

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

André Lara Barata

**AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE ESCOAMENTO LIVRE COM MUDANÇAS DE DIREÇÃO  
COM O AUXÍLIO DE MODELO EXPERIMENTAL**

Belo Horizonte  
2025

André Lara Barata

**AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE ESCOAMENTO LIVRE COM MUDANÇAS DE DIREÇÃO  
COM O AUXÍLIO DE MODELO EXPERIMENTAL**

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 de título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientadora: Edna Maria de Faria Viana

Coorientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui

Belo Horizonte  
2025

B226a Barata, André Lara.  
Avaliação hidráulica de escoamento livre com mudanças de direção com o auxílio de modelo experimental [recurso eletrônico] / André Lara Barata. – 2025.  
1 recurso online (126 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.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Desenvolvimento – Teses. 3. Água – Escoamento – Velocidade – Teses. 4. Drenagem – Projetos – Teses. 5. Modelos e construção de modelos – 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

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

"Avaliação Hidráulica de Escoamento Livre Com Mudanças de Direção Com O Auxílio de Modelo Experimental"

**ANDRE LARA BARATA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profª. EDNA MARIA DE FARIA VIANA

Prof. JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI - Coorientador

Prof. GUSTAVO MEIRELLES LIMA

DR. ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

Prof. MAURICIO DAI PRÁ

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Eduardo Coutinho de Paula

Profª. Edna Maria de Faria Viana

Coordenador

Orientadora

Belo Horizonte, 24 de abril de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 28/04/2025, às 08:30, 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 **Aloysio Portugal Maia Saliba, Usuário Externo**, em 28/04/2025, às 09:36, 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 **Gustavo Meirelles Lima, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2025, às 10:37, 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, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2025, às 10:52, 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 28/04/2025, às 11:58, 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 05/06/2025, às 13:55, 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](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4162935** e o código CRC **5AA24EE1**.

*Dedico essa dissertação aos meus pais,  
Rogério e Jaqueline e à minha esposa,  
Mariana, pelo carinho e apoio  
incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à ANEEL, CEMIG, ELETROBRAS-FURNAS, a FAPEMIG, CNPq, CAPES, Serra do Facão, CPH, EHR e UFMG, pelo suporte financeiro para a realização desse trabalho. Agradeço especialmente à minha orientadora, Prof. Dr.(a) Edna Viana, por me guiar ao longo deste enorme desafio e me lembrar que tudo iria dar certo nos momentos de maior ansiedade, além de colocar a mão na massa e me ajudar nos experimentos. Também agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Jorge Tarqui, pelas contribuições, orientações e boa vontade para ajudar, sempre que precisei. Expresso minha enorme gratidão àquele que sempre fará parte da família do CPH, Dr. Aloysio Saliba, que, há 7 anos propôs o tema a qual dediquei meu TCC e, agora, meu Mestrado, além de ter sido o grande responsável por me introduzir ao mundo da hidráulica, recursos hídricos e, especialmente, da modelagem experimental. Também expresso minha gratidão ao Prof. Armando Alves Neto, do Departamento de Engenharia Eletrônica, pelo auxílio no desenvolvimento do código.

Agradeço à Geoestável Consultoria e Projetos e meus colegas, sobretudo da equipe de recursos hídricos, pelo apoio e incentivo aos meus estudos e interesse no tema, me ajudando a encarar este desafio com mais leveza. Agradeço especialmente à Sarah Luiz, pelo incentivo e compreensão nos momentos mais difíceis e ao Daniel Ferreira, pela parceria no trajetória do mestrado.

Agradeço à minha família pelo incondicional apoio e compreensão. Meu pai, Rogério, que, com suas brincadeiras nas horas certas (e erradas também) me alegrou em todos os momentos. Minha mãe, Jaqueline, que me aconselhou, me guiou, me acolheu e fez de tudo a seu alcance para me ajudar, trazendo o carinho de uma mãe e a inspiração de uma professora com uma brilhante carreira acadêmica. Um obrigado muito especial à Mariana, que me apoiou (como de costume) ao longo desse processo como minha namorada, noiva e esposa, trazendo o conforto do qual eu precisei nos momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço aos meus amigos e meus primos, pela paciência de escutarem que eu “não vou poder sair hoje” inúmeras vezes e ainda não desistirem de me convidar de novo.

## RESUMO

Estruturas de drenagem superficial são comuns no contexto da mineração no Brasil, sendo encontradas em pilhas de estéril, barragens, cavas e outras estruturas. Suas geometrias podem ser influenciadas por diversas condições de campo, como restrições de terraplenagem e espaço disponível. Dessa forma, é comum utilizar dispositivos de mudança de direção, ou deflexões, para contornar essas dificuldades. Este estudo investiga o escoamento livre em mudanças de direção em canais de drenagem superficial, buscando melhor compreender o comportamento do escoamento nesse tipo de estrutura, com o objetivo de identificar as geometrias mais eficientes do ponto de vista de variação de profundidade e perturbações causadas no escoamento, contribuindo para um melhor dimensionamento hidráulico em aplicações práticas. Para o estudo do fenômeno, foi utilizado um modelo experimental, construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Se trata de um modelo de um canal em acrílico, com 15 centímetros de largura e 35 centímetros de altura, com peças de deflexão em diferentes ângulos ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ ) que, juntamente com a utilização de fundos falsos para simular degraus e soleiras antes e depois de cada deflexão, permitem múltiplas configurações geométricas. Os experimentos foram filmados por múltiplos ângulos e as medições feitas posteriormente à realização dos testes, por meio de análise de vídeo. Para essa análise, desenvolveu-se uma ferramenta computacional em linguagem de programação Python, baseada em modelos de detecção de movimento para medir a profundidade do escoamento. Dessa forma, foi possível comparar o comportamento do escoamento em cada configuração geométrica. Os resultados obtidos mostram que a geometria do fundo do canal impacta significativamente o comportamento do escoamento nas deflexões, assim como o ângulo de deflexão, tendo sido observadas, em alguns casos, profundidades máximas na deflexão da ordem de cinco vezes as de aproximação. Além disso, foram identificados fenômenos como vórtices de recirculação, zonas de separação e ressaltos hidráulicos em múltiplos testes. Em relação à propagação de perturbações, concluiu-se que as geometrias B (degrau a montante e fundo liso a jusante) e C (degrau a montante e soleira a jusante) apresentaram os melhores desempenhos, a montante e jusante da deflexão, respectivamente. Também foi possível concluir que ângulos mais suaves de deflexão fazem com que as profundidades máximas ocorram mais a jusante e as perturbações se propaguem por maiores distâncias. Os resultados reforçam a necessidade de se avaliar cada cenário prático antes de definir a configuração mais adequada, de acordo com os objetivos almejados no dimensionamento.

Palavras-chave: mudança de direção; escoamento livre; análise de vídeo; drenagem superficial; modelagem experimental.

## ABSTRACT

Surface water drainage structures are common in Brazil's mining sector, often found in waste dumps, dams, pits, and other structures. The geometries of these structures can be influenced by various field conditions, such as earthwork constraints and/or available space. Sharp bends are commonly used to overcome these difficulties. This study explores open channel flow in sharp bends to identify the most efficient bend geometries from the flow depth increase and disturbance propagation perspective, contributing to improved hydraulic design in practical applications. An experimental model was constructed to study the phenomenon at the Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) of the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). The model consists of an acrylic channel with a width of 15 centimeters and a height of 35 centimeters, with bends at different angles ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $90^\circ$ ) that, combined with the use of false channel beds to simulate steps and sills before and after each deflection, allow for various geometric configurations. Multiple angle records of the experiments were analyzed using a computational tool developed in Python programming language based on motion detection models to measure the flow depth, enabling the comparison of flow behavior across the different geometric configurations. Results show that both the channel bed geometry and the bend angle significantly impact flow behavior at sharp bends. In some cases, maximum depths observed at the bend reached up to five times the approach depths. Additionally, phenomena such as recirculation vortices, separation zones, and hydraulic jumps were identified in multiple tests. Regarding disturbance propagation, geometries B (step upstream and smooth bed downstream) and C (step upstream and sill downstream) exhibited the best performances upstream and downstream of the bend, respectively. Smoother deflection angles cause maximum depths further downstream, and disturbances propagate over longer distances. The results highlight the need for each practical scenario to be carefully evaluated before determining the most adequate geometry according to the desired design objectives.

Keywords: sharp bends; open channel flow; video analysis; surface water drainage; experimental modelling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de tipos de ressalto de acordo com o número de Froude de montante .....	24
Figura 2 – Protótipo e modelo: (a) Vertedouro em degraus da Barragem <i>Les Olivettes</i> , na França. (b) Modelo reduzido desse vertedouro em escala 1:10.....	25
Figura 3 – Vetores de velocidade (setas) e contornos $VRVi$ para os experimentos em laboratório, sendo (a) um plano horizontal na altura de 0,5cm a partir do fundo do canal e (b) na altura de 10,5cm a partir do fundo do canal.....	31
Figura 4 – Esquema das aletas cilíndricas posicionadas na parede interna do canal .....	32
Figura 5 – Representação esquemática dos efeitos de uma deflexão sem raio no escoamento em um canal de largura finita (vista em planta) .....	35
Figura 6 – Relações gerais entre $F_1$ , $\theta$ , $\beta$ , $y_2/y_1$ e $F_2$ para ressaltos oblíquos.....	36
Figura 7 – Modelo experimental na configuração de deflexão de $90^\circ$ .....	37
Figura 8 – Transbordamento e fluxo espiral ocorrendo após a deflexão.....	38
Figura 9 – Visão em planta e seção do fenômeno de separação de fluxo ao longo de uma mudança de direção em $90^\circ$ com raio. ....	39
Figura 10 – Formação de ressalto hidráulico e de ondas transversais, ou ondas de choque, a jusante da deflexão – $Fr = 0,3395$ .....	40
Figura 11 – Modelo experimental utilizado no presente trabalho – Configuração $90^\circ$ - B.....	45
Figura 12 – Detalhe do desnível criado com o auxílio de fundos falsos .....	47
Figura 13 – Representação esquemática do modelo físico na configuração $90^\circ$ - B .....	47
Figura 14 – Vistas em planta do modelo com as deflexões de $45^\circ$ e $60^\circ$ .....	48
Figura 15 – Vistas isométricas do modelo com os três ângulos de deflexão estudados. ....	48
Figura 16 – Perfis longitudinais do modelo para as quatro geometrias testadas .....	49
Figura 17 – Detalhes das placas de isopor e dos blocos de nylon utilizados para apoio do fundo falso.....	50
Figura 18 – Detalhes de algumas marcações realizadas para auxiliar na avaliação das filmagens.....	51
Figura 19 – Posicionamento da câmera em relação ao modelo no trecho de montante (a) e no trecho de jusante (b) .....	53

Figura 20 – Marcações no chão (a) e no suporte (b) utilizadas como referência para o posicionamento do tripé, a montante e jusante da deflexão .....	53
Figura 21 – Pontos de referência utilizados para a obtenção dos resultados .....	55
Figura 22 – Teste sendo realizado na configuração 4,75L/s – 60° – B. Em destaque, etiqueta com identificação do teste .....	60
Figura 23 – Aplicação do algoritmo de detecção de bordas com o uso da ferramenta CPH-ViFA, proposta por Ribeiro (2023) .....	62
Figura 24 – Tratamento da imagem do teste na configuração 4,75L/s – 60° – B – (a): imagem original (b): imagem tratada .....	65
Figura 25 – Comparação entre os perfis nos vídeos cortado e completo .....	66
Figura 26 – Definição de área de exclusão devido à movimentação intensa de bolhas sob a superfície .....	67
Figura 27 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 6,96L/s – 60° – A .....	69
Figura 28 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 6,96L/s – 60° – A.....	70
Figura 29 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58L/s – 90° – A (afastado) .....	72
Figura 30 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58L/s – 90° – A (padrão).....	72
Figura 31 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58L/s – 90° – A.....	72
Figura 32 – Presença de ondas transversais a jusante.....	75
Figura 33 – Presença de ondas transversais a jusante – vista superior .....	76
Figura 34 – Zona de separação do escoamento – 90° – 1,58 L/s – A.....	76
Figura 35 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – A .....	77
Figura 36 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – A .....	78
Figura 37 – Perfis máximo e médio observados – 9,50 L/s – 90° – A.....	79
Figura 38 – Colisão de ondas e movimentação intensa de bolhas – 9,50 L/s – 90° – A .....	80
Figura 39 – Formação de ondas transversais a jusante da deflexão – 9,50 L/s – 90° – A.....	80

Figura 40 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – B .....	81
Figura 41 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – B .....	82
Figura 42 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – B .....	82
Figura 43 – Formação de ondas transversais a jusante da deflexão – 1,58 L/s – 90° – B .....	83
Figura 44 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – B .....	84
Figura 45 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – B .....	85
Figura 46 – Presença de vórtices de recirculação no trecho de deflexão – 9,50 L/s – 90° – B.....	86
Figura 47 – Ondas transversais a jusante – 9,50 L/s – 90° – B.....	87
Figura 48 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – C (afastado).....	89
Figura 49 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – C (padrão) .....	89
Figura 50 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – C .....	89
Figura 51 – Queda na profundidade na saída da deflexão – 1,58 L/s – 90° – C .....	90
Figura 52 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – C .....	91
Figura 53 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – C .....	91
Figura 54 – Vórtice com padrão espiral de circulação montante – 9,50 L/s – 90° – C .....	92
Figura 55 – Vórtice com padrão espiral de circulação – 9,50 L/s – 90° – C .....	93
Figura 56 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – D (afastado).....	94
Figura 57 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – D (padrão) .....	94

Figura 58 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – D .....	94
Figura 59 – Zona de separação do escoamento – 90° – 1,58 L/s – D .....	95
Figura 60 – Descolamento do fluxo e vórtice de recirculação – 90° – 1,58 L/s – D...96	96
Figura 61 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – D .....	96
Figura 62 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – D .....	97
Figura 63 – Vista de montante da deflexão com destaque para o choque de ondas, zona de separação e padrão de recirculação – 9,50 L/s – 90° – D .....	98
Figura 64 – Vista de jusante da deflexão com destaque para o vórtice de recirculação, as ondas transversais e os respingos que extravasam as paredes do canal – 9,50 L/s – 90° – D .....	98
Figura 65 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a montante da deflexão – 90° – Q = 1,58L/s.....	99
Figura 66 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a montante da deflexão – 90° – Q = 9,50L/s.....	101
Figura 67 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a jusante da deflexão – 90° – Q = 1,58L/s.....	102
Figura 68 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a jusante da deflexão – 90° – Q = 9,50L/s.....	103
Figura 69 – Formação de ondas transversais – vista superior, geometria D – 60° – Q = 6,96L/s .....	104
Figura 70 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria A – Montante .....	106
Figura 71 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria A – Jusante.....	107
Figura 72 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria B – Montante .....	108
Figura 73 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria B – Jusante.....	109
Figura 74 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria C – Montante .....	110

Figura 75 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria C – Jusante.....	111
Figura 76 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria D – Montante .....	112
Figura 77 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria D – Jusante.....	113
Figura 78 – Variação de profundidade máxima causada pela deflexão para cada teste – Q = 1,58L/s.....	115
Figura 79 – Variação de profundidade máxima causada pela deflexão para cada teste – Q = 9,50L/s.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações geométricas a serem construídas e testadas .....	44
Tabela 2 – Especificações técnicas do aparelho utilizado nas filmagens .....	52
Tabela 3 – Faixa de vazões testadas nos experimentos.....	59
Tabela 4 – Resultados para as seções nos pontos de interesse: 1,58 L/s – 90° – A	73
Tabela 5 – Valores considerados nas análises: 1,58 L/s – 90° – A.....	74
Tabela 6 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – A.....	78
Tabela 7 – Valores considerados nas análises – 1,58 L/s – 90° – B.....	83
Tabela 8 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – B.....	85
Tabela 9 – Valores considerados nas análises – 1,58 L/s – 90° – C.....	90
Tabela 10 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – C.....	92
Tabela 11 – Valores considerados nas análises – 1,58 L/s – 90° – D.....	95
Tabela 12 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – D.....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCE	The American Society of Civil Engineers
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
LDA	Anemometria Laser Doppler
PIV	Velocimetria de Imagem de Partícula
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USBR	United States Bureau of Reclamation
$A$	Área molhada ( $m^2$ )
$F_r$	Número de Froude
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
$I$	Declividade (m/m)
$L$	Comprimento característico (m)
$L_r$	Escala geométrica
$n$	Coefficiente de rugosidade de Manning ( $m^{1/3}/s$ )
$Q$	Vazão ( $m^3/s$ )
$Q_r$	Escala de vazões
$\Delta P$	Diferença de pressão (Pa)
$Re$	Número de Reynolds
$R_h$	Raio hidráulico (m)
$T$	Largura de topo do canal (m)
$V$	Velocidade (m/s)

$V_r$	Escala de velocidades
$V_R$	Velocidade resultante no plano horizontal (m/s)
$V_i$	Velocidade de entrada (m/s)
$z$	Altura acima do fundo do canal (m)
$\Pi$	Parâmetros adimensionais do Teorema Pi de Buckingham
$y$	Profundidade (m)
$y_h$	Profundidade hidráulica (m)
$y_{méd.}$	Profundidade média (m)
$y_{mín.}$	Profundidade mínima (m)
$y_{máx.}$	Profundidade máxima (m)
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s)
$\rho$	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	Tensão superficial (N/m)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	19
2	OBJETIVOS .....	21
2.1	Objetivo geral .....	21
2.2	Objetivos específicos.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	Escoamento livre.....	22
3.2	Modelagem experimental na engenharia hidráulica.....	24
3.2.1	Escala e semelhança de Froude .....	24
3.2.2	Análise dimensional e números adimensionais .....	26
3.3	Curvas horizontais em canais de drenagem.....	29
3.3.1	Curvas horizontais com raio .....	29
3.3.2	Curvas horizontais sem raio (deflexões) .....	33
3.4	Avaliação de escoamento por meio de análise de vídeo .....	41
4	METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS .....	43
4.1	Aparato experimental .....	43
4.2	Filmagens.....	51
4.3	Definição das vazões .....	57
4.4	Procedimento experimental / Ensaios .....	59
4.5	Análise de vídeo.....	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
5.1	Saída do programa.....	68
5.2	Deflexão de 90 graus .....	71
5.2.1	Geometria A (fundo liso a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	71
5.2.2	Geometria A (fundo liso a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	77
5.2.3	Geometria B (degrau a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	81
5.2.4	Geometria B (degrau a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	84
5.2.5	Geometria C (degrau a montante – soleira a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	87
5.2.6	Geometria C (degrau a montante – soleira a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	91
5.2.7	Geometria D (fundo liso a montante – degrau a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	93
5.2.8	Geometria D (fundo liso a montante – degrau a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$ .....	96

5.3	Influência da geometria no comportamento do escoamento.....	99
5.3.1	Influência a montante da deflexão.....	99
5.3.2	Influência a jusante da deflexão.....	101
5.3.3	Propagação de perturbações originárias da deflexão.....	105
5.4	Influência do ângulo de deflexão no comportamento do escoamento.....	105
5.4.1	Geometria A.....	106
5.4.2	Geometria B.....	108
5.4.3	Geometria C.....	110
5.4.4	Geometria D.....	112
5.5	Profundidades máximas causadas no escoamento pela mudança de direção ...	114
5.5.1	Varição de profundidade máxima registrada – $Q = 1,58\text{L/s}$ .....	114
5.5.2	Varição de profundidade máxima registrada – $Q = 9,50\text{L/s}$ .....	116
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	118
	REFERÊNCIAS.....	121
	APÊNDICE A – Exemplos de vídeos exportados pelo programa.....	125
	APÊNDICE B – Código do programa em linguagem Python.....	126

## 1 INTRODUÇÃO

Na área da mineração, dispositivos de drenagem superficial são muito comuns, podendo ser observados em estruturas como barragens, pilhas de estéril/rejeito, cavas, acessos e ao longo de áreas de minas em geral.

Esses dispositivos fazem parte de sistemas de drenagem superficial e são responsáveis por conduzir a parcela de escoamento superficial das águas pluviais de maneira ordenada e controlada até pontos de desague adequados. A composição e complexidade desses sistemas variam de acordo com a estrutura ou área em que eles estão inseridos.

Segundo Pinheiro (2011), na mineração não existe formalmente a distinção entre macrodrenagem e microdrenagem, como em sistemas de drenagem urbana. Entretanto, os sistemas podem ser divididos de forma análoga, considerando como microdrenagem estruturas de menor porte, com menores áreas de contribuição (canaletas de berma, de crista e descidas de água) e como macrodrenagem as estruturas de maior porte, que recebem as águas coletadas pela microdrenagem antes do lançamento final nos cursos d'água (canais periféricos e outras grandes estruturas). Outro exemplo de estruturas comuns nesse contexto são os bueiros e galerias, que podem variar em dimensões, desde pequenos tubos a grandes canais.

A maioria dos sistemas de drenagem superficial, sobretudo no contexto da mineração no Brasil, é dimensionada com base em conceitos e formulações empíricas já consolidadas. Esses métodos aplicam-se muito bem a dispositivos usuais e/ou de baixo risco, trazendo um bom resultado na maioria dos casos, com aplicação fácil e rápida.

Entretanto, alguns fenômenos específicos, como mudanças de direção em escoamento livre, são mais complexos. Esses fenômenos são normalmente caracterizados por separação de fluxo, escoamento secundário, perda de carga e variações da superfície da água (HAN *et al.* 2011). Dessa forma, essas singularidades requerem um dimensionamento mais criterioso, sobretudo se associados a estruturas de alto risco.

Contudo, para canais de drenagem ou vertedores de pequenas estruturas, que não apresentem elevados riscos ou consequências de falha, muitas vezes os dimensionamentos e verificações são realizados adotando aproximações que podem não ser representativas, ou utilizando critérios excessivamente conservadores, onerando esses dispositivos de forma desnecessária.

As mudanças de direção são comumente empregadas em sistemas de drenagem em áreas de minas, pois possibilitam a adequação dos alinhamentos dos dispositivos de drenagem às interferências observadas em campo, estando presentes em diversas formas, como curvas, caixas de passagem e deflexões sem raio. Frequentemente opta-se pelas deflexões sem raio, devido à simplicidade e celeridade executiva, além de requererem menos espaço físico para sua implantação.

Dessa forma, no dimensionamento hidráulico de canais, é importante que sejam adotadas geometrias adequadas em trechos de mudança de direção, considerando-se as condições de contorno e tomando-se os devidos cuidados para minimizar a imprevisibilidade desses dispositivos.

No presente trabalho, será avaliado o escoamento livre em mudança de direção, com o auxílio de modelo físico experimental. Vale ressaltar que não se trata de um modelo reduzido, visto que não há um protótipo específico associado, mas sim um modelo experimental.

A partir da investigação do fenômeno em laboratório, sob condições de contorno controladas, variando geometria, vazão e ângulo de deflexão, espera-se melhor caracterizar o fluxo nesse tipo de estrutura, auxiliando no processo de dimensionamento hidráulico em situações práticas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o funcionamento hidráulico de diferentes estruturas de mudança de direção em escoamento livre e definir as mais eficientes do ponto de vista de borda livre e propagação de perturbações superficiais no escoamento.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma ferramenta computacional de análise de vídeo para a avaliação da profundidade em escoamento livre em canais a partir de filmagens;
- Avaliar os parâmetros que influenciam o comportamento do escoamento em dispositivos de mudança de direção.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Escoamento livre

Os escoamentos livres são caracterizados pelo fato de a superfície do líquido estar em contato com a atmosfera, estando, portanto, submetida à pressão atmosférica (BAPTISTA; COELHO, 2014). Esses escoamentos apresentam grande variabilidade conforme a geometria do canal que os conduzem.

Os escoamentos livres podem ser classificados em diferentes tipos de escoamento (PORTO, 2006):

- Permanente ou não permanente – referente à variabilidade no tempo: o escoamento é permanente se a velocidade local em um ponto qualquer da corrente é constante em módulo e direção;
- Uniforme ou não uniforme – referente à variabilidade no espaço: o escoamento é uniforme se as velocidades locais forem paralelas entre si e constantes ao longo de uma mesma trajetória.

Na prática, os escoamentos nunca serão perfeitamente uniformes e permanentes, entretanto, essas simplificações são comumente adotadas para possibilitar o dimensionamento hidráulico de canais de drenagem.

Uma das formulações mais utilizadas no dimensionamento dessas estruturas é a equação de Manning, que possui origem empírica e está apresentada a seguir (Equação (1)).

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times \sqrt{I} \quad (1)$$

Sendo que:

- $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ );
- $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning ( $m^{1/3}/s$ );
- $A$  é a área molhada ( $m^2$ );
- $R_h$  é o raio hidráulico da seção molhada (m);
- $I$  é a declividade longitudinal (m/m).

A área molhada ( $A$ ) e o raio hidráulico ( $R_h$ ) são funções da profundidade ( $y$ ) do escoamento. Dessa forma, a partir da manipulação da equação de Manning, é possível obter a profundidade de escoamento normal para uma dada vazão de projeto, se conhecidas as propriedades geométricas da estrutura.

Além das classificações apresentadas, escoamentos também podem ser classificados como supercríticos ou subcríticos, de acordo com o número de Froude. Conforme descrito por Porto (2006), o número de Froude é um adimensional muito utilizado em estudos de canais e consiste na raiz quadrada da relação entre as forças inerciais e gravitacionais, definido conforme apresentado na Equação (2).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy_h}} \quad (2)$$

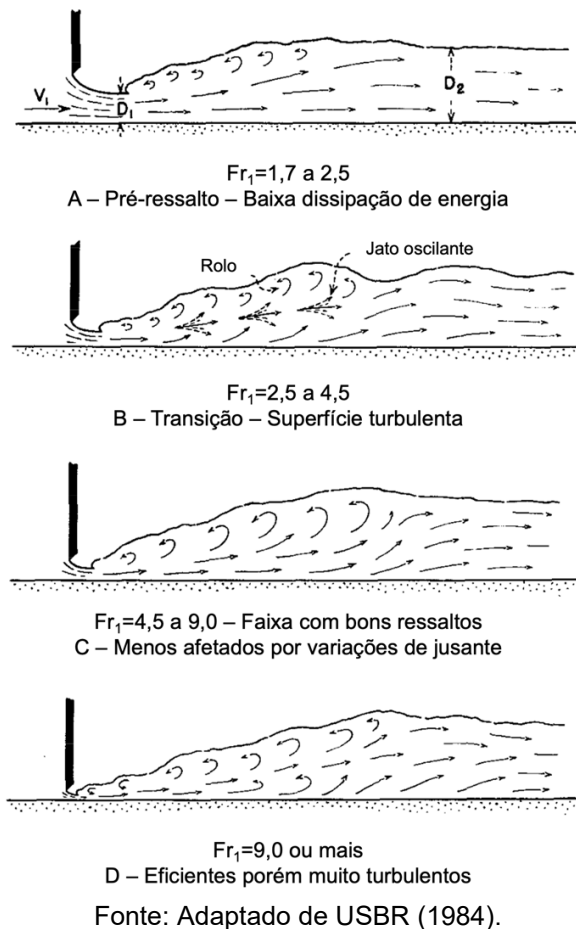
Sendo que:

- $V$  é a velocidade média de escoamento na seção (m/s);
- $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- $y_h$  é a profundidade hidráulica, que é igual à profundidade de escoamento ( $y$ ) para canais retangulares (m).

Para números de Froude maiores do que 1, tem-se que o regime de escoamento é supercrítico (ou torrencial), ou seja, as forças inerciais predominam sobre as forças gravitacionais. Se o número de Froude é inferior a 1, tem-se regime subcrítico (ou fluvial), no qual as forças gravitacionais predominam sobre as forças inerciais (BAPTISTA; COELHO, 2014). Finalmente, se o número de Froude é igual a 1, tem-se regime crítico de escoamento.

A avaliação do número de Froude auxilia a prever o comportamento do escoamento ao longo de estruturas hidráulicas, como canais. Esse adimensional é frequentemente adotado como parâmetro de dimensionamento de dispositivos de drenagem, tendo como uma das principais aplicações o cálculo de bacias de dissipação em canais abertos, conforme apresentado por USBR, 1984. A publicação apresenta uma classificação de tipos de ressalto de acordo com o número de Froude de montante, conforme Figura 1.

**Figura 1 – Classificação de tipos de ressalto de acordo com o número de Froude de montante**



O trabalho citado utilizou modelos reduzidos para obter as classificações apresentadas, além de definir diversos critérios de dimensionamento de bacias de dissipação, demonstrando a eficiência e importância do estudo de fenômenos hidráulicos em laboratório, para melhor compreender o comportamento das estruturas reais, ou protótipos.

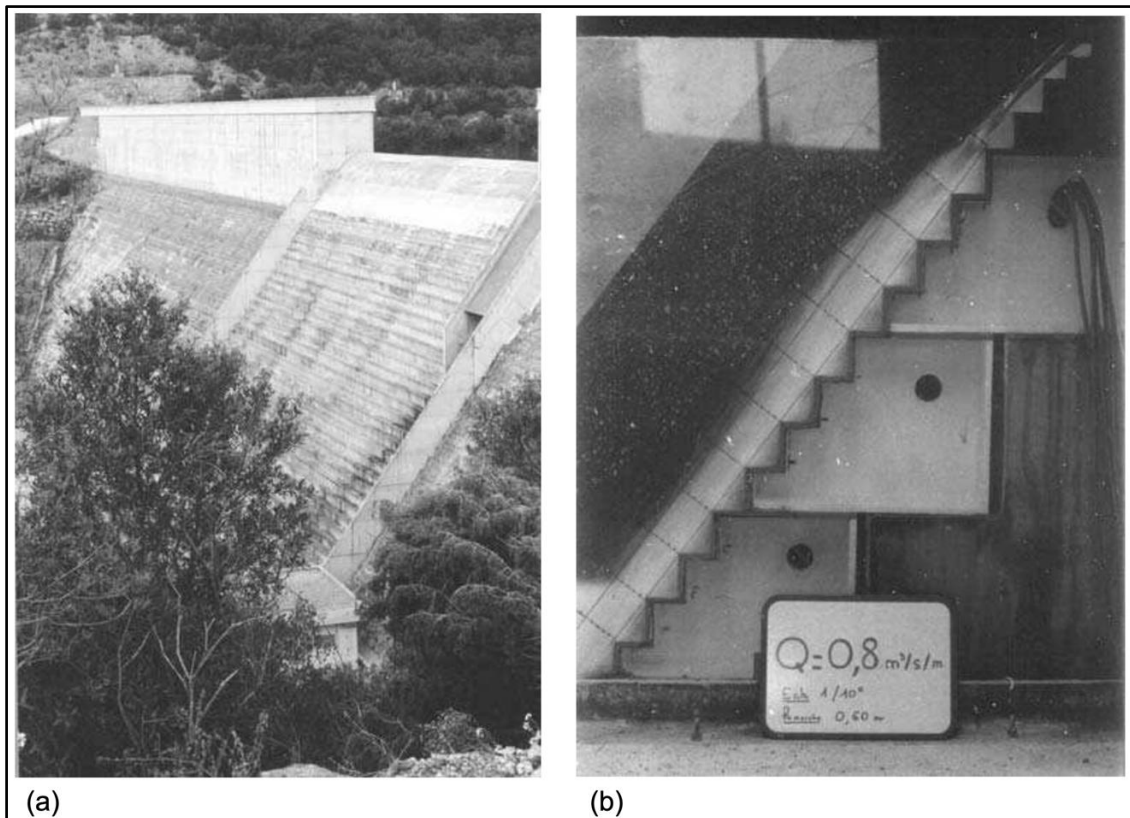
### 3.2 Modelagem experimental na engenharia hidráulica

O uso de modelos físicos experimentais na engenharia hidráulica é extremamente importante para a melhor compreensão do comportamento de uma série de fenômenos hidráulicos ainda não estudados/compreendidos.

#### 3.2.1 Escala e semelhança de Froude

Chanson (1999) define modelo físico como uma representação em escala de uma situação de escoamento hidráulico (Figura 2), que precisa apresentar as condições de contorno e a geometria da estrutura em escala correta.

**Figura 2 – Protótipo e modelo: (a) Vertedouro em degraus da Barragem Les Olivettes, na França. (b) Modelo reduzido desse vertedouro em escala 1:10**



Fonte: Adaptado de Chanson (1999).

Ainda segundo o autor, esses modelos são comumente usados para otimizar e garantir o dimensionamento correto de estruturas hidráulicas e devem apresentar semelhança de forma (geometria), de movimento (cinemática) e de forças (dinâmica) entre modelo e protótipo.

Portanto, a escala é um fator de grande importância na modelagem física, pois permite transferir as observações e conclusões obtidas a partir de experimentos com modelos físicos em laboratório para situações reais, nos protótipos.

Conforme Novak *et al.* (2010), a escala pode ser definida como a razão entre uma variável no protótipo e o valor correspondente no modelo (ex. 1cm no modelo correspondendo a 10cm no protótipo: escala geométrica = 1:10). Um modelo físico pode, ainda, apresentar distorções, que correspondem a uma alteração consciente em alguma variável para possibilitar melhor análise do fenômeno estudado. Normalmente consistem em distorções geométricas, em que as escalas vertical e horizontal diferem (ex. escala vertical 1:10 e escala horizontal 1:5).

Além da semelhança geométrica, expressa pela correspondência entre unidades de comprimento no modelo e no protótipo, no caso de modelos físicos envolvendo escoamentos de superfície livre, normalmente é adotada a semelhança de Froude, mantendo idênticos o número de Froude no modelo e no protótipo (CHANSON, 1999).

A partir da semelhança de Froude, é possível deduzir outros fatores de escala (ENDERSON, 1966 apud CHANSON, 1999), como de velocidade e de vazão, conforme equações (3) e (4), garantindo semelhança geométrica e cinemática ao modelo:

$$V_r = \sqrt{L_r} \quad (3)$$

$$Q_r = V_r L_r^2 = L_r^{5/2} \quad (4)$$

Sendo que:

- $L_r$  é a escala geométrica (adimensional);
- $V_r$  é a escala de velocidades (adimensional);
- $Q_r$  é a escala de vazões (adimensional).

Dessa forma, é possível correlacionar profundidades, velocidades e vazões em estruturas reais (protótipos) com as estruturas em laboratório (modelos). Conforme apresentado, para definir essas relações, foi fundamental utilizar como ferramenta o número de Froude, que é um adimensional.

O uso de adimensionais é muito importante no contexto da modelagem experimental e a principal ferramenta adotada para a avaliação desses adimensionais é a análise dimensional, que será abordada a seguir.

### 3.2.2 Análise dimensional e números adimensionais

Uma das principais ferramentas para avaliação de diversos fenômenos estudados em modelos reduzidos é a análise dimensional. Grande parte dos problemas de mecânica dos fluidos e engenharia hidráulica apresenta fenômenos que possuem dependência complexa de parâmetros geométricos e do escoamento (FOX *et al.*, 2010).

A análise dimensional permite manipular matematicamente as correlações entre variáveis de interesse de modo a obter essas correlações experimentalmente, visando solucionar problemas que seriam muito mais complexos de se resolver se os parâmetros fossem avaliados individualmente.

O Teorema Pi ( $\Pi$ ) de Buckingham estabelece uma relação entre uma função expressa em termos de parâmetros dimensionais e uma função correlacionada, expressa em termos de parâmetros adimensionais (FOX *et al.*, 2010).

A partir da manipulação das correlações entre os fatores que governam um fenômeno, com o auxílio do Teorema Pi de Buckingham, é possível reduzir a complexidade do problema avaliado, obtendo números adimensionais e definindo, experimentalmente, a relação entre eles. Esses parâmetros adimensionais são chamados de  $\Pi$ , originando o nome do teorema.

Um número adimensional pode ser definido como uma razão de parâmetros que possui significância física e é adimensional (ASCE, 1982 apud NOVAK *et al.*, 2010). Dentre os principais números adimensionais, destacam-se o número de Froude, de Reynolds, Weber e Euler, apresentados nas equações (2), (5), (6) e (7), respectivamente.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (5)$$

$$We = \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}} \quad (6)$$

$$Eu = \frac{\rho V^2}{\Delta P} \quad (7)$$

Sendo que:

- $L$  é o comprimento característico (m);
- $V$  é a velocidade (m/s);
- $\Delta P$  é a diferença de pressão (Pa);
- $\sigma$  é a tensão superficial (Pa);
- $\mu$  é a viscosidade dinâmica (kg/m.s);

- $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ).

Os adimensionais citados podem ser utilizados para garantir semelhança cinemática entre um modelo experimental e um protótipo. Entretanto, apenas uma semelhança cinemática pode ser respeitada, se utilizado o mesmo fluido no modelo e no protótipo, que normalmente é a água, principalmente por razões econômicas (PFISTER; HAGER, 2014).

Diante do exposto, é necessário avaliar qual é o mecanismo dominante no fenômeno estudado, para que a semelhança cinemática seja baseada no adimensional adequado (CHANSON, 1999):

- Em condutos forçados, normalmente o comportamento é governado pelas forças viscosas, sendo utilizado o número de Reynolds;
- Escoamento de superfície livre os efeitos da gravidade predominam, sendo utilizado o número de Froude;
- Quando as forças inerciais e de tensão superficial são predominantes, é utilizada a similaridade com base no número de Weber;
- O número de Euler normalmente é usado em modelos que utilizam ar ao invés da água.

Dessa forma, na hidráulica experimental, os números de Froude e Reynolds podem ser considerados os principais adimensionais, mais comumente utilizados em modelagens de escoamentos livres e de condutos forçados, respectivamente.

No contexto da mineração no Brasil, normalmente os modelos experimentais são desenvolvidos para avaliar estruturas de alto risco ou que estejam associadas a grandes investimentos, de tal forma que a sua falha ou ineficiência operacional poderiam levar a grandes prejuízos, sejam eles econômicos, ambientais, sociais ou uma combinação desses fatores.

No caso de canais de drenagem ou vertedores de pequenas estruturas, na maioria das vezes, os investimentos necessários para desenvolver modelos físicos reduzidos

para subsidiar seu dimensionamento hidráulico não se justificam financeiramente para as mineradoras.

Dessa forma, observa-se que singularidades como mudanças de direção em canais de drenagem de pilhas, cavas, minas e acessos precisam muitas vezes ser dimensionadas/verificadas utilizando critérios excessivamente conservadores, onerando esses dispositivos de forma desnecessária, ou utilizando aproximações que, muitas vezes, podem não ser representativas.

### **3.3 Curvas horizontais em canais de drenagem**

Canais de drenagem são projetados preferencialmente em trechos retilíneos, com o menor número de interferências possível, buscando minimizar perturbações que possam vir a ser causadas no escoamento. Contudo, no contexto da mineração, as condições de projeto frequentemente levam à necessidade de se projetar curvas nessas estruturas. A seguir serão apresentados os principais aspectos relacionados a essa condição de projeto.

#### **3.3.1 Curvas horizontais com raio**

Curvas horizontais com raio em escoamento livre é tema já explorado por diversos autores na comunidade científica, em diferentes contextos. O escoamento em curva em canais naturais, como meandros em rios, deforma fortemente o leito dos corpos d'água, gerando dunas, pontos de deposição e de erosão ao longo dos rios (VAN BALEN, *et al.*, 2010).

Essas características motivaram a investigação de turbulência e escoamento secundário por Blanckaert e De Vriend (2004) e Blanckaert e De Vriend (2005), partir de testes laboratoriais em modelo experimental. Devido às dificuldades de obter representatividade no modelo, em relação a canais naturais, os autores trabalharam com um trecho curvo de canal retangular buscando isolar os efeitos da curvatura, contribuindo, portanto, para pesquisas de canais artificiais.

Além dos canais naturais, a avaliação de canais artificiais também possui importância, sobretudo relacionada ao dimensionamento hidráulico dessas estruturas quanto à

profundidade de escoamento. Trechos com curvatura criam perturbações no escoamento, geradas pela força centrífuga provocada pelo movimento do líquido, causando sobrelevação do fluxo na parte externa da curva (aumento de profundidade) e o efeito oposto na parte interna da curva (diminuição da profundidade - AZEVEDO NETTO E FERNÁNDEZ, 2015).

Steffler et al. (1985) verificaram que curvaturas em canais fazem com que a superfície do escoamento se ajuste ao longo de um comprimento de transição que depende da largura do canal e do número de Froude.

Diante do exposto, canais com trechos em curvas requerem alguns cuidados especiais no dimensionamento. Segundo Pinheiro (2011), preferencialmente deve-se evitar o projeto de curvas horizontais em canais, devido à possibilidade de formação de ondas transversais, que perturbam o escoamento a jusante da singularidade e levam à sobrelevação do nível d'água na estrutura.

Entretanto, nem sempre é possível evitar curvas em canais. Portanto, deve-se tomar os devidos cuidados para avaliar o escoamento nesses trechos e minimizar a possibilidade de problemas decorrentes da perturbação do escoamento.

Os cuidados a serem tomados no dimensionamento dependem do regime de escoamento observado (supercrítico ou subcrítico). Para o caso de regime subcrítico, o dimensionamento é simplificado: não é necessário o uso de transição na curva (curva simples), bastando garantir a relação  $R > 3T$ , sendo  $R$  o raio da curva e  $T$  a largura de topo do canal (CETESB, 1986).

Para o caso de regime supercrítico, deve-se adotar transição (curva composta) e o raio da curva principal  $R$  deve obedecer à relação apresentada na Equação (8) (BENTLEY SYSTEMS *et al.*, 2007).

$$R > \frac{4 \cdot v^2 \cdot T}{gy} \quad (8)$$

Sendo  $v$  a velocidade média a montante da curva (m/s),  $T$  a largura de topo do canal (m),  $y$  a profundidade normal (m) e  $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

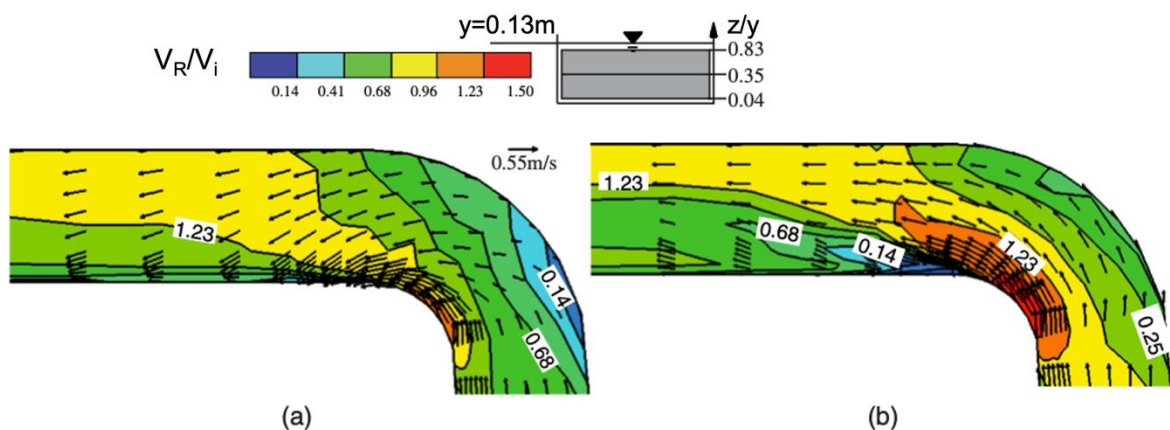
Pinheiro (2011) apresenta a condição de que a máxima sobrelevação admissível não deve superar 9% da largura de topo do canal.

Além da profundidade de escoamento, as curvas também afetam a distribuição de velocidade, conforme investigado por Ramamurthy *et al.* (2013). Os autores apresentam uma avaliação do escoamento com mudança de direção acentuada com raio, com o intuito de comparar diferentes modelos computacionais tridimensionais.

Para tal, realiza-se um experimento com modelo físico de modo a comparar os resultados de laboratório com os obtidos nas simulações com os diferentes modelos computacionais.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos na pesquisa citada. As imagens representam a distribuição das velocidades em dois planos horizontais ao longo da curva, evidenciando sua tridimensionalidade. A razão  $V_R/V_i$  apresentada na imagem corresponde à razão entre a velocidade resultante no plano horizontal e a velocidade média na entrada da curva.

**Figura 3 – Vetores de velocidade (setas) e contornos  $V_R/V_i$  para os experimentos em laboratório, sendo (a) um plano horizontal na altura de 0,5cm a partir do fundo do canal e (b) na altura de 10,5cm a partir do fundo do canal.**



Fonte: Adaptado de Ramamurthy *et al.* (2013).

Os autores observaram que, no fundo do canal, o fluxo move na direção do raio interno e apresenta maior velocidade lateral, enquanto próximo à superfície, o escoamento se move na direção do raio externo. Isso mostra que as linhas de fluxo no escoamento são tridimensionais, conforme citado por Thandveswara, Seetharamiah (1971).

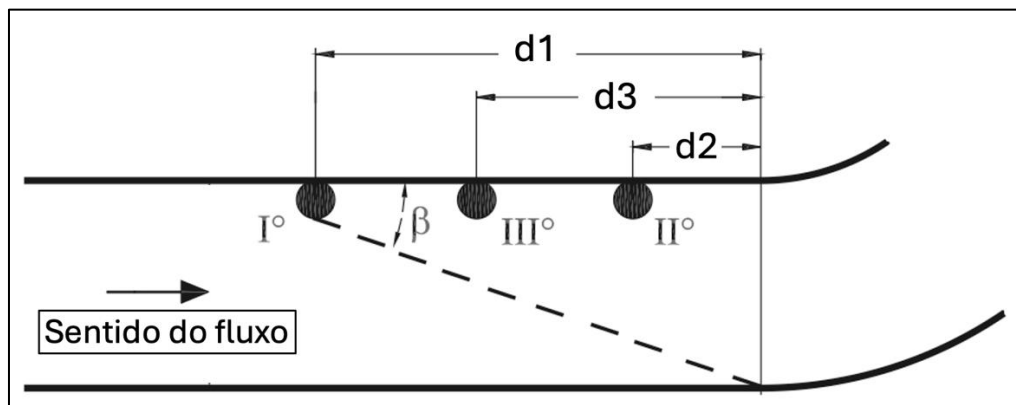
No plano horizontal próximo à superfície (Figura 3b), é possível identificar a zona de separação do escoamento. Os experimentos também mostraram que a variação da superfície do escoamento entre a parede interna e externa da curva foi de aproximadamente 16,5% da profundidade média observada.

Beltrami *et al.* (2007) avaliaram as perturbações causadas por curvaturas em canais, buscando propor formas de amenizá-las. Os autores dividem as técnicas de inibição de formação e persistência de padrões oscilatórios causados por curvaturas em dois grupos: tratamento de causa (agir na causa da perturbação) e tratamento de interferência (introduzir perturbações similares, opostas em fase àquelas causadas pela curva).

Ainda segundo Beltrami *et al.* (2007), um dos fatores que influencia as perturbações causadas por curvas com raio ao longo de um canal é a chamada curvatura adimensional, que consiste na relação entre a largura do canal e o raio de curvatura ao longo do eixo. No estudo citado, foram testadas curvaturas adimensionais entre 0,13 e 0,25.

Os autores obtiveram bons resultados na redução das perturbações causadas pela curva por meio do uso de aletas cilíndricas posicionadas na parede interna do canal a montante da curva, observando reduções de até 80% na amplitude das ondas formadas. A Figura 4 apresenta um esquema com o posicionamento das aletas, sendo  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  as distâncias entre cada uma delas e o início da curva.

**Figura 4 – Esquema das aletas cilíndricas posicionadas na parede interna do canal**



Fonte: Adaptado de Beltrami *et al.* (2007).

No contexto da mineração, sobretudo quando se trata de estruturas que compõem sistemas de drenagem superficial de pilhas de estéril/rejeito ou cavas, muitas vezes não é possível projetar curvas com raio por questões executivas, como restrições de terraplenagem e/ou espaço disponível.

Isso se deve ao fato de que quanto mais suaves os raios, menores as perturbações observadas no escoamento, entretanto, é necessário mais espaço físico para a implantação de curvas com grandes raios. Por essa razão, frequentemente opta-se por mudanças de direção sem raio ou caixas de passagem.

Caixas de passagem são utilizadas para auxiliar na absorção das perdas de carga decorrentes de mudanças de direção de fluxo (PINHEIRO, 2011), evitando que o escoamento transborde as paredes das estruturas no ponto de mudança de direção. Ainda segundo Pinheiro (2011), sua implantação deve ser realizada em seções onde ocorrem mudanças de direção ou junções de fluxos. Contudo, vale ressaltar que nem sempre há espaço suficiente para implantação de caixas de passagem, visto que são estruturas que normalmente requerem mais espaço do que uma simples mudança de direção.

O autor traz como referência de dimensionamento as equações de pequenos e grandes orifícios, associando as seções de saída das caixas de passagem a tubulações funcionando como orifícios. Entretanto, a seção de saída pode não configurar esse tipo de funcionamento hidráulico, fazendo com que as equações adotadas não sejam representativas, podendo levar a inconsistências no projeto ou superdimensionamento.

### 3.3.2 Curvas horizontais sem raio (deflexões)

A quantidade de pesquisas ou trabalhos que abordam mudanças de direção sem raio é relativamente limitada, quando comparada com curvas horizontais com raio ou outros fenômenos associados a escoamentos livres. Essa limitação é ainda mais evidente se tratando de estudos com foco em borda livre no ponto de deflexão, para escoamentos supercríticos.

A seguir, estão apresentadas algumas pesquisas/trabalhos, elaborados por diferentes autores, que abordam escoamentos livres com mudança de direção sem raio, com raio pequeno, ou com raio somente na parede externa.

Pode-se observar que as pesquisas apresentam algumas diferenças em relação ao fenômeno abordado no presente trabalho, sejam elas as condições de regime de escoamento (subcrítico), enfoque em parâmetros diferentes da borda livre, como formação de zona de separação e distribuição de velocidades, limitações de aplicabilidade ou diferenças geométricas, com a presença de raio, por menores que sejam.

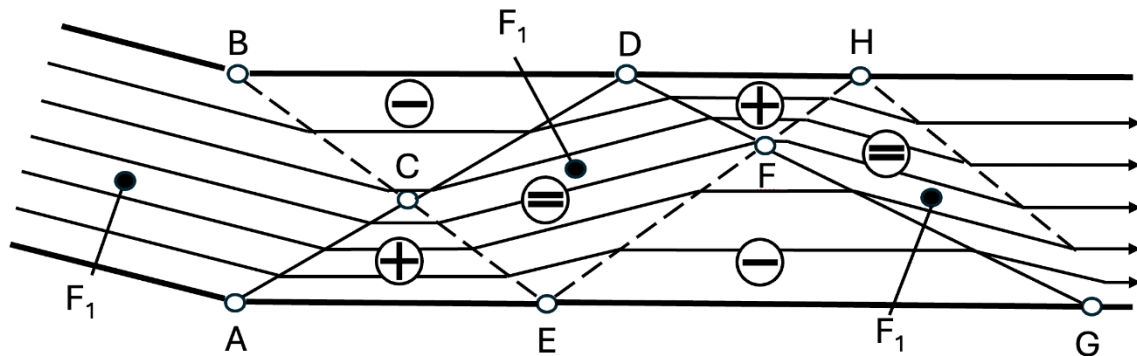
Entretanto, apesar desses pontos de atenção, esses trabalhos auxiliam na consolidação do conhecimento relacionado ao fenômeno estudado e permitem traçar algumas expectativas em relação ao comportamento do escoamento em deflexões.

Hager (1992) apresenta uma avaliação das perturbações na superfície do escoamento, resultantes de obstáculos como deflexões em canais. As perturbações ocorrem na forma de ondas, denominadas *cross-waves*, ou ondas transversais, em tradução livre. A sobrelevação no escoamento associada a essas perturbações demanda borda livre adicional no dimensionamento da estrutura.

O autor apresenta uma avaliação no padrão das perturbações de ondas transversais em um canal com uma deflexão em um ângulo  $\theta$  (Figura 5). Conforme pode ser observado na imagem citada, o escoamento no canal pode ser dividido em zonas, que representam a direção das linhas de fluxo e as áreas nas quais as profundidades aumentam ou diminuem, no canal de jusante.

As regiões marcadas com o sinal positivo indicam um aumento na profundidade de escoamento, enquanto as regiões com o sinal negativo indicam uma diminuição na profundidade. O sinal de “igual” indica que as características de número de Froude e profundidade são iguais àquelas a montante da deflexão, tendo como diferença apenas a direção das linhas de fluxo.

Figura 5 – Representação esquemática dos efeitos de uma deflexão sem raio no escoamento em um canal de largura finita (vista em planta)



Fonte: Adaptado de Hager (1992).

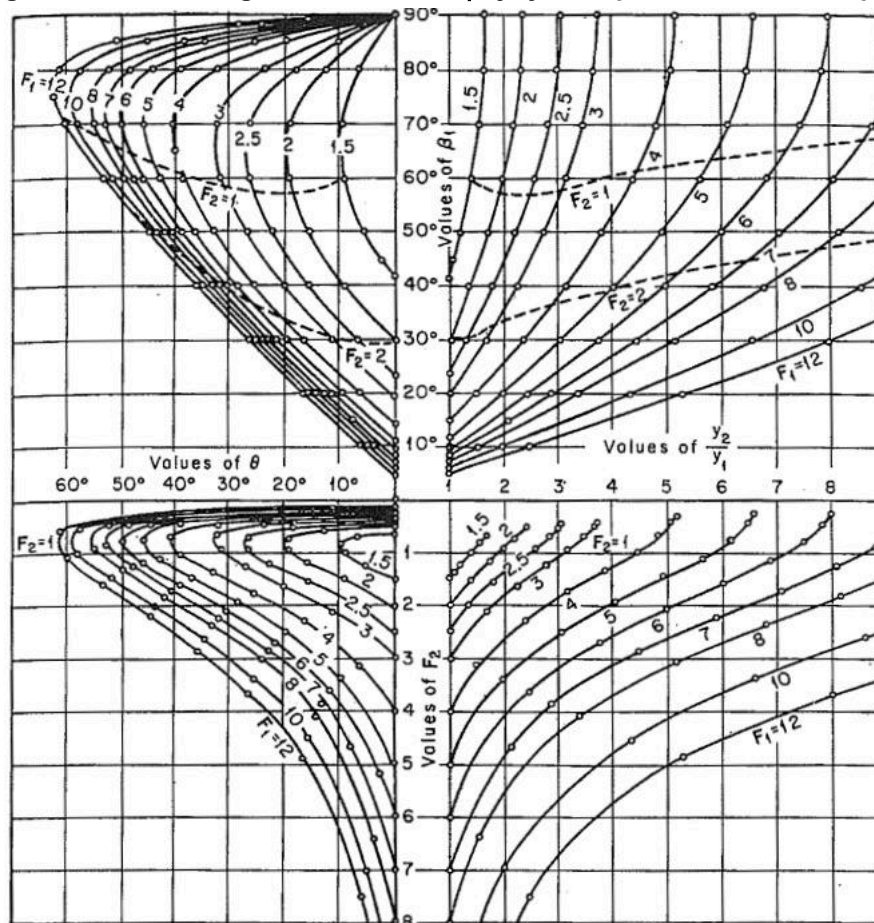
As interferências entre as ondas geradas também criam regiões em que as características são semelhantes às de montante, como é o caso da área CDEF.

Chow *et al.* (1988) também apresentam uma avaliação sobre o tema, denominando-o ressalto oblíquo. Essa nomenclatura está associada ao fato de que o fenômeno se assemelha a um ressalto hidráulico, porém acontece ao longo de uma seção perpendicular à onda transversal, que faz um ângulo  $\beta$  com o sentido do escoamento.

Os autores apresentam a Equação (9), que permite computar o valor de  $\beta$  (ângulo entre o sentido do escoamento e a onda transversal) a partir de  $Fr_1$  e  $\theta$ . Entretanto, a Equação (9), não pode ser resolvida diretamente: para tal, pode-se utilizar o Ábaco de Ippen (IPPEN, 1951 apud CHOW *et al.*, 1988), apresentado na Figura 6.

$$\tan \theta = \frac{\tan \beta \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2 \beta} - 3 \right)}{2 \tan^2 \beta + \sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2 \beta} - 1} \quad (9)$$

Figura 6 – Relações gerais entre  $F_1$ ,  $\theta$ ,  $\beta$ ,  $y_2/y_1$  e  $F_2$  para ressalto oblíquos



Fonte: Adaptado de Chow *et al.* (1988).

Han *et al.* (2011) apresentam uma avaliação de mudança de direção em  $90^\circ$ , considerando a presença ou não de aletas, “*vanes*”, também conhecidas como guias. Esses dispositivos também são explorados por Azevedo Netto e Fernández (2015); entretanto, no contexto da mineração no Brasil, eles não são amplamente utilizados. Além de questões relacionadas à celeridade executiva, a adoção de aletas pode não ser tão eficiente devido ao fato de que as águas pluviais em áreas de minas normalmente carregam uma quantidade considerável de sedimentos, elevando o potencial de assoreamento da estrutura.

Barata (2018) apresenta uma avaliação de mudança de direção com o uso de modelo experimental, consistindo no estudo de deflexões de  $90^\circ$  e  $45^\circ$ , localizadas imediatamente a jusante de uma descida de água, simulando uma caixa de passagem.

A abordagem utilizada consistiu no uso da equação de energia específica para buscar obter uma relação entre as profundidades de entrada e máxima ao longo da deflexão, utilizando a simplificação de que toda a energia do escoamento seria convertida em energia de posição no ponto em que o escoamento atinge a parede da mudança de direção, que simula uma caixa de passagem.

Após as comparações entre os valores, obteve-se a relação de que aproximadamente 80% da energia total do escoamento de entrada seria manifestada na forma de energia de posição (carga) na parede da mudança, para deflexões de 90°.

A Figura 7 apresenta o modelo utilizado na pesquisa citada, na configuração de deflexão de 90°.

**Figura 7 – Modelo experimental na configuração de deflexão de 90°**



Fonte: Barata (2018).

Yu *et al.* (2008) apresentam um estudo de caso de um incidente ocorrido em uma área urbana de Hong Kong, no qual utilizam um modelo reduzido em escala 1:16 para investigar as causas do ocorrido e melhor compreender o comportamento do escoamento na condição de mudança de direção em descida de água.

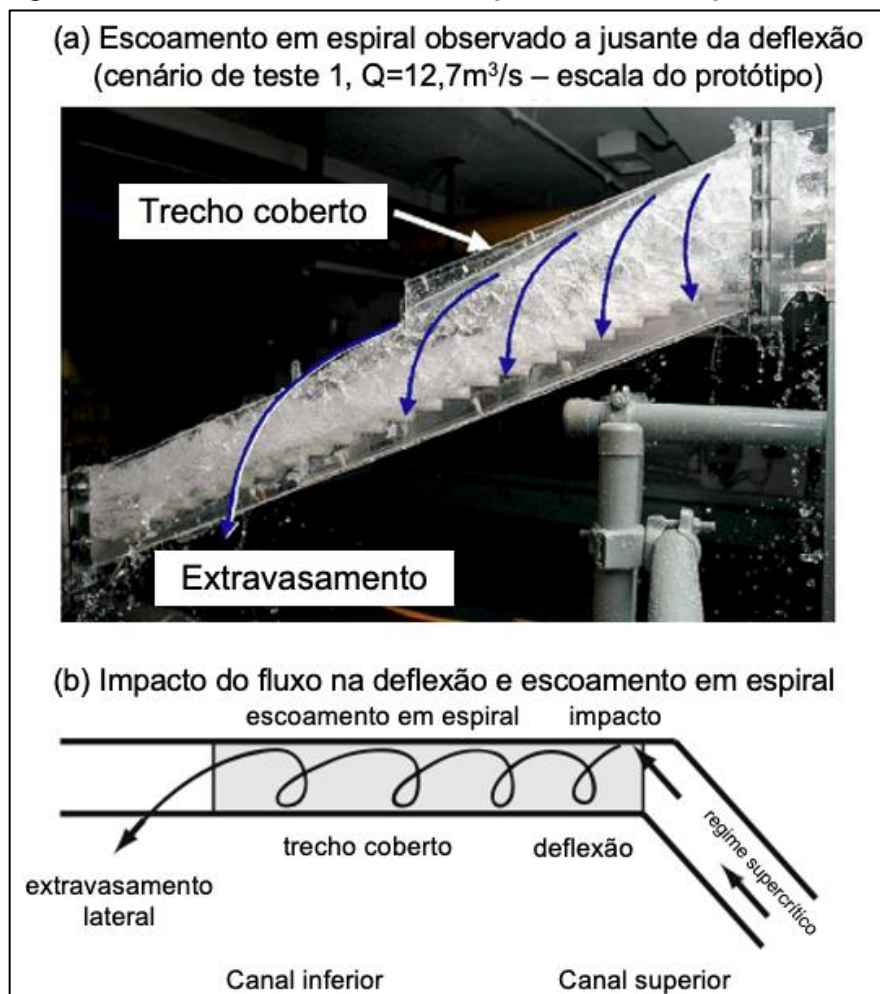
O canal apresenta uma deflexão coberta de 48° e contém grades de retenção de resíduos, para evitar que detritos entrem na estrutura e causem entupimentos ou

danos. Os autores estudam as influências das grades e da deflexão no escoamento, buscando isolar os efeitos causados por cada elemento.

Os experimentos mostraram que o escoamento é suave e uniforme a montante da deflexão, formando uma curva S2 típica até atingir a mudança de direção. A partir desse ponto, o escoamento colide com a parede externa do canal com velocidade alta e apresenta a tendência de transbordar a estrutura.

Contudo, como esse trecho possui uma cobertura, o fluxo fica confinado e forma um padrão espiral de escoamento, conforme apresentado na Figura 8. Esse comportamento se mantém ao longo de todo o trecho tampado até o extravasamento, após a cobertura.

**Figura 8 – Transbordamento e fluxo espiral ocorrendo após a deflexão**

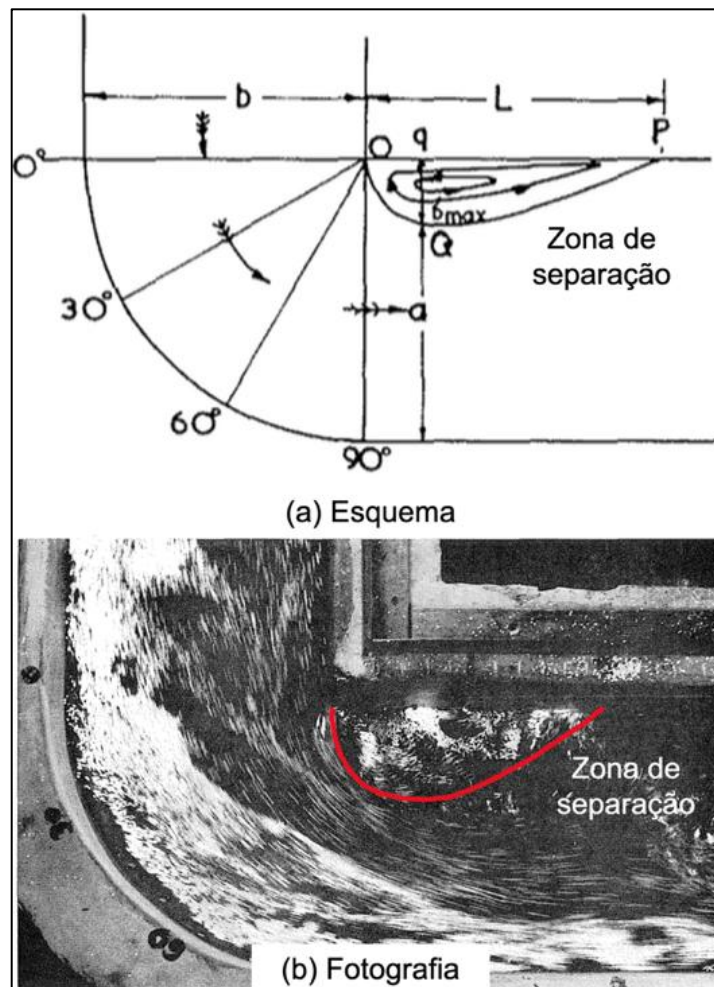


Fonte: Adaptado de Yu *et al.* (2008).

Os autores concluem que a maior parte do transbordamento do escoamento no canal se deve às características geométricas das grades de retenção de detritos e seu posicionamento, associando esses fatores como as causas do ocorrido em Hong Kong. Entretanto, os testes deixaram claro que a deflexão também causou transbordamento e é um ponto de atenção quando do dimensionamento e avaliação de estruturas de drenagem, sobretudo se tratando de declividades longitudinais acentuadas.

Thandveswara, Seetharamiah (1971) apresentam uma avaliação do escoamento subcrítico ao longo de uma mudança de direção em  $90^\circ$ , com raio de curvatura em torno de 15 cm em um canal de 30 cm de largura, com trechos retos antes e depois da curva. A Figura 9 apresenta o canal estudado pelos autores citados.

**Figura 9 – Visão em planta e seção do fenômeno de separação de fluxo ao longo de uma mudança de direção em  $90^\circ$  com raio.**



Fonte: Adaptado de Thandveswara, Seetharamiah (1971).

Dentre as características do fluxo avaliadas no estudo, destaca-se o fenômeno da formação de uma zona de separação do escoamento, que acontece logo após a mudança de direção, apresentada esquematicamente na Figura 9(a) e fotograficamente na Figura 9(b).

Segundo os autores, a zona de separação contribui para a perda de carga do escoamento na curva e suas características variam de acordo com o número de Reynolds e o número de Froude.

Outra conclusão do estudo consiste no fato de que, quando o número de Froude ( $Fr$ ) a montante da deflexão é superior a 0,32 (estando ainda em regime subcrítico, ou seja,  $0,32 < Fr < 1$ ), a zona de separação gera uma contração no escoamento que é suficiente para fazer com que o regime se torne supercrítico. Imediatamente a jusante, o fluxo se expande novamente, retornando para o regime subcrítico por meio de um ressalto hidráulico.

Esse ressalto é acompanhado pela formação de ondas transversais, ou ondas de choque, conforme pode ser observado na Figura 10, que apresenta a visão superior do escoamento, se assemelhando ao padrão de ondas observado por Hager (1992), Figura 5.

**Figura 10 – Formação de ressalto hidráulico e de ondas transversais, ou ondas de choque, a jusante da deflexão –  $Fr = 0,3395$**



Fonte: Thandveswara, Seetharamiah (1971).

### 3.4 Avaliação de escoamento por meio de análise de vídeo

No contexto da modelagem experimental, a medição dos parâmetros de interesse é de suma importância nos experimentos de laboratório. Existem várias técnicas de medição, podendo ser intrusivas ou não intrusivas, a depender da perturbação causada no escoamento. Jensen (2004) chama atenção de algumas dificuldades associadas ao uso de métodos intrusivos de medição, incluindo a dificuldade de medição em escoamentos com alta turbulência e formação de vórtices.

Considerando a natureza do fenômeno a ser estudado no presente trabalho, por se tratar de uma singularidade que pode causar muita turbulência, com grandes variações de profundidade, velocidade e direção, optou-se pela busca de uma solução não intrusiva para a medição da profundidade.

Dentre os métodos não intrusivos de medição, destaca-se a anemometria laser Doppler (LDA, do inglês *Laser Doppler Anemometry*), também conhecida como velocimetria laser Doppler (LDV, *Laser Doppler Velocimetry*). Esse método de medição de velocidade foi aplicado pela primeira vez, de forma simplificada, por Yeh e Cummins (1964), tendo sido melhorado com a adição de configurações alternativas que otimizaram o processo de medição, até atingir o formato dos sistemas LDA modernos no final da década de 1960 (TAVEIRA-PINTO *et al.*, 2008). No entanto, esse tipo de sistema de medição tem problemas de reflexão quando o escoamento possui bolhas, tornando inviável a utilização do LDA.

Outro método não intrusivo de medição conhecido é a velocimetria por imagem de partículas (PIV, do inglês *Particle Imaging Velocimetry*) e consiste, de forma simplificada, na observação do deslocamento de partículas em imagens sucessivas para calcular a velocidade do fluido (DI CRISTO, 2011). A técnica foi referenciada pela primeira vez na literatura na década de 80 (ADRIAN, 2005) e vem sendo aperfeiçoada e suas aplicações ampliadas desde então.

Apesar dos bons desempenhos das técnicas citadas, os autores mencionam o custo como um obstáculo para a sua aplicação. Considerando a limitação dos recursos financeiros disponíveis para a presente pesquisa, optou-se pelo uso da análise de vídeo para as medições realizadas nos experimentos.

Os avanços na tecnologia de câmeras, associadas ao uso de visão computacional, contribuíram para que a análise de vídeo se tornasse uma das principais ferramentas utilizadas no estudo da dinâmica de fluidos (ZNAMENSKAYA *et al.*, 2021).

Ljubičić e Ivetić (2023) utilizam a análise de vídeo para medir as vazões em rios naturais e canais artificiais, com vazões de até 1.000m<sup>3</sup>/s, observando boa concordância com os valores de referência. Outro exemplo consiste no uso de estereoscopia por vídeo para medir o perfil 3D da superfície da água e as velocidades de fluxo associadas a um evento de rompimento de barragem em modelo reduzido (EAKET *et al.*, 2005).

Ribeiro (2018) apresenta o uso da análise de vídeo por meio do *software* Kinovea, normalmente utilizado para o monitoramento e análise de práticas esportivas, aplicado à avaliação de escoamento em degraus. Barata (2018) apresenta uma análise semelhante aplicada a uma estrutura de mudança de direção, utilizando o mesmo *software*.

Ribeiro (2023) aprimorou o processo de avaliação do escoamento por análise de imagens a partir do desenvolvimento de um método cujo princípio de funcionamento se dá a partir da linguagem Python, com a utilização da biblioteca OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*), desenvolvida originalmente pela *Intel*.

A biblioteca abrange mais de 2.500 algoritmos de visão computacional. Ribeiro (2023) optou pela utilização do algoritmo proposto por Canny (1986), que é capaz de identificar as bordas principais de uma imagem, de modo a delimitar o escoamento em cada quadro da filmagem.

O Autor disponibilizou a ferramenta para avaliação em novas pesquisas na área, batizando-a de CPH-ViFA (Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos – *Video Flow Analysis*).

O uso do código citado na presente pesquisa foi avaliado, entretanto, optou-se pelo desenvolvimento de uma nova ferramenta, conforme detalhado no item 4.5.

## 4 METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho foi avaliado o escoamento livre em mudança de direção, com o auxílio de modelo físico experimental, buscando melhor caracterizar o fluxo nesse tipo de singularidade. Foram utilizadas diferentes configurações de geometria buscando analisar o escoamento com diferentes condições de contorno.

A seguir serão apresentados os principais aspectos referentes à metodologia para realização dos testes.

### 4.1 Aparato experimental

O modelo experimental foi construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas, CPH, na UFMG. A estrutura consiste em um canal de acrílico com largura constante de 15cm e altura variável de 25cm a 35cm, com um trecho com alta declividade e perfil longitudinal em degraus conectado a um trecho liso, imediatamente a jusante. Os degraus possuem 5cm de altura e 10cm de comprimento de patamar, ou seja, a declividade do canal nesse trecho é de 2,0H:1,0V.

O modelo é alimentado por um sistema de bomba e tubulação de recalque, controlado por um inversor de frequência. A montante da descida, para receber o escoamento da tubulação de recalque, existe uma caixa tranquilizadora, preenchida com material rochoso para suavizar o fluxo de aproximação da descida.

A parte inicial do trecho liso possui 25cm de altura de paredes, assim como a descida. Os 40cm finais possuem altura de 35cm, por estarem mais próximos ao trecho de mudança de direção. Optou-se por uma altura de paredes superior para minimizar a probabilidade de ocorrência de extravasamentos/respingos excessivos na região da deflexão, devido às perturbações causadas no escoamento, garantindo a observação adequada ao fenômeno estudado.

Além do canal em acrílico, também foi necessário construir um suporte de metal para possibilitar o posicionamento da estrutura sobre o reservatório. A conexão entre as peças do canal foi realizada utilizando grampos tipo C e a vedação nas juntas foi realizada com o uso de silicone. Essa montagem possibilita que as geometrias sejam

mais facilmente alteradas do que se as peças fossem parafusadas, garantindo maior celeridade na realização dos experimentos.

O trecho em degraus, de alta declividade (50%), tem a função de induzir o escoamento a montante da deflexão a ocorrer no regime supercrítico, se a vazão for alta o suficiente. Em situações práticas de sistemas de drenagem superficial de pilhas de estéril ou estruturas similares, as declividades longitudinais dos canais normalmente são superiores às críticas, levando ao regime de escoamento supercrítico.

O trecho liso a jusante da descida em degraus possui declividade de aproximadamente 0,31%. Essa condição resultou das restrições impostas pela compatibilização das peças do canal e do seu suporte com o posicionamento sobre o reservatório. Para escoamento em profundidade normal, essa declividade estaria associada ao regime subcrítico, entretanto, com a manutenção do trecho de alta declividade, não é necessário ter altas declividades a jusante para manter o regime torrencial. Isso ocorre pois não há elementos que forcem a ocorrência de ressalto hidráulico antes da deflexão, como uma soleira, por exemplo.

A Tabela 1, apresenta as diferentes configurações geométricas que foram testadas no trabalho. A Figura 11 apresenta o modelo experimental, na configuração 90° - B. Nessa figura também é possível observar as peças do suporte de metal, utilizadas para posicionar a estrutura sobre o reservatório.

**Tabela 1 – Configurações geométricas a serem construídas e testadas**

Configuração	Ângulo (°)	Condição de montante	Condição de jusante
A	45	Liso	Liso
B		Degrau	Liso
C		Degrau	Soleira
D		Liso	Degrau
A	60	Liso	Liso
B		Degrau	Liso
C		Degrau	Soleira
D		Liso	Degrau
A	90	Liso	Liso
B		Degrau	Liso
C		Degrau	Soleira
D		Liso	Degrau

Fonte: Autor (2025).

Figura 11 – Modelo experimental utilizado no presente trabalho – Configuração 90° - B.



Fonte: Autor (2025).

A razão pela qual optou-se pelo ângulo de deflexão de 90° é o fato de ele ser muito comum no contexto de sistemas de drenagem em mineração, normalmente estando presente em drenagens de pátios, canais periféricos de pilhas e, sobretudo, em estruturas de transposição de acessos, que precisam receber contribuições de canais nos bordos desses acessos e conduzi-las ao outro lado, por exemplo.

Outra razão para a escolha do ângulo de 90° é o fato de ele trazer um grande impacto no comportamento do escoamento: a expectativa é de que quanto maior o ângulo de deflexão, mais acentuadas tendam a ser as perturbações no escoamento no ponto da mudança de direção.

Apesar de deflexões em 90° serem relativamente comuns, a grande variabilidade de questões executivas que levam à adoção de mudanças de direção nos canais faz com que os ângulos dessas deflexões também variem muito. Dentre essas questões, pode-se destacar fatores como falta de espaço físico, restrições de terraplenagem e interferências com outras estruturas.

Normalmente, cada situação é avaliada de forma independente, buscando a melhor solução de projeto para cada caso. Muitas vezes, não é possível prever a solução em projeto, sendo necessário que os ajustes sejam feitos em campo, a partir de cada situação específica.

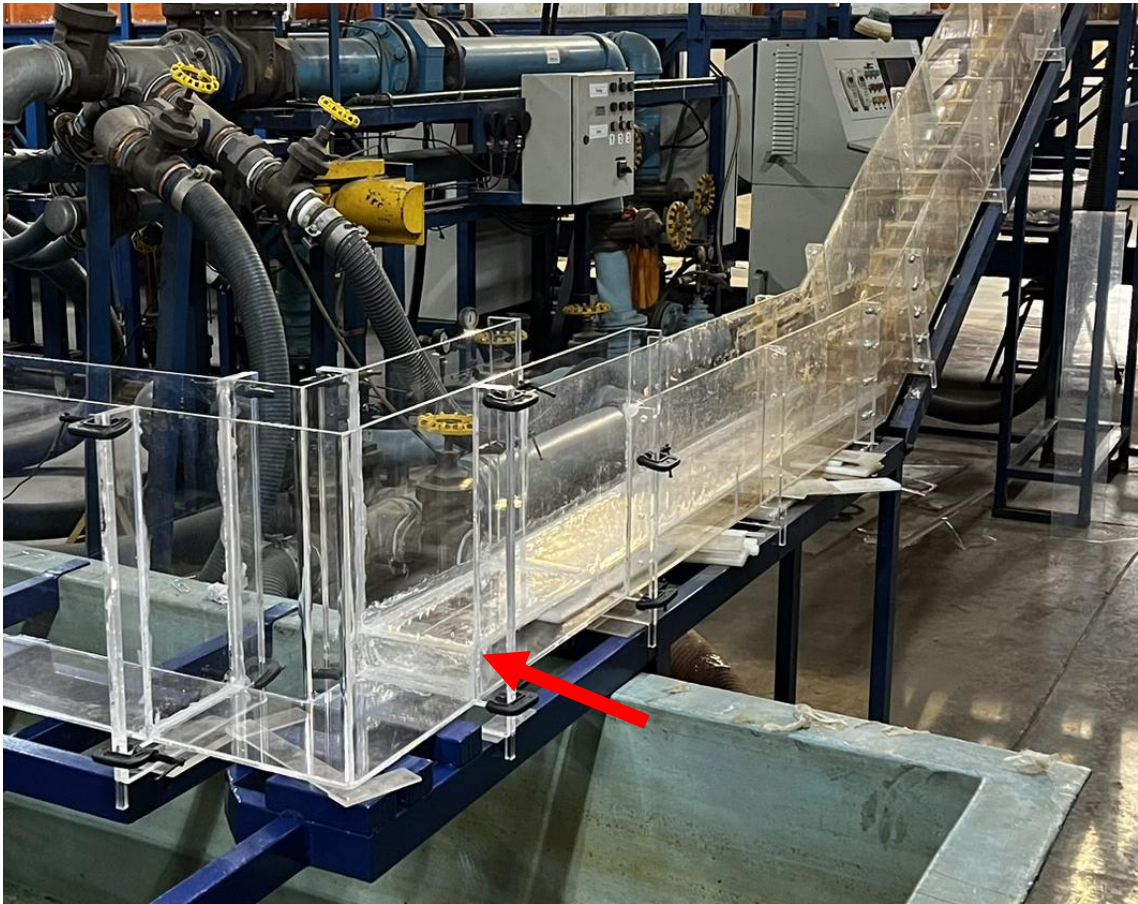
Diante do exposto, optou-se pelos ângulos de 45° e 60°, além do de 90°, para cobrir um espectro maior de variações acentuadas e buscar relacionar o comportamento do escoamento entre as diferentes geometrias testadas.

No que diz respeito às condições de montante e jusante, optou-se por testar variações de configurações de degraus, para avaliar a hipótese de que a borda livre resultante em deflexões pode ser substancialmente impactada com o uso de degraus e/ou soleiras. Para tal, trabalhou-se com fundos falsos que permitem criar desníveis na entrada e saída da deflexão, conforme pode ser observado na Figura 12.

A Figura 13 apresenta uma representação esquemática do modelo, com vistas em planta, perfil e seção típica. Na Figura 14, estão apresentadas as vistas em planta das deflexões em 45° e 60° e, na Figura 15, são apresentadas vistas isométricas das deflexões para os três ângulos testados.

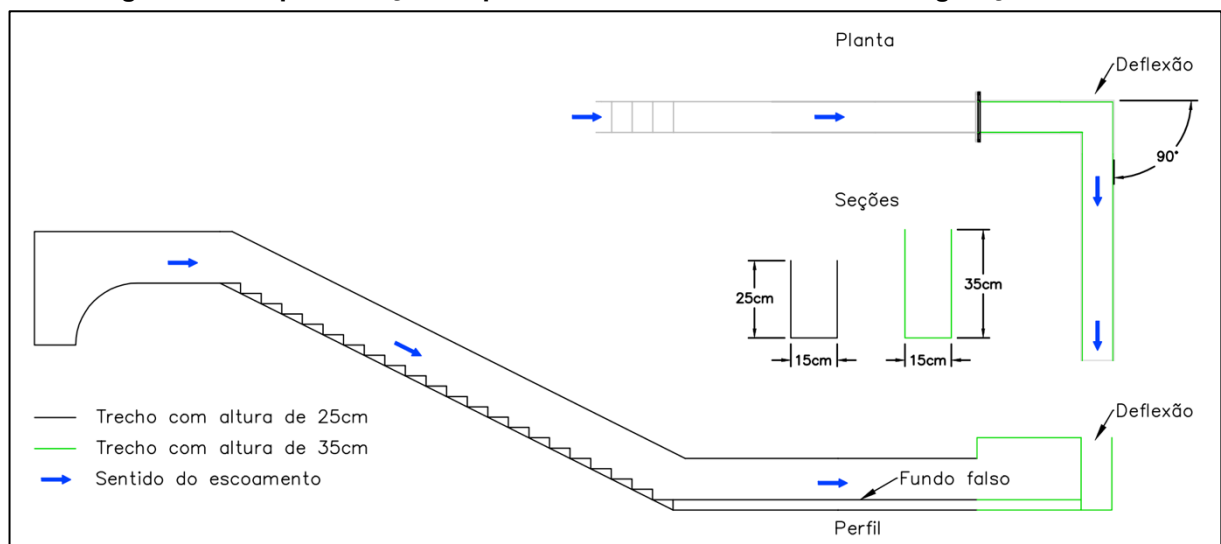
Por fim, a Figura 16 apresenta os perfis longitudinais do modelo para as quatro geometrias testadas.

**Figura 12 – Detalhe do desnível criado com o auxílio de fundos falsos**



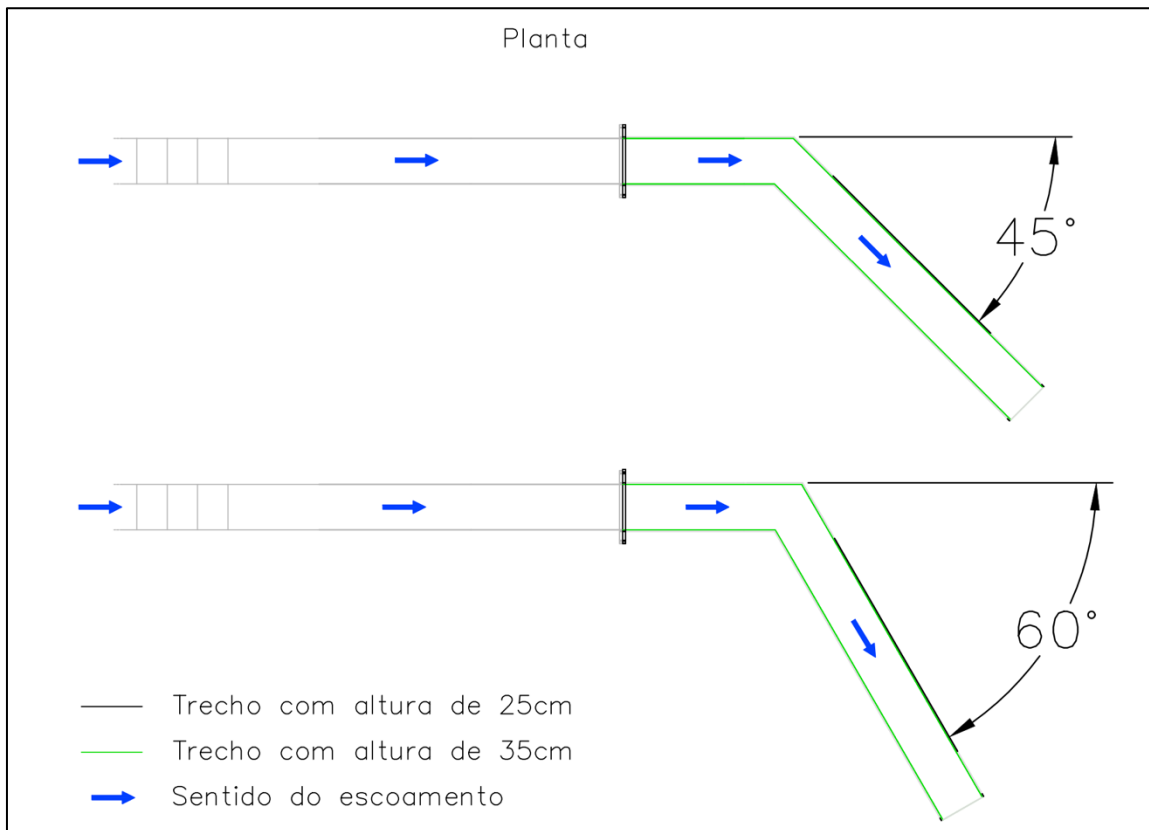
Fonte: Autor (2025).

**Figura 13 – Representação esquemática do modelo físico na configuração 90° - B**



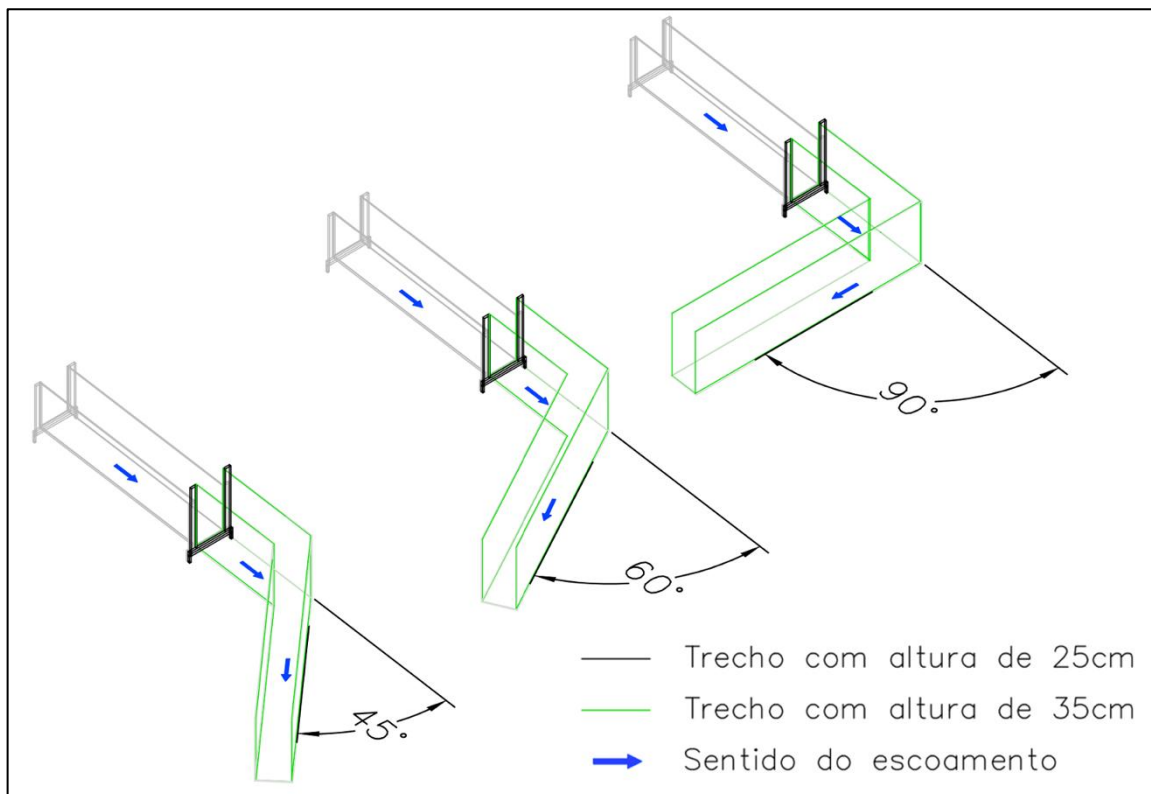
Fonte: Autor (2025).

**Figura 14 – Vistas em planta do modelo com as deflexões de 45° e 60°.**



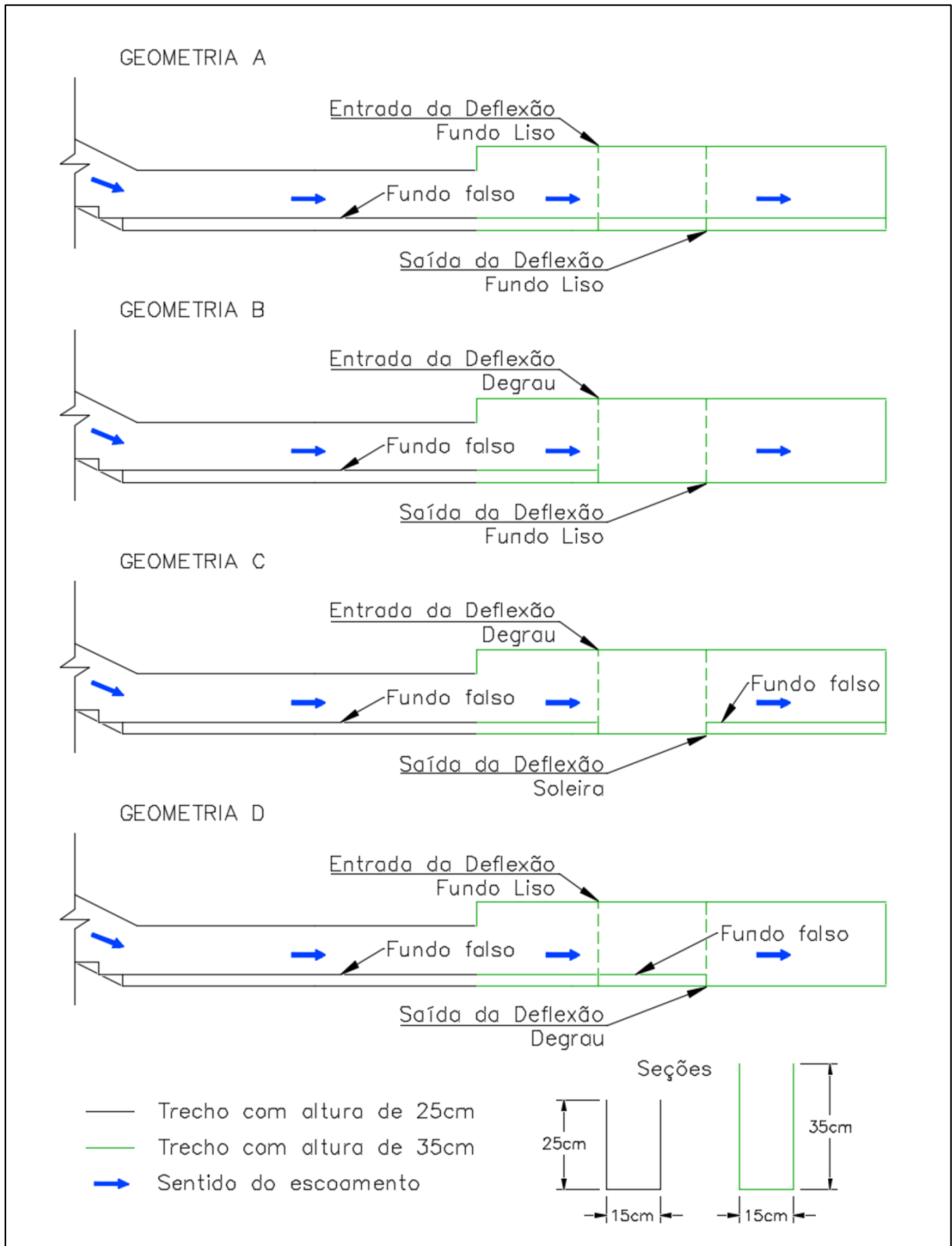
Fonte: Autor (2025).

**Figura 15 – Vistas isométricas do modelo com os três ângulos de deflexão estudados.**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 16 – Perfis longitudinais do modelo para as quatro geometrias testadas**



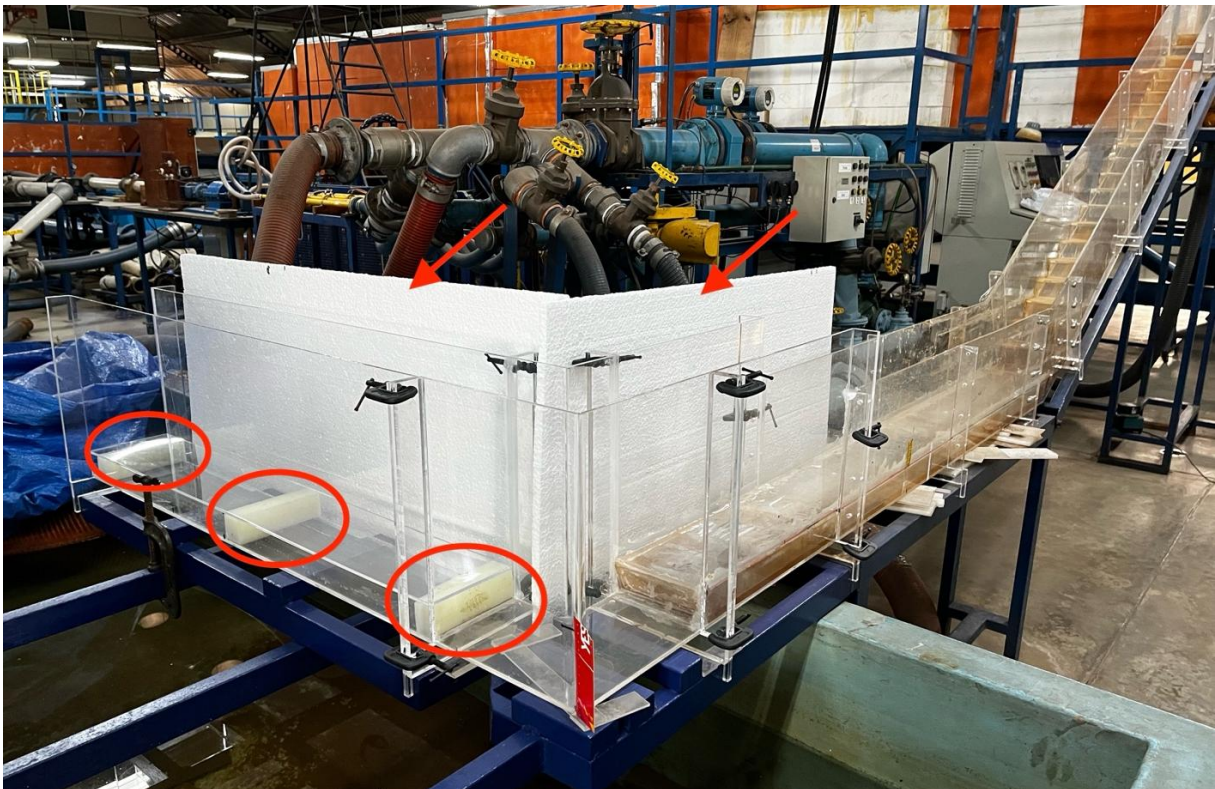
Fonte: Autor (2025).

Foram posicionadas placas de isopor (identificadas pelas setas na Figura 17) ao lado do canal (no lado oposto ao da câmara em cada teste), com o intuito de criar um fundo

branco para melhorar as condições de visualização do escoamento nas filmagens. Para apoio do fundo falso de jusante, que precisou ser inserido e removido do modelo diversas vezes para formar as diferentes configurações geométricas, foram utilizados blocos de nylon cortados sob medida (identificados pelas elipses na Figura 17).

Vale ressaltar que, apesar de a Figura 17 apresentar a configuração geométrica 90° - C, as medidas citadas foram adotadas, de forma análoga, nas demais configurações.

**Figura 17 – Detalhes das placas de isopor e dos blocos de nylon utilizados para apoio do fundo falso**



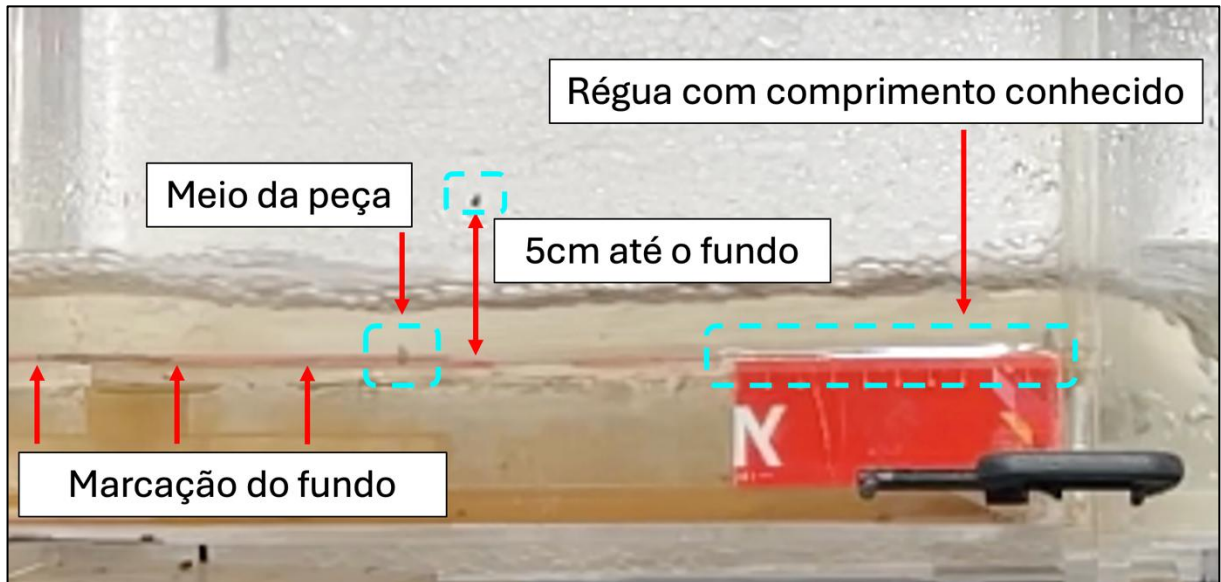
Fonte: Autor (2025).

No fundo falso localizado a montante da deflexão, utilizou-se silicone para a vedação e clorofórmio para fixação. Já no caso da peça de jusante, devido à necessidade constante de adequação conforme as configurações geométricas, optou-se pelo uso da fita adesiva para a fixação do fundo falso e blocos de nylon.

Ao longo de vários trechos do canal, tanto a montante quanto a jusante, para todas as geometrias, foram realizadas marcações no acrílico em pontos de interesse para auxiliar na avaliação das filmagens, servindo como referências de comprimentos e

alturas. Alguns exemplos dessas marcações estão apresentados na Figura 18, a seguir.

**Figura 18 – Detalhes de algumas marcações realizadas para auxiliar na avaliação das filmagens**



Fonte: Autor (2025).

Conforme pode ser observado, o fundo falso foi marcado para melhor definir o fundo do canal (correspondente à profundidade  $Y=0$ ) e facilitar a identificação nos vídeos. Régua de 10 centímetros de comprimento foram utilizadas para referenciar uma dimensão conhecida e subsidiar a definição da escala entre centímetros e *pixels*. Uma marcação no meio da última peça do trecho liso identifica o ponto localizado 20 centímetros a montante da entrada da deflexão e outra marcação identifica o ponto com altura de 5 centímetros em relação ao fundo do canal.

Além das marcações evidenciadas na Figura 18, outras foram realizadas em diferentes pontos da estrutura com objetivos análogos.

## 4.2 Filmagens

Após a montagem do modelo e preparação do experimento, os testes foram executados e filmados, possibilitando a realização das medições por análise de vídeo, após a operação do modelo. Foram realizadas ao menos duas filmagens por geometria, em duas posições diferentes, de modo a possibilitar a avaliação do

escoamento por mais de um ângulo, visto que se trata de uma mudança de direção, ou seja, o fluxo não se dá apenas em um plano.

As filmagens foram realizadas utilizando o aparelho celular iPhone 13. Esse aparelho possui um sistema de câmera dupla, conforme especificações apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Especificações técnicas do aparelho utilizado nas filmagens**

<b>Especificações</b>	<b>Detalhes</b>
Resoluções de Vídeo	4K, 1080p, 720p
Gravação de Vídeo 4K	24 fps, 25 fps, 30 fps ou 60 fps
Gravação de Vídeo 1080p (Full HD)	25 fps, 30 fps ou 60 fps
Gravação de Vídeo 720p (HD)	30 fps
Vídeo em Câmera Lenta (Slow-motion)	1080p a 120 fps ou 240 fps
Zoom Digital	Até 3x
Estabilização Óptica de Imagem para Vídeo	Sim (grande-angular)
Estabilização Cinemática de Vídeo	4K, 1080p e 720p
Vídeo com Foco Automático Contínuo	Sim
Formatos de Gravação de Vídeo	HEVC e H.264
Gravação em Estéreo	Sim

Fonte: Adaptado de Apple (2025).

A câmera foi posicionada com boa proximidade do modelo, tomando-se o cuidado de evitar aproximar demais, o que poderia fazer com que distorções ópticas da lente afetassem as imagens, sobretudo nas extremidades.

Após testes visuais no laboratório, definiu-se que um bom intervalo de distância entre o modelo e a câmera para o experimento realizado é de aproximadamente 40 a 80 centímetros, a depender da vazão e configuração geométrica testadas.

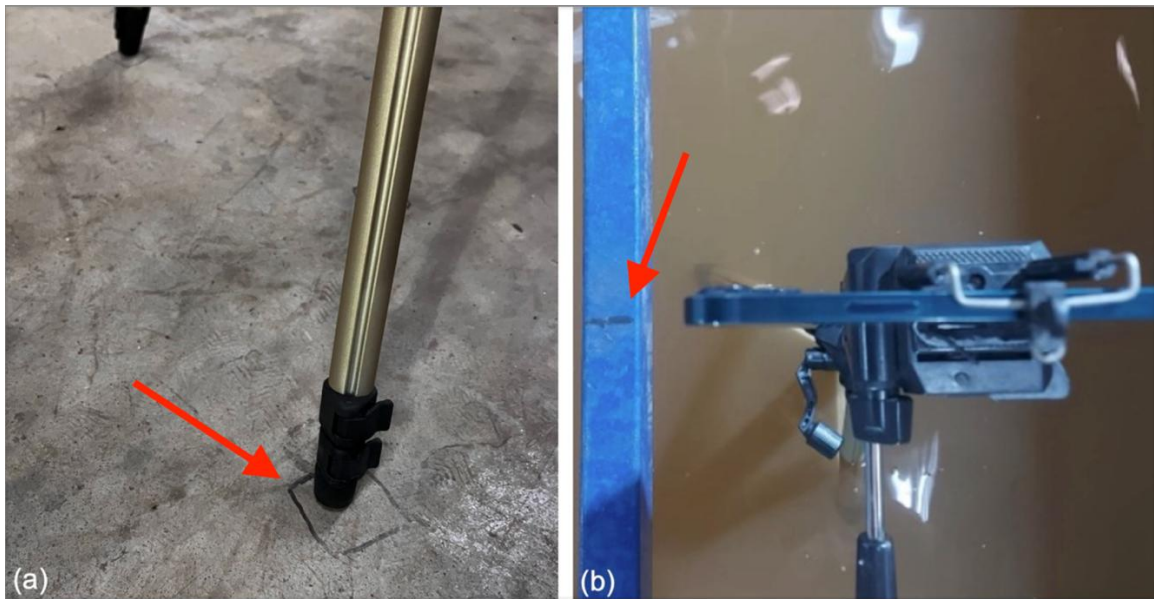
A Figura 19 apresenta o posicionamento do tripé com o aparelho celular utilizado para as filmagens, nas posições de montante e jusante. Buscando manter o posicionamento semelhante ao longo de todos os testes, foram feitas marcações no chão e no suporte de metal que foram usadas como referência para a colocação do tripé. Essas marcações estão apresentadas na Figura 20.

**Figura 19 – Posicionamento da câmera em relação ao modelo no trecho de montante (a) e no trecho de jusante (b)**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 20 – Marcações no chão (a) e no suporte (b) utilizadas como referência para o posicionamento do tripé, a montante e jusante da deflexão**



Fonte: Autor (2025).

Tomou-se o cuidado de buscar enquadramentos semelhantes nos experimentos, dentro do possível, utilizando como referência o suporte que sustenta o modelo, além do controle de nivelamento presente no aplicativo da câmera do aparelho utilizado nas filmagens. Apesar disso, foi necessário variar levemente os enquadramentos nos testes para que fosse possível englobar toda a área de interesse em cada caso, visto

que algumas geometrias e/ou vazões causam mais perturbações a montante ou a jusante (abordado nos itens 5.3 e 5.4), sendo necessário deslocar a câmera.

É importante notar que não é necessário filmar simultaneamente os ângulos de montante e jusante da deflexão, visto que se trabalhou com as profundidades médias de cada trecho do canal, definidas com base na detecção de movimento nos quadros dos vídeos, de forma independente. As profundidades médias representam a tendência geral do comportamento do escoamento, e não valores específicos para um determinado instante no tempo.

Dessa forma, é possível estabelecer relações entre os valores médios, e não necessariamente das profundidades de entrada e saída em um dado momento, simplificando o processo de realização dos testes. Mais detalhes sobre funcionamento do código serão apresentados no item 4.5.

Foram posicionados refletores a montante e a jusante da deflexão, com o intuito de aprimorar a visibilidade nas filmagens, por meio não só do aumento da visibilidade, mas, também, pelo fato de se tratar de equipamentos de corrente contínua, evitando que as filmagens em câmera lenta captassem as variações de iluminação características de luzes de corrente alternada.

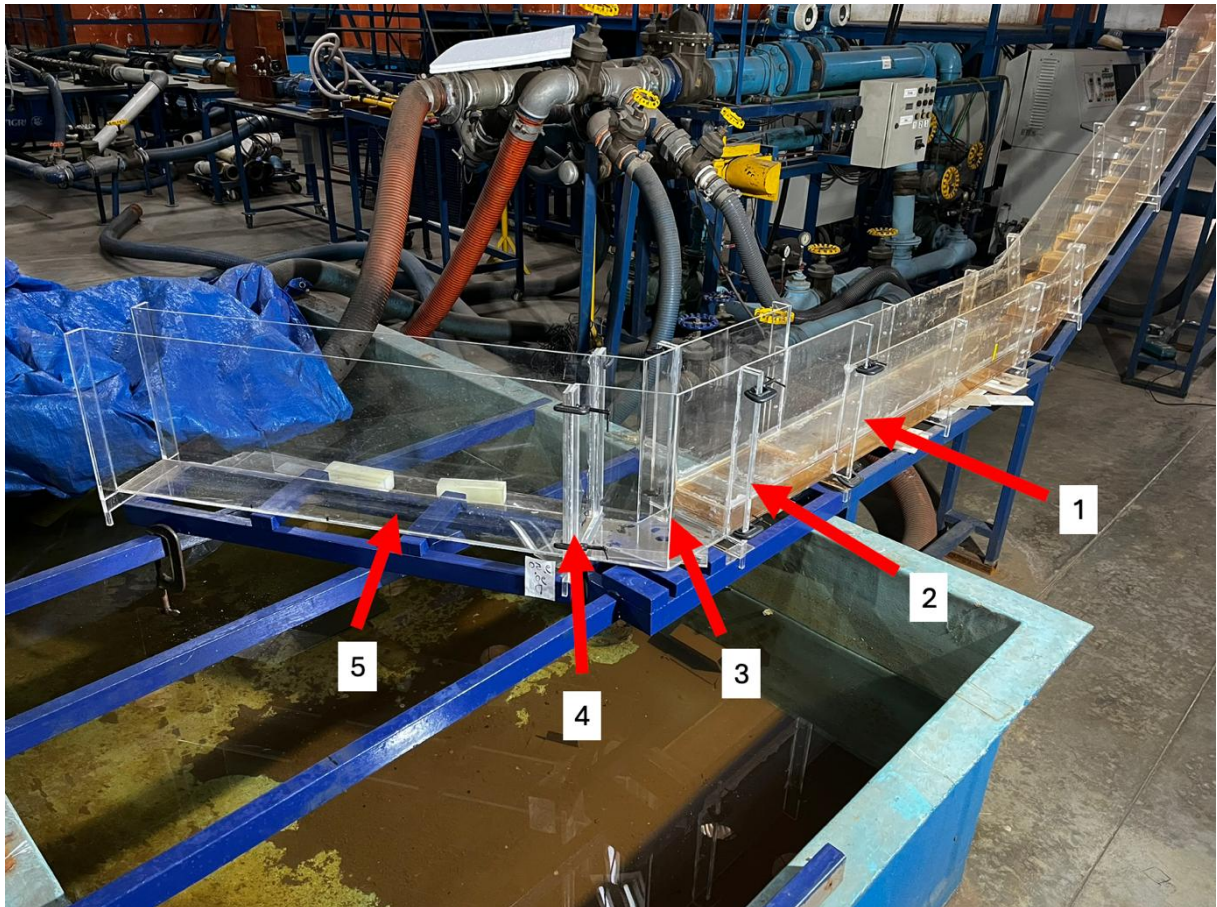
Para cada teste realizado, foram selecionados pontos de referência para a obtenção das profundidades, conforme apresentado na Figura 21. Ao todo, foram selecionados 5 pontos de interesse, sendo dispostos da seguinte forma:

- Ponto 1: a montante da deflexão, ainda no trecho reto, com perfil longitudinal liso. Nesse ponto, as perturbações causadas pelo escoamento em degrau já se dissiparam e o escoamento se dá de forma relativamente estável, com menores variações e baixa aeração, permitindo medidas mais precisas;
- Ponto 2: na entrada da deflexão, buscando a profundidade do escoamento imediatamente antes da mudança de direção;
- Ponto 3: na deflexão, de modo a obter a profundidade máxima alcançada pelo escoamento para cada configuração;

- Ponto 4: na saída da deflexão, imediatamente a jusante da mudança de direção, permitindo a observação das perturbações causadas pela deflexão, como a formação de ondas transversais;
- Ponto 5: a jusante da deflexão, com a distância variando entre 20cm e 40cm, a depender do teste, avaliando o impacto da deflexão a jusante.

As profundidades não foram medidas no trecho em degraus ou imediatamente a jusante da descida pelo fato de que, quando o escoamento chega na estrutura de mudança de direção, o fluxo já se encontra relativamente estável e sem influência significativa dos degraus.

**Figura 21 – Pontos de referência utilizados para a obtenção dos resultados**



Fonte: Autor (2025).

Apesar de os pontos de interesse estarem bem determinados na Figura 21, não é necessário que as medições sejam realizadas exatamente nos pontos definidos, que consistem apenas em referências da região de interesse a ser investigada. Dessa forma, a câmera foi posicionada de tal forma que as áreas no entorno desses pontos

estivessem visíveis na filmagem, possibilitando maior flexibilidade na obtenção dos resultados.

Essa flexibilidade é importante visto que a escolha dos pontos nos quais de fato os resultados foram extraídos variaram devido aos diferentes comportamentos do escoamento para cada vazão testada, além da qualidade dos resultados obtidos em cada teste, nas regiões do entorno dos pontos de interesse.

Ao todo, foram gerados 186 arquivos de vídeo, na configuração câmera lenta (*slow-motion*) 1080p a 240fps. A duração de gravação dos vídeos foi de aproximadamente 20 segundos, correspondendo a um vídeo em câmera lenta de aproximadamente 2 minutos e 40 segundos de duração. Inicialmente foram feitas gravações mais extensas (até 1 minuto de duração), porém os comportamentos observados foram semelhantes e o tamanho dos arquivos foi significativamente maior. Mesmo com apenas 20 segundos de gravação, cada vídeo possui um tamanho de aproximadamente 170MB (megabytes), totalizando aproximadamente 32GB (gigabytes) de arquivos de vídeo.

A especificação “1080p” se refere à resolução do vídeo, ou seja, à quantidade de *pixels* que formam cada quadro do vídeo. Quanto mais *pixels* formam esses quadros, maior o nível de detalhe contido na imagem. Dessa forma, a resolução está diretamente relacionada ao nível de detalhe do vídeo. Para cada vídeo, é definida uma escala entre *pixels* e centímetros, conforme detalhado no item 4.5.

Uma resolução 1080p corresponde a uma imagem formada por 1920 *pixels* horizontais e 1080 *pixels* verticais. Essa resolução possui um nível de detalhe bom o suficiente para a observação do escoamento no presente estudo, considerando o posicionamento adequado da câmera.

A especificação “240fps” se refere à quantidade de quadros por segundo (do inglês, *frames per second*) que são capturados pelo sensor da câmera no momento da gravação do vídeo. Para obter o efeito de câmera lenta, o vídeo é gravado a uma alta taxa de quadros, mas é reproduzido a uma taxa inferior. Nesse caso, a gravação foi

feita a 240fps e a reprodução a 30fps, ou seja, o vídeo é reproduzido a uma velocidade correspondente a 12,5% da real.

Algumas medidas foram tomadas para melhorar a qualidade e visibilidade das filmagens, como o posicionamento de placas de isopor para formar um fundo claro (Figura 17) e o posicionamento de uma placa atrás da câmera para reduzir reflexos nas paredes do canal.

### 4.3 Definição das vazões

Estruturas de drenagem superficial são dimensionadas considerando uma vazão de projeto, que normalmente está associada ao pico do hidrograma correspondente a um evento extremo.

Para canais periféricos de pilhas de estéril, por exemplo, a ABNT NBR 13.028/2017 recomenda como critério de dimensionamento um tempo de retorno (TR) de 500 anos, ou seja, um evento com chance de ocorrência de  $1/500 = 0,2\%$  em um dado ano. Contudo, essas estruturas também são submetidas a vazões muito inferiores, associadas a eventos mais rotineiros, com TR de 2 ou 5 anos.

Dessa forma, definiu-se por realizar os testes considerando várias vazões, com o intuito de observar o comportamento do escoamento em diferentes níveis de solicitação da estrutura.

Com o objetivo de definir uma faixa de vazões para serem testadas, estabeleceu-se um valor de referência. Esse valor foi determinado com base no princípio de geometria de máxima eficiência, ou seja, a geometria que leva à necessidade do menor canal para uma dada vazão, para determinadas declividade e rugosidade (FOX *et al.*, 2010).

Ainda segundo Fox *et al.* (2010), para um canal retangular de largura de base  $b$  e profundidade normal de escoamento  $y_n$ , a seção transversal ótima é tal que  $b = 2y_n$ , ou seja, a profundidade normal corresponde à metade da largura.

Um protótipo hipotético correspondente ao modelo experimental avaliado no presente trabalho, supondo uma escala geométrica de 1:10, consistiria em um canal com

revestimento em concreto com 1,50m de largura de base, configuração muito comum em sistemas de drenagem em áreas de mineração. Portanto, com base no princípio da geometria de máxima eficiência, é razoável considerar que um canal como esse possa ser, na prática, submetido a uma vazão que corresponda a uma profundidade de escoamento de 0,75m (metade da largura).

Considerando a declividade de aproximadamente 0,31%, pode-se utilizar a equação de Manning para determinar a vazão correspondente à profundidade de 0,75m em um canal de concreto de 1,50m de largura.

Adotando-se a Equação (1), considerando o coeficiente de rugosidade de Manning (n) de 0,015 (valor comumente utilizado para estruturas com revestimento em concreto), obtém-se o valor de vazão de aproximadamente 2,2m<sup>3</sup>/s.

Conforme apresentado no item 3.2.1, a escala de vazões é diferente da escala geométrica e, portanto, utilizou-se a Equação (4) para determinar qual a vazão no modelo ( $Q_m$ ) que corresponde à vazão de 2,2m<sup>3</sup>/s no protótipo ( $Q_p$ ), considerando a escala geométrica  $L_r = 10$ :

$$Q_r = V_r L_r^2 = L_r^{5/2} = 10^{5/2} = 316,23$$

Portanto:

$$Q_r = 316,23 = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{2,20}{Q_m} \rightarrow Q_m = \frac{2,20}{316,23} = 0,00696 \text{ m}^3/\text{s} = 6,96\text{L/s}$$

Dessa forma, para uma vazão de 2,20m<sup>3</sup>/s no protótipo, tem-se aproximadamente 6,96L/s no modelo. Para a faixa de vazões a serem adotadas nos testes, trabalhou-se com os valores apresentados na Tabela 3.

Vale ressaltar que o valor máximo de vazão testado foi de 9,50L/s para evitar que o equipamento trabalhe próximo ao limite, visto que a capacidade da bomba é limitada a aproximadamente 11,5L/s.

**Tabela 3 – Faixa de vazões testadas nos experimentos**

$Q_m$ (L/s)	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)
1,58	0,50
3,16	1,00
4,75	1,50
6,32	2,00
6,96	2,20
9,50	3,00

Fonte: Autor (2025).

Apesar da realização dos testes e coleta de dados correspondentes a todas as vazões apresentadas na Tabela 3, com o intuito de viabilizar a avaliação criteriosa dos resultados obtidos, dada a disponibilidade de tempo e volume de dados, optou-se por considerar apenas a menor e maior vazões, possibilitando a avaliação nas condições menos e mais críticas. Observou-se que, para as demais vazões, o comportamento do escoamento foi intermediário em relação aos observados nas vazões mínima e máxima.

#### **4.4 Procedimento experimental / Ensaios**

A seguir, estão apresentados os procedimentos realizados para a execução dos experimentos.

As geometrias testadas foram agrupadas de acordo com o ângulo de deflexão, iniciando pela de 90°. Para cada ângulo de deflexão, foram testadas as geometrias A, B, C e D, conforme apresentado na Tabela 1. Foram testadas duas configurações geométricas por dia, buscando minimizar a possibilidade de propagação de possíveis erros sistemáticos na operação do modelo.

Cada teste foi dividido em duas etapas, uma para a filmagem do trecho de montante e outra para o trecho de jusante. Foram feitas imagens adicionais em alguns casos, buscando melhor registrar o fenômeno estudado além dos pontos de interesse registrados no ensaio. Essas imagens incluem fotografias e filmagens de cima (vista do canal em planta), vista de jusante para montante a partir do fim do canal, e, em alguns casos, registros focados em observar o comportamento do escoamento sob a superfície da água, identificando pontos de recirculação, por exemplo.

Cada experimento foi devidamente identificado com etiquetas indicando a vazão, o ângulo da deflexão e a configuração geométrica, conforme Figura 22, que apresenta a filmagem do teste na configuração 60°, B, para a vazão de 4,75L/s.

Para cada teste foi, inicialmente, configurado o inversor de frequência para a rotação correta, de modo a corresponder às vazões apresentadas na Tabela 3. Sempre na primeira vazão a ser testada após o equipamento ser ligado, deve-se anteriormente, aguardar para que todo o ar saia do sistema.

**Figura 22 – Teste sendo realizado na configuração 4,75L/s – 60° – B. Em destaque, etiqueta com identificação do teste**



Fonte: Autor (2025).

Após a configuração, é necessário aguardar um tempo para a estabilização da vazão, de tal forma que as oscilações sejam menores. Ainda assim, devido a limitações do equipamento, não é possível eliminar completamente as variações, que continuam ocorrendo de forma menos significativa, sendo da ordem de até 0,1L/s em relação ao valor pretendido, correspondendo a aproximadamente 2 a 3% da vazão testada, em média.

Dessa forma, por mais que as variações existam, a expectativa é de que não influenciem significativamente os resultados, visto que são muito pequenas proporcionalmente às vazões testadas.

#### 4.5 Análise de vídeo

Os vídeos foram importados do aparelho celular em formato MOV e tratados no *software* de edição de vídeo *iMovie*. O tratamento realizado pode ser descrito pelos seguintes ajustes:

- Ajustes de sombras: redução do valor desse parâmetro de forma a tornar as áreas escuras da imagem, mais escuras;
- Ajustes de contraste: aumento do valor desse parâmetro de forma a tornar maior a diferença entre as áreas claras e escuras da imagem;
- Corte da duração total dos vídeos (de quase 3 minutos para 20 segundos).

Inicialmente, para a obtenção das medições relacionadas à variável de interesse (profundidade), foi avaliado o uso da ferramenta CPH-ViFA, disponibilizada por Ribeiro (2023). Entretanto, algumas limitações associadas ao seu uso na presente pesquisa foram observadas.

A Figura 23 apresenta o resultado da aplicação do algoritmo de detecção de bordas com o uso da ferramenta citada. Em relação à detecção do escoamento em si, pode-se observar um bom resultado, representado pela boa aderência da linha d'água gerada pelo algoritmo em comparação com a filmagem.

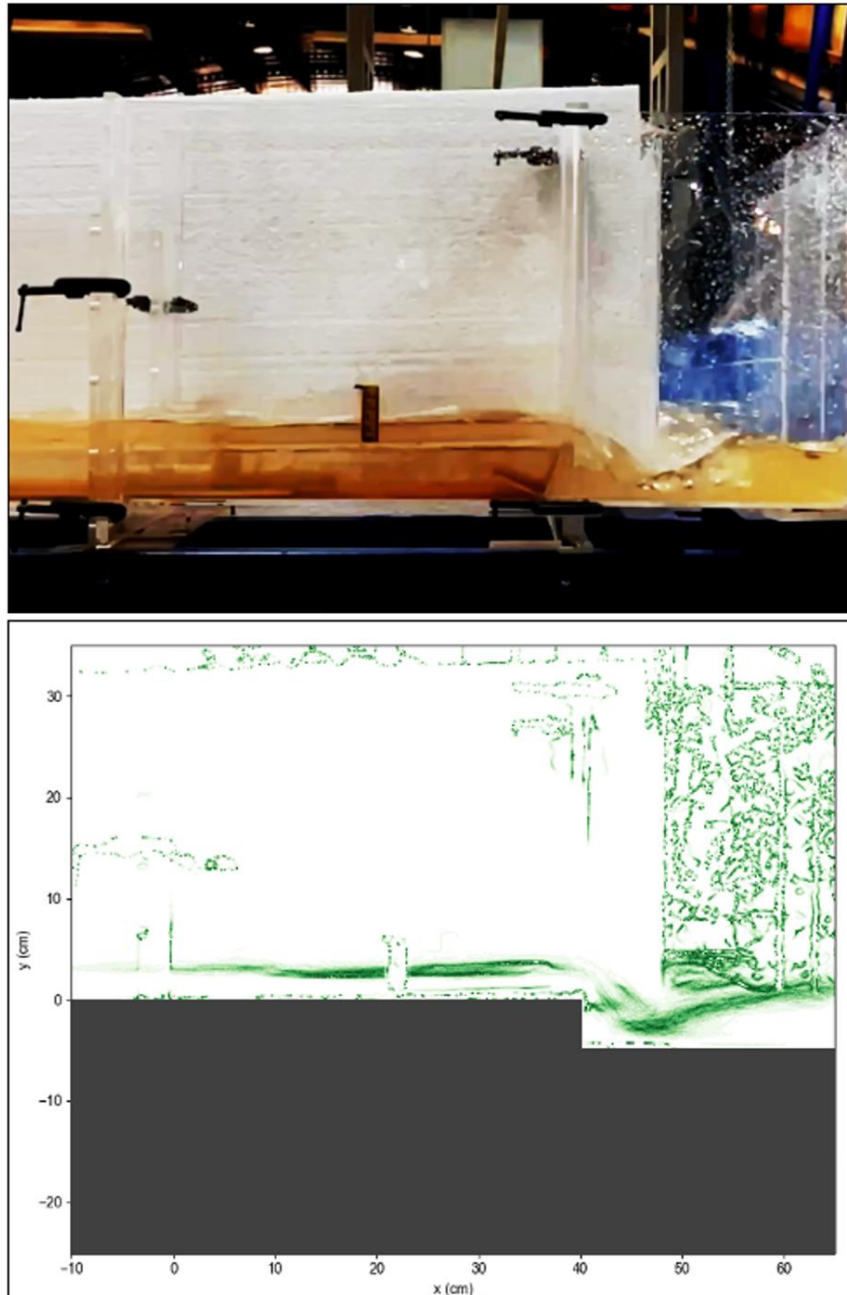
Entretanto, uma das principais limitações observadas consiste no fato de que o princípio de funcionamento do algoritmo é o de detecção de bordas, ou seja, todas as bordas presentes na imagem são detectadas, não só aquelas correspondentes à superfície do escoamento em si.

Dessa forma, são detectados elementos como as paredes do canal, as juntas entre as peças, os grampos em C, além das gotas depositadas na parede do canal provenientes de respingos.

Esses elementos geram dados na saída do programa, dificultando a extração quantitativa dos resultados de forma assertiva, pois o algoritmo não é capaz de discernir entre detecções que de fato correspondem ao escoamento e as que

correspondem a esses elementos indesejados. Esse problema é acentuado quando considerado o grande volume de vídeos gerados.

**Figura 23 – Aplicação do algoritmo de detecção de bordas com o uso da ferramenta CPH-ViFA, proposta por Ribeiro (2023)**



Fonte: Autor (2025).

Diante do exposto, a análise de vídeo foi realizada utilizando um novo código, desenvolvido para a presente pesquisa, em parceria com o Departamento de Engenharia Eletrônica. O código foi elaborado em linguagem Python, no ambiente *Visual Studio Code*.

O programa foi desenvolvido utilizando a biblioteca OpenCV, que, conforme citado anteriormente, possui mais de 2.500 algoritmos de visão computacional. Esses algoritmos possuem diversas aplicações, como reconhecimento facial, identificação de objetos, classificação de ações humanas em vídeos, entre outras.

Para o presente trabalho, utilizou-se um algoritmo de detecção de movimento em imagens, proposto originalmente em Zivkovic (2004) e Zivkovic; van der Heijden (2006), com foco em aplicações em vigilância por vídeo, permitindo a detecção de movimento em cenas monitoradas por câmeras de segurança estáticas.

A vantagem do algoritmo citado é que o seu princípio de funcionamento se baseia na detecção de movimento na imagem, ao contrário do algoritmo de detecção de bordas de Canny (1986), utilizado por Ribeiro (2023). Por essa razão, elementos estáticos presentes na cena (como as juntas e paredes do canal, por exemplo) não são detectados e, portanto, não influenciam nos resultados gerados.

No programa desenvolvido, o algoritmo foi utilizado para detectar o movimento do escoamento ao longo do vídeo, capturando as alterações na superfície da água para as diferentes configurações geométricas apresentadas na Tabela 1. As detecções de movimento são acumuladas ao longo da duração do vídeo de modo a se obter a profundidade média e desvio padrão em todos os pontos do escoamento.

Basicamente, o funcionamento do programa se baseia na aplicação de uma máscara de fundo (*background mask*) na imagem, que constrói um modelo dinâmico do fundo do vídeo, atualizando-o ao longo do tempo. Essa atualização permite a incorporação de pequenas variações no fundo, como mudanças de iluminação, que não devem ser interpretadas como movimento. À medida em que o vídeo é processado, cada quadro é analisado e comparado com esse modelo dinâmico de fundo, e é verificado se há alteração em cada *pixel*, de quadro a quadro. Os *pixels* nos quais são detectadas alterações indicam a presença de movimento na imagem. Alguns parâmetros podem ser alterados pelo usuário antes do início do processamento, como a sensibilidade da detecção (*threshold*), a quantidade de frames anteriores que o modelo usa para atualizar o modelo dinâmico do fundo (*history*), a ativação ou desativação da detecção

de sombras e a opacidade de plotagem da média e desvio padrão que é sobreposta à imagem no vídeo de saída.

Por padrão, o algoritmo de detecção de movimento é executado em toda a extensão da imagem correspondente a cada quadro. Como o processamento é realizado em todos os *pixels* e a resolução dos vídeos utilizados é 1080p, ou 1920 (horizontal) x 1080 (vertical), são apresentados 1.920 valores de média e desvio padrão, cada um correspondendo a uma coluna de *pixels* na imagem, dado que a largura da imagem é de 1920 *pixels*.

O código foi desenvolvido incluindo algumas funcionalidades que permitem uma melhor avaliação de fenômenos hidráulicos como escoamento em canais, como é o caso da presente pesquisa. Dentre essas funcionalidades, estão a possibilidade de selecionar seções de interesse a serem avaliadas, a definição de um ponto que represente a origem do eixo vertical ( $Y=0$ ) e a definição de dois pontos na imagem com distância entre eles conhecida, para calibração de uma escala entre *pixels* e centímetros.

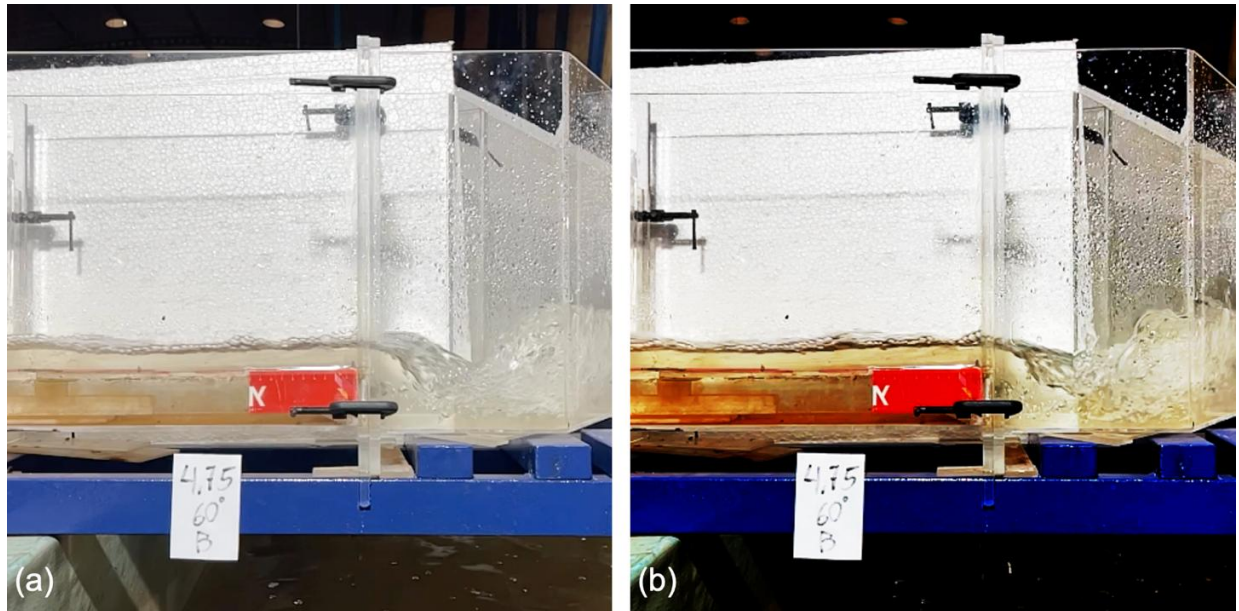
Antes do início do processamento, no primeiro quadro do vídeo, é solicitado que o usuário clique na imagem para indicar os pontos de origem, os pontos de calibração da escala de conversão e os pontos correspondentes às seções de interesse. Para cada etapa é proporcionado *feedback* visual ao usuário, para que seja possível validar se os pontos clicados estão corretos.

A partir dessas funcionalidades é possível obter facilmente os resultados de profundidade média e desvio padrão para as seções selecionadas, que são exportados em centímetros e em relação ao fundo do canal, usando, respectivamente, a escala de conversão e o ponto de origem ( $Y=0$ ), definidos pelo usuário.

As primeiras filmagens foram tratadas com diferentes ajustes de contraste, brilho e saturação de modo a se buscar o melhor desempenho do algoritmo de detecção de movimento. Após várias combinações diferentes de ajustes de imagem e testes realizados no programa, foi escolhida aquela com melhor resultado. A Figura 24

apresenta a filmagem do teste correspondente à configuração 60°, geometria B, para a vazão de 4,75 L/s, antes e após o tratamento.

**Figura 24 – Tratamento da imagem do teste na configuração 4,75L/s – 60° – B – (a): imagem original (b): imagem tratada**



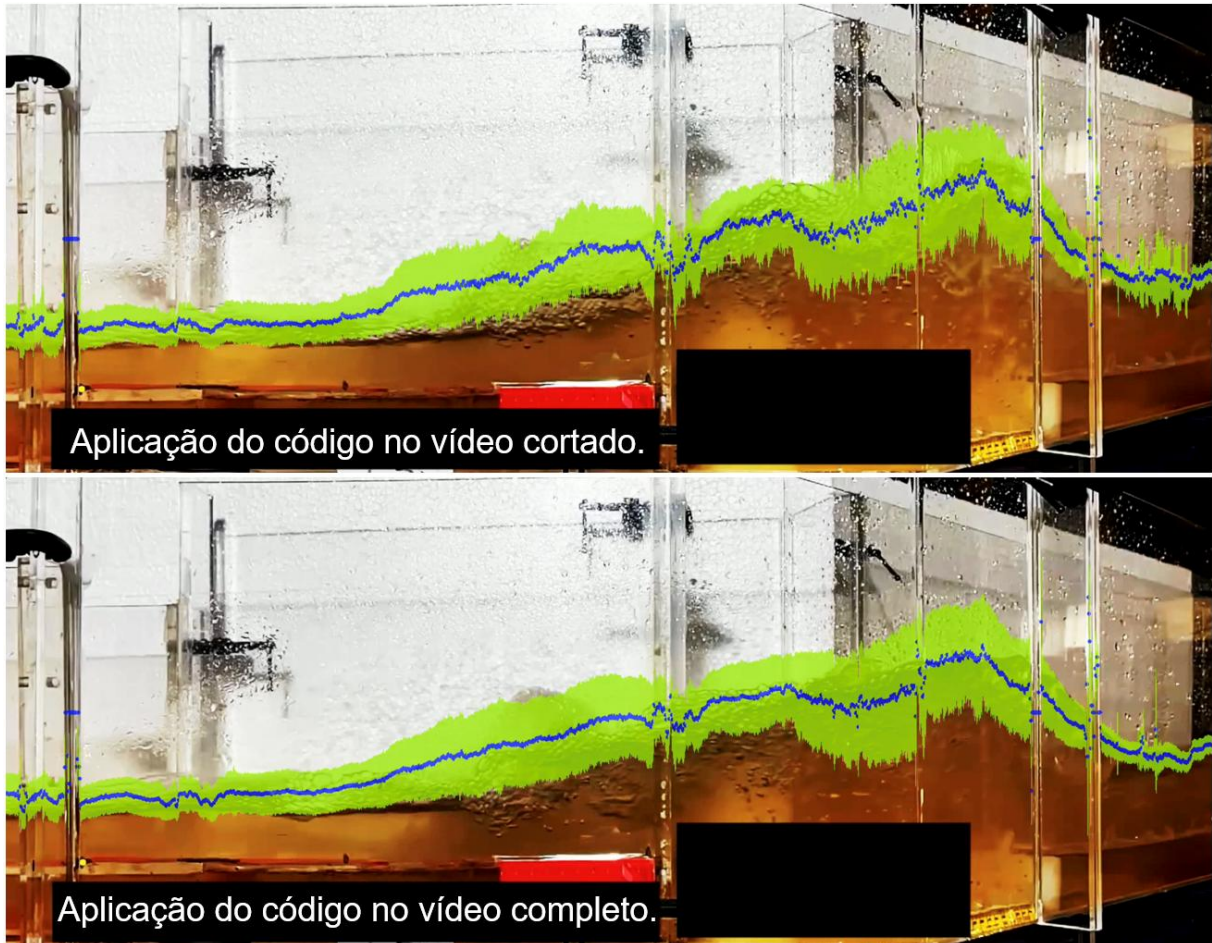
Fonte: Autor (2025).

É importante ressaltar que, além do tratamento realizado manualmente nos vídeos, antes do processamento no programa, o próprio código também realiza uma modificação na imagem, aplicando um filtro preto e branco antes do processamento. Essa operação é realizada com o intuito de otimização do processo, visto que é necessário que o programa armazene menos informações para cada quadro se não for necessário armazenar a informação de cor.

Conforme citado anteriormente, a duração dos vídeos foi cortada de aproximadamente 3 minutos para 20 segundos. O corte possibilitou reduzir drasticamente o tamanho dos arquivos a serem alimentados no programa sem perdas significativas de informação. Isso se deve ao fato de que a duração final foi suficiente para capturar as variações no comportamento da lâmina d'água contendo a maior parte dos valores máximos e mínimos de profundidade do escoamento, além de eventuais respingos. Após alguns testes, observou-se que a diferença média nos resultados de profundidade e de desvio padrão para os vídeos completos ou cortados foi da ordem de 4% e 10%, respectivamente. Como exemplo, a Figura 25 apresenta o teste 9,50L/s – 45° – C, no qual as profundidades nos pontos 1 e 2 foram de 9,30cm

e 14,70cm, respectivamente (vídeo cortado) para 8,97cm e 14,24cm (vídeo completo). Essas variações são da ordem de 3,7% e 3,2%, ligeiramente inferiores ao valor médio de 4%, observado quando avaliado o perfil completo do escoamento.

**Figura 25 – Comparação entre os perfis nos vídeos cortado e completo**



Fonte: Autor (2025).

Após a utilização do código para processamento de vídeos correspondentes a algumas geometrias foi possível perceber que a movimentação de bolhas sob a superfície do escoamento é um fator que pode influenciar nos resultados, sobretudo para as maiores vazões.

Esse fenômeno pode fazer com que os valores correspondentes à média naquela área sejam alterados por sofrerem influência de detecção de movimento abaixo da superfície.

Para evitar que isso aconteça, nos casos em que se observou movimento intenso abaixo da superfície, a ponto de influenciar nos resultados da média acumulada, os vídeos foram editados com a inserção de polígonos sobre essas áreas para que o movimento não fosse detectado nessas regiões, criando, portanto, áreas de exclusão. A Figura 26 ilustra essa situação.

**Figura 26 – Definição de área de exclusão devido à movimentação intensa de bolhas sob a superfície**



Fonte: Autor (2025).

Os resultados foram comparados entre si, buscando definir a geometria mais eficiente sob o ponto de vista de variação de profundidade do escoamento, ou seja, para qual geometria é necessária uma menor altura de paredes na estrutura para conter o escoamento, considerando a perturbação causada pela mudança de direção.

A avaliação dos resultados está apresentada a seguir.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento foi realizado buscando não só observar as profundidades nos pontos de interesse identificados na Figura 21 mas, também, caracterizar o escoamento de forma geral e observar as particularidades de cada configuração geométrica, para diferentes vazões. Os testes foram realizados entre setembro e outubro de 2024 e os resultados para as vazões de 1,58 L/s e 9,50 L/s estão apresentados a seguir.

### 5.1 Saída do programa

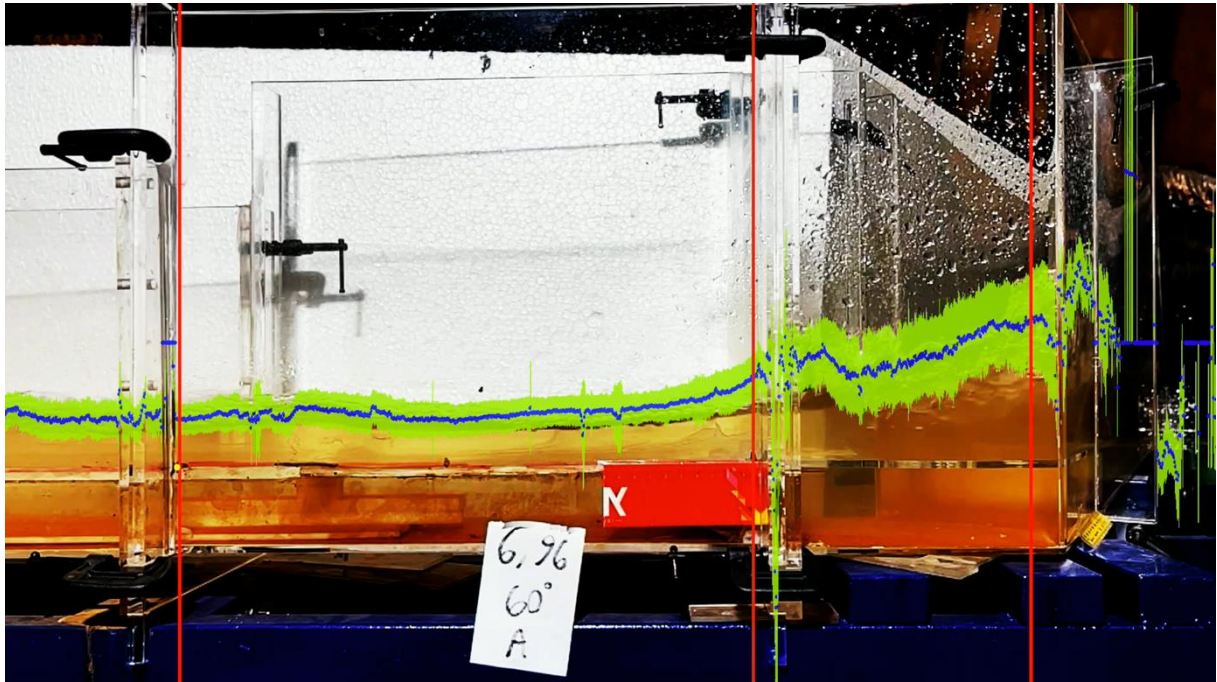
O programa exibe em tempo real uma sobreposição gráfica que representa a detecção de movimento no vídeo de entrada e, após a conclusão do processamento, exporta os resultados em um arquivo de vídeo no formato mp4, além de uma tabela em formato csv, contendo os valores de profundidade média e desvio padrão ao longo de toda a extensão da imagem.

A tabela e o vídeo exportados permitem a avaliação do escoamento em cada teste, de forma a se observar as características e particularidades do fenômeno conforme a geometria em questão.

A Figura 27 apresenta um exemplo de resultados de saída do programa a montante da deflexão. Esse exemplo corresponde ao teste 6,96L/s – 60° – A, no qual não foi necessário inserir um polígono de área de exclusão, conforme apresentado no item 4.5. Isso significa que não houve influência significativa da movimentação de bolhas sob a superfície do escoamento nos resultados de profundidade média.

Os pontos azuis na figura representam a média acumulada dos pontos em que é detectado movimento ao longo do vídeo, ou seja, a profundidade média do escoamento. A área verde apresenta o desvio padrão e as linhas verticais em vermelho representam as seções de interesse selecionadas pelo usuário.

**Figura 27 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 6,96L/s – 60° – A**



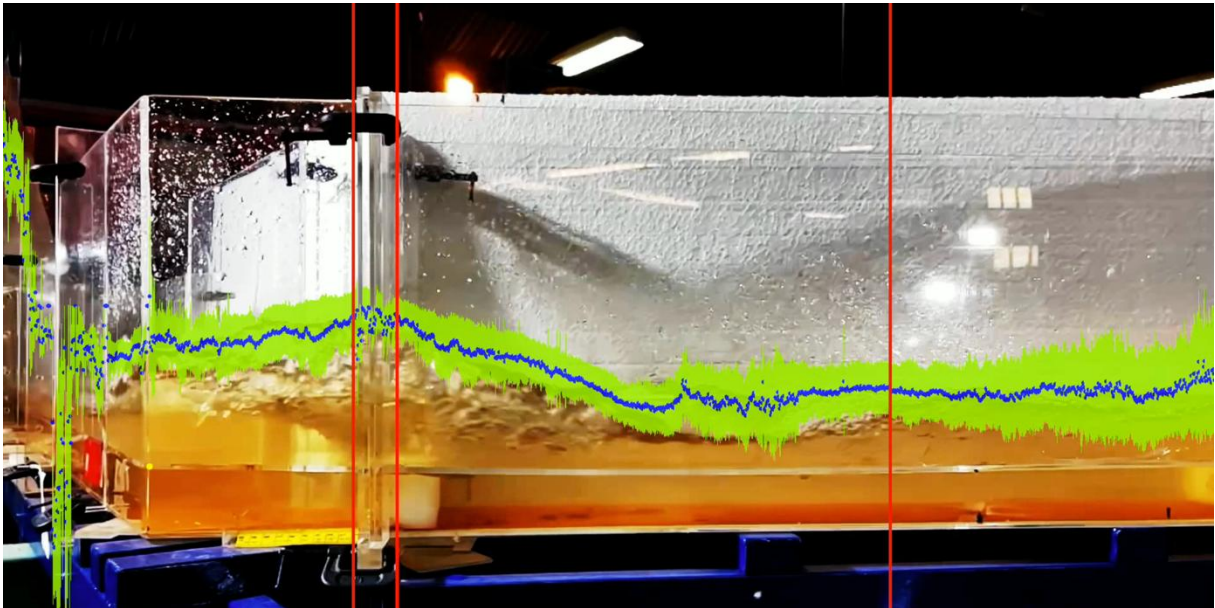
Fonte: Autor (2025).

A partir da imagem, foi possível observar que o código teve um bom desempenho na estimativa da profundidade média a partir da detecção de movimento no vídeo. Observou-se, nos pontos das junções entre as peças, pequenas descontinuidades nos valores da média, isso ocorre, pois, essas peças acabam obstruindo a linha de visão da câmera, afetando a detecção de movimento nessas áreas.

Por essa razão, é importante avaliar o posicionamento das seções de interesse para evitar essas interferências. Vale ressaltar que os resultados exportados pelo código destacam os valores nas seções selecionadas, mas também contém as demais seções, sendo possível a obtenção da linha d'água completa.

A Figura 28 apresenta um exemplo dos resultados de saída do programa a jusante da deflexão, ainda do teste 6,96 – 60° – A.

**Figura 28 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 6,96L/s – 60° – A**



Fonte: Autor (2025).

Novamente, observam-se bons resultados no que diz respeito à estimativa da profundidade média com base na detecção de movimento.

Para a obtenção da profundidade máxima no trecho da deflexão, ou seja, ao longo da estrutura de mudança de direção, considerou-se a profundidade média acrescida do desvio padrão, com o intuito de englobar as oscilações observadas no escoamento.

Essa premissa é razoável, tendo em vista que o parâmetro de maior interesse a ser investigado é a profundidade máxima, que leva à menor borda livre e condiciona o dimensionamento hidráulico da estrutura.

Neste tópico, utilizou-se como exemplo de saída do programa o teste 6,96 – 60° – A, porém foram realizados testes e coleta de dados correspondentes a todas as vazões apresentadas na Tabela 3. Entretanto, conforme citado anteriormente, buscando viabilizar a avaliação criteriosa dos resultados obtidos, dada a disponibilidade de tempo e volume de dados, optou-se por considerar apenas a menor e maior vazões (1,58 L/s e 9,50 L/s), possibilitando a avaliação nas condições menos e mais críticas.

Após a realização dos testes, confirmou-se a hipótese de que, para as demais vazões, o comportamento do escoamento é intermediário em relação aos observados nas vazões mínima e máxima.

O Apêndice A apresenta vídeos de saída do programa, possibilitando a visualização da detecção da linha d'água em tempo real, conforme a execução do código.

## **5.2 Deflexão de 90 graus**

A seguir, estão apresentados os resultados referentes aos testes da deflexão de 90 graus, iniciando pela vazão de 1,58 L/s. Na sequência, serão apresentados os resultados correspondentes à vazão de 9,50 L/s.

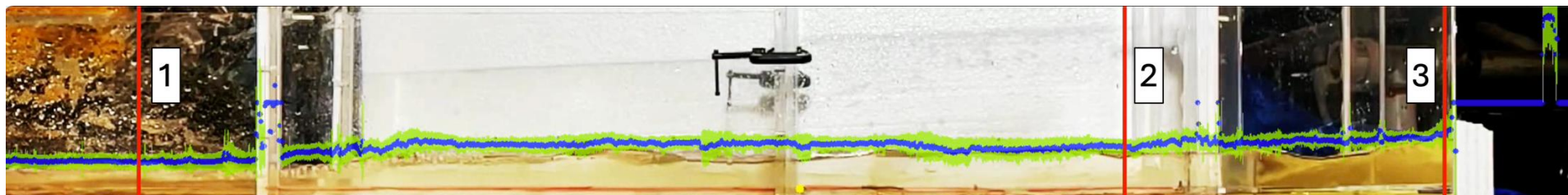
### **5.2.1 Geometria A (fundo liso a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$**

Para essa vazão, que corresponderia a  $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$  em um protótipo hipotético, foram filmados três enquadramentos diferentes, sendo dois a montante e um a jusante. Isso se deve ao fato de que a deflexão causou uma perturbação no escoamento a montante (na forma de mudança de profundidade) que teve influência a um comprimento significativo, excedendo o enquadramento padrão adotado para as demais vazões. Vale destacar que não se trata de um ressalto hidráulico, visto que o número de Froude de montante é inferior a 1, conforme apresentado na Tabela 5.

Essa condição foi observada frequentemente nos testes com vazão ( $Q$ ) de 1,58 L/s, sendo necessário adotar a medida citada em grande parte dos testes. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que, para a declividade e dimensões adotadas no modelo, a vazão de 1,58 L/s corresponde a um regime subcrítico de escoamento. Escoamentos em regime subcrítico permitem a propagação de perturbações para montante, pois possuem controle hidráulico de jusante (BAPTISTA; COELHO, 2014).

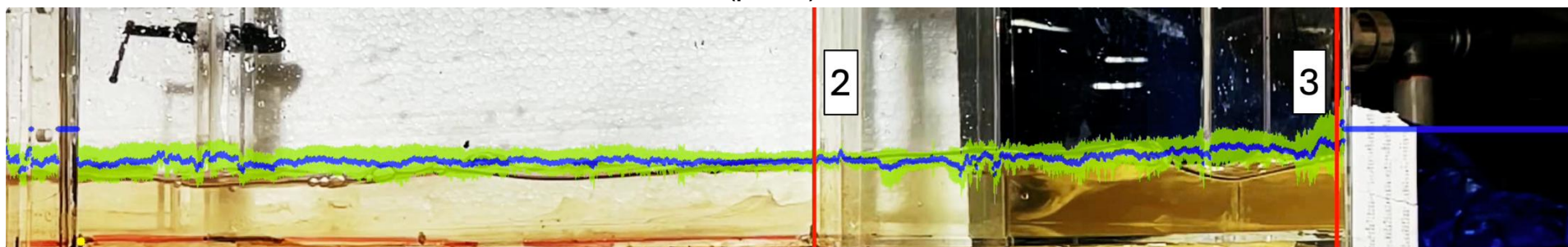
A Figura 29, a Figura 30 e a Figura 31 apresentam imagens com os resultados finais de saída do programa a montante (afastado), a montante (distância padrão) e a jusante da deflexão, respectivamente, para a vazão de 1,58 L/s.

Figura 29 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58L/s – 90° – A (afastado)



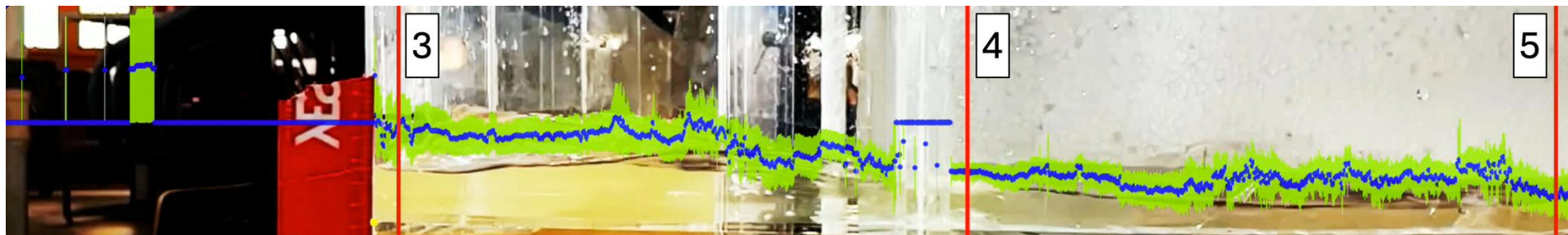
Fonte: Autor (2025).

Figura 30 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58L/s – 90° – A (padrão)



Fonte: Autor (2025).

Figura 31 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58L/s – 90° – A



Fonte: Autor (2025).

A partir das imagens, pode-se observar que o código teve um bom desempenho e os valores de profundidade média exibiram continuidade e não variaram muito, sobretudo nas imagens de montante da deflexão.

Para a obtenção das profundidades nos pontos de referência, foram selecionadas 3 seções no trecho de montante e 3 seções no trecho de jusante. As duas primeiras correspondem aos pontos 1 e 2 (Figura 29), enquanto as duas últimas correspondem aos pontos 4 e 5 (Figura 31).

Para o ponto 3, define-se uma seção na deflexão na imagem de montante (Figura 30) e outra, também na deflexão, na imagem de jusante (Figura 31). Os resultados de montante e jusante são comparados e o maior valor é mantido, visto que se busca a máxima profundidade na deflexão. Normalmente, foram observadas maiores profundidades a partir do ângulo de jusante, contudo os valores apresentaram diferenças pequenas, da ordem de 1,5 a 2,0 cm.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no teste de 90° – A – 1,58 L/s. O Ponto 3 corresponde à seção na deflexão de maior profundidade entre a imagem de montante e de jusante. Estão apresentados, respectivamente, a profundidade média em centímetros ( $y_{méd.}$ ), convertida utilizando a escala definida a partir dos dois pontos conhecidos, o desvio padrão, também em centímetros, as profundidades máximas e mínimas ( $y_{máx.}$  e  $y_{mín.}$ ), obtidas a partir da soma/subtração do desvio padrão nos valores de profundidade média e os números de Froude ( $Fr$ ) associados a cada profundidade (média, mínima e máxima).

**Tabela 4 – Resultados para as seções nos pontos de interesse: 1,58 L/s – 90° – A**

Ponto	$y_{méd.}$ (cm)	Desvio (cm)	$y_{máx.}$ (cm)	$y_{mín.}$ (cm)	$Fr$ ( $y_{méd.}$ )	$Fr$ ( $y_{máx.}$ )	$Fr$ ( $y_{mín.}$ )
1	3,1	0,8	3,9	2,2	0,63	0,44	1,01
2	4,6	0,6	5,2	4,0	0,34	0,28	0,42
3	5,4	2,0	7,4	3,4	0,27	0,17	0,55
4	2,4	0,4	2,8	1,9	0,93	0,73	1,26
5	1,3	0,9	2,1	0,4	2,35	1,09	12,36

Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar que o desvio padrão é máximo no ponto 3, que corresponde à área da deflexão. Esse comportamento é esperado, devido à maior variabilidade da lâmina d'água nessa região.

Por mais que exista grande variabilidade nos valores de profundidade no ponto 3, que significa que a profundidade máxima nesse ponto pode ser substancialmente maior do que a média, optou-se por considerar as profundidades médias nas análises dos resultados, visto que se trata da condição que mais se aproxima do comportamento geral do escoamento.

Diante do exposto, a Tabela 5 apresenta os valores de profundidade considerados nas análises realizadas, juntamente com as velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) associados. Pode-se observar que o regime é subcrítico a montante da deflexão, dado que o único valor de Froude superior a 1 é o do ponto 5, ou seja, a última seção.

O fato de o escoamento se dar no regime subcrítico para a vazão de 1,58 L/s pode ter contribuído para a continuidade observada entre os pontos da profundidade média. Isso se deve ao fato de que o fluxo, nessas condições, apresenta menor velocidade e aeração, causando menos variações bruscas na lâmina d'água.

**Tabela 5 – Valores considerados nas análises: 1,58 L/s – 90° – A**

Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	3,1	0,34	0,63
2	4,6	0,23	0,34
3	5,4	0,20	0,27
4	2,4	0,45	0,93
5	1,3	0,83	2,35

Fonte: Autor (2025).

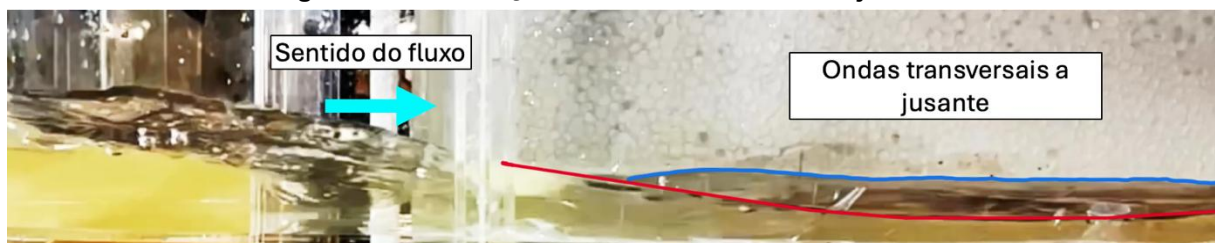
A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que, para a vazão de 1,58 L/s, a mudança brusca de direção causa uma perturbação a montante que faz com que a profundidade aumente de 3,1 cm (ponto 1) para 4,6 cm (ponto 2). Quando o fluxo atingiu a parede da deflexão, a profundidade média observada foi de aproximadamente 5,4 cm, ou seja, aproximadamente 75% maior do que a profundidade média de aproximação (3,1 cm).

Após a mudança de direção, a profundidade reduz novamente, atingindo seu valor mínimo na seção final e configurando regime supercrítico.

Na vista de jusante são observadas maiores oscilações nos valores de profundidade média. Esse comportamento é esperado, pois, após a colisão com a parede do canal no momento da deflexão, são introduzidas perturbações no escoamento, tais como as ondas transversais, que se propagam para jusante de forma alternada entre as paredes externa e interna.

A Figura 32 apresenta com mais detalhes as ondas transversais formadas no escoamento. Para a vazão de 1,58 L/s, as ondas são pouco intensas e menos evidentes do que em vazões maiores, mas já é possível observá-las.

**Figura 32 – Presença de ondas transversais a jusante**

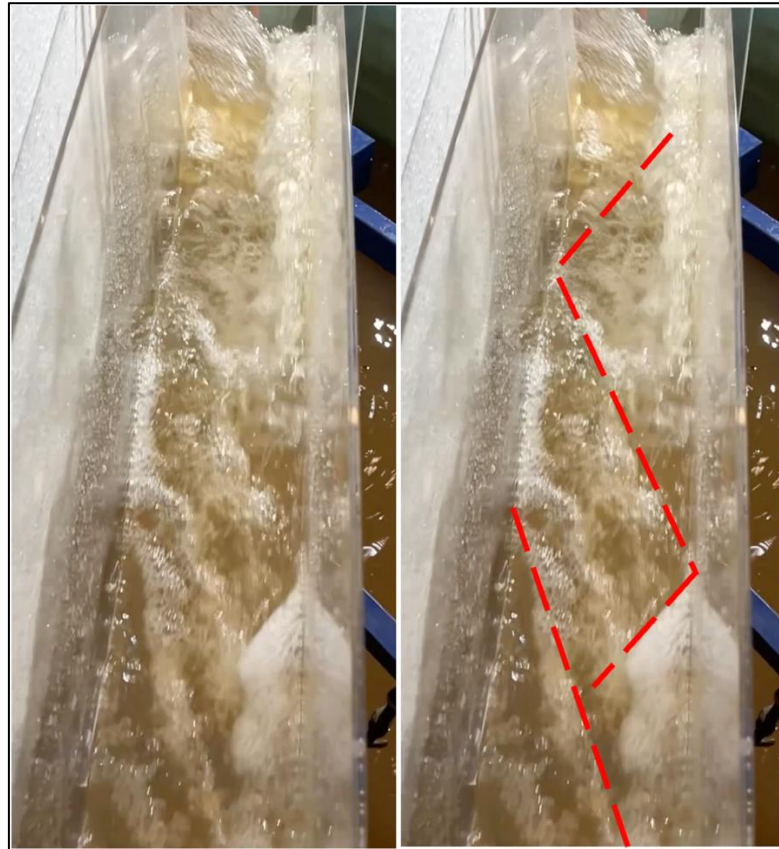


Fonte: Autor (2025).

A linha vermelha representa o escoamento na margem direita do canal (lado externo da deflexão) e a linha azul representa a profundidade na margem esquerda do canal (lado interno da deflexão). A diferença entre as profundidades em cada lado está associada à formação das ondas transversais.

Esse fenômeno foi observado em praticamente todos os testes, com intensidades variadas. Como exemplo, a Figura 33 apresenta a vista em superior do teste Q = 9,50L/s, ângulo de 45°, geometria B, que permite observar de forma mais clara a formação de ondas transversais em padrão semelhante ao apresentado por Hager (1992).

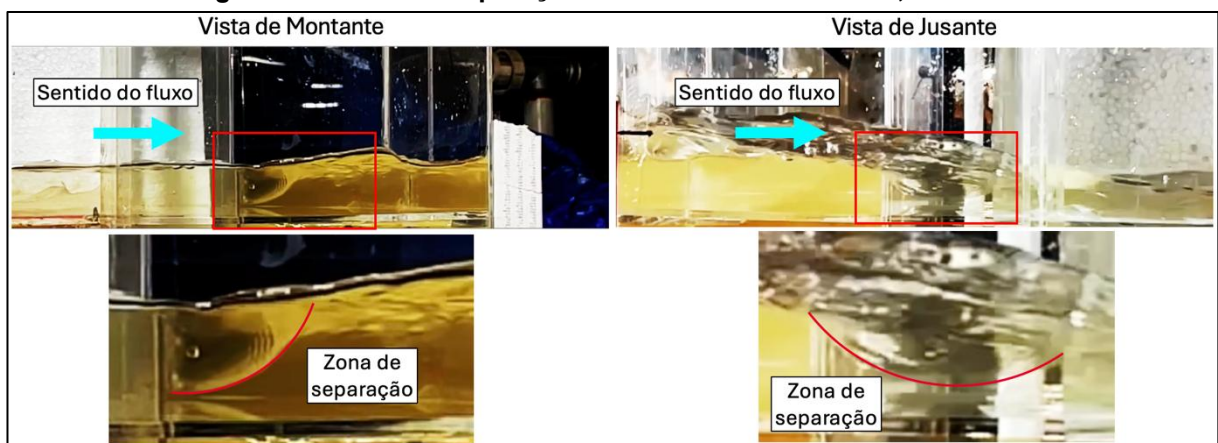
**Figura 33 – Presença de ondas transversais a jusante – vista superior**



Fonte: Autor (2025).

Adicionalmente, foi possível identificar uma zona de separação do escoamento, apresentada na Figura 34.

**Figura 34 – Zona de separação do escoamento – 90° – 1,58 L/s – A**



Fonte: Autor (2025).

Esse fenômeno corrobora as observações apresentadas por Ramamurthy *et al.* (2013) e Thandveswara, Seetharamiah (1971) (ver item 3.3.2), e é caracterizado pelo

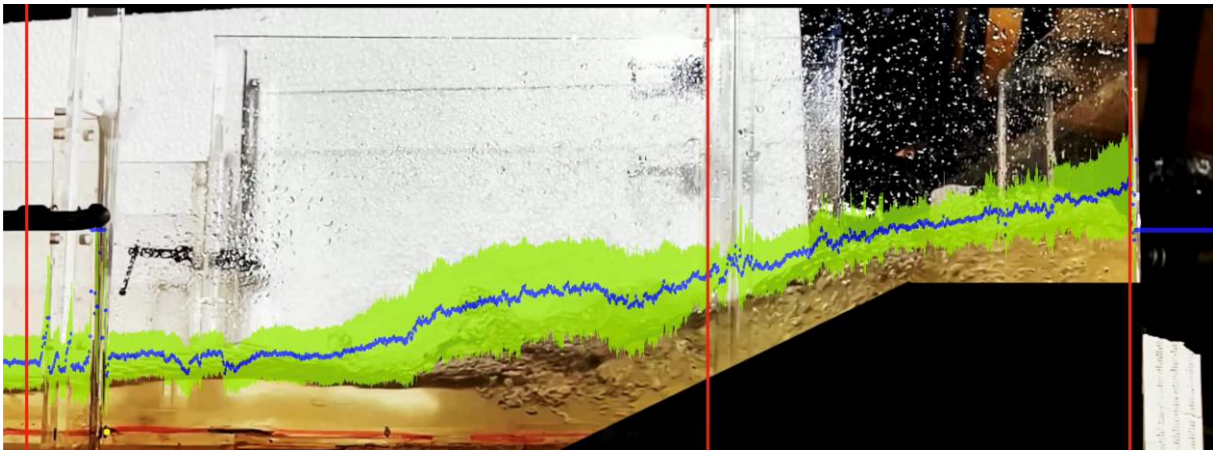
descolamento do fluxo da parede do canal, podendo ser observado nos ângulos de montante e jusante.

### 5.2.2 Geometria A (fundo liso a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$

Para a vazão de  $9,50 \text{ L/s}$ , que corresponderia a  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  em um protótipo hipotético, foram filmados dois enquadramentos diferentes, sendo um a montante e um a jusante. Para essa vazão, ocorreu a formação de um ressalto hidráulico devido à presença da deflexão, conforme evidenciado pelo regime supercrítico no Ponto 1 (Tabela 6) seguido do brusco aumento de profundidade na deflexão.

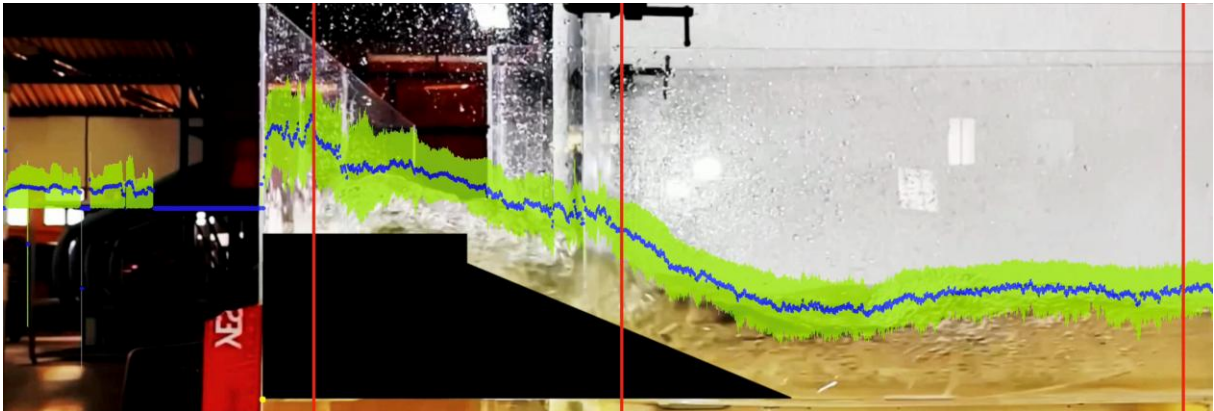
Para que o código apresentasse um bom desempenho nesse teste, foi necessário criar polígonos para definir áreas de exclusão nos vídeos, devido à grande movimentação de bolhas na área da deflexão. A Figura 35 e a Figura 36 apresentam os vídeos de saída do programa a montante e a jusante da deflexão, respectivamente, para a vazão de  $9,50 \text{ L/s}$ . Nessas figuras, também é possível observar os polígonos de exclusão.

**Figura 35 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) –  $9,50 \text{ L/s} - 90^\circ - A$**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 36 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – A**



Fonte: Autor (2025).

A partir das imagens, pode-se observar que o código teve um bom desempenho e os valores de profundidade média estão aderentes, sendo representativos do que é observado no vídeo.

A Tabela 6, apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados nas análises realizadas.

Vale ressaltar que os números de Froude apresentados foram calculados com base no valor de profundidade em cada ponto específico. No ponto 3, por se tratar de uma seção transversal próxima à parede da deflexão, na qual ocorre a mudança de direção do escoamento e grande variabilidade da lâmina d'água, a velocidade de escoamento também varia de direção, fazendo com que o número de Froude nesse ponto possa nem sempre ser representativo, sobretudo para maiores vazões.

**Tabela 6 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – A**

Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	4,9	1,31	1,89
2	11,1	0,57	0,55
3	20,4	0,31	0,22
4	12,3	0,52	0,47
5	8,2	0,77	0,85

Fonte: Autor (2025).

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que, quando o fluxo atinge a parede da deflexão, a profundidade média observada é de aproximadamente 20,4 cm, ou seja, é da ordem de 4 vezes (~420%) a profundidade média de aproximação (4,9 cm).

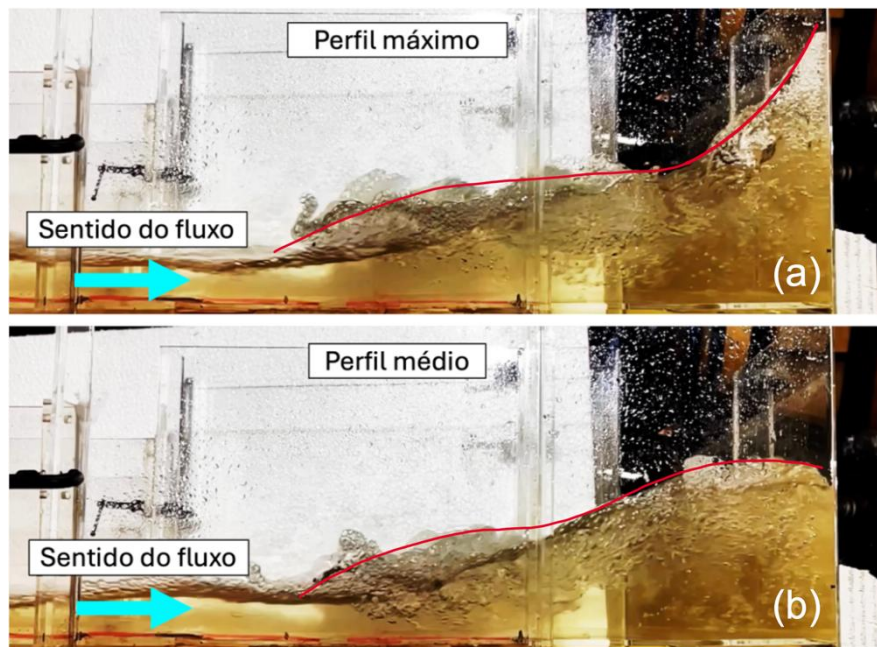
Por mais que a profundidade na entrada da mudança de direção seja de aproximadamente 11,1 cm (ponto 2), considerou-se o valor do ponto 1 como profundidade média de aproximação por ela ocorrer antes da influência do ressalto hidráulico causado pela deflexão.

Pelo fato de o programa detectar as profundidades médias, podem ocorrer aumentos de profundidade pontuais superiores aos apresentados nos dados de saída.

As ondas propagadas ao longo do escoamento fizeram com que houvesse diferenças consideráveis entre o perfil da linha d'água quando é observada a profundidade máxima, e o perfil médio, observado mais frequentemente ao longo do teste. Dessa forma, é importante ressaltar que, apesar de terem sido consideradas as profundidades médias nas avaliações, o aumento de profundidade na deflexão pode ser ainda maior em determinados momentos.

Essas variações justificam a consideração da profundidade máxima no trecho da deflexão, com o intuito de englobar as oscilações na linha d'água. A Figura 37 ilustra essa situação.

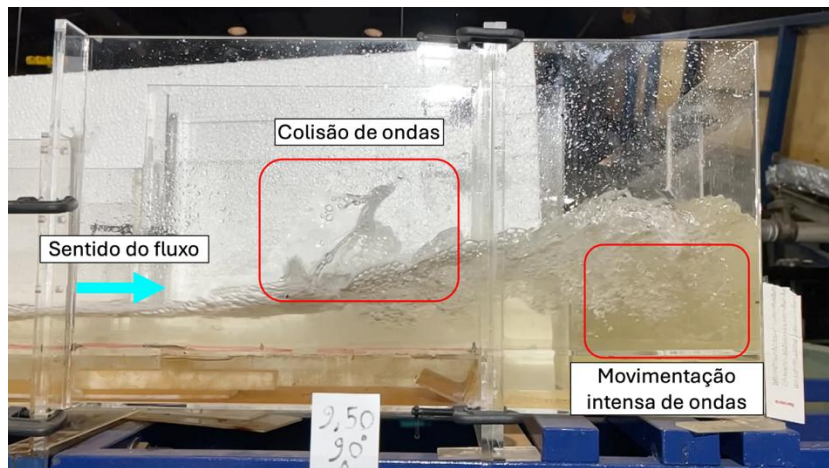
**Figura 37 – Perfis máximo e médio observados – 9,50 L/s – 90° – A**



Fonte: Autor (2025).

Foi possível observar a grande movimentação de bolhas no fluxo. Buscou-se identificar um padrão nessa movimentação, mas as ondas criadas pelo ressalto fazem com que as bolhas não necessariamente sigam um padrão específico. Adicionalmente, algumas ondas se movimentam no sentido contrário do escoamento, por cima da lâmina d'água, podendo colidir com o fluxo de montante, criando perturbações a montante da entrada da deflexão. Essas perturbações podem lançar respingos a alturas significativas, conforme apresentado na Figura 38.

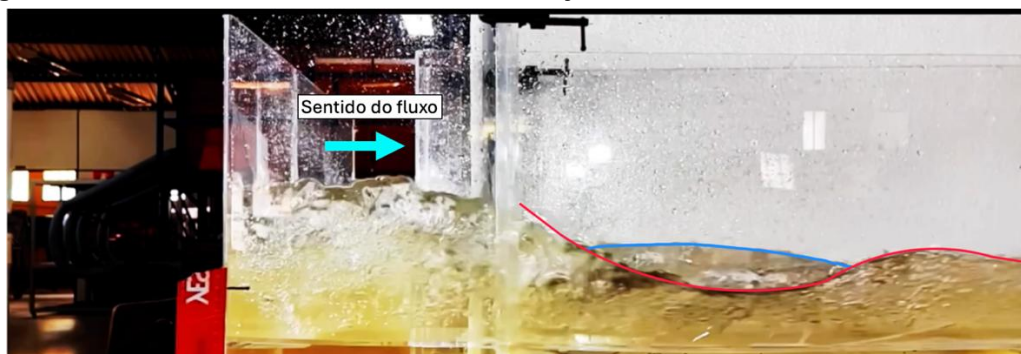
**Figura 38 – Colisão de ondas e movimentação intensa de bolhas – 9,50 L/s – 90° – A**



Fonte: Autor (2025).

A Figura 39 apresenta a vista de jusante, evidenciando a formação de ondas transversais após a deflexão.

**Figura 39 – Formação de ondas transversais a jusante da deflexão – 9,50 L/s – 90° – A**



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que as perturbações são intensas para a vazão de 9,50 L/s e se assemelham ao padrão de ondas transversais apresentado por Hager (1992), com

pontos alternados de aumento e diminuição da profundidade nas margens externa e interna da mudança de direção.

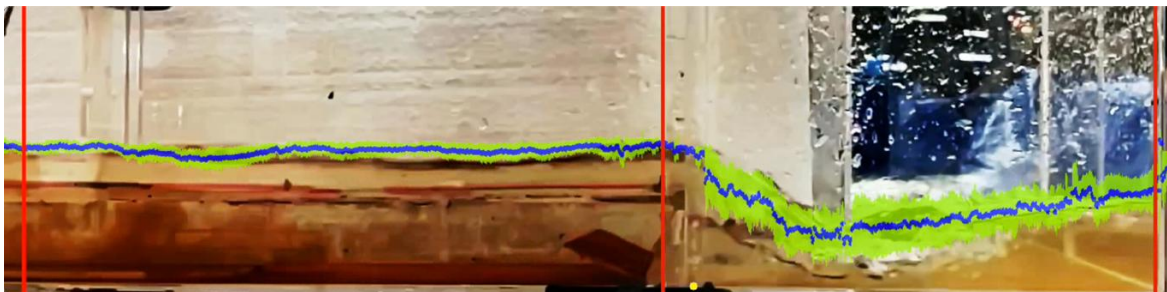
Após análise detalhada dos vídeos, foi possível concluir que a primeira onda que ocorre fora da deflexão, na parede externa, acontece a aproximadamente 40 cm (correspondente a 4 metros em um protótipo equivalente) de distância da mudança de direção e atinge cerca de 45% da profundidade média, observada no ponto 3.

### 5.2.3 Geometria B (degrau a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$

A geometria B corresponde a degrau na entrada da deflexão e fundo liso na saída. A seguir estão apresentados os resultados para a vazão de 1,58 L/s, que corresponderia a  $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$  em um protótipo hipotético.

A Figura 40 apresenta os resultados de saída do programa a montante da deflexão, para a vazão de 1,58 L/s.

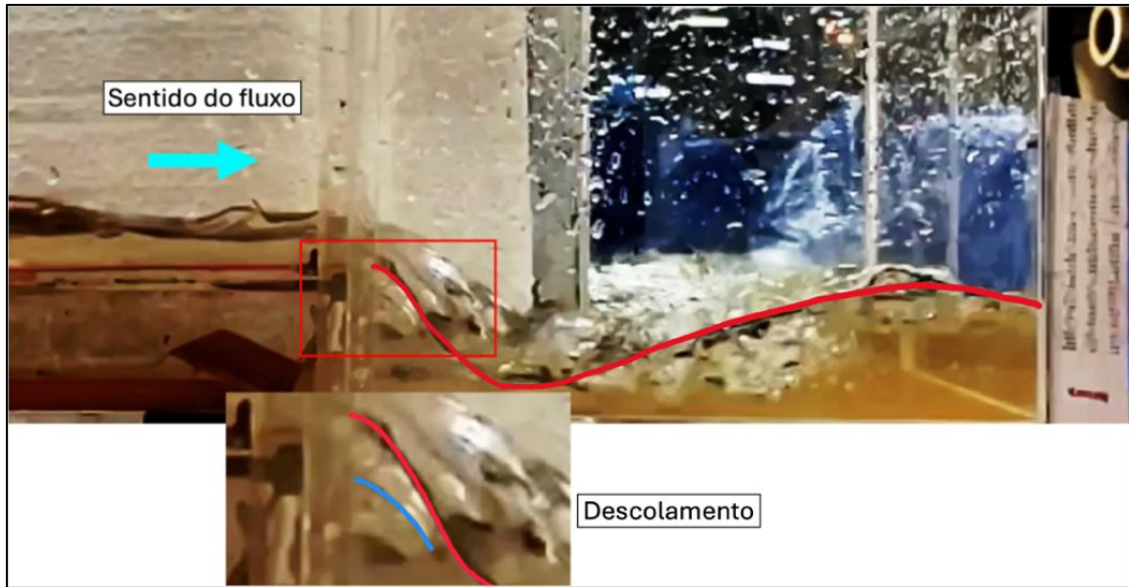
**Figura 40 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s –  $90^\circ$  – B**



Fonte: Autor (2025).

Nesse caso, pelo fato de existir um degrau na entrada da mudança de direção, não ocorre propagação de perturbações para montante e a profundidade média se mantém constante ao longo de todo o trecho de aproximação. No ponto em que o fluxo atinge o degrau, ocorre a queda, seguida de um aumento da profundidade, causado pela parede da deflexão, conforme apresentado na Figura 41. Esse fenômeno caracteriza um ressalto do tipo ondular, que ocorre em faixa de número de Froude de montante entre 1 e 1,7 (CHOW *et al.*, 1988). Esse tipo de ressalto é caracterizado pela formação de ondas na superfície do escoamento, sem necessariamente apresentar a formação do rolo do ressalto.

**Figura 41 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – B**

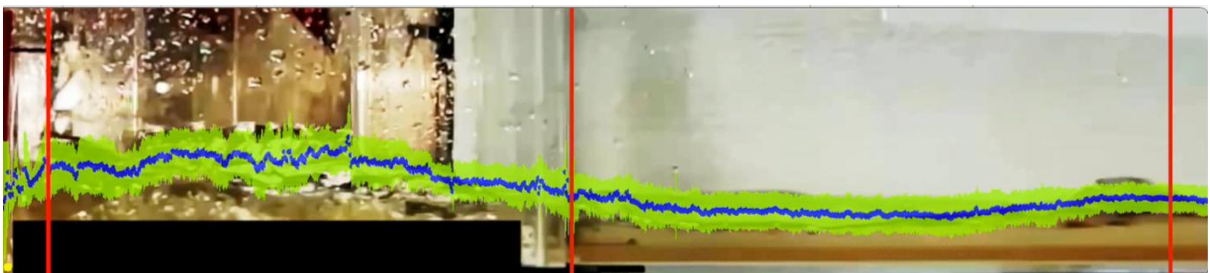


Fonte: Autor (2025).

Adicionalmente, a imagem permite observar a ocorrência do descolamento do escoamento durante a queda.

A Figura 42 apresenta os resultados de saída do programa a jusante da deflexão.

**Figura 42 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – B**



Fonte: Autor (2025).

A partir das imagens, pode-se observar que o código teve um bom desempenho e os valores de profundidade média estão aderentes, sendo representativos do que é observado no vídeo.

A Tabela 7, apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados nas análises realizadas.

**Tabela 7 – Valores considerados nas análises – 1,58 L/s – 90° – B**

Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	2,2	2,87	1,02
2	2,5	2,54	0,86
3	5,3	1,20	0,28
4	3,0	2,10	0,64
5	3,1	2,03	0,61

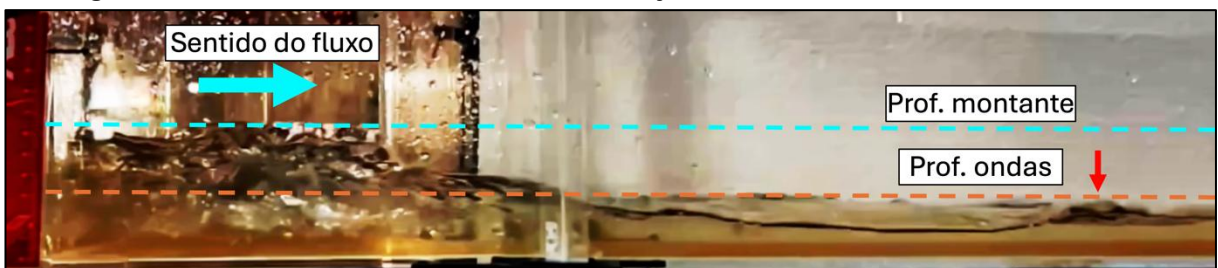
Fonte: Autor (2025).

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que, para a vazão de 1,58 L/s, a profundidade média permanece aproximadamente constante entre os pontos 1 e 2. Vale ressaltar que os valores de profundidade apresentados sempre utilizam, como referência, o fundo do canal na seção em questão (em todas as geometrias), portanto o ponto 3, cuja profundidade é de aproximadamente 5,3 cm, não está 2,8 cm acima do ponto 2, mas sim 2,2 cm abaixo dele, visto que entre eles existe um degrau de 5 cm de altura.

Quando o fluxo atingiu a parede da deflexão, a profundidade média observada foi de aproximadamente 5,3 cm em relação ao fundo, ou seja, é 2 vezes maior (~240%) do que a profundidade média de aproximação (2,2 cm). Entretanto, se descontados os 5 cm de altura do degrau, essa profundidade é de 0,3 cm, sendo inferior à do ponto 1.

Após a mudança de direção, a profundidade reduz novamente, variando com as ondas transversais de jusante, conforme apresentado na Figura 43.

**Figura 43 – Formação de ondas transversais a jusante da deflexão – 1,58 L/s – 90° – B**



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que as perturbações são pouco intensas para a vazão de 1,58 L/s. Após análise detalhada dos vídeos, foi possível concluir que a primeira onda que ocorre fora da deflexão, na parede externa, acontece a aproximadamente 35 cm (correspondente

a 3,5 metros em um protótipo equivalente) de distância da mudança de direção e atinge cerca de 70% da profundidade média observada no ponto 3.

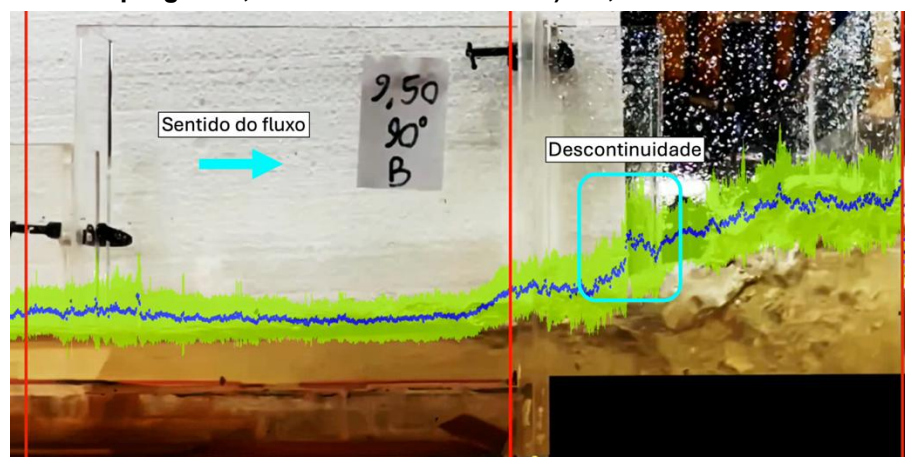
É importante destacar que a profundidade atingida pela onda não supera a profundidade média de aproximação, se considerada a altura do degrau, de 5 cm, conforme destacado pelas linhas horizontais na imagem.

#### 5.2.4 Geometria B (degrau a montante – fundo liso a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$

Para a vazão de 9,50 L/s, que corresponderia a 3,0 m<sup>3</sup>/s em um protótipo hipotético, ocorreu a formação de um ressalto hidráulico após a queda. A alta movimentação de bolhas no trecho de deflexão requereu a criação de uma área de exclusão para garantir o bom funcionamento do código.

Assim como para a vazão de 1,58 L/s, para 9,50 L/s o escoamento a montante da deflexão teve comportamento semelhante, se mantendo com profundidade aproximadamente constante até a entrada da deflexão, salvo pelo trecho de início do ressalto hidráulico, próximo à segunda seção de interesse mostrada na Figura 44, que apresenta os resultados de saída do programa a montante da deflexão.

**Figura 44 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – B**

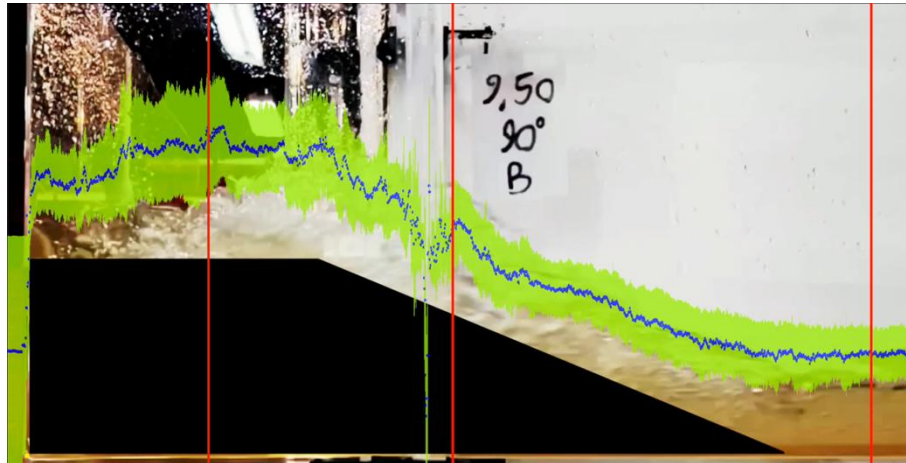


Fonte: Autor (2025).

A partir da imagem é possível observar uma descontinuidade no trecho destacado. Essa descontinuidade está associada à formação de ondas transversais intensas após a colisão do fluxo com a parede. Algumas dessas ondas acabam colidindo com

o escoamento de montante no ponto destacado e causando perturbações significativas. A Figura 45 apresenta os resultados no trecho de jusante.

**Figura 45 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – B**



Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar uma variação de profundidade significativa na parede da deflexão. De modo geral, o escoamento nesse trecho é muito agitado, se comparado ao trecho de montante. Existe uma descontinuidade nos resultados na saída da deflexão, que está associada à junção entre as peças, que obstrui a linha de visão da câmera, afetando a detecção de movimento nessas áreas.

A Tabela 8 apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados nas análises realizadas.

**Tabela 8 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – B**

Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	4,7	1,34	1,98
2	6,6	0,97	1,21
3	20,1	0,32	0,22
4	14,2	0,45	0,38
5	6,4	0,99	1,24

Fonte: Autor (2025).

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que a profundidade média permanece aproximadamente constante após o ponto 1 até sofrer um aumento próximo ao ponto 2, associado à presença do ressalto hidráulico. Quando o fluxo atinge a parede da deflexão, a profundidade média observada é de aproximadamente

20,1 cm, ou seja, da ordem de 4 vezes maior (~420%) do que a profundidade média de aproximação (4,7 cm). Após a mudança de direção, a profundidade reduz novamente, variando conforme as ondas transversais de jusante. De forma análoga ao que foi feito para a vazão de 1,58 L/s, se descontados os 5 cm de altura do degrau, essa profundidade é de 15,1 cm, da ordem de 3 vezes maior (320%) do que a profundidade média de aproximação.

Dentre os principais efeitos causados no escoamento pela geometria B – 90°, está a criação de vórtices de recirculação após o degrau. A Figura 46 apresenta a vista de montante, sem o polígono de exclusão.

As setas na imagem destacam os vórtices de recirculação, com sentidos opostos, criados no escoamento devido ao degrau seguido da deflexão.

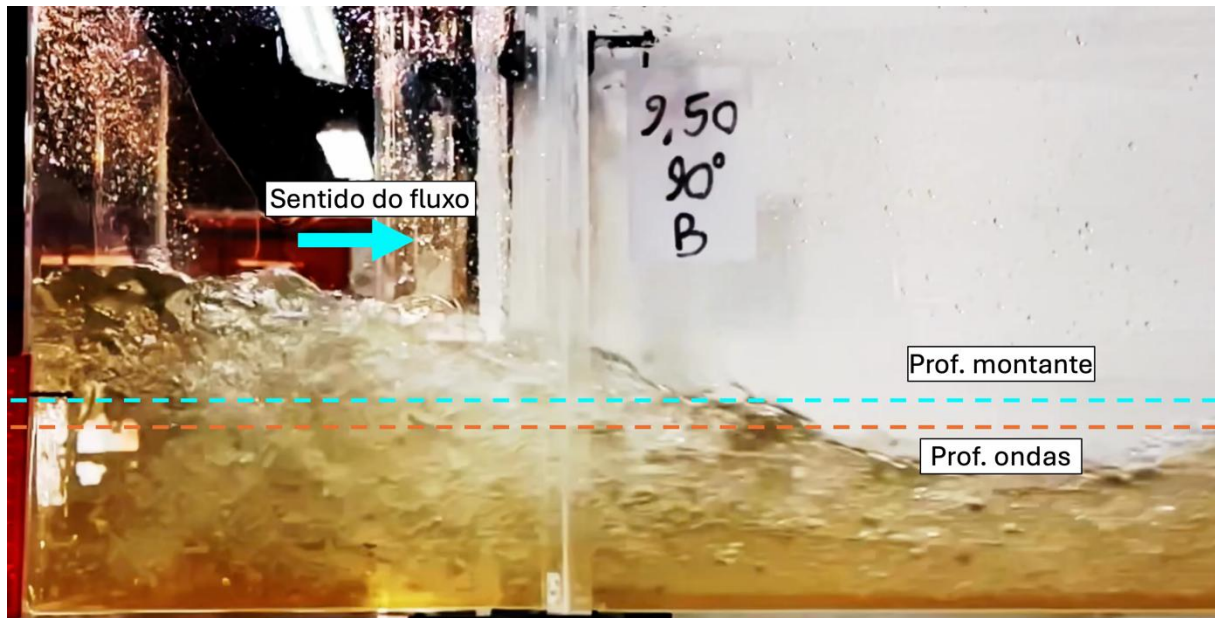
**Figura 46 – Presença de vórtices de recirculação no trecho de deflexão – 9,50 L/s – 90° – B**



Fonte: Autor (2025).

A Figura 47 apresenta a vista de jusante, na qual pode-se observar a propagação das ondas transversais.

Figura 47 – Ondas transversais a jusante – 9,50 L/s – 90° – B



Fonte: Autor (2025).

É importante destacar que a profundidade atingida pela primeira onda da parede externa após a deflexão não supera a profundidade média de aproximação, se considerada a altura do degrau, de 5 cm, conforme destacado pelas linhas horizontais na imagem.

#### 5.2.5 Geometria C (degrau a montante – soleira a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$

A Geometria C consiste em degrau na entrada da deflexão e soleira na saída, criando um colchão d'água ao longo da mudança de direção. Assim como na geometria A, para esse caso foram necessárias filmagens com três enquadramentos diferentes (dois a montante e um de jusante) para captar todas as perturbações causadas no escoamento pela mudança de direção.

A Figura 48, a Figura 49 e a Figura 50 apresentam os vídeos de saída do programa a montante (afastado), a montante (distância padrão) e a jusante da deflexão, respectivamente, para a vazão de 1,58 L/s.

Para essa configuração, a linha d'água sofre influência da deflexão, levando a um aumento da profundidade a montante. Similarmente ao teste de mesma vazão para a geometria A, esse aumento de profundidade não caracteriza um ressalto hidráulico,

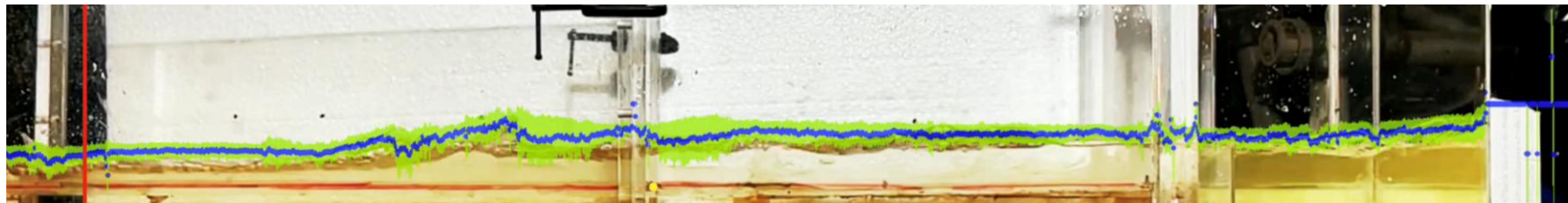
visto que o número de Froude é inferior a 1 em todas as seções de interesse, conforme apresentado na Tabela 9.

Após o aumento da profundidade, a linha d'água permanece aproximadamente constante até a deflexão. Na Figura 50, que apresenta a vista de jusante, pode-se observar dois pontos de descontinuidade ao longo da linha d'água.

No caso do primeiro, se trata de uma interferência causada pelo reflexo na parede de acrílico do modelo. Apesar desse problema, verificou-se após análise do vídeo, que os pontos próximos à parede, no lado esquerdo da imagem, são capazes de representar os valores máximos da linha d'água, portanto foram mantidos.

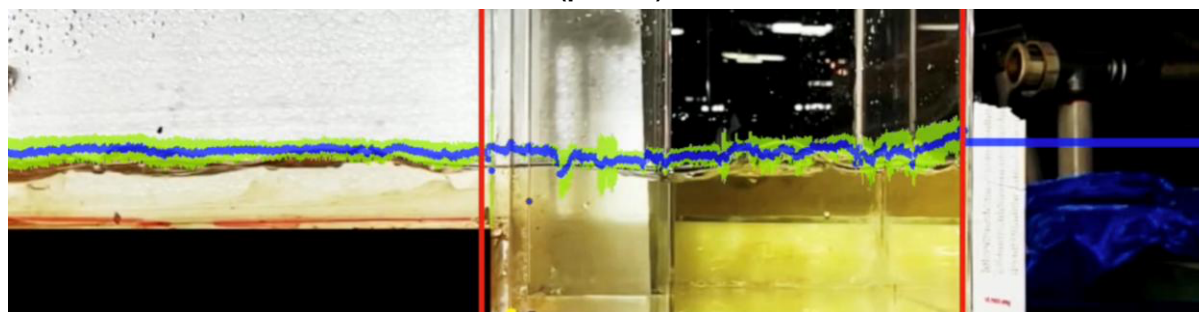
Já a segunda descontinuidade é causada pelo movimento de algumas partículas em suspensão abaixo da superfície do escoamento e, embora afete os resultados no trecho em questão, não impacta na avaliação das seções de interesse.

**Figura 48 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – C (afastado)**



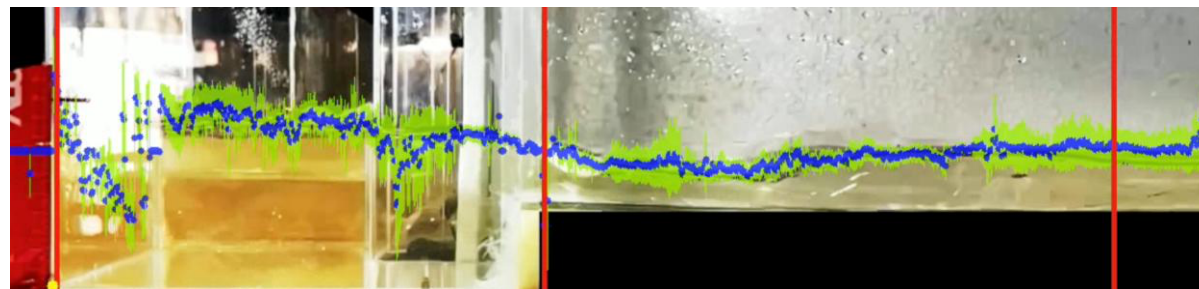
Fonte: Autor (2025).

**Figura 49 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – C (padrão)**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 50 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – C**



Fonte: Autor (2025).

Na saída da deflexão, pode-se observar uma queda na profundidade, com comportamento semelhante ao de emboque em um canal, do escoamento proveniente de um reservatório, como um vertedouro, por exemplo. Após essa queda, há um pequeno aumento de profundidade, que segue estável até o fim da estrutura. A Figura 51 ilustra essa situação.

**Figura 51 – Queda na profundidade na saída da deflexão – 1,58 L/s – 90° – C**



Fonte: Autor (2025).

Não são observadas ondas transversais intensas a jusante da deflexão, indicando que o colchão d'água formado pelo degrau e a soleira ajuda a estabilizar o fluxo, dissipando parte da energia cinética do escoamento.

A Tabela 9 apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados nas análises realizadas.

**Tabela 9 – Valores considerados nas análises – 1,58 L/s – 90° – C**

Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	2,7	2,34	0,75
2	3,7	1,71	0,47
3	11,0	0,58	0,09
4	7,1	0,90	0,18
5	7,4	0,86	0,17

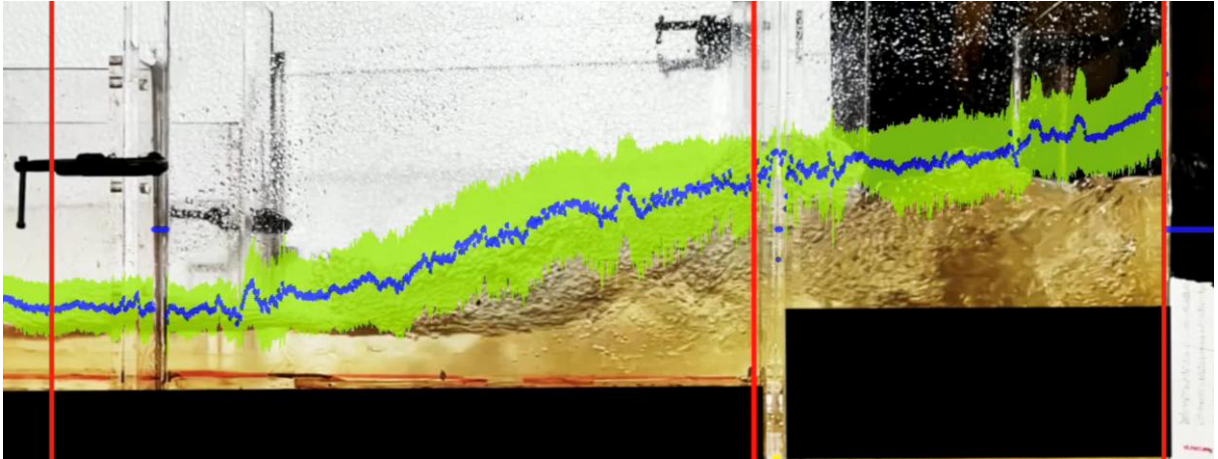
Fonte: Autor (2025).

Conforme citado anteriormente, os valores de profundidade sempre utilizam, como referência, o fundo do canal na seção em questão, portanto o ponto 3, cuja profundidade é de aproximadamente 11,0 cm, não está 7,3 cm acima do ponto 2, mas sim 2,3 cm visto que entre eles existe um degrau de 5 cm de altura. Dessa forma, descontando a altura do degrau, a profundidade varia pouco.

### 5.2.6 Geometria C (degrau a montante – soleira a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$

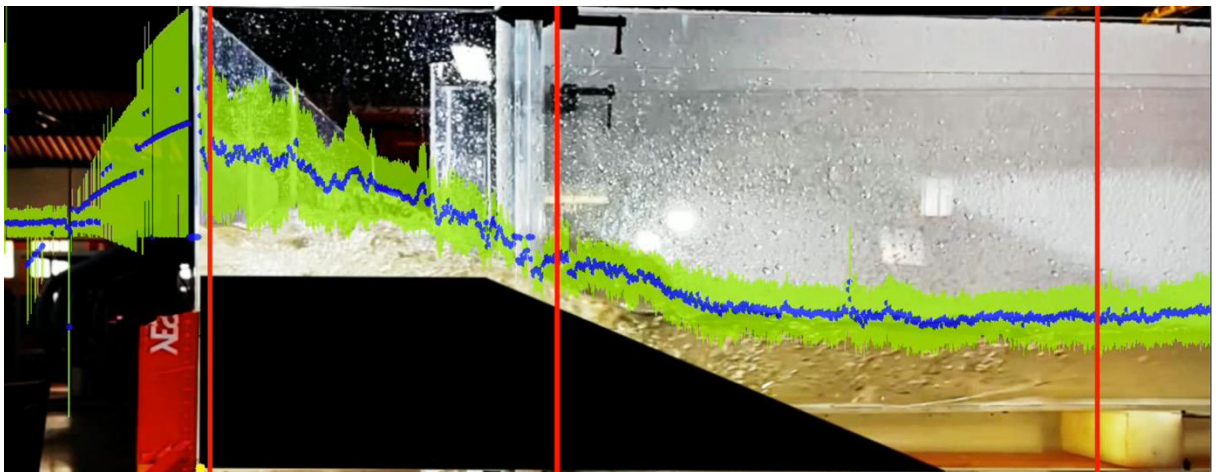
Para a vazão de  $9,50 \text{ L/s}$ , há a formação de ressalto hidráulico, afetando a linha d'água a montante da deflexão. A Figura 52 e a Figura 53 apresentam os vídeos de saída do programa a montante e a jusante da deflexão, respectivamente.

**Figura 52 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) –  $9,50 \text{ L/s} - 90^\circ - C$**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 53 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) –  $9,50 \text{ L/s} - 90^\circ - C$**



Fonte: Autor (2025).

As imagens mostram que, mesmo com o colchão d'água formado entre o degrau e a soleira, a variação de profundidade no escoamento causada pela deflexão é considerável e o ressalto hidráulico continua ocorrendo.

A Tabela 10, que apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados, permite concluir que a profundidade aumenta de  $4,6 \text{ cm}$

(ponto 1) para 24,0 cm no ponto 3, da ordem de 5 vezes maior (~520%). Esses valores são de 19,0 cm e 4 vezes maior (410%) se descontada a altura do degrau.

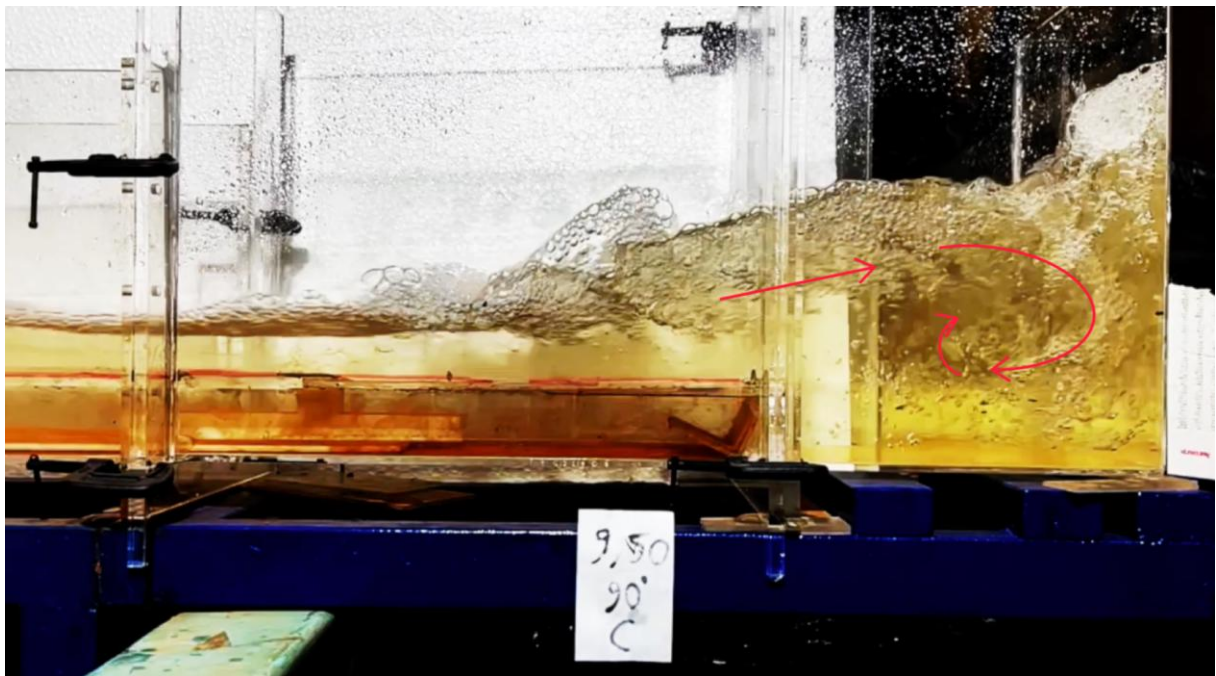
**Tabela 10 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – C**

Ponto	Valor considerado	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	Médio	4,6	1,37	2,04
2	Médio	13,1	0,48	0,43
3	Máximo	24,0	0,26	0,17
4	Médio	10,5	0,60	0,59
5	Médio	6,1	1,04	1,34

Fonte: Autor (2025).

Após a análise dos vídeos, foi possível observar o movimento das bolhas, que indica a existência de um padrão de espiral de circulação, conforme Figura 54, que apresenta a vista de montante.

**Figura 54 – Vórtice com padrão espiral de circulação montante – 9,50 L/s – 90° – C**

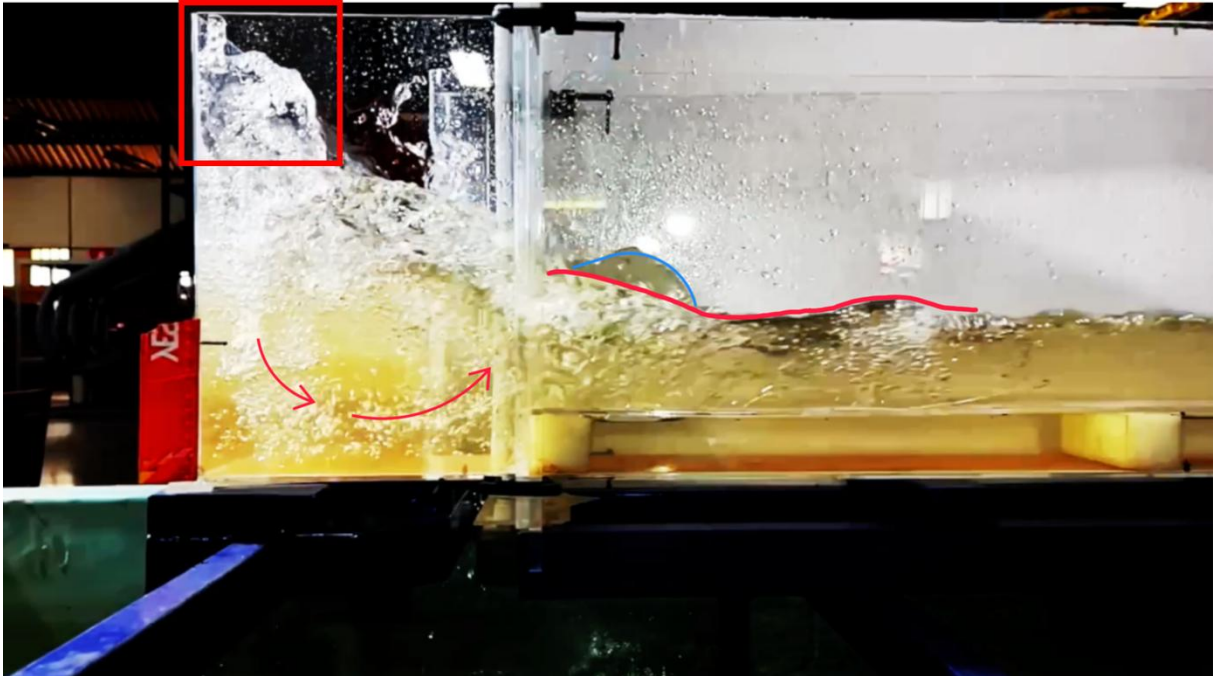


Fonte: Autor (2025).

Além disso, apesar de as profundidades da Tabela 10 não superarem a altura das paredes (35 cm), alguns respingos extravasaram o modelo pontualmente, devido ao impacto com a parede da deflexão. Também foi possível observar que a profundidade a jusante na parede interna em alguns momentos supera a da parede externa, ao contrário do que ocorre em todas as outras geometrias. Esse comportamento pode

estar associado à formação do padrão de circulação em espiral. Os fenômenos citados podem ser observados na vista de jusante, apresentada na Figura 55.

**Figura 55 – Vórtice com padrão espiral de circulação – 9,50 L/s – 90° – C**



Fonte: Autor (2025).

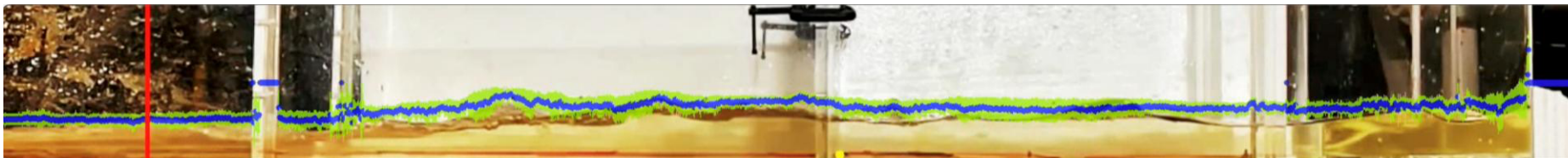
#### 5.2.7 Geometria D (fundo liso a montante – degrau a jusante) – $Q = 1,58 \text{ L/s} - 90^\circ$

A geometria D consiste em fundo liso na entrada e degrau na saída da deflexão. Novamente, para a vazão de 1,58 L/s foram necessárias filmagens com três enquadramentos diferentes (dois a montante e um de jusante) para captar todas as perturbações causadas no escoamento pela mudança de direção.

A Figura 56, a Figura 57 e a Figura 58 apresentam os vídeos de saída do programa a montante (afastado), a montante (distância padrão) e a jusante da deflexão, respectivamente, para a vazão de 1,58 L/s.

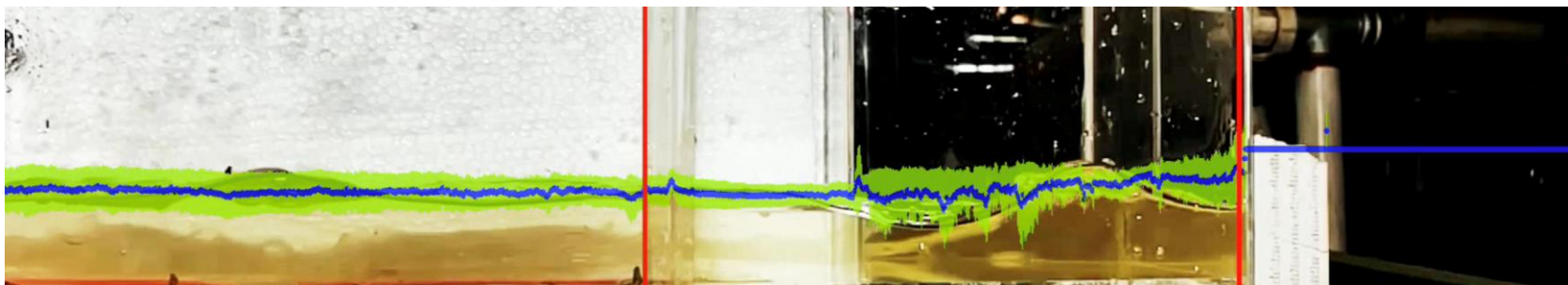
Para essa configuração, a linha d'água sofre influência da deflexão, levando a um aumento da profundidade a montante. Similarmente aos testes de mesma vazão para as geometrias A e C, esse aumento de profundidade não caracteriza um ressalto hidráulico, visto que o número de Froude é inferior a 1 em todas as seções de interesse, com exceção da última, conforme apresentado na Tabela 11.

**Figura 56 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – D (afastado)**



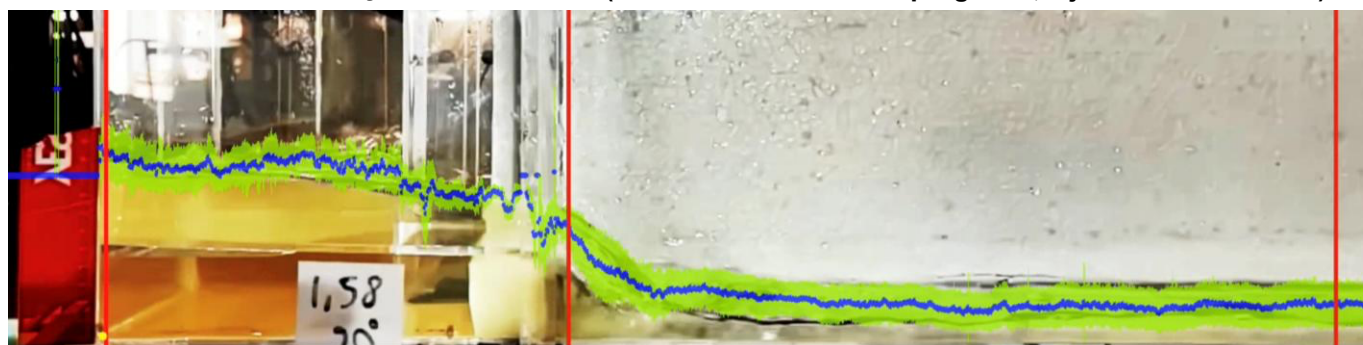
Fonte: Autor (2025).

**Figura 57 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – D (padrão)**



Fonte: Autor (2025).

**Figura 58 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 1,58 L/s – 90° – D**



Fonte: Autor (2025).

Após o aumento da profundidade, a linha d'água permanece aproximadamente constante até a deflexão. Na Figura 58, que apresenta a vista de jusante, pode-se observar um ponto de descontinuidade ao longo da linha d'água, causada pela junção entre as peças, que obstrui a linha de visão da câmera, afetando a detecção de movimento nessas áreas.

A Tabela 11 apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados nas análises realizadas.

**Tabela 11 – Valores considerados nas análises – 1,58 L/s – 90° – D**

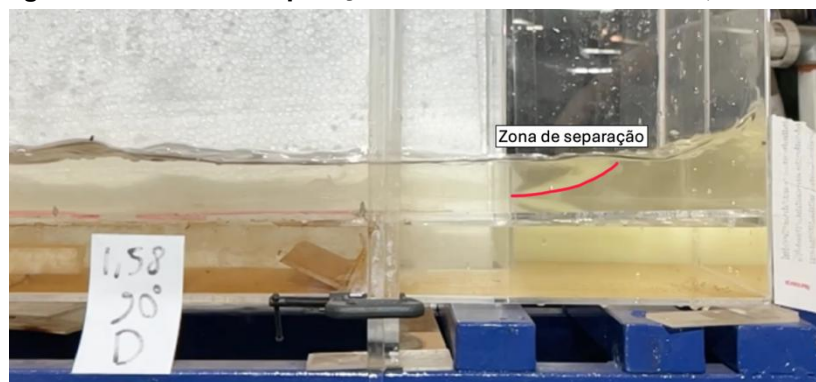
Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	3,3	1,93	0,56
2	4,0	1,59	0,42
3	5,1	1,24	0,29
4	6,2	1,03	0,22
5	1,8	3,44	1,35

Fonte: Autor (2025).

A partir da análise dos resultados, pode-se observar que, após o ponto 1, ocorre um aumento de profundidade, que, então, se mantém constante até a entrada da deflexão, com valor de aproximadamente 4,0 cm. Na deflexão ocorre variação de profundidade, fazendo com que o valor chegue a 5,1 cm, aproximadamente 50% maior do que a profundidade média de aproximação. A jusante a profundidade se estabiliza e é da ordem de 2 cm.

Assim como na geometria A, observou-se a formação de uma zona de separação do escoamento no lado interno da deflexão, conforme apresentado na Figura 59.

**Figura 59 – Zona de separação do escoamento – 90° – 1,58 L/s – D**



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 60, que apresenta a vista de jusante, é possível observar a separação do fluxo no degrau, juntamente com a formação de um vórtice de recirculação.

**Figura 60 – Descolamento do fluxo e vórtice de recirculação – 90° – 1,58 L/s – D**

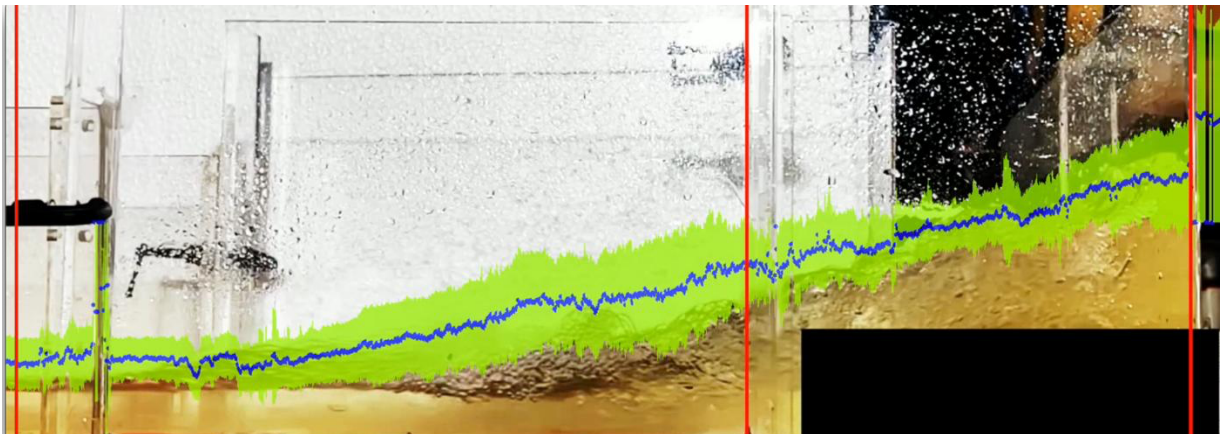


Fonte: Autor (2025).

#### 5.2.8 Geometria D (fundo liso a montante – degrau a jusante) – $Q = 9,50 \text{ L/s} - 90^\circ$

A Figura 61 apresenta os resultados de saída do programa a montante da deflexão, para a vazão de 9,50 L/s.

**Figura 61 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a montante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – D**

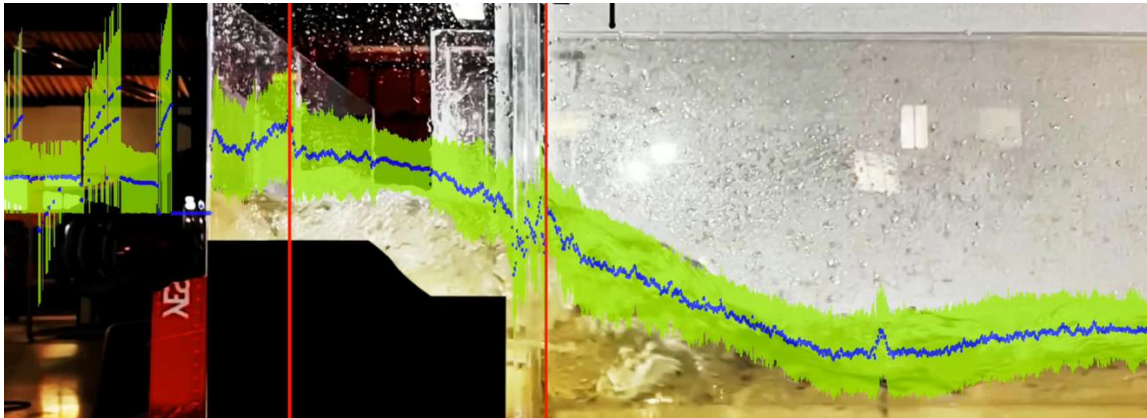


Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar que, para essa configuração, há a formação de ressalto hidráulico, afetando a linha d'água a montante da deflexão. O comportamento do escoamento a é similar ao da geometria A, que possui configuração similar na entrada da deflexão.

A Figura 62 apresenta os resultados de saída do programa a jusante deflexão.

**Figura 62 – Resultados da análise de detecção de movimento (resultados de saída do programa, a jusante da deflexão) – 9,50 L/s – 90° – D**



Fonte: Autor (2025).

A partir da imagem, é possível notar que ocorre uma descontinuidade nos resultados no trecho do degrau, assim como na vazão de 1,50L/s, por esse trecho coincidir com a junção entre as peças do canal. Para a vazão de 9,50L/s, o degrau introduz perturbações significativas a jusante da deflexão.

A Tabela 12 apresenta os valores de profundidade, velocidades ( $V$ ) e números de Froude ( $Fr$ ) considerados nas análises realizadas.

**Tabela 12 – Valores considerados nas análises – 9,50 L/s – 90° – D**

Ponto	Y (cm)	V (m/s)	Fr
1	4,6	1,38	2,06
2	10,4	0,61	0,60
3	18,1	0,35	0,26
4	16,3	0,39	0,31
5	7,0	0,90	1,09

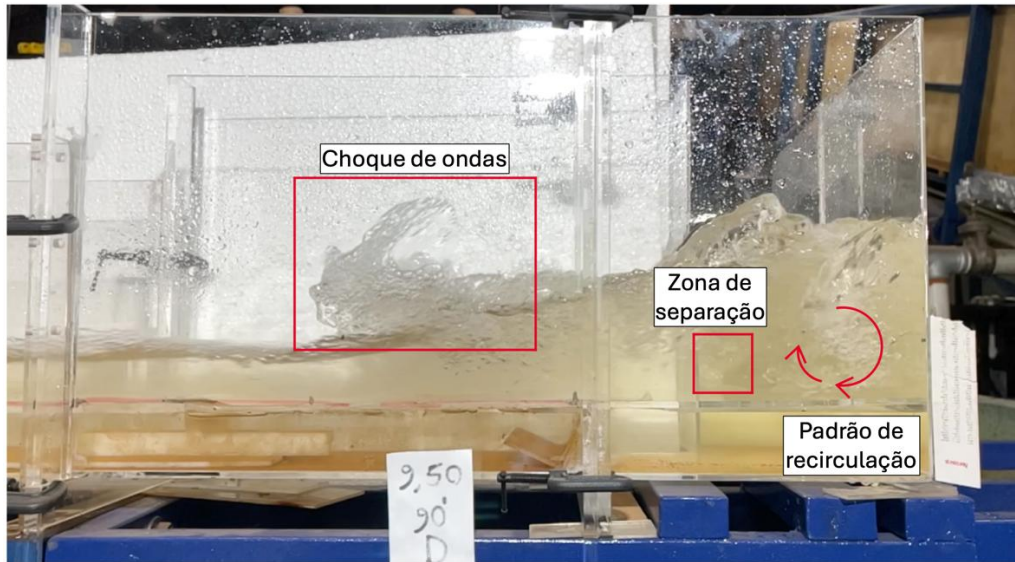
Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar que, entre as profundidades médias de aproximação (ponto 1 – 4,6 cm) e na deflexão (ponto 3 – 18,1 cm) ocorre um aumento considerável, sendo a profundidade no ponto 3 da ordem de 4 vezes (~390%) a do ponto 1.

A vazão de 9,50 L/s apresentou alguns fenômenos já observados em outras geometrias, tais como a zona de separação, choque de ondas com o fluxo de montante, grande movimentação de bolhas com padrão de recirculação e lançamento de respingos com eventuais extravasamentos.

A Figura 63 apresenta a vista de montante, evidenciando alguns desses fenômenos.

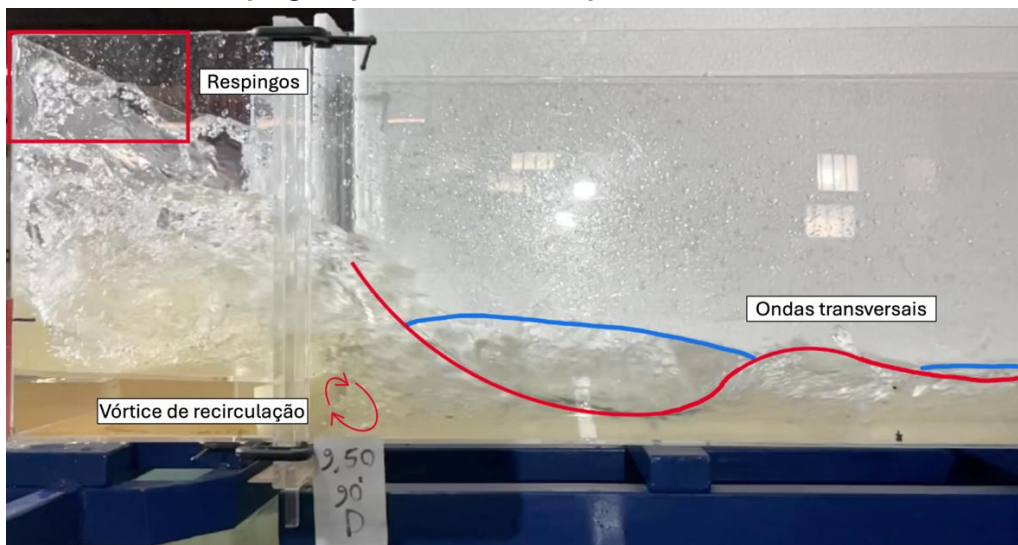
**Figura 63 – Vista de montante da deflexão com destaque para o choque de ondas, zona de separação e padrão de recirculação – 9,50 L/s – 90° – D**



Fonte: Autor (2025).

A Figura 64 apresenta a vista de jusante, destacando o vórtice de recirculação causado no degrau, as ondas transversais de jusante e os respingos que causam extravasamento, pontualmente.

**Figura 64 – Vista de jusante da deflexão com destaque para o vórtice de recirculação, as ondas transversais e os respingos que extravasam as paredes do canal – 9,50 L/s – 90° – D**



Fonte: Autor (2025).

### 5.3 Influência da geometria no comportamento do escoamento

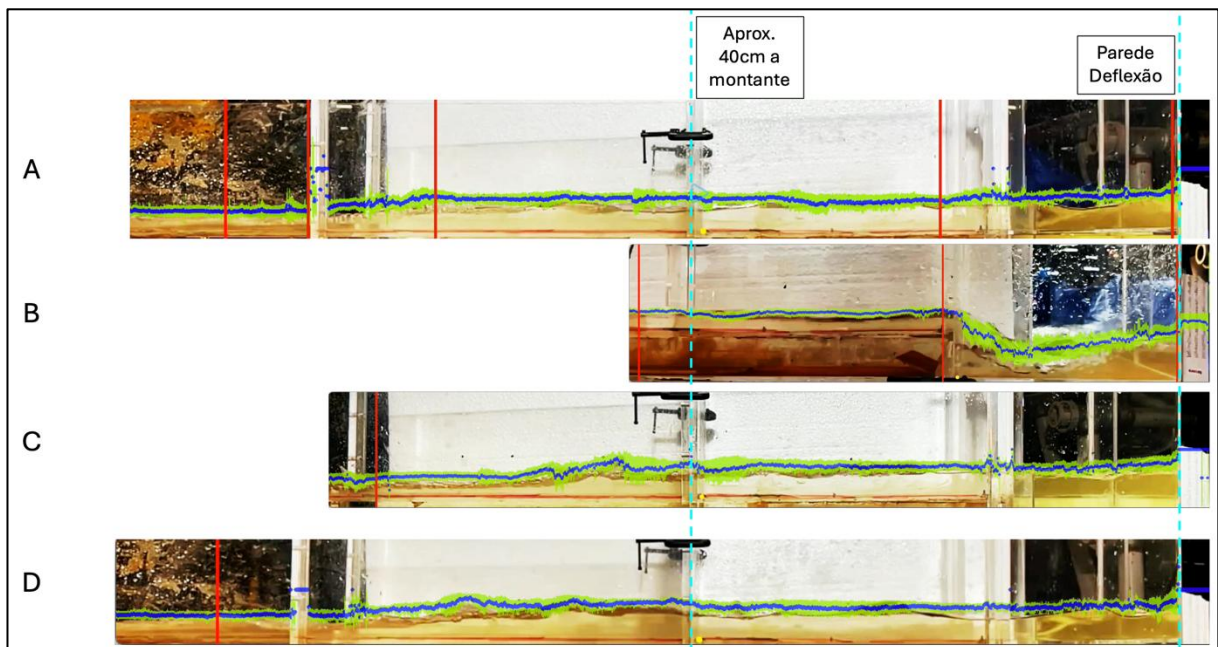
Ao longo dos testes e após a avaliação dos resultados, foi possível observar que as diferentes configurações geométricas resultaram em mudanças significativas no comportamento do escoamento em cada caso.

A seguir, é apresentado como cada configuração geométrica (A, B, C e D) influencia o comportamento do escoamento a montante e a jusante da deflexão, para o ângulo de 90°.

#### 5.3.1 Influência a montante da deflexão

A Figura 65 apresenta as vistas de montante para as quatro geometrias após processamento no programa de detecção de movimento, para a vazão de 1,58L/s.

**Figura 65 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a montante da deflexão – 90° –  $Q = 1,58\text{L/s}$**



Fonte: Autor (2025).

A partir das imagens, pode-se observar que as perturbações causadas pela deflexão no escoamento de montante variam consideravelmente de acordo com a geometria adotada.

Um dos parâmetros afetados é a distância em que as perturbações se propagam. As linhas verticais pontilhadas representam a parede da deflexão e o ponto localizado a aproximadamente 40cm de distância, a montante da entrada da deflexão.

A geometria B é a que possui a menor perturbação a montante, com a linha d'água permanecendo aproximadamente constante ao longo do canal, até a queda no degrau da entrada da mudança de direção.

A geometria C apresentou propagação das perturbações (caracterizadas pelo aumento de profundidade de escoamento) a distâncias um pouco superiores à marca de 40cm.

As geometrias A e D apresentaram resultados semelhantes entre si, porém, as perturbações atingem uma distância a montante um pouco maior para a geometria A, que corresponde a fundo liso na entrada e na saída da deflexão.

Diante do exposto, para a vazão de 1,58L/s, pode-se concluir que a propagação das perturbações a montante aumenta na seguinte sequência: geometrias B, C, D e A.

A mesma avaliação foi realizada para a vazão de 9,50L/s, conforme apresentado na Figura 66. No caso dessa vazão, dadas as maiores variações de linha d'água, a análise é dificultada.

Para a geometria B, que consiste em degrau a montante e fundo liso a jusante, observa-se que a distância influenciada pela deflexão é a menor, dado que o ressalto hidráulico ocorre mais próximo à entrada do trecho de mudança de direção.

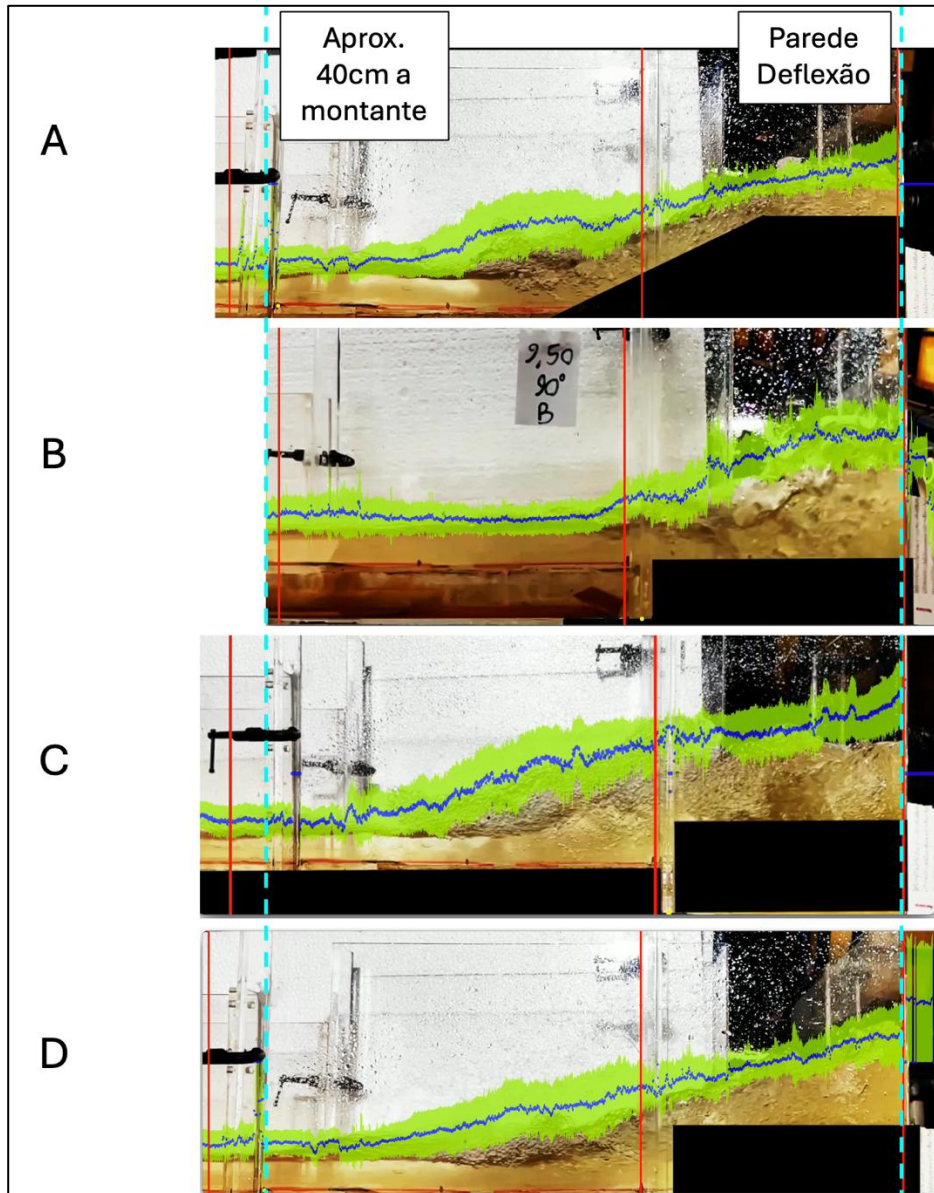
Para as demais geometrias, pode-se notar que os comportamentos são muito semelhantes, com as perturbações se propagando até aproximadamente o mesmo ponto.

Uma hipótese que explicaria esse comportamento é a ausência de degraus nas geometrias A e D. No caso da geometria C, por mais que exista um degrau, o fato de haver uma soleira a jusante faz com que se crie um colchão d'água no trecho de deflexão, que acaba atuando como o fundo do canal, visto que o escoamento se dá

acima desse colchão d'água. Dessa forma, o único caso no qual o escoamento interpreta a presença do degrau é na geometria B.

Diante do exposto, para a vazão de 9,50L/s, pode-se concluir que a propagação das perturbações a montante é significativamente menor para a geometria B.

**Figura 66 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a montante da deflexão – 90° – Q = 9,50L/s**



Fonte: Autor (2025).

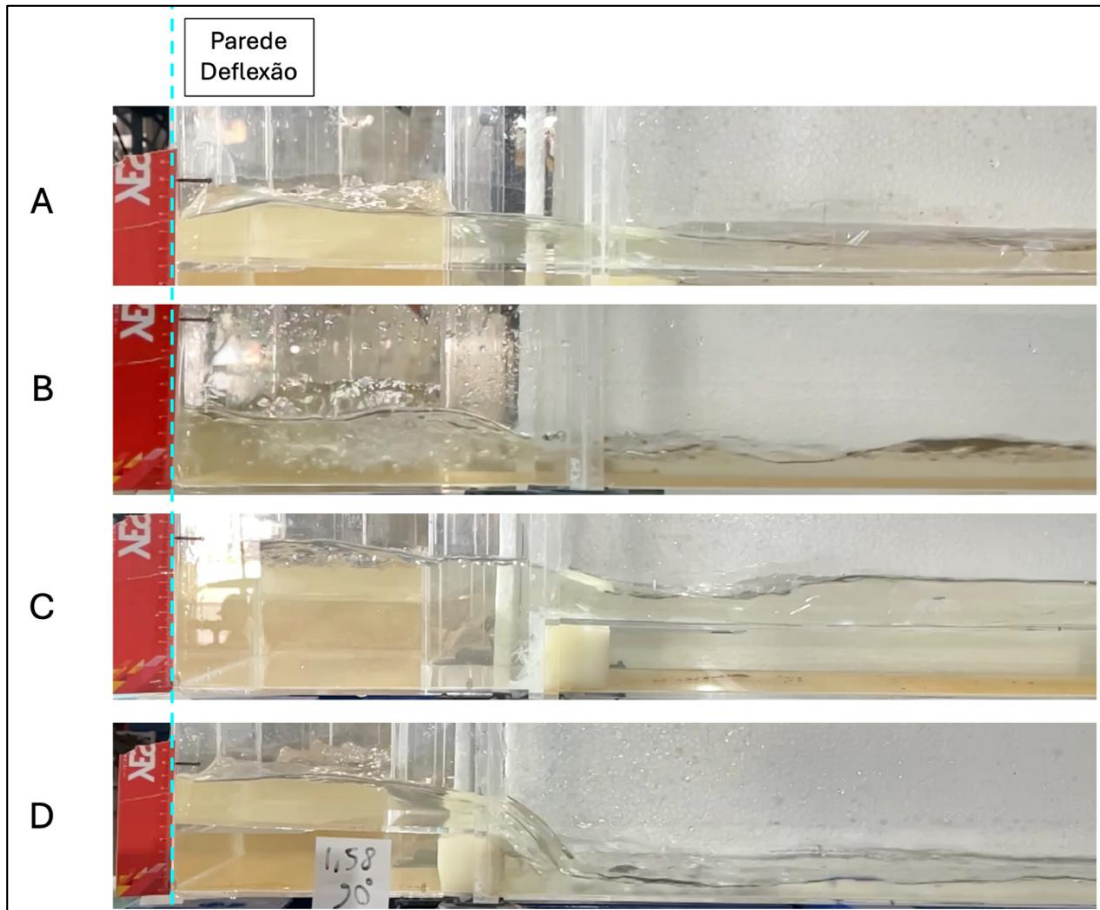
### 5.3.2 Influência a jusante da deflexão

Também foram avaliadas as propagações das ondas a jusante da deflexão conforme cada configuração geométrica (A, B, C e D) para o ângulo de 90°. Para essa avaliação,

foram utilizadas as imagens pré-processamento, por facilitarem a análise de formação de ondas transversais.

A Figura 67 apresenta as vistas de jusante para as quatro geometrias, para a vazão de 1,58L/s.

**Figura 67 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a jusante da deflexão – 90° –  $Q = 1,58\text{L/s}$**



Fonte: Autor (2025).

A partir da observação das imagens, é possível concluir que, para a vazão de 1,58L/s, o comportamento do escoamento a jusante da deflexão apresenta maior formação de ondas transversais na geometria B (degrau a montante e fundo liso a jusante).

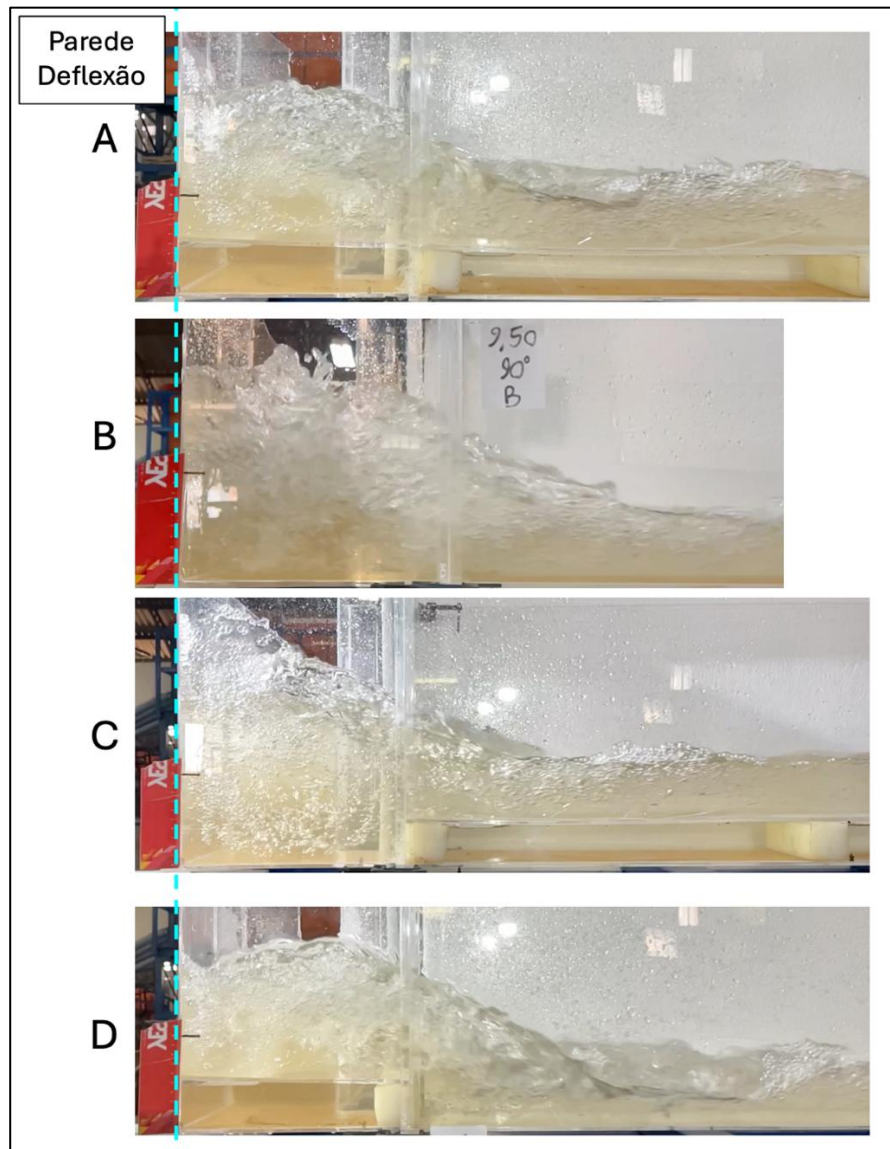
A geometria C (degrau a montante e soleira a jusante) apresentou a menor formação de ondas transversais. Para esse caso, inicialmente existe uma queda na profundidade, com comportamento semelhante ao de emboque em um canal,

conforme descrito no item 5.2.5. Após esse ponto, a lâmina d'água permanece praticamente constante, sem muitas perturbações.

As geometrias A e D possuem comportamentos intermediários às demais, com formação de ondas ligeiramente maior na D. Diante do exposto, para a vazão de 1,58L/s, pode-se concluir que a propagação das perturbações a jusante aumenta na seguinte sequência: geometrias C, A, D e B.

A mesma avaliação foi realizada para a vazão de 9,50L/s, conforme apresentado na Figura 68.

**Figura 68 – Análise comparativa da influência de cada geometria no comportamento do escoamento a jusante da deflexão – 90° –  $Q = 9,50\text{L/s}$**



Fonte: Autor (2025).

É possível observar que o comportamento do escoamento a jusante da deflexão é similar entre as geometrias A, B e D. No caso da geometria C, ocorrem menores perturbações a jusante da deflexão. Esse comportamento é evidenciado pela lâmina d'água mais constante em relação às demais geometrias. Vale ressaltar que, apesar de a geometria C apresentar menor formação de ondas, ainda existem variações consideráveis na profundidade de escoamento em todas as configurações para a vazão de 9,50L/s.

De forma análoga à vazão de 1,58L/s, a geometria B apresentou maiores perturbações a jusante, seguida pelas geometrias D e A, respectivamente.

É importante notar que, apesar de a configuração B gerar maiores perturbações de modo geral, se caracterizando por variações mais bruscas na lâmina d'água, a geometria D apresentou ondas transversais mais bem definidas, com variações mais localizadas, entre a as paredes interna e externa do canal, conforme apresentado na Figura 72.

**Figura 69 – Formação de ondas transversais – vista superior, geometria D – 60° – Q = 6,96L/s**



Fonte: Autor (2025).

Diante do exposto, para a vazão de 9,50L/s, pode-se concluir que a propagação das perturbações a jusante aumenta na seguinte sequência: geometrias C, A, D e B.

### 5.3.3 Propagação de perturbações originárias da deflexão

A partir dos resultados apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2, pode-se concluir que, se tratando da geração de perturbações no escoamento, as geometrias B e C apresentaram os melhores desempenhos, para montante e jusante, respectivamente.

Dessa forma, o uso de degraus na entrada de mudanças de direção pode fazer com que as perturbações causadas pela deflexão no escoamento a montante sejam minimizadas, se concentrando no trecho de mudança e reduzindo o desgaste no fundo do canal a montante. Adicionalmente, o uso da geometria C, com degrau na entrada e soleira na saída da mudança de direção, pode auxiliar a minimizar as perturbações a jusante da deflexão.

## 5.4 Influência do ângulo de deflexão no comportamento do escoamento

Além da influência das geometrias no escoamento, também se faz necessária a avaliação do impacto do ângulo de mudança de direção no comportamento do fluxo.

Foram traçados os perfis de linha d'água dos testes realizados para cada geometria, buscando isolar os efeitos do ângulo de deflexão no escoamento, considerando as vazões de 1,58L/s e 9,50L/s. Em todos os gráficos, o eixo X representa as colunas de *pixels* na imagem e, o eixo Y, a profundidade média registrada em cada coluna.

Vale ressaltar que os enquadramentos podem variar levemente para cada geometria/vazão.

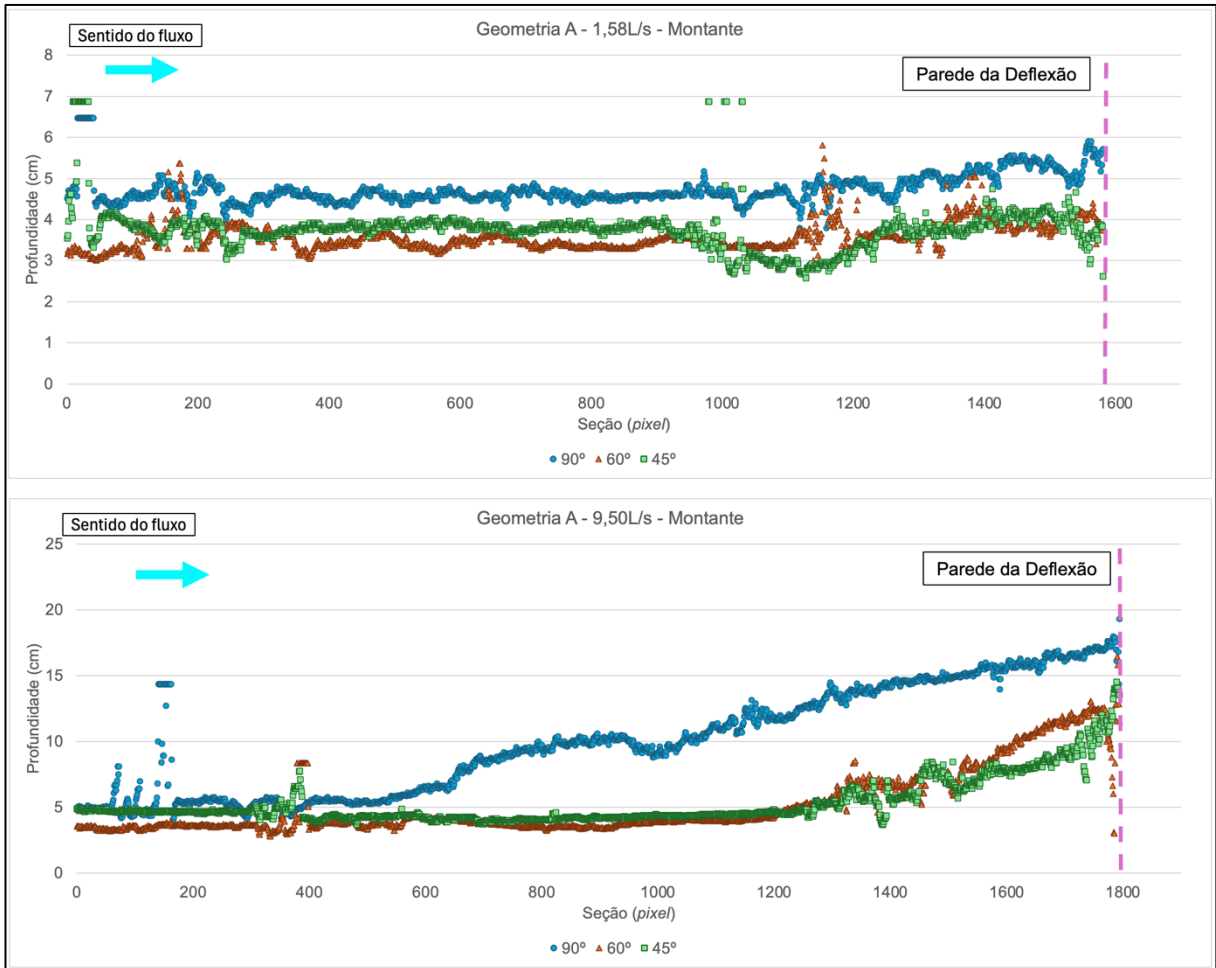
Diante do exposto, os perfis de profundidade apresentados a seguir devem ser interpretados como representativos das tendências e comportamentos gerais da linha d'água em cada teste e não dos valores absolutos atingidos pelo escoamento em pontos específicos.

Portanto, essa avaliação permite comparar os comportamentos gerais dos perfis de cada geometria e, não necessariamente, as profundidades registradas.

### 5.4.1 Geometria A

A Figura 70 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de montante da geometria A (fundo liso a montante e a jusante). A partir da avaliação dos gráficos, é possível notar que o ângulo de deflexão influencia consideravelmente o comportamento da linha d'água.

**Figura 70 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria A – Montante**



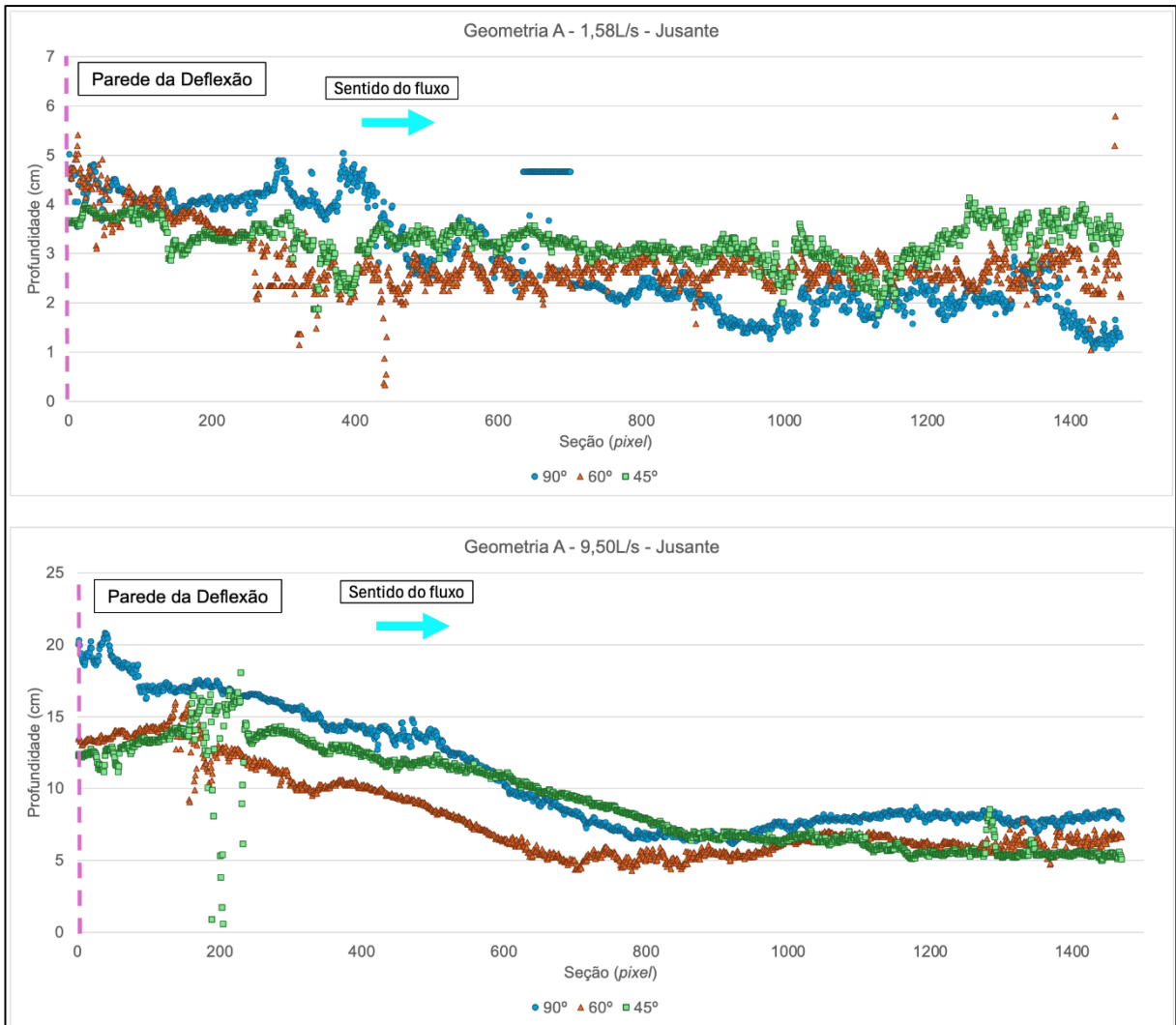
Fonte: Autor (2025).

Para a vazão de 1,58L/s, observa-se que o ângulo de 90° levou a uma maior profundidade de escoamento a montante da mudança de direção, enquanto os demais ângulos tiveram comportamentos semelhantes entre si.

Para a vazão de 9,50L/s, observa-se que a perturbação causada pela deflexão a montante, se propaga por uma distância muito maior para o ângulo de 90° do que para os ângulos de 45° e 60°.

A Figura 71 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de jusante da geometria A. Observa-se que, para a vazão de 1,58L/s, a linha d'água para o ângulo de 90° sofreu maiores variações do que para os demais ângulos.

**Figura 71 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria A – Jusante**



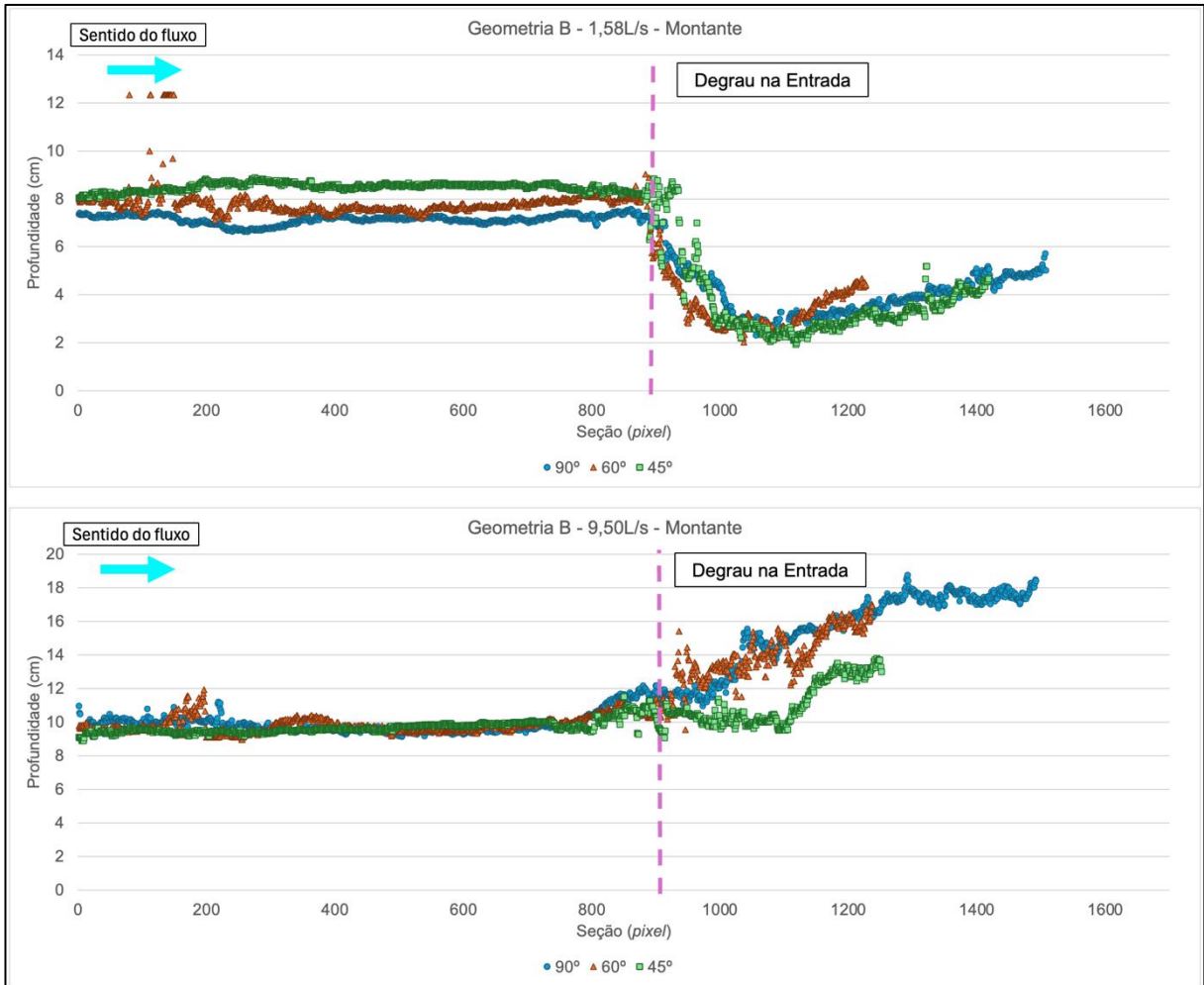
Fonte: Autor (2025).

Para a vazão de 9,50L/s, pode-se observar que há uma mudança no padrão de variação de profundidade para cada ângulo. Para o ângulo de 90°, a maior profundidade ocorre mais próxima à parede da deflexão, enquanto para os ângulos de 60° e 45°, os picos de profundidades são deslocados para jusante conforme o ângulo se suaviza. Esse comportamento também foi observado nas demais geometrias, conforme apresentado nos itens a seguir.

### 5.4.2 Geometria B

A Figura 72 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de montante da geometria B (degrau a montante e fundo liso a jusante). Para a vazão de 1,58L/s, pode-se observar que os comportamentos são semelhantes e as diferenças de profundidade são pequenas.

**Figura 72 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria B – Montante**



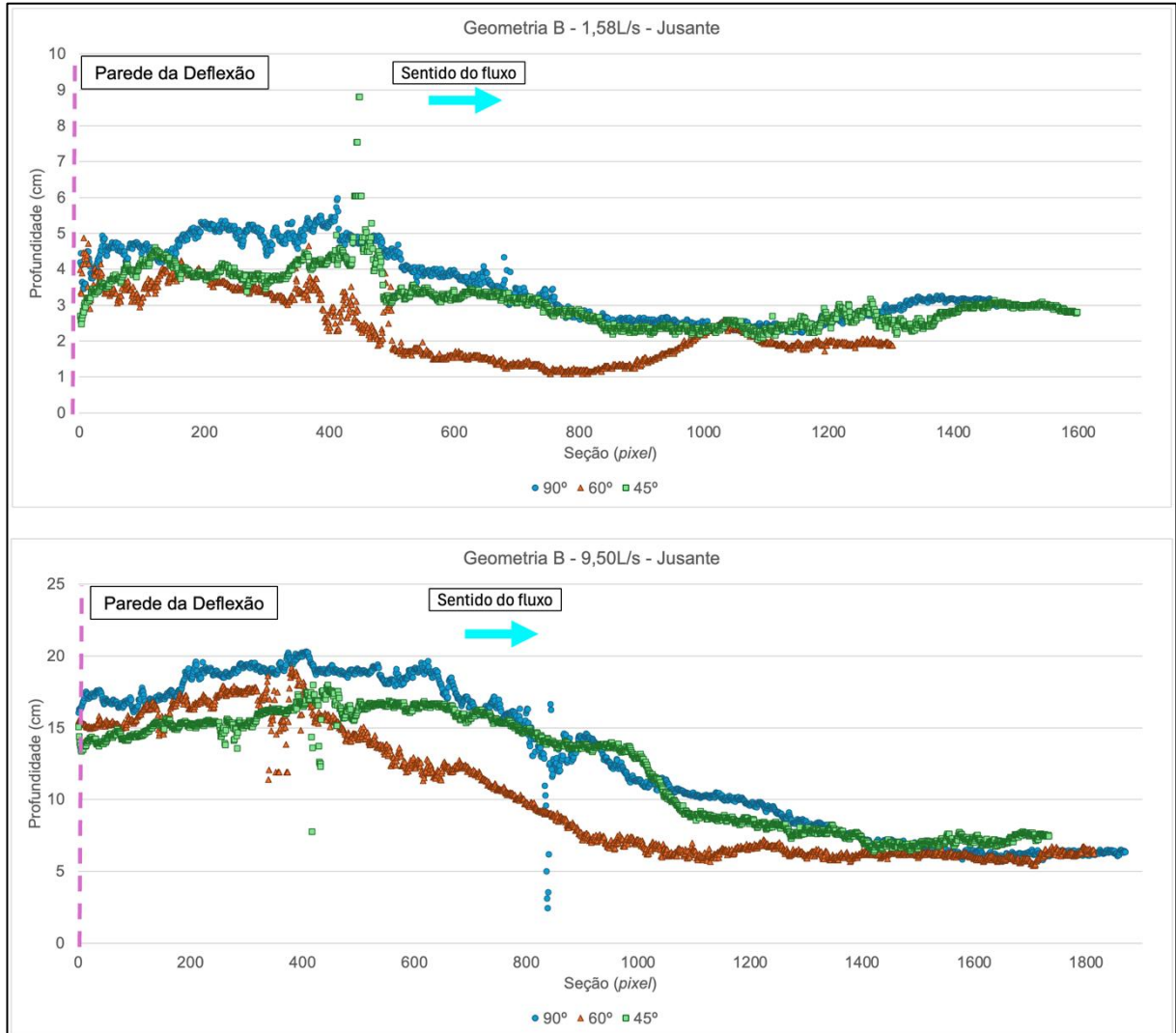
Fonte: Autor (2025).

Para a vazão de 9,50L/s, o comportamento do escoamento a montante do degrau é praticamente idêntico para os três ângulos de mudança de direção, mas a profundidade na deflexão aumenta com o aumento do ângulo.

Pode-se observar que os perfis terminam em pontos diferentes. Isso é esperado, visto que, de acordo com a geometria, a posição do vértice da deflexão varia, além de que os enquadramentos foram ajustados para melhor englobar todo o fenômeno.

A Figura 73 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de jusante da geometria B.

**Figura 73 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria B – Jusante**



Fonte: Autor (2025).

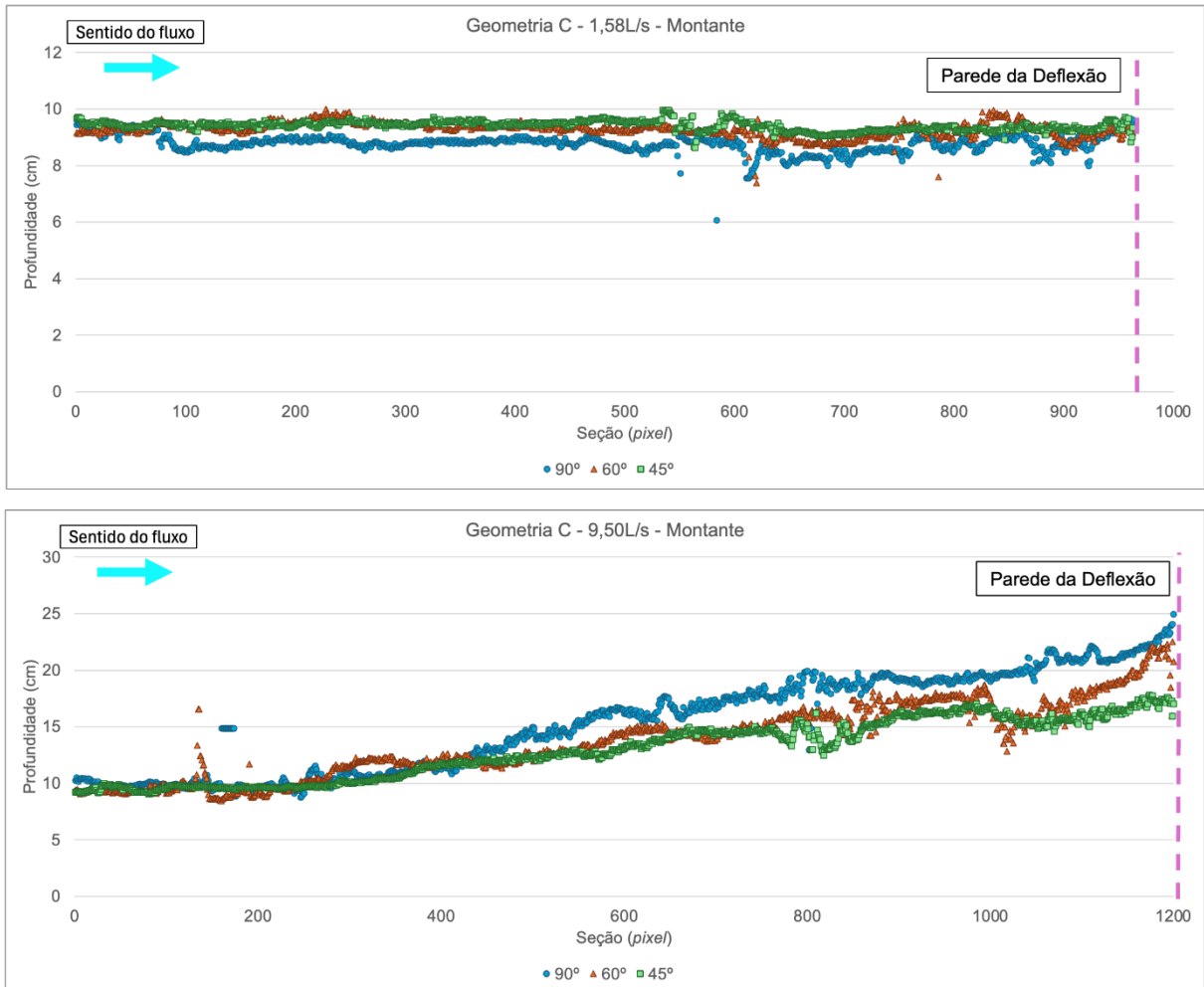
No caso da geometria B, pode-se observar que o padrão de comportamento se mantém de modo geral, com o pico de variação de profundidade ocorrendo antes para o ângulo de 90° e mais a jusante para 45°.

Entretanto, pode-se notar uma diferença na tendência dos valores correspondentes ao ângulo de 60°. Hipóteses que podem explicar esse comportamento são as pequenas variações no enquadramento, já citadas anteriormente, ou o fato de que o ângulo da propagação das ondas varia com cada geometria.

### 5.4.3 Geometria C

A Figura 74 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de montante da geometria C (degrau a montante e soleira a jusante).

**Figura 74 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria C – Montante**



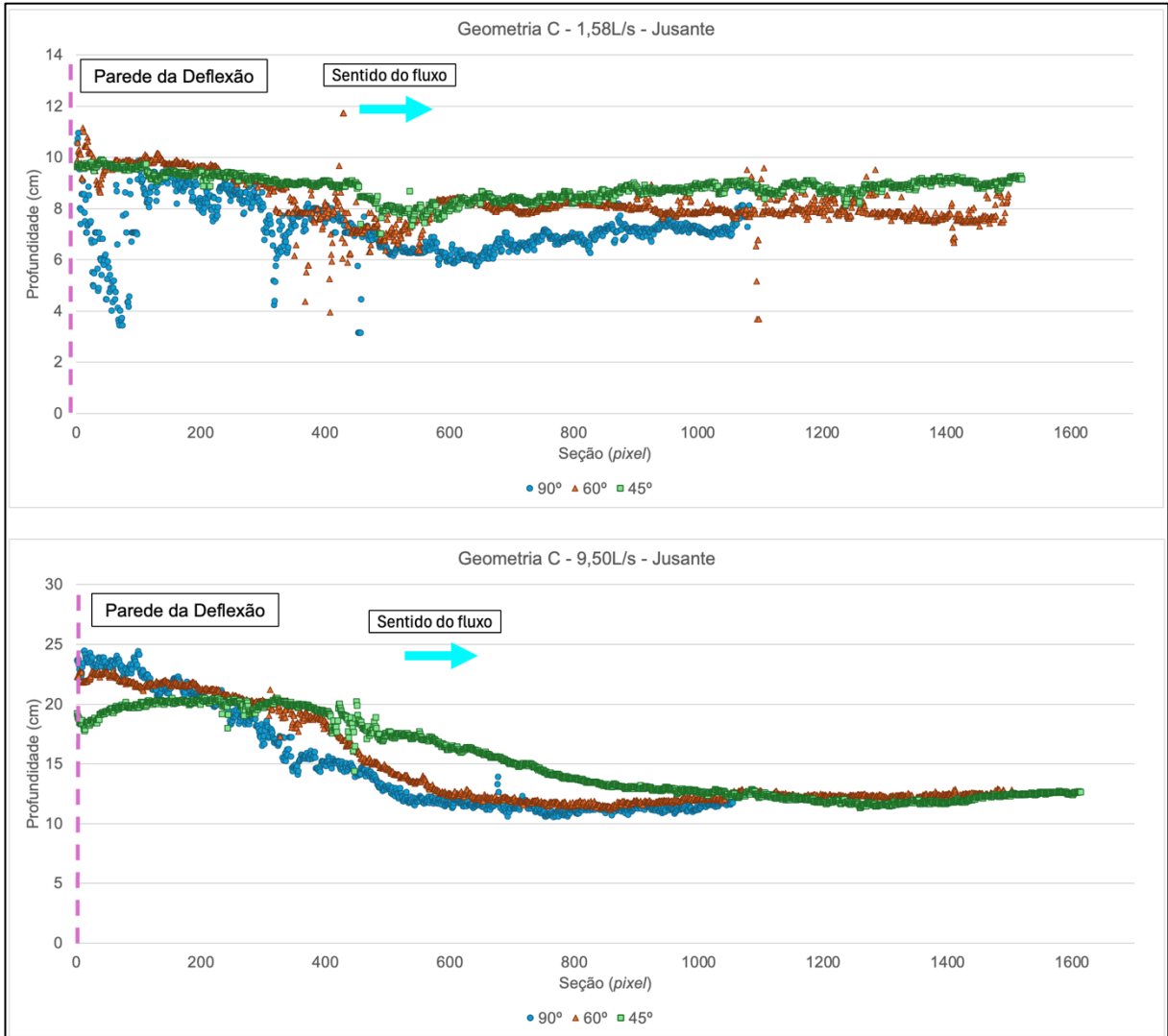
Fonte: Autor (2025).

A partir da análise da imagem, pode-se concluir que os resultados dos três ângulos foram muito semelhantes para a vazão de 1,58L/s, que é um comportamento esperado, visto que o colchão d'água formado no trecho de deflexão ajuda a absorver grandes variações na linha d'água.

No caso da vazão de 9,50L/s, dada a sua magnitude, as diferenças entre as linhas d'água são mais evidentes, sendo a variação de profundidade maior para o ângulo de 90°, intermediária para 60° e menor para 45°.

A Figura 75 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de jusante da geometria C.

**Figura 75 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria C – Jusante**



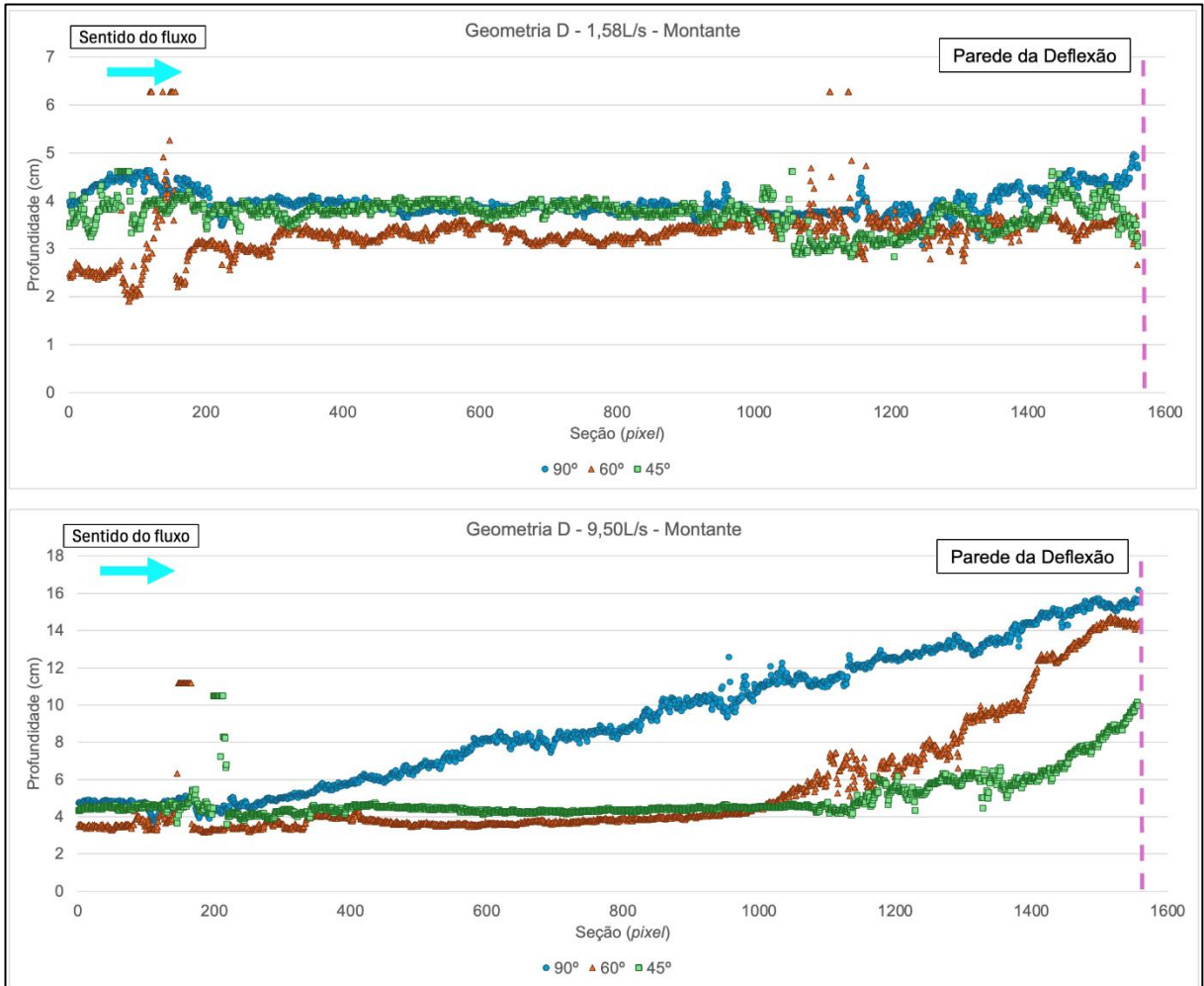
Fonte: Autor (2025).

Para o trecho de jusante, observa-se que, quanto menor o ângulo de deflexão, mais deslocado para jusante se torna o ponto de profundidade máxima e menor é essa profundidade. Isto é, o ângulo de 90° gera uma profundidade maior na deflexão em si, porém minimiza as perturbações a jusante da mudança de direção. Esse comportamento é mais facilmente observável na vazão de 9,50L/s.

#### 5.4.4 Geometria D

A Figura 76 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de montante da geometria D (fundo liso a montante e degrau a jusante).

**Figura 76 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria D – Montante**



Fonte: Autor (2025).

O comportamento do escoamento a montante para a geometria D é semelhante ao da geometria A. Esse comportamento é esperado, dado que ambas as geometrias apresentam fundo liso na entrada da mudança de direção. Observa-se que, quanto maior o ângulo de deflexão, maior a distância de propagação das perturbações para montante.

A Figura 77 apresenta os perfis da linha d'água para o trecho de jusante da geometria D.

**Figura 77 – Perfis da linha d'água para cada ângulo de deflexão – Geometria D – Jusante**



Fonte: Autor (2025).

Para o trecho de jusante, os perfis são semelhantes quando se tratando da vazão de 1,58L/s, mas, para a vazão de 9,50L/s, é possível observar o deslocamento do ponto de profundidade máxima para jusante, conforme observado nas geometrias A e C.

Diante do exposto, é possível concluir que o ângulo de deflexão influencia consideravelmente o comportamento da linha d'água em todas as geometrias e que essa influência é mais evidente para a vazão de 9,50L/s.

De modo geral, quanto mais suave o ângulo da mudança de direção, maior a distância em que as perturbações originárias da deflexão se propagam para jusante e menor a profundidade máxima observada.

Uma hipótese que pode explicar esse comportamento está relacionada à perda de carga provocada pelo fenômeno no escoamento. Quanto mais suave a mudança de direção, menos energia cinética é transformada em carga de posição, fazendo com que o escoamento se propague por uma distância maior ao longo da parede externa do canal, atingindo uma profundidade máxima menor.

Adicionalmente, se tratando do trecho de montante, os ângulos maiores (60° e 90°) também causaram maiores perturbações, levando a aumentos de profundidade a distâncias consideráveis a montante da deflexão, para uma dada geometria.

### **5.5 Profundidades máximas causadas no escoamento pela mudança de direção**

Conforme apresentado nos resultados, a mudança de direção causa uma variação de profundidade considerável no escoamento. Essa variação de profundidade varia em intensidade e posição de acordo com a geometria e ângulo da deflexão, além da vazão do escoamento.

A seguir, serão exploradas as variações de profundidade de acordo com os resultados dos testes, utilizando como referência no ponto 3 as profundidades máximas, determinadas pela soma da profundidade média e o desvio padrão em cada ponto.

Os gráficos apresentados indicam a profundidade de entrada na mudança de direção e a profundidade máxima atingida pelo escoamento na deflexão. Para tal, considerou-se como profundidade de entrada e profundidade máxima de sobrelevação aquelas observadas nos pontos 1 e 3, respectivamente.

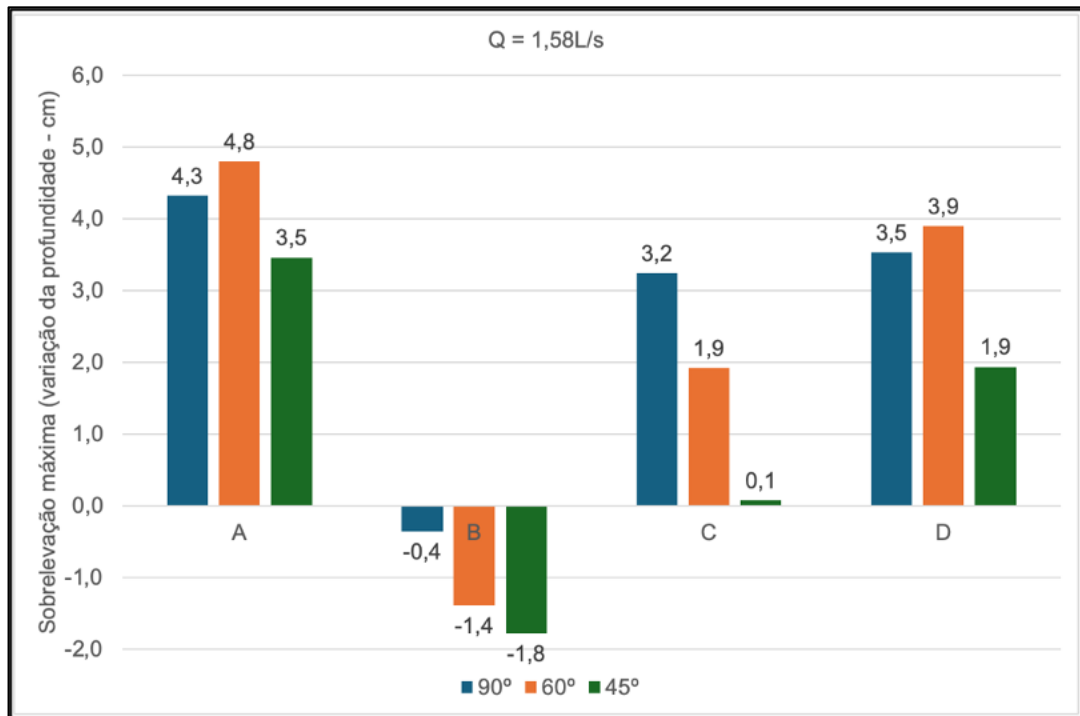
A razão pela qual não foi utilizado o ponto 2 como referência para a profundidade de entrada é que a influência causada pela variação de profundidade, por meio da propagação de perturbações a montante, afeta o registro da profundidade nesse ponto.

#### **5.5.1 Variação de profundidade máxima registrada – $Q = 1,58\text{L/s}$**

A Figura 78 apresenta a variação de profundidade máxima na deflexão registrada em cada teste, para a vazão de 1,58L/s. Conforme citado anteriormente, considerou-se,

para o cálculo, a variação entre as profundidades no ponto 3 e no ponto 1, para cada ângulo de mudança de direção.

**Figura 78 – Variação de profundidade máxima causada pela deflexão para cada teste – Q = 1,58L/s**



Fonte: Autor (2025).

De acordo com o gráfico, foi possível observar que a profundidade máxima diminuiu no caso da geometria B, isso ocorre devido à presença do degrau na entrada da deflexão, ou seja, a profundidade máxima não é suficiente para superar a altura do degrau somada à profundidade de montante.

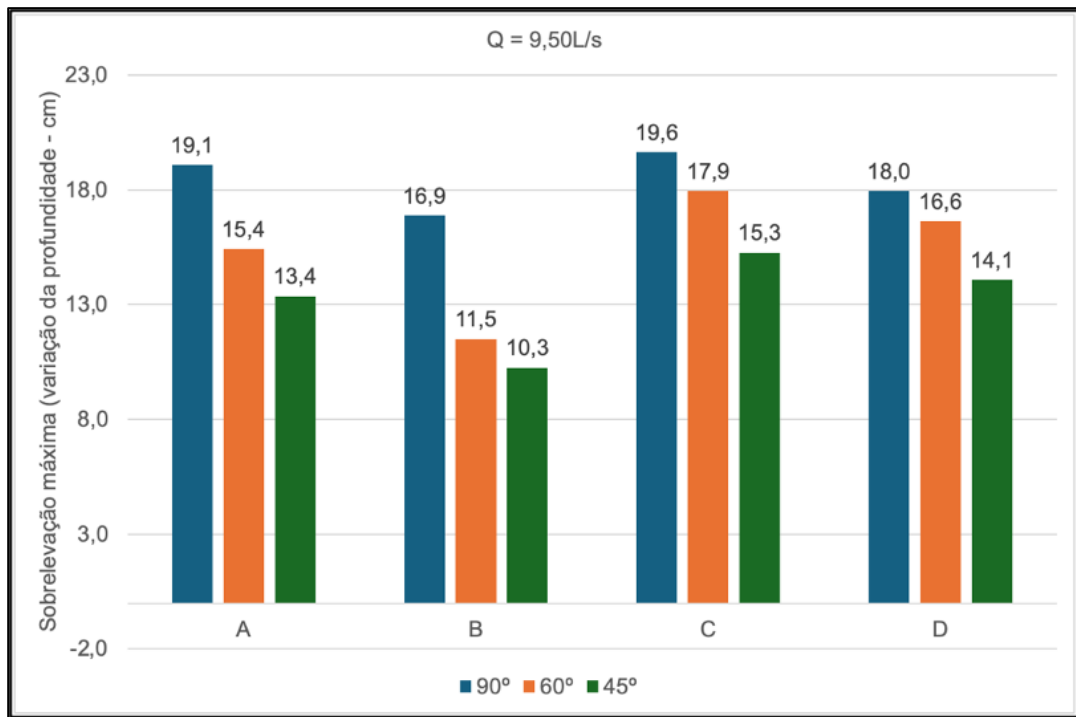
Adicionalmente, observou-se que a geometria A, que corresponde a fundo liso na entrada e na saída da mudança de direção, apresentou a maior variação de profundidade, ou seja, requereria uma altura de paredes maior para conter o escoamento sem transbordamento.

Dentre as demais configurações, a geometria C apresentou uma redução considerável da variação de profundidade máxima, se comparada à geometria A. Entretanto, conforme apresentado a seguir, a vazão tem grande influência no comportamento do escoamento.

### 5.5.2 Variação de profundidade máxima registrada – Q = 9,50L/s

A Figura 79 apresenta a variação de profundidade máxima registrada em cada teste para a vazão de 9,50L/s.

**Figura 79 – Variação de profundidade máxima causada pela deflexão para cada teste – Q = 9,50L/s**



Fonte: Autor (2025).

A partir do gráfico, pode-se concluir que a geometria B continua sendo a mais eficiente sob o ponto de vista de borda livre, entretanto, ao contrário dos testes para a vazão de 1,58L/s, os resultados referentes a 9,50L/s indicaram a geometria C como a menos eficiente (maior variação de profundidade). Isso ocorreu para todos os ângulos de deflexão.

Adicionalmente, os gráficos corroboram a observação de que menores ângulos de deflexão, de modo geral, levam a uma menor variação de profundidade e maior propagação de perturbações a jusante, sobretudo no formato de ondas transversais, conforme apresentado no item 5.4.

De posse dessas informações, pode-se correlacionar as características observadas com situações práticas para escolha da geometria mais adequada. Por exemplo, ao se tratar de uma deflexão a montante de um ponto de deságue do canal em terreno

natural, pode-se considerar adotar uma geometria que minimize as perturbações a jusante, por mais que isso leve a maiores alturas de parede, como é o caso da geometria C.

Como outro exemplo, no caso de uma estrutura na qual a altura de paredes a montante é um fator limitante, pode-se adotar a geometria B, que leva a uma menor variação de profundidade e pode até minimizar o desgaste no revestimento imediatamente a montante da deflexão.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme os resultados apresentados, o programa desenvolvido teve bom desempenho na estimativa da profundidade média com base na detecção de movimento no vídeo.

Foi possível observar a linha d'água de forma clara na maior parte das imagens, com algumas oscilações em pontos específicos, inerentes ao aparato experimental e natureza do fenômeno estudado.

Foram observadas diversas perturbações decorrentes da deflexão, com variações significativas para cada geometria. Dentre os fenômenos mais comuns encontram-se vórtices de recirculação, formação de ondas transversais, zonas de separação e de ressaltos hidráulicos.

As razões entre as profundidades de aproximação (adotadas como o ponto 1 em todas as geometrias) e as profundidades máximas na deflexão variaram entre 2 e 5, a depender da geometria adotada, evidenciando que variações de profundidade causadas por deflexões com ângulo de  $90^\circ$  são significativas e variam muito de acordo com as condições de contorno.

Foi possível definir a configuração geométrica de mudança de direção mais eficiente do ponto de vista de borda livre, ou seja, aquela que leva à menor variação de profundidade do escoamento. Conforme citado anteriormente, a geometria B apresentou o melhor resultado se tratando de borda livre, além de minimizar a propagação de perturbações no trecho de montante. A geometria C apresentou os melhores resultados do ponto de vista de propagação de perturbações no trecho de jusante da deflexão.

Para a vazão de 1,58L/s, que corresponderia a  $0,50\text{m}^3/\text{s}$  ou  $0,33\text{m}^3/\text{s.m}$  em um protótipo hipotético, os resultados indicaram um comportamento próximo ao esperado, com a geometria C apresentando ótimos resultados tanto sob o ponto de vista de variação de profundidade quanto de propagação de perturbações.

Para a vazão de 9,50L/s, ou 3,00m<sup>3</sup>/s ou 2,00m<sup>3</sup>/s.m em um protótipo hipotético, o comportamento mudou, mantendo bons resultados no quesito de propagação de perturbações, mas apresentando maior variação de profundidade do que as demais geometrias, ao contrário do esperado antes dos testes.

Dessa forma, foi possível concluir que, além da configuração geométrica e do ângulo de deflexão, a vazão também possui influência significativa no comportamento, conforme mostrado pelos resultados da geometria C.

Em geral, observou-se que as profundidades máximas atingidas nas deflexões (pontos 3) aumentam muito em relação àquelas de aproximação (pontos 1), podendo atingir valores da ordem de 4 vezes (410%) maiores, como no caso da geometria C, para o ângulo de 90° e vazão de 9,50 L/s. Em contrapartida, para a vazão de 1,58 L/s, a profundidade no ponto 3 chega a ser inferior à do ponto 1, no caso da geometria B, por exemplo, e apresentando poucas variações nas demais geometrias.

Os diferentes comportamentos do escoamento decorrentes das geometrias distintas permitem que elas sejam adotadas, na prática, conforme as particularidades, objetivos e limitações existentes projetos de dimensionamento hidráulico de canais. Essas particularidades podem ser exemplificadas como restrições de altura de paredes a montante ou jusante da deflexão ou a proximidade da deflexão de outros pontos de interesse na estrutura de drenagem, como o ponto de deságue ou uma mudança de direção subsequente.

Foi possível observar que a forma dos perfis de linha d'água se altera de acordo com o ângulo de deflexão, se tornando mais abatido (maior comprimento, menor altura) quanto mais suave for a deflexão. Esse comportamento se mostrou consistente para a maior parte dos testes.

Recomenda-se, em futuras pesquisas, a avaliação de configurações adicionais, como degrau na entrada e na saída de deflexão, geometria que não foi avaliada devido à limitação de recursos na presente pesquisa. Adicionalmente, o programa desenvolvido nesse trabalho para avaliação da linha d'água possui espaço para melhorias. Dentre elas, recomenda-se a implementação da opção de detecção de

valores máximos, e não só médios, a partir do mesmo princípio de funcionamento atualmente empregado. Também pode ser sugerida como melhoria de metodologia o emprego de mais de uma segunda câmera para filmar cada ângulo com um equipamento específico. Isso possibilitaria não remover a câmera do local após cada teste de modo a se manter exatamente o mesmo enquadramento, visto que, por mais que tenham sido tomados cuidados para se obter o mesmo enquadramento em todos os testes, podem ocorrer pequenas variações.

A expectativa é de que seja possível utilizar e expandir o programa desenvolvido para a presente pesquisa em outros trabalhos na área da modelagem hidráulica. Visando contribuir para tal expansão, o código está apresentado no Apêndice B e foi disponibilizado para implementação na ferramenta CPH-ViFA, apresentada por Ribeiro (2023), visando expandir suas capacidades e aplicações e contribuir para o desenvolvimento de um *software* cada vez mais robusto.

Por fim, vale ressaltar que, embora possam auxiliar no dimensionamento de estruturas hidráulicas em situações práticas de projeto, os resultados apresentados nessa pesquisa foram obtidos especificamente para as geometrias e condições de contorno testadas. Por esta razão, esses resultados podem não necessariamente representar de forma exata o comportamento do escoamento em estruturas reais.

## REFERÊNCIAS

ADRIAN, R. J. Twenty years of particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, n. 39, p. 159-169, Julho, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13029: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Rio de Janeiro, 2017. 7 p.

APPLE INC. Obter ajuda para usar a câmera do iPhone. Disponível em: <https://support.apple.com/pt-br/111872>. Acesso em: 19 jan. 2025.

AZEVEDO NETTO, J. M., FERNÁNDEZ, M. F., **Manual de hidráulica**. Nona edição. São Paulo: Blucher, 2015.

BARATA, André L. **Modelagem hidráulica de caixas de passagem em descidas de água**. 2018. Monografia de graduação – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Terceira edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

BELTRAMI, G. M.; DEL GUZZO, A.; REPETTO, R. A Simple Method to Regularize Supercritical Flow Profiles in Bends. **Journal of Hydraulic Research**, n. 45 (6), p. 773-786, 2007.

BENTLEY SYSTEMS; DYHOUSE, G.; HATCHETT, J.; BENN, J. **Floodplain Modeling Using HEC-RAS**, Bentley Institute Press, Exton, Pennsylvania, 2007.

BLANCKAERT, K.; DE VRIEND, H. J. Secondary flow in sharp open-channel bends. **Journal of Fluid Mechanics**, n. 498, p. 353-380, Janeiro, 2004.

BLANCKAERT, K.; DE VRIEND, H. J. Turbulence characteristics in sharp open-channel bends. **Physics of Fluids**, n. 17, Abril, 2005.

CANNY, J. A computational approach to edge detection. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, vol. PAMI-8, n. 6, p. 679-698, Novembro, 1986.

CETESB. **Drenagem urbana: manual de projeto**. Terceira edição. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.

CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow: an introduction**. Segunda edição. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 1999.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydraulics**. Segunda edição. New York: McGraw-Hill, 1988.

DI CRISTO, C. Particle Imaging Velocimetry and Its Applications in Hydraulics: A State-of-the-Art Review. In: ROWIŃSKI, P. (Ed.). **Experimental Methods in Hydraulic Research**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p. 49-66. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17475-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17475-9_3). Acesso em: 2 jan. 2025.

EAKET, J.; HICKS, F.; PETERSON, A. Use of Stereoscopy for Dam Break Flow Measurement. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 1, p. 24-29, Janeiro, 2005.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.; LEYLEGIAN, J. C. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Oitava edição. Rio de Janeiro: GEN/LTC, 2010.

HAGER, W. **Spillways. Shockwaves and Air Entrainment: Review and Recommendations**. Paris: ICOLD – International Commission on Large Dams, 1992.

HAN, S. S.; RAMAMURTHY, A. S.; BIRON, P. M. Characteristics of flow around open channel 90° bends with vanes. **Journal of irrigation and drainage engineering**, n. 137, p. 668-676, Outubro, 2011.

JENSEN, K. D. Flow measurements. **Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering**, Vol. XXVI, n. 4, p. 400-419, Outubro – Dezembro, 2004.

LJUBIČIĆ, R.; IVETIĆ, D. Open-channel flow rate measurement estimation using videos. [S. l.], 2023.

NOVAK, P.; GUINOT, V.; JEFFREY, A.; REEVE, D. E. **Hydraulic modelling – an introduction: principles, methods and applications**. Londres: Spon Press, 2010.

PFISTER, M.; HAGER, W. History and Significance of the Morton Number in Hydraulic Engineering. **Journal of Hydraulic Engineering**, n. 140 (5), Maio, 2014.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC, 2006.

RAMAMURTHY, A. S.; ASCE, F.; HAN, S. S.; BIRON, P. M. Three-Dimensional Simulation Parameters for 90° Open Channel Bend Flows. **Journal of Computing in Civil Engineering**, n. 27 (3), Maio/Junho, 2013.

RIBEIRO, M. E. C. **Escoamento em Escada de Degraus de Pequeno Porte em Modelo Físico Reduzido**. 2018. Monografia de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

RIBEIRO, M. E. C. **Modelagem física da utilização de soleiras entre trechos liso e em degraus em uma descida de água: uma análise fotográfica**. 2023. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

STEFFLER, P. M.; ASCE, A. M.; RAJARATNAM, N.; PETERSON, A. W. Water Surface at Change of Channel Curvature. **Journal of Hydraulic Engineering**, n. 111 (5), Maio, 1985.

TAVEIRA-PINTO, F.; PROENÇA, M. F.; MAIA, R.; PÊGO, J. P.; LIMA, M. M.; NEVES, A. C.; CARVALHO, E. 20 anos de experiência em aplicações com anemometria laser

Doppler. **3<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente**, p. 129-149, Janeiro, 2008.

THANDVESWARA, B. S.; SEETHARAMIAH, K. Some Characteristics of Flow Around a 90° Open Channel Bend. **La Houille Blanche**, n. 57 (1), p. 43-48, 1971.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). **Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators**. Engineering monograph n° 25. Washington, D.C.: United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1984.

VAN BALEN, W.; UIJTTEWAAL, W. S. J.; BLANCKAERT, K. Large-eddy simulation of a curved open-channel flow over topography. **Physics of Fluids**, n. 22, Julho, 2010.

YEH, Y.; CUMMINS, H. Z. Localized fluid flow measurements with an He–Ne laser spectrometer. **Applied Physics Letters**, Vol. 4, p. 176-178, Junho, 1964.

YU, D.; LEE, J. H. W.; WONG, C. K. C. Stormwater Overflow in Stepped Channel. **Journal of Hydro-environment Research**, n. 2 (2), p. 119-128, Outubro, 2008.

ZIVKOVIC, Z. Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction. **17<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition**, n. 2 (2), p.28-31, Setembro, 2004.

ZIVKOVIC, Z.; VAN DER HEIJDEN, F. Efficient Adaptive Density Estimation per Image Pixel for the Task of Background Subtraction. **Pattern Recognition Letters**, n. 27 (7), p.773-780, Maio, 2006.

ZNAMENSKAYA, I.; SYSOEV, N.; DOROSHCHENKO, I. Animations Analysis in Experimental Fluid Dynamics. **Scientific Visualization**, n. 4 (13), p. 66-75, [S.I.], 2021.

## APÊNDICE A – Exemplos de vídeos exportados pelo programa

No link a seguir estão disponibilizados exemplos de vídeos exportados pelo programa após o processamento.

Link: [bit.ly/Apendice\\_A](https://bit.ly/Apendice_A)

Os arquivos estão nomeados de acordo com o experimento, no formato “vazão – ângulo – geometria – enquadramento” conforme apresentado a seguir:

- 1-58-60-B.mp4 – vazão de 1,58 L/s, ângulo de 60°, geometria B, enquadramento de montante;
- 1-58-60-D-J.mp4 – vazão de 1,58 L/s, ângulo de 60°, geometria D, enquadramento de jusante;
- 1-58-90-C-afastado.mp4 – vazão de 1,58 L/s, ângulo de 90°, geometria C, enquadramento afastado de montante;
- 9-50-60-A.mp4 – vazão de 9,50 L/s, ângulo de 60°, geometria A, enquadramento de montante;
- 9-50-60-A-J.mp4 – vazão de 9,50 L/s, ângulo de 60°, geometria A, enquadramento de jusante;
- 9-50-90-C.mp4 – vazão de 9,50 L/s, ângulo de 90°, geometria C, enquadramento de montante.

## **APÊNDICE B – Código do programa em linguagem Python**

No link a seguir está disponibilizado o código do programa desenvolvido para realizar as análises dos vídeos.

Link: [bit.ly/Apendice\\_B\\_Codigo](https://bit.ly/Apendice_B_Codigo)