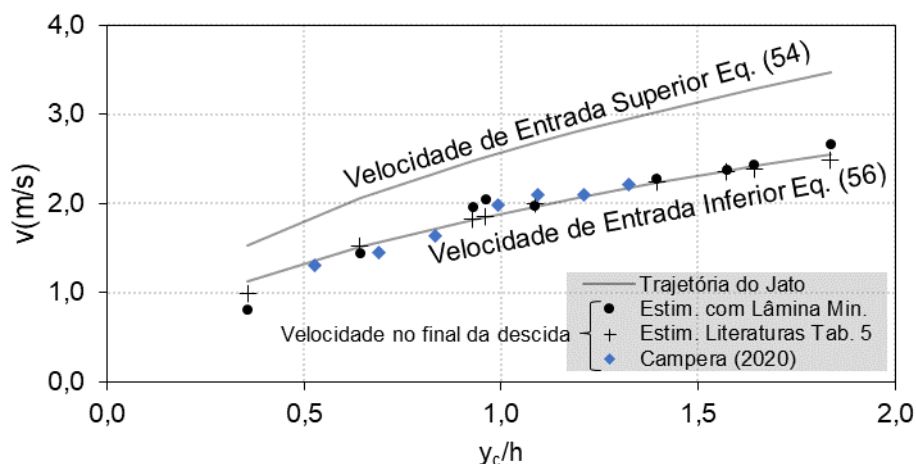
$$\left(\frac{y_0}{y_c} \right) = 0,4993 \quad (55)$$

$$\left(\frac{q^2}{v_{b,inf}^2 \cdot y_c^2} \right) = 0,1381 \quad (56)$$

5.3.2.2 Relação Entre as Velocidades Estimadas pelas Trajetórias e as Velocidades no Pé da Descida

Com base nas relações apresentada na equação (54) e na equação (56), foram estimadas as velocidades de entrada do jato, superior e inferior, que gerariam as trajetórias detectadas, como apresentado na Figura 119. As velocidades estimadas no final do primeiro trecho em degraus (Figura 115) também são apresentadas no gráfico as velocidades na entrada do jato estimadas pelos parâmetros da parábola (linhas) e as velocidades estimadas no final do primeiro trecho em degraus (pontos).

Figura 119 – Velocidades obtidas das trajetórias dos jatos e velocidades estimadas para o final do primeiro trecho em degraus.



A diferença entre as velocidades estimadas pelas trajetórias inferior e superior dos jatos era esperada devido a não uniformidade do perfil de velocidades (Figura 116). No entanto, supondo inicialmente a não dissipação de energia ao longo do trecho horizontal, seria esperado que as velocidades médias estimadas no final do primeiro trecho estivessem com valores entre a velocidade de entrada superior e inferior do jato.

Supondo-se, em segundo instante, a ocorrência da dissipação de energia ao longo do trecho horizontal, seriam esperadas no início dos jatos velocidades mais baixas em relação ao fluxo no final da descida.

A concordância dos dados com as velocidades estimadas para a trajetória inferior levanta algumas possibilidades, não excludentes entre si:

- Uma grande diferença de velocidade ao longo do perfil do escoamento na iminência da ocorrência do jato leva a trajetórias mais alongadas pelo perfil superior do jato;
- O escoamento encontra-se acelerado no trecho horizontal;
- O efeito da aeração do fluxo muda o comportamento do jato de forma a alongar as trajetórias mesmo com velocidades mais baixas (desintegração do jato); e/ou
- O limite inferior das detecções de jato representa melhor a trajetória com base na velocidade estimada para o final do trecho em degraus, sendo

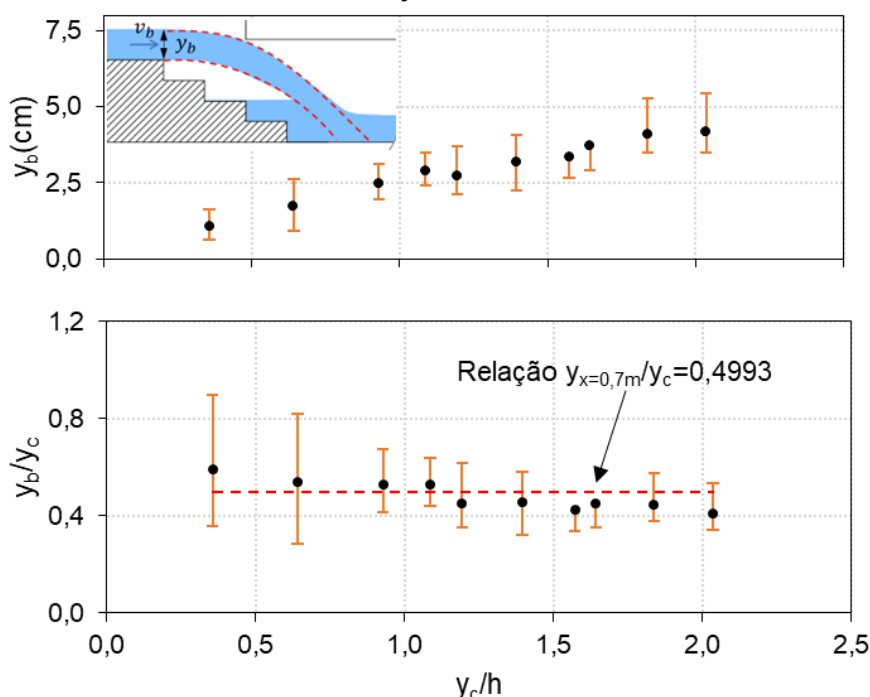
a região de maior concentração de detecções afetada pela turbulência do fluxo de entrada.

5.3.2.3 Definição da Profundidade de Saída do Jato

Um outro parâmetro obtido das equações da trajetória do jato é a razão entre a profundidade na iminência do jato e a profundidade crítica. Conforme apresentado no item 4.3, foram feitas medições de lâmina por vídeo com enfoque na região da iminência da ocorrência do jato, com as quais pode-se comparar a estimativa da relação $\frac{y_b}{y_c}=0,4993$, mostrado na Figura 120.

A relação obtida pela trajetória dos jatos superiores encontra-se em concordância com os valores de maior concentração de detecção do espectro de lâminas do ponto $x=0,7m$ (iminência do jato). Assim como a lâmina medida no ponto $x=0cm$, a variação da lâmina em termos relativos foi maior para vazões mais baixas

Figura 120 – Relação entre as vazões testadas e as profundidades medidas na iminência do jato.



Nota-se como a não medição da velocidade no modelo gera incertezas nas análises. Trabalhos mais detalhados com os dados já medidos podem dar melhores evidências acerca das suposições acima, mas apenas a medição de velocidade poderia fornecer

melhores perspectivas sobre os parâmetros, como perda de energia e velocidades no trecho horizontal.

5.3.3 Experimento 2 – Análise Com Soleira

Após as observações feitas nos itens anteriores, pode-se estimar que a condição final do primeiro trecho em degraus ($x=0$, $y=0$) como sendo a condição inicial do ressalto. Tal premissa é assumida devido ao fato de que o trecho horizontal aparenta não imprimir perdas de energia do escoamento. Pode-se utilizar as características do escoamento no final do primeiro trecho em degraus para caracterização da trajetória do jato depois do primeiro trecho horizontal no Experimento 2 (Figura 119).

A maioria das formulações relacionadas com o ressalto hidráulico e sua ocorrência são baseadas na condição de entrada do ressalto (v_1 , y_1 e Fr_1) e na condição conjugada a jusante esperada para o equilíbrio do ressalto natural (y_2^*). Para as análises a seguir, as condições de montante foram estabelecidas com base na Equação (50), na equação da continuidade ($y_1=q/v_1$) e na Equação (51), respectivamente. Já a condição de jusante para o ressalto natural, foi obtida com a equação de Bélanger (Equação (23)).

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para as vazões do Experimento 2.

Tabela 8 – Condições estimadas na posição de início do ressalto e estimativa da condição conjugada a jusante necessária para o ressalto natural.

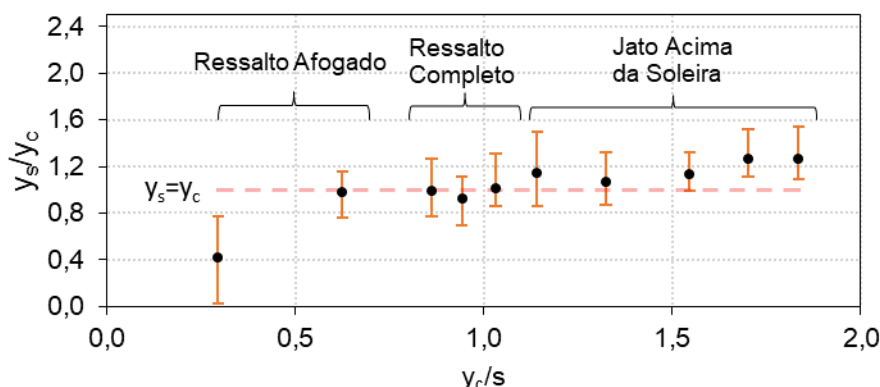
q (m ³ /(s.m))	v_1 (m/s)	y_1 (m)	Fr_1	y_2^* (m)
0,0056	0,685	0,0082	2,421	0,081
0,0173	1,459	0,0118	4,283	0,209
0,0280	1,791	0,0156	4,575	0,192
0,0367	1,977	0,0185	4,634	0,084
0,0427	2,081	0,0205	4,640	0,151
0,0533	2,234	0,0239	4,617	0,125
0,0673	2,394	0,0281	4,559	0,126
0,0777	2,493	0,0312	4,508	0,187
0,0870	2,570	0,0338	4,461	0,202

5.3.3.1 Condição de Jusante

Inicialmente, avaliou-se qual a condição imposta pela soleira ao escoamento. Foram comparados os valores de lâmina detectada na seção da soleira ($x=0,6$ m) com os

valores de profundidade crítica do escoamento, como mostrado na Figura 121. A profundidade na região se assemelha bastante à profundidade crítica, especialmente para as vazões intermediárias. No entanto, para a vazão mais baixa testada, o escoamento na região da soleira tem profundidade mais baixa, provavelmente devido às pequenas aberturas laterais da soleira, o que não impacta nas demais vazões.

Figura 121 – Relação entre a lâmina medida acima da soleira e a profundidade crítica.



Já para as vazões mais altas testadas (maiores razões y_c/s), a detecção tendeu à valores mais altos que a profundidade crítica. Entende-se três possíveis motivos para tal, não excludentes entre si:

- O escoamento não passa pela soleira com a energia crítica para as vazões mais altas;
- Ocorrência de parte da recirculação do escoamento acima da soleira;
- Medição não perpendicular às linhas de velocidade; e/ou
- Presença de maior aeração no escoamento.

A Figura 122 ilustra as observações. É possível notar a presença da recirculação do ressalto próximo da soleira nas vazões mais altas, bem como o aumento das zonas de recirculação a montante das soleiras com o aumento da vazão, influenciando no comportamento do escoamento acima da soleira.

Posteriormente, verificou-se qual a relação da profundidade na região da soleira com a profundidade esperada para a ocorrência de um ressalto natural (y^*_2), como apresentado na Figura 123.

Figura 122 – Observações na região da soleira - $y_c/s=0,624$: Ressalto afogado; $y_c/s=0,861$: Aeração até próxima da soleira; $y_c/s=1,114$: Escoamento totalmente aerado, recirculação até próxima da soleira e início do descolamento a jusante da soleira; $y_c/s=1,544$: Escoamento totalmente aerado, recirculação até próxima da soleira, descolamento total a jusante da soleira.

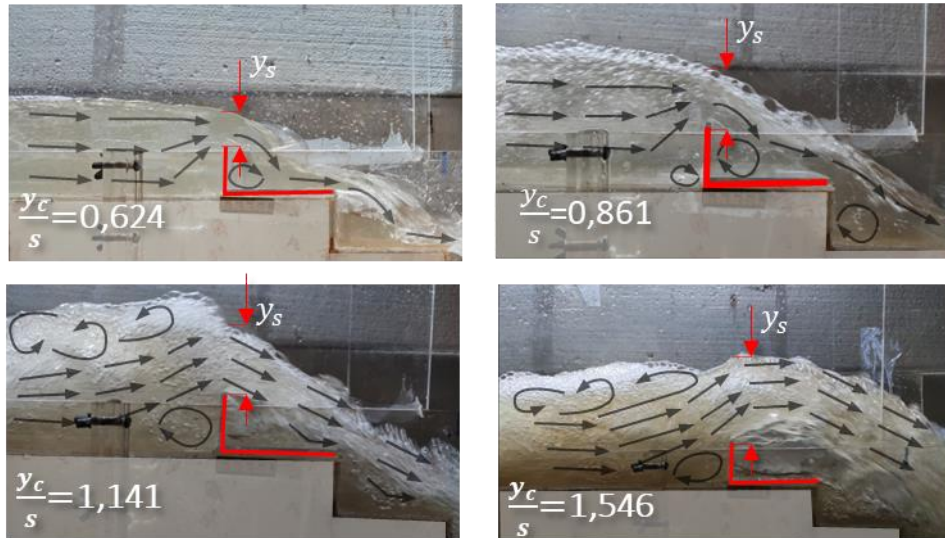
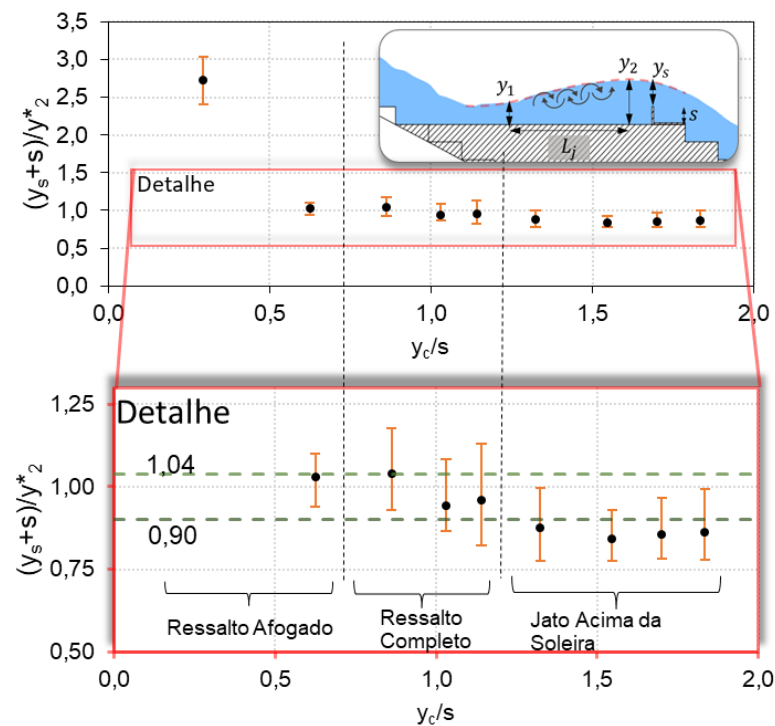


Figura 123 – Relação entre a condição imposta pela soleira e a profundidade y_2^* conjugada de um ressalto natural.



Pela análise gráfica, o afogamento do ressalto ocorreu em profundidades na soleira 5% superiores à profundidade conjugada. A ocorrência de jatos na soleira se deu com profundidades impostas pela soleira inferiores à 90% da profundidade conjugada pelo gráfico. No entanto, ressalta-se que as hipóteses levantadas ilustradas na Figura 122 são também válidas para a atual análise.

De maneira prática, a adoção da ocorrência da profundidade crítica acima da soleira, seguida de sua comparação com a condição necessária para o equilíbrio do ressalto y^*_2 , permite a determinação da ocorrência do afogamento do ressalto e de jatos acima da soleira. Porém, são necessários testes com mais relações y_c/s para a generalização dessas afirmações (possíveis de se obter com aumento da vazão ou diminuição da soleira).

5.3.3.2 Desenvolvimento do Ressalto

Dando sequência nas análises do Experimento 2, é possível a obtenção das profundidades de início e final do ressalto, y_1 e y_2 , respectivamente, para sua comparação com os valores estimados pela literatura.

De maneira similar àquela feita para as coordenadas do jato, pôde-se extrair as coordenadas do ressalto hidráulico com base nos limites das detecções e das regiões de maior densidade, como apresentado na Figura 124. Foram obtidas as coordenadas para todas as vazões realizadas no experimento 2, como apresentado na Figura 125. Determinou-se como posições de início e fim do ressalto (pontos (x_1, y_1) e (x_2, y_2)) o ponto de menor profundidade média detectado na região do ressalto e o ponto de maior profundidade média detectada da superfície. Ressalta-se que correspondem a profundidades detectadas com presença de ar.

Notou-se que não há uma linearidade em relação à posição do início do ressalto. Para as duas menores vazões testadas, o ponto de início do ressalto encontra-se “afogado” pelo nível de jusante, sendo que, para vazão mais baixa testada, o ressalto ocorre como uma ondulação da lâmina na piscina formada no trecho horizontal. Para vazão com $y_c/s=0,624$ tem-se a formação de um ressalto afogado com níveis acima do nível da soleira, mas sem o avanço da recirculação (Figura 107).

Figura 124 – Detecções de lâmina em uma região do ressalto hidráulico com base nas filmagens feitas no Ponto IV.

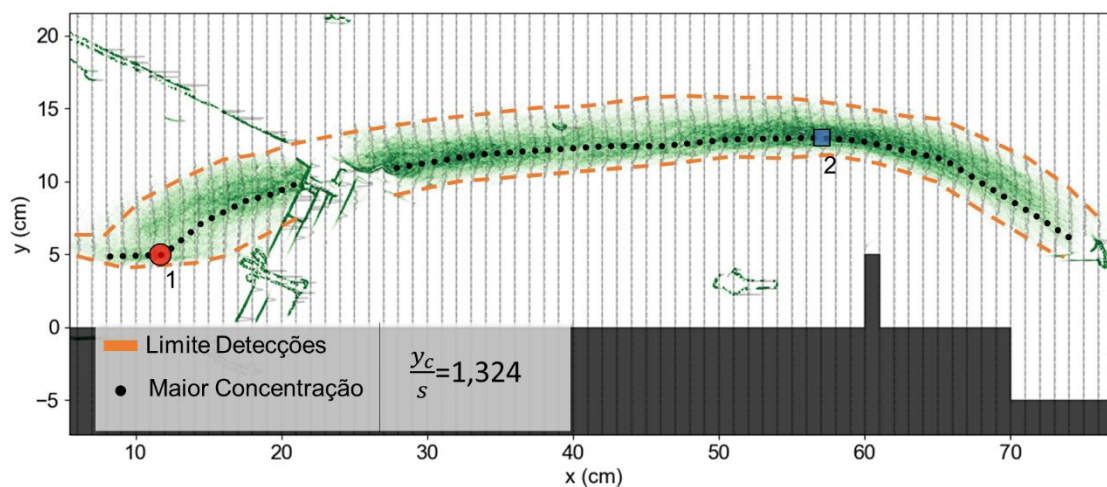
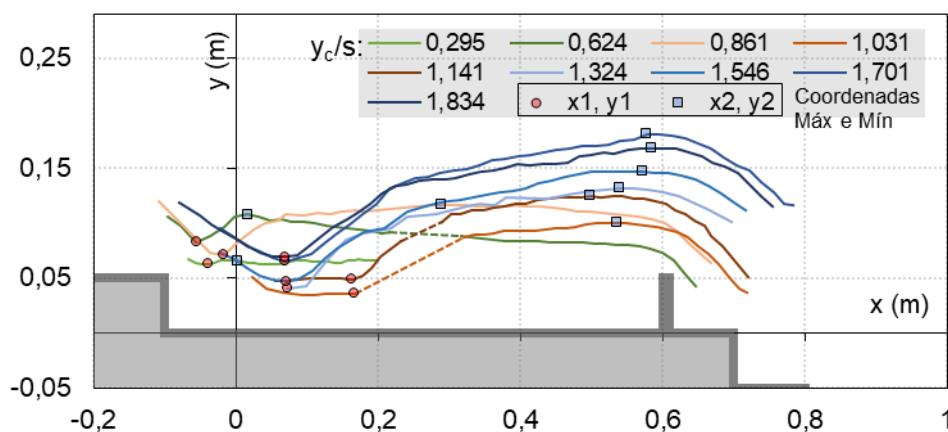


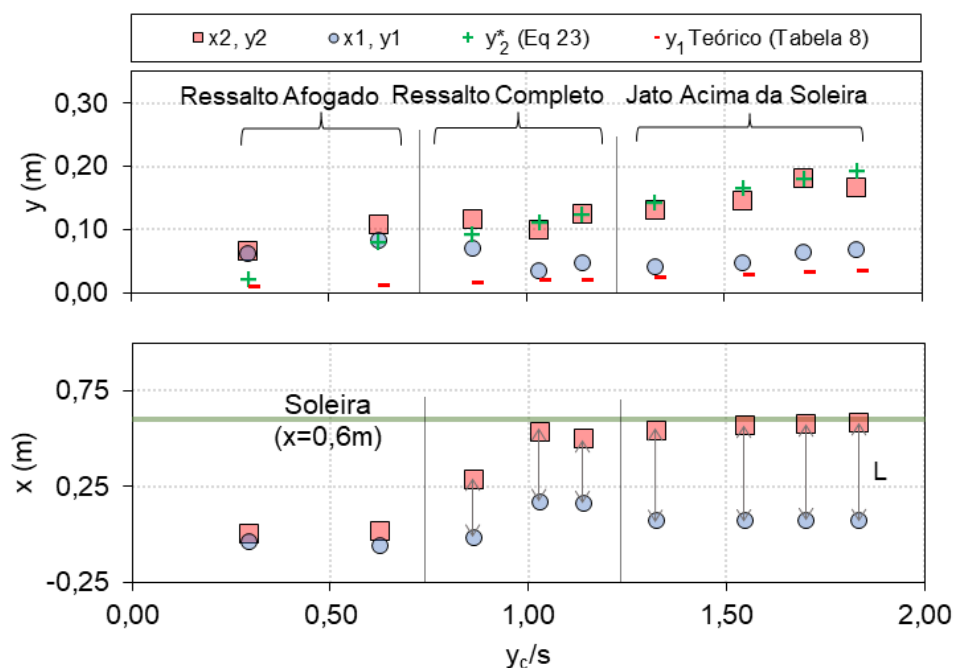
Figura 125 – Perfis médios (maior concentração) do ressalto hidráulico em função das vazões testadas (y_c/s): (verde – ressaltos afogados), (marrons – ressaltos completos), (azuis – ressalto com jato acima da soleira).



A posição do início do ressalto passa a ocorrer mais a jusante para as duas vazões em que foi identificado o ressalto completo. Para vazões com $y_c/s=1,324$, o ressalto passa a ter seu início mais a montante, sendo a soleira uma espécie de limite para o avanço da recirculação.

A Figura 126 apresenta as posições inicial e final da recirculação do ressalto em função do aumento da vazão (aumento de y_c/s).

Figura 126 – Posição do início e final do ressalto com base nas elevações máximas e mínimas das lâminas detectadas.



O gráfico superior mostra a magnitude e diferença entre os valores das profundidades conjugadas do ressalto (descritas no item 3.4). Como esperado, o aumento de vazão promove um aumento dos valores de profundidade no final do ressalto. Para as vazões mais baixas, nota-se que y_2 é superior ao y_2^* necessário para o equilíbrio, configurando o afogamento notado nas gravações.

Para as vazões com ocorrências de jato acima da soleira, nota-se que as profundidades a jusante do ressalto encontram-se em concordância com as profundidades necessárias para a ocorrência do ressalto natural. As profundidades iniciais encontram-se mais altas que a literatura, o que se pode considerar normal devido a detecção de ar no escoamento, enquanto os valores teóricos são para profundidades de água no escoamento (y_w).

A razão entre as profundidades a montante e a jusante do ressalto é função exclusivamente do número de Froude na entrada do escoamento (Equação (23)), para ressalto acontecendo controlado pelo nível de água a jusante, com as profundidades não aeradas. Em algumas literaturas a diferença entre as duas é usada apresentada como proporcional ao tamanho do ressalto (USBR, 1985). No caso do controle

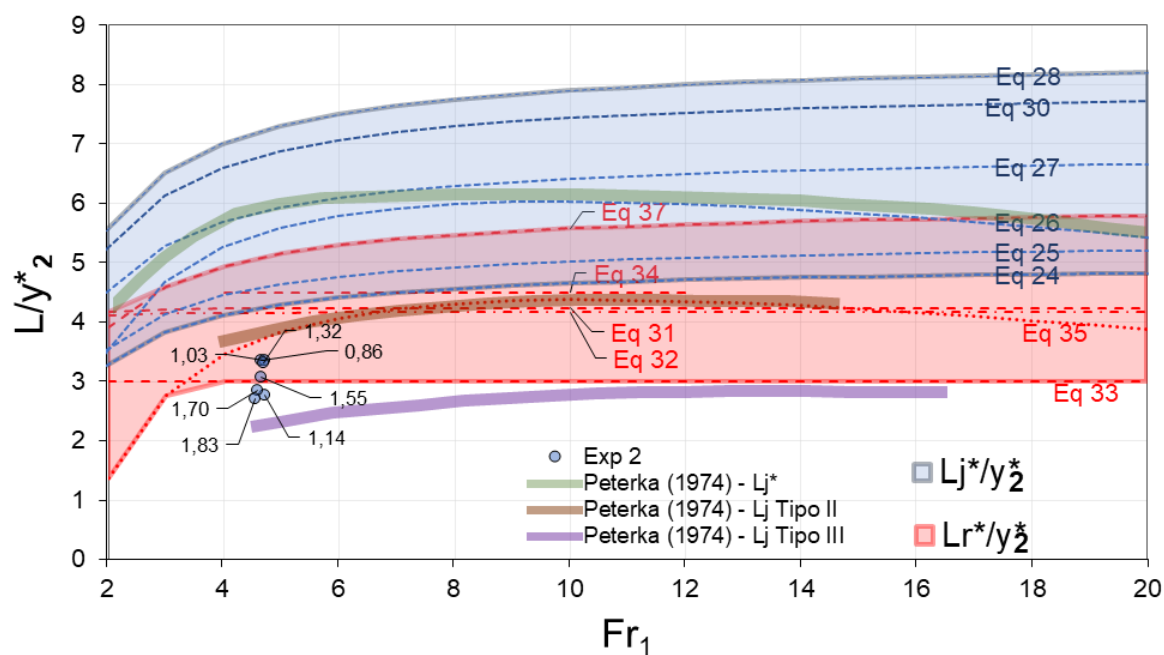
exercido pela soleira terminal, com uma condição de descida a jusante explorado nestes estudos, aparentemente a diferença não se altera com o aumento da vazão.

O gráfico inferior, por sua vez, apresenta a posição e o comprimento do ressalto. Uma possibilidade para a não linearidade é o não desenvolvimento do ressalto completo, é que a recirculação fica limitada à distância da soleira ao início do ressalto para vazões mais altas ($x_2 - x_1$ seria aproximadamente $x_s - x_1$, em que x_s seria a posição da soleira).

5.3.3.3 Comprimento e o Tipo de Soleira

Pode-se inserir os dados medidos de $x_2 - x_1 = L$ nos gráficos da Figura 48, que apresenta os comprimentos de ressaltos com e sem obstáculos e das recirculações em função do número de Froude, resultando no apresentado na Figura 127.

Figura 127 – Relações entre comprimentos propostos por diversos autores para o ressalto hidráulico natural (azul) e para recirculação (vermelho), além dos comprimentos de ressaltos em bacias de dissipação com blocos Tipo II e Tipo III (Peterka, 1974), e os dados experimentais deste trabalho. Destaque para os valores da razão y_c/s para os dados do Experimento 2.



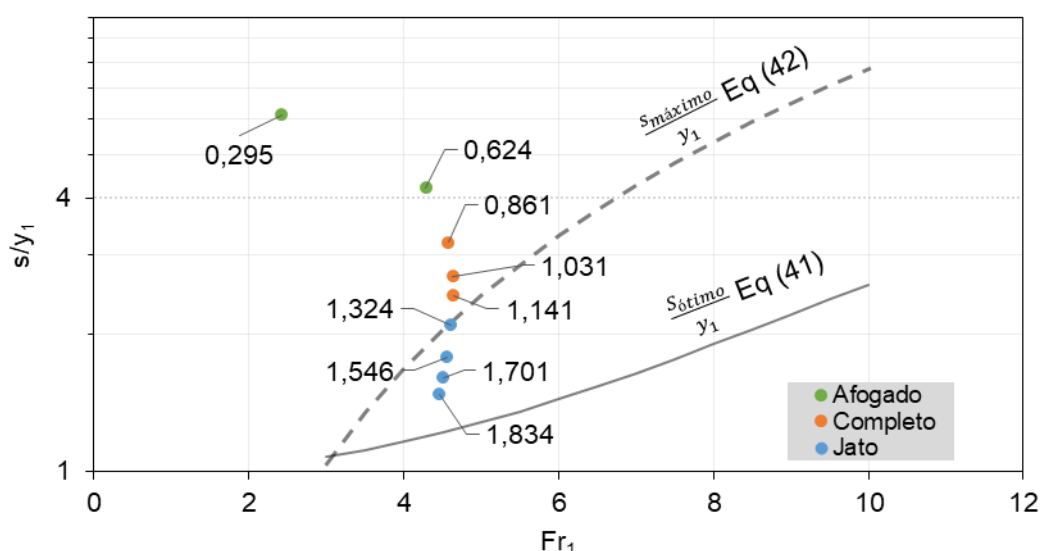
Fonte: Comprimento do ressalto natural: Tabela 1; Comprimento da recirculação: Tabela 2; Formulações de ressaltos com obstáculos na bacia: Peterka (1974) (Figura 48).

Os comprimentos obtidos correspondem ao limite inferior dos comprimentos de recirculação segundo a literatura, estando para as maiores vazões fora da faixa. Ressalta-se que, nas classificações visuais em que se determinou a ocorrência completa do ressalto ($y_c/s=0,86$, $y_c/s=1,03$ e $y_c/s=1,14$), o valor de $x_2 - x_1$ não corresponde ao valor esperado do ressalto completo. O valor de x_2 é determinado

como o ponto em que se tem a maior lâmina detectada, o que aparenta corresponder ao final da recirculação, mas não do ressalto em si (Figura 43 apresenta a diferenciação entre os dois comprimentos).

Analisando-se o posicionamento da soleira em relação às condições de entrada do ressalto, y_1 e Fr_1 , é possível avaliar a validade das equações (41) e (42), propostas por Hager *et al* (2020) na análise de soleiras em trechos horizontais entre trechos em degraus, como apresentado na Figura 128.

Figura 128 – Relação entre a razão altura da soleira s e a profundidade do escoamento no início do ressalto *versus* o número de Froude. Destaque para os valores de y_c/s e a classificação visual das ocorrências do ressalto.



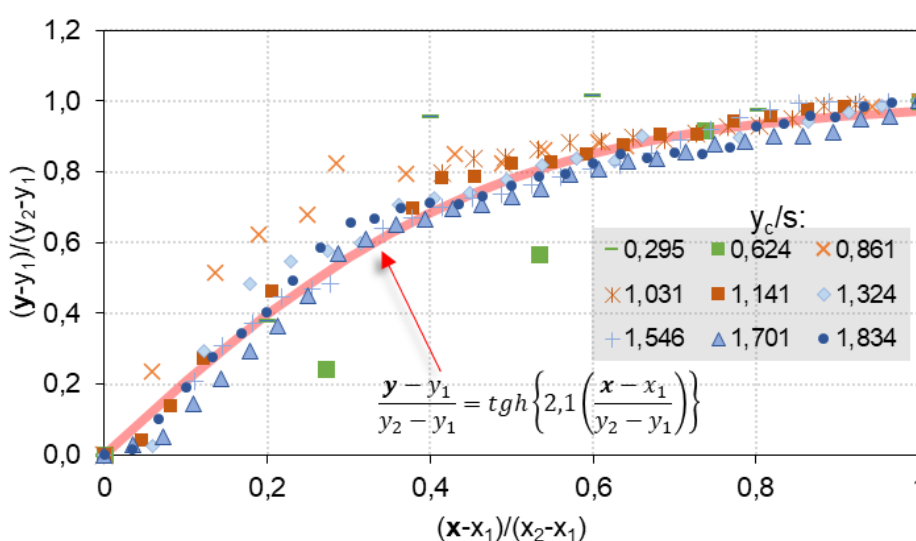
Fonte: Equações apresentadas por Hager *et al* (2020).

A análise mostra que as razões que apresentaram jatos acima da soleira estariam em uma faixa ideal de controle dos ressaltos por um obstáculo. Pelos experimentos, para as vazões em que o ressalto se desenvolveu por completo aparenta-se haver um melhor controle do escoamento. Destaca-se que a condição de jusante dos experimentos deste trabalho não é um escoamento fluvial, como usual em bacias de dissipação. Portanto, entende-se que os ressaltos controlados por soleiras com condições de jusante supercríticas não atendem às classificações apresentadas na Figura 52 (classificação dos tipos de ressalto em função do nível de água a jusante), que são a base das formulações das equações (41) e (42).

5.3.3.4 Perfil da Recirculação

Assumindo a diferença $x_2 - x_1$ como o comprimento da recirculação, pode-se avaliar a coerência da consideração dos pontos de início e final do ressalto como os pontos mais alto e mais baixo da superfície detectada. Para tanto, foi feita uma avaliação dos ressalto com base na evolução do ressalto com base nos adimensionais apresentados na Figura 129.

Figura 129 – Evolução do perfil detectado da recirculação com base nas profundidades definidas. Em verde: ressalto afogado; em marrom: ressalto completo; em azul: jato acima da soleira.



A evolução da recirculação se dá da mesma maneira para quase todas as vazões testadas, com exceção das três primeiras. Tal concordância mostra que é esperado que o perfil da linha de água a montante da soleira como função de y_2 e x_2 , uma vez que x_1 e y_1 são função das condições de chegada.

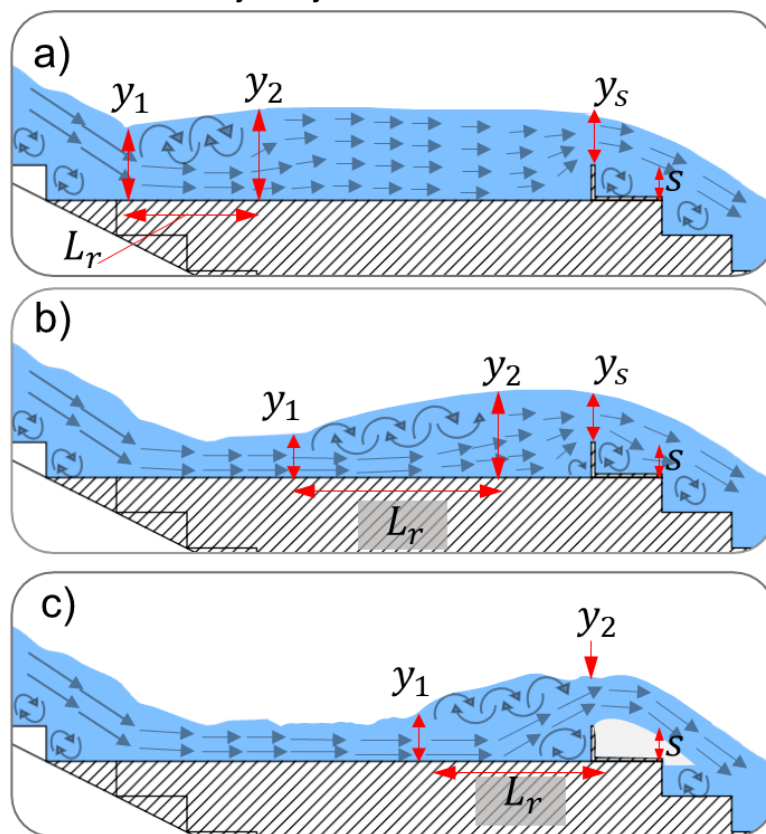
5.3.3.5 Considerações Finais das Análises do Experimento 2

Por fim, pode-se resumir as análises da ocorrência do ressalto hidráulico em um trecho horizontal, foçado por uma soleira com uma descida como condição de jusante como apresentado na Figura 130. Nos vídeos, é possível observar que há praticamente um caminho preferencial entre as recirculações do ressalto e a montante da soleira para a condição c) da Figura 130.

Através das observações, pode-se especular que o valor esperado de L_r será maior, com o aumento do número de Froude na chegada. Logo, espera-se que haja uma

condição em que a recirculação voltaria a afogar o escoamento no pé da descida, porém dessa vez por limite de espaço na região horizontal para o desenvolvimento do ressalto. Testes com diferentes valores de Froude ou menores comprimentos de trecho horizontal podem verificar tal hipótese.

Figura 130 – Resumo das observações e análises feitas para o Experimento 2: a) Ressalto afogado pelo nível de jusante; b) recirculação do ressalto (rolo) se desenvolvendo completamente; c) recirculação (rolo) ocorrendo incompleta, limitada à soleira, gerando um jato a jusante da soleira.



6 CONCLUSÕES

Canais em degraus são utilizados em diversos tipos de sistema de condução de água, de drenagem superficial a extravasores em ombreiras de barragens de água, sedimentos e rejeitos, de pequeno e médio porte. Tais estruturas por vezes são modulares, com trechos em descida seguidos de trechos horizontais, seguidas novamente de descidas. Por vezes os canais seguem os traçados do terreno de implantação, que pode apresentar irregularidades, gerando a necessidade de curvas horizontais e verticais, muitas vezes projetadas como curvas verticais bruscas. Por se tratar de escoamentos com grandes velocidades, as mudanças de direção horizontais e verticais têm um potencial de causar comportamentos distante daqueles esperados para o fluxo em canais com alinhamentos retos, base dos modelos reduzidos que norteiam toda a literatura dos escoamentos em degraus.

Diante destes desafios, este trabalho lança um olhar para as possíveis ocorrências de jatos em trechos de mudança de direção vertical bruscas, comuns em estruturas modulares (mas não exclusivos), como drenagens de pilhas de estéril, pilhas de rejeitos e aterros sanitários de grande porte. Apesar das vazões reduzidas dessas estruturas, quando comparadas com estruturas extravasoras de grandes barragens, e do menor dano potencial associado à sua possível falha, tem-se presenciado a implantação de estruturas cada vez maiores, tanto devido às necessidades econômicas como pela ocorrência mais frequente de eventos extremos de precipitação. Alguns desses eventos geram vazões próximas das de projeto das estruturas e evidenciam as incompatibilidades entre os métodos utilizados para a verificação e dimensionamento das estruturas disponíveis na literatura e as estruturas praticadas na engenharia atual.

Neste trabalho foi feita a utilização de um modelo reduzido em acrílico de declividade 2h:1v (26°) em dois trechos em degraus, separados por um patamar de comprimento de cerca de 70% da altura do primeiro trecho. Foram testadas vazões em todos os regimes de escoamento em degraus apresentados na literatura, do Nappe Flow ao Skimming Flow, distinguindo-se o regime de transição entre eles.

As conclusões acerca de cada um dos pontos discutidos nesse trabalho são apresentadas em forma de guia para o dimensionamento de soleira e desafios na

continuidade desta pesquisa. No item subsequente, são apresentadas as conclusões quanto a medição do escoamento por meio fotográfico.

6.1 Dimensionamento de Soleiras em Trechos de Mudança de Declividade

Como apresentado no item 3.2.4, canais com mudanças de direção vertical são muitas vezes inevitáveis. Diante da necessidade de análise de um canal com mudança brusca de declividade, recomenda-se:

- Avaliar o dano potencial associado a ocorrência do jato no escoamento, se gera potenciais problemas para as estruturas no entorno e a jusante;
- Avaliar o potencial de salto do jato para a vazão de projeto (detalhado a seguir);
- Nos casos de possibilidade de contenção do ressalto no trecho horizontal, avaliar e dimensionar a soleira com base na ocorrência de um ressalto “reduzido”, limitado pela presença da soleira; e
- Nos casos de limite de espaço vertical para a contenção do ressalto, avaliar a possibilidade de construção de curva de concordância para a transição entre trechos (apresentado a seguir).

6.1.1 Determinação da Condição de Chegada no Início do Trecho Liso

As análises indiretas realizadas nesse estudo mostraram que a literatura para a previsão da profundidade e velocidade final do fluxo depois de um trecho reto em degraus se mostra coerente e consolidada.

Apenas para a condição de *Nappe Flow*, as equações propostas por Chanson (2002) não apresentaram uma boa correlação com as lâminas observadas. França *et al.* (2022) relata que a vasta literatura pesquisada não apresenta coerência entre algumas formulações.

Os trabalhos de Chanson (2002) e Chanson e Toombes (2004) apresentaram alguns parâmetros para a análise em regime de transição. Mesmo com a complexidade relatada na literatura para o regime, os métodos simplificados adotados como referência para cálculo da concentração de ar, profundidade e velocidades finais do

escoamento se mostraram coerentes. Mas não se pode atestar sua confiabilidade sem aumento na quantidade de testes e melhoria das medições.

Para o regime *Skimming Flow*, os trabalhos de Ohtsu *et al.* (2004), bastante difundidos nas análises realizadas no Brasil, devido principalmente ao *software* SisCCoH (Sistema de Cálculo de Componentes Hidráulicos), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica da UFMG, mostraram uma boa capacidade de previsão das condições de chegada do escoamento em *Skimming Flow*, comparando dados obtidos neste trabalho e por Campera (2020) no mesmo modelo reduzido.

6.1.2 Verificação do Jato

Definida a situação de chegada no trecho liso, pode-se assumir que a mesma energia de escoamento se mantém constante até o início do segundo trecho em degraus. Tal premissa implica em desprezar a perda de energia por atrito no trecho horizontal, o que é razoável em trechos horizontais curtos e lisos, mas requer validação. Tal premissa pode não ser válida em canais com maior rugosidade, declividades maiores e com transição de geometria entre os trechos.

Com base na energia de entrada do escoamento no jato, deve-se estimar a profundidade de saída do jato. Uma boa estimativa é de que a profundidade do escoamento é de aproximadamente $0,5y_c$. Com base na energia e na profundidade, a velocidade média pode ser estimada e utilizada para a previsão da trajetória inferior do jato. Essa correlação entre a velocidade média e a trajetória inferior do jato também deve ser verificada.

No presente estudo, a correlação apresentada na equação (53) se mostrou válida para uma descida de inclinação de 2h:1v (26°), com uma razão entre altura total H e comprimento do trecho horizontal de L (H/L) de 1,29. Razões maiores (patamares relativamente menores) possivelmente apresentarão comportamento similar, dada a premissa de não haver perda de energia no trecho horizontal. Razões menores poderão apresentar a ocorrência de um escoamento gradualmente variado que gerará condições de entrada do jato diferentes. Tais efeitos deverão ser investigados em futuros trabalhos.

Com base na trajetória do jato definida, é possível avaliar o ponto de impacto do jato no segundo trecho em degraus. É necessária uma investigação a respeito da aceitabilidade do jato para definir qual o parâmetro usar para definir a necessidade de utilização das soleiras.

Um salto de três degraus já se mostrou problemático no ponto de impacto nos estudos realizados (sobressaltos no ponto de impacto do jato, Figura 102). Porém, não se pode definir o desenvolvimento do escoamento ao longo do restante da descida. Os jatos acima da soleira dão um vislumbre do que pode ser o comportamento do escoamento a jusante da ocorrência de um jato e como tratado no item 3.3. Algumas estratégias de aeração de extravasores consistem justamente em provocar o descolamento do escoamento em extravasores para a entrada de ar na parte inferior. No entanto, a Figura 5 apresenta uma situação em modelo reduzido, baseado em um protótipo, que mostra o potencial destrutivo de um jato atingindo estruturas a jusante, que já foi relatado em operações do protótipo durante eventos extremos.

6.1.3 Dimensionamento e Posicionamento da Soleira

Definida a necessidade de utilização da soleira, faz-se necessária a definição de três variáveis principais, a posição da soleira a partir do final da descida x_s , o tamanho da soleira s e a altura do ressalto y_2 . Os dois primeiros são os parâmetros que controlam a ocorrência do terceiro em função da vazão.

A partir do valor da razão y_c/s , para uma descida com as configurações físicas apresentadas nestes estudos, é possível determinar o tipo da ocorrência do ressalto (afogado, completo ou com jato acima da soleira), assumindo a soleira como uma seção de controle do escoamento crítico (Figura 121). Entende-se que, para fins de dimensionamento, pode-se considerar o escoamento afogado quando a energia total no pé do primeiro trecho em degraus for inferior a energia crítica somada ao tamanho da soleira ($s + 1,5y_c$). Tal definição, porém, demanda de estudos com a avaliação das forças específicas do escoamento atuando no trecho horizontal.

Ainda para uma descida com as configurações apresentadas, com a soleira posicionada à distância de um patamar de degrau a montante ($L_s = L_h - l = 0,6\text{m}$), vazões que resultam em valores de y_c/s entre 0,85 e 1,15, aproximadamente,

promoveram a ocorrência de um ressalto sem a ocorrência de afogamento do escoamento no pé do primeiro trecho e sem a ocorrência do jato acima da soleira. É interessante incorporar aos estudos novas posições relativas de soleiras, bem como outros tamanhos, com distâncias maiores até o início do segundo trecho em degraus.

A ocorrência do jato acima da soleira apresentou uma solicitação grande à estrutura da soleira, sendo possível notar nos vídeos que o escoamento promove pequenos deslocamentos da peça de acrílico. No entanto, do ponto de vista hidráulico, a soleira promove o contato com o trecho em degraus novamente, mesmo com a ocorrência do jato observado nas vazões mais altas. Como apresentado por Wu *et al.* (2017), uma estratégia para evitar a ocorrência de jatos acima das soleiras é a utilização de degraus na face de montante da soleira, o que deve ser testado para guiar a modelagem de soleira entre trechos em degraus.

A profundidade y_1 do início do ressalto pode ser adotada como a profundidade do final do trecho em degraus, como mostrado na Figura 126. A posição de início do ressalto depende da relação entre a vazão, distância da soleira e tipo de ressalto a montante, para a ocorrência do jato acima da soleira, tem-se a posição da soleira fiada a uma distância de

O conjunto de novos resultados e condições pode gerar alguns ábacos correlacionando as principais variáveis adimensionais envolvidas no dimensionamento: Fr_1 , L_s/L_h , y_c/h , y_c/s , y_1/y_2 , x_1/x_2 .

6.1.4 Alternativa à Utilização de Soleiras

Quando não há a possibilidade de se utilizar as soleiras por limitação de espaço, como problemas de construção de paredes para contenção do ressalto, pode-se proceder com a construção de curvas verticais de concordância entre os trechos. A partir da equação (53) é possível determinar a variação do ângulo do jato inferior ao longo de uma trajetória, como apresentado na equação (57):

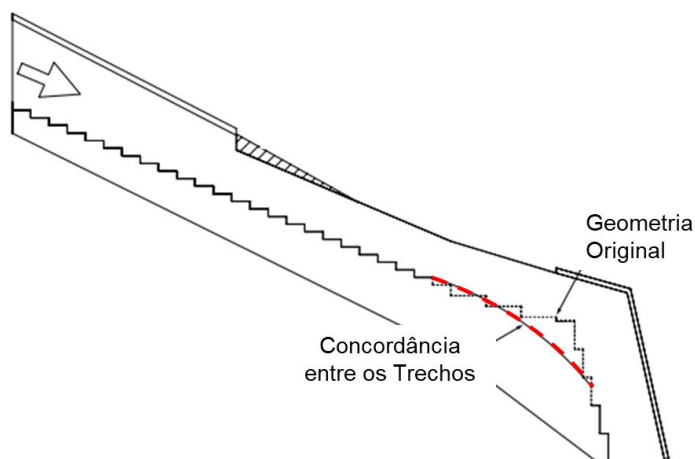
$$tg(\theta_x) = \frac{x \cdot q^2}{v_0^2 \cdot y_c^3} \quad (57)$$

Em que:

- θ_x representa a variação do ângulo da reta tangente à parábola;
- x representa a variação do eixo x ao longo da trajetória (m);
- q representa a vazão específica (m^2/s);
- v_0 representa a velocidade de entrada do jato (m/s); e
- y_c representa a profundidade crítica do escoamento (m).

De posse do ângulo do segundo trecho θ_2 , é possível prever a distância x de concordância entre os trechos de canal para a vazão de projeto, como apresentado na Figura 131. Sugere-se inserir degraus de patamar variável nesses trechos para transição do escoamento entre os trechos.

Figura 131 – Exemplo de concordância em curva horizontal.



Fonte: Adaptado de Yu *et al* (2008).

Destaca-se que a implantação da curva de concordância elimina a necessidade de contenção do ressalto, mas pode aumentar a necessidade de escavação no terreno em canais implantados em terreno natural. Há de se ponderar a respeito dessas alterações e dificuldades construtivas quando da análise de canais com mudanças de direção.

6.2 Aquisição de Dados

Para a aquisição e tratamento dos dados nos fenômenos testados, não foram utilizadas as metodologias clássicas de aquisição de dados em escoamentos aerados, com medidores intrusivos de fração de ar no escoamento. Buscou-se desenvolver uma técnica de aquisição e tratamento de dados baseada na detecção automática da superfície de água do escoamento.

Uma vez que a extrema turbulência do escoamento promove variações significativas de lâmina de água, foram feitos vídeos de 10 a 20 segundos de duração, com taxa de aquisição de imagens de 120 frames por segundo (120fps), gerando entre 1200 e 2400 imagens sequenciais para cada análise. Com um banco de dados para cada experimento, posição e vazão, foi necessário desenvolver um meio de detecção de bordas automático por meio de programação em linguagem Python, com base na biblioteca OpenCV.

Grande parte do tempo desta dissertação foi dedicado ao desenvolvimento da ferramenta. Ela mostrou um grande potencial de apoio nas análises de canais e de outros fenômenos que envolvam a permanência de um movimento ao longo do tempo. O código desenvolvido foi disponibilizado em plataforma de códigos abertos e nomeado de *CPH-ViFA* (Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos – Video Flow Analysis). Pretende-se dar continuidade no desenvolvimento da ferramenta, incorporando uma interface de usuário e possíveis análises de velocimetria por meio de vídeo. A ferramenta pode ser uma grande aliada na verificação a modelagem numérica em conjunto com a modelagem física, podendo-se avaliar a coerência dos modelos de turbulência utilizados

Com base nos resultados obtidos da ferramenta, foi possível constatar os efeitos da turbulência do fluxo, refletido em mapas de permanência da lâmina detectada em cada local, obtendo-se os contornos máximos e mínimos, além das linhas médias (de maior detecção de borda) ao longo do tempo. Por limitação de tempo, não foram aplicadas análises estatísticas às variações de lâmina, mas pretende-se incorporá-las em análises futuras.

Tais resultados mostraram interessantes comportamentos do jato e da utilização de soleira para as condições testadas, podendo-se obter algumas correlações de interesse no dimensionamento das soleiras. No entanto, como evidenciado ao longo do trabalho, são necessários testes com novas configurações para a verificação de algumas das constatações apresentadas. Alguns destes podem ser facilmente realizados e incorporados a esse trabalho, graças a ferramenta de análise de escoamento por meio de vídeo desenvolvida.

O objetivo deste trabalho é lançar o alicerce do que se pretende ser uma pesquisa completa das mudanças de alinhamento em canais rápidos. São possíveis os estudos de variação dos meios de medição, como a comparação de medição intrusiva e não intrusiva; e a variação dos modelos físicos, com diferentes formatos de soleiras e suas configurações, além de curvas horizontais e outras particularidades de canais que não seguem o padrão das estruturas da literatura dos escoamentos em degraus, dos jatos de aeração e dissipação e dos ressaltos hidráulicos.

7 RECOMENDAÇÕES

As recomendações sobre os dois principais temas deste são listadas a seguir:

7.1 Medição do Escoamento

- Melhorar a ferramenta CPH-ViFA para obtenção de velocidades por meio de vídeo (*Optical Flow*);
- Implantar saída digital do medidor de vazão para poder correlacionar as vazões com os resultados evitando erro humano na leitura da vazão;
- Implantar manômetros na base do canal para análise da variação de pressão e possíveis obtenções de parâmetros como velocidade média a partir da equação da continuidade;
- Construir o medidor de fase intrusivo para obter as concentrações de ar e velocidades em escoamento;
- Utilização de LIDAR e medidores ultrassônicos para validação cruzada de medidas;
- Aplicar as medições intrusivas e não intrusivas nas regiões do escoamento em degraus para fins de comparação com a literatura; e
- Desenvolvimento de medidores de detecção de fase, manômetros e métodos de *Optical Flow* aplicáveis a níveis de protótipos.

7.2 Experimentos

- Testar novas alturas, posições e formatos de soleiras no trecho horizontal;
- Testar diferentes ângulos de entrada no segundo trecho em degraus para confirmar o cálculo de trajetória dos jatos;
- Testar diferentes configurações de canais (outros ângulos, sem degraus, com diferentes rugosidades), para avaliar o efeito de diferentes condições de chegada no trecho horizontal (número de Froude na chegada, diferentes condições de aeração etc.);
- Testar a aceitabilidade da ocorrência do jato para definir a necessidade da implantação das soleiras. No presente estudo não foi possível avaliar o impacto do jato no escoamento de um segundo trecho em degraus

longo, sendo que o jato tem seu impacto direto no trecho reto de deságue; e

- Testar canais em modelos maiores, que se aproximem dos tamanhos de protótipos, e buscar parcerias com empresas gerenciadoras de estruturas hidráulicas (extravadores e canais periféricos em barragens e pilhas, bacias de contenção de cheias urbanas, PCHs) para análise em protótipos da utilização de soleiras e dos efeitos de escala esperados.

8 REFERÊNCIAS

ARANTES, E. J. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. 2007. Tese de Doutorado. University of São Paulo, Brazil.

AROSQUIPA NINA, Y.; SHI, R.; WÜTHRICH, D.; CHANSON, H. Intrusive and non-intrusive two-phase air-water measurements on stepped spillways: A physical study. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 131, n. September 2021, p. 110545, 2022. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2021.110545. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110545>.

BATCHELOR, George Keith. **An introduction to fluid dynamics**. Cambridge university press, 2000.

BAYON, A.; VALERO, D.; GARCÍA-BARTUAL, R.; VALLÉS-MORÁN, F. J.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. **Environmental Modelling and Software**, v. 80, p. 322–335, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>.

BERNOULLI, Daniel. Hydrodinamica: Sive de Viribus et Motibus Fluidorum Comentariorum - Opus Academicum. Basileia, Suíça: Typis Joh. HENR. DECKERI, Typographi Bafilienfis., 1738. 344 p

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 9, p. 661–670, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:9(661)).

BRADLEY J.; PETERKA A. Hydraulic Design of Stilling Basins. **Journal of Hydraulic Division ASCE**, v. 83, n. 5, p. 1401–1406, 1957.

BRADSKI G. The OpenCV Library. Dr Dobbs's **Journal of Software Tools**. 2000

BUNG, D. B. Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 5, p. 639–648, 2011. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.584372>.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Jet Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 121, n. 5, p. 441–448, 1995. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1995\)121:5\(441\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1995)121:5(441)).

CHANSON, Hubert. Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows. 1996. .

CHANSON, Hubert. Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways. **Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering**, v. 36, n. 1, p. 69–76, 1994. .

CHANSON, Hubert. Hydraulics of skimming flows on stepped chutes: The effects of inflow conditions? **Journal of Hydraulic Research**, v. 44, n. 1, p. 51–60, 2006. <https://doi.org/10.1080/00221686.2006.9521660>.

CHANSON, Hubert. **STUDY AND ON OF AIR AERATION SPILLWAY DEVICES**. 1988. 245 f. Catenburry New Zeland, 1988.

CHANSON, Hubert. **The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways**. [S. l.: s. n.], 2002.

CHANSON, Hubert.; TOOMBES, L. Hydraulics of stepped chutes: The transition flow | L'hydraulique des chutes en marches d'escalier: L'écoulement de transition. **Journal of Hydraulic Research**, v. 42, n. 1, p. 43–54, 2004. .

CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 809–819, 2002. <https://doi.org/10.1139/I02-083>.

CHANSON, Hubert. **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. 1. ed. Dundee, UK: CRC Press, 2015.

CHANSON, Hubert; WHITMORE, R. L. Gold Creek dam and its unusual waste waterway (1890-1997): Design, operation, and maintenance. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 25, n. 4, p. 755–768, 1998. <https://doi.org/10.1139/I98-005>.

CHANSON, Hubert; TOOMBES, Luke. Hydraulics of stepped chutes: The transition flow | L'hydraulique des chutes en marches d'escalier: L'écoulement de transition. **Journal of Hydraulic Research**, v. 42, n. 1, p. 43–54, 2004.

CHAUDHRY, M. H. **Open-Channel flow**. [S. l.: s. n.], 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96447-4>.

DAI PRÁ, Maurício. Características de Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ELEVATORSKI, A. E. Hydraulic Energy Dissipators, McGraw-Hill: New York, 1959.

FELDER, S.; CHANSON, H. Phase-detection probe measurements in high-velocity free-surface flows including a discussion of key sampling parameters. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 61, p. 66–78, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.10.009>.

FRANÇA. I. DE S., T.; SIMÕES, A. L.; MATOS QUEIROZ, L.; LIMA NETO, I. E.; EDMAR SCHULZ, H.; DE MELO PORTO, R. O estado da arte sobre escoamentos em quedas sucessivas em canais com o fundo em degraus. **Revista DAE**, v. 71, n. 239, p. 97–114, 2022. <https://doi.org/10.36659/dae.2023.008>.

FRIZELL, W.; SVOBODA, C. D. Performance of Type III Stilling Basins – Stepped Spillway Studies Do Stepped Spillways Affect Traditional Design Parameters? **Hydraulic Laboratory Report HL-2012-02**, n. July, 2012. .

GONZALEZ, C. A.; CHANSON, H. Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams. **Dam Engineering**, v. 17, n. 4, p. 223–244, 2007. .

HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N. Classical hydraulic jump: length of roller. **Journal of Hydraulic Research**, v. 28, n. 5, p. 591–608, set. 1990.

HAGER, W. H. Classical hydraulic jump: free surface profile. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 3, p. 536–539, 1993. <https://doi.org/10.1139/l93-068>.

HAGER, Willi H.; BRETZ, N. V. Ressauts hydrauliques par-dessus des marches positives et négatives. **Journal of Hydraulic Research**, v. 24, n. 4, p. 237–253, 1986. <https://doi.org/10.1080/00221688609499303>.

HAGER, Willi H.; LI, D. Sill-controlled energy dissipator. **Journal of Hydraulic Research**, v. 30, n. 2, p. 181, 1992. <https://doi.org/10.1080/00221689209498932>.

HAGER, Willi H.; SCHLEISS, A. J.; BOES, R. M.; PFISTER, M. **Hydraulic Engineering of Dams**. 1. ed. Zurich, Lausanne, Fribourg: [s. n.], 2020. v. 1, .

HAGER, Willi H.; SCHLEISS, Anton J.; BOES, Robert M.; PFISTER, Michael. **Hydraulic Engineering of Dams**. 1. ed. Zurich, Lausanne, Fribourg: [s. n.], 2020. v. 1.

HANG, W.; CHANSON, H. Integral turbulent length and time scales in hydraulic jumps: an experimental investigation at large reynolds numbers hang. n. 2, p. 28–31, 2015. .

LEANDRO, J.; BUNG, Daniel B.; CARVALHO, R. Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods. **Experiments in Fluids**, v. 55, p. 1-17, 2014.

LI, Rui. On the Opportunities and Challenges of LIDAR Technology in Air-water Flows in Physical Hydraulic Modelling. 2022.

LIVIO, Mario. **Galileu e os negadores da ciência**. Editora Record, 2021.

KRAMER, M.; CHANSON, H. Transition flow regime on stepped spillways: air–water flow characteristics and step-cavity fluctuations. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 18, n. 4, p. 947–965, 2018. DOI 10.1007/s10652-018-9575-y. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9575-y>.

MATOS, J.; MEIRELES, I. Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: Engineering challenges, labyrinths of research. **ISHS 2014 - Hydraulic Structures and Society - Engineering Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures**, n. June, p. 25–27, 2014. <https://doi.org/10.14264/uql.2014.11>.

MARQUES, Marcelo Giulian; DRAPEAU, Jean; VERRETTE, Jean-Louis. Flutuação de pressão em ressalto hidráulico. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. vol. 2, n. 2 (jul./dez. 1997), p. 45-52, 1997.**

MOODY, Lewis F. Friction factors for pipe flow. **Transactions of the American Society of mechanical engineers**, v. 66, n. 8, p. 671-678, 1944.

NIKURADSE, J. Untersuchungen über turbulente Strömungen in nicht kreisförmigen Rohren. **Ingenieur-archiv**, v. 1, p. 306-332, 1930.

NÓBREGA, Juliana Dorn; SCHULZ, Harry Edmar; ZHU, D. Z. Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis and ultrasonic sensor measurements. In: **ISHS 2014-Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures**. The University of Queensland, 2014. p. 1-8.

NÓBREGA, Juliana Dorn. **Metodologia teórica e experimental para determinação das características do ressalto hidráulico clássico**. 2014. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. doi:10.11606/D.18.2014.tde-30092014-105847. Acesso em: 2024-09-23.

PLETERSKI, Žan et al. Measurements of Complex Free Water Surface Topography Using a Photogrammetric Method. **Remote Sensing**, v. 15, n. 19, p. 4774, 2023.

PIGOTT, R.J.S. The flow of fluids in closed conduits. **Mechanical Engineering**, 55:497–501,515, August 1933.

PIETRKOWSKI, J., Beitrag zur Kenntnis des Wechselsprunges (**Contribution on the Knowledge on Hydraulic Jumps**), Die Wasserwirtschaft, Nr. 25, pp. 356-358, 1932.

QIAN, Shangtuo; WU, Jianhua; MA, Fei. Hydraulic performance of ski-jump-step energy dissipater. **Journal of hydraulic engineering**, v. 142, n. 10, p. 05016004, 2016.

RAJARATNAM, N. **Hydraulic Jumps**. [S. l.]: ACADEMIC PRESS INC., 1967. v. 4, .

DOI 10.1016/b978-1-4831-9935-1.50011-2. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2>.

RAJARATNAM, N. Skimming Flow in Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 4, p. 587–591, 1990. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1990\)116:4\(587\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1990)116:4(587)).

RAK, Gašper et al. A review on methods for measurement of free water surface. **Sensors**, v. 23, n. 4, p. 1842, 2023.

RIEGEL, R. M.; BEEBE, J. C. **The hydraulic jump as a means of dissipating energy**. Miami Conservancy District, 1928.

SAFRANIEZ, Kurt Moissei. Wechselsprung und die Energievernichtung des Wassers, 1927. (Tradução para o inglês por Barnes, D.P.); Bureau of Reclamation: Denver, CO, USA, 1929.

SANAGIOTTO, D. G. (2003) - **Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 118 p.

SIMÕES, André Luiz Andrade. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SIMÕES, André Luiz Andrade. **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: Resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SORENSEN, B. R. M.; ASCE, F. Stepped spillway hydraulic model investigation. v. I, n. 12, p. 1461–1472, 1986. .

TEHRANI, M. J. O. M.; MATOS, J.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A. J. Bottom-pressure development due to an abrupt slope reduction at stepped spillways. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14010041>.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2008. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TOOMBES, L. Experimental Study of Air-Water Flow Properties on Low-Gradient Stepped Cascades. , p. 304, 2002.

TOZZI, M. J. B., Giorgio. Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com parâmetro em degraus. 1992. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

USB. **Design of Small Dams**. 3. ed. Washington,, DC: U.S. Government Printing, 1987.

VALERO, D.; VITI, N.; GUALTIERI, C. Numerical simulation of hydraulic jumps. Part 1: Experimental data for modelling performance assessment. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–16, 2018. <https://doi.org/10.3390/w11010036>.

WAHL, T. L.; FRIZELL, K. H.; COHEN, E. A. Computing the Trajectory of Free Jets. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 2, p. 256–260, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:2\(256\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:2(256)).

WEST, Geoffrey. **Scale. The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies**. Nova York, Penguin Press, 479 p., 2017.

WU, Jian-hua; QIAN, Shang-tuo; MA, Fei. A new design of ski-jump-step spillway. **Journal of Hydrodynamics**, v. 28, n. 5, p. 914-917, 2016.

WU, Jianhua et al. Residual energy on ski-jump-step and stepped spillways with various step configurations. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 146, n. 4, p. 06020002, 2020.

YEN, B. C. Open Channel Flow Resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 1, p. 20–39, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:1(20)).

YU, D.; LEE, J. H. W.; WONG, C. K. C. Stormwater overflow in stepped channel. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 2, n. 2, p. 119–128, 2008. DOI 10.1016/j.jher.2008.05.004. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2008.05.004>.