

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PADRÕES DE
ESCOAMENTO E DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM
RESERVATÓRIOS RETANGULARES RASOS:
INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DOS CANAIS DE ENTRADA E
DE SAÍDA**

Daniel Augusto de Miranda

Orientadores: Doutor António Heleno Cardoso

Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Doutora Márcia Maria Lara Pinto Coelho

Tese aprovada em sessão pública para obtenção dos Graus de Doutor em
Engenharia Civil (IST-ULisboa)

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG)

Qualificação atribuída pelo júri: Aprovado com distinção

2019

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PADRÕES DE
ESCOAMENTO E DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM
RESERVATÓRIOS RETANGULARES RASOS:
INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DOS CANAIS DE ENTRADA E DE SAÍDA**

Daniel Augusto de Miranda

Orientadores: Doutor António Heleno Cardoso
Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves
Doutora Márcia Maria Lara Pinto Coelho

**Tese aprovada em sessão pública para obtenção dos Graus de Doutor em
*Engenharia Civil (IST-ULisboa)***

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG)

Qualificação atribuída pelo júri: Aprovado com distinção

Júri

Doutora Márcia Maria Lara Pinto Coelho, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil;

Doutor Márcio Benedito Baptista, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil;

Doutor Geraldo de Freitas Maciel, Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil;

Doutor António Heleno Cardoso, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa;

Doutor Jorge de Saldanha Gonçalves Matos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa;

Doutor José Junji Ota, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Instituição financiadora: FCT
2019

Daniel Augusto de Miranda

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PADRÕES DE
ESCOAMENTO E DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM
RESERVATÓRIOS RETANGULARES RASOS:
INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DOS CANAIS DE
ENTRADA E DE SAÍDA**

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

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientadora: Prof.^a Dra. Márcia Maria Lara Pinto Coelho

Orientadora: Dra. Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Orientador: Prof. Dr. António Heleno Cardoso

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

T266s

Miranda, Daniel Augusto de.

Análise experimental e numérica de padrões de escoamento e de deposição de sedimentos em reservatórios retangulares rasos [recurso eletrônico] : influência do posicionamento dos canais de entrada e saída/ Daniel Augusto de Miranda. - 2019.

1 recurso online (407 f. : il., color.) : pdf.

Orientadores: Márcia Maria Lara Pinto Coelho, Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves, António Heleno Cardoso.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 209-407.

Bibliografia: f. 204-208.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Escoamento turbulento - Teses. 4. Reservatório - Sedimentação - Teses. 5. Análise numérica - Teses. I. Coelho, Márcia Maria Lara Pinto. II. Alves, Elsa. III. Cardoso, António Heleno. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

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

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise Experimental e Numérica de Padrões de Escoamento e de Deposição de Sedimentos Em Reservatórios Retangulares Rasos: Influência do Posicionamento dos Canais de Entrada e de Saída

DANIEL AUGUSTO DE MIRANDA

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profa MÁRCIA MARIA LARA PINTO COELHO

Prof. ANTÔNIO HELENO CARDOSO - Orientador IST

Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA

Prof. JORGE DE SALDANHA GONÇALVES MATOS

Prof. JOSÉ JUNJI OTA

Prof. GERALDO DE FREITAS MACIEL

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador

Versão Final aprovada por

Prof. Márcia Maria Lara Pinto Coelho
Orientadora

Belo Horizonte, 28 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Sinto-me no dever de creditar essa conquista àqueles que estiveram desde o início ao meu lado neste desafio, ajudando-me direta ou indiretamente. São tantos que poderia escrever outra tese se fosse citar nominalmente cada pessoa.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, o grande engenheiro do Universo, por me permitir trilhar esse caminho árduo, porém, de muito aprendizado.

À minha querida esposa, Talita Fernanda das Graças Silva, pelos inúmeros conselhos, pelo suporte científico sempre que precisei, pela amizade, amor e compreensão. Você é o maior presente que Deus já me concedeu!

À minha mãe, por ser meu grande exemplo de vida e de inspiração, além de ser minha maior incentivadora para seguir sempre em frente e buscar ser cada dia um melhor profissional e ser humano. Ao meu pai, por sempre compartilhar comigo cada vitória e por ter sido fundamental na minha educação. Mãe e pai, vocês são minhas referências de caráter e de valores!

Ao meu irmão Allyson, minhas cunhadas Bárbara, Bruna e Cristiane, e minha sogra Graça, por fazerem parte da minha família e por torcerem pelo meu sucesso.

À Prof.^a Márcia Lara, minha orientadora brasileira e conselheira em cada etapa desse projeto tão importante para minha carreira. Meu muito obrigado por sua irretocável dedicação e profissionalismo, desde as revisões do meu texto de forma minimalista e cuidadosa, até cada palavra de incentivo. Sem sua colaboração, esse caminho seguramente seria bem mais tortuoso. Sua confiança em meu trabalho faz-me buscar sempre o melhor e torna-me um profissional mais motivado a cada dia. Sou seu grande admirador e tenho imenso orgulho em contar a quem quiser ouvir que você me orientou.

Ao Prof. António Heleno Cardoso, meu orientador português e igualmente grande conselheiro. Sou muito privilegiado por ter podido aprender consigo um pouco de seu vasto conhecimento e por ter trabalhado próximo a um dos melhores engenheiros que já conheci. Grande exemplo de profissional, ser humano de mais alto valor e grande incentivador. Muito obrigado por seu empenho e compromisso de colaborar para minha formação como pesquisador/investigador.

À Dr.^a Elsa Alves, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), minha coorientadora portuguesa, só tenho a agradecer pela paciência, por seus conselhos e pelo zelo que teve comigo desde o primeiro dia que cheguei a Lisboa para minha jornada científica. Meu muito obrigado por tudo!

Aos professores Márcio Benedito Baptista, Aloysio Portugal Maia Saliba, Nilo de Oliveira Nascimento e Luiz Rafael Palmier, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, à Prof.^a Silvia Maria Alves Corrêa Oliveira, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, ao Prof. José Junji Ota, da Universidade Federal do Paraná, ao Prof. Geraldo de Freitas Maciel, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Prof. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos, do Instituto Superior Técnico, por terem colaborado grandiosamente com o meu trabalho durante os seminários de doutorado, qualificação ou defesa da tese.

Ao Prof. Carlos Barreira Martinez, da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e aos professores Jorge Luis Zegarra Tarqui e Edna Maria de Faria Viana, do Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, pelo envolvimento com meus testes experimentais e interesse em compartilhar um pouco de suas vastas experiências profissionais.

Aos professores Dídia Isabel Cameira Covas, Jorge de Saldanha Gonçalves Matos, novamente, e Rui Miguel Lage Ferreira, do CERIS/IST, meu especial agradecimento pela vossa atenção cordial e colaboração com o meu trabalho durante a minha estada em terras portuguesas. Toda minha admiração por vocês!

Aos colegas Álefe Marques dos Reis, Fernando Mallea Veizaga, Olga Birjukova Canelas e Joana Vaz Baltazar, que dedicaram longas e intensas horas de seus dias a “colocarem a mão na massa” durante a realização dos meus ensaios de laboratório realizados na UFMG e no IST e/ou que me deram fundamental suporte com o MatLab. Não teria sido possível obter resultado algum sem o indispensável apoio de vocês.

Aos técnicos de laboratório Geraldo Garcia e Paulo Roberto de Souza, da UFMG, e João Caetano e Francisco Almeida, do IST, que sempre estiveram por perto, dando-me fundamental suporte em cada empecilho encontrado que me impedia de iniciar os experimentos. A paciência e dedicação de vocês foram fundamentais para que esse trabalho pudesse se tornar realidade.

Aos colaboradores Júlio Esteves e Lucas Oliveira, da UFMG, e Dulce Fernandes, Margarida Barriga e Paula Marques, do IST, por toda paciência e atenção que tiveram comigo sempre que precisei de ajuda no que se referia aos aspectos administrativos e acadêmicos.

Sou grato também a todos os professores não citados nominalmente, sem exceção, e aos colaboradores administrativos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG e da Área Científica de Hidráulica, Ambiente e Recursos Hídricos do IST que, de uma forma ou de outra, mostraram-se disponíveis e cooperaram comigo sempre que precisei.

Ao Prof. Benjamin Dewals, da Universidade de Liège (Bélgica), e a toda sua equipe, que me receberam em seu laboratório com muito boa vontade durante o período que estive por lá.

A todos os meus amigos de sala da UFMG (Aline, Hildelano, Rafael, Lorena, Viviane, Erick, Marcos Veloso, Sarah, Natália, Fernando e Denis) e do convívio do CPH (Ana Letícia, Mila, Andrés e Stênio) pela paciência e conversas descontraídas ao longo de nosso percurso acadêmico.

À minha “família” portuguesa, meus amigos Ana Ricardo, André, Nuno, João Pacheco, Clara Pereira, Inés Teotónio, Margarida Braga Maia, Rawaz Mohammed, Cíntia Paderneiras, João Casagrande, Alexandre Pinheiro, Tiziana, Norma Buttarazzi, Rita Santos, Sabrina Meninno, Giulio Rebellato, Giulia Marcon, Hamid Zahabi, Joana Miguel, Marta Cabral, Miguel, Ana Clara, Rui Silva, Ana Ferreira, João Ferreira, Cátia Miguel, Luís Espinosa, Gabriel Solis, dentre tantos outros, muito obrigado por tudo! Sem vocês, minha jornada em Portugal não teria sido tão incrível!

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – por seu fundamental apoio financeiro para realização desta pesquisa. Agradeço também ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pelo suporte à participação em congressos.

À Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT), pelo apoio financeiro durante minha permanência em Portugal, através do seu programa de financiamento PD/BD/135219/2017.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pelo fornecimento de insumo para realização dos experimentos com sedimentos no âmbito do LH-IST.

Aos amigos do Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, que acreditaram em minha carreira docente e que me encorajaram a conciliar a jornada de sala de aula com os desafios do Doutorado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG Campus Santa Luzia), por me acolher tão bem como professor e por acreditar na minha pesquisa suportando-a financeiramente durante o período em que estive afastado para capacitação. Aos meus amigos de IFMG que me deram todo apoio e que torceram tanto por mim para que este momento um dia chegasse. Vocês são muito especiais! Agradeço especialmente aos colegas Fernanda, Dário, Geisy Anny, Ricardo, Roxane, Wemerton, Verônica, Paula Glória, Paula Gobetti, Letícia, Rafael, Wanderson, Patrícia, Neilson, Wílio, Samantha, Janaína Park e Leandro Evangelista.

A todos os meus amigos, familiares, alunos e ex-alunos, que colaboram a cada dia para que minha vida e meu esforço tenham algum sentido.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

RESUMO

Os escoamentos rasos correspondem a escoamentos turbulentos com profundidade limitada por uma superfície de fundo e por sua superfície livre, cuja dimensão é significativamente menor do que as duas dimensões horizontais. São de grande importância para a Engenharia Hidráulica, já que se relacionam a aplicações frequentemente adotadas, tais como as bacias de retenção, as lagoas de estabilização para tratamento de efluentes, assim como os tanques de aquicultura.

Usualmente, os escoamentos rasos são tratados como escoamentos bidimensionais ou “quase-bidimensionais”, tanto por conta da velocidade líquida, admitida como a média do perfil vertical, quanto por suas flutuações turbulentas. Suas características tridimensionais são introduzidas por efeitos difusivos e dispersivos turbulentos adicionais.

Pelo fato de estarem associados a baixas velocidades de escoamento, os reservatórios rasos, para os quais se aplicam as premissas ora mencionadas, são frequentemente afetados por contínuo processo de sedimentação. Destaca-se, por esta razão, a importância em se ampliar o conhecimento acerca de seu comportamento hidrodinâmico em função da configuração geométrica e das condições hidráulicas. Uma vez compreendidos os principais fenômenos em causa, seria possível estabelecer um adequado plano de manutenção desses reservatórios e estimar sua vida útil de forma mais robusta e assertiva.

A presente pesquisa teve como objetivo analisar, a partir de abordagem experimental e numérica, a influência do posicionamento variável dos canais de entrada e de saída sobre o padrão de escoamento e sobre a deposição de sedimentos em dois reservatórios retangulares rasos, para vazões e profundidades distintas.

Para tanto, foram realizados dois programas experimentais associados a reservatórios com diferentes dimensões, vinculados pela relação de escala 1:2, um no Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFMG, Brasil) e o outro, no Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico de Lisboa (LH-IST, Portugal). Em ambos os casos, foram consideradas três possibilidades de acoplamento dos canais de entrada e de saída na correspondente parede do reservatório: esquerda (L), central (C) e direita (R). Para cinco diferentes combinações geométricas dos canais (CC, LC, LL, LR e CR), realizaram-se ensaios apenas com água, nos dois reservatórios, com o objetivo de caracterizar o padrão de

escoamento em cada caso. Além disso, para o reservatório português, foram realizados experimentos envolvendo a introdução contínua de baquelite granular, visando caracterizar as tendências de sedimentação para as diferentes combinações geométricas dos canais, avaliar os volumes de sedimentos retidos no reservatório em cada caso e permitir a análise dos padrões de escoamento pós-estabelecimento da condição de equilíbrio sólido do reservatório. Paralelamente, foram geradas simulações numéricas, para todos os cenários no âmbito desta pesquisa envolvendo apenas água, auxiliadas por dois programas computacionais, WOLF 2D e Autodesk® CFD.

Verificou-se, nos ensaios com água limpa e nas simulações numéricas correspondentes, que o padrão de escoamento foi comparável para todas as configurações geométricas cujo canal de entrada foi posicionado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório (configurações LL, LC e LR). Para as configurações geométricas CC e CR, contudo, observou-se em algumas situações não haver convergência entre resultados experimentais e numéricos, provavelmente por conta de alguma ligeira alteração geométrica não identificada durante os ensaios. Com relação aos ensaios com sedimentos, constatou-se que o percurso do jato desde o início da alimentação sólida até a finalização do ensaio foi significativamente afetado pela alteração da morfologia do fundo, por sua vez, decorrente do processo de sedimentação. Toda a carga sólida introduzida no reservatório ficou retida até cerca de metade da duração de cada ensaio. Por outro lado, na metade final de cada experimento, a taxa de retenção diminuiu progressivamente até resultar no alcance do equilíbrio sólido entre a entrada e a saída do reservatório. A configuração geométrica LR foi aquela em que houve maior retenção de sedimentos dentro do reservatório, ao passo que a do tipo LL teria sido aquela com a menor retenção sólida.

Palavras-chave: Escoamento raso; Sedimentação; Comportamento hidrodinâmico; Avaliação experimental; Avaliação numérica.

ABSTRACT

Shallow flows correspond to turbulent flows with water depth limited by a bottom surface and by a free surface, whose dimension is significantly smaller compared to the horizontal ones. They are of great importance for Hydraulic Engineering, since they are related to frequently adopted applications, such as detention basins, stabilization ponds for effluent treatment, as well as aquaculture tanks.

Usually, shallow flows are treated as two-dimensional or "quasi-two-dimensional" flows, because of the water velocity, depth-averaged, and because of their turbulent fluctuations. Their three-dimensional features are provided by additional turbulent diffusive and dispersive effects.

Shallow reservoirs, for which the aforementioned premises are applied, are often affected by a continuous sedimentation process, since they are associated with low flow velocities. For this reason, it is important to increase the knowledge about their hydrodynamic behavior as a function of their geometric configuration and the hydraulic conditions. Once the main involved phenomena were understood, it would be possible to establish an adequate maintenance plan for these reservoirs and to estimate their useful life in a more robust and assertive way.

The present research had as objective to analyze, from an experimental and numerical approach, the influence of the variable positioning of the inlet and outlet channels on the flow pattern and on the sediment deposition in two shallow rectangular reservoirs, for different flow rates and water depths.

For that, two experimental programs were performed in reservoirs with different dimensions, linked by the 1: 2 scale ratio, one at the Hydraulic Research Center of the Federal University of Minas Gerais (CPH-UFMG, Brazil) and the other at the Laboratory of Hydraulics of the Instituto Superior Técnico of Lisbon (LH-IST, Portugal). In both cases, three possibilities of coupling the inlet and outlet channels were considered in the corresponding reservoir wall: left (L), central (C) and right (R). For five different geometric channel combinations (CC, LC, LL, LR and CR), clear water tests were carried out in both reservoirs, in order to characterize the flow pattern in each case. In addition, for the Portuguese reservoir, experiments were carried out involving the continuous introduction of granular bakelite, in order to characterize

the sedimentation trends for the different geometric channels combinations, to assess the sediment volumes retained in the reservoir in each case and to allow the analysis of flow pattern after the establishment of the solid balance condition of the reservoir. At the same time, numerical simulations were generated for all the clear water scenarios of this research, aided by two computational programs, WOLF 2D and Autodesk® CFD.

It was verified in the clear water tests and in the corresponding numerical simulations that the flow pattern was comparable for all geometric configurations whose inlet channel was positioned to the left of the longitudinal axis of the reservoir (LL, LC and LR configurations). For the CC and CR configurations, however, it was observed in some situations that there was no convergence between experimental and numerical results, probably due to some slight geometric disturbance not identified during the tests. With respect to the sediment tests, it was verified that the jet path was significantly affected from the beginning of the solid feed until the end of the test by the alteration of the bottom morphology, in turn, due to the sedimentation process. All solid volume introduced into the reservoir was retained until about half the duration of each test. On the other hand, in the final half of each experiment, the retention rate decreased progressively until it reached the solid balance between the inlet and the outlet of the reservoir. The LR configuration was the one in which there was greater sediment retention inside the reservoir, while the LL configuration would have been the one with the lowest solid retention.

Key-words: Shallow flow; Sedimentation; Hydrodynamic behavior; Experimental evaluation; Numerical evaluation

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE QUADROS E TABELAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS E ÍNDICES	XVII
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 JUSTIFICATIVA	23
3 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS.....	25
3.1 OBJETIVO GERAL	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3.3 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	26
4 REVISÃO DA LITERATURA.....	30
4.1 GENERALIDADES SOBRE ESCOAMENTOS RASOS	30
4.1.1 <i>Definição e caracterização geral</i>	30
4.1.2 <i>Aplicações</i>	32
4.1.3 <i>Fatores condicionantes do comportamento hidrodinâmico dos escoamentos rasos</i>	34
4.2 GENERALIDADES SOBRE SEDIMENTOS.....	38
4.2.1 <i>Controle de sedimentos em reservatórios</i>	38
4.2.2 <i>Problemas devidos à deposição de sedimentos em reservatórios</i>	39
4.2.3 <i>Determinação da eficiência de retenção de sedimentos</i>	40
4.3 MODELAGEM NUMÉRICA	41
4.3.1 <i>Utilização de modelagem numérica em Hidráulica</i>	41
4.3.2 <i>Modelo conservativo de volume finito WOLF 2D</i>	42
4.3.3 <i>Modelo tridimensional Autodesk® CFD</i>	44
4.4 EXPERIÊNCIA SOBRE PADRÕES DE ESCOAMENTO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS RASOS 47	
4.4.1 <i>Terminologia</i>	47
4.4.2 <i>Caracterização dos padrões de escoamento</i>	49
4.4.2.1 <i>Avaliação experimental e numérica de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Kantoush (2008)</i>	50
4.4.2.2 <i>Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Dufresne et al. (2010a,b)</i>	54
4.4.2.3 <i>Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Camnasio, Orsi e Schleiss (2011)</i>	57
4.4.2.4 <i>Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Camnasio et al. (2012)</i>	61
4.4.2.5 <i>Avaliação experimental de geometrias simples com canais de entrada e de saída centralizados segundo Peltier et al. (2013), Peltier et al. (2014a,b) e Peltier et al. (2015)</i>	62
4.4.2.6 <i>Avaliação experimental e numérica do posicionamento dos canais de entrada e de saída segundo Camnasio et al. (2013)</i>	63
4.4.2.7 <i>Avaliação numérica do posicionamento dos canais de entrada e de saída segundo Ferrara et al. (2018)</i> ..	65
4.4.2.8 <i>Avaliação da robustez do programa computacional WOLF 2D para simulação numérica de escoamentos rasos</i> 68	
4.4.2.9 <i>Avaliação numérica da eficiência hidráulica de reservatórios com geometria complexa segundo Jansons e Law (2007)</i>	68
4.4.2.10 <i>Síntese e avaliação crítica das principais referências consultadas sobre caracterização dos padrões de escoamento</i> 71	
4.4.3 <i>Caracterização de tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção de sedimentos pelo reservatório</i>	75
4.4.3.1 <i>Contribuições da literatura</i>	75

4.4.3.2	Síntese e avaliação crítica das principais referências consultadas sobre caracterização das tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção sólida em reservatórios rasos	82
5	MATERIAL E MÉTODOS	86
5.1	MODELAGEM FÍSICA	86
5.1.1	<i>Estudo experimental realizado no CPH-UFMG</i>	86
5.1.2	<i>Estudo experimental realizado no LH-IST</i>	96
5.2	MODELAGEM NUMÉRICA	106
5.2.1	<i>Modelo acadêmico WOLF 2D</i>	106
5.2.2	<i>Programa Autodesk® CFD</i>	108
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
6.1	MODELAGEM FÍSICA	111
6.1.1	<i>Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no CPH-UFMG</i>	111
6.1.2	<i>Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no LH-IST</i>	123
6.1.3	<i>Caracterização de tendências de deposição de sedimentos baseada nos ensaios realizados no LH-IST</i>	148
6.1.4	<i>Avaliação do volume de sedimentos retidos baseada nos ensaios realizados no LH-IST</i>	167
6.1.5	<i>Análise dos padrões de escoamento obtidos pós-deposição de sedimentos no reservatório do LH-IST</i>	169
6.1.6	<i>Avaliação da influência da sedimentação sobre a velocidade de escoamento no reservatório do LH-IST</i>	173
6.2	MODELAGEM NUMÉRICA	183
6.2.1	<i>Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no CPH-UFMG: WOLF 2D</i>	183
6.2.2	<i>Comparação entre resultados numéricos de caracterização dos padrões de escoamento com água limpa do CPH-UFMG: WOLF 2D x Autodesk CFD</i>	190
6.2.3	<i>Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no LH-IST: Autodesk CFD</i>	194
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	199
	REFERÊNCIAS	204
	APÊNDICE I – Modos de transporte de sedimentos	209
	APÊNDICE II – Modelagem física	211
II.1	<i>Vantagens de utilização de modelagem física em Hidráulica</i>	211
II.2	<i>Princípios de semelhança entre protótipo e modelo</i>	211
II.3	<i>Técnicas para medição de parâmetros hidráulicos</i>	217
II.3.1	Monitoramento das velocidades: LSPIV e <i>Vectrino</i>	217
II.3.2	Monitoramento das vazões: inversor de frequência e medidor eletromagnético	220
II.3.13	Monitoramento da espessura dos depósitos de sedimento: sensor de distância a <i>laser</i>	221
	APÊNDICE III – Ábaco de Chauvin e relações de proporção estabelecidas entre as grandezas físicas empregadas nos ensaios do CPH-UFMG e os do LH-IST	223
	APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa	224
	APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG ..	230
	APÊNDICE VI – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST.....	236
	APÊNDICE VII – Distribuição transversal de velocidades em profundidade – Ensaios com água limpa do LH-IST	241

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – MANIFESTAÇÃO DO EFEITO COANDA A JUSANTE DE UMA EXPANSÃO BRUSCA	37
FIGURA 4.2 - REPRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM RESERVATÓRIO RETANGULAR RASO (EM PLANTA).....	47
FIGURA 4.3 - REPRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS DE POSICIONAMENTO RELATIVO D_{IN} E D_{OUT} EM UM RESERVATÓRIO RETANGULAR RASO (EM PLANTA)	49
FIGURA 4.4 - CONFIGURAÇÃO DE REFERÊNCIA DO ESTUDO – RESERVATÓRIO RETANGULAR COM $L = 6,00$ M E $B =$ $4,0$ M.....	51
FIGURA 4.5 - VARIANTES EM RELAÇÃO À CONFIGURAÇÃO DE REFERÊNCIA – REDUÇÃO DA LARGURA B	51
FIGURA 4.6 - VARIANTES EM RELAÇÃO À CONFIGURAÇÃO DE REFERÊNCIA – REDUÇÃO DO COMPRIMENTO L	51
FIGURA 4.7 - VARIANTES EM RELAÇÃO À CONFIGURAÇÃO DE REFERÊNCIA – REDUÇÃO DO ÂNGULO DE EXPANSÃO DO RESERVATÓRIO.....	52
FIGURA 4.8 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS QUATRO PADRÕES DE ESCOAMENTO OBSERVADOS: (A) $A3$, (B) $A2$, (C) $A1$ E (D) $S0$	55
FIGURA 4.9 - CLASSIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO OBSERVADOS: SIMÉTRICO ($S0$ E $S1$), ASSIMÉTRICO ($A1$ E $A2$), INSTÁVEL ($A1/S1$) E TÍPICO DE CANAL ($CH-L$).....	58
FIGURA 4.10 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS NA EPFL E NA ULG, INDICANDO OS PADRÕES DE ESCOAMENTO SIMÉTRICOS ($S0$ E $S1$), ASSIMÉTRICOS ($A1$, $A2$ E $A3$) E TÍPICO DE CANAL ($CH-L$)	60
FIGURA 4.11 - REPRESENTAÇÃO EM PLANTA DE CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS TESTADAS EM LABORATÓRIO: (A) CC, (B) LL, (C) LR E (D) CR.....	64
FIGURA 4.12 - NOVE DIFERENTES GEOMETRIAS DE RESERVATÓRIO TESTADAS NUMERICAMENTE, IDENTIFICADAS DE P1 A P9.....	69
FIGURA 5.1 – RESERVATÓRIO RETANGULAR CONSTRUÍDO NO CPH-UFMG: (A) CANAL DE ENTRADA ALINHADO COM O EIXO LONGITUDINAL DO RESERVATÓRIO, (B) CANAL DE SAÍDA IGUALMENTE ALINHADO COM O EIXO LONGITUDINAL.	86
FIGURA 5.2 – CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS TESTADAS NO CPH-UFMG	87
FIGURA 5.3 – IMAGEM DE TOPO DO RESERVATÓRIO DO CPH-UFMG, COM IDENTIFICAÇÃO DAS POSIÇÕES ALTERNATIVAS DOS CANAIS DE ENTRADA E DE SAÍDA.	88
FIGURA 5.4 - INSTALAÇÕES DE BOMBEAMENTO PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS NO CPH-UFMG.....	91
FIGURA 5.5 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DAS VAZÕES LÍQUIDAS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO CONJUNTO MOTOBOMBA.....	92
FIGURA 5.6 - DISPOSITIVOS INSTALADOS NO CPH-UFMG AO LONGO DO CANAL DE ENTRADA PARA REDUÇÃO DE TURBULÊNCIAS NA ENTRADA DO RESERVATÓRIO ENSAIADO	93
FIGURA 5.7 - SUPORTE METÁLICO COM CÂMERA PARA FILMAGEM DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CPH- UFMG.....	94
FIGURA 5.8 – RESERVATÓRIO RETANGULAR CONSTRUÍDO NO LH-IST	96
FIGURA 5.9 – CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS TESTADAS NO LH-IST	97
FIGURA 5.10 – PLANTA ESQUEMÁTICA DO APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO NO LH-IST	100
FIGURA 5.11 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA BAQUELITE UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NO LH- IST	102
FIGURA 5.12 – ESTEIRA DISTRIBUIDORA DE SEDIMENTOS COM BAQUELITE (COR PRETA) UTILIZADA EM EXPERIMENTOS DO LH-IST	103
FIGURA 5.13 – PROGRAMA COMPUTACIONAL CONFLUME, UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS DO LH-IST	103
FIGURA 5.14 – SONDA <i>MICRO ECHOSOUNDER</i> UTILIZADA EM EXPERIMENTOS DO LH-IST PARA REALIZAÇÃO DE LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	104
FIGURA 5.15 – SONDA BAUMER ULTRASONIC SENSOR UNDK UTILIZADA EM EXPERIMENTOS DO LH-IST PARA REALIZAÇÃO DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.....	106
FIGURA 5.16 – INTERFACE GRÁFICA DO PROGRAMA COMPUTACIONAL AUTODESK® CFD PARA MODELAGEM NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM RESERVATÓRIOS RASOS.....	108
FIGURA 6.1 – CAMPOS DE VELOCIDADE SUPERFICIAL REFERENTES AOS EXPERIMENTOS COM ÁGUA LIMPA DO CPH-UFMG.....	115

FIGURA 6.2 – CAMPOS DE VELOCIDADES SUPERFICIAIS PARA $Q = 0,80$ L/s (CONFIGURAÇÃO CC).....	121
FIGURA 6.3 – CAMPOS DE VELOCIDADES SUPERFICIAIS PARA $Q = 1,00$ L/s (CONFIGURAÇÃO CC).....	122
FIGURA 6.4 – CAMPOS DE VELOCIDADES SUPERFICIAIS PARA $Q = 1,25$ L/s (CONFIGURAÇÃO CC).....	122
FIGURA 6.5 – CAMPOS DE VELOCIDADE SUPERFICIAL REFERENTES AOS EXPERIMENTOS COM ÁGUA LIMPA DO LH-IST	129
FIGURA 6.6 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC – $Q = 0,15$ L/S E $H = 3,6$ CM	135
FIGURA 6.7 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC – $Q = 0,37$ L/S E $H = 7,1$ CM	136
FIGURA 6.8 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC – $Q = 1,00$ L/S E $H = 14,3$ CM	137
FIGURA 6.9 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LC – $Q = 1,00$ L/S E $H = 14,3$ CM	139
FIGURA 6.10 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LL – $Q = 1,00$ L/S E $H = 14,3$ CM	140
FIGURA 6.11 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LR – $Q = 1,00$ L/S E $H = 14,3$ CM	141
FIGURA 6.12 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CR – $Q = 0,15$ L/S E $H = 3,6$ CM	145
FIGURA 6.13 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CR – $Q = 0,37$ L/S E $H = 7,1$ CM	146
FIGURA 6.14 – PLANOS HORIZONTAIS DE VELOCIDADE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CR – $Q = 1,00$ L/S E $H = 14,3$ CM	147
FIGURA 6.15 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC – $Q = 1,00$ L/s.....	151
FIGURA 6.16 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LR – $Q = 1,00$ L/s.....	154
FIGURA 6.17 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CR – $Q = 1,00$ L/s.....	157
FIGURA 6.18 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LL – $Q = 1,00$ L/s.....	160
FIGURA 6.19 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LC – $Q = 1,00$ L/s.....	163
FIGURA 6.20 – EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA ESPACIAL DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC.....	165
FIGURA 6.21 – EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA ESPACIAL DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LR.....	166
FIGURA 6.22 – EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA ESPACIAL DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CR.....	166
FIGURA 6.23 – PADRÕES DE ESCOAMENTO PÓS-DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS.....	170
FIGURA 6.24 – VETORES DE VELOCIDADE OBTIDOS EM ENSAIO COM BAQUELITE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ CM)	174
FIGURA 6.25 – VETORES DE VELOCIDADE OBTIDOS EM ENSAIO COM BAQUELITE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LC – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ CM)	177
FIGURA 6.26 – VETORES DE VELOCIDADE OBTIDOS EM ENSAIO COM BAQUELITE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LL – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ CM).....	179
FIGURA 6.27 – VETORES DE VELOCIDADE OBTIDOS EM ENSAIO COM BAQUELITE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA LR – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ CM)	180
FIGURA 6.28 – VETORES DE VELOCIDADE OBTIDOS EM ENSAIO COM BAQUELITE PARA A CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CR – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ CM)	182
FIGURA 6.29 – CAMPOS DE VELOCIDADE DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CPH-UFGM OBTIDOS NUMERICAMENTE COM EMPREGO DO <i>SOFTWARE</i> WOLF 2D	187
FIGURA 6.30 – CAMPOS DE VELOCIDADE DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CPH-UFGM OBTIDOS NUMERICAMENTE COM EMPREGO DO <i>SOFTWARE</i> AUTODESK® CFD.....	191

FIGURA 6.31 – CAMPOS DE VELOCIDADE DOS ENSAIOS REALIZADOS NO LH-IST OBTIDOS NUMERICAMENTE COM EMPREGO DO SOFTWARE AUTODESK® CFD.....	197
FIGURA I.1 – MODOS DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS DE SEDIMENTO EM CURSOS E CORPOS D'ÁGUA	210
FIGURA II.1 – ÁBACO DE CHAUVIN PARA SEMELHANÇA DE MODELOS DE FUNDO MÓVEL.....	216
FIGURA II.2 - IMAGEM CAPTURADA DE UM DOS ENSAIOS REALIZADOS COM ÁGUA LIMPA NO LH-IST.....	218
FIGURA II.3 – SONDA DO TIPO <i>VECTRINO</i>	219
FIGURA II.4 - INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR DE SISTEMAS DE BOMBAMENTO, MARCA WEG, MODELO CFW 09.	220
FIGURA II.5 - MEDIDOR DE VAZÃO DE MARCA ENDRESS-HAUSER MODELO PROMAG.....	221
FIGURA II.6 - SENSOR DE DISTÂNCIA A LASER DA MARCA BAUMER, MODELO OADM 13I7480/S35A.....	221
FIGURA II.7 - SENSOR DE DISTÂNCIA A <i>LASER</i> INSTALADO SOBRE UMA BARRA METÁLICA ACIMA DO RESERVATÓRIO MONITORADO.....	222

LISTA DE QUADROS E TABELAS

LISTA DE QUADROS:

QUADRO 4.1 - SÍNTESE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS PARA CADA GEOMETRIA SIMULADA	70
QUADRO 4.2 - SÍNTESE DAS PRINCIPAIS REFERÊNCIAS ESTUDADAS SOBRE CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO	71
QUADRO 4.3 - SÍNTESE DAS PRINCIPAIS REFERÊNCIAS ESTUDADAS SOBRE CARACTERIZAÇÃO DAS TENDÊNCIAS DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS E EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS	82
QUADRO 5.1 - COMBINAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS CANAIS DE ENTRADA E DE SAÍDA TESTADAS FÍSICA E NUMERICAMENTE NO CPH-UFGM.....	88
QUADRO 5.2 - COMBINAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS CANAIS DE ENTRADA E DE SAÍDA TESTADAS FÍSICA E NUMERICAMENTE NO LH-IST.....	98
QUADRO 6.1 – PRINCIPAIS ASPECTOS OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE NOS ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA DO CPH-UFGM.....	117
QUADRO 6.2 – PRINCIPAIS ASPECTOS OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE NOS ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA DO LH-IST.....	128
QUADRO 6.3 – COMPARATIVO DE ASPECTOS HIDRODINÂMICOS IDENTIFICADOS EXPERIMENTAL E NUMERICAMENTE (WOLF 2D) – EXPERIMENTOS DO CPH-UFGM COM ÁGUA LIMPA	189
QUADRO 6.4 – COMPARATIVO DE ASPECTOS HIDRODINÂMICOS NUMÉRICOS ENTRE WOLF 2D E AUTODESK® CFD – EXPERIMENTOS DO CPH-UFGM COM ÁGUA LIMPA	193
QUADRO II.1 - RELAÇÕES DE ESCALA BASEADAS NA SEMELHANÇA DE FROUDE	213

LISTA DE TABELAS:

TABELA 4.1 - EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS PELO RESERVATÓRIO, PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÃO E DOIS DIFERENTES MÉTODOS DE MEDIÇÃO (EM %)	81
TABELA 5.1 - CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS TESTADAS NO CPH-UFGM COM SUAS RESPECTIVAS PROFUNDIDADES DE JUSANTE E VAZÕES EM REGIME PERMANENTE	90
TABELA 5.2 - CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS TESTADAS NO LH-IST COM SUAS RESPECTIVAS PROFUNDIDADES DE JUSANTE E VAZÕES EM REGIME PERMANENTE.....	99
TABELA 6.1 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA DO CPH-UFGM PARA DEFINIÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO A PARTIR DO NÚMERO DE FROUDE (CALCULADOS EM UMA SEÇÃO DO CANAL DE ENTRADA).....	112
TABELA 6.2 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA DO CPH-UFGM PARA DEFINIÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO A PARTIR DO NÚMERO DE REYNOLDS (CALCULADOS EM UMA SEÇÃO DO CANAL DE ENTRADA).....	113
TABELA 6.3 – ENSAIOS COMPLEMENTARES REFERENTES À CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA CC PARA VAZÕES ENTRE 0,80 E 1,25 L/s.....	120
TABELA 6.4 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA DO LH-IST PARA DEFINIÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO A PARTIR DO NÚMERO DE FROUDE (CALCULADOS EM UMA SEÇÃO DO CANAL DE ENTRADA).....	126
TABELA 6.5 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS ENSAIOS COM ÁGUA LIMPA DO LH-IST PARA DEFINIÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO A PARTIR DO NÚMERO DE REYNOLDS (CALCULADOS EM UMA SEÇÃO DO CANAL DE ENTRADA).....	127
TABELA 6.6 – VOLUMES DE SEDIMENTOS RETIDOS E PERCENTUAL DE DEPOSIÇÃO SÓLIDA NOS ENSAIOS DO LH-IST	168
TABELA 6.7 – VALORES MÁXIMOS OBSERVADOS PARA AS VELOCIDADES SUPERFICIAIS ANTES E APÓS A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM SEDIMENTOS NO LH-IST	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ADV	<i>Acoustic Doppler velocimeter</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Brasil)
CERIS	<i>Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability</i> (Portugal)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Brasil)
CPH - UFMG	Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais
CFL	Condição de Courant-Friedrichs-Levy
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EPFL	Escola Politécnica Federal de Lausanne (Suíça)
ERS	Eficiência de retenção de sedimentos
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FCT	Fundação para Ciência e Tecnologia (Portugal)
<i>fps</i>	Telas por segundo (<i>frames per second</i>)
FVS	<i>Flux Vector Splitting</i>
HD	<i>High definition</i> (alta resolução)
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
IST	Instituto Superior Técnico de Lisboa
<i>laser</i>	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LH-IST	Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico
LNCE	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
LSPIV	<i>Large scale particle image velocimetry</i>
PET	Poli tereftalato de etila
PVC	Policloreto de vinila
<i>quasi-2D</i>	Escoamento “quase-bidimensional”
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
<i>rpm</i>	Rotações por minuto
SciELO	Scientific Electronic Library Online
SWE	<i>Shallow water equations</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
ULg	Universidade de Liège (Bélgica)
ULisboa	Universidade de Lisboa
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UVP	<i>Ultrasonic Doppler velocity profiler</i>

LISTA DE SÍMBOLOS E ÍNDICES

LISTA DE SÍMBOLOS:

$A1, A2, A3$	Padrões de escoamento geometricamente assimétricos
$A1/S0$	Padrão de escoamento de transição
A_{molhada}	Área molhada da seção transversal
B	Largura do reservatório
B/b	Razão de expansão lateral
b	Largura dos canais de entrada e de saída
CC	Configuração geométrica dos canais de entrada e de saída em posição central
c_f	Parâmetro de atrito do leito
CH-L	Padrão de escoamento típico de canal (<i>Channel-like flow</i>)
CR	Configuração geométrica do canal de entrada em posição central e do canal de saída à direita
d_{50} ou D_{50}	Diâmetro correspondente ao tamanho médio dos grãos
d_{in}	Deslocamento do canal de entrada
d_{out}	Deslocamento do canal de saída
E_b	Módulo de elasticidade da água
Fr	Número de Froude
g	Aceleração gravitacional
h	Comprimento vertical ou profundidade do escoamento
h/b	Profundidade do escoamento adimensional
$h/\Delta B$	Profundidade do escoamento adimensional
k	Energia cinética turbulenta
L	Comprimento horizontal ou comprimento do reservatório
l	Comprimento dos canais de entrada e de saída
L/B	Comprimento adimensional ou relativo
LC	Configuração geométrica do canal de entrada à esquerda e do canal de saída em posição central
$L/\Delta B$	Comprimento adimensional ou relativo
LL	Configuração geométrica dos canais de entrada e de saída à esquerda
LR	Configuração geométrica do canal de entrada à esquerda e do canal de saída à direita
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
P_{molhado}	Perímetro molhado da seção transversal
Q	Vazão (ou caudal)
RC	Configuração geométrica do canal de entrada à direita e do canal de saída em posição central
Re	Número de Reynolds
$S0, S1$	Padrões de escoamento geometricamente simétricos
S_{afluente}	Massa ou volume de sedimentos afluente ao reservatório
$S_{\text{defluente}}$	Massa ou volume de sedimentos que sai do reservatório
SF	Fator de forma (<i>Shape factor</i>)
S_{retido}	Massa ou volume de sedimentos depositada no reservatório

t	Tempo
$T_{\text{água}}$	Temperatura da água
U	Velocidade média
u	Componente longitudinal da velocidade
V	Velocidade
v	Componente transversal da velocidade
w	Componente vertical da velocidade
x ou X	Dimensão ou coordenada longitudinal do escoamento
y	Dimensão transversal do escoamento
y_h	Profundidade hidráulica
z ou Z	Dimensão ou coordenada vertical do escoamento
ΔB	Expansão lateral
$\Delta B/b$	Razão de expansão lateral
ΔP	Diferença de pressão
Δt	Intervalo temporal
Δx	Incremento espacial no sentido longitudinal ao escoamento
Δy	Incremento espacial no sentido transversal ao escoamento
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
λ	Relação de escala entre um comprimento característico do modelo e do protótipo
μ	Viscosidade dinâmica, ou absoluta, do fluido (ou da água)
ν	Viscosidade cinemática do fluido (ou da água)
ρ	Massa específica do fluido (ou da água)
ρ_r	Relação de escala entre a massa específica do fluido para o modelo e para o protótipo
σ	Tensão tangencial ou superficial
τ	Tensão de arrastamento do fundo

LISTA DE ÍNDICES:

D	Diâmetro das partículas sólidas
H	Comprimento horizontal
in	Canal de entrada
J	Declividade da linha de energia
L	Comprimento horizontal
m	Modelo
$mont$	Montante
out	Canal de saída
p	Protótipo
Q	Vazão
t	Tempo do escoamento
t_s	Tempo sedimentológico
v	Velocidade
X	Números de Reynolds de arrastamento
γ'_s	Peso específico aparente úmido

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios rasos, também conhecidos na literatura como reservatórios pouco profundos, são estruturas hidráulicas comumente empregadas em projetos de engenharia fluvial e urbana. Estes estão sujeitos inevitavelmente a algum grau de sedimentação, uma vez que alteram o balanço morfodinâmico do curso d'água com a modificação das características hidráulicas do escoamento e, conseqüentemente, de sua capacidade de transporte de sedimentos (KANTOUSH *et al.*, 2005; CAMNASIO *et al.*, 2013).

Na Engenharia Hidráulica, algumas das aplicações mais notáveis de reservatórios rasos referem-se a: (1) bacias de detenção, dispositivos largamente contemplados em projetos de drenagem urbana para controle de cheias e prevenção de ocorrência de inundações; (2) lagoas de estabilização para tratamento de efluentes, em que se tem interesse pelo aumento da eficiência do processo de decantação e remoção do lodo formado pela ação de bactérias; (3) tanques de aquicultura, no que diz respeito ao dimensionamento de estruturas para o desenvolvimento apropriado de culturas de peixes; (4) reservatórios para irrigação, utilizados para provimento de água em períodos de escassez deste recurso, por exemplo, em regiões semiáridas e; (5) reservatórios para fins de geração hidrolétrica, concebidos visando à produção de eletricidade .

A definição dos critérios de projeto para a concepção de reservatórios rasos depende de seus objetivos: quando são pretendidos, por exemplo, como reservatórios para irrigação, para controle de cheias ou ainda para geração hidroelétrica, o processo de sedimentação deve ser minimizado; por outro lado, se são utilizados como estruturas hidráulicas de sedimentação, a decantação de sólidos deve ser evidentemente maximizada (DUFRESNE *et al.*, 2010a).

Ainda segundo Dufresne *et al.* (2010a), a predição da deposição de sedimentos em tais reservatórios ainda não é completamente entendida, tendo em vista a complexa influência da geometria do reservatório, das condições hidráulicas e das características do sedimento. Revela-se, deste modo, como um desafio à Engenharia Hidráulica entender de forma mais objetiva como o padrão de escoamento desenvolvido em tais reservatórios interfere na sedimentação e, conseqüentemente, na operação desses sistemas.

Em recentes estudos, experimentos em laboratório e simulações numéricas foram sistematicamente realizados, tendo em vista sua aplicação a reservatórios rasos (JANSONS; LAW, 2007; KANTOUSH, 2008; DEWALS *et al.*, 2008; DUFRESNE *et al.*, 2010a,b; CAMNASIO; ORSI; SCHLEISS, 2011; DUFRESNE *et al.*, 2011; CAMNASIO *et al.*, 2013, PELTIER *et al.*, 2015, PELTIER *et al.*, 2016, MIRANDA *et al.*, 2018a,c, MIRANDA; REIS; COELHO, 2018b, FERRARA *et al.*, 2018). Tais estudos visaram melhorar o entendimento, por um lado, do comportamento hidráulico e dos padrões de escoamento correlatos e, por outro lado, das tendências de sedimentação e dos fatores intervenientes na retenção de sedimentos em tais reservatórios rasos.

Vislumbrou-se com a presente investigação científica avaliar sistematicamente a influência do posicionamento simétrico e assimétrico dos canais de entrada e de saída em reservatórios retangulares rasos sobre os padrões de escoamento e sobre a deposição de sedimentos. Para tanto, foram consideradas diferentes vazões e profundidades líquidas, o que representa uma nova contribuição deste estudo.

No âmbito da presente pesquisa, recorreu-se a dois programas experimentais associados a reservatórios retangulares rasos com diferentes dimensões, vinculados pela relação de escala 1:2. Os experimentos foram realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFGM, Brasil) e no Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico de Lisboa (LH-IST, Portugal). Em ambos os casos, foi possível ajustar a posição dos canais de entrada e de saída dentre três alternativas previstas na parede de montante do reservatório e outras três em sua parede de jusante.

Além disso, foram geradas simulações numéricas auxiliadas por dois programas computacionais, o modelo acadêmico WOLF 2D, desenvolvido pela Universidade de Liège (ULg, Bélgica) e o programa computacional Autodesk® CFD, disponibilizado pela empresa desenvolvedora de *softwares* Autodesk, responsável também pelo mundialmente conhecido AutoCAD.

Quanto à organização da presente tese, esta é composta por sete capítulos e sete apêndices. Na presente seção (Capítulo 1, relativo à Introdução), foram apresentadas informações gerais de caracterização e contextualização do objeto do estudo. Além disso, foram elencados alguns fatores que motivaram a escolha do tema e que ajudaram a identificar o problema da pesquisa.

No Capítulo 2 (Justificativa), destacaram-se as principais motivações para investigação dos padrões de escoamento e de deposição de sedimentos em reservatórios retangulares rasos. Além disso, apresentaram-se, em linhas gerais, algumas das contribuições que a pesquisa pode aportar à literatura técnica (pontos de ineditismo científico).

Por sua vez, no Capítulo 3 (Objetivos e Etapas Metodológicas) foram apresentados os objetivos geral e específicos, bem como uma breve descrição das etapas metodológicas empregadas para nortear as ações conduzidas durante esta investigação científica.

O Capítulo 4 (Revisão da Literatura) referiu-se a uma ampla revisão bibliográfica acerca dos principais aspectos tratados no estudo, tais como as generalidades sobre escoamentos rasos e sobre sedimentos, bem como dos programas computacionais utilizados para realização de modelagem numérica. Destacaram-se ainda as principais contribuições de estudos precedentes no que se refere ao comportamento hidrodinâmico em reservatórios rasos e na avaliação de sua eficiência na retenção de sedimentos.

No Capítulo 5 (Materiais e Métodos), foram sistematizadas as informações procedimentais mais relevantes concernentes aos reservatórios retangulares que foram utilizados na pesquisa, assim como aquelas relativas às etapas para modelagem numérica.

O Capítulo 6 contemplou os Resultados e Discussão, referentes aos ensaios realizados com água limpa no âmbito do CPH-UFMG e do LH-IST, bem como aqueles baseados na inserção de sedimentos (LH-IST). Empregou-se nesta pesquisa o termo ‘água limpa’ para designar a condição desprovida de sedimentos. Ademais, foram apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos numericamente, através dos programas *WOLF 2D* e *Autodesk® CFD*.

No Capítulo 7, foram destacadas as principais conclusões tomadas a partir da análise conjunta de dados e de constatações realizadas a partir dos resultados obtidos, relativos a cenários numéricos e experimentais sob condição de água limpa e com a presença de sedimentos.

Deve-se fazer menção ainda aos sete apêndices contidos nesta pesquisa, quais sejam: Apêndice I - Modos de transporte de sedimentos; Apêndice II – Modelagem física; Apêndice III - Ábaco de Chauvin e relações de proporção estabelecidas entre as grandezas físicas empregadas nos ensaios do CPH-UFMG e os do LH-IST; Apêndice IV - Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa;

Apêndice V - Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG; Apêndice VI - Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST e; Apêndice VII - Distribuição transversal de velocidades em profundidade – Ensaios com água limpa do LH-IST (disponibilizado em link de compartilhamento).

2 JUSTIFICATIVA

Conforme ressaltado no capítulo anterior, o estudo dos escoamentos rasos envolve uma gama de aplicações com inquestionável importância para a Engenharia Hidráulica e para suas respectivas áreas de interesse. Dentre elas, destacam-se as bacias de detenção, as lagoas de estabilização para tratamento de efluentes, assim como os tanques de aquicultura.

Para muitas das aplicações dos escoamentos rasos, a literatura dispõe de diversas relações empíricas destinadas à estimação da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios. Entretanto, estas apresentam frequentes inconsistências devido ao fato de não considerarem explicitamente a influência do padrão de escoamento correlato sobre a deposição dos sedimentos (STOVIN, 1996; KANTOUSH, 2008; DUFRESNE *et al.*, 2010b; CAMNASIO *et al.*, 2013). Esta limitação constitui uma das razões pela qual se justifica ampliar o conhecimento sobre os escoamentos rasos e o entendimento quanto à sua dependência da geometria do reservatório, das características hidráulicas do escoamento e de aspectos sedimentológicos. Sendo assim, é conveniente avaliar a influência de tais fatores sobre o comportamento hidrodinâmico e sobre a tendência de deposição de sedimentos em reservatórios rasos.

No contexto dos escoamentos rasos, observou-se ainda a existência de outras lacunas que mereciam ser investigadas de forma sistemática. Com efeito, Camnasio *et al.* (2013) estudaram a influência do posicionamento assimétrico dos canais de entrada e de saída em relação ao eixo longitudinal do reservatório, porém, não o fizeram sob diferentes condições de vazão e com profundidades líquidas distintas. Ao contrário, foi estabelecida uma única condição hidráulica em regime permanente. No caso da presente pesquisa, foram avaliadas 3 vazões em particular, cada qual associada a uma profundidade característica. Ademais, apesar de terem sido traçadas importantes considerações pelos autores em pauta, levaram-se em conta 4 diferentes configurações geométricas, ao passo que o presente estudo contemplou, em quase todas as suas análises, 5 geometrias distintas, assim como uma sexta configuração em alguns casos. Essa abordagem foi tratada por meio da construção de dois reservatórios de tamanhos distintos, porém, com dimensões proporcionais, e a partir de modelagem numérica.

Além da consideração de diferentes condições hidráulicas no âmbito deste estudo, foram avaliados outros aspectos de forma inédita. Destaca-se, com efeito, a análise dos padrões de

escoamento modificados em função da alteração da morfologia do reservatório pós-realização dos ensaios com sedimentos. Além disso, avaliou-se o comportamento hidrodinâmico dos reservatórios rasos em profundidade, em diferentes planos horizontais, a fim de se verificar a pertinência das simplificações comumente empregadas para tais escoamentos quanto à adoção de um único valor para a componente vertical da velocidade do escoamento. Outra contribuição inédita desta tese referiu-se à evolução temporal das velocidades em certas localidades do reservatório por influência da sedimentação.

Em outros estudos de referência deste trabalho, em destaque para os de Dufresne *et al.* (2010a) e Camnasio *et al.* (2013), realizaram-se experimentos em laboratório que contemplaram a utilização de partículas sólidas representativas dos sedimentos. Contudo, as durações destes experimentos foram relativamente curtas, prejudicando a caracterização da influência dos sólidos na operação dos respectivos reservatórios rasos. Na presente investigação, a interrupção dos experimentos com sedimentos foi condicionada ao atingimento do equilíbrio sólido, ou seja, a partir do momento em que a concentração de baquelite recolhida a jusante igualou a concentração injetada a montante. Tal aspecto metodológico também representa um ponto de ineditismo científico, tendo em vista outros trabalhos envolvendo o mesmo objeto de estudo deste.

Acredita-se que os resultados da presente pesquisa contribuirão substancialmente para a consolidação do conhecimento já acumulado sobre o assunto. Ademais, é importante salientar o incentivo pretendido para que outros trabalhos surjam como desdobramento deste, em destaque para os contextos brasileiro e português. Aparentemente, não há estudos similares em curso no Brasil voltados à avaliação experimental e numérica do comportamento hidrodinâmico e de seu vínculo com a deposição de sedimentos em reservatórios rasos, exceto aqueles que se desdobraram da presente tese com a participação de seu autor.

3 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS

3.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral da presente pesquisa consistiu em analisar, por meio de abordagem experimental e numérica, a influência do posicionamento variável dos canais de entrada e de saída sobre o padrão de escoamento e sobre a deposição de sedimentos em dois reservatórios retangulares rasos, tendo em vista distintas condições hidráulicas (vazão e profundidade).

3.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos do estudo foram:

- Ampliar o conhecimento acerca da complexa interação entre o posicionamento dos canais de entrada e de saída e os padrões de escoamento em dois reservatórios retangulares rasos, sob diversas condições de vazão e de profundidade;
- Caracterizar, experimentalmente, as tendências de deposição de sedimentos em função de diferentes configurações geométricas dos canais de entrada e de saída de um dos reservatórios retangulares rasos;
- Avaliar a capacidade de retenção de sedimentos para algumas configurações geométricas dos canais de entrada e de saída de um reservatório retangular raso em particular, para uma dada vazão em regime permanente;
- Avaliar as alterações nos padrões de escoamento, em um dos reservatórios, provocadas pelos sólidos decantados, pós-realização dos ensaios com sedimentos;
- Avaliar, ao longo do tempo, a influência da sedimentação sobre a velocidade de escoamento em um dos reservatórios considerados no presente estudo;
- Avaliar a robustez de dois modelos numéricos distintos, WOLF 2D e Autodesk® CFD, no que se refere à capacidade de reprodução das condições hidrodinâmicas observadas experimentalmente em ambos os reservatórios retangulares rasos;
- Associar as condições hidrodinâmicas observadas durante os ensaios com sedimentos, para um dos reservatórios construídos, ao correspondente padrão de escoamento verificado em experimentos com água limpa.

3.3 Etapas metodológicas

A construção desta tese baseou-se nas etapas sucintamente descritas a seguir e pormenorizadas nos capítulos subsequentes.

Revisão da literatura

A primeira etapa da pesquisa, a qual se estendeu por todos os anos de seu desenvolvimento, consistiu em uma revisão de literatura acerca de tópicos considerados pertinentes aos interesses do estudo, a saber:

- Caracterização geral e aplicações das equações para o escoamento raso;
- Generalidades sobre sedimentos: problemas devidos à deposição sólida, modos de transporte de sedimentos (Apêndice I) e determinação da eficiência de retenção de sedimentos;
- Princípios de semelhança entre protótipo e modelo (Apêndice II – item II.2);
- Técnicas para medição de parâmetros hidráulicos em modelagem física (Apêndice II – item II.3);
- Caracterização de dois programas computacionais para modelagem numérica utilizados no estudo; e
- Experiência de outros autores relativa ao estudo de padrões de escoamento e de deposição de sedimentos em reservatórios rasos.

Para tanto, foram exploradas tradicionais plataformas de pesquisa para auxiliar na investigação científica, tais como o Portal de Periódicos da CAPES, Google Acadêmico e SciELO (*Scientific Electronic Library Online*). Ademais, consultaram-se alguns bancos de dados de armazenamento de artigos e teses de instituições de ensino brasileiras e estrangeiras.

Avaliaram-se documentos redigidos principalmente em línguas portuguesa, inglesa e francesa, utilizando-se palavras-chave relacionadas aos temas supramencionados.

Realização de experimentos no Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFMG, Brasil)

Esta etapa baseou-se na construção de um reservatório retangular raso com 3,0 m de comprimento, 2,0 m de largura e com 0,30 m de profundidade. Seus dois canais, o de entrada e o de saída, ambos com seção transversal em formato retangular, tiveram 1,0 m de comprimento, 0,125 m de largura e a mesma profundidade do reservatório.

Ao todo, foram realizados 18 ensaios sob condição de água limpa, sendo 6 ensaios para cada uma das 3 diferentes vazões consideradas, em regime permanente (0,50 L/s, 1,25 L/s e 3,40 L/s). Para cada vazão de referência, empregou-se uma profundidade líquida específica (0,05 m, 0,10 m e 0,20 m, respectivamente). Cada um dos 6 ensaios realizados por vazão contemplou uma configuração geométrica em particular, definida em função do posicionamento dos canais de entrada e de saída, instalados nas paredes de montante e de jusante do reservatório, respectivamente. Em cada uma dessas paredes, foram previstas três posições alternativas: à esquerda, à direita e alinhada com o eixo longitudinal do reservatório.

Os 18 experimentos realizados no CPH-UFMG fundamentaram-se na filmagem dos ensaios com a utilização de traçadores inseridos na água e na aplicação da técnica do LSPIV (*large scale particle image velocimetry*). A partir do emprego de tal técnica, foram construídas figuras representativas dos campos de velocidade superficial, utilizadas na análise do padrão de escoamento associado a cada configuração geométrica.

Realização de experimentos no Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico (LH-IST, Portugal)

Outro programa experimental foi concebido no âmbito do LH-IST. Para tanto, construiu-se um segundo reservatório retangular raso, em menor escala, com dimensões horizontais correspondentes à proporção 1:2 do reservatório brasileiro. Deste modo, o reservatório português dispôs de 1,5 m de comprimento, 1,0 m de largura e 0,16 m de profundidade. Quanto aos canais de entrada e de saída, ambos foram construídos com 1,0 m de comprimento, 0,063 m de largura e com altura idêntica à do reservatório. Tal como para o reservatório brasileiro, avaliaram-se diferentes configurações geométricas em função do posicionamento dos canais de entrada e de saída, seguindo a mesma definição realizada naquele caso, ou seja, com três posições alternativas para cada canal.

Realizaram-se 15 ensaios com água limpa, tendo sido desconsiderada 1 das 6 configurações geométricas adotadas nos experimentos brasileiros, pelo fato de seus resultados terem sido espelhados aos de outra geometria. Consideraram-se 3 diferentes vazões (0,15 L/s, 0,37 L/s e 1,00 L/s), cada qual associada a uma dada profundidade líquida (0,036 m, 0,071 m e 0,143 m, respectivamente). Em cada um daqueles 15 ensaios, foram avaliados os seguintes aspectos:

- Caracterização dos padrões de escoamento em superfície, a partir da filmagem dos experimentos com adição de traçadores e emprego da técnica do LSPIV, similar ao realizado no reservatório brasileiro;
- Caracterização dos padrões de escoamento em profundidade, a partir da medição de velocidades em três planos horizontais de referência e uso da sonda *Vectrino*.

Adicionalmente, realizaram-se 5 experimentos com inserção de sedimentos transportados por arrastamento, um para cada uma das 5 configurações geométricas de referência. Optou-se pela utilização de baquelite granular à concentração de 3,0 g/L de água. Em todos os ensaios com sedimento, considerou-se a vazão líquida de 1,00 L/s em regime permanente. Foram avaliadas as seguintes condições:

- Caracterização de tendências de deposição de sedimento, a partir da avaliação da evolução morfológica temporal baseada em levantamentos topobatimétricos periódicos, realizados a cada hora de ensaio;
- Avaliação do volume de sedimentos retidos, a partir de levantamentos topobatimétricos completos realizados após o término de cada ensaio, e do percentual da capacidade do reservatório comprometido pelo processo de sedimentação;
- Análise dos padrões de escoamento obtidos pós-deposição de sedimentos, realizada com base na adoção da técnica do LSPIV, de modo similar ao empregado nos ensaios com água limpa;
- Avaliação da influência da sedimentação sobre a velocidade de escoamento, a partir da medição de velocidades em profundidade com uso da sonda *Vectrino* em determinadas regiões do reservatório, periodicamente durante a realização dos experimentos com baquelite.

Realização de simulações numéricas para avaliação do padrão de escoamento relativo aos ensaios com água limpa

Paralelamente à condução dos experimentos com água limpa nos reservatórios brasileiro e português, foram utilizados os programas computacionais *WOLF 2D* e *Autodesk® CFD* para realização de simulações numéricas.

Com auxílio do programa *WOLF 2D*, foram construídas todas as geometrias avaliadas experimentalmente no âmbito do CPH-UFMG, tendo em vista também as 3 distintas vazões adotadas, e obtidos os campos de velocidade superficial numéricos. No que se refere à utilização do programa *Autodesk® CFD*, foram contemplados todos os experimentos com água limpa realizados no Brasil e em Portugal, no contexto desta pesquisa.

Por meio da realização das simulações numéricas, foi possível avaliar os seguintes aspectos:

- Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no CPH-UFMG;
- Comparação entre resultados numéricos de caracterização dos padrões de escoamento com água limpa referentes ao CPH-UFMG: *WOLF 2D* x *Autodesk® CFD*;
- Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no LH-IST.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Generalidades sobre escoamentos rasos

4.1.1 Definição e caracterização geral

De acordo com Jirka e Uijttewall (2004) e Cieslik *et al.* (2010), as bases da teoria de turbulência 2D, que motivaram o estudo dos escoamentos rasos, foram estabelecidas nos anos 60, especialmente por influência do trabalho de Kraichnan (1967). Segundo as citadas referências e conforme Stoker (1957), os escoamentos rasos caracterizam-se como escoamentos turbulentos com extensão verticalmente limitada, pela superfície de fundo e por uma superfície livre, em um domínio para o qual duas dimensões horizontais são significativamente maiores que uma terceira dimensão, a vertical.

Por se tratar de escoamentos rasos, costumam ser caracterizados como bidimensionais (2D) ou “quase-bidimensionais” (*quasi-2D*), tanto por conta da velocidade líquida, admitida como a média do perfil vertical, quanto por suas flutuações turbulentas. Desta forma, as características tridimensionais apareceriam como efeitos difusivos e dispersivos turbulentos adicionais, estes últimos devidos ao perfil vertical de tensões tangenciais, em relação ao transporte de massa e de quantidade de movimento (KANTOUSH, 2008).

Matematicamente, os escoamentos rasos tendem a ser tratados aplicando-se as chamadas equações de águas rasas, ou *shallow water equations* (SWE), no termo em inglês. Essas equações representam um conjunto de equações diferenciais parciais hiperbólicas. São compostas pela equação de conservação da massa e pelas equações de conservação da quantidade de movimento relativas às duas dimensões horizontais do escoamento (x e y). Também chamadas de equações de Saint-Venant, correspondem a um caso particular das equações de Navier-Stokes, considerando uma velocidade média característica de toda a profundidade do escoamento. Admite-se também que a componente vertical da velocidade é reduzida em relação às componentes horizontais. Além disso, considera-se que os gradientes verticais de pressão são aproximadamente hidrostáticos (STOKER, 1957; KANTOUSH, 2008; WALTERS *et al.*, 2009).

Nasif, Barron e Balachandar (2014) destacam que os escoamentos rasos assemelham-se a escoamentos de camada-limite influenciados pela tensão tangencial transmitida pela

superfície de fundo e quase sem a presença de qualquer tensão resistente na superfície livre, como ocorre no caso de escoamento em canais, em que há uma interface água-ar.

Jirka e Uijtewall (2004) são mais enfáticos em estabelecer dois requisitos fundamentais para que um escoamento seja caracterizado como turbulento raso: um de caráter cinemático, em que a escala do comprimento horizontal L deve ser muito maior que a escala do comprimento vertical h , no caso, a profundidade; e outra condição dinâmica, vinculada às condições de contorno, em que uma das superfícies de contato com o fluido deve engendrar uma tensão de arrastamento neste, ao passo que outra superfície deve ser isenta de tal influência. Essa última condição, portanto, vai ao encontro do requisito observado e pontuado por Nasif, Barron e Balachandar (2014).

As instabilidades observadas em águas rasas costumam estar associadas a números de Reynolds suficientemente grandes, maiores que 10^3 , com designação do regime de escoamento como completamente turbulento (JIRKA; UIJTTEWALL, 2004). Neste caso, os autores consideraram o número de Reynolds calculado pela expressão $Re = U.h/\nu$, sendo U a velocidade média do escoamento, h a profundidade líquida e ν a viscosidade cinemática da água. Kolyshkin e Nazarovs (2005) salientam ainda que a formação de vórtices em escoamentos rasos pode assemelhar-se a padrões observados em escoamentos profundos, mas que a ocorrência desse padrão de escoamento está usualmente associada a números de Reynolds bastante elevados, reforçando a tese dos autores anteriormente mencionados. Contudo, Kolyshkin e Nazarovs (2005) não apresentam valores para o número de Reynolds a partir dos quais haveria manifestação dos efeitos turbulentos em escoamentos rasos. Apenas citam um exemplo de outra referência em que se observou a formação de vórtices para um número de Reynolds igual a 10^7 . Não foi informado nem como, nem em relação a qual seção transversal se determinou esse valor.

De acordo com Talstra (2011), o tamanho e as fronteiras de um dado vórtice formado em uma zona de recirculação são de difícil determinação, apesar de ser possível associá-los a escalas de comprimento e de velocidade características em função de uma dada vazão.

Kolyshkin e Nazarovs (2005) endossam a simplificação discutida anteriormente quanto à hipótese de que há independência das características do escoamento de sua coordenada vertical, uma vez que as equações de águas rasas costumam considerar valores de

profundidades médias. No entanto, essa premissa pode não ser válida quando há mudanças na geometria estudada, em função do regime de escoamento ou ainda por conta da influência da rugosidade de fundo. Em alguns casos, é indicada, inclusive, a utilização de coeficientes para correção da quantidade de movimento, em razão da não-uniformidade na distribuição vertical de velocidades.

4.1.2 Aplicações

Escoamentos turbulentos em águas rasas podem ser encontrados na natureza em diversos ambientes, tais como rios largos, estuários, lagos, áreas costeiras de pequena profundidade, dentre outros (CARMER; JIRKA, 2001; NASIF; BARRON; BALACHANDAR, 2014). Ademais, Jirka e Uijttewall (2004) estendem a aplicação da teoria referente aos escoamentos rasos também aos corpos hídricos estratificados, tais como fiordes (golfos sinuosos entre altas montanhas rochosas) e bacias oceânicas mais alargadas.

Nasif, Barron e Balachandar (2014) salientam ainda que seria benéfico um bom entendimento do comportamento hidráulico dos escoamentos em ambientes pouco profundos, assim como sua capacidade de transporte, tendo em vista a tendência de aprisionamento de poluentes em ilhas ou áreas de cabeceiras, a acumulação de nutrientes ou a atividade biológica de diversas espécies aquáticas.

Outra aplicação dos escoamentos rasos de grande interesse, no que se refere à caracterização dos padrões de escoamento e de deposição de sedimentos, consiste nos desarenadores e em outras estruturas de decantação previstas nas etapas de pré-tratamento em estações de tratamento de esgoto, conforme destaca Camnasio (2012). Stovin (1996) avaliou em seu estudo a eficiência de retenção de sólidos em tanques de sedimentação (*storage chambers*, no termo em inglês) em função da vazão e de parâmetros geométricos. Para tanto, foi construído um modelo reduzido de laboratório e realizada a modelagem numérica correlata, a fim de se poder identificar os volumes depositados no interior do tanque, bem como os locais onde ocorreram os depósitos sólidos. Por sua vez, e seguindo a mesma abordagem, Dufresne (2008) investigou os padrões de escoamento e transporte sólido (eficiência e localização dos depósitos) em reservatórios retangulares para decantação de sólidos em sistemas de esgotamento sanitário. Objetivou-se, com base na utilização de um programa computacional comercial para modelagem numérica e na construção de um modelo físico, estabelecer

critérios geométricos para esse tipo de reservatório que pudessem nortear o desenvolvimento de projetos de instalações similares.

Os escoamentos turbulentos rasos também são alvo de estudos concernentes a etapas de tratamento que contemplam a estabilização de resíduos e de efluentes sanitários, oxidação, arrefecimento ou desinfecção (CAMNASIO, 2012). Com efeito, Wood *et al.* (1998) estudaram à época a influência de fatores geométricos, tal como a geometria das tubulações afluentes a lagoas de estabilização de sistemas de esgotamento sanitário, sobre a hidrodinâmica do fluido. Para tanto, os autores utilizaram um modelo computacional bidimensional do tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e compararam os resultados a dados experimentais que envolviam a avaliação da distribuição do tempo de residência nesse tipo de reservatório. Constituiu objetivo do estudo identificar fatores que influenciavam o desempenho das bacias de estabilização de efluentes, em termos de eficiência de sedimentação, os quais não eram corretamente considerados em modelos teóricos tradicionais. Abbas, Nasr e Seif (2006), por sua vez, avaliaram a influência dos parâmetros geométricos e de defletores instalados internamente em lagoas de estabilização, no que se refere à sua eficiência na melhoria da qualidade da água. Utilizou-se, de forma similar a Wood *et al.* (1998), um programa computacional 2D do tipo CFD. Após simularem diversas configurações geométricas considerando um reservatório de forma retangular, sem ou com defletores, concluíram que a relação comprimento/largura de 4:1 com a presença de defletores transversais correspondia à configuração mais apropriada para melhorar a hidrodinâmica global da lagoa de estabilização e a eficiência de remoção de DBO (demanda bioquímica de oxigênio). Outros estudos seguindo abordagens similares foram promovidos com o objetivo de definir uma configuração geométrica ótima para maximização da eficiência de tratamento de lagoas de estabilização, baseando-se no aumento do tempo de retenção (OLUKANNI; DUCOSTE, 2011; LI *et al.*, 2013).

Ademais, são exemplos de aplicações das teorias envolvendo os escoamentos turbulentos rasos as bacias de detenção, dispositivos largamente empregados em projetos de drenagem urbana para controle de cheias e prevenção de ocorrência de inundações. Diversos estudos, tais como os apresentados por Persson, Somes e Wong (1999), Persson (2000) e Persson e Wittgren (2003), basearam-se na avaliação da influência da forma geométrica desses reservatórios, da posição dos condutos de entrada e de saída, do arranjo botânico e da morfologia da bacia sobre a hidrodinâmica dos fluidos. Dando seguimento aos estudos ora

mencionados, Jansons e Law (2007) analisaram a eficiência hidráulica de bacias de retenção de diferentes formatos, inclusive com configurações não convencionais, como em formato de gota, arqueadas e com a presença de uma ilha em sua parte central. Para essa finalidade, foi utilizado o modelo computacional bidimensional Mike-21. De acordo com os resultados obtidos, as configurações com maiores comprimentos relativos (relação comprimento-largura) resultaram em maior eficiência hidráulica, gerando menos áreas de estagnação de água, em relação a outras configurações que foram consideradas como menos eficientes.

De acordo com Oca e Masaló (2006) e Masaló (2008), a caracterização dos padrões de escoamento desenvolvidos em diferentes configurações de tanques de aquicultura corresponde a uma das aplicações de interesse no domínio dos reservatórios rasos. O entendimento do comportamento hidrodinâmico nesse tipo de ambiente favorece o correto dimensionamento de estruturas para o desenvolvimento apropriado de culturas de peixes. Segundo os estudos de Camnasio (2012), nota-se a ocorrência de caminhos preferenciais de deslocamento da água, chamados de curtos-circuitos, sobretudo quando as velocidades de escoamento são pequenas, resultando na formação de zonas mortas ou de estagnação, as quais correspondem a zonas preferenciais de sedimentação.

Talstra (2011) ressalta que os complexos escoamentos turbulentos em águas rasas podem resultar em diversos problemas práticos, associados em grande parte à morfologia fluvial, tais como entraves à navegação devido à considerável mobilização de partículas sólidas e perda de estabilidade de estruturas hidráulicas causada por processos erosivos avançados. Portanto, juntamente com todas as demais aplicações supramencionadas, destaca-se a relevância do assunto em pauta sob esse aspecto.

4.1.3 Fatores condicionantes do comportamento hidrodinâmico dos escoamentos rasos

Segundo Nasif, Barron e Balachandar (2014), observa-se comumente em águas rasas a formação de agitações turbulentas quando tal escoamento é desestabilizado por uma mudança topológica abrupta, por exemplo, provocada pela desaceleração do escoamento. Segundo Talstra (2011), os vórtices verificados em escoamentos rasos ampliam-se em tamanho e energia à medida que se deslocam para jusante e podem eventualmente dissipar-se por influência da rugosidade de fundo.

Ademais, Kolyshkin e Nazarovs (2005) e Kantoush (2008) destacam que as instabilidades no escoamento são fortemente influenciadas pela reduzida profundidade líquida e que a rugosidade de fundo atua como um fator de supressão para o desenvolvimento de perturbações transversais. As instabilidades tridimensionais são limitadas devido à escala vertical do escoamento ser relativamente pequena, de modo que as turbulências formadas ficam restritas essencialmente a movimentos horizontais bidimensionais. Ainda segundo Kantoush (2008), a rugosidade de fundo tem uma influência estabilizante sobre a ocorrência dos vórtices de larga escala, reduzindo, conseqüentemente, o desenvolvimento de camadas planas de mistura (*plane mixing layers*, no termo em inglês). Tal ressalva endossa as destacadas ponderações de Kolyshkin e Nazarovs (2005) sobre o efeito da rugosidade de fundo.

No que se refere especificamente às camadas planas de mistura, Kantoush (2008) e McMullan e Garrett (2016) salientam que esse aspecto tem sido muito estudado desde a década de 40, já que se refere a uma forte instabilidade do escoamento, responsável pela formação de turbulências de grande escala. Essas camadas planas de mistura, do ponto de vista físico, estão associadas às trocas de massa e de quantidade de movimento em aplicações que envolvem o encontro de dois escoamentos com diferentes velocidades. É o caso dos jatos ao serem escoados através de massas de água com baixa velocidade ou até mesmo inicialmente em repouso. O princípio de troca de massa e de quantidade de movimento entre o jato e as zonas de expansão constitui um fator determinante do padrão de escoamento característico de uma dada aplicação, do processo de transporte de sedimento e erosão, assim como do transporte de poluentes.

McMullan e Garrett (2015) ressaltam que a influência das camadas planas de mistura já foi identificada em uma série de aplicações com ampla gama de números de Reynolds. Apesar de a teoria clássica indicar que tal camada de mistura turbulenta é representada por um escoamento essencialmente aleatório, tem-se observado experimentalmente a formação de estruturas escoando de forma organizada. Ainda segundo os autores, tais estruturas ocupam toda a espessura visível da camada de mistura, o que ressalta sua importância para o escoamento em termos dinâmicos. Quando associadas a elevados números de Reynolds, ou seja, a escoamentos turbulentos, tendem a expandir-se continuamente para jusante, tal como destacado por Talstra (2011).

De acordo com Jirka e Uijtewall (2004), muitos fatores adicionais e variações geométricas podem perturbar a estabilidade dos escoamentos rasos, a saber: (a) presença de expansões ou contrações na geometria externa; (b) presença de curvaturas resultando em circulações secundárias internas; (c) escoamento em grandes escalas (com dimensões compatíveis com as chamadas ondas de Rossby), introduzindo efeitos de rotação provocados pela força de Coriolis; (d) instabilidades de ondulações internas e provenientes da interação de camadas de diferentes fluidos estratificados em função da densidade; dentre outros.

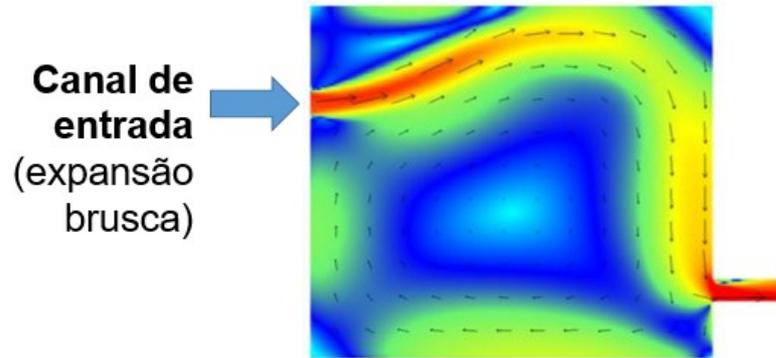
A título de informação, ondas de Rossby, também chamadas de ondas planetárias, correspondem a padrões de circulação naturais de grande escala que se propagam pelo oceano e pela atmosfera, em razão da rotação do planeta. As ondas de Rossby na Terra são padrões meandriformes gigantes em ventos de elevada altitude que causam grande influência no clima. São ondas com pequena velocidade de propagação, em torno de 10 cm/s, e com comprimentos de onda podendo alcançar centenas ou até mesmo milhares de quilômetros (OLIVEIRA; POLITO, 2009).

Um fenômeno interveniente dos padrões de escoamento, observado em aplicações de águas rasas, refere-se ao chamado efeito Coanda, também conhecido como efeito de aderência à parede. Consiste na tendência de um fluido em movimento, líquido ou gasoso, ser atraído por uma superfície adjacente, aderir-se a ela e fluir ao longo da mesma superfície (QUIANI; GLOWINSKI; CANIC, 2016).

Um exemplo de ocorrência desse fenômeno é apresentado a seguir, na Figura 4.1, a qual representa o caso de um jato de água desviado em direção à parede lateral esquerda após passar por uma expansão brusca. O exemplo em pauta refere-se à simulação numérica de um reservatório retangular raso, com o canal de entrada posicionado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório. O número de Reynolds correspondente, determinado em uma seção transversal do canal de entrada, foi igual a 112.000 (regime turbulento), obtido a partir da expressão $Re = U \cdot 4h / \nu$. O escoamento foi permanente (CAMNASIO *et al.*, 2013).

Ainda segundo Quiani, Glowinski e Canic (2016), o fenômeno em pauta foi assim denominado em homenagem ao engenheiro aeronáutico romeno Henri Coanda, o pioneiro a observar tal ocorrência, no ano de 1930, aplicada ao desenvolvimento de aeronaves.

FIGURA 4.1 – Manifestação do efeito Coanda a jusante de uma expansão brusca



Fonte: CAMNASIO *et al.*, 2013.

Mais especificamente, o efeito Coanda refere-se a um fenômeno hidrodinâmico descrito pela aderência superficial de jatos que escoam próximos de alguma superfície lateral. O fenômeno resulta de uma expansão assimétrica do jato causada pela redução do arrastamento de massa naquele lado do jato que estiver mais próximo de tal superfície. Em outras palavras, isso ocorre devido à presença da superfície lateral, que impede que o fluido circundante seja arrastado para dentro em direção ao jato. Um aumento das forças tangenciais devido aos maiores diferenciais de velocidade no sentido transversal resulta no desvio do jato e em sua aderência à superfície lateral. Além disso, o jato fica impedido de se expandir mais a jusante do lado afetado (CHAO *et al.*, 1992).

De acordo com Shapira, Degani e Weihs (1990) e Dewals *et al.* (2008), o desvio do jato deve-se ao fato de que há aumento da velocidade em um de seus lados, o mais próximo de uma parede lateral, resultando em redução da pressão local e amplificando a deflexão do escoamento e, em consequência, a assimetria do escoamento. Por outro lado, na parte interna do vórtice formado à direita do jato, um aumento da velocidade provoca aumento das forças centrífugas, as quais tendem a restabelecer a simetria do padrão de escoamento. Os autores destacam ainda que o escoamento estável representa um equilíbrio entre os dois efeitos mencionados.

Cabe ressaltar que a manifestação desse desvio do escoamento (condição assimétrica) por conta do efeito Coanda em transições horizontais de expansão brusca ocorre para elevados números de Reynolds, típicos de regime de escoamento turbulento. Quando associado a pequenos números de Reynolds, normalmente inferiores a 150, o escoamento costuma ser

bidimensional e simétrico na região central, ou seja, o efeito Coanda não se manifesta neste caso (SHAPIRA; DEGANI; WEIHS, 1990).

É relevante destacar que o efeito Coanda manifesta-se apenas no caso do fluido do jato e o circundante serem essencialmente a mesma substância (um jato de ar atuando sobre uma massa de ar ou um jato líquido agindo sobre um meio líquido).

O efeito Coanda aplica-se a uma imensa diversidade de áreas, dentre as quais a Engenharia Hidráulica, conforme apresentado neste capítulo, a aeronáutica, que deu origem a sua formulação, bem como a medicina cardiovascular. O conhecimento do efeito Coanda foi primordial para a melhoria do desempenho dos dispositivos para propulsão e elevação de aeronaves. Um exemplo disso refere-se à existência de superfícies curvas nas asas, as quais auxiliam no direcionamento do jato de ar para cima. Quanto à aplicação no campo da medicina cardiovascular, cita-se o estudo de Quiani, Glowinski e Canic (2016). Segundo os autores, o fenômeno corresponde à principal causa da chamada regurgitação mitral, uma doença cardíaca caracterizada por um vazamento anormal de sangue através da válvula mitral do ventrículo esquerdo para o átrio esquerdo do coração.

4.2 Generalidades sobre sedimentos

4.2.1 Controle de sedimentos em reservatórios

Por estarem suscetíveis à decantação de sólidos carregados pelo escoamento e, por consequência, ao processo de assoreamento, os reservatórios podem demandar, em seu plano de conservação e de manutenção, a adoção de medidas preventivas e/ou corretivas. Carvalho (2018) destaca que as medidas preventivas estão associadas ao controle dos processos erosivos na bacia e às ações que visam evitar que o sedimento entre no sistema fluvial e seja decantado nos reservatórios. São exemplos de medidas preventivas a proteção vegetal das margens de rios e de reservatórios e a construção de bacias de sedimentação ou de desarenadores a montante desses reservatórios. Já as medidas corretivas, consideradas mais dispendiosas, referem-se à adoção de alternativas para mitigação de algum problema de operação de um reservatório e para redução de prejuízos, sobretudo, financeiros. Englobam, dentre outras soluções, a remoção do sedimento por dragagem, o alteamento da barragem para recuperação do volume de água ocupado pelo sedimento e o uso de descarregadores de fundo junto ao corpo de barragens.

No que se refere à seleção de medidas para controle da afluência de sedimentos ao reservatório, destaca-se a possibilidade de construção de uma pequena barragem a montante, ao longo do curso d'água principal ou em algum afluente cuja carga sólida seja expressiva, para acumulação desse sedimento. Além disso, outra solução bastante empregada, inclusive em áreas urbanas, envolve a construção de bacias de decantação (ou de sedimentação) em áreas adjacentes às dos cursos d'água e reservatórios, com o objetivo de promover a retenção de sólidos carregados, por exemplo, durante as enchentes (CARVALHO, 2008).

Logo, quando se tem interesse em proteger os reservatórios da influência da carga sólida sedimentável empregando-se bacias de decantação, é fundamental que se tenha conhecimento dos fatores que resultam na máxima retenção de sedimentos possível. Tais fatores referem-se a aspectos geométricos, hidráulicos e relativos à natureza do sedimento.

4.2.2 Problemas devidos à deposição de sedimentos em reservatórios

No que se refere à deposição de sedimentos em reservatórios, Carvalho (2008) destaca, dentre outros, os seguintes inconvenientes:

- A sedimentação pode resultar no assoreamento do reservatório, além de reduzir sua capacidade de armazenamento de água, seja para qual finalidade for usado e, conseqüentemente, encurtar sua vida útil;
- Tal assoreamento pode comprometer estruturas hidráulicas, como as tomadas d'água, assim como interferir nas condições de navegabilidade em decorrência da diminuição da profundidade disponível;
- Reservatórios para controle de cheias ficam suscetíveis ao transbordamento, também por conta da redução de sua capacidade de armazenamento de água;
- A presença de sedimentos, e eventualmente de contaminantes, pode colocar em risco a qualidade da água utilizada para dessedentação de animais e para abastecimento humano;
- Quando em grande quantidade, o sedimento decantado pode comprometer o desenvolvimento da fauna e flora aquáticas;
- Demandam grandes investimentos para realização de serviços de manutenção e de desassoreamento.

De acordo com Giri e Narayan (2018), baseando-se em estudos de 243 barragens na Índia, cerca de 26 bilhões de m³ de volume total de armazenamento bruto já foram consumidos por sedimentos decantados. Isso corresponde a um volume maior que a capacidade dos reservatórios de todas as grandes barragens japonesas (aproximadamente 23 bilhões de m³).

Segundo Hussain, Cattapan e Franca (2018), o problema com a intensa sedimentação também acomete os reservatórios no Paquistão, com perda anual de capacidade global de armazenamento entre 0,5 e 1,0%. O reservatório de Mangla, por exemplo, teve sua capacidade reduzida em 1,97 bilhões de m³ entre 1967 e 2010, o que representou uma taxa anual média de perda volumétrica em torno de 0,5%.

Com relação ao Japão, Sumi e Kantoush (2018) destacam uma perda anual de capacidade de armazenamento em reservatórios de cerca de 0,24%, o que é considerado um índice reduzido. O estudo pautou-se em dados anuais de 877 reservatórios japoneses. Já nas regiões montanhosas do centro do país, tal percentual alcançou 0,42%. Os autores salientam ainda a condição de alguns reservatórios para fins de geração hidroelétrica, em operação há mais de 50 anos, cuja perda de capacidade acumulada representa de 60 a 80% de seu volume total.

4.2.3 Determinação da eficiência de retenção de sedimentos

A eficiência de retenção de sedimentos (ERS) é definida pela razão entre a quantidade de sedimentos retida ou decantada e a quantidade de sedimentos afluente num dado intervalo de tempo. Esta relação é apresentada pela Equação 4.1.

$$ERS = 100 \cdot \frac{S_{\text{afluente}} - S_{\text{defluente}}}{S_{\text{afluente}}} = 100 \cdot \frac{S_{\text{retido}}}{S_{\text{afluente}}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Em que:

ERS = eficiência de retenção de sedimentos (em %);

S_{afluente} = massa ou volume de sedimentos afluente ao reservatório;

S_{defluente} = massa ou volume de sedimentos que sai do reservatório;

S_{retido} = massa ou volume de sedimentos depositada no reservatório.

É relevante pontuar que o conceito de eficiência de retenção de sedimentos é relativo com respeito ao tempo. No início do processo de sedimentação, pode ser total; quando em

equilíbrio, é nula. Se for integrada até ao equilíbrio, a eficiência de retenção dependerá de vários aspectos que determinam o processo, dentre os quais a forma do reservatório e a disposição da entrada e da saída.

4.3 Modelagem numérica

4.3.1 Utilização de modelagem numérica em Hidráulica

Modelos numéricos de escoamentos em Hidráulica envolvem a utilização de programas computacionais projetados com o objetivo de solucionar equações clássicas de Mecânica dos Fluidos (CHANSON, 2004). Muitos desses programas computacionais, entretanto, restringem-se normalmente a intervalos específicos de condições iniciais e de contorno. Ademais, o processo de calibração dos parâmetros envolvidos no modelo e a validação da solução numérica costumam representar uma tarefa bastante árdua, que demanda experiência e perspicácia por parte de seus utilizadores.

Os modelos hidráulicos mais robustos atualmente disponíveis têm como referência as equações de Reynolds e costumam ser bi ou tridimensionais. Chanson (2014) destaca a importância de se ter prudência ao utilizar um programa computacional desse tipo, pois é necessário que se conheça as equações de base, bem como as limitações do programa. Ademais, recomenda-se muita atenção quanto ao entendimento dos mecanismos hidráulicos correlatos e dos processos físicos envolvidos no sistema.

Segundo Kantoush (2008), simulações numéricas do escoamento em reservatórios são importantes para que se determine em detalhes os padrões de escoamento que tipicamente resultam na separação do escoamento nas estruturas de entrada do reservatório, bem como as zonas de recirculação e de estagnação.

No que se refere à modelagem do comportamento do sedimento no contexto de ambientes fluviais e costeiros, tem-se investido bastante em códigos numéricos para tal finalidade. Esses modelos integram habitualmente aspectos relacionados à propagação da cheia (*water routing*) e ao transporte do sedimento e costumam dispor de outras ferramentas desenvolvidas por conta de algum interesse específico (KANTOUSH, 2008).

Encontram-se disponíveis atualmente modelos acadêmicos e comerciais unidimensionais, tais como o HEC-RAS e o WOLF 1D, bidimensionais, assim como o HEC-RAS 2D e o CCHE 2D, e tridimensionais, como, por exemplo, o Autodesk® CFD e o FLOW-3D.

No âmbito desta investigação científica, foram utilizados o modelo conservativo de volume finito WOLF 2D e o programa computacional tridimensional Autodesk® CFD, apresentados, respectivamente, nos itens 4.3.2 e 4.3.3. Justifica-se a escolha do modelo WOLF 2D pelo fato deste já ter sido utilizado em outros trabalhos em que se realizou a modelação numérica de escoamentos rasos em reservatórios retangulares, tal como nesta pesquisa (KANTOUSH, 2008; DEWALS *et al.*, 2008; ERPICUM *et al.*, 2009; CAMNASIO *et al.*, 2013; PELTIER *et al.*, 2015; PELTIER *et al.*, 2016; MIRANDA; REIS; COELHO, 2018; FERRARA *et al.*, 2018). Além disso, o autor desta tese contou com suporte da equipe responsável pelo modelo WOLF 2D, da Universidade de Liège. Por sua vez, justifica-se a escolha do modelo tridimensional Autodesk® CFD pelo fato deste ser gratuito e apresentar uma boa interface gráfica, por ser facilmente integrado ao programa AutoCAD, também fornecido pela empresa Autodesk, e por demandar um tempo relativamente curto para realização das simulações.

4.3.2 Modelo conservativo de volume finito WOLF 2D

O modelo acadêmico WOLF 2D foi desenvolvido pela Universidade de Liège (ULg, Bélgica) em língua francesa. Tal programa computacional baseia-se no emprego de equações bidimensionais de conservação da massa e da quantidade de movimento, sob a hipótese de adoção de profundidade média do fluido. As equações em questão são conhecidas como equações de águas rasas, ou no termo em inglês, *shallow water equations* (SWE).

O WOLF 2D admite como premissa que a componente vertical w da velocidade é desprezável em relação às componentes horizontais. Com isso, supõe-se haver uma distribuição hidrostática de pressões em toda a região de análise da modelagem. Já as componentes horizontais da velocidade u e v são velocidades médias em profundidade que aparecem inseridas nas denominadas equações RANS, do termo em inglês, *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, ou ainda equações de Reynolds. Tais equações derivam da integração ao longo da direção vertical z das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis (CAMNASIO, 2012).

As tensões turbulentas são expressas seguindo a aproximação de Boussinesq (transposto para um modelo de média em profundidade), a qual as associa às velocidades médias do escoamento, por meio da viscosidade turbulenta. Tal viscosidade turbulenta deve ser definida adotando-se um modelo de turbulência específico. Para avaliação da viscosidade turbulenta, há acoplado ao programa WOLF 2D o modelo de turbulência do tipo $k-\epsilon$. Este modelo baseia-se em duas equações de transporte, uma referente à energia cinética turbulenta (k) e outra para transporte da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ), que são resolvidas em conjunto com as equações de continuidade e de quantidade de movimento a cada passo de tempo. Por meio das citadas equações de transporte, são adicionadas flutuações às componentes horizontais da velocidade, médias em profundidade. Além disso, o programa envolve duas diferentes escalas de comprimento que representam a mistura de turbulência vertical e horizontal (DEWALS *et al.*, 2008; CAMNASIO, 2012).

Ainda com relação ao modelo de turbulência $k-\epsilon$, este é indicado pela literatura como adequado para modelagem numérica de escoamento através de expansões laterais bruscas (alargamentos) e em canais dotados de espigões (*groynes* ou *groins*, no termo em inglês).

A discretização espacial das equações de águas rasas dá-se por meio de teoria de volumes finitos.

Os fluxos advectivos são calculados por um método *Flux Vector Splitting* (FVS) autodesenvolvido, enquanto os fluxos turbulentos são simplesmente avaliados por meio de um esquema centrado (ERPICUM *et al.*, 2009; CAMNSAIO, 2012).

Tendo em vista que o modelo admite condição hidraulicamente estacionária, realiza-se a integração temporal por meio de um algoritmo Runge-Kutta de 1ª ordem, em três etapas, resultando em dissipação temporal apropriada. Para assegurar a estabilidade numérica, o passo de tempo Δt deve obedecer a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) aplicável a ondas gravitacionais. O programa realiza ainda um pré-tratamento do termo de atrito de fundo, sem demandar, para tanto, grande esforço computacional adicional.

No que se refere às condições de contorno, considera-se comumente a vazão específica do lado de montante e a elevação da superfície líquida constante do lado de jusante. A vazão específica normal às paredes laterais é ajustada para zero. Finalmente, os gradientes das

incógnitas do modelo devem ser especificados nas seções de entrada e de saída, objetivando-se avaliar os termos difusivos do escoamento.

Quanto aos aspectos de constituição da malha do problema estudado, são considerados elementos cartesianos multiblocos. O modelo WOLF 2D dispõe de um algoritmo automático de refinamento de malha. Ademais, uma técnica de adaptação dos elementos da malha limita o domínio de simulação às células “úmidas”.

Informações pormenorizadas acerca do programa computacional WOLF 2D, incluindo a apresentação das equações de referência, são dadas por Dewals *et al.* (2008) e por Erpicum *et al.* (2009).

Alguns estudos concentraram-se na validação do programa computacional WOLF 2D e nas melhorias de sua robustez para modelação dos padrões de escoamento observados experimentalmente. O modelo em questão mostrou-se apto à reprodução dos complexos padrões de escoamento turbulentos em reservatórios rasos (DEWALS *et al.*, 2008; DUFRESNE *et al.*, 2011; CAMNASIO *et al.*, 2013, PELTIER *et al.*, 2015).

Para simulação de um cenário qualquer utilizando-se o programa WOLF 2D, inicialmente deve ser construída a malha do objeto a ser modelado através de um gerador de malhas integrado ao programa. Para tanto, são informadas as coordenadas absolutas de um ponto de referência, assim como os incrementos espaciais em dois eixos (Δx e Δy), de modo a criar uma malha bidimensional em função do número de elementos a serem construídos e exibidos sob demanda do usuário. Após a montagem da configuração a ser simulada, devem ser informados no programa computacional os parâmetros referentes às condições de contorno (geometria dos canais de entrada e de saída, no caso, coeficiente de rugosidade segundo Manning, dados topográficos dos elementos de composição da malha, dentre outros) e às condições iniciais de vazão e de profundidade do nível d'água. Finalmente, antes de prosseguir à simulação propriamente dita, realiza-se o ajuste dos parâmetros dessa simulação, inclusive os relativos à frequência de registro de resultados.

4.3.3 Modelo tridimensional Autodesk® CFD

O programa computacional tridimensional Autodesk® CFD trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos, tais como aeroacústica,

reações de combustão, reações químicas, dentre outras aplicações (ESSS, 2016; AUTODESK, 2018).

Tal programa demanda a utilização de outro *software* para construção do objeto sólido com o qual se pretende trabalhar. Neste caso, há boa compatibilidade com o AutoCAD, fornecido também pela empresa Autodesk, embora um não esteja efetivamente incorporado ao outro. O Autodesk® CFD permite importar arquivos com base geométrica nos formatos *.x_t*, *.sldprt*, *.sldasm*, *.step*, *.iges*, *.3dm*, dentre outros.

O *software* abrange ferramentas que possibilitam solucionar a maior parte dos problemas básicos de fluidodinâmica, o que inclui sua capacidade de modelar líquidos ou gases de múltiplos componentes e escoamentos estáveis ou instáveis. Além disso, integra um banco de dados de materiais, uma gama de modelos de turbulência e funções específicas para pré e pós-processamento de resultados. Possui uma versão denominada “CFD Ultimate”, fortemente compatível com outros programas computacionais CFD consagrados no mercado, como é o caso do SolidWorks Flow (RESOLVED ANALYTICS, 2018).

Baseia-se na análise de elementos finitos, resultando em malhas de superfícies triangulares e em elementos de volumes tetraédricos (formato padrão). O programa computacional dispõe de uma ferramenta para ajuste automático da malha (função ‘Autosize’).

Para modelos de turbulência associados a elevados números de Reynolds, são utilizadas “funções de parede” (*wall functions*, no termo em inglês) para modelar o escoamento turbulento próximo a paredes sólidas. Tais funções baseiam-se na lei logarítmica da distribuição de velocidades junto àquele tipo de superfície, também denominada de “lei da parede” (*wall law*, no termo em inglês). Nesse sentido, as “funções de parede” substituem o modelo de turbulência nos elementos representativos da parede e demandam a atribuição de apenas um nó da malha à camada limite. Para que isso seja feito, recorre-se à ferramenta ‘wall layer’ (AUTODESK, 2018; RESOLVED ANALYTICS, 2018).

Do ponto de vista matemático, as equações que governam os cálculos realizados pelo programa aplicados à abordagem do CFD, para escoamento do fluido e para transferência de calor, são: a de conservação da massa (continuidade), as de Reynolds (chamadas também de RANS, do termo em inglês, *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) ou de conservação da quantidade de movimento nas direções *x*, *y* e *z*, e a da Primeira Lei da Termodinâmica, ou de

conservação da energia. Todas as cinco equações citadas são equações diferenciais parciais, dependentes do tempo e tridimensionais, em relação às direções x , y e z (AUTODESK, 2018).

Ainda de acordo com Autodesk (2008), o modelo numérico Autodesk® CFD resolve tais equações diferenciais baseando-se em um valor médio temporal. Neste caso, leva-se em conta que as variáveis dependentes podem ser representadas por uma superposição de um valor médio e um valor flutuante, onde esta flutuação ocorre em torno da própria média.

Com relação aos modelos de turbulência empregados pelo programa em pauta, costumam envolver duas equações de transporte que permitem determinar a viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) e a condutividade turbulenta (*eddy conductivity*). De maneira geral, o modelo de turbulência k - ϵ é o mais comumente usado em CFD para simular as características de vazão média para condições de escoamento turbulento. Neste caso, o modelo k - ϵ envolve uma equação para transporte da energia cinética turbulenta (k) e outra para transporte da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ) (AUTODESK, 2018).

Adicionalmente, outros modelos de turbulência estão disponíveis no *software* para situações mais específicas, como: o modelo ‘RNG’, quando se deseja simular, por exemplo, situações em que há presença de ar junto ao escoamento ou pontos de separação no escoamento; o modelo ‘Low Re k-epsilon’, quando há, por exemplo, grandes regiões do domínio do problema que são laminares; modelo ‘SST k-omega’ e suas variantes SAS, RC e DES, utilizado em diversas aplicações aerodinâmicas; dentre outros (AUTODESK, 2018).

Convém ressaltar, ainda no que se refere ao modelo ‘SST k-omega’, que este representa uma combinação do modelo ‘Wilcox-k-omega’ com o modelo ‘ k - ϵ ’. O modelo ‘k-omega’ é mais adequado para simular o escoamento junto à sub-camada viscosa, ao passo que o modelo ‘ k - ϵ ’ é ideal para representar o escoamento afastado da parede (AUTODESK, 2018).

Quanto ao método de discretização, a abordagem do programa é baseada, conforme já ressaltado, no método de elementos finitos, segundo Autodesk (2018). As equações diferenciais parciais previamente citadas são então reduzidas a um conjunto de equações algébricas. O método de elementos finitos age diretamente nos termos de difusão e fonte das equações de base.

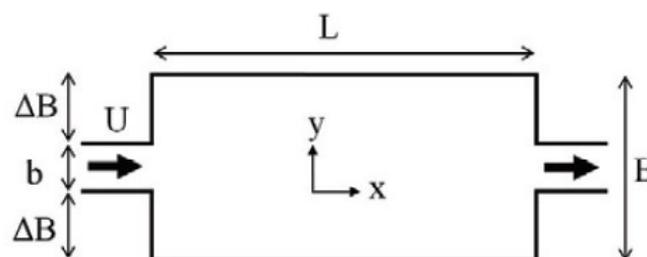
No entanto, é requerido ainda que seja escolhido um esquema de advecção (*advection scheme*), também chamado, no termo em inglês, de *upwind method*, para estabilidade numérica. Autodesk (2018) apresenta as cinco opções disponíveis no programa: ADV 1 (Monotone streamline upwind); ADV 2 (Petrov-Galerkin); ADV 3 (Flux based scheme); ADV 4 (Min-Mod scheme – Petrov-Galerkin variant) e; ADV 5 (Modified Petrov-Galerkin). O quinto deles, o ADV 5, aparenta ser o mais adequado para aplicações de escoamentos com formação de vórtices e de células de escoamento secundário. Além disso, representa uma versão numericamente mais estável que o segundo, o ADV 2.

4.4 Experiência sobre padrões de escoamento e deposição de sedimentos em reservatórios rasos

4.4.1 Terminologia

De acordo com Dufresne *et al.* (2010a,b), considera-se na literatura concernente ao estudo de reservatórios rasos que o escoamento é representado fundamentalmente por nove parâmetros, a saber: L = comprimento do reservatório, ΔB = expansão lateral, b = larguras dos canais de entrada e de saída, h = profundidade do escoamento, U = velocidade média do escoamento, determinada no canal de entrada, τ = tensão de arrastamento do fundo, ρ = massa específica da água, μ = viscosidade dinâmica, ou absoluta, da água e g = aceleração gravitacional. Os parâmetros geométricos mencionados acima são apresentados na Figura 4.2.

FIGURA 4.2 - Representação dos parâmetros de um reservatório retangular raso (em planta).



Fonte: DUFRESNE *et al.*, 2010a.

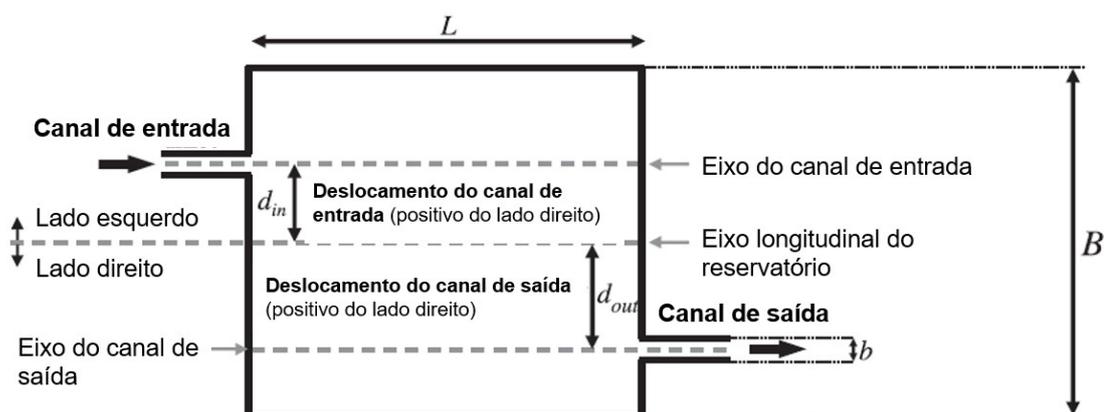
Ademais, a Figura 4.2 indica o comprimento do reservatório, simbolizado pelo parâmetro L , bem como a direção do escoamento, orientada pela seta e pela letra U , utilizada para caracterizar o termo de velocidade média do escoamento.

Tendo em vista que o conjunto dos nove parâmetros envolve as grandezas *tempo*, *massa* e *comprimento*, é possível reduzi-los a seis outros fatores, nesse caso, adimensionais. Define-se então: razão de expansão lateral $\Delta B/b$; comprimento adimensional $L/\Delta B$; profundidade do escoamento adimensional $h/\Delta B$; número de Froude $Fr = U/(g.y_h)^{1/2}$, sendo que y_h representa a profundidade hidráulica no canal de entrada; número de Reynolds $Re = \rho.U.R_h/\mu$; e coeficiente de atrito do fundo $c_f \Delta B/2h$, em que c_f é obtido por meio da formulação $c_f = 2\tau/\rho U^2$. Com relação à profundidade hidráulica, considerou-se o mesmo símbolo y_h adotado por Baptista e Lara (2016), correspondendo ao quociente entre a área molhada da seção transversal e largura superficial desta. É conveniente destacar que o chamado número de Froude refere-se à razão entre as forças inerciais e as forças gravitacionais, ao passo que o número de Reynolds representa o efeito das forças viscosas em relação às forças inerciais (CHOW, 1959).

Vale salientar que alguns autores, como Camnasio, Orsi e Schleiss (2011), caracterizam a razão de expansão lateral em termos do quociente B/b , ao invés de $\Delta B/b$ e o comprimento adimensional em função da relação L/B , ao invés de $L/\Delta B$. Quanto à relação L/B , encontra-se também na literatura menção a esse fator com a designação ‘razão ou taxa de aspecto’, em livre tradução do inglês (CAMNASIO *et al.*, 2012). Por outro lado, considerou-se mais apropriado utilizar em Português os termos ‘comprimento adimensional’ ou ‘comprimento relativo’ para se referir a tal relação.

Mais recentemente, Ferrara *et al.* (2018) definiram mais dois parâmetros geométricos para caracterização dos canais de entrada e de saída, quando desalinhados com o eixo longitudinal do reservatório. Assim sendo, foram estabelecidos o ‘deslocamento do canal de entrada’ d_{in} , do termo em inglês ‘*inlet channel offset*’ e o ‘deslocamento do canal de saída’ d_{out} , do termo em inglês ‘*outlet channel offset*’. Enquanto o primeiro parâmetro refere-se à distância entre o eixo longitudinal do reservatório e o eixo do canal de entrada, o segundo parâmetro corresponde à distância entre o mesmo eixo longitudinal e o eixo do canal de saída. Convencionou-se que os módulos destes parâmetros seriam arbitrados como positivos caso o respectivo canal estivesse à direita do eixo longitudinal do reservatório, em relação ao sentido do escoamento, e negativos se estivesse a sua esquerda. A representação de ambos os parâmetros é mostrada na Figura 4.3.

FIGURA 4.3 - Representação dos parâmetros de posicionamento relativo d_{in} e d_{out} em um reservatório retangular raso (em planta).



Fonte: FERRARA *et al.*, 2018 (*adaptado*).

4.4.2 Caracterização dos padrões de escoamento

No que se refere à descrição da literatura acerca da caracterização dos padrões de escoamento, optou-se por segmentá-la em subitens, tendo em vista o grande volume de informações sobre o assunto. Cada subitem foi identificado em função de um ou de alguns autores de referência. Para tanto, foram definidas quatro abordagens para segmentação dos estudos correlatos, conforme destacado a seguir:

- Avaliação experimental e numérica dos parâmetros de forma e hidráulicos para reservatórios de geometria simples (normalmente retangulares), com posicionamento simétrico dos canais de entrada e de saída: enfatizam-se os trabalhos de Kantoush (2008), Dufresne *et al.* (2010a,b), Camnasio, Orsi e Schleiss (2011), Camnasio *et al.* (2012), Peltier *et al.* (2013), Peltier *et al.* (2014a,b) e Peltier *et al.* (2015);
- Avaliação experimental e/ou numérica da influência do posicionamento dos canais de entrada e de saída sobre os padrões de escoamento desenvolvidos: tem-se como referência os estudos realizados por Camnasio *et al.* (2013) e por Ferrara *et al.* (2018). O último destes estudos baseia-se unicamente em modelagem numérica;
- Avaliação da robustez do programa computacional WOLF 2D para simulação numérica de escoamentos rasos: destacam-se os estudos de Dewals *et al.* (2008), Erpicum *et al.* (2009), Dufresne *et al.* (2011), Camnasio *et al.* (2013), Peltier *et al.* (2015) e Peltier *et al.* (2016);

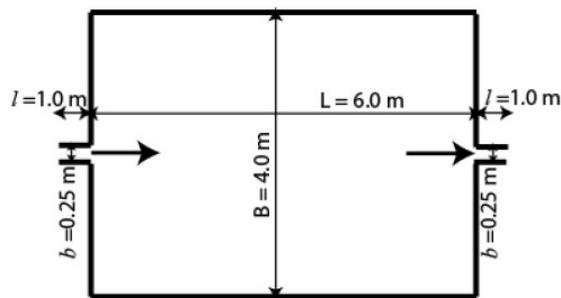
- Avaliação numérica da eficiência hidráulica de reservatórios com geometria complexa (formato de gota, de feijão, com geometria multicelular e com a presença de ilha central), com uso do modelo comercial MIKE 21: dá-se destaque ao estudo de Jansons e Law (2007).

Ao final do item 4.4.2., é apresentado um quadro-resumo das referências discutidas abaixo, seguido de uma avaliação crítica do autor desta tese quanto à pertinência dos resultados dispostos na literatura.

4.4.2.1 Avaliação experimental e numérica de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Kantoush (2008)

Um dos estudos relativamente recentes e pioneiros no mapeamento dos padrões de escoamento em reservatórios rasos, sobretudo os de forma retangular, e na avaliação da influência de fatores geométricos e hidráulicos foi realizado por Kantoush (2008). Do ponto de vista hidrodinâmico, a pesquisa em pauta teve como um dos objetivos principais entender o comportamento do escoamento em função da forma do reservatório (retangular ou com paredes laterais chanfradas, de modo a reduzir o ângulo de expansão na interface canal de entrada-reservatório), da proporção entre comprimento e largura do reservatório (mais largo ou mais estreito, mais curto ou mais comprido, ou uma combinação dessas dimensões geométricas) e das características hidráulicas (profundidade e vazão). Por essa razão, construiu-se um modelo reduzido em PVC rígido com comprimento máximo de 6 m, largura máxima de 4 m e profundidade máxima de 0,30 m. Definiu-se como referência a geometria retangular com comprimento de 6 m e largura de 4 m (FIGURA 4.4), para uma vazão de 7 L/s e profundidade do escoamento de 0,20 m, medida do canal de saída. Para essa configuração padrão, foram ainda realizados experimentos com profundidades de 0,075, 0,10 e 0,15 m. No que se refere aos canais de entrada e de saída, estes foram construídos com o mesmo material do reservatório com extensão l de 1,0 m, largura b de 0,25 m e profundidade máxima h de 0,30 m, idêntica à do reservatório.

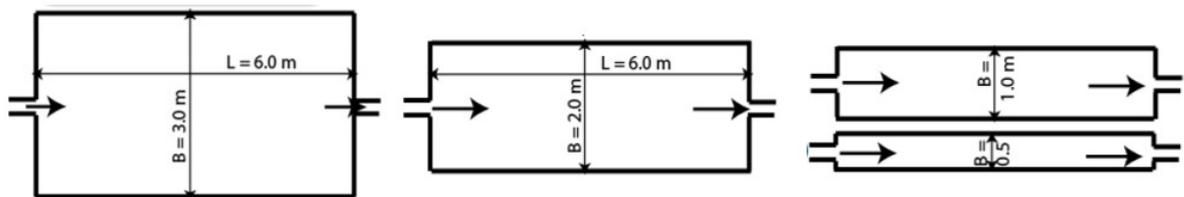
FIGURA 4.4 - Configuração de referência do estudo – Reservatório retangular com $L = 6,00$ m e $B = 4,0$ m



Fonte: KANTOUSH, 2008.

Ademais, uma série de variantes foi considerada no estudo, de modo a viabilizar a realização de algumas análises de sensibilidade geométrica. A Figura 4.5, por exemplo, refere-se a quatro diferentes configurações de reservatório, tendo em vista para todas elas a redução da largura do reservatório em relação ao cenário de referência. Deste modo, foram avaliadas as larguras de 0,5, 1,0 e 2,0 m. O comprimento do reservatório permaneceu constante em todos esses cenários, igual a 6,0 m.

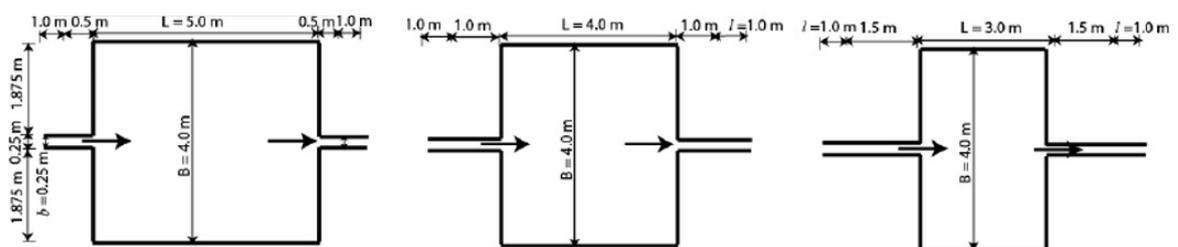
FIGURA 4.5 - Variantes em relação à configuração de referência – redução da largura B



Fonte: KANTOUSH, 2008.

A Figura 4.6, por sua vez, corresponde a três variações de redução do comprimento do reservatório em relação à situação de base.

FIGURA 4.6 - Variantes em relação à configuração de referência – redução do comprimento L

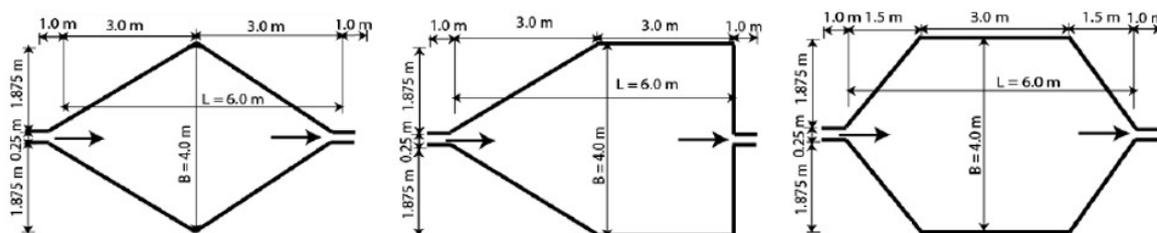


Fonte: KANTOUSH, 2008.

Nos casos em que os comprimentos do reservatório foram reduzidos, estabeleceram-se valores iguais a 3,0, 4,0 e 5,0 m, sendo constante para essas variantes a largura de 4,0 m.

Por fim, apresentam-se na Figura 4.7. três diferentes cenários que foram considerados nos experimentos, tendo em vista a redução do ângulo de expansão na interface entre o canal de entrada e o reservatório.

FIGURA 4.7 - Variantes em relação à configuração de referência – redução do ângulo de expansão do reservatório



Fonte: KANTOUSH, 2008.

Observa-se que duas das três configurações apresentaram também contração na transição entre o reservatório e o canal de saída (FIGURA 4.7. à esquerda e à direita). Outra observação relevante refere-se ao fato de que a diminuição do ângulo de expansão na Figura 4.7 à direita, em relação ao caso de referência (FIGURA 4.4), é menor do que para as demais geometrias mostradas na Figura 4.7.

Com base em resultados experimentais, através de modelagem física, e numéricos obtidos com o emprego dos programas computacionais CCHE2D (Universidade do Mississippi, EUA), WOLF 2D (Universidade de Liège, Bélgica) e FLOW-3D (Flow Science, EUA), Kantoush (2008) constatou que havia três comportamentos típicos do escoamento, a saber:

- Um primeiro caracterizado por um jato desviado sempre para a direita do canal de entrada, desenvolvendo um padrão assimétrico estável com a presença de um vórtice de grande extensão em sentido anti-horário. Ademais, para as geometrias dotadas de quinas na porção de montante, observou-se a existência de dois pequenos vórtices nessas localidades, um de cada lado do jato. Esse comportamento foi observado na configuração de referência e em todas as variantes mais estreitas que essa (retangulares), bem como nos reservatórios com quinas suprimidas (FIGURA 4.7 à esquerda e ao centro), exceto a de geometria hexagonal (FIGURA 4.7 à direita). Cabe ressaltar que a remoção das quinas na porção de montante do reservatório resultou na

não ocorrência dos dois pequenos vórtices ora mencionados (caso das três configurações apresentadas na Figura 4.7, apesar de a da direita representar outro padrão de escoamento). Por outro lado, a supressão das quinas de jusante não provocou qualquer tipo de alteração no padrão de escoamento, segundo o autor;

- Um segundo comportamento representado por um jato alinhado com o eixo longitudinal do reservatório (linha de centro) e com a formação de dois vórtices em sentidos contrários, um anti-horário à esquerda do jato e outro horário à direita deste. Trata-se de um padrão de escoamento simétrico observado nas configurações de reservatório com reduzida extensão (FIGURA 4.6) e para geometria hexagonal (FIGURA 4.7 à direita);
- Finalmente, um terceiro comportamento caracterizado pela formação de um jato central em forma sinusoidal com perturbação periódica (amplitude do padrão meandriforme) e por uma assimetria instável. Observou-se esse padrão de escoamento em todas as geometrias cuja relação h/b foi igual ou inferior a 0,6, com números de Froude superiores a 0,15.

Kantoush (2008) constatou ainda, em termos gerais, que a profundidade do escoamento, diretamente relacionada ao número de Froude, tem um significativo efeito sobre os padrões de escoamento e sobre a estrutura do vórtice de maior dimensão formado para condições tais como as de seus experimentos em laboratório. Para números de Froude inferiores a 0,10, calculados em relação a uma seção transversal do canal de entrada, o padrão de escoamento foi assimétrico (geometria de referência), com o desvio do jato para um dos lados, ao passo que o aumento do número de Froude devido à diminuição da profundidade conduziu à formação do jato meandrizado, identificado a partir de números de Froude em torno de 0,15. Para avaliação da possível influência do número de Reynolds, foram testados dois diferentes cenários, um com $Re = 42.000$ e outro com $Re = 52.000$. Constatou-se que o número de Reynolds não apresentou influência sobre os padrões de escoamento observados, considerando o intervalo de valores tratados experimentalmente. Isso se deve provavelmente ao fato de que as duas variantes em questão tiveram por base escoamentos turbulentos. É fundamental salientar que ambos os parâmetros, números de Froude e Reynolds, foram determinados ao longo do canal de entrada. Durante os experimentos, observou-se que a “preferência” do jato pelo lado direito, no padrão assimétrico de escoamento mapeado,

pareceu ser extremamente sensível à estabilização das condições iniciais. Acidentalmente, verificou-se um padrão de escoamento precisamente espelhado em relação ao que foi mencionado anteriormente, em função de pequena alteração ocorrida nas referidas condições iniciais. Por fim, o autor destacou a provável influência da rugosidade de fundo e das paredes laterais sobre os padrões de escoamento, por estar associada à difusão turbulenta horizontal. Salientou-se nesse estudo a necessidade de aprofundamento de pesquisas acerca desse parâmetro por meio da realização de outros trabalhos acadêmicos subsequentes.

Diversos experimentos, apresentados a seguir, foram realizados por outros autores sempre com vistas a melhorar o entendimento das características geométricas sobre a hidrodinâmica dos escoamentos em reservatórios rasos e a validar as constatações e hipóteses levantadas em estudos precedentes. Em um deles, identificou-se a existência de duas zonas de recirculação de cada lado de uma dupla expansão lateral, ambas com a mesma extensão longitudinal, para relações $\Delta B/b$ inferiores a 0,25, denotando uma simetria do escoamento e a existência de dois pontos de recolagem do escoamento (*reattachment points*). Por outro lado, para relações $\Delta B/b$ superiores a 0,25, o padrão de escoamento foi assimétrico, também com dois pontos de recolagem do escoamento, porém, com zonas de recirculação com extensões longitudinais distintas (ABBOTT; KLINE, 1962 *apud* DUFRESNE *et al.*, 2010b).

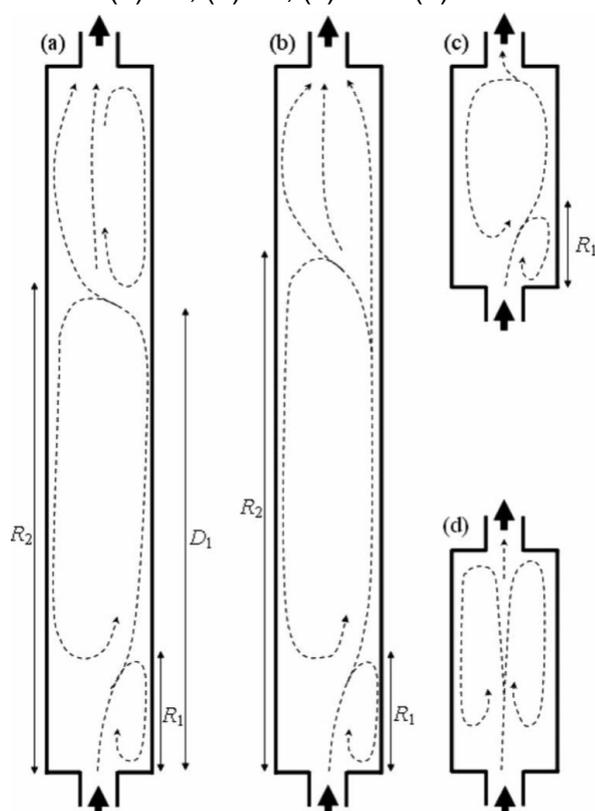
4.4.2.2 Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Dufresne *et al.* (2010a,b)

Por meio de ensaios de laboratório conduzidos em um canal de acrílico com 10,40 m de comprimento e 0,985 m de largura no Laboratório de Engenharia Hidráulica da Universidade de Liège (Bélgica), investigações visuais com o auxílio de corante injetado na água indicaram a existência de quatro padrões de escoamento (assim como um quinto padrão instável e de transição), conforme apresentado na Figura 4.8 (DUFRESNE *et al.*, 2010b). Para tanto, instalou-se na entrada deste canal uma contração construída em chapa metálica, posicionada dentro do mesmo, simulando um canal de entrada, com 1,00 m de comprimento e largura variável, ora de 0,285 m, ora de 0,485 m, permitindo avaliar, deste modo, a sensibilidade do modelo à razão de expansão lateral $\Delta B/b$. Por sua vez, do lado de jusante, criou-se outra contração em chapa metálica para caracterizar o canal de saída, com dimensões similares às do canal de entrada, isto é, com 1,00 m de comprimento e largura variável entre 0,285 m e 0,485 m. Essas contrações eram móveis no sentido longitudinal, permitindo, deste modo, um

ajuste na extensão da parte central que representou o reservatório de ensaios. Foram avaliados comprimentos de reservatório de 1,80, 2,00, 2,20 e 7,00 m.

Os testes foram realizados para um intervalo de temperaturas da água entre 18 e 20°C. Ademais, todos os experimentos levaram em conta as seguintes condições: velocidade média do escoamento de 0,28 m/s, calculada numa seção transversal do canal de entrada, profundidade líquida de 0,20 m, número de Froude aproximadamente igual a 0,20 e profundidade adimensional do escoamento $h/\Delta B$ variando entre 0,57 e 0,80, conforme largura do canal de entrada e conseqüente valor de ΔB , seja de 0,35 m ou de 0,25 m, respectivamente.

FIGURA 4.8 - Representação esquemática dos quatro padrões de escoamento observados: (a) A3, (b) A2, (c) A1 e (d) S0.



Fonte: DUFRESNE *et al.*, 2010b.

A observação dos diferentes padrões de escoamento foi também confirmada por meio de medidas quantitativas captadas de dispositivos LSPIV (*large-scale particle image velocimetry*) (PELTIER *et al.*, 2014a, b).

Conforme esboçado na Figura 4.8, os padrões de escoamento foram identificados em função de sua simetria *versus* assimetria, do número de zonas de circulação (vórtices) e da

localização dos pontos de recolagem do escoamento (*reattachment points*). De acordo com as observações experimentais de Dufresne *et al.* (2010a,b), o padrão de escoamento S0 (FIGURA 4.8d) é observado em reservatórios relativamente curtos, isto é, para comprimento adimensional $L/\Delta B$ pequeno. Tal padrão é formado por um jato direcionado do canal de entrada para o de saída do reservatório, com duas recirculações simétricas ao longo de ambos os lados do jato. No caso daquele experimento, isso ocorreu quando o comprimento do canal (reservatório) utilizado nos testes foi ajustado para 1,80 m (parâmetro L). No que se refere aos testes para mapeamento dos padrões de escoamento, a largura do canal de entrada permaneceu fixa em todos os cenários avaliados (0,285 m). Especificamente para o padrão de escoamento intitulado S0, a relação $L/\Delta B$ (comprimento adimensional) resultou em 5,14, já que o valor de ΔB foi mantido constante, correspondendo a 0,35 m. Deste modo, a razão de expansão lateral $\Delta B/b$ também se manteve constante, igual a 0,8.

Quando o comprimento do reservatório foi estendido, ou seja, aumentando-se o valor da relação $L/\Delta B$, um padrão de escoamento assimétrico foi observado experimentalmente, resultando no tipo A1 (FIGURA 4.8c). Para os testes realizados, observou-se esse padrão de escoamento quando o comprimento de canal L foi alterado para 2,20 m. Neste caso, o comprimento adimensional $L/\Delta B$ resultou em 6,29. Para comprimentos de reservatório intermediários entre os dois anteriores, um padrão de escoamento de transição pode ser constatado (A1/S0), oscilando entre o padrão de escoamento simétrico (S0) e o assimétrico (A1) (DUFRESNE *et al.*, 2010a; CAMNASIO; ORSI; SCHLEISS, 2011). No caso de Dufresne *et al.* (2010a,b), o padrão A1/S0 foi mapeado quando o comprimento do canal foi ajustado para 2,00 m, o que correspondeu à relação $L/\Delta B$ igual a 5,71. Por sua vez, para comprimentos de reservatório maiores, os experimentos revelaram um padrão de escoamento assimétrico com dois pontos de recolagem do escoamento (A2, FIGURA 4.8b). Isso ocorreu nos estudos experimentais belgas quando o comprimento do canal atingiu 7,00 m. Para essa variante, o comprimento adimensional $L/\Delta B$ calculado foi igual a 20. Finalmente, para reservatórios ainda mais compridos, uma zona de recirculação adicional pode desenvolver-se, eventualmente, na porção de jusante do reservatório (padrão de escoamento A3, FIGURA 4.8a), caso haja uma diminuição da profundidade do escoamento adimensional $h/\Delta B$. Este último padrão de escoamento, no entanto, não foi avaliado experimentalmente por Dufresne *et al.* (2010a,b), embora tenha sido catalogado.

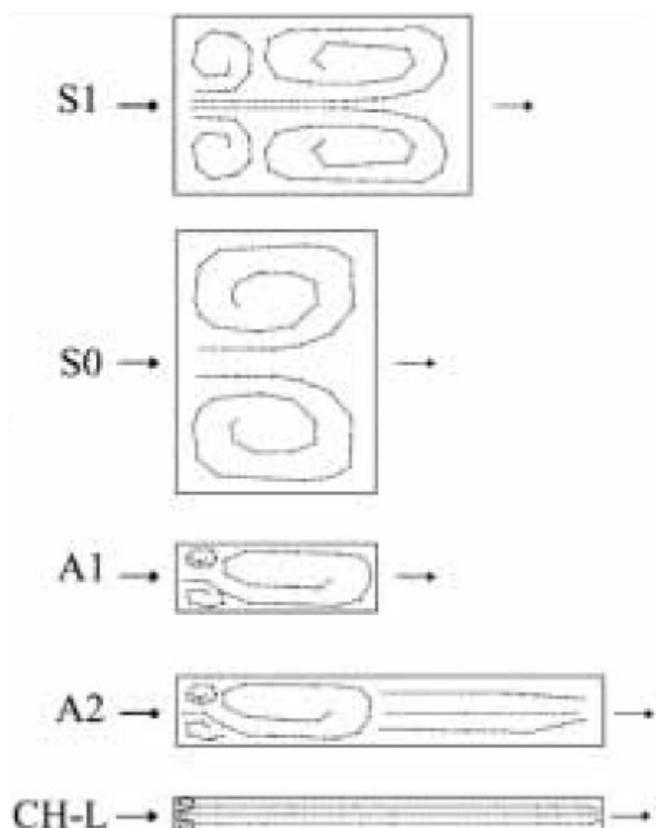
4.4.2.3 Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Camnasio, Orsi e Schleiss (2011)

Por sua vez, Camnasio, Orsi e Schleiss (2011) reavaliaram os diferentes padrões de escoamento mapeados por Kantoush (2008) e Dufresne *et al.* (2010a,b) a partir de resultados de 41 experimentos realizados no mesmo reservatório utilizado por Kantoush (2008). No âmbito do estudo de Camnasio, Orsi e Schleiss (2011), foram consideradas combinações distintas de comprimento e largura do reservatório, visto que as paredes do modelo construído em PVC eram ajustáveis. Avaliaram-se comprimentos L variando entre 3,0 e 6,0 m e larguras B variando entre 0,5 e 4,0 m, o que resultou na análise de efeitos combinados das relações L/B e B/b . Em todos os experimentos, considerou-se a vazão de 7 L/s, em regime permanente, e profundidade de 20 cm, controlada por uma soleira instalada a jusante do reservatório. A partir das observações experimentais, estabeleceram-se três diferentes categorias de padrões de escoamento:

- Escoamento típico de canal (*Channel-like flow*, no termo em inglês, ou CH-L), conforme indicado na Figura 4.9: observado para valores da relação B/b inferiores ou iguais a 2, independentemente da extensão longitudinal do reservatório (comprimento L). Nesse caso, não foram observadas zonas de recirculação, a exceção de dois pequenos vórtices à esquerda e à direita do jato central, na porção de montante do reservatório;
- Escoamento simétrico (S0 e S1), também mostrado na Figura 4.9: mapeado para pequenos quocientes da relação L/B , correspondendo a valores inferiores ao intervalo entre 1,5 e 2,0, dependendo da relação B/b . Portanto, o padrão de escoamento simétrico é típico de reservatórios curtos. A subclasse S0 corresponde à formação de dois vórtices em sentidos opostos, resultante de razões $L/B \leq 1$, ou seja, para reservatórios “mais largos que compridos” ou de forma quadrada. Por sua vez, definiu-se a subclasse S1 baseada na observação de quatro vórtices, dois do lado esquerdo e outros dois do lado direito ao jato central, válida para os demais casos de simetria. Apesar de não se estabelecerem limites para essa categoria, cabe destacar que se refere a casos em que a largura do reservatório possui uma dimensão ligeiramente inferior à sua extensão longitudinal. Ambas as subclasses caracterizam-se por apresentarem um jato retilíneo atravessando toda a extensão do reservatório, desde o canal de entrada

até o de saída, e desmembrando-se parcialmente para a formação dos vórtices simétricos e opostos, os quais ocupam todo o perímetro do reservatório. No que se refere ao subtipo S1, dotado de quatro zonas de recirculação, seus dois vórtices de montante foram de menor dimensão que os dois correspondentes de jusante e configuraram-se como áreas de estagnação, visto que as velocidades foram menores nessa zona;

FIGURA 4.9 - Classificação dos padrões de escoamento observados: simétrico (S0 e S1), assimétrico (A1 e A2), instável (A1/S1) e típico de canal (CH-L)



Fonte: CAMNASIO; ORSI; SCHLEISS, 2011.

- Escoamento assimétrico (A1 e A2), igualmente representado na Figura 4.9: neste caso, incluem todas as configurações contendo relações $B/b > 2$. Para ambas as subclasses mapeadas, observou-se um jato desviando-se em direção a uma das paredes laterais do reservatório, aderindo-se a ela. Na porção de jusante do reservatório, o escoamento permaneceu aderido a uma das paredes laterais até alcançar o canal de saída. Definiram-se, para os escoamentos assimétricos, duas configurações distintas: o tipo A1, quando há a formação de um grande vórtice por quase toda a extensão do

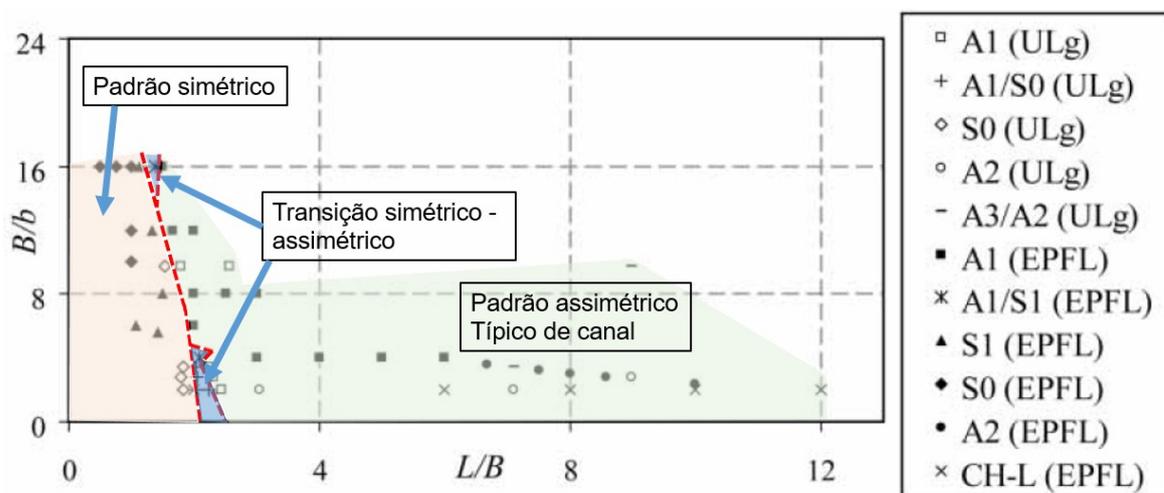
reservatório, podendo-se notar ainda a presença de duas pequenas zonas de recirculação na porção de montante do reservatório e; o tipo A2, que representa uma combinação do comportamento observado no tipo A1 até cerca de metade da extensão do reservatório com as características do escoamento típico de canal ($CH-L$) na porção de jusante desse reservatório. Tendo em vista os experimentos realizados pelos autores, o tipo A2 é característico de reservatórios estreitos ($2 < B/b < 4$) e compridos ($L/B > 6$).

Camnasio, Orsi e Schleiss (2011) identificaram ainda duas configurações de reservatórios retangulares para as quais se verificou um comportamento classificado como “instável”. De acordo com os autores, alguns ensaios indicaram um padrão de escoamento simétrico do tipo ‘S1’, apesar de outras observações experimentais sob condições hidráulicas e geométricas idênticas resultarem numa configuração assimétrica do tipo ‘A1’. Ambos os experimentos enquadram-se em uma faixa de valores limites de uma zona de transição instável entre os padrões de escoamento simétrico e assimétrico. Em termos numéricos, esses valores limites estão associados ao chamado ‘parâmetro adimensional de forma’ ou ‘fator de forma’ (*shape factor*, SF , no termo em inglês), proposto por Dufresne *et al.*(2010b) e calculado a partir da Equação 4.2. Os valores limites em questão são $SF = 6,20$ e $SF = 6,80$. Em outras palavras, para as condições hidráulicas avaliadas, o escoamento é simétrico quando $SF < 6,20$, assimétrico para $SF > 6,80$ e, finalmente, para $6,20 < SF < 6,80$, ambos os tipos de escoamento podem ser observados.

$$SF = L/[ΔB^{0,6} \cdot b^{0,4}] \quad (\text{Equação 4.2})$$

A Figura 4.10 sintetiza os resultados experimentais realizados na EPFL (KANTOUSH, 2008; CAMNASIO; ORSI; SCHLEISS, 2011) e na ULg (DUFRESNE *et al.*, 2010a,b), representados em função das relações adimensionais B/b e L/B .

FIGURA 4.10 - Compilação de resultados experimentais realizados na EPFL e na ULg, indicando os padrões de escoamento simétricos (S0 e S1), assimétricos (A1, A2 e A3) e típico de canal (CH-L)



Fonte: CAMNASIO; ORSI; SCHLEISS, 2011 (*adaptado*).

A análise da Figura 4.10, conforme indicado pelas pequenas zonas azuis, permite identificar que a transição entre os padrões de escoamento simétrico e assimétrico ocorreu para relações L/B entre 1,5 e 2,2, dependendo também da razão de expansão lateral B/b . Além disso, destacou-se com a cor rosa a região em que o padrão de escoamento foi simétrico e em cor verde a área gráfica correspondente ao padrão de escoamento assimétrico ou típico de canal. Ainda com relação ao chamado ‘escoamento típico de canal’ (CH-L), este foi observado para relações B/b iguais ou inferiores a 2, independentemente do comprimento adimensional L/B . No entanto, Camnasio, Orsi e Schleiss (2011) destacam que, para $B/b = 2,031$, Dufresne *et al.* (2010a,b) observaram diferentes padrões de escoamento, a saber: S0, A1 e A2, dependendo do comprimento adimensional L/B . Os autores associam essa constatação a diferentes condições hidráulicas para B/b aproximadamente igual a 2, já que os ensaios na EPFL consideraram $Fr = 0,1$, ao passo que os testes na ULg foram realizados sob $Fr = 0,2$, ambos determinados para uma seção transversal ao longo do canal de entrada.

Tendo por base investigações experimentais e numéricas de reservatórios retangulares rasos com número de Froude superior a 0,1, constatou-se que o escoamento teve um aspecto meandriforme, caracterizado por oscilações periódicas do jato, o qual se formou ao longo do eixo do reservatório (KANTOUSH, 2008; CAMNASIO *et al.*, 2012). Tal tipo de padrão de escoamento foi catalogado para configuração de reservatório com comprimento adimensional $L/B = 1,5$ e razão de expansão $B/b = 16$. Inicialmente, esse comportamento foi observado por Kantoush (2008) por meio de testes experimentais em reservatório retangular com $L = 6$ m, B

= 4 m e $b = 0,25$ m. Tendo em vista uma condição de regime permanente com $Q = 7$ L/s, o autor identificou o aspecto meandriforme ao longo do jato para profundidades líquidas iguais ou inferiores a 0,15 m (0,075, 0,10 e 0,15 m), com respectivos números de Froude iguais a 0,43, 0,28 e 0,15 e relações h/b iguais a 0,3, 0,4 e 0,6, respectivamente. Para todos esses casos, o fator de forma SF , adimensional, foi igual a aproximadamente 7,2. Por outro lado, para a condição hidráulica em que a altura de água foi igual a 0,2 m ($h/b = 0,8$ e $Fr = 0,1$), não se notou a formação do escoamento meandrizado. Com efeito, Dewals *et al.* (2008) observaram que a diminuição da profundidade líquida tende a reduzir a deflexão do jato, uma vez que o efeito estabilizante da rugosidade de fundo é amplificado. Para todos os experimentos de Kantoush (2008), o número de Reynolds foi mantido constante, igual a 112.000, caracterizando o regime de escoamento como turbulento. Ghidaoui e Kolyshkin (1999) destacaram que, quando o número de Reynolds é superior a 1000, a influência deste parâmetro sobre os padrões de escoamento desenvolvidos e sobre a estabilidade do escoamento torna-se pouco significativa.

4.4.2.4 Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados, segundo Camnasio *et al.* (2012)

Por sua vez, Camnasio *et al.* (2012) construíram no *Politecnico di Milano* um reservatório com dimensões em escala 1:5 em relação ao de Kantoush (2008). Desse modo, avaliou-se o mesmo comportamento do escoamento em um reservatório retangular com dimensões $L = 1,17$ m, $B = 0,78$ m e $b = 0,048$ m, considerando uma vazão de 0,125 L/s, determinada por meio das relações de semelhança de Froude. Avaliaram-se, nesse caso, as profundidades 0,015, 0,02, 0,03 e 0,04 m, correspondendo, aproximadamente, aos mesmos números de Froude (calculados ao longo do canal de entrada) dos experimentos realizados por Kantoush (2008). Em todos os casos avaliados, o regime de escoamento foi turbulento, com $Re = 10.400$, determinado em relação a uma seção transversal do canal de entrada.

Do mesmo modo que no estudo de referência, Camnasio *et al.* (2012) identificaram a formação de escoamento meandriforme ao longo do jato para as três menores profundidades testadas experimentalmente, associadas a números de Froude maiores que 0,1 e a fatores de forma SF a partir de 7,2. Ademais, os autores constataram que a variação do número de Froude em um intervalo entre 0,15 e 0,44 não influenciou de forma significativa os valores do período de oscilação do escoamento meandriforme observado.

4.4.2.5 Avaliação experimental de geometrias simples com canais de entrada e de saída centralizados segundo Peltier *et al.* (2013), Peltier *et al.* (2014a,b) e Peltier *et al.* (2015)

Ainda no que se refere ao padrão de escoamento em forma sinusoidal, outros trabalhos contemplaram tal aspecto na literatura (PELTIER *et al.*, 2013; PELTIER *et al.*, 2014a,b; PELTIER *et al.*, 2015). Com base nos resultados experimentais que identificaram a formação do padrão de escoamento meandrizado, estabeleceu-se sua ocorrência em situações em que o número de Froude fosse superior a 0,1, conforme previamente observado por Kantoush (2008), e para relações $h/\Delta B$ (profundidade adimensional) menores que 0,2. De acordo com Peltier *et al.* (2013), o jato ao longo do eixo longitudinal do reservatório, dadas as condições de escoamento mencionadas, é caracterizado pela formação de oscilações periódicas desde a entrada da vazão líquida no reservatório até o alcance do canal de saída. Quando há esse tipo de comportamento, é notável a formação de dois grandes vórtices, um de cada lado do jato, os quais transferem quantidade de movimento do jato para todo o reservatório e resultam em alteração na distribuição de velocidades em relação à situação sem a formação das oscilações periódicas. Desse modo, há um grande arrastamento de sedimentos para o interior dos dois grandes vórtices formados, resultando no aumento da capacidade de retenção de sedimentos nesses reservatórios em um fator de 1,7 (PELTIER *et al.*, 2014a,b). Tendo como referência uma série de resultados de experimentos realizados em um canal com largura de 0,985 m, para extensões longitudinais L variando entre 0,7 e 1,6 m, comprimento de expansão lateral ΔB igual a 0,45 m (exceto em um dos testes para $\Delta B = 0,46$ m) e largura do canal de entrada b igual a 0,08 m (exceto em um dos testes para $b = 0,06$ m), Peltier *et al.* (2014b) estabeleceram valores de referência para os quatro diferentes tipos de padrão de escoamento mapeados até então, em função do número de Froude (Fr) e do fator de forma (SF). Deste modo, definiu-se:

- Padrão de escoamento simétrico (para $Fr < 0,21$ e $SF < 6,2$): o jato é retilíneo desde o canal de entrada até o de saída, dando origem a duas zonas de recirculação simétricas, uma de cada lado desse jato;
- Padrão de escoamento assimétrico (para $SF > 8,1$ sem restrição para o valor correspondente ao número de Froude): o jato sofre deflexão em direção a uma das paredes laterais do reservatório e resulta na formação de uma grande zona de recirculação ao longo de praticamente todo o reservatório, podendo dar origem à formação de vórtices menores em sua porção de montante;

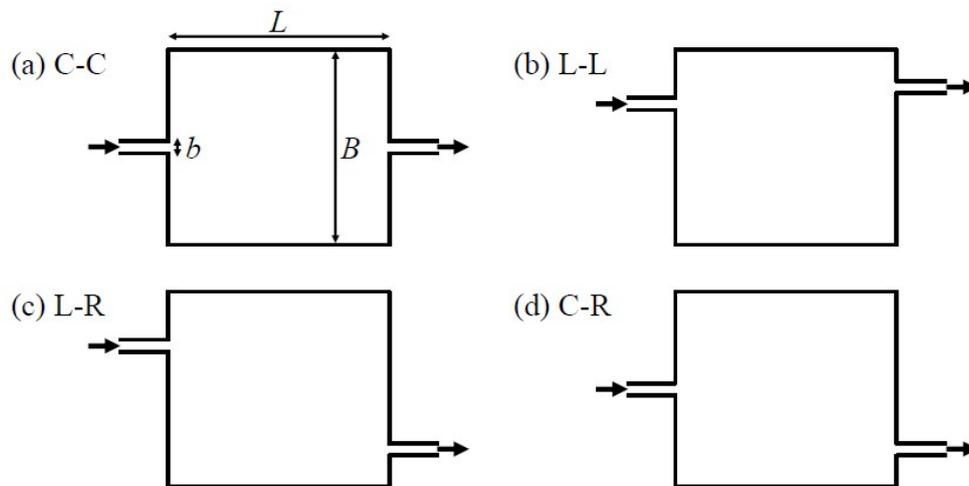
- Padrão de escoamento meandriforme (para $Fr > 0,21$ e $SF < 6,2$): o jato oscila periodicamente e espacialmente desde o canal de entrada até o de saída, resultando em duas zonas de recirculação ligeiramente deformadas em relação ao que ocorre para o padrão de escoamento simétrico;
- Padrão de escoamento instável (para Fr próximo a $0,21$ e $SF < 6,2$ ou para $Fr > 0,21$ e $6,2 < SF < 8,1$): em um mesmo experimento, o padrão de escoamento pode variar entre o simétrico e o assimétrico.

4.4.2.6 Avaliação experimental e numérica do posicionamento dos canais de entrada e de saída segundo Camnasio *et al.* (2013)

As primeiras análises experimentais e numéricas considerando a influência da localização assimétrica dos canais de entrada e de saída foram realizadas por Camnasio *et al.* (2013), os quais avaliaram configurações geométricas escolhidas de forma arbitrária (sob condições de contorno hidraulicamente constantes), conforme sintetizado na Figura 4.11.

No que se refere à avaliação experimental, utilizou-se um reservatório em formato retangular construído em PVC com 4,5 m de comprimento, 4 m de largura e 0,25 m de profundidade máxima. Os canais de entrada e de saída possuíam 1 m de extensão, 0,25 m de largura e a mesma profundidade do reservatório. Foram previstos dispositivos para fixação de ambos os canais nas respectivas paredes de montante e de jusante do reservatório, permitindo o estudo de diferentes configurações geométricas envolvendo os mesmos. Consideraram-se, deste modo, quatro diferentes configurações geométricas, a primeira delas referindo-se ao cenário-padrão: uma configuração intitulada CC (FIGURA 4.11a), em que ambos os canais foram instalados ao longo da linha de centro do reservatório; uma segunda configuração LL (FIGURA 4.11b), com ambos os canais posicionados de um mesmo lado, à esquerda do eixo longitudinal do reservatório; outra configuração identificada pela sigla LR (FIGURA 4.11c), cujos canais de entrada e de saída foram dispostos em lados opostos à linha de centro do reservatório; e, finalmente, uma última configuração CR (FIGURA 4.11d), com o canal de entrada ao centro e o canal de saída à direita em relação ao eixo longitudinal do reservatório. Para os ensaios em questão, adotou-se vazão $Q = 7$ L/s, em regime permanente, e profundidade líquida de 0,20 m.

FIGURA 4.11 - Representação em planta de configurações geométricas testadas em laboratório: (a) CC, (b) LL, (c) LR e (d) CR



Fonte: CAMNASIO *et al.*, 2013.

Tendo em vista a configuração CC, Camnasio *et al.* (2013) avaliaram a formação de dois vórtices simétricos, de ambos os lados do jato. Ademais, visualizou-se um pequeno vórtice formado do lado direito do jato. Já para a configuração LL, observou-se uma deflexão do escoamento na direção da parede lateral esquerda do reservatório, permanecendo aderido a ela até sua saída pelo canal de saída. Foi constatada também a formação de um grande zona de recirculação na parte restante do reservatório, em sentido horário. A deflexão destacada acima pode ser atribuída ao chamado efeito Coanda, conforme citado anteriormente.

Ainda no que se refere aos resultados experimentais de Camnasio *et al.* (2013), observou-se para a configuração LR um desvio do jato em direção à parede lateral esquerda do reservatório, de modo similar ao que foi constatado para a configuração LL, seguindo o escoamento aderido às paredes do reservatório até alcançar o canal de saída. Finalmente, para a configuração CR, o jato alcançou o canal de saída sem aderir-se às paredes laterais do reservatório. Dois vórtices de diferentes dimensões foram observados em ambos os lados do jato.

Com relação à abordagem numérica do estudo de Camnasio *et al.* (2013), empregou-se o modelo acadêmico WOLF 2D para realização de simulações correspondentes às 4 configurações geométricas avaliadas experimentalmente (CC, LL, LR e CR).

É pertinente reiterar que o programa em questão baseia-se na resolução das chamadas equações de águas rasas a partir da construção de malhas cartesianas multiblocos e da utilização de um esquema de volume finito preciso de segunda ordem. Além disso, a viscosidade turbulenta foi avaliada com base em um modelo do tipo $k-\epsilon$ com profundidade média e com duas escalas de comprimento distintas para representação da mistura de turbulência vertical e horizontal (CAMNASIO *et al.*, 2013).

Após a obtenção dos campos de velocidade superficial numéricos, constatou-se ter havido concordância com os experimentos no que se refere às configurações geométricas CC, LL e CR. Por outro lado, com relação à geometria LR, o jato aderiu-se à parede lateral esquerda na simulação numérica, ao passo que isso não foi observado em laboratório, apesar do desvio do jato para a esquerda. Ainda no que concerne à última configuração, realizaram-se outras duas simulações numéricas alterando-se em cada uma delas a condição inicial. Ao invés de as simulações iniciarem-se com o reservatório cheio com a mesma profundidade de referência para os experimentos (0,2 m), tal como nos demais casos, contemplaram as seguintes condições iniciais: (1) com reservatório previamente vazio e; (2) a partir do uso de um padrão de escoamento com jato aderente à parede lateral esquerda. No primeiro caso, obteve-se a mesma solução numérica da condição inicial de reservatório cheio, portanto, também destoando do que foi observado experimentalmente. Em contrapartida, o padrão de escoamento com jato aderente à parede lateral esquerda preservou-se de tal modo até o final da simulação no segundo caso. Essa solução representou mais fielmente o padrão de escoamento obtido em laboratório. O estudo validou, por esta razão, a robustez do modelo WOLF 2D quanto a sua habilidade de modelar inclusive a tal configuração LR, já que foi possível alcançar diferentes soluções matemáticas do sistema, em função da condição inicial imposta.

4.4.2.7 Avaliação numérica do posicionamento dos canais de entrada e de saída segundo Ferrara *et al.* (2018)

Outro trabalho de relevância na literatura relacionado à modelagem numérica de reservatórios rasos com canais de entrada e de saída instalados em posições variáveis foi desenvolvido por Ferrara *et al.* (2018). O estudo em questão baseou-se em uma análise sistemática do posicionamento dos dois canais em reservatórios retangulares caracterizados por diferentes

comprimentos adimensionais (relação L/B). Para tanto, empregou-se também o modelo numérico WOLF 2D para realização das simulações numéricas.

Foram consideradas nesta modelagem numérica as características geométricas de reservatório e as condições hidráulicas atinentes aos experimentos realizados por Camnasio, Orsi e Schleiss (2011). Em todos os cenários simulados, manteve-se constante a largura do reservatório ($B = 4$ m), tendo sido avaliados três diferentes comprimentos ($L = 4,5$ m; $L = 5,5$ m e $L = 6$ m). No que se refere aos canais de entrada e de saída, a largura b adotada foi igual a 0,25 m. Além disso, as simulações levaram em conta uma vazão constante e igual a 7 L/s e a profundidade líquida igual a 0,20 m, resultando em um número de Froude igual a 0,1.

A referência contemplou 11 diferentes localidades relativas ao posicionamento do canal de entrada ao longo da parede de montante do reservatório, a maioria à esquerda de sua linha de centro. Além disso, foram consideradas outras 11 diferentes localidades de instalação do canal de saída ao longo da parede de jusante, à esquerda e à direita da citada linha de centro. Com isso, foram realizadas cerca de 60 simulações numéricas para cada comprimento de reservatório.

Dentre as constatações do estudo, é conveniente destacar que:

- O posicionamento dos canais de entrada e de saída exerceu uma significativa influência sobre o tipo de padrão de escoamento observado em todos os casos em que ambos foram situados de um mesmo lado do reservatório em relação a sua linha de centro;
- Para os maiores comprimentos de reservatório ($L = 5,5$ m e $L = 6$ m), observou-se que o jato aderiu-se à parede lateral esquerda, mesmo nos casos em que o canal de entrada esteve posicionado sobre a linha de centro do reservatório. Esta ressalva é válida apenas para as situações em que o canal de saída esteve mais afastado da linha de centro, sempre instalado do lado esquerdo. Isso demonstra a influência de ambos os canais sobre o padrão de escoamento resultante;
- Quando ambos os canais estiveram localizados em lados opostos da linha de centro do reservatório, constatou-se que a transição entre a “aderência do jato à parede lateral

mais próxima do canal de entrada” e a “não aderência a ela” foi essencialmente controlada pela própria localização do canal de entrada;

- Para os reservatórios mais extensos, com comprimentos adimensionais (relação L/B) de 1,38 e de 1,50, notou-se que o jato aderiu-se à parede lateral do reservatório mais próxima ao canal de entrada, sempre que a distância entre o eixo desse canal e o do reservatório excedeu $B/4$;
- Quando confrontados os resultados numéricos de Ferrara *et al.* (2018) com os experimentais de Camnasio *et al.* (2013), para $L = 4,5$ m, foi possível observar convergência entre ambos os estudos. Em linhas gerais, não houve aderência do jato à parede lateral do reservatório para as configurações CC e CR, diferentemente do que ocorreu com a geometria LL, em que houve aderência do jato à parede lateral esquerda;
- Ainda segundo o estudo de Ferrara *et al.* (2018), a configuração LR corresponde a um escoamento duplamente estável (*bi-stable flow*, do termo em inglês), já que, do ponto de vista numérico, pode ou não haver aderência do jato à parede lateral esquerda do reservatório. Em outras palavras, há duas soluções estáveis vinculadas a tal configuração. A estabilidade numérica é fortemente dependente da condição inicial imposta.

O estudo em questão apresentou uma pequena lista com recomendações aos engenheiros projetistas e gestores de reservatórios rasos, das quais se destacam as seguintes:

- Convém evitar a adoção de configurações como a LR, tendo em vista a ocorrência do padrão de escoamento duplamente estável. Tal configuração, associada a um comportamento hidrodinâmico aleatório, poderia não cumprir adequadamente os critérios de desempenho pré-estabelecidos;
- Seria conveniente selecionar configurações geométricas em que ocorra recolagem do escoamento (aderência à parede lateral) quando se pretende aumentar a sedimentação no reservatório. Por outro lado, se o interesse for o de reduzir a sedimentação, é recomendável a adoção de um padrão de escoamento em que não haja aderência do jato à parede. Estas recomendações apoiam-se numa observação de Dufresne *et al.*

(2010a), relativa à propensão de ocorrer taxas de sedimentação significativamente maiores em função da aderência do jato a uma parede lateral do reservatório.

4.4.2.8 Avaliação da robustez do programa computacional WOLF 2D para simulação numérica de escoamentos rasos

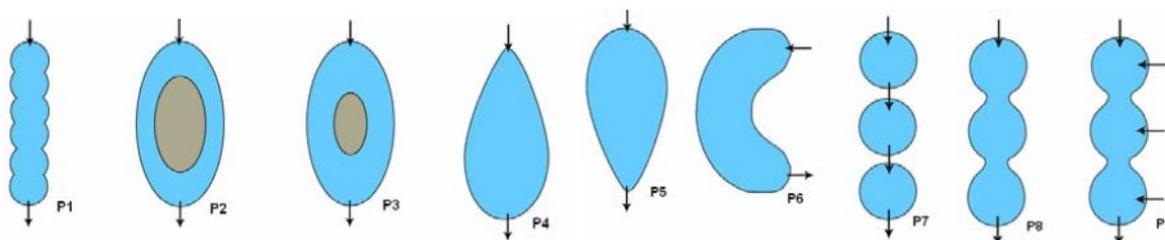
Do ponto de vista numérico, algumas publicações destinaram-se a avaliar a robustez de diferentes programas computacionais e sua aptidão em reproduzir adequadamente os padrões de escoamento observados em reservatórios retangulares rasos construídos em laboratório. Dufresne *et al.* (2011), por exemplo, investigaram a capacidade do modelo numérico WOLF 2D de simular padrões de escoamento simétricos e assimétricos em escoamentos de águas rasas. Segundo os autores, o programa computacional apresentou dificuldades para reproduzir a transição entre esses dois padrões de escoamento. Para maiores valores da razão de expansão lateral ($\Delta B/b$), as simulações indicaram grande sensibilidade do modelo às condições iniciais inferidas, exigindo cautela por parte do utilizador durante o ajuste dos parâmetros de simulação. Essa ressalva é válida para razões $\Delta B/b$ entre 4,38 e 10,0. Nesse sentido, sugeriu-se um protocolo de simulação para obtenção de resultados numéricos coerentes. No que se refere aos valores limites do parâmetro adimensional de forma proposto por Dufresne *et al.* (2010b), o programa WOLF 2D apresentou boa convergência dos resultados numéricos em relação aos respectivos padrões de escoamento observados experimentalmente. Entretanto, para pequenos valores da razão de expansão lateral, entre 0,52 e 1,25, a reprodução dos resultados experimentais pelo programa computacional não foi satisfatória. Ainda no que concerne à validação do modelo conservativo WOLF 2D, outros trabalhos destacaram sua aptidão em simular tais padrões de escoamento tratados como bidimensionais em águas rasas (DEWALS *et al.*, 2008; ERPICUM *et al.*, 2009; CAMNASIO *et al.*, 2013; PELTIER *et al.*, 2015; PELTIER *et al.*, 2016).

4.4.2.9 Avaliação numérica da eficiência hidráulica de reservatórios com geometria complexa segundo Jansons e Law (2007)

Alguns autores empenharam-se em avaliar a eficiência hidráulica de reservatórios rasos com geometria distinta da tradicional forma retangular comumente investigada. Dentre esses estudos, destacam-se as pesquisas de Jansons e Law (2007) e de Kantoush (2008). No que se refere ao trabalho de Jansons e Law (2007), utilizou-se para avaliar o comportamento hidrodinâmico de nove geometrias distintas o modelo comercial bidimensional Mike 21,

baseado na adoção de uma velocidade média característica de todo o perfil de velocidades, representativos de todo o perfil vertical. As configurações apreciadas pelos autores são apresentadas na Figura 4.12. Foram avaliadas diferentes relações L/B e posições dos canais de entrada e de saída. Cabe salientar que o canal de entrada, na referida figura, é simbolizado por uma seta apontando para o reservatório, ao passo que o canal de saída é representado por uma seta apontando para fora do mesmo.

FIGURA 4.12 - Nove diferentes geometrias de reservatório testadas numericamente, identificadas de P1 a P9



Fonte: JANSONS; LAW, 2007.

Todos os reservatórios simulados numericamente possuíam profundidade de 1,5 m, vazão de 300 L/s em regime permanente e área superficial aproximada de 18.000 m². O reservatório P1 levou em conta uma grande razão L/B . Já os reservatórios P2 e P3 incluíram em sua geometria uma ilha central, típica de bacias de detenção quando se deseja realizar o tratamento de águas pluviais, segundo os autores. Os reservatórios P4 e P5 representaram, por sua vez, o formato de uma gota cujo padrão de escoamento é de difícil predição. O reservatório P6 correspondeu ao formato de um feijão ou de um rim e os reservatórios P7, P8 e P9, por fim, caracterizaram uma geometria multicelular com um único corpo d'água (P8 e P9) ou com corpos d'água independentes (P7), conectados por sistemas de bombeamento.

Tendo em vista que a aplicação pretendida no contexto do estudo era para melhoria da qualidade de águas pluviais em bacias de detenção, a ampliação da eficiência hidráulica deve ser entendida como uma minimização da capacidade de retenção de sedimentos por parte dessas bacias.

Os resultados numéricos permitiram avaliar os seguintes aspectos, listados no Quadro 4.1:

QUADRO 4.1 - Síntese dos resultados numéricos para cada geometria simulada

Geometria avaliada	Avaliação da eficiência hidráulica	Comentários
P1	Satisfatória	Boa utilização do volume do reservatório, porém, com a formação de zonas de estagnação em função do padrão de escoamento assimétrico.
P2	Boa	Melhoria da eficiência hidráulica por influência da grande ilha existente ao centro, com escoamento naturalmente direcionado para o entorno da ilha.
P3	Satisfatória	A ilha central menor é menos eficiente do ponto de vista hidráulico, se comparada à geometria P2. Apesar de conter zonas de estagnação em sua porção de montante, possui melhor eficiência hidráulica que muitas outras configurações avaliadas.
P4	Satisfatória	Forma um jato ao longo do eixo longitudinal do reservatório e extensas zonas de estagnação no contorno da mesma, resultando em limitada eficiência hidráulica.
P5	Satisfatória	Ainda menos eficiente que o reservatório P4, já que as zonas de estagnação são mais evidentes próximo ao canal de entrada.
P6	Boa	Distribui eficientemente o escoamento no reservatório. São observadas zonas de estagnação ao redor do lado interno de sua curvatura, mas o escoamento é globalmente consistente.
P7	Ruim	Limitada eficiência hidráulica devido ao elevado grau de circulação do escoamento em cada reservatório, separadamente.
P8	Ruim	Assim como para os reservatórios P1, P7 e P9, são observadas grandes zonas de recirculação nos cantos, reduzindo sua eficiência hidráulica.
P9	Ruim	A separação das vazões afluentes ao longo da extensão do reservatório representam uma substancial diminuição de sua eficiência hidráulica.

Fonte: JANSONS; LAW, 2007 (*adaptado*).

De acordo com a análise do Quadro 4.1, é possível inferir que a adoção de ilhas de grandes dimensões, como no caso do reservatório P2, resulta na criação de trajetórias lineares de escoamento em cada lado da ilha, no aumento da razão comprimento/largura e na consequente ampliação da eficiência hidráulica do reservatório. Por outro lado, a configuração P3 é significativamente menos eficiente na distribuição do escoamento, de modo que o tamanho da ilha posicionada nesse tipo de reservatório representa um relevante fator que atua sobre suas características hidrodinâmicas. A importância do posicionamento dos canais de entrada e saída é avaliado pelas geometrias P4 e P5, sendo que a eficiência hidráulica pode ser significativamente alterada por conta desse aspecto. Apesar de adequada distribuição do escoamento ao longo do reservatório P6 (em formato de feijão) e boa eficiência hidráulica, verificaram-se pequenas zonas de estagnação na parte central da curva e provável propensão dessa forma a desenvolver processos erosivos. Ademais, a presença de múltiplos canais de entrada, conforme proposto para a geometria P9, gera uma múltipla concentração do escoamento ao invés de promover uma dispersão deste através da largura e do comprimento

do reservatório. De forma geral, o estudo evidencia o fato de que a eficiência hidráulica do reservatório é tanto maior quanto maior for o resultado da relação entre seu comprimento e sua largura.

4.4.2.10 Síntese e avaliação crítica das principais referências consultadas sobre caracterização dos padrões de escoamento

Com o objetivo de possibilitar uma avaliação mais concisa e abrangente das informações discutidas ao longo do item 4.4.2, apresenta-se a seguir o Quadro 4.2, em que são pontuadas as principais contribuições dos estudos de referência. São apresentadas também algumas limitações e/ou perspectivas identificadas nestes estudos.

QUADRO 4.2 - Síntese das principais referências estudadas sobre caracterização dos padrões de escoamento

Objeto de estudo	Referência(s)	Principais contribuições	Limitações/Perspectivas identificadas
Avaliação experimental e numérica de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados	Kantoush (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de geometrias retangulares, hexagonal e chanfradas; • Identificação de três comportamentos típicos: (1) padrão assimétrico, para geometria retangular de referência, configurações mais estreitas e com quinas suprimidas; (2) padrão simétrico, para reservatórios curtos e com geometria hexagonal; (3) padrão meandriforme, para números de Froude superiores a 0,15; • Padrões de escoamento dependentes do número de Froude; • Não houve grande distinção no padrão de escoamento para números de Reynolds muito elevados (regime turbulento); • Sensibilidade do escoamento às condições iniciais. 	Necessidade de aprofundamento da análise quanto à influência da rugosidade de fundo e das paredes laterais.

QUADRO 4.2 - Síntese das principais referências estudadas sobre caracterização dos padrões de escoamento (*continuação*)

Objeto de estudo	Referência(s)	Principais contribuições	Limitações/Perspectivas identificadas
Avaliação experimental de geometrias simples, com canais de entrada e de saída centralizados	Dufresne <i>et al.</i> (2010a,b)	<ul style="list-style-type: none"> Identificação de quatro padrões de escoamento e um padrão de transição: (1) S0, simétrico, para reservatórios curtos (relação $L/\Delta B = 5,14$); (2) A1, assimétrico, encontrado para $L/\Delta B = 6,29$; (3) A1/S0, de transição, com comprimentos intermediários entre os dos tipos S0 e A1; (4) A2, assimétrico, para reservatórios mais compridos (relação $L/\Delta B = 20,0$); (5) A3, assimétrico, para reservatórios ainda mais compridos que os do tipo A2, não testado experimentalmente. 	Reservatório de pequena dimensão, sujeito à influência das forças viscosas e das tensões superficiais.
	Camnasio, Orsi e Schleiss (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Identificação de três categorias de padrões de escoamento: (1) típico de canal, para relações B/b inferiores ou iguais a 2; (2) simétrico (S0 e S1), para relação L/B inferiores ao intervalo entre 1,5 e 2,0; (3) assimétrico (A1 e A2), para relações $B/b > 2$; Equacionamento do parâmetro “fator de forma”, em função dos valores de L, ΔB e b. 	-
	Camnasio <i>et al.</i> (2012)	<ul style="list-style-type: none"> Estudo do padrão de escoamento meandriforme; Pouca variação no período de oscilação do escoamento sinuoso para números de Froude entre 0,15 e 0,44. 	<ul style="list-style-type: none"> Reservatório com dimensões muito reduzidas, sujeito à influência das forças viscosas e das tensões superficiais; Vazão muito pequena considerada nos ensaios, suscetível a variações significativas.
	Peltier <i>et al.</i> (2013), Peltier <i>et al.</i> (2014a,b) e Peltier <i>et al.</i> (2015)	<ul style="list-style-type: none"> Estudo do padrão de escoamento meandriforme; Padrão de escoamento meandriforme para números de Froude superiores a 0,1 e relações $h/\Delta B$ menores que 0,2; Estabelecimento de valores de referência para quatro diferentes padrões de escoamento, em função do número de Froude (Fr) e do fator de forma (SF): (1) simétrico, para $Fr < 0,21$ e $SF < 6,2$; (2) assimétrico, para $SF > 8,1$ sem restrição para o valor correspondente ao número de Froude; (3) meandriforme, para $Fr > 0,21$ e $SF < 6,2$; (4) instável, para Fr próximo a 0,21 e $SF < 6,2$ ou para $Fr > 0,21$ e $6,2 < SF < 8,1$. 	Reservatório de pequena dimensão, sujeito à influência das forças viscosas e das tensões superficiais.

QUADRO 4.2 - Síntese das principais referências estudadas sobre caracterização dos padrões de escoamento (*continuação*)

Objeto de estudo	Referência(s)	Principais contribuições	Limitações/Perspectivas identificadas
Avaliação experimental e numérica do posicionamento dos canais de entrada e de saída	Camnasio <i>et al.</i> (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterização dos padrões de escoamento para as geometrias CC, LL, LR e CR; • Avaliação da influência do efeito Coanda; • Avaliação do padrão de escoamento com uso do modelo WOLF 2D. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliou-se apenas uma vazão e uma única profundidade líquida; • Houve distinção do resultado numérico obtido para a geometria LR, quando comparado ao observado experimentalmente.
Avaliação numérica do posicionamento dos canais de entrada e de saída	Ferrara <i>et al.</i> (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo numérico de diversas configurações geométricas com posicionamento variável dos canais de entrada e de saída; • Recomendação de se evitar o uso da configuração geométrica LR, tendo em vista a ocorrência de um padrão de escoamento duplamente estável; • Recomendação pela construção de reservatórios em que ocorra recolagem do escoamento (aderência à parede lateral) quando se pretende aumentar a retenção de sedimentos. 	Estudo apenas numérico, sem comprovação experimental.
Avaliação da robustez do programa computacional WOLF 2D para simulação numérica de escoamentos rasos	Dufresne <i>et al.</i> (2011), Dewals <i>et al.</i> (2008); Erpicum <i>et al.</i> (2009); Camnasio <i>et al.</i> (2013); Peltier <i>et al.</i> (2015); Peltier <i>et al.</i> (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Aptidão do programa WOLF 2D em reproduzir adequadamente os padrões de escoamento observados em grande parte dos experimentos realizados no âmbito dos estudos de referência; • O programa WOLF 2D apresentou dificuldades para reproduzir a transição entre os padrões de escoamento simétrico e assimétrico; • Grande sensibilidade do modelo às condições iniciais, para razões $\Delta B/b$ entre 4,38 e 10,0. 	-
Avaliação numérica da eficiência hidráulica de reservatórios com geometria complexa	Jansons e Law (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação da eficiência hidráulica, associada à minimização da capacidade de retenção de sedimentos, de reservatórios com formas diversas; • Análise da existência de ilhas centrais, de geometria multicelular e de corpos de água independentes, conectados por sistemas de bombeamento; • Boa eficiência hidráulica em reservatórios com grande ilha central e em formato de feijão; • Baixa eficiência hidráulica em reservatórios multicelulares e com corpos de água independentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo apenas numérico, sem comprovação experimental; • Não realização de simulações com sedimentos. Apesar disso, há conclusões tomadas que envolvem o processo de sedimentação.

Além das ressalvas destacadas no Quadro 4.2, atinentes às limitações identificadas dos estudos de referência, é pertinente também mencionar os seguintes aspectos:

- O estudo de Kantoush (2008) foi aquele que contemplou o reservatório com as maiores dimensões, tendo servido de referência para quase todos os demais trabalhos citados. A investigação experimental de Camnasio *et al.* (2013), por sua vez, foi realizada no mesmo aparato utilizado pelo primeiro autor. Considera-se que, em ambos os casos, não tenha havido problemas típicos de pequenas escalas, por influência das tensões superficiais e das forças viscosas;
- Por outro lado, os experimentos realizados por Dufresne *et al.* (2010a,b), Camnasio *et al.* (2012), Peltier *et al.* (2013), Peltier *et al.* (2014a,b) e Peltier *et al.* (2015) contemplaram reservatórios pequenos, cuja largura foi inferior a 1,0 m. No caso específico do estudo de Camnasio *et al.* (2012), construiu-se um reservatório retangular ainda menor que os demais, correspondente à escala 1:5 do de Kantoush (2008). Acredita-se que todos esses aparatos experimentais tenham sido significativamente influenciados pelas forças viscosas, já que foram submetidos a baixas velocidades, assim como pelos efeitos da tensão superficial. Além disso, os ensaios em questão podem ter sido afetados por oscilações milimétricas da profundidade líquida e/ou por variações de vazões consideradas não desprezáveis para pequenas escalas;
- Concernente àqueles ensaios em que houve assimetria hidrodinâmica, Dufresne *et al.* (2010a,b) relataram a ocorrência de desvio do jato ora para a esquerda, ora para a direita. Em seu programa de ensaios, ambos os canais foram instalados ao longo da linha de centro do reservatório. Os autores atribuem a dupla possibilidade de deflexão do jato às condições iniciais do experimento, sem, contudo, explicar o que exatamente tenha causado tal distinção. Os padrões de escoamento assimétricos observados foram espelhados;
- Apesar dos mencionados problemas típicos de reservatórios de pequena escala, globalmente, os resultados identificados em laboratório, para diferentes estudos, aparentaram ser comparáveis, no que se refere ao comportamento hidrodinâmico;

- Nenhum dos estudos citados concentrou-se na análise de sensibilidade da vazão sobre os padrões de escoamento obtidos, já que se basearam num único valor estabelecido em condição de regime permanente;
- Com relação ao estudo de Ferrara *et al.* (2018), foram identificadas importantes contribuições e recomendações de projeto, porém, sem ter sido respaldadas por nenhum tipo de investigação experimental. As suposições quanto às tendências de sedimentação decorrentes dos padrões de escoamento numéricos foram baseadas em experiências de trabalhos anteriores, o que não atesta o mesmo comportamento em condições reais;
- O estudo de Jansons e Law (2007) representou uma importante contribuição científica, porém, assim como no caso anterior, baseou-se unicamente na abordagem numérica. Serviria, assim, como uma ferramenta de identificação de configurações geométricas e/ou de condições hidráulicas que deveriam ser avaliadas em laboratório ou para outras dimensões, caso tenha-se interesse em executar alguma(s) das proposições estudadas.

4.4.3 Caracterização de tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção de sedimentos pelo reservatório

A seguir, no subitem 4.4.3.1, é apresentada uma série de contribuições da literatura no que tange às tendências de deposição sólida e relativas à avaliação da eficiência de retenção de sedimentos por reservatórios rasos.

Mais adiante, no subitem 4.4.3.2, realiza-se uma síntese das referências discutidas abaixo, bem como uma avaliação crítica do autor quanto à pertinência dos resultados correlatos.

4.4.3.1 Contribuições da literatura

De acordo com Stovin (1996), o padrão de deposição de sedimentos é fortemente influenciado pela distribuição da tensão de arrastamento do leito, explicitando, deste modo, a necessidade de se estabelecer ferramentas apropriadas para predição dos campos de escoamento.

Conforme avaliação em modelo físico e por meio de modelagem numérica, Kantoush, Bollaert e Schleiss (2008) constataram que os padrões de escoamento foram fortemente afetados pelas condições iniciais e de contorno. Além disso, durante seus experimentos, observou-se que o padrão de escoamento passou de assimétrico com água limpa para simétrico com sedimentos e houve a formação de padrões morfológicos no fundo do reservatório.

Kantoush (2008) observou em laboratório que a característica do escoamento após a introdução dos sedimentos no reservatório foi completamente alterada em relação à condição com água limpa apenas, evidentemente devido à modificação da morfologia de fundo. Em seus ensaios, utilizou-se como sedimento cascas de nozes trituradas com $d_{50} = 210 \mu\text{m}$, massa específica de 1.500 kg/m^3 , inseridos no reservatório a uma concentração de $3,0 \text{ g/L}$ e transportados em suspensão. A escolha desse tipo de material foi condicionada ao fato de que era possível obter uma mistura homogênea dessas partículas com água no interior do tanque misturador e ao longo de todo o reservatório, inclusive evitando haver uma forte deposição de partículas dentro do canal de entrada, observada para outros tipos de material avaliados previamente.

Em relação ao tempo de realização dos ensaios para alcance de um campo de velocidades estável relativo à mistura água-sedimento, avaliou-se que 90 minutos seriam suficientes para o atingimento da estabilidade pretendida. Ainda assim, foi realizada a maior parte dos ensaios com duração total de 270 minutos, dividido em três intervalos de 90 minutos. Do ponto de vista hidráulico, os experimentos foram executados em condição de regime permanente com vazão de 7 L/s e com profundidade líquida de $0,20 \text{ m}$.

Para a geometria de referência, citada no capítulo anterior, o padrão de escoamento que se desenvolveu de forma assimétrica durante o ensaio somente com a adução de água limpa apresentou uma configuração praticamente simétrica com respeito à linha de centro do reservatório com a introdução dos sedimentos. Os pequenos vórtices em sentido horário formados nas quinas de montante e detectados com a presença de água limpa não foram vistos após ter sido atingida a estabilidade da condição de mistura água-sedimento. Por outro lado, os dois vórtices remanescentes, similares aos da configuração simétrica relatada para a condição de água limpa, aparentaram ter uma tendência de ondulação, com a ligeira formação de padrões sinusoidais. Essa mudança observada no padrão de escoamento foi devida às

alterações na forma do leito, ou rugosidade efetiva, provocadas pela gradual deposição de sedimentos durante a realização do experimento. Concluiu-se que a inserção do sedimento no reservatório resultou na diminuição da turbulência do escoamento e dos comprimentos de mistura. Juntamente com o aumento da rugosidade efetiva, gerou-se um aumento do gradiente de velocidades dentro do reservatório quando comparado ao ensaio apenas com água limpa. Ademais, a carga de sedimentos depositada no fundo do reservatório afetou a troca de quantidade de movimento lateral.

Avaliando-se de maneira detalhada, no decorrer dos ensaios, notou-se nos minutos iniciais o desenvolvimento de depósitos de sedimento sob a forma de rugas do lado direito do reservatório, lado “preferencial” de desvio do jato, conforme constatado nos ensaios com água limpa. As rugas em questão apresentaram comprimentos entre 11 e 17 cm e altura de cerca de 1 cm. O padrão de escoamento alterou-se à medida que a espessura dos depósitos de sedimento excedeu nessa região cerca de 15% da profundidade de água. Com isso, houve uma significativa redução da assimetria do escoamento inicialmente estabelecida e condizente com a configuração estável observada nos experimentos apenas com água limpa. A partir de então, o jato concentrou-se ao longo da linha de centro do reservatório e observaram-se depósitos de sedimentos formando rugas através desse percurso, assim como maior concentração de sólidos em suspensão. Tendo em vista uma variante dos testes para a configuração geométrica padrão na qual foram introduzidos sedimentos no reservatório por um período de 1080 minutos (16 horas), avaliou-se que quase 50% de seu volume foram consumidos pelos depósitos sólidos após esse período.

De modo geral, avaliou-se que as características da forma do fundo do reservatório permaneceram as mesmas, independentemente da configuração ensaiada e apesar dos diversos padrões de escoamento existentes e observados somente com água limpa (assimetria com deflexão do jato, simetria com jato retilíneo e ondulação de fundo).

No que se refere aos experimentos com sedimentos realizados por Kantoush (2008) em configurações mais estreitas em relação à geometria de referência (larguras de 2,0 e 3,0 m), constatou-se que os padrões de deposição de sedimento finais resultaram em maior simetria e distribuições uniformes em toda a superfície, com depósitos concentrados em ambos os lados. Ao avaliar variantes de reservatório mais curtas em relação à configuração padrão, notou-se que a deposição de sedimentos aumentou ainda mais, apesar das recirculações em ambos os

lados terem sido impedidas com a redução do comprimento do reservatório. Em função disso, propôs-se que a relação L/B fosse superior a 0,75 quando se desejasse minimizar a sedimentação. Por outro lado, a máxima razão L/B deveria ser de 1,50, pois o aumento desse quociente corresponderia a um aumento muito rápido da deposição de sedimentos, conforme foi constatado com a realização dos experimentos.

Kantoush (2008) também investigou em seu estudo a eficiência de retenção de sedimentos correspondente a dez configurações experimentais. Por definição, a eficiência de retenção de sólidos refere-se à habilidade de um dado reservatório em armazenar sedimentos afluentes ao reservatório. Comumente, esse parâmetro é expresso em percentual, aferido pelo volume de sedimentos depositados no reservatório em relação à quantidade de sólidos inseridos no sistema. Essa deposição de sedimentos diminui paulatinamente com o tempo, à medida que o volume do reservatório vai sendo ocupado pelos sólidos decantados. De forma qualitativa, averiguou-se que a geometria de reservatório em forma de losango foi aquela em que a deposição de sedimentos foi menor, portanto, representou a configuração com menor eficiência de retenção, dentre aquelas consideradas no estudo. Em termos hidrodinâmicos, isso se dá em função da grande instabilidade do padrão de escoamento e pela existência de uma única célula de recirculação. Em seu estudo, Kantoush (2008) observou experimentalmente que a retenção de sólidos foi tanto menor quanto menor a quantidade de vórtices formados, o que correspondeu às soluções assimétricas observadas para os experimentos com água limpa. É conveniente endossar que os sedimentos foram transportados em suspensão. Adicionalmente, estabeleceu-se uma relação entre o tempo de residência do sedimento, a eficiência de retenção deste e um parâmetro geométrico denominado “fator de forma”.

Quanto à utilização de modelos numéricos bidimensionais baseados no cálculo de uma profundidade média, Kantoush (2008) avaliou que esses programas computacionais eram suficientemente robustos para reprodução dos resultados experimentais sem e com a inserção de sedimentos. Entretanto, destacou-se a necessidade de realização de melhorias nas técnicas de modelagem por parte de seus desenvolvedores, a fim de se obter previsões mais precisas e, portanto, mais confiáveis.

Em outros estudos realizados, constatou-se que a razão L/B (comprimento/largura) de reservatórios rasos, bem como a localização dos canais de entrada e de saída, apresentam uma

significativa influência no desempenho hidráulico do reservatório (PERSSON *et al.*, 1999; PERSSON, 2000; PERSSON; WITTGREN, 2003). Tais estudos foram realizados anteriormente aos de Kantoush (2008), Dufresne *et al.* (2010a) e Camnasio (2012). De toda forma, verifica-se haver um consenso do que foi observado em todos eles quanto à influência das características geométricas, em particular.

Com relação ao estudo de Dufresne *et al.* (2010a), constatou-se que os padrões de escoamento permaneceram similares àqueles observados sem sedimentos. Nesse caso, foram considerados experimentos realizados com sedimentos em reservatórios simétricos, isto é, com canais de entrada e de saída localizados ao longo da linha de centro do reservatório (eixo longitudinal), A localização dos depósitos mostrou-se fortemente dependente do padrão de escoamento.

A investigação conduzida por Camnasio *et al.* (2013) baseou-se no monitoramento contínuo da concentração de sedimentos com o auxílio de dois turbidímetros, um posicionado no canal de entrada e outro no de saída. Durante a realização de cada ensaio, com duração de 4 horas, foram inseridos 200 kg de sedimentos distribuídos uniformemente por meio de um tanque misturador (concentração de 2 g/L). O sedimento utilizado consistiu de cascas de noz trituradas, cuja massa específica era de 1500 kg/m³ e cujo diâmetro médio era de 112 µm. A espessura dos depósitos de sedimentos foi medida com o emprego de um sensor *laser* (Baumer, OADM 13), tendo decorridas duas e quatro horas do início da alimentação sólida no reservatório.

No que se refere à configuração LR (FIGURA 4.11), cujos canais de entrada e de saída foram dispostos em lados opostos à linha de centro do reservatório, observou-se padrão de escoamento significativamente distinto entre o ensaio somente com água limpa e aquele com sedimentos em suspensão (CAMNASIO *et al.*, 2013). Com efeito, enquanto para o ensaio somente com água limpa houve desvio do jato para a esquerda, em direção à parede lateral do reservatório, observou-se a formação de um jato diagonal direcionado para o canal de saída após 30 minutos de alimentação do reservatório com sedimentos. Considerando a duração total do ensaio (4 horas), pode-se observar que a estabilidade do campo de velocidades foi alcançada de forma relativamente rápida.

Para todas as configurações avaliadas, as camadas mais espessas de depósitos de sedimento formaram-se ao longo do jato, tendo em vista que a taxa de descarga sólida afluyente excedia a

capacidade de transporte do escoamento formado através do jato (CAMNASIO, 2012; CAMNASIO *et al.*, 2013). Em termos quantitativos, identificaram-se depósitos de 40 mm de altura ao longo desse percurso, ao passo que a altura da camada de sedimentos não ultrapassou 5 mm no centro das zonas de recirculação. A maior parte dos sedimentos decantou-se antes de ser arrastada para o interior dos vórtices. Isso ocorreu pelo fato de a velocidade do jato não ter sido suficiente para manter as maiores partículas de sedimento em suspensão, resultando em sua deposição ao longo do jato.

De acordo com os experimentos de Camnasio (2012), observou-se uma clara relação entre as camadas mais espessas dos depósitos de sedimento e os picos de velocidade medidos através da técnica do UVP decorridas 4 horas do início do experimento. De forma geral, onde a espessura dos depósitos de sedimento foi maior, houve um aumento local da velocidade em função da redução da seção transversal no fundo do reservatório.

Por outro lado, é importante salientar que a localização dos depósitos de sedimento é estritamente dependente da combinação entre a capacidade de transporte (parâmetros hidráulicos, características do sedimento e sua tensão de arrastamento crítica) e a taxa de inserção de sedimentos no reservatório (CAMNASIO, 2012). No caso dos experimentos realizados por Dufresne *et al.* (2010a), por exemplo, o principal mecanismo de transporte de material sólido foi por arrastamento. De maneira geral, a capacidade de transporte de sedimento foi consideravelmente maior que a taxa de fornecimento de sedimentos a montante, de modo que a deposição desses sólidos foi pouco significativa ao longo do jato. Entretanto, houve maior quantidade de depósitos sólidos no interior das zonas de recirculação, tendo em vista que a tensão de arrastamento e a velocidade do escoamento nesses locais eram menores.

No que se refere à quantificação da eficiência de retenção do reservatório (*trapping efficiency*, no termo em inglês), avaliou-se para uma única vazão (7 L/s, em regime permanente), correspondendo à profundidade de 0,20 m, a influência do posicionamento assimétrico dos canais de entrada e de saída nesses depósitos de sedimento (CAMNASIO, 2012). Para tanto, a eficiência de retenção foi determinada de três maneiras: (1) por meio do cálculo baseado na diferença entre a concentração de sólidos em suspensão na entrada e na saída do reservatório, obtida através de dois turbidímetros instalados nesses locais; (2) através de medições das espessuras dos depósitos de sedimento mediante utilização de um sensor *laser*. Neste caso, o volume de sedimentos foi transformado em peso de sedimento depositado, tendo em vista que

o peso específico dos sólidos foi previamente determinado; (3) numericamente, com o emprego do modelo computacional WOLF 2D. As eficiências de retenção determinadas são apresentadas na Tabela 4.1. Cabe destacar que esses valores representam a razão entre o volume de sedimentos retido no reservatório e o volume total fornecido durante um dado intervalo de tempo.

TABELA 4.1 - Eficiência de retenção de sedimentos pelo reservatório, para diferentes configuração e dois diferentes métodos de medição (em %)

Configuração	Resultados experimentais		Resultados numéricos <i>WOLF 2D</i>
	Método de medição (1)	Método de medição (2)	
CC	67	62	72
LL	54	50	64
LR	56	58	70
CR	58	62	71

Método de medição (1): diferença de concentrações medidas por dois turbidímetros;
Método de medição (2): medição das espessuras dos depósitos de sedimento com auxílio de um sensor laser.

Fonte: CAMNASIO, 2012 (*adaptado*).

A análise da Tabela 4.1 permitiu constatar, de modo geral, que o posicionamento dos canais de entrada e de saída aparentou não ter grande influência sobre a eficiência de retenção do reservatório, já que os percentuais indicados são relativamente próximos. Por outro lado, foi possível notar que a configuração CC (com os dois canais posicionados na linha de centro do reservatório) correspondeu à maior eficiência de retenção, ao passo que a configuração LL (em que ambos os canais ficam posicionados do lado esquerdo do eixo longitudinal do reservatório) foi aquela que resultou na menor eficiência de retenção.

Ainda de acordo com Camnasio (2012), as diferenças entre os dois valores referentes a cada método de medição experimental deve estar associada, provavelmente, à significativa incerteza na obtenção dos resultados. Quanto aos resultados obtidos numericamente por meio da utilização do programa computacional WOLF 2D, observou-se que os valores de eficiência de retenção foram sempre superiores aos dados obtidos experimentalmente, portanto, superestimando os resultados. A autora salientou que algumas premissas simplificadoras adotadas em seu modelo numérico deveriam ser objeto de calibração mais cautelosa. São exemplos dessas premissas:

- Diâmetro dos sedimentos: na modelagem em questão, adotou-se um diâmetro médio característico. Sugeriu-se adotar, alternativamente, uma distribuição granulométrica mais próxima da caracterização do sedimento utilizado nos experimentos;
- Porosidade: parâmetro que reflete na espessura das camadas de sedimento depositado e na eficiência de retenção do reservatório. Sugeriu-se novamente que fosse feita uma análise de sensibilidade desse termo numérico.

4.4.3.2 Síntese e avaliação crítica das principais referências consultadas sobre caracterização das tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção sólida em reservatórios rasos

De modo similar à síntese das informações dispostas na literatura quanto à caracterização dos padrões de escoamento (QUADRO 4.2), apresentam-se no Quadro 4.3 as principais contribuições e limitações dos estudos de referência apresentados no subitem 4.4.3.1.

QUADRO 4.3 - Síntese das principais referências estudadas sobre caracterização das tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios

Referência(s)	Objeto de estudo	Principais contribuições	Limitações
Stovin (1996)	Deposição de sedimentos em desarenadores de estações de tratamento de esgoto (ETE).	O padrão de deposição de sedimentos foi fortemente influenciado pela distribuição da tensão de arrastamento do leito.	-
Kantoush, Bollaert e Schleiss (2008)	Avaliação experimental e numérica de tendências de sedimentação em reservatórios rasos com canais de entrada e de saída centralizados.	<ul style="list-style-type: none"> • Padrões de escoamento fortemente afetados pelas condições iniciais e de contorno; • Mudança de padrão de escoamento assimétrico com água limpa para simétrico com a presença de sedimentos decantados. 	-
Kantoush (2008)	Avaliação experimental e numérica de tendências de sedimentação e da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios rasos com canais de entrada e de saída centralizados; sedimentos em suspensão.	<ul style="list-style-type: none"> • Padrão de escoamento após a introdução dos sedimentos completamente alterado em relação à condição com água limpa, devido à modificação da morfologia de fundo; • Pequenos vórtices formados nas quinas de montante nos ensaios com água limpa deixaram de existir nos ensaios com sedimentos; • Tendência de ondulação dos vórtices remanescentes, com a ligeira formação de padrões sinusoidais; 	Maior parte dos ensaios com sedimentos foram interrompidos não após 3h do início da alimentação sólida, antes do atingimento do equilíbrio das vazões na entrada e na saída do reservatório.

QUADRO 4.3 - Síntese das principais referências estudadas sobre caracterização das tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios (*continuação*)

Referência(s)	Objeto de estudo	Principais contribuições	Limitações
Kantoush (2008) - <i>continuação</i>	Avaliação experimental e numérica de tendências de sedimentação e da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios rasos com canais de entrada e de saída centralizados; sedimentos em suspensão.	<ul style="list-style-type: none"> • Inserção do sedimento no reservatório resultou no aumento da rugosidade efetiva e na diminuição da turbulência do escoamento e dos comprimentos de mistura; • A carga de sedimentos depositada no fundo do reservatório afetou a troca de quantidade de movimento lateral; • Quase 50% do volume do reservatório foram consumidos por sólidos decantados após 16h de alimentação sólida; • Indicação de construção de reservatórios com quociente L/B entre 0,75 e 1,50, quando se deseja minimizar a sedimentação; • A retenção de sólidos foi tanto menor quanto menor a quantidade de vórtices formados, como ocorrido em padrões assimétricos dos experimentos com água limpa; • Modelos bidimensionais são suficientemente robustos para reprodução de resultados experimentais sem e com a inserção de sedimentos 	
Persson <i>et al.</i> (1999); Persson (2000); Persson; Wittgren (2003)	Avaliação da influência de fatores hidrológicos e hidráulicos no desempenho de reservatórios de sedimentação.	A razão L/B do reservatório, bem como a localização dos canais de entrada e de saída, apresentam uma significativa influência no desempenho hidráulico do reservatório.	-
Dufresne <i>et al.</i> (2010a)	Investigação experimental da deposição de sedimentos em reservatórios retangulares rasos; sedimentos transportados por arrastamento.	<ul style="list-style-type: none"> • Os padrões de escoamento permaneceram similares àqueles observados sem sedimentos; • A localização dos depósitos mostrou-se fortemente dependente do padrão de escoamento; • Deposição sólida pouco significativa ao longo do jato, já que o modo de transporte foi por arrastamento; • Maior quantidade de depósitos sólidos no interior das zonas de recirculação. 	A inserção de sedimentos plásticos foi realizada durante apenas 10 minutos, com concentração de 0,5 g/L.

QUADRO 4.3 - Síntese das principais referências estudadas sobre caracterização das tendências de deposição de sedimentos e eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios (*continuação*)

Referência(s)	Objeto de estudo	Principais contribuições	Limitações
Camnasio <i>et al.</i> (2013)	Avaliação experimental e numérica de tendências de sedimentação e da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios rasos com posicionamento variável dos canais de entrada e de saída.	<ul style="list-style-type: none"> • Padrão de escoamento significativamente distinto para a configuração LR, entre o ensaio somente com água limpa e aquele com sedimentos em suspensão; • Estabilidade do padrão de escoamento final foi alcançada de forma relativamente rápida; • As camadas mais espessas de depósitos de sedimento formaram-se ao longo do jato. 	Ensaio com sedimentos relativamente curtos, com duração máxima de 4h.
Camnasio (2012)	Avaliação experimental e numérica de tendências de sedimentação e da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios rasos com canais de entrada e de saída centralizados.	O posicionamento dos canais de entrada e de saída aparentou não ter grande influência sobre a eficiência de retenção do reservatório, já que os percentuais indicados foram relativamente próximos.	Os ensaios foram curtos, com tempo insuficiente para atingimento do equilíbrio das vazões na entrada e na saída do reservatório

Além das ressalvas apresentadas no Quadro 4.3, relativas às limitações dos estudos de referência, cabe ainda endossar alguns aspectos, a saber:

- Os estudos de Kantoush, Bollaert e Schleiss (2008) e Kantoush (2008) foram aqueles considerados mais robustos e apropriados, do ponto de vista metodológico, tendo em vista a grande escala do aparato experimental e as conclusões tomadas em função da duração de cada ensaio;
- Por outro lado, o trabalho conduzido por Dufresne *et al.* (2010a) apresentou uma série de conclusões consideradas incompletas ou até mesmo indevidas, sobretudo no que se refere à suposta não alteração do padrão de escoamento por influência da deposição sólida e ao modo de transporte dos sedimentos;
- Quanto aos trabalhos de investigação de Camnasio (2012) e Camnasio *et al.* (2013), pioneiros na avaliação do posicionamento assimétrico dos canais de entrada e de saída, observou-se haver grande limitação nos métodos utilizados para determinar a eficiência de retenção sólida das configurações testadas. Com efeito, os valores obtidos por meio de duas técnicas experimentais e uma avaliação numérica foram muito próximos para diferentes geometrias. Adicionalmente, pelo fato de o tempo de

ensaio ter sido relativamente curto, considera-se não ter sido encontrada uma condição estável, do ponto de vista sólido, que pudesse conduzir a uma conclusão assertiva acerca da influência do posicionamento dos canais sobre as tendências de retenção sólida.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Modelagem física

5.1.1 Estudo experimental realizado no CPH-UFMG

Parte dos ensaios de laboratório no âmbito dessa pesquisa foram realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da UFMG, no Brasil. Construiu-se, para tanto, um reservatório retangular de fundo plano com 3,00 m de comprimento, 2,00 m de largura e 0,30 m de profundidade, com chapas metálicas e revestido com pintura epóxi, com o objetivo de protegê-lo contra oxidação. O reservatório em questão dispôs de dois canais de seção retangular, um instalado junto a sua parede de montante e outro junto a sua parede de jusante. O aparato experimental construído no CPH-UFMG é apresentado na Figura 5.1.

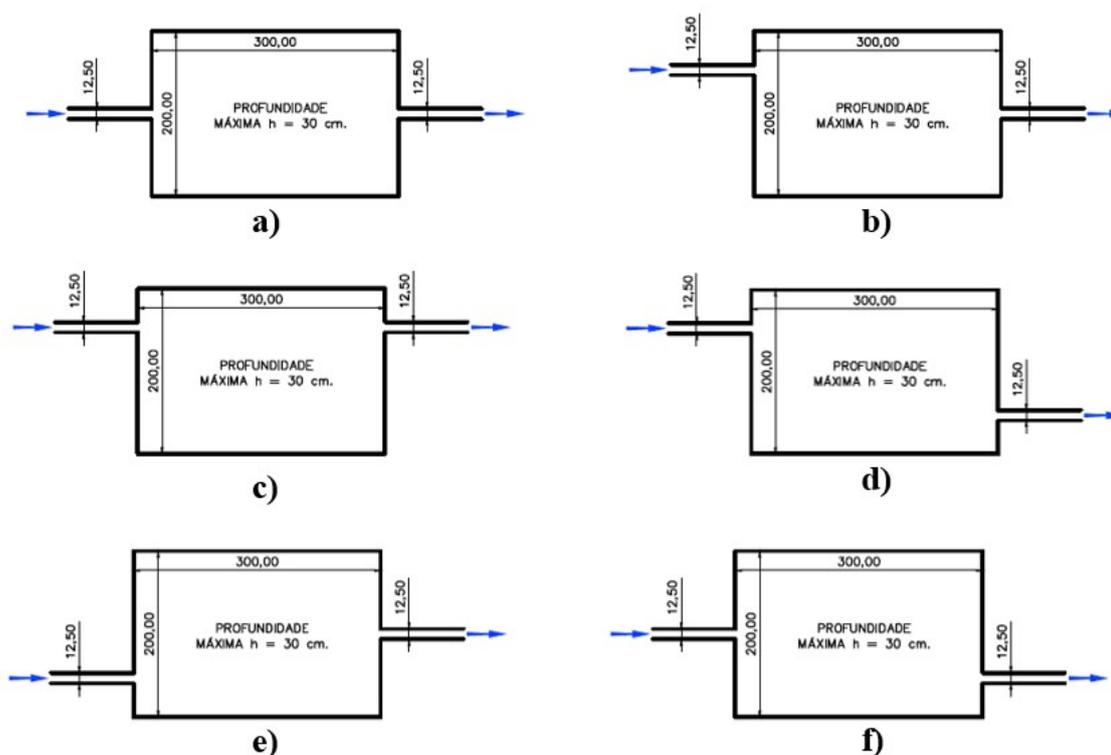
FIGURA 5.1 – Reservatório retangular construído no CPH-UFMG: (a) canal de entrada alinhado com o eixo longitudinal do reservatório, (b) canal de saída igualmente alinhado com o eixo longitudinal.



Os canais de entrada e de saída foram também construídos com chapas metálicas. Ambos possuíam 1,0 m de comprimento, 0,125 m de largura e 0,30 m de altura, esta última correspondendo à mesma altura do reservatório. Uma vez que o objetivo geral da pesquisa consistiu em avaliar a influência do posicionamento dos canais de entrada e de saída sobre os padrões de escoamento e sobre a deposição de sedimentos, foram previstas três localizações na entrada do reservatório e três na saída para instalação dos referidos canais. Assim sendo, cada um deles pode ser instalado com o emprego de parafusos ora à esquerda do eixo longitudinal do reservatório, em relação ao sentido do escoamento (posição L, inicial do termo em inglês *left*), ora alinhado com o eixo longitudinal (posição C, inicial do termo em inglês *central*) ou senão à direita deste eixo (posição R, inicial do termo em inglês *right*).

No reservatório retangular do CPH-UFMG, realizou-se uma série de experimentos com água limpa, com vistas ao mapeamento dos padrões de escoamento em função da configuração geométrica e para condições hidráulicas pré-definidas, em regime permanente. Foram, assim, definidas 6 diferentes combinações geométricas de posicionamento dos canais de entrada e de saída, conforme ilustrado nas Figuras 5.2 e 5.3 e indicado no Quadro 5.1.

FIGURA 5.2 – Configurações geométricas testadas no CPH-UFMG



Legenda: (a) CC, (b) LC, (c) LL, (d) LR, (e) RC, (f) CR.

As configurações definidas foram: CC, cujos canais de entrada e de saída foram instalados ao longo do eixo longitudinal do reservatório; LC, com o canal de entrada posicionado à esquerda e o de saída localizado ao centro; RC, com o canal de entrada à direita e o de saída ao centro; LL, em que ambos os canais foram instalados à esquerda do eixo longitudinal do reservatório; LR, com o canal de entrada à esquerda e o de saída à direita e; finalmente, CR, relativo à instalação do canal de entrada ao longo do eixo longitudinal do reservatório e o de saída do lado direito. Ao todo, conforme indicado no Quadro 5.1, foram previstos 18 experimentos, 3 para cada configuração geométrica e cada qual para uma dada vazão, entre 3 diferentes valores selecionados (0,50 L/s, 1,25 L/s e 3,40 L/s).

FIGURA 5.3 – Imagem de topo do reservatório do CPH-UFMG, com identificação das posições alternativas dos canais de entrada e de saída.



QUADRO 5.1 - Combinações geométricas dos canais de entrada e de saída testadas física e numericamente no CPH-UFMG

No.	Código do experimento	Posição do canal de entrada			Posição do canal de saída		
		Esquerda	Centro	Direita	Esquerda	Centro	Direita
1	1 - CC						
2	2 - CC		X			X	
3	3 - CC						
4	1 - LC						
5	2 - LC	X				X	
6	3 - LC						
7	1 - LL						
8	2 - LL	X			X		
9	1 - LL						
10	1 - LR						
11	2 - LR	X					X
12	3 - LR						
13	1 - RC						
14	2 - RC			X		X	
15	3 - RC						
16	1 - CR						
17	2 - CR		X				X
18	3 - CR						

É importante destacar que essas configurações geométricas foram escolhidas de acordo com os diferentes padrões de escoamento que se esperava obter de todas as combinações possíveis em função do posicionamento dos canais de entrada e de saída. No entanto, duas delas foram intencionalmente selecionadas de forma redundante (configurações LC e RC) com o objetivo de se verificar se o padrão de escoamento era efetivamente espelhado.

Todos os cenários experimentais definidos no Quadro 5.1 e ilustrados pelas Figuras 5.2 e 5.3 serviram igualmente de base para a realização das simulações numéricas. As informações concernentes à modelagem numérica serão pormenorizadas adiante no presente capítulo, especificamente no item 5.2.

Cabe destacar também que o aparato experimental construído no CPH-UFMG correspondeu à escala 1:2 do aparato de Kantoush (2008), tanto no que se refere ao reservatório quanto aos canais de entrada e de saída. Optou-se por adotar tal referência com vistas a promover a comparação e a validação dos resultados desta pesquisa com as observações daquele autor, tendo em vista que os parâmetros geométricos adimensionais foram preservados (relações L/B , B/b , $L/\Delta B$, $\Delta B/b$, dentre outras). De forma complementar, avaliaram-se outras condições hidráulicas distintas daquela correspondente em escala entre este estudo e o de Kantoush (2008).

O objetivo dos experimentos realizados com água limpa consistiu em avaliar qual(is) dos padrões de escoamento preconizados por Kantoush (2008), Dufresne *et al.* (2010b) e Camnasio, Orsi e Schleiss (2011) foi(ram) verificado(s) no reservatório construído no CPH-UFMG. Nesse caso, foi possível confrontar os resultados da literatura, levando-se em conta a condição de referência, qual seja, com os canais de entrada e de saída posicionados paralelamente à linha de centro do reservatório (configuração CC). Ademais, puderam ser mapeados os padrões de escoamento em configurações geométricas assimétricas e em função de condições hidráulicas distintas (variantes de profundidade e de vazão líquida), o que correspondeu a uma das contribuições da presente pesquisa.

Conforme já destacado, para cada uma das 6 configurações geométricas, foram realizados ensaios com três diferentes vazões (0,50 L/s, 1,25 L/s e 3,40 L/s) em regime permanente. Por sua vez, cada vazão foi associada a uma profundidade de água monitorada a jusante do reservatório, na porção inicial do canal de saída, com o auxílio de uma régua milimetrada

convencional. As profundidades e vazões consideradas nos experimentos são apresentadas na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 - Configurações geométricas testadas no CPH-UFMG com suas respectivas profundidades de jusante e vazões em regime permanente

No.	Código do cenário	Profundidade	Vazão
		H	Q
		[m]	[L/s]
1	1 - CC	0,05	0,50
2	2 - CC	0,10	1,25
3	3 - CC	0,20	3,40
4	1 - LC	0,05	0,50
5	2 - LC	0,10	1,25
6	3 - LC	0,20	3,40
7	1 - LL	0,05	0,50
8	2 - LL	0,10	1,25
9	3 - LL	0,20	3,40
10	1 - LR	0,05	0,50
11	2 - LR	0,10	1,25
12	3 - LR	0,20	3,40
13	1 - RC	0,05	0,50
14	2 - RC	0,10	1,25
15	3 - RC	0,20	3,40
16	1 - CR	0,05	0,50
17	2 - CR	0,10	1,25
18	3 - CR	0,20	3,40

Para controle da profundidade de jusante, empregou-se uma soleira na parte final do canal de saída, parafusada a essa estrutura, com espessura de cerca de 2 mm e altura ajustada em função da profundidade de água requerida. É válido destacar que a vazão de 1,25 L/s foi selecionada para corresponder ao valor adotado nos experimentos de Kantoush (2008) na escala 1:2. Tal vazão foi obtida utilizando-se a relação de escala de vazão apresentada no Apêndice II desta tese (item II.2), baseada na semelhança de Froude. A menor vazão dos experimentos (0,50 L/s), por sua vez, foi escolhida por representar um dos menores valores indicados na curva da bomba empregada nos testes. Por fim, a vazão de 3,40 L/s correspondeu ao limite superior alcançado pela mesma bomba para a máxima rotação de seu motor.

Conforme já apresentado anteriormente, foram estabelecidos códigos alfanuméricos para facilitar a identificação dos cenários avaliados experimentalmente. Em outras palavras, todos

os códigos dos experimentos com água limpa foram associados a um número (entre 1 e 3), representando a vazão de referência (código 1 = vazão de 0,50 L/s; código 2 = vazão de 1,25 L/s; e código 3 = vazão de 3,40 L/s) seguido por duas letras, a primeira referindo-se à posição do canal de entrada (L para posição à esquerda; C para posição central; e R para posição à direita) e a segunda, à posição do canal de saída, seguindo a mesma padronização adotada para o canal de entrada. Por exemplo, conforme se verifica pela análise conjunta do Quadro 5.1 e da Tabela 5.1, deduz-se que o ensaio de código 1-LR (Experimento 10) foi realizado com uma vazão de 0,50 L/s, com profundidade de jusante de 5,0 cm e com canais de entrada e de saída instalados, respectivamente, nas posições à esquerda e à direita do eixo longitudinal do reservatório.

Ainda no que se refere aos ensaios realizados, foram instalados e explorados dois sistemas de bombeamento, conforme mostrado na Figura 5.4.

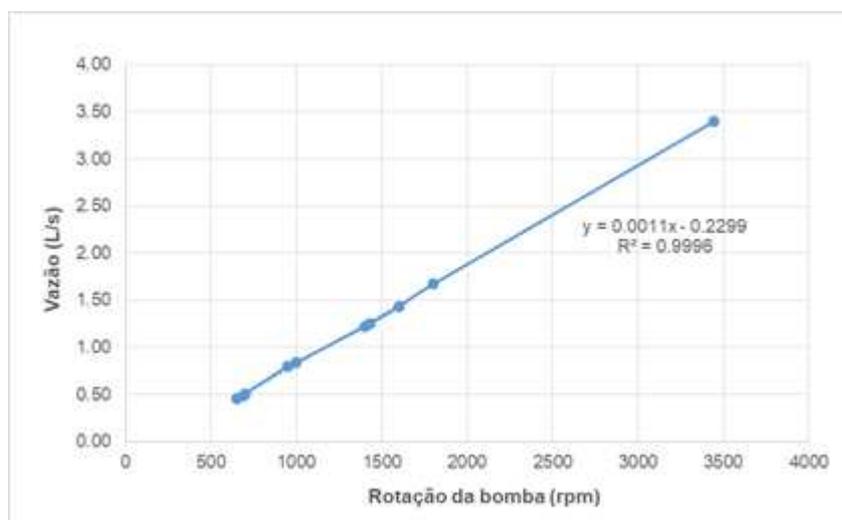
FIGURA 5.4 - Instalações de bombeamento para realização dos experimentos no CPH-UFMG



Legenda: (a) bomba para fornecimento de água ao reservatório, (b) inversor de frequência para controle da velocidade de rotação da bomba, (c) bomba para restituição da vazão defluente ao reservatório auxiliar

Um desses sistemas de bombeamento correspondeu ao conjunto motobomba centrífuga de marca Schneider, modelo BC-92 trifásico de 1 cv de potência e rotação nominal máxima de 3500 rpm (Figura 5.4a). O ajuste das vazões de referência em cada ensaio foi viabilizado pela instalação de um inversor de frequência de marca Weg, modelo CFW 09 (Figura 5.4b), que permitiu regular a velocidade de rotação do motor da bomba. Para tanto, calibrrou-se a rotação correspondente a cada vazão de interesse, essa última obtida na porção final do canal de saída e aferida por medição volumétrica, com auxílio de balde e cronômetro. Para assegurar o correto estabelecimento da relação velocidade de rotação da bomba *versus* vazão líquida, antes de cada medição volumétrica, aguardou-se o tempo necessário para alcance da condição permanente do escoamento no reservatório, avaliado em função da estabilização da profundidade líquida dentro do reservatório por meio de régua instalada. Esse tempo de estabilização foi normalmente entre 5 e 10 minutos. A velocidade de rotação do sistema motobomba correspondente a cada vazão de interesse só foi efetivamente definida após repetidas aferições pelo método volumétrico. Durante os experimentos, a vazão defluente ao reservatório, na porção final do canal de saída, foi restituída para um reservatório auxiliar, com emprego do segundo sistema de bombeamento. Esse sistema correspondeu a um conjunto motobomba de marca Weg, modelo não identificado, com 5 cv de potência e rotação de 3485 rpm (Figura 5.4c). É válido mencionar que o reservatório auxiliar serviu também ao fornecimento da vazão afluyente ao reservatório avaliado, de modo que todo o sistema de bombeamento instalado pudesse ser considerado fechado. A Figura 5.5 refere-se à curva de calibração das vazões líquidas em função da rotação do sistema de bombeamento.

FIGURA 5.5 – Curva de calibração das vazões líquidas em função da velocidade de rotação do conjunto motobomba



Pela análise da Figura 5.5, foi possível constatar graficamente, conforme já era esperado, que havia uma relação linear entre as velocidades de rotação do sistema de bombeamento e as respectivas vazões líquidas. Além disso, o coeficiente R^2 (coeficiente de determinação) relativo à reta de regressão linear foi igual a 0,9996, indicando um ajuste praticamente perfeito da dependência de uma variável em relação à outra.

É importante destacar que foram previstos dispositivos (tubos de PVC de 20 mm de diâmetro justapostos) para tornar uniformemente distribuído o escoamento na entrada do reservatório, e atenuar, desse modo, flutuações provocadas pelo jato de água afluyente (Figura 5.6).

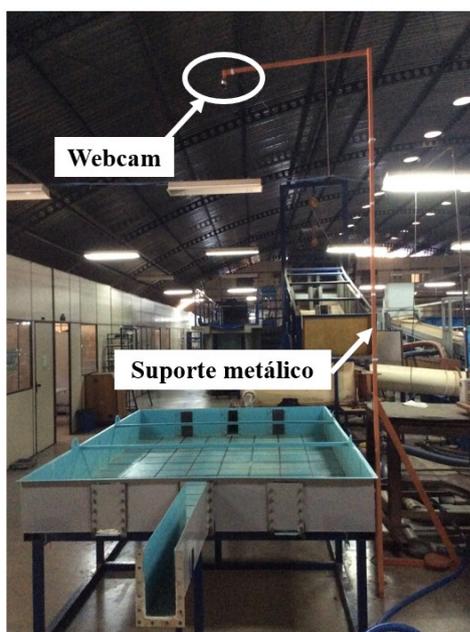
FIGURA 5.6 - Dispositivos instalados no CPH-UFMG ao longo do canal de entrada para redução de turbulências na entrada do reservatório ensaiado



Os 18 experimentos realizados no CPH-UFMG tiveram por objetivo avaliar o padrão de escoamento em cada caso, por meio da determinação dos campos de velocidade superficial, em função da configuração geométrica e da vazão correspondente. Desta forma, seria possível avaliar a influência do posicionamento dos canais de entrada e de saída sobre o comportamento hidrodinâmico verificado.

Para tanto, foram realizadas filmagens do reservatório (normalmente entre 8 e 12 minutos) para subsequente captura e processamento de fotos em programa computacional baseado na aplicação da técnica do LSPIV (*large scale particle image velocimetry*). Instalou-se acoplada a um suporte metálico de 4,0 m de altura, posicionado sobre o reservatório ensaiado, uma *webcam* de marca Logitech, modelo C920, para registro de vídeos em alta resolução (HD) com resolução de até 1080 pixels. O suporte para fixação da câmera utilizada para registros de vídeo, em cor alaranjada, é mostrado na Figura 5.7.

FIGURA 5.7 - Suporte metálico com câmera para filmagem dos experimentos realizados no CPH-UFMG



A altura de instalação da câmera foi devidamente calculada para viabilizar a captura de imagens representativas de toda a área retangular do reservatório de ensaios. A realização das filmagens demandou a utilização de um computador portátil e, especificamente, de um programa computacional que permitisse o registro de vídeos. Nesse estudo, optou-se por empregar o software gratuito AMCap, versão 9.22, desenvolvido por Noël Danjou (disponível em [#AMCap](http://noeld.com/programs.asp?cat=video)).

É pertinente ressaltar que, devido ao fato de o reservatório ter sido construído com chapas metálicas, necessitou-se travar as paredes laterais em sua parte superior com a instalação das referidas barras, conforme se observa na Figura 5.3. Com isso, tais barras foram inevitavelmente projetadas junto ao fundo do reservatório durante as filmagens.

Ainda no que se refere ao princípio de determinação dos campos de velocidade superficial do escoamento por meio da técnica do LSPIV, foram utilizadas partículas traçadoras lançadas de forma contínua e uniforme do reservatório, imprescindíveis no processo de vetorização pelo algoritmo compatível com a referida técnica de medição. Com efeito, empregaram-se tampas plásticas de garrafa PET 2 litros (cor preta, para contrastar com o fundo azul do reservatório), devido a sua facilidade de manuseio e pelo fato de flutuarem sobre a superfície líquida, conforme recomendações de Meselhe, Peeva e Muste (2004), apresentadas no capítulo anterior.

Ademais, o fundo do reservatório foi inteiramente quadriculado com fita do tipo *silver tape*, compondo uma série de elementos de 25 cm de lado (FIGURA 5.3), com o objetivo de facilitar a identificação de uma série de pontos georreferenciados demandadas pelo programa computacional acessório à técnica do LSPIV.

O programa computacional FUDAA-LSPIV foi utilizado para extração de fotografias, a partir dos vídeos gravados durante cada ensaio, e para posterior obtenção dos campos de velocidade superficial. Definiu-se um intervalo temporal Δt fixo para obtenção de imagens subsequentes, de acordo com a velocidade do escoamento. Conforme orientação de outros estudos e do próprio manual do FUDAA-LSPIV, o intervalo Δt considerado para captura das imagens foi entre 1 e 2 segundos. Privilegiou-se a adoção de um intervalo menor entre fotos (1 segundo, isto é, 1 fotografia por segundo) para a maior vazão ensaiada ($Q = 3,40$ L/s), visto que o deslocamento dos traçadores utilizados ocorreu mais rapidamente. Em contrapartida, a baixa velocidade do escoamento para as menores vazões ($Q = 0,50$ L/s e $1,25$ L/s) possibilitou a aquisição de imagens em intervalos de tempo mais espaçados (obteve-se 1 fotografia a cada 2 segundos), o que reduziu o tempo de processamento do programa computacional. Cabe salientar que, tradicionalmente, uma filmagem comporta uma taxa de cerca de 30 fps (*frames per second*), ou seja, seria possível obter até 30 imagens por segundo.

Outra tarefa demandada pelo *software* FUDAA-LSPIV consistiu na ortorretificação da imagem, o que requereu a eliminação de distorções comumente existentes nas bordas da fotografia provocadas pela não-planicidade da lente da câmera. Ademais, necessitou-se definir outros parâmetros do modelo para geração dos campos vetoriais de velocidade superficial (resolução da imagem, definição das áreas de interesse, ajuste da fineza da malha e, finalmente, estabelecimento de filtros nos módulos dos vetores de velocidade).

Respeitando-se a rotina ora detalhada, foi gerado o mapeamento dos vetores de velocidade superficial média referentes aos 18 experimentos realizados.

Adicionalmente, em todas as variantes experimentais, foram anotadas as temperaturas ambiente e da água, com o emprego de um termômetro digital portátil tipo vareta de marca Minipa, modelo MV-363. No caso específico da temperatura da água, utilizou-se tal parâmetro para definição precisa da viscosidade cinemática ν e, por consequência, do número de Reynolds (caracterização do regime de escoamento).

5.1.2 Estudo experimental realizado no LH-IST

A outra etapa experimental no âmbito desta pesquisa foi realizada no Laboratório de Hidráulica do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa, em Portugal. Para tanto, construiu-se um segundo reservatório retangular raso com fundo plano (FIGURA 5.8).

FIGURA 5.8 – Reservatório retangular construído no LH-IST



Legenda: (a) identificação dos canais de entrada e de saída, (b) ensaio com água limpa em curso, com vazão de 1,00 L/s.

O reservatório português, mostrado na Figura 5.8, teve o comprimento de 1,5 m, a largura de 1,0 m e a profundidade máxima de 0,16 m. O aparato foi instalado dentro de um canal existente, com fundo e paredes laterais de alvenaria. As paredes de montante e de jusante foram fabricadas por empresa especializada, construídas com chapas de aço inoxidável. Os canais de entrada e de saída, por sua vez, possuíam 1,0 m de comprimento, largura de 0,063 m e 0,16 m de altura e foram também construídos com aço inoxidável.

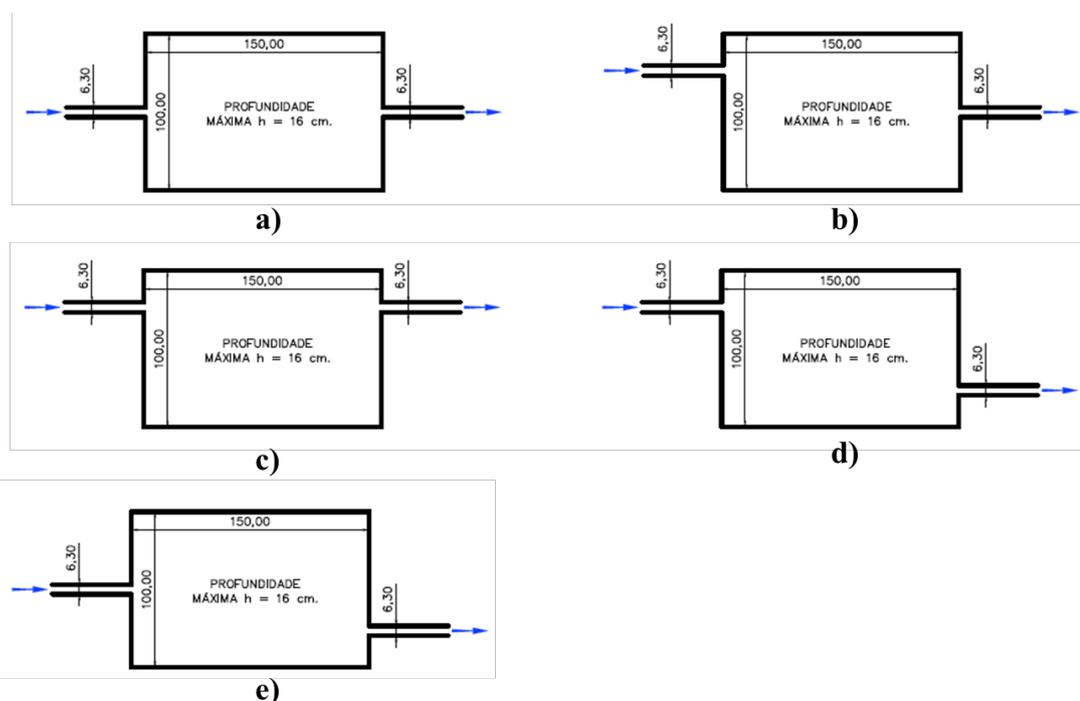
É conveniente salientar que o reservatório utilizado para realização dos experimentos em Portugal (LH-IST) e o do CPH-UFMG são geometricamente proporcionais e vinculados a partir das relações de semelhança de modelos de cursos d'água com fundo móvel de Chauvin (1962), conforme apresentado no capítulo anterior. O reservatório português representou, deste modo, um modelo distorcido do reservatório brasileiro, o protótipo. As dimensões lineares horizontais (comprimento e largura do reservatório) foram relacionados na escala 1:2. Enquanto o comprimento do reservatório brasileiro foi de 3,0 m, este valor foi de 1,5 m no caso do reservatório português. No que se refere à largura do reservatório, o valor

estabelecido para o do CPH-UFMG foi de 2,0 m e, para o do LH-IST, de 1,0 m. As demais grandezas foram distorcidas, inclusive as profundidades líquidas correspondentes empregadas nos experimentos. O ábaco de Chauvin e as relações de proporção definidas para as diversas grandezas concernentes a esta pesquisa são apresentados no Apêndice III.

A razão principal para a adoção das relações de semelhança preconizadas por Chauvin (1962), e não as da semelhança de Froude, deve-se ao fato de o escoamento observado nesses reservatórios não ter sido turbulento rugoso, conforme avaliado durante testes preliminares no laboratório. Deste modo, a influência da viscosidade da água não pode ser desprezada e, portanto, justifica-se a escolha de relações matemáticas que representem um compromisso entre as semelhanças de Froude e de Reynolds.

Considerou-se igualmente a possibilidade de acoplagem dos canais de entrada e de saída em três diferentes posições, de forma análoga e geometricamente proporcional ao reservatório brasileiro. Da mesma forma que no caso dos ensaios realizados no CPH-UFMG, selecionou-se uma série de configurações geométricas baseadas na alteração do posicionamento dos referidos canais para realização dos experimentos no LH-IST (FIGURA 5.9).

FIGURA 5.9 – Configurações geométricas testadas no LH-IST



Legenda: (a) CC, (b) LC, (c) LL, (d) LR, (e) CR.

Enquanto para o reservatório brasileiro foram elencadas 6 diferentes combinações, consideraram-se 5 geometrias distintas para o reservatório português (CC, LL, LC, LR e CR). As devidas combinações dos canais de entrada e de saída consideradas em cada experimento são apresentadas no Quadro 5.2.

QUADRO 5.2 - Combinações geométricas dos canais de entrada e de saída testadas física e numericamente no LH-IST

No.	Código do cenário	Posição do canal de entrada			Posição do canal de saída		
		Esquerda	Centro	Direita	Esquerda	Centro	Direita
1	1 - CC						
2	2 - CC		X			X	
3	3 - CC						
4	1 - LC						
5	2 - LC	X				X	
6	3 - LC						
7	1 - LL						
8	2 - LL	X			X		
9	3 - LL						
10	1 - LR						
11	2 - LR	X					X
12	3 - LR						
13	1 - CR						
14	2 - CR		X				X
15	3 - CR						

Conforme explanado anteriormente, uma das configurações geométricas, a do tipo RC (com o canal de entrada à direita e com o canal de saída alinhado com o eixo longitudinal do reservatório), havia sido adotada no CPH-UFMG de forma redundante em relação ao tipo LC. Após realização dos ensaios brasileiros e face aos resultados obtidos, optou-se pela eliminação da configuração RC no que tange aos experimentos do LH-IST.

Levaram-se em conta no âmbito do LH-IST três diferentes vazões em regime permanente (0,15 L/s, 0,37 L/s e 1,00 L/s), cada qual associada a uma profundidade do escoamento. Tal profundidade foi regulada em função da abertura/fechamento de uma válvula de gaveta instalada a jusante do canal de saída, acoplada a um mangote flexível. O ajuste da abertura/fechamento da válvula, bem como a aferição da profundidade líquida resultante, foram feitos mediante introdução de uma régua milimetrada metálica posicionada no interior do reservatório.

As três vazões serviram de referência para os experimentos realizados para as 5 configurações geométricas selecionadas (CC, LL, LC, LR e CR), o que resultou em 15 experimentos com água limpa. As informações em questão são apresentadas na Tabela 5.2.

Cumprindo endossar que os valores constantes na Tabela 5.2 são os correspondentes aos adotados nos experimentos do CPH-UFMG pela aplicação das relações de semelhança preconizadas por Chauvin (1962).

TABELA 5.2 - Configurações geométricas testadas no LH-IST com suas respectivas profundidades de jusante e vazões em regime permanente

No.	Código do cenário	Profundidade	Vazão
		H	Q
		[m]	[L/s]
1	1 - CC	0,036	0,15
2	2 - CC	0,071	0,37
3	3 - CC	0,143	1,00
4	1 - LC	0,036	0,15
5	2 - LC	0,071	0,37
6	3 - LC	0,143	1,00
7	1 - LL	0,036	0,15
8	2 - LL	0,071	0,37
9	3 - LL	0,143	1,00
10	1 - LR	0,036	0,15
11	2 - LR	0,071	0,37
12	3 - LR	0,143	1,00
13	1 - CR	0,036	0,15
14	2 - CR	0,071	0,37
15	3 - CR	0,143	1,00

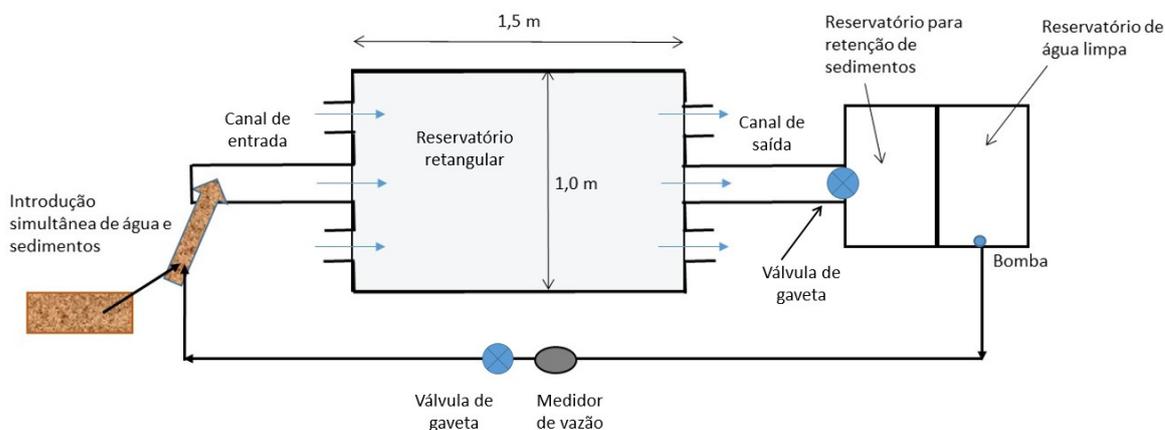
Assim como no aparato experimental do CPH-UFMG, foram utilizados pequenos tubos de PVC justapostos, de 10 mm de diâmetro, para atenuar as flutuações geradas pelo jato de água na porção inicial do canal de entrada. Tais tubos de PVC, com cerca de 30 cm de comprimento cada, foram colocados paralelamente ao escoamento, dentro do canal de entrada.

A Figura 5.10 representa um esquema das instalações que foram construídas, isto é, adaptadas para a realização dos experimentos em Portugal.

O aparato, além do reservatório retangular e dos canais de entrada e de saída, já descritos, contou com uma bomba submersível instalada dentro de um reservatório para armazenamento

de água limpa, conforme mostrado no esquema. Este reservatório auxiliar, localizado a jusante do canal de saída, foi responsável pela estocagem e fornecimento da água utilizada nos ensaios.

FIGURA 5.10 – Planta esquemática do aparato experimental utilizado no LH-IST



Uma válvula de gaveta foi instalada na tubulação de adução de água para regular a vazão líquida, aferida, por sua vez, através de um medidor de vazão eletromagnético de marca Octave, indicado na Figura 5.10, posicionado imediatamente a montante da válvula.

Posto que os ensaios foram realizados em condição de equilíbrio de vazões líquidas na entrada e na saída, optou-se pela instalação de outra válvula de gaveta imediatamente a jusante do canal de saída, conforme já mencionado, junto a um mangote flexível acoplado ao canal. Esta válvula permitiu regular a vazão defluente e, conseqüentemente, manter constante a profundidade líquida dentro do reservatório.

Assim como no caso dos experimentos realizados no CPH-UFMG, os do LH-IST com água limpa foram filmados utilizando-se uma *webcam* de alta resolução, idêntica à utilizada no laboratório brasileiro, de marca Logitech e modelo C920. A referida câmera foi fixada em um suporte metálico já existente no laboratório, próximo a sua laje de cobertura, distando de cerca de 2,0 m do fundo do reservatório ensaiado. Conforme testes prévios, constatou-se que esta distância era adequada para focalizar toda a área do reservatório. As imagens sequenciais capturadas também foram processadas e convertidas em campos vetoriais de velocidade superficial com auxílio do programa computacional FUDAA-LSPIV. Neste caso, utilizaram-se traçadores plásticos consistindo de pequenos elementos cilíndricos de cor branca, com

cerca de 0,5 cm de altura e com diâmetro da seção em torno de 0,3 cm, introduzidos em toda extensão da parede de montante do reservatório.

Paralelamente, durante cada ensaio foram realizadas medições de velocidades em profundidade com o emprego de uma sonda acústica Doppler do tipo *Vectrino* (*side looking*, isto é, com hastes de medição posicionadas lateralmente ao volume de controle que se desejava medir). Definiram-se três planos de referência, a 30, 50 e 80% da profundidade líquida em relação ao fundo do reservatório para aquisição das velocidades. Tal escolha foi baseada nas seguintes considerações: (1) o plano de referência mais próximo ao fundo do reservatório teve por base uma distância mínima de 0,5 cm até a extremidade inferior da sonda, fixada para a menor das três profundidades líquidas. Caso contrário, as medições mais próximas do fundo seriam afetadas por reflexões do sinal emitidas por aquele; (2) arbitrou-se como conveniente tomar um plano horizontal de referência à meia altura; e (3) estabeleceu-se para o plano horizontal correspondente a 80% da profundidade uma posição vertical que expusesse o mínimo possível as hastes superiores do equipamento de medição à influência atmosférica.

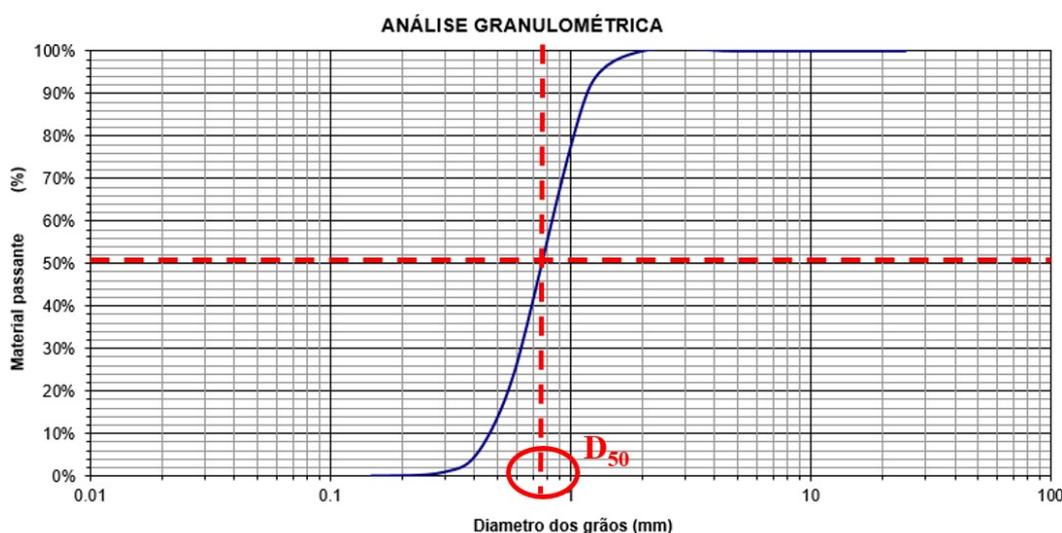
Foram estabelecidas para caracterização das velocidades em profundidade 8 seções transversais dentro do reservatório, espaçadas de 20 cm. Para cada seção, definiram-se 15 verticais de medição. Em cada ponto de aquisição de velocidade, a sonda permaneceu estática por exatos 3 minutos e, durante este período, foram registradas as componentes instantâneas de velocidade u , v e w , respectivamente, ao longo dos eixos x (paralelo), y (transversal) e z (normal ao reservatório ensaiado). Ao todo, foram coletados 18.000 valores instantâneos de velocidade em cada ponto, já que a sonda registrou dados a uma frequência de 100 Hz. Os dados obtidos foram armazenados em um computador utilizado para este fim e todo o sistema foi controlado por meio do programa computacional Conflume, desenvolvido no Instituto Superior Técnico para dar suporte aos ensaios realizados naquele canal.

Ainda com relação à Figura 5.10, mostrada anteriormente, é possível verificar a existência de um sistema para inserção de sedimentos, a montante do reservatório principal, e de um reservatório para retenção desses sedimentos a jusante do mesmo. Os dispositivos em pauta foram explorados durante a realização de experimentos com alimentação sólida. Ao todo, foram realizados 5 ensaios com mistura água-sedimentos, um para cada configuração

geométrica de referência (CC, LL, LC, LR e CR) e todos eles com vazão líquida de 1,00 L/s unicamente, em regime permanente.

No caso destes ensaios, utilizou-se baquelite granular previamente seca em estufa, a fim de evitar sua aglomeração e de permitir a introdução de uma concentração constante de cerca de 3,0 g/L de água do início ao término de cada ensaio. A massa específica dos grãos era de 1,43 g/cm³, conforme atestado no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFMG) – Campus Santa Luzia (Minas Gerais, Brasil). A determinação da massa específica do grão de baquelite foi realizada em conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 6458:2016 e em consonância com o padrão internacional ISO 1183-1:2004, referente à determinação da massa específica de material plástico. Por sua vez, o diâmetro D_{50} de baquelite foi igual a 0,75 mm, conforme indicado na curva granulométrica obtida a partir de uma amostra do material (FIGURA 5.11). Para caracterização do diâmetro D_{50} , utilizou-se também como referência a norma brasileira ABNT NBR 6458:2016. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da UFMG.

FIGURA 5.11 – Curva granulométrica da baquelite utilizada nos experimentos realizados no LH-IST



Antes de ser introduzida no reservatório de ensaios pelo canal de entrada, a baquelite foi misturada à vazão líquida em uma calha misturadora, de modo que o transporte sólido se desse por arrastamento. O controle de injeção de baquelite deu-se a partir da calibração da velocidade de translação de uma esteira distribuidora de sedimentos, mostrada na Figura 5.12, cujo acionamento era vinculado a uma função do programa computacional Conflume.

FIGURA 5.12 – Esteira distribuidora de sedimentos com baquelite (cor preta) utilizada em experimentos do LH-IST



A Figura 5.13, por sua vez, corresponde a uma fotografia do programa Conflume, utilizado em todos os experimentos do LH-IST.

FIGURA 5.13 – Programa computacional Conflume, utilizado nos experimentos do LH-IST



Para atenuação da flutuação provocada pelo jato de água dentro do canal de entrada nos ensaios com sedimentos, utilizou-se uma espessa placa de poliestireno colocada sobre a superfície líquida formada neste canal. Esta placa foi ligeiramente pressionada com auxílio de um calço e de um suporte metálico, a fim de se evitar sua ondulação com o movimento do líquido. Neste caso, os tubos de PVC, citados anteriormente na caracterização dos experimentos com água limpa, foram retirados, já que sua presença afetaria de forma

significativa a qualidade e a representatividade dos resultados com baquelite. Além disso, se estivessem presentes durante tais ensaios, seriam colmatados pela presença de baquelite.

Antes de iniciar cada ensaio com sedimentos (instante $t = 0h$) e durante a realização deste, a cada hora completa, utilizou-se uma sonda do tipo *micro echosounder* para levantamento batimétrico (FIGURA 5.14). Tal sonda permaneceu cerca de 1 cm submersa e deslocou-se em trajetórias longitudinais em zig-zag (percursos alternados de jusante para montante e de montante para jusante) com auxílio de um carro de equipamentos automático controlado pelo programa Conflume.

FIGURA 5.14 – Sonda *micro echosounder* utilizada em experimentos do LH-IST para realização de levantamento batimétrico



Convém destacar que a sonda *micro echosounder* requeria uma distância mínima até o sólido monitorado igual a 7,4 cm. Tendo sido posicionado à distância de 13,5 cm em relação ao fundo do reservatório e a 2,5 cm do respectivo topo, o nível máximo que foi possível mapear foi de 6,1 cm. Apesar desta limitação, a sonda foi utilizada para obter a evolução do contorno da área de sedimentação em cada ensaio e o detalhamento da espessura dos depósitos sólidos até 6,1 cm. Para tal, os levantamentos foram feitos com intervalos de cerca de uma hora. Especificamente para as configurações geométricas LL e LC, utilizou-se também a sonda *micro echosounder* para obtenção do contorno da área de sedimentação para a condição de equilíbrio, isto é, para a morfologia final. Neste caso, o detalhamento da espessura dos depósitos sólidos também se limitou a 6,1 cm.

Além disso, foram selecionados cerca de 10 pontos em cada configuração geométrica ensaiada para medição de velocidades em profundidade, a cada 2 horas, com emprego da sonda *Vectrino* (*side looking*). Muitos desses pontos de medição foram coincidentes com as zonas mortas formadas no reservatório ou estavam posicionados ao longo do jato (alinhado com a abertura do canal de entrada).

Os ensaios duraram cerca de 6 a 9h, dependendo da configuração geométrica, e foram interrompidos após o atingimento do equilíbrio sólido, ou seja, a partir do momento em que a concentração de baquelite recolhida a jusante igualou a concentração de 3,0 g/L injetada a montante. Para tal verificação, calibrou-se o volume sólido, em mililitros, correspondente à concentração estipulada, dada em unidade de massa de baquelite por litro de água, e realizou-se o controle a jusante com auxílio de uma proveta com capacidade de 1 litro. De acordo com a relação massa-volume de baquelite estabelecida através de sucessivas pesagens, a concentração sólida de 3,0 g/L foi atingida em cada experimento quando recolhido a jusante o equivalente ao volume de 50 mililitros de baquelite para cada 10 L de água. A interrupção de cada ensaio correspondeu ao desligamento da bomba para adução de água, à suspensão do fornecimento de sedimento e ao fechamento da válvula a jusante do canal de saída.

No que concerne ao mapeamento da morfologia de fundo para a condição de equilíbrio, referente às configurações CC, LR e CR, drenou-se de forma lenta e cautelosa praticamente toda a água contida no reservatório após o atingimento da condição pretendida de equilíbrio sólido. Para tanto, abriu-se sutilmente a válvula de gaveta a jusante do canal de saída e utilizou-se uma seringa de plástico para retirada da água remanescente. Procurou-se, nesta etapa, não gerar qualquer tipo de alteração expressiva na morfologia final que pudesse prejudicar a sua caracterização. Logo depois, utilizou-se a sonda do tipo Baumer Ultrasonic Sensor UNDK (FIGURA 5.15) que, diferentemente do outro equipamento mencionado, era sensível à presença de água. Com isso, para os três experimentos em questão, foi possível obter efetivamente a morfologia final completa.

FIGURA 5.15 – Sonda Baumer Ultrasonic Sensor UNDK utilizada em experimentos do LH-IST para realização de levantamento topográfico



Para conclusão dos ensaios com mistura água-sedimentos, procurou-se ainda avaliar o padrão de escoamento resultante da alteração morfológica provocada pelo processo de deposição da baquelite. Para tanto, o reservatório foi enchido novamente, de forma cautelosa para não causar significativa deformação na morfologia de fundo obtida após a introdução do sedimento. A condição de equilíbrio das vazões líquidas e o fornecimento de baquelite foram restabelecidos. Utilizaram-se novamente traçadores plásticos introduzidos pelo lado de montante do reservatório e filmaram-se por cerca de 5 minutos os deslocamentos dos traçadores. Para cada configuração geométrica, foram realizadas de 2 a 5 filmagens, a fim de selecionar a condição mais adequada para representar o padrão de escoamento concernente. Em seguida, determinaram-se os campos de velocidade superficial com emprego do programa computacional FUDAA-LSPIV, seguindo o mesmo procedimento dos demais ensaios com traçadores.

5.2 Modelagem numérica

5.2.1 Modelo acadêmico WOLF 2D

O modelo acadêmico WOLF 2D, desenvolvido pela Universidade de Liège (ULg, Bélgica), foi adotado para simulação numérica dos 18 experimentos realizados com água limpa no âmbito do CPH-UFMG, listados na Tabela 5.1. Tal modelo já tinha sido sistematicamente validado para uso em aplicações similares (hidrodinâmica de reservatórios rasos) e outros escoamentos turbulentos complexos, conforme literatura citada anteriormente.

A título de informação, o autor dessa pesquisa realizou um treinamento em julho de 2016 em Liège, na Bélgica, de modo a se familiarizar com o uso do programa computacional. Na ocasião, foram construídas todas as configurações geométricas do modelo numérico.

Para construção da malha característica do reservatório do CPH-UFMG, foram estabelecidos 327 elementos no eixo das abcissas (Δx), paralelos ao eixo longitudinal do reservatório, e 166 elementos no eixo das ordenadas (Δy), perpendicular ao referido eixo longitudinal. A resolução da malha foi igual a 0,0125 m. Para cada ensaio, considerou-se como condição inicial de simulação valores uniformes de nível d'água, equivalentes ao que se esperava medir na seção inicial do canal de saída em condição de equilíbrio para cada regime. No que se refere às condições de contorno, foram introduzidos no programa os valores concernentes à vazão específica, ou seja, por unidade de largura, estabelecida na entrada do reservatório (seção final do canal de entrada) e a profundidade requerida na porção inicial do canal de saída. O intervalo de tempo Δt atribuído em todas as simulações foi igual a 0,1 s.

Ainda com relação à condição de contorno de montante, foram consideradas distribuições ligeiramente modificadas da vazão específica, conforme recomendado por Dewals *et al.* (2008) e Dewals *et al.* (2012). Ou seja, a vazão relativa a cada elemento da malha correspondente ao canal de entrada foi variável. Caso contrário, não haveria possibilidade do ponto de vista numérico de se obter um resultado assimétrico. Por outro lado, a existência desta condição de contorno de montante ligeiramente modificada não impediria que uma simulação convergisse para um resultado simétrico, uma vez que o cálculo atenuaria essa assimetria.

Cabe destacar que, conforme orientação da equipe desenvolvedora do programa computacional WOLF 2D, foi ajustado um coeficiente de Manning nulo para todo o reservatório e para os canais de entrada e de saída. Em uma prévia análise de sensibilidade realizada para uma das configurações testadas, constatou-se que esse parâmetro não interferiu nos padrões de escoamento verificados. Comparou-se, para tanto, os resultados dos ensaios com coeficiente de Manning nulo e com $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

As simulações foram interrompidas assim que foi constatada a ocorrência de regime permanente. Para que esse tipo de verificação possa ser feito, o modelo computacional WOLF 2D dispõe de duas ferramentas: a primeira refere-se à possibilidade de acompanhamento da solução numérica para a velocidade em um dado elemento da malha que apresente velocidades não nulas. A partir do instante em que esse valor visualizado graficamente torna-se constante ou com sutis variações, admite-se que a solução é estável; a outra ferramenta consiste na diferença algébrica dos valores atribuídos às velocidades de cada elemento entre

os dois últimos passos de tempo simulados. Quando as variações de velocidade começam a ser relativamente pequenas, da ordem de 10^{-5} m/s ou ainda menor, considera-se o fator de erro como aceitável para o modelo numérico.

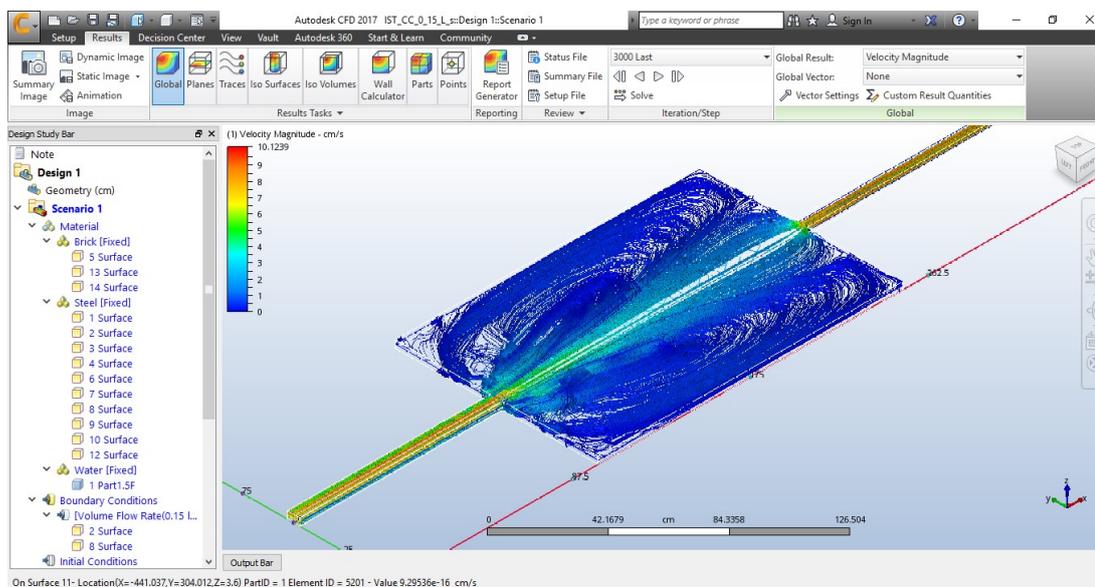
5.2.2 Programa Autodesk® CFD

O programa computacional tridimensional Autodesk® CFD foi utilizado para modelagem numérica de todos os cenários experimentais tratados nesta pesquisa envolvendo água limpa. Isso compreendeu os 18 experimentos brasileiros igualmente simulados com uso do programa WOLF 2D e aqueles executados em Portugal (15 experimentos).

Utilizou-se nesta pesquisa a versão estudantil de 2017, penúltima atualização do programa disponibilizada pela Autodesk. A versão atual, a 2019, não foi adotada devido a dificuldades encontradas com relação à compatibilidade desta com o formato do arquivo do objeto sólido gerado em outro *software*, sobre o qual são apresentadas informações detalhadas a seguir.

A Figura 5.16 corresponde a uma imagem representativa da interface gráfica do programa Autodesk® CFD, indicando, no caso, as linhas de corrente em um dos cenários avaliados numericamente, determinadas à meia profundidade líquida.

FIGURA 5.16 – Interface gráfica do programa computacional Autodesk® CFD para modelagem numérica de escoamentos em reservatórios rasos



Na sequência, são apresentadas as etapas concernentes à construção do objeto de simulação (reservatório e canais de entrada e de saída), inserção das condições inicial e de contorno,

escolha do material de revestimento das paredes e do fundo do reservatório, discretização da malha e ajuste das configurações de simulação.

Inicialmente, construiu-se para cada cenário de simulação um objeto em tamanho real que representasse como condições de contorno o formato do respectivo reservatório retangular e de seus canais de entrada e de saída. A altura de tal objeto correspondeu ao mesmo valor da profundidade líquida de referência para a simulação. Nesta etapa, foi utilizado o programa computacional AutoCAD versão 2017. Em seguida, cada sólido foi exportado separadamente em arquivos do tipo IGES, com extensão .igs, formato compatível com o programa Autodesk® CFD.

A etapa seguinte correspondeu à definição dos materiais representativos de cada superfície do objeto construído no AutoCAD, a partir de ferramenta específica do programa Autodesk® CFD. Para tanto, demandou-se a criação de um novo projeto de simulação, iniciando-se pela importação do arquivo criado no AutoCAD.

No que tange aos 15 experimentos realizados com água limpa no reservatório do LH-IST, considerou-se o fato de este ter sido instalado dentro de um canal com paredes e fundo em alvenaria. Suas paredes de montante e de jusante, assim como os canais de entrada e de saída, foram construídos em aço inoxidável e, por esta razão, procurou-se reproduzir essas condições. Nesse sentido, as superfícies em alvenaria foram representadas pelo material ‘brick’ (bloco cerâmico) com espessura de 0,5 cm, enquanto aquelas em aço inoxidável foram simbolizadas por ‘steel’ (aço), com espessura de 0,2 cm.

Com relação aos ensaios com água limpa referentes ao reservatório do CPH-UFMG, considerou-se que todas as superfícies deste pudessem ser representadas por aço, com espessura de 0,2 cm, já que o reservatório foi construído com chapas metálicas, assim como seus canais de entrada e de saída. Considerou-se também, para todos os cenários simulados com água limpa, que todo o volume dentro do reservatório representava água à temperatura ambiente. Os parâmetros físicos concernentes respeitaram essa condição (massa específica, viscosidade, etc.).

Introduziu-se a vazão de cada cenário como condição de contorno na seção inicial do canal de entrada, assim como na seção final do canal de saída. Quanto à discretização da malha, optou-se pela funcionalidade ‘autosize’ (tamanho ou ajuste automático, em livre tradução do termo

em inglês) para definição dos elementos finitos, os quais foram mais refinados próximo às paredes com auxílio da ferramenta ‘wall layer’ (camada de parede).

Para execução das simulações, levou-se em conta um total de 3000 iterações numéricas, suficientes para o atingimento da condição de regime permanente em testes realizados previamente. Conforme recomendação dos desenvolvedores e de usuários do *software* para aplicações de hidráulica, selecionou-se a opção de esquema de advecção do tipo ADV 5 (Modified Petrov-Galerkin). Considerou-se ainda uma distribuição hidrostática de pressões e um modelo de turbulência do tipo k-épsilon ($k-\varepsilon$), assim como adotado nas simulações bidimensionais com o programa WOLF 2D.

Por fim, com relação à visualização dos resultados, gerou-se um plano horizontal de referência a 50% da profundidade líquida e determinaram-se as linhas de fluxo correspondentes.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Modelagem física

6.1.1 Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no CPH-UFMG

Conforme descrito no capítulo anterior, uma das etapas desta pesquisa para caracterização dos padrões de escoamento em condição de água limpa consistiu na realização de experimentos em reservatório retangular raso construído no CPH-UFMG.

Ao todo, foram realizados 18 experimentos no âmbito do CPH-UFMG, levando-se em conta três diferentes vazões (0,50, 1,25 e 3,40 L/s), em regime permanente, para cada uma das seis configurações geométricas definidas (CC, LC, LL, LR, RC e CR). Para tanto, utilizou-se nesta etapa a técnica do LSPIV e o *software* FUDAA-LSPIV.

A partir do monitoramento da profundidade da água na porção final do canal de entrada, em cada configuração e para cada vazão, pode-se constatar que o regime de escoamento dentro desse canal foi fortemente subcrítico para todos os experimentos, assim como nos estudos de referência citados anteriormente. Com efeito, a Tabela 6.1 apresenta os parâmetros correlatos à determinação do número de Froude, que resultou em valores entre 0,09 e 0,12.

Para determinação do regime de escoamento, calculou-se o número de Reynolds para cada cenário experimental. Este parâmetro foi determinado a partir da equação $Re = U.R_h/\nu$, com U correspondendo à velocidade média na seção transversal, R_h ao raio hidráulico e ν à viscosidade cinemática da água. Classificou-se o regime de escoamento como laminar para $Re < 500$, escoamento de transição para Re entre 500 e 1000 e turbulento para $Re > 1000$. De acordo com a Tabela 6.2, é possível observar que todos os experimentos foram turbulentos com valores de Reynolds oscilando entre 2100 e 2500 para a vazão de 0,50 L/s, entre 3800 e 4100, aproximadamente, para a vazão de 1,25 L/s, e entre 6300 e 7000 para a vazão de 3,40 L/s. Admite-se em qualquer caso que a turbulência é incipiente, posto que os valores do número de Reynolds são relativamente pequenos. Os valores referiram-se, novamente, ao regime de escoamento verificado dentro do canal de entrada.

TABELA 6.1 – Parâmetros hidráulicos dos ensaios com água limpa do CPH-UFMG para definição do regime de escoamento a partir do número de Froude (calculados em uma seção do canal de entrada)

Configuração	Vazão Q (L/s)	Largura b (m)	Profundidade líquida h_{mont} (m)	Área molhada $A_{molhada}$ (m ²)	Velocidade média U (m/s)	Número de Froude Fr	Regime de escoamento
CC	0,50	0,125	0,055	0,007	0,07	0,10	SUBCRÍTICO
	1,25		0,105	0,013	0,10	0,09	SUBCRÍTICO
	3,40		0,205	0,026	0,13	0,09	SUBCRÍTICO
LC	0,50	0,125	0,051	0,006	0,08	0,11	SUBCRÍTICO
	1,25		0,100	0,013	0,10	0,10	SUBCRÍTICO
	3,40		0,201	0,025	0,14	0,10	SUBCRÍTICO
LL	0,50	0,125	0,048	0,006	0,08	0,12	SUBCRÍTICO
	1,25		0,103	0,013	0,10	0,10	SUBCRÍTICO
	3,40		0,198	0,025	0,14	0,10	SUBCRÍTICO
LR	0,50	0,125	0,053	0,007	0,08	0,11	SUBCRÍTICO
	1,25		0,103	0,013	0,10	0,10	SUBCRÍTICO
	3,40		0,208	0,026	0,13	0,09	SUBCRÍTICO
RC	0,50	0,125	0,057	0,007	0,07	0,09	SUBCRÍTICO
	1,25		0,107	0,013	0,09	0,09	SUBCRÍTICO
	3,40		0,207	0,026	0,13	0,09	SUBCRÍTICO
CR	0,50	0,125	0,057	0,007	0,07	0,09	SUBCRÍTICO
	1,25		0,107	0,013	0,09	0,09	SUBCRÍTICO
	3,40		0,207	0,026	0,13	0,09	SUBCRÍTICO

TABELA 6.2 – Parâmetros hidráulicos dos ensaios com água limpa do CPH-UFMG para definição do regime de escoamento a partir do número de Reynolds (calculados em uma seção do canal de entrada)

Configuração	Vazão Q (L/s)	Largura b (m)	Profundidade líquida h_{mont} (m)	Área molhada $A_{molhada}$ (m ²)	Perímetro molhado $P_{molhado}$ (m)	Raio hidráulico R_h (m)	Velocidade média U (m/s)	Temperatura da água $T_{água}$ (°C)	Massa específica da água ρ (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica da água μ (N.s/m ²)	Número de Reynolds Re	Regime de escoamento
CC	0,50	0,125	0,055	0,007	0,24	0,03	0,07	24,7	997,2	0,00090	2365	TURBULENTO
	1,25		0,105	0,013	0,34	0,04	0,10	24,2	997,3	0,00091	4093	TURBULENTO
	3,40		0,205	0,026	0,54	0,05	0,13	24,5	997,2	0,00090	7026	TURBULENTO
LC	0,50	0,125	0,051	0,006	0,23	0,03	0,08	22,9	997,6	0,00094	2337	TURBULENTO
	1,25		0,100	0,013	0,33	0,04	0,10	23,1	997,6	0,00094	4101	TURBULENTO
	3,40		0,201	0,025	0,53	0,05	0,14	22,6	997,7	0,00095	6793	TURBULENTO
LL	0,50	0,125	0,048	0,006	0,22	0,03	0,08	24,2	997,3	0,00091	2482	TURBULENTO
	1,25		0,103	0,013	0,33	0,04	0,10	23,1	997,6	0,00094	4027	TURBULENTO
	3,40		0,198	0,025	0,52	0,05	0,14	22,3	997,7	0,00095	6819	TURBULENTO
LR	0,50	0,125	0,053	0,007	0,23	0,03	0,08	23,0	997,6	0,00094	2302	TURBULENTO
	1,25		0,103	0,013	0,33	0,04	0,10	22,7	997,6	0,00095	3986	TURBULENTO
	3,40		0,208	0,026	0,54	0,05	0,13	22,7	997,6	0,00095	6633	TURBULENTO
RC	0,50	0,125	0,057	0,007	0,24	0,03	0,07	22,1	997,8	0,00096	2175	TURBULENTO
	1,25		0,107	0,013	0,34	0,04	0,09	21,7	997,9	0,00097	3796	TURBULENTO
	3,40		0,207	0,026	0,54	0,05	0,13	20,8	998,1	0,00099	6354	TURBULENTO
CR	0,50	0,125	0,057	0,007	0,24	0,03	0,07	22,9	997,6	0,00094	2219	TURBULENTO
	1,25		0,107	0,013	0,34	0,04	0,09	22,3	997,7	0,00095	3853	TURBULENTO
	3,40		0,207	0,026	0,54	0,05	0,13	20,5	998,1	0,00100	6309	TURBULENTO

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos pela técnica do LSPIV (Figura 6.1) atinentes às seis configurações geométricas avaliadas (CC, LC, LL, LR, RC e CR) e para as três vazões consideradas (0,50 L/s, 1,25 L/s e 3,40 L/s). Para facilitar a comparação e a interpretação dos padrões de escoamento correspondentes a cada experimento realizado no CPH-UFMG, optou-se por exibir os resultados de forma matricial, em função da configuração geométrica e da vazão. Adicionaram-se setas para indicar o deslocamento do jato pelo reservatório, assim como para ilustrar o sentido de rotação dos vórtices que puderam ser reproduzidos com o auxílio do programa computacional FUDAA-LSPIV.

É importante salientar que serão observadas duas limitações inevitáveis nos resultados relativos ao CPH-UFMG, quais sejam: (1) os vetores das velocidades superficiais não puderam ser determinados numa estreita faixa próxima às paredes laterais, de montante e de jusante, isto é, em todo o perímetro do reservatório, devido à restrição do próprio *software*; e (2) houve uma indicação indevida da direção de alguns vetores em torno projeção das duas barras transversais existentes no reservatório do CPH-UFMG e mencionadas no Capítulo 5.

Ainda com relação à Figura 6.1, nota-se a existência de escalas de cores na representação dos vetores de velocidade superficial de cada experimento. Tal escala corresponde a intervalos de valores das velocidades obtidas em cada caso. De forma geral, a cor vermelha foi associada às menores velocidades, seguida pelas cores laranja (quando existente), amarela, verde e azul, a última indicativa das maiores velocidades do reservatório. O Apêndice V apresenta as escalas de cores para cada ensaio realizado no CPH-UFMG, complementarmente à informação disposta na Figura 6.1.

FIGURA 6.1 – Campos de velocidade superficial referentes aos experimentos com água limpa do CPH-UFMG

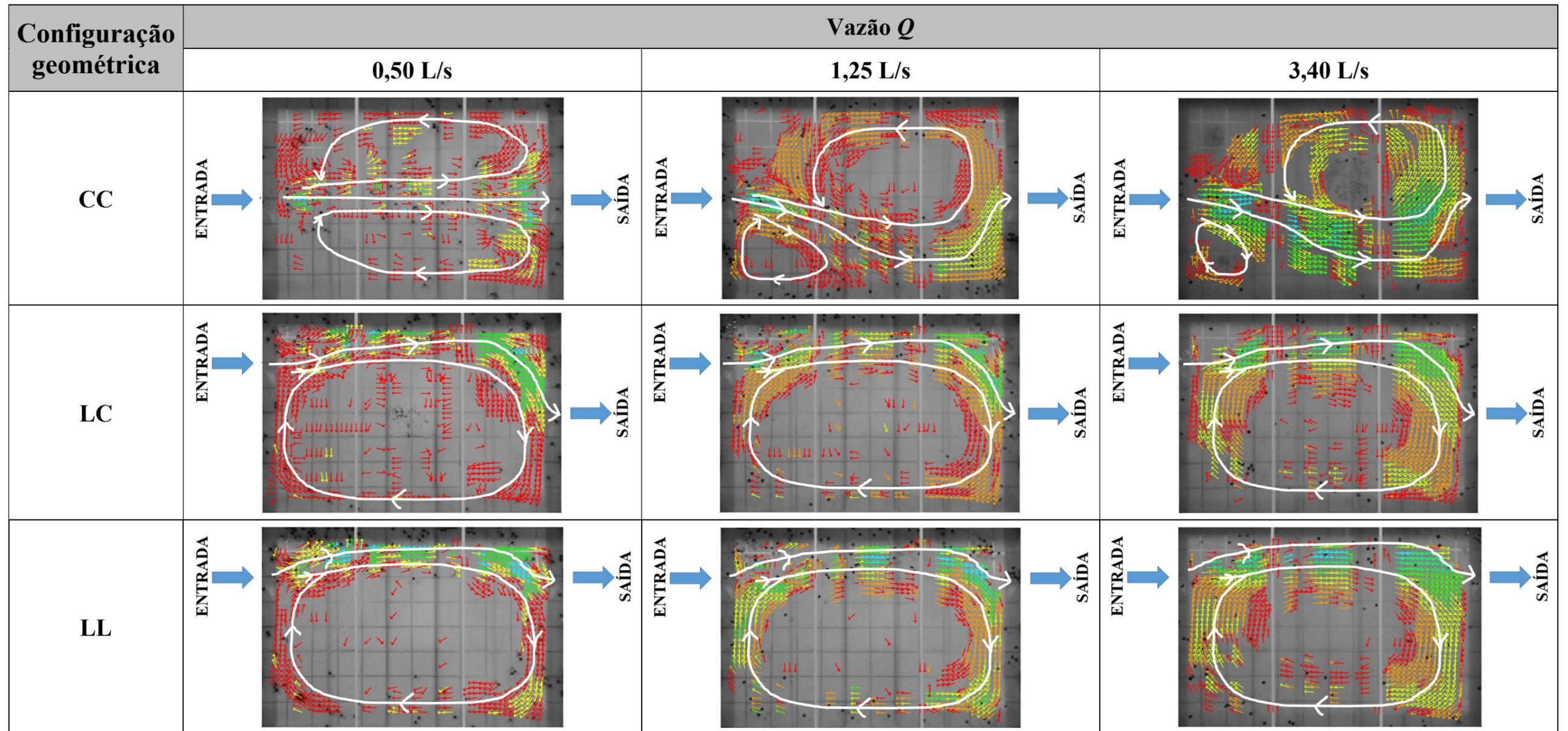
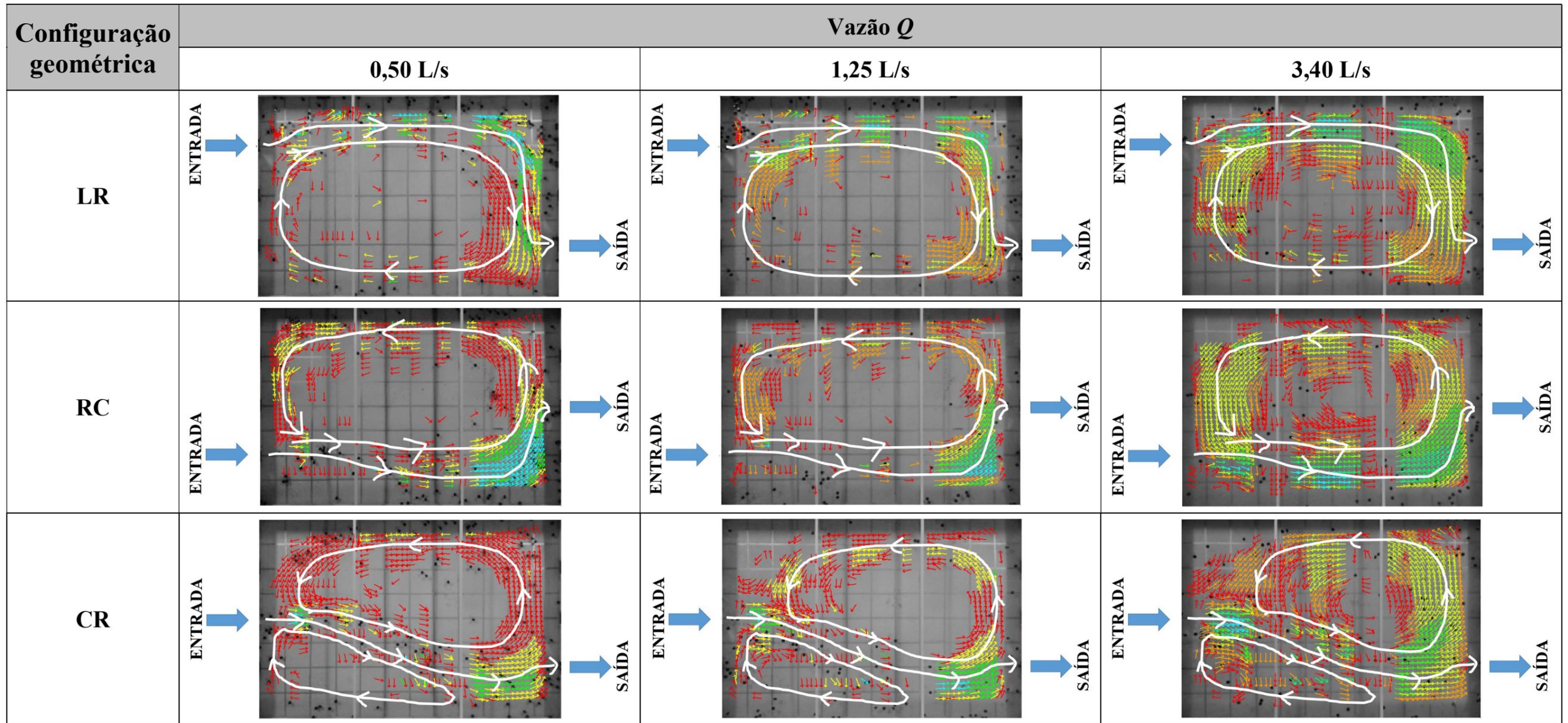


FIGURA 6.1 – Campos de velocidade superficial referentes aos experimentos com água limpa do CPH-UFMG (continuação)



Com o intuito de tornar mais objetiva a análise comparativa dos resultados dos 18 experimentos realizados com água limpa no CPH-UFMG, mostrados na Figura 6.1, resumem-se algumas das características mais notáveis de cada um deles no Quadro 6.1. Definiram-se como parâmetros básicos de comparação os seguintes aspectos: padrão de escoamento observado, sentido de desvio do jato e sentido de rotação do vórtice maior.

É importante salientar que, em algumas das configurações avaliadas, observou-se a formação de mais de um vórtice, o que justifica a designação de ‘vórtice maior’ a que se refere o Quadro 6.1. Isso ocorreu para as vazões de 1,25 e 3,40 L/s da configuração CC (pequeno vórtice formado à direita do jato, na porção de montante do reservatório) e para as três vazões da configuração CR (vórtice de médio porte formado também do lado direito do reservatório). Já para a vazão de 0,50 L/s da configuração CC, observou-se a formação de dois vórtices de mesmo tamanho e com sentidos de rotação contrários. Por esta razão, não há qualquer identificação deste aspecto no Quadro 6.1 para o experimento em questão, visto que não há predominância de um dos vórtices.

QUADRO 6.1 – Principais aspectos observados experimentalmente nos ensaios com água limpa do CPH-UFMG

Configuração	Vazão (L/s)	Padrão de escoamento	Desvio do jato	Sentido de rotação do vórtice maior
CC	0,50	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente	-
	1,25	ASSIMÉTRICO (A1)	Direita	Anti-horário
	3,40	ASSIMÉTRICO (A1)	Direita	Anti-horário
LC	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
LL	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
LR	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
RC	0,50	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário
	1,25	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário
	3,40	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário
CR	0,50	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário
	1,25	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário
	3,40	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário

Relativo ao padrão de escoamento característico de cada experimento, verificou-se a condição de simetria hidrodinâmica apenas para a vazão de 0,50 L/s da configuração geométrica CC. Por outro lado, no que se refere às demais vazões testadas para a mesma configuração, o padrão de escoamento foi assimétrico. Observou-se também a ocorrência de assimetria hidrodinâmica em todos os demais experimentos realizados (configurações LC, LL, LR, RC e CR), independentemente da vazão ajustada e da posição dos canais de entrada e de saída. Quanto à última consideração, já era previsível que seriam observados padrões de escoamento assimétricos, tendo em vista que as configurações em pauta também eram assimétricas do ponto de vista geométrico.

Ainda no que concerne aos padrões de escoamento observados no CPH-UFGM, a relação $L/\Delta B$ (comprimento adimensional) referente ao reservatório utilizado nesta pesquisa, aplicável unicamente à configuração CC, resultou em 3,20. O valor em questão advém do quociente entre o comprimento do reservatório L (3,0 m) e a largura de expansão lateral ΔB (0,9375 m). Cabe reiterar que o parâmetro ΔB foi definido apenas para as configurações simétricas, como é o caso do tipo CC.

Conforme apontado nos estudos de Dufresne *et al.* (2010b), para comprimentos $L/\Delta B$ inferiores a 5,14, seria esperada a formação de um jato direcionado do canal de entrada para o de saída do reservatório, com duas recirculações simétricas em ambos os lados do jato (padrão de escoamento S0). Ainda segundo a referência, para a relação $L/\Delta B$ igual a 5,71, o padrão de escoamento seria caracterizado como ‘de transição’ (A1/S0) e como assimétrico para $L/\Delta B$ igual a 6,29. Em todos os experimentos dos autores em pauta, o número de Froude foi constante e igual a 0,20 (regime de escoamento subcrítico) e o escoamento foi ainda classificado como turbulento (com número de Reynolds igual a 23.240, calculado por meio da equação $Re = U.R_h/\nu$, com $U = 0,28$ m/s, $R_h = 0,083$ m). Ambos os parâmetros da referência consultada também foram determinados dentro do canal de entrada. Confrontando-se as observações experimentais da presente pesquisa com as ponderações do citado estudo, notou-se haver uma incongruência com os resultados obtidos para as vazões de 1,25 e 3,40 L/s, cujos padrões de escoamento foram assimétricos e correspondentes ao padrão A1. Dufresne *et al.* (2010b) restringiram a análise em questão a parâmetros estritamente geométricos (ou parâmetros de forma) e não a validaram para diferentes condições hidráulicas, conforme pontuado no Capítulo 4 (subitem 4.4.2.2). É conveniente destacar que o número de Reynolds nos ensaios de Dufresne *et al.* (2010b) foi muito maior do que os valores encontrados no

CPH-UFMG. No último caso, os níveis de turbulência estariam relativamente próximos aos de um escoamento laminar, podendo eventualmente haver algum efeito de escala de natureza viscosa.

Em contrapartida, os resultados dos experimentos realizados por Kantoush (2008) foram coerentes com o que foi observado no âmbito do CPH-UFMG, sendo comparável apenas a vazão de 1,25 L/s. Ressalte-se que aquele autor não avaliou vazões equivalentes às de 0,50 e 3,40 L/s, tratadas nesta pesquisa. É pertinente reiterar que o aparato experimental do CPH-UFMG correspondeu à escala 1:2 do reservatório de Kantoush (2008), por questões de conveniência na comparação de resultados. Ademais, a vazão de 1,25 L/s empregada nesta pesquisa corresponde à de 7,00 L/s daquele estudo, nos termos da semelhança de Froude. Segundo a referência consultada, observou-se a formação de um padrão de escoamento assimétrico caracterizado pela existência de um grande vórtice formado a partir do desvio do jato e de pequenos vórtices em sentido oposto ao vórtice maior nas laterais de montante do reservatório. No que se refere aos ensaios de Kantoush (2008), os números de Reynolds foram muito mais elevados, entre 42.000 e 52.000. Apesar da semelhança hidrodinâmica, os resultados obtidos no CPH-UFMG são presumivelmente mais afetados pelos efeitos da viscosidade.

Conforme previamente retratado, de acordo com Shapira, Degani e Weihs (1990) e Dewals *et al.* (2008), o desvio do jato é resultado do aumento da velocidade em um de seus lados, aquele que estiver mais próximo a uma parede lateral. Por conta disso, há uma consequente diminuição da pressão local, amplificação da deflexão do escoamento e assimetria hidrodinâmica. Tal comportamento refere-se ao chamado efeito Coanda, razão para a instabilidade observada no escoamento.

De forma sucinta, os experimentos realizados com água limpa no CPH-UFMG permitiram identificar dois comportamentos hidrodinâmicos característicos, conforme análise do Quadro 6.1: (1) quando o canal de entrada foi posicionado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório (posição L), o desvio do jato foi sempre para a esquerda e o vórtice maior formou-se em sentido horário, independentemente da vazão e do posicionamento do canal de saída; (2) quando o canal de entrada foi instalado na posição central ou à direita do eixo longitudinal do reservatório (posições C e R), o desvio do jato ocorreu em direção à parede lateral direita, exceto para a vazão de 0,50 L/s da configuração CC.

Não se conhece uma explicação evidente para o fato de que o jato tenha tido “preferência” pelo lado direito do reservatório para a configuração geométrica CC. Com efeito, não foi encontrada na literatura qualquer esclarecimento acerca da relatada tendência de desvio do jato, embora outros autores, tais como Kantoush (2008) e Dufresne *et al.* (2010a,b), tenham registrado comportamento similar ao dos experimentos do CPH-UFMG.

Com o intuito de se investigar precisamente a partir de qual vazão o padrão de escoamento referente à configuração geométrica CC alterar-se-ia de simétrico a assimétrico, realizaram-se três ensaios complementares. Nesse sentido, fez-se variar a vazão em uma faixa de valores entre 0,50 e 1,25 L/s, a partir de 0,80 L/s, conforme mostrado na Tabela 6.3, sem, contudo, alterar a altura da soleira instalada na seção final do canal de saída. Ou seja, tentou-se avaliar a sensibilidade da vazão afluyente sobre o padrão de escoamento, apesar da pequena variação da profundidade no reservatório provocada naturalmente pela variação da vazão.

TABELA 6.3 – Ensaios complementares referentes à configuração geométrica CC para vazões entre 0,80 e 1,25 L/s

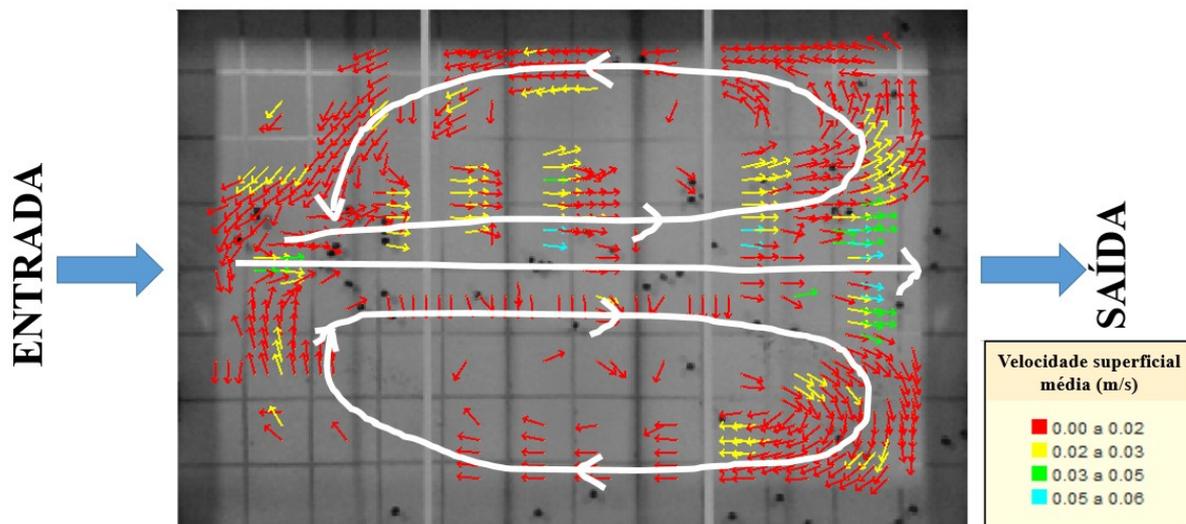
Vazão Q	Profundidade H	Número de Froude (Fr)		Número de Reynolds (Re)	
		Valor	Regime	Valor	Regime
0,80	0,059	0,14	SUBCRÍTICO	3659	TURBULENTO
1,00	0,063	0,16	SUBCRÍTICO	4428	TURBULENTO
1,25	0,066	0,19	SUBCRÍTICO	5406	TURBULENTO

De acordo com a interpretação da Tabela 6.3, o escoamento no canal de entrada caracterizou-se como subcrítico (números de Froude entre 0,14 e 0,19) e turbulento (números de Reynolds entre 3659 e 5406).

Tendo como objetivo tornar a análise acerca dos padrões de escoamento mais fundamentada para esses três cenários, os respectivos experimentos foram filmados. As Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 correspondem, respectivamente, às vazões de 0,80, 1,00 e 1,25 L/s. Cabe ressaltar que o experimento realizado para a vazão mais elevada diferiu do da Figura 6.1. Enquanto o da Figura 6.1 correspondeu à profundidade de 0,105 m, aquele foi realizado com 0,066 m de altura d’água.

Para avaliação da vazão a partir da qual o padrão de escoamento tornar-se-ia assimétrico, adotou-se como referência o padrão de escoamento indicado na Figura 6.1 para a vazão de 0,50 L/s. Naquele caso, constatou-se que o padrão de escoamento foi simétrico, com a existência de um jato retilíneo e alinhado com o eixo longitudinal do reservatório e de dois grandes vórtices com sentidos de rotação contrários, um em sentido anti-horário do lado esquerdo e outro, horário e à direita desse jato.

FIGURA 6.2 – Campos de velocidades superficiais para $Q = 0,80$ L/s (configuração CC)



A apreciação da Figura 6.2 permitiu constatar que o padrão de escoamento foi relativamente simétrico, mesmo para a vazão de 0,80 L/s. As únicas diferenças perceptíveis com relação ao padrão de escoamento consistiram em ligeiro aumento da velocidade superficial máxima (de 0,05 para 0,06 m/s) com incremento da vazão e um sutil encurtamento, segundo o eixo longitudinal, dos dois vórtices próximo à porção de montante do reservatório.

Quanto à vazão de 1,00 L/s, conforme análise da Figura 6.3, verificou-se que o vórtice formado à esquerda do jato foi bastante similar ao correspondente para a vazão de 0,80 L/s. Por outro lado, o vórtice à direita do jato não pode ser identificado pelo programa computacional. Possivelmente, pelo que se observou no laboratório, esta deve ter sido uma vazão de transição entre os dois padrões de escoamento, simétrico para assimétrico.

Finalmente, verificou-se na Figura 6.4 que o padrão de escoamento tornou-se assimétrico com aumento da vazão para 1,25 L/s, com desvio do jato para o lado direito. Além disso, notou-se a conseqüente formação de um grande vórtice em sentido anti-horário e de dois vórtices de menor tamanho, um de cada lado do jato e localizados na porção de montante do reservatório.

FIGURA 6.3 – Campos de velocidades superficiais para $Q = 1,00$ L/s (configuração CC)

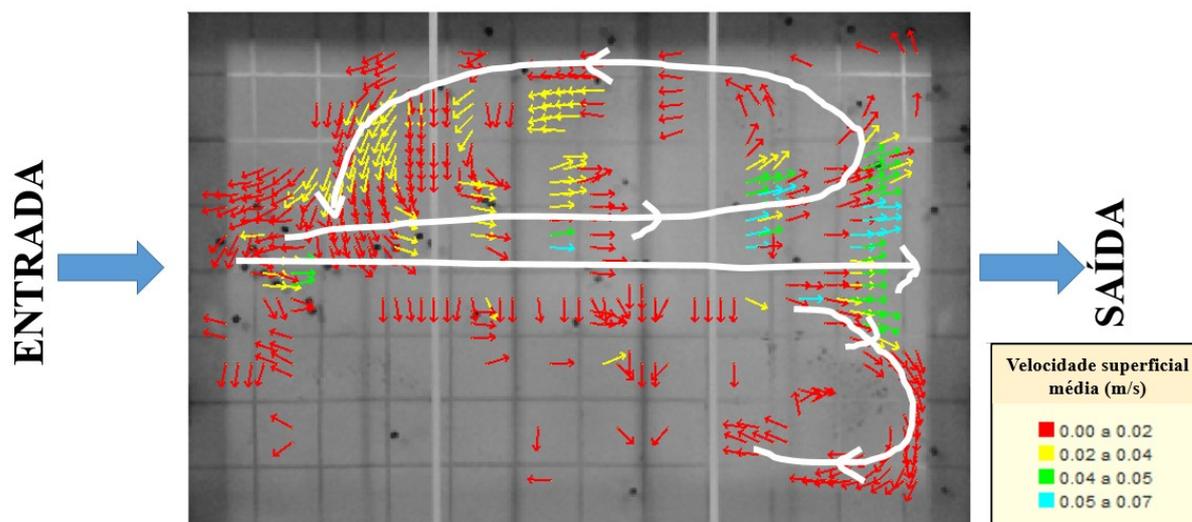
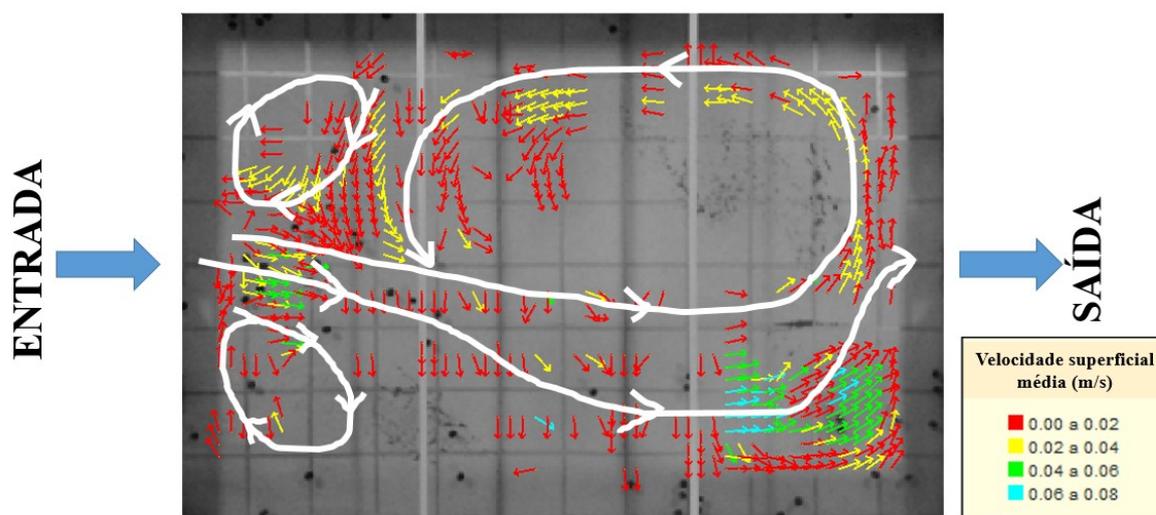


FIGURA 6.4 – Campos de velocidades superficiais para $Q = 1,25$ L/s (configuração CC)



Portanto, concluiu-se que a mudança do padrão de escoamento de simétrico para assimétrico, no que se refere à configuração geométrica CC, ocorreu para vazão entre 1,00 e 1,25 L/s, associada à profundidade líquida em torno de 6 cm. Cabe salientar, neste caso, que a assimetria em questão referiu-se a um número de Froude mais elevado que nos demais casos ($Fr = 0,19$, contra $Fr = 0,14$ e $Fr = 0,16$ para as vazões de 0,80 e 1,00 L/s, respectivamente), conforme mostrado na Tabela 6.3.

De acordo com o estudo de Camnasio, Orsi e Schleiss (2011), o padrão de escoamento seria assimétrico quando o chamado fator de forma (SF , calculado a partir da Equação 4.2) fosse superior a 6,80. A referida equação, aplicável somente à configuração geometricamente

simétrica CC, envolve apenas fatores geométricos, isto é, o comprimento do reservatório L , o parâmetro de expansão lateral ΔB e a largura do canal de entrada b . Para o reservatório do CPH-UFGM, o fator de forma SF foi igual a 7,16 e, por esta razão, o padrão de escoamento seria classificado como assimétrico. No estudo de Kantoush (2008), cujo fator de forma SF foi também igual a 7,16, observou-se padrão de escoamento assimétrico para $Fr = 0,10$, para vazão compatível à de 1,25 L/s dos ensaios do CPH-UFGM. Já no último caso, tal assimetria hidrodinâmica foi observada tanto para $Fr = 0,09$ (FIGURA 6.1) quanto para $Fr = 0,19$ (FIGURA 6.4). Logo, a mudança do padrão de escoamento simétrico para assimétrico estaria condicionada à diminuição da influência das forças viscosas com aumento da vazão e, conseqüentemente, do número de Reynolds. De qualquer forma, é aconselhável que esta hipótese seja ratificada em estudos futuros por meio da realização de novos experimentos para a configuração CC com vazões variáveis e, conseqüentemente, como números de Reynolds distintos, preferencialmente com valores próximos aos considerados nesta investigação científica.

6.1.2 Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no LH-IST

No que se refere à caracterização dos padrões de escoamento observados nos experimentos com água limpa do LH-IST, utilizaram-se diferentes técnicas para tal fim, conforme detalhado a seguir.

A primeira técnica a ser abordada baseou-se na filmagem do escoamento com uso de traçadores injetados na água e posterior conversão de fotos subsequentes recuperadas dessas filmagens em campos de velocidade superficial, tal como foi feito no âmbito dos ensaios do CPH-UFGM.

Foram gerados os campos de velocidade superficial em toda a área do reservatório para os 15 experimentos realizados com água limpa (configurações geométricas CC, LC, LL, LR e CR e suas vazões de 0,15 L/s, 0,37 L/s e 1,00 L/s).

Os principais parâmetros hidráulicos característicos que viabilizaram a determinação dos números de Froude e de Reynolds, assim como a classificação do regime de escoamento correspondente no canal de entrada, são apresentados, respectivamente, na Tabela 6.4 e na Tabela 6.5.

Não se tendo medido a temperatura da água, consideraram-se a temperatura de 20°C e os valores correspondentes da massa específica e da viscosidade dinâmica.

De acordo com a análise da Tabela 6.4, constatou-se que o regime de escoamento também foi fortemente subcrítico em todos os experimentos com água limpa realizados no LH-IST, assim como no caso dos experimentos realizados no Brasil. Com efeito, os valores do número de Froude concentraram-se no intervalo entre 0,09 e 0,11, praticamente idênticos aos dos ensaios do CPH-UFMG, o que decorre das relações de semelhança de Chauvin (1962).

Ademais, segundo a Tabela 6.5, concernente à determinação do número de Reynolds, verificou-se que o escoamento foi turbulento para todos os casos ensaiados em laboratório. Os valores de Reynolds foram de 1102 para a vazão de 0,15 L/s, de 1788 para a vazão de 0,37 L/s e de 2836 para a vazão de 1,00 L/s. Assim como para o reservatório do CPH-UFMG, o número de Reynolds foi determinado a partir da equação $Re = U.R_h/\nu$, com U correspondendo à velocidade média na seção transversal, R_h ao raio hidráulico e ν à viscosidade cinemática da água. O regime de escoamento foi classificado como laminar para $Re < 500$, escoamento de transição para Re entre 500 e 1000 e turbulento para $Re > 1000$.

Esses valores foram naturalmente inferiores aos correspondentes do CPH-UFMG, posto que os raios hidráulicos e as vazões do LH-IST foram menores. Por esta razão, os efeitos da viscosidade são ainda mais significativos no caso do reservatório português, apesar dos escoamentos serem teoricamente classificados como turbulentos.

No caso do reservatório de Kantoush (2008), cujas dimensões horizontais foram 4 vezes maiores que as do reservatório do LH-IST, obtiveram-se números de Reynolds aproximadamente iguais a 10800 (escoamento turbulento) para vazão comparável à de 0,37 L/s dos experimentos realizados em Portugal. Utilizou-se para o caso de Kantoush (2008) a mesma fórmula citada acima para determinação do número de Reynolds. Admitindo um reservatório em dimensão natural, tal como o protótipo de referência de Kantoush (2008), 50 vezes maior que seu modelo, isto é, com largura igual a 200 m e comprimento de 300 m, o número de Reynolds correspondente seria cerca de 3.800.000, ou seja, fortemente turbulento e presumidamente menos suscetível à influência das forças viscosas.

Apesar de estar associada a números de Reynolds menores, de acordo com a Tabela 6.5 e, por esta razão, ser supostamente mais dependente dos efeitos viscosos, verificou-se para a

configuração geométrica CC do LH-IST que o padrão de escoamento também foi assimétrico para a vazão de 0,37 L/s, como será discutido mais adiante com base na Figura 6.5. Neste caso, tem-se como referência de comparação a vazão de 1,25 L/s do reservatório do CPH-UFMG (subitem 6.1.1) e a de 7,0 L/s do reservatório de Kantoush (2008).

TABELA 6.4 – Parâmetros hidráulicos dos ensaios com água limpa do LH-IST para definição do regime de escoamento a partir do número de Froude (calculados em uma seção do canal de entrada)

Configuração	Vazão Q (L/s)	Largura b (m)	Profundidade líquida h_{mont} (m)	Área molhada $A_{molhada}$ (m ²)	Velocidade média U (m/s)	Número de Froude Fr	Regime de escoamento
CC	0,15	0,063	0,036	0,002	0,07	0,11	SUBCRÍTICO
	0,37		0,071	0,004	0,08	0,10	SUBCRÍTICO
	1,00		0,143	0,009	0,11	0,09	SUBCRÍTICO
LC	0,15	0,063	0,036	0,002	0,07	0,11	SUBCRÍTICO
	0,37		0,071	0,004	0,08	0,10	SUBCRÍTICO
	1,00		0,143	0,009	0,11	0,09	SUBCRÍTICO
LL	0,15	0,063	0,036	0,002	0,07	0,11	SUBCRÍTICO
	0,37		0,071	0,004	0,08	0,10	SUBCRÍTICO
	1,00		0,143	0,009	0,11	0,09	SUBCRÍTICO
LR	0,15	0,063	0,036	0,002	0,07	0,11	SUBCRÍTICO
	0,37		0,071	0,004	0,08	0,10	SUBCRÍTICO
	1,00		0,143	0,009	0,11	0,09	SUBCRÍTICO
CR	0,15	0,063	0,036	0,002	0,07	0,11	SUBCRÍTICO
	0,37		0,071	0,004	0,08	0,10	SUBCRÍTICO
	1,00		0,143	0,009	0,11	0,09	SUBCRÍTICO

TABELA 6.5 – Parâmetros hidráulicos dos ensaios com água limpa do LH-IST para definição do regime de escoamento a partir do número de Reynolds (calculados em uma seção do canal de entrada)

Configuração	Vazão Q (L/s)	Largura b (m)	Profundidade líquida h_{mont} (m)	Área molhada $A_{molhada}$ (m ²)	Perímetro molhado $P_{molhado}$ (m)	Raio hidráulico R_h (m)	Velocidade média U (m/s)	Temperatura da água $T_{água}$ (°C)	Massa específica da água ρ (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica da água μ (N.s/m ²)	Número de Reynolds Re	Regime de escoamento
CC	0,15	0,063	0,036	0,002	0,135	0,017	0,07	20,0	998,2	0,00101	1102	TURBULENTO
	0,37		0,071	0,004	0,205	0,022	0,08	20,0	998,2	0,00101	1788	TURBULENTO
	1,00		0,143	0,009	0,349	0,026	0,11	20,0	998,2	0,00101	2836	TURBULENTO
LC	0,15	0,063	0,036	0,002	0,135	0,017	0,07	20,0	998,2	0,00101	1102	TURBULENTO
	0,37		0,071	0,004	0,205	0,022	0,08	20,0	998,2	0,00101	1788	TURBULENTO
	1,00		0,143	0,009	0,349	0,026	0,11	20,0	998,2	0,00101	2836	TURBULENTO
LL	0,15	0,063	0,036	0,002	0,135	0,017	0,07	20,0	998,2	0,00101	1102	TURBULENTO
	0,37		0,071	0,004	0,205	0,022	0,08	20,0	998,2	0,00101	1788	TURBULENTO
	1,00		0,143	0,009	0,349	0,026	0,11	20,0	998,2	0,00101	2836	TURBULENTO
LR	0,15	0,063	0,036	0,002	0,135	0,017	0,07	20,0	998,2	0,00101	1102	TURBULENTO
	0,37		0,071	0,004	0,205	0,022	0,08	20,0	998,2	0,00101	1788	TURBULENTO
	1,00		0,143	0,009	0,349	0,026	0,11	20,0	998,2	0,00101	2836	TURBULENTO
CR	0,15	0,063	0,036	0,002	0,135	0,017	0,07	20,0	998,2	0,00101	1102	TURBULENTO
	0,37		0,071	0,004	0,205	0,022	0,08	20,0	998,2	0,00101	1788	TURBULENTO
	1,00		0,143	0,009	0,349	0,026	0,11	20,0	998,2	0,00101	2836	TURBULENTO

Os resultados concernentes à aplicação da técnica do LSPIV, especificamente os campos de velocidade superficial, são apresentados na Figura 6.5, dispostos matricialmente em função das configurações geométricas e das vazões de referência dos experimentos. Novamente, foram incorporadas às imagens setas representativas da trajetória desenvolvida pelo jato e do sentido de rotação dos vórtices que puderam ser identificados.

De forma análoga aos resultados relativos ao reservatório brasileiro, compilaram-se no Quadro 6.2 os aspectos utilizados para caracterização do comportamento hidrodinâmico dos experimentos do LH-IST.

QUADRO 6.2 – Principais aspectos observados experimentalmente nos ensaios com água limpa do LH-IST

Configuração	Vazão (L/s)	Padrão de escoamento	Desvio do jato	Sentido de rotação do vórtice maior
CC	0,15	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente	-
	0,37	ASSIMÉTRICO (A1)	Esquerda	Horário
	1,00	ASSIMÉTRICO (A1)	Esquerda	Horário
LC	0,15	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	0,37	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,00	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
LL	0,15	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	0,37	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,00	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
LR	0,15	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	0,37	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,00	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
CR	0,15	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	0,37	ASSIMÉTRICO	Esquerda	Horário
	1,00	ASSIMÉTRICO	Direita	Anti-horário

A análise conjunta do Quadro 6.2 com a Figura 6.5 possibilitaram observar, no que tange à configuração geométrica CC, que houve simetria hidrodinâmica, do ponto de vista experimental, apenas para a vazão de 0,15 L/s. Neste caso, o jato atravessou toda a área do reservatório em trajetória retilínea, alinhada com os canais de entrada e de saída. Verificou-se também a formação de dois vórtices de dimensões similares, um à esquerda do jato, com sentido de rotação anti-horário, e outro do lado direito, com sentido horário. Esse comportamento hidrodinâmico correspondeu ao padrão S0 definido por Dufresne *et al.* (2010b), característico de razões $L/\Delta B$ inferiores a 5,14. No âmbito do LH-IST, $L/\Delta B$ foi igual a 3,20.

FIGURA 6.5 – Campos de velocidade superficial referentes aos experimentos com água limpa do LH-IST

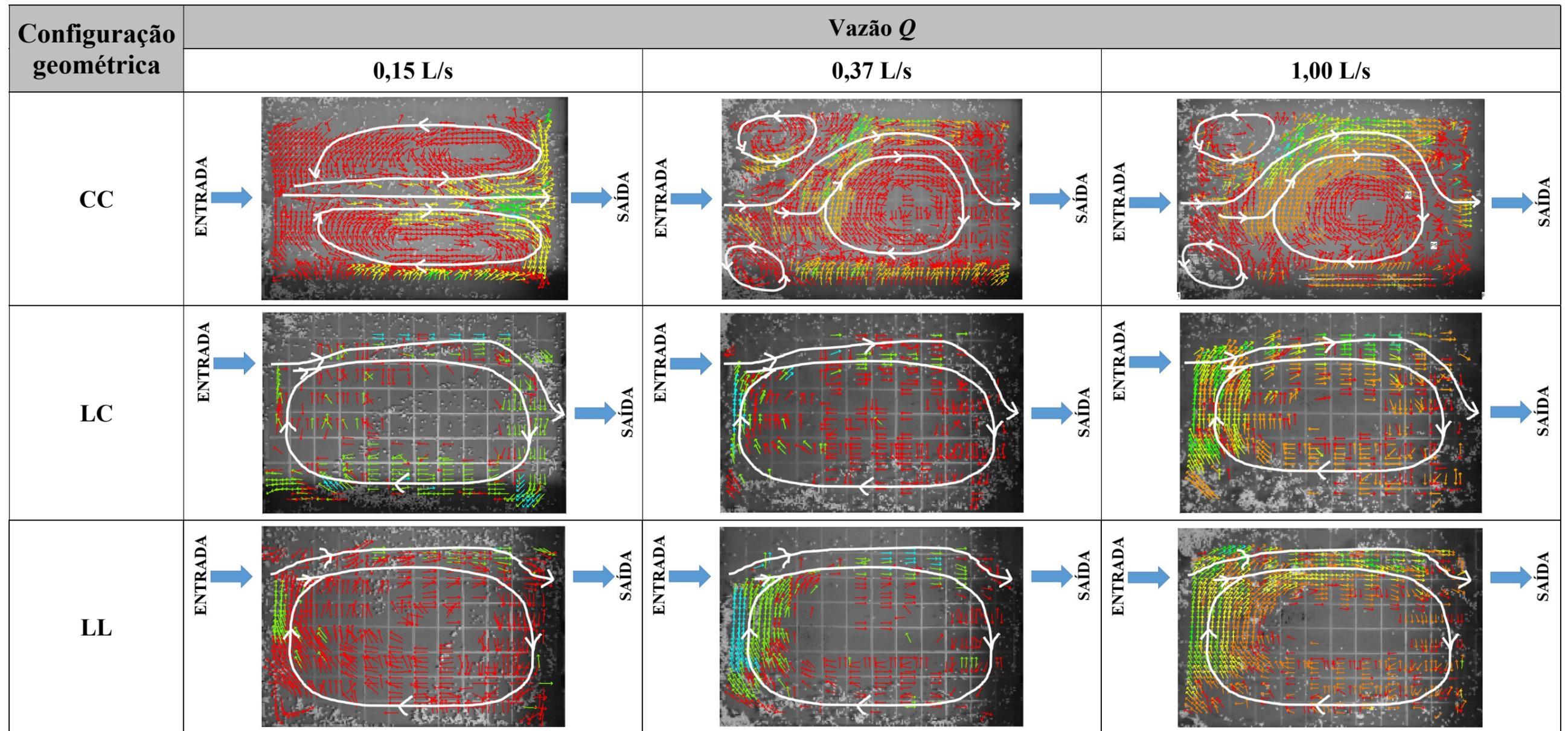
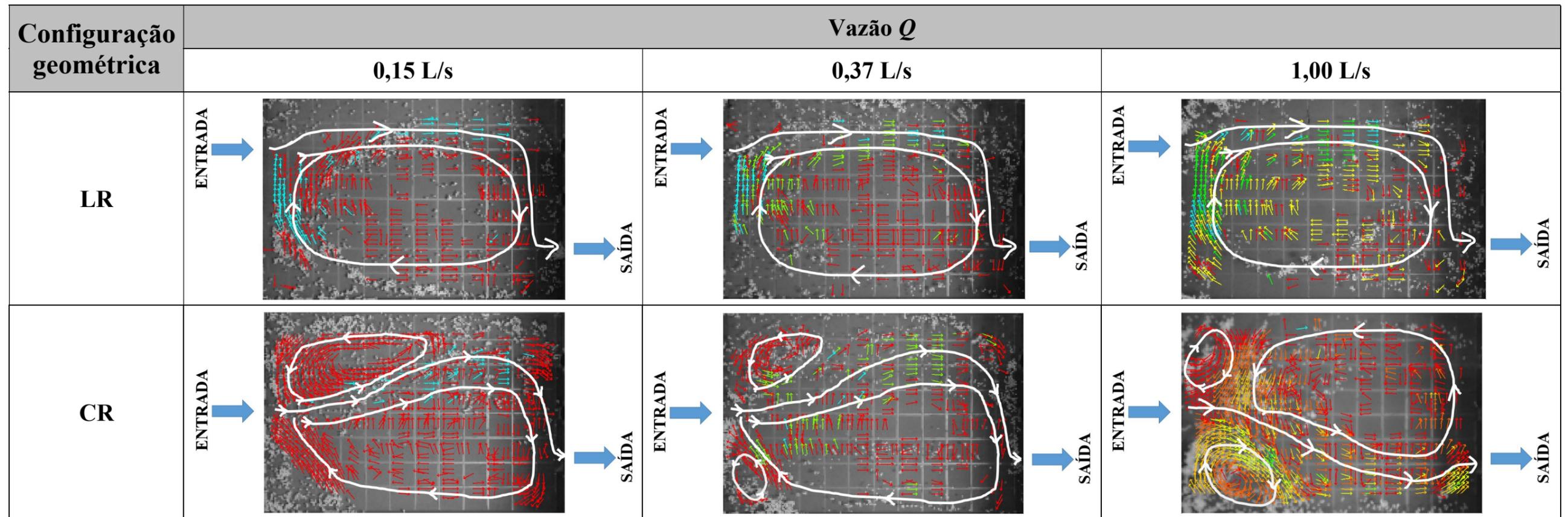


FIGURA 6.5 – Campos de velocidade superficial referentes aos experimentos com água limpa do LH-IST (continuação)



Por outro lado, para as vazões de 0,37 L/s e de 1,00 L/s da geometria CC, o padrão de escoamento foi assimétrico, correspondente ao tipo A1 de Dufresne *et al.* (2010b), com desvio do jato para o lado esquerdo e formação de um vórtice maior em sentido horário. Além disso, notou-se a formação de dois pequenos vórtices na porção de montante do reservatório, um de cada lado em relação ao seu eixo longitudinal. É relevante comentar que um desses vórtices de menor dimensão, o do lado esquerdo do reservatório, não foi identificado no âmbito do CPH-UFMG, devido à ausência de uma quantidade suficiente de traçadores naquela região durante as filmagens.

Ainda com relação à configuração CC, observou-se no CPH-UFMG que o desvio do jato lateral no reservatório brasileiro, para as maiores vazões, foi direcionado para o lado direito (FIGURA 6.1), enquanto no reservatório português o foi para o lado esquerdo. Não havia sido encontrada, até esta etapa do estudo, uma razão explícita para justificar a ocorrência deste fato. Inicialmente, elencaram-se como possíveis causas a existência de alguma instabilidade na vazão fornecida ao reservatório ou de algum aspecto de natureza geométrica, por exemplo, devido à possível não perpendicularidade de um dos canais em relação à parede do reservatório a qual estava acoplado.

Durante os ensaios do LH-IST realizados para a configuração CC, verificou-se o desvio do jato para ambos os lados em situações distintas. Com efeito, Kantoush (2008) e Dufresne *et al.* (2010a,b) destacaram em seus estudos a grande sensibilidade do padrão assimétrico às condições iniciais, já que observaram em seus respectivos reservatórios os dois padrões espelhados, tais como os destacados acima.

Quando da realização de todos os experimentos no LH-IST, tomou-se precaução para que fossem evitadas grandes oscilações na profundidade dentro do reservatório. Considerou-se aceitável uma variação de ± 2 mm, o que correspondeu a 5% da menor das profundidades de referência dos ensaios (3,6 cm para a vazão de 0,15 L/s). Foram realizadas medições frequentes da profundidade no início de cada ensaio com auxílio de uma régua milimetrada, sempre em uma mesma localidade, com o objetivo de atestar o atingimento da condição inicial estável. Somente após tal constatação, o que demandava ao menos 15 minutos, eram inseridos os traçadores pelo lado de montante do reservatório. No que se refere ao reservatório do CPH-UFMG, seguiu-se um procedimento semelhante. Por se tratar de um reservatório de maior dimensão, as eventuais oscilações nas condições iniciais eram menos expressivas e

mais fáceis de serem controladas, apesar de ter sido demandado mais tempo para sua estabilização.

As geometrias LC, LL e LR, por sua vez, apresentaram mesmo padrão de escoamento, sempre caracterizado pelo desvio do jato em direção à parede lateral mais próxima do canal de entrada, ou seja, a esquerda. Adicionalmente, notou-se a formação de um grande vórtice com sentido de rotação horário, ocupando quase toda a extensão do reservatório. A deflexão do jato produziu-se de forma condizente com o comportamento preconizado pelo efeito Coanda, conforme pontuado por Shapira, Degani e Weihs (1990) e endossado por Dewals *et al.* (2008). Em todos aqueles casos, houve uma expansão assimétrica do jato, em função da redução do arrastamento de massa no entorno da parede lateral esquerda. A presença desta parede impediu que a água pudesse ser arrastada para dentro em direção ao jato. Assim, o jato foi desviado em direção à parede esquerda, em razão do aumento das forças tangenciais no sentido transversal, e aderiu-se a ela (CHAO *et al.*, 1992).

Quanto à configuração geométrica CR, o desvio do jato ocorreu em direção à parede lateral esquerda para as vazões de 0,15 L/s e 0,37 L/s, e em direção à parede lateral direita para a vazão de 1,00 L/s. Por esta razão, a rotação do maior vórtice formado no reservatório foi distinta entre as menores vazões (sentido horário) e a maior (sentido anti-horário).

Ao confrontar as observações experimentais referentes à geometria CR entre os reservatórios do CPH-UFMG e do LH-IST, constatou-se não haver um consenso entre os padrões de escoamento verificados, exceto para a maior vazão. No caso do reservatório brasileiro, o comportamento hidrodinâmico foi similar para todas as vazões, representado pela deflexão do jato para a direita e formação de um grande vórtice à esquerda deste, com sentido de rotação anti-horário.

Outra etapa de caracterização dos padrões de escoamento, no âmbito do LH-IST, baseou-se na seleção de três planos horizontais para medição de velocidades em profundidade. Foram escolhidos os planos horizontais a 30, 50 e 80% da profundidade estabelecida para o respectivo ensaio.

Os planos horizontais referentes à configuração geométrica CC são apresentados na Figura 6.6 (vazão de 0,15 L/s), na Figura 6.7 (vazão de 0,37 L/s) e na Figura 6.8 (vazão de 1,00 L/s).

Para a menor vazão (FIGURA 6.6), notou-se que o jato deslocou-se segundo o alinhamento entre os canais de entrada e de saída. Verificou-se na Figura 6.5, obtida em superfície, que o padrão de escoamento foi condizente com o que se observou em profundidade, para os três planos horizontais de referência. Entre os planos horizontais, observou-se que o módulo da velocidade do jato na entrada do reservatório foi visivelmente maior para as profundidades de 1,8 e 2,9 cm face à de 1,1 cm, conforme era esperado.

Quanto à vazão de 0,37 L/s (FIGURA 6.7), o padrão de escoamento correspondente às medições de velocidade em profundidade foi similar ao observado para a vazão de 0,15 L/s (FIGURA 6.6), sem qualquer deflexão expressiva do jato. Por outro lado, comparando-se com o comportamento hidrodinâmico identificado superficialmente (FIGURA 6.5), não se observou correspondência entre os resultados. Enquanto o padrão de escoamento foi simétrico, segundo as velocidades medidas em profundidade, na superfície houve desvio do jato para o lado esquerdo do reservatório, rumo a sua parede lateral esquerda, o que resultou na formação de um grande vórtice em sentido horário.

Cogita-se ter havido algum sutil desalinhamento entre os canais, não identificado no laboratório, ou ainda alguma oscilação da vazão à entrada do reservatório, quando da realização do ensaio em superfície, distinto do que teria ocorrido em profundidade. Os ensaios em superfície e em profundidade foram feitos em momentos diferentes, embora em sequência. Por alguma razão desconhecida, pode ter ocorrido algum deslocamento ou ligeira rotação de um dos canais, ou de ambos, em relação ao plano horizontal, que possa ter afetado os resultados de um ou de outro método. Confrontando-se ainda todos esses resultados com o padrão de escoamento superficial verificado no âmbito do CPH-UFMG (FIGURA 6.1), para a vazão análoga, constatou-se haver compatibilidade com o que se encontrou em superfície no LH-IST, porém, de forma espelhada.

Ainda com relação à configuração geométrica CC, no que tange à vazão de 1,00 L/s, verificou-se para os três planos horizontais em profundidade que o comportamento hidrodinâmico no reservatório foi assimétrico (FIGURA 6.8). Segundo as medições da sonda *Vectrino*, houve deflexão do jato obliquamente para a direita, com formação de um grande vórtice em sentido anti-horário. Entre os três planos horizontais, não foi possível observar grande variação no módulo da velocidade em função da altura líquida. O padrão de escoamento em profundidade foi espelhado em relação ao que se identificou em superfície no

LH-IST, porém, similar ao observado no CPH-UFMG. Conforme previamente destacado, a literatura de referência desta pesquisa (KANTOUSH, 2008; DUFRESNE *et al.*, 2010a,b) já identificou tanto experimental quanto numericamente ambos os comportamentos acima pontuados, isto é, com o deslocamento do jato tanto para a esquerda como para a direita. Sugere-se, mais uma vez, a possível interferência de algum fator externo, seja do ponto de vista geométrico ou em decorrência de alguma instabilidade hidráulica.

FIGURA 6.6 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica CC – Q = 0,15 L/s e h = 3,6 cm

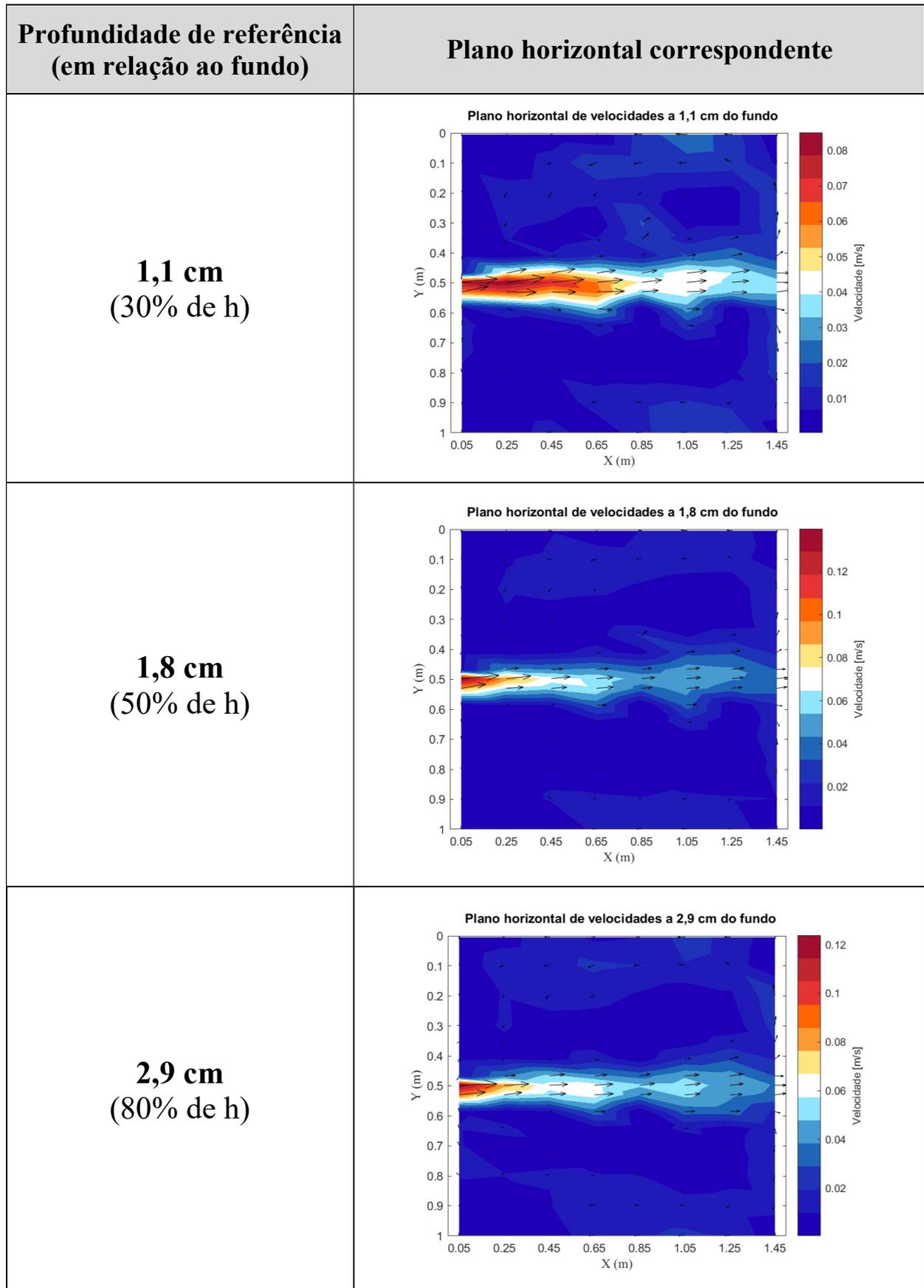


FIGURA 6.7 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica CC – Q = 0,37 L/s e h = 7,1 cm

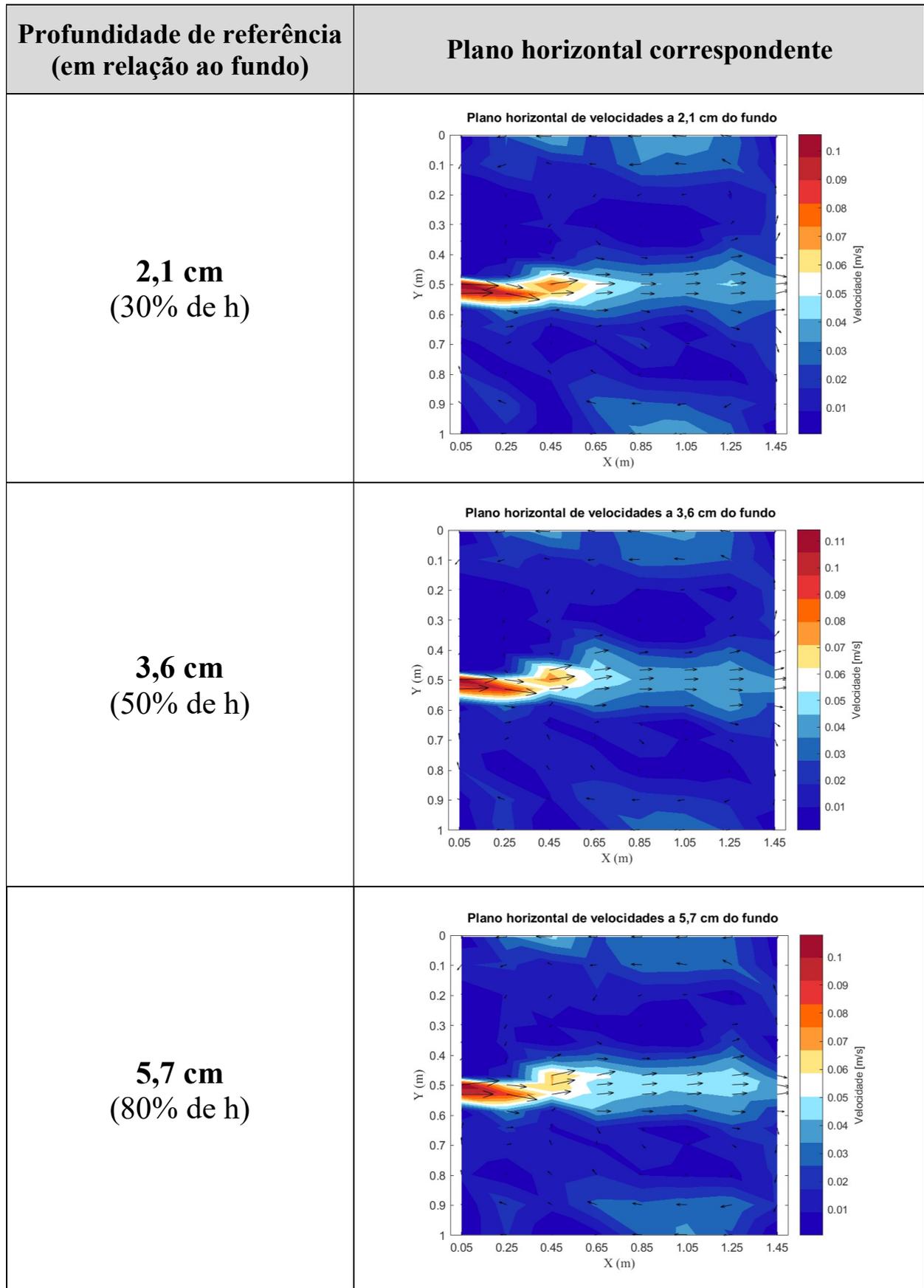
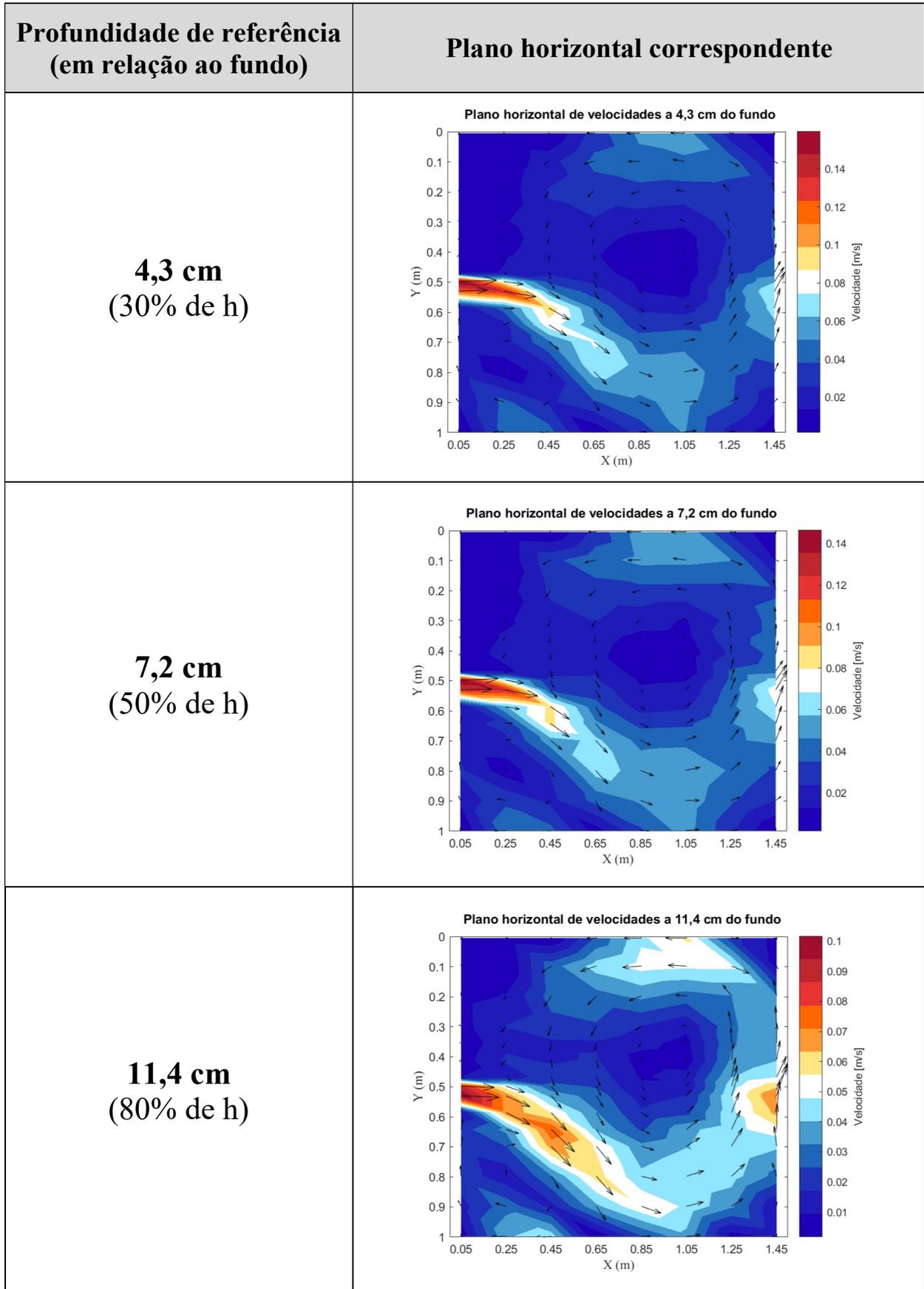


FIGURA 6.8 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica CC – Q = 1,00 L/s e h = 14,3 cm



Para as configurações geométricas em que o canal de entrada foi instalado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório (tipos LC, LL e LR), observou-se um comportamento hidrodinâmico similar para todas as vazões de referência dos ensaios do LH-IST (0,15, 0,37 e 1,00 L/s). Dito de outra forma, nos três casos, e para suas respectivas vazões, o jato defletiu-se para o lado esquerdo do reservatório, influenciado pela parede lateral mais próxima, resultando na formação de um grande vórtice em sentido horário. Tal comportamento pode ser observado para a vazão de 1,00 L/s na Figura 6.9 (configuração LC), na Figura 6.10 (configuração LL) e na Figura 6.11 (configuração LR). No que concerne às vazões de 0,15 e de 0,37 L/s, os resultados atinentes às três geometrias são apresentados no Apêndice IV.

Quando se avaliou vazão por vazão para cada configuração geométrica daquelas recém-mencionadas, verificou-se que as velocidades medidas no plano horizontal mais próximo à superfície líquida eram ligeiramente superiores às velocidades correspondentes dos planos inferiores.

Ainda no que se refere aos módulos das velocidades em profundidade, constatou-se que os valores verificados ao longo do jato, próximo à parede lateral esquerda do reservatório, foram globalmente comparáveis ao que se obteve em superfície com a aplicação da técnica do LSPIV. O padrão de escoamento superficial referente aos ensaios do LH-IST foi similar ao que se verificou pelas medições realizadas com a sonda *Vectrino*. Por esta razão, endossa-se a conveniência da realização de filmagens superficiais para os escoamentos rasos, já que se confirmou experimentalmente que a velocidade é pouco variável na vertical.

Os Apêndices V e VI referem-se aos campos de velocidade superficial para os ensaios realizados, respectivamente, no CPH-UFMG e no LH-IST. Complementarmente ao disposto na Figura 6.1 (CPH-UFMG) e na Figura 6.5 (LH-IST), apresentam-se nos referidos apêndices a escala de cores indicativa dos módulos de velocidade superficial para cada ensaio realizado em ambos os programas experimentais.

FIGURA 6.9 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica LC – $Q = 1,00$ L/s e $h = 14,3$ cm

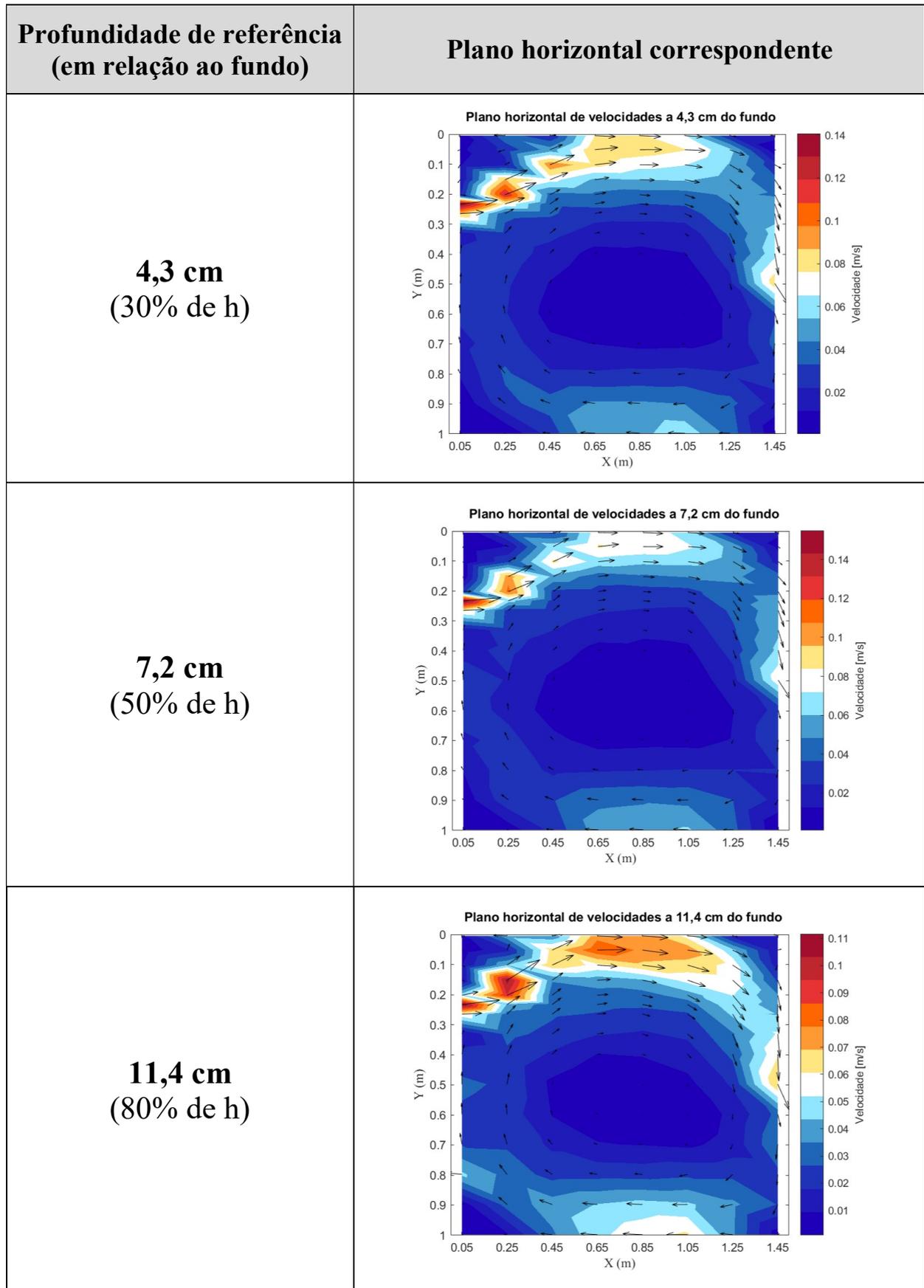


FIGURA 6.10 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica LL – Q = 1,00 L/s e h = 14,3 cm

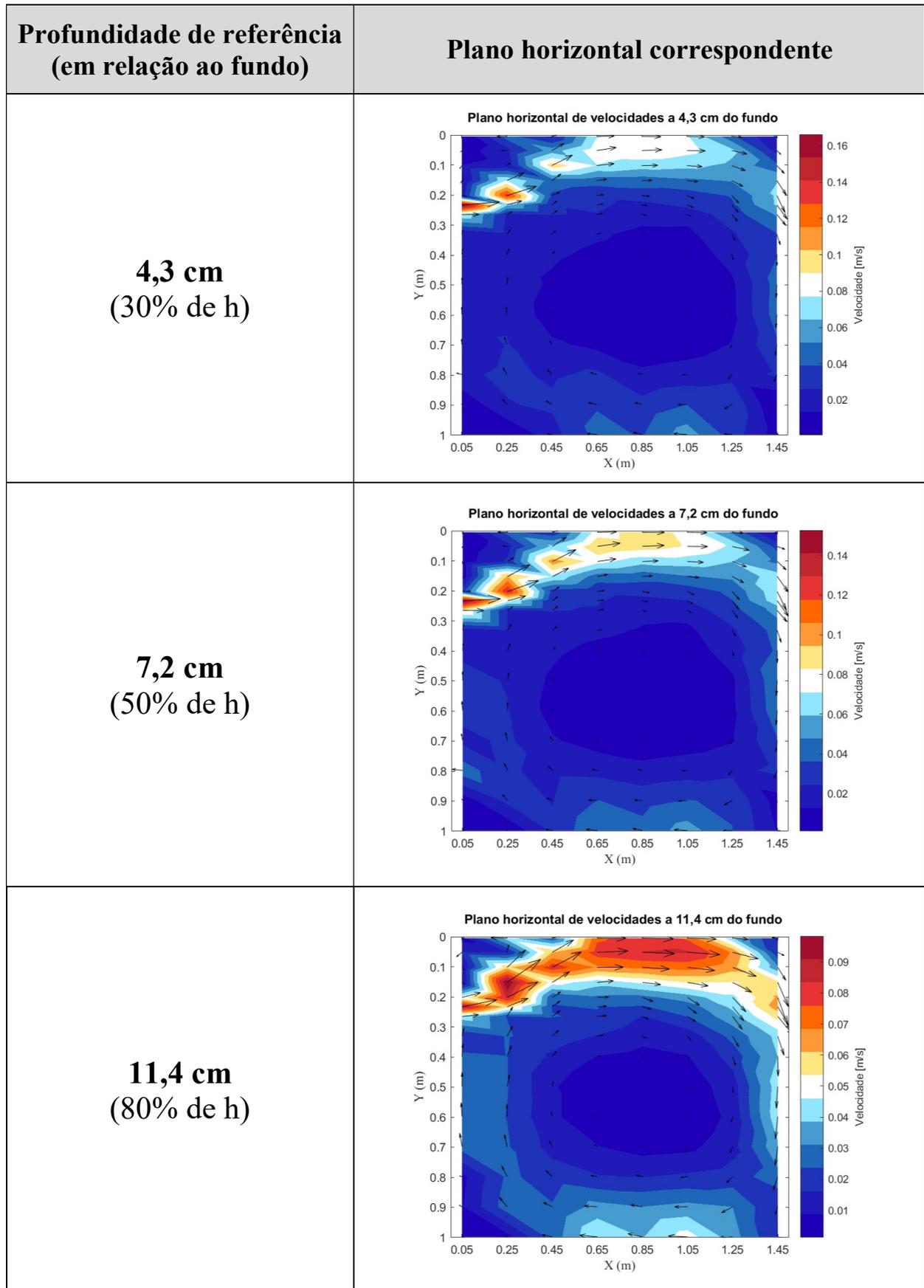
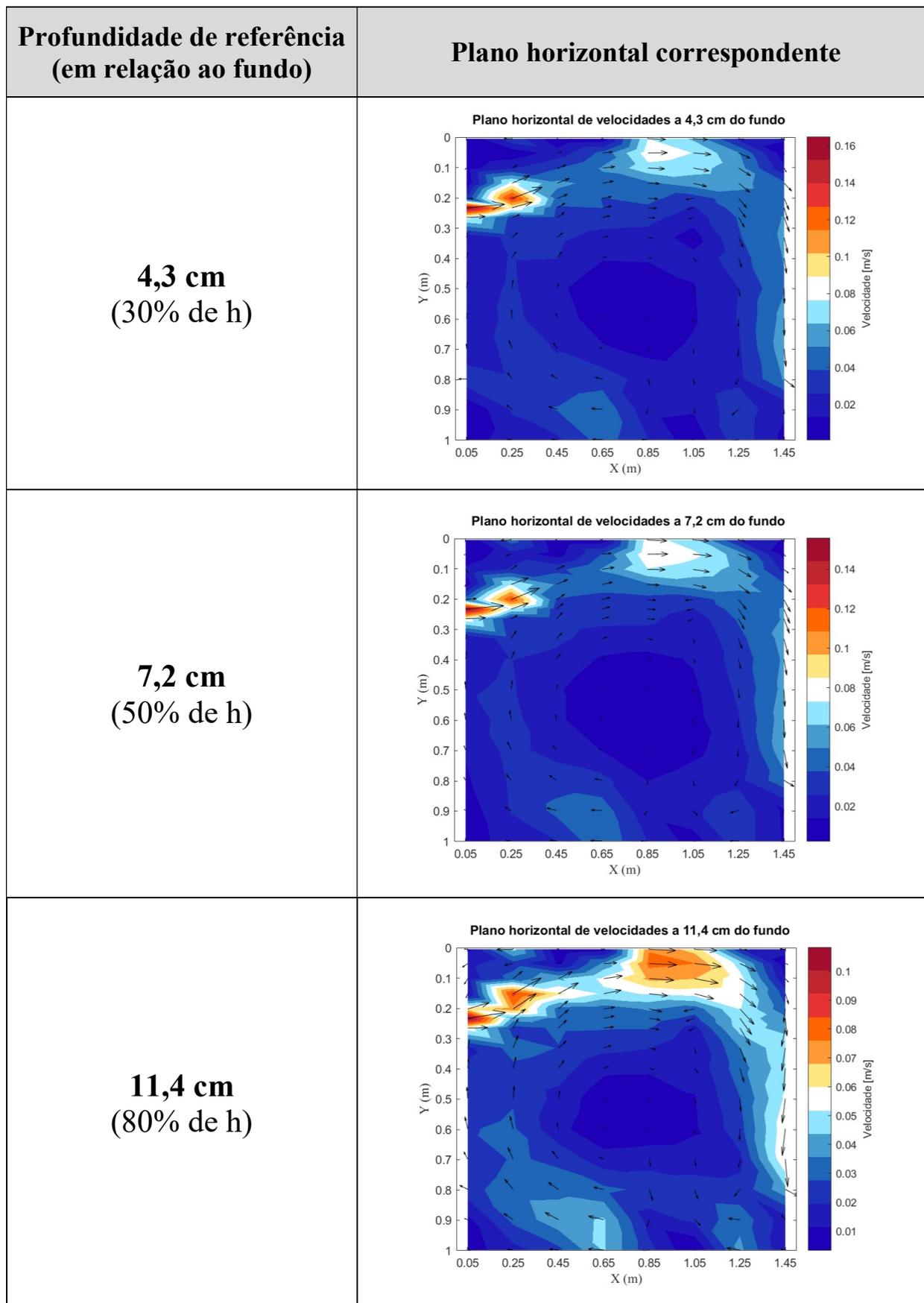


FIGURA 6.11 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica LR – Q = 1,00 L/s e h = 14,3 cm



Referente à configuração geométrica CR, apresentam-se os planos horizontais de velocidades em profundidade na Figura 6.12 (vazão de 0,15 L/s), na Figura 6.13 (vazão de 0,37 L/s) e na Figura 6.14 (vazão de 1,00 L/s).

Primeiramente, é notável a distinção entre o padrão de escoamento observado para a menor vazão (FIGURA 6.12) em relação às maiores (FIGURAS 6.13 E 6.14). Para a vazão de 0,15 L/s, o jato lateral aparentou encurvar-se para dentro do reservatório, sem se aproximar da parede lateral direita. De acordo com a Figura 6.12, é perceptível o aparecimento de dois vórtices com sentidos de rotação opostos, um à esquerda e outro à direita do jato. Por outro lado, houve aproximação do jato em relação à parede lateral direita do reservatório nos casos das vazões de 0,37 L/s (FIGURA 6.13) e de 1,00 L/s (FIGURA 6.14). Em ambos os casos, observou-se a formação de um grande vórtice em sentido anti-horário, à esquerda do jato. Para a vazão menor, a deflexão é menos pronunciada que para as maiores devido ao fato de a diferença de pressões à esquerda e à direita do jato ser menos acentuada neste caso. A massa de água transportada pelo jato, de montante para jusante, é defletida por conta do desalinhamento entre os canais de entrada e de saída. Próximo ao emboque do canal de saída, a massa de fluido curva-se, sendo que parte dela sai por este canal e parte circula o reservatório pelo seu lado esquerdo, mobilizando maior quantidade de água daquele lado do que à direita do jato. Com isso, a pressão do lado esquerdo torna-se maior que a do lado direito, o que amplia a deflexão do jato, autoalimentado por este efeito. Quando a vazão é maior, como nos casos das de 0,37 L/s e de 1,00 L/s, os fluxos de massa e de quantidade de movimento são também maiores, o que contribui para a maior deflexão do jato, tal como observado nas Figuras 6.13 e 6.14, em comparação com a Figura 6.12 ($Q = 0,50$ L/s).

Com relação à variação da velocidade em função da profundidade líquida, de acordo com as Figuras 6.12 e 6.13, concernentes às vazões de 0,15 e de 0,37 L/s, não foi possível notar qualquer diferença significativa. Por outro lado, para a vazão de 1,00 L/s, é possível verificar que as velocidades registradas ao longo do percurso desenvolvido pelo jato são ligeiramente menores para a profundidade de 11,4 cm em relação às demais alturas (4,3 e 7,2 cm).

Tendo em vista o comportamento hidrodinâmico apresentado na Figura 6.5, relativo aos campos de velocidade superficial, observou-se convergência com o que se obteve em profundidade apenas para a maior vazão, qual seja a de 1,00 L/s. Já no que se refere às vazões de 0,15 e de 0,37 L/s, identificou-se em superfície um comportamento espelhado

comparando-se ao que se obteve para a maior vazão, ou seja, com desvio do jato para a esquerda e formação de um grande vórtice à direita desta, em sentido horário.

Anteriormente, quando da discussão dos padrões de escoamento encontrados em profundidade para a configuração geométrica CC, foram identificadas duas hipóteses que pudessem justificar o comportamento distinto do que se observou em superfície: ou haveria alguma interferência de natureza geométrica, tal como um desalinhamento entre os canais, ou hidráulica, como uma oscilação de vazão fornecida ao reservatório.

No que diz respeito à configuração geométrica CR, quando se analisa globalmente todos os resultados superficiais e em profundidade, tanto os do LH-IST quanto os do CPH-UFMG, nota-se que a única inconsistência ocorreu para as menores vazões do reservatório português nas medições em superfície. Uma hipótese que se formula para justificar tal fato está relacionada a uma possível deflexão do jato para a esquerda desde sua entrada no reservatório, isto é, no desemboque do canal de entrada. Isso ocorreria por conta da não perpendicularidade do canal de entrada em relação à parede de montante do reservatório ou devido a uma distribuição não uniforme de vazões por este canal. Para a maior vazão do LH-IST dos ensaios em superfície, cuja deflexão do jato deu-se para a direita, e não para a esquerda como ocorrido para as menores vazões, esse comportamento seria por conta da maior diferença de pressões entre os lados esquerdo e direito do jato dentre os três casos. Para $Q = 1,00$ L/s, a deflexão resultante do efeito de autoalimentação do jato teria sido preponderante em relação à influência da alteração geométrica sugerida acima e, por esta razão, o jato desviou-se para a direita, como era esperado.

É importante comentar também que os ensaios em superfície e em profundidade foram realizados em momentos diferentes, porém, sequenciais, ou seja, sem que tenha havido alteração no posicionamento dos canais durante o intervalo entre um e outro ensaio. Por alguma razão, pode ter havido uma interferência das condições de contorno e iniciais que tenha se manifestado de forma distinta em cada tipo de ensaio. Em outras palavras, deve ter ocorrido durante os diferentes ensaios uma pequena zona de instabilidade dos valores de vazão e de profundidades em relação ao que se esperava observar em cada experimento.

Complementarmente aos planos horizontais apresentados neste subitem, foram elaboradas figuras representativas das 8 seções transversais de medição das velocidades instantâneas para cada um dos 15 ensaios realizados com água limpa no âmbito do LH-IST. As figuras, geradas

a partir dos dados de medição obtidos com uso da sonda *Vectrino*, serviram de apoio à análise do padrão de escoamento encontrado em cada experimento, juntamente com os planos horizontais de velocidade mostrados há pouco. Tais seções transversais são apresentadas no Apêndice VII, disponibilizado unicamente em versão digital no seguinte link de compartilhamento:

<https://drive.google.com/file/d/1D23xq0Q0E68rYzmrKZwTwZBZO3IbZa8V/view?usp=sharing>

FIGURA 6.12 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica CR – Q = 0,15 L/s e h = 3,6 cm

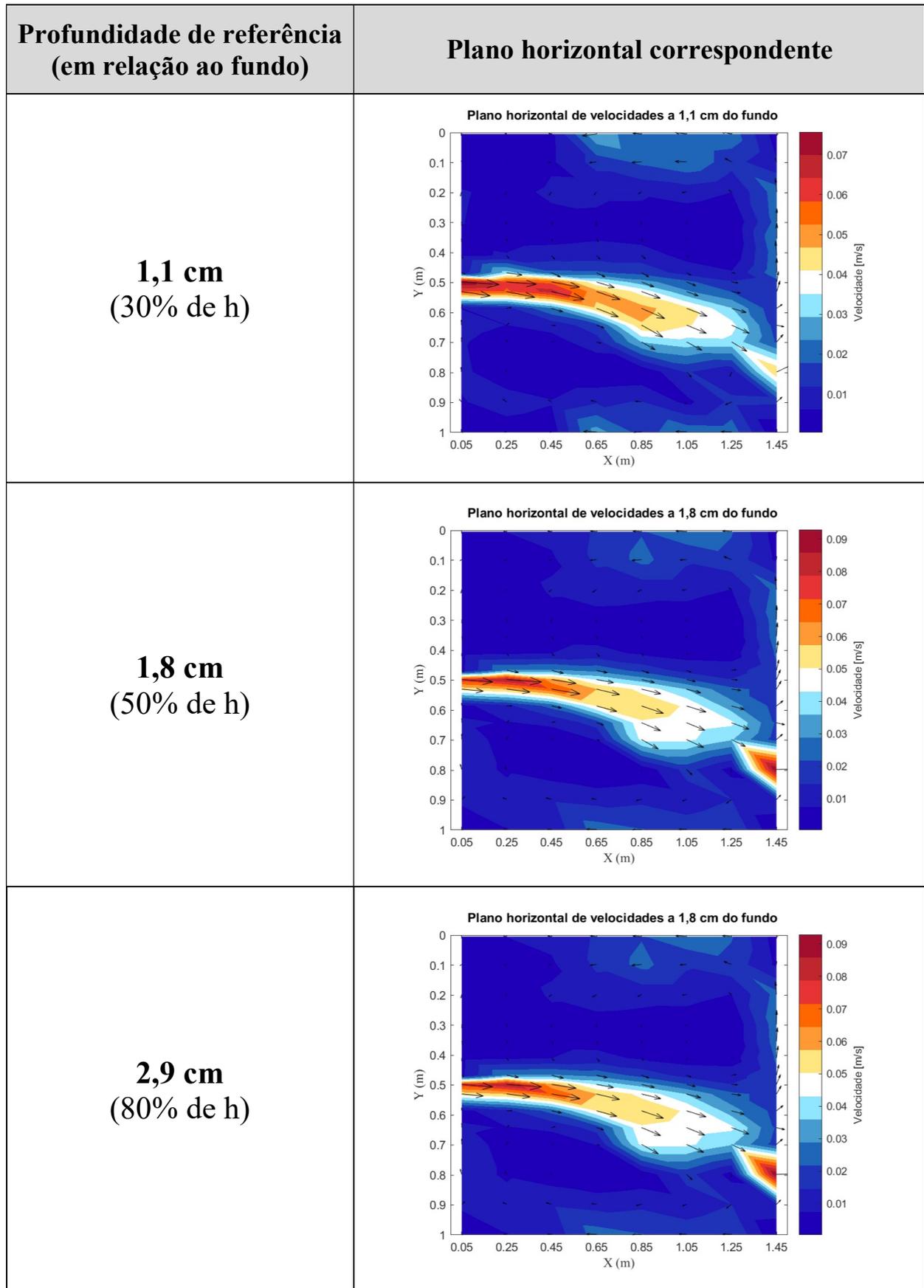


FIGURA 6.13 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica CR – Q = 0,37 L/s e h = 7,1cm

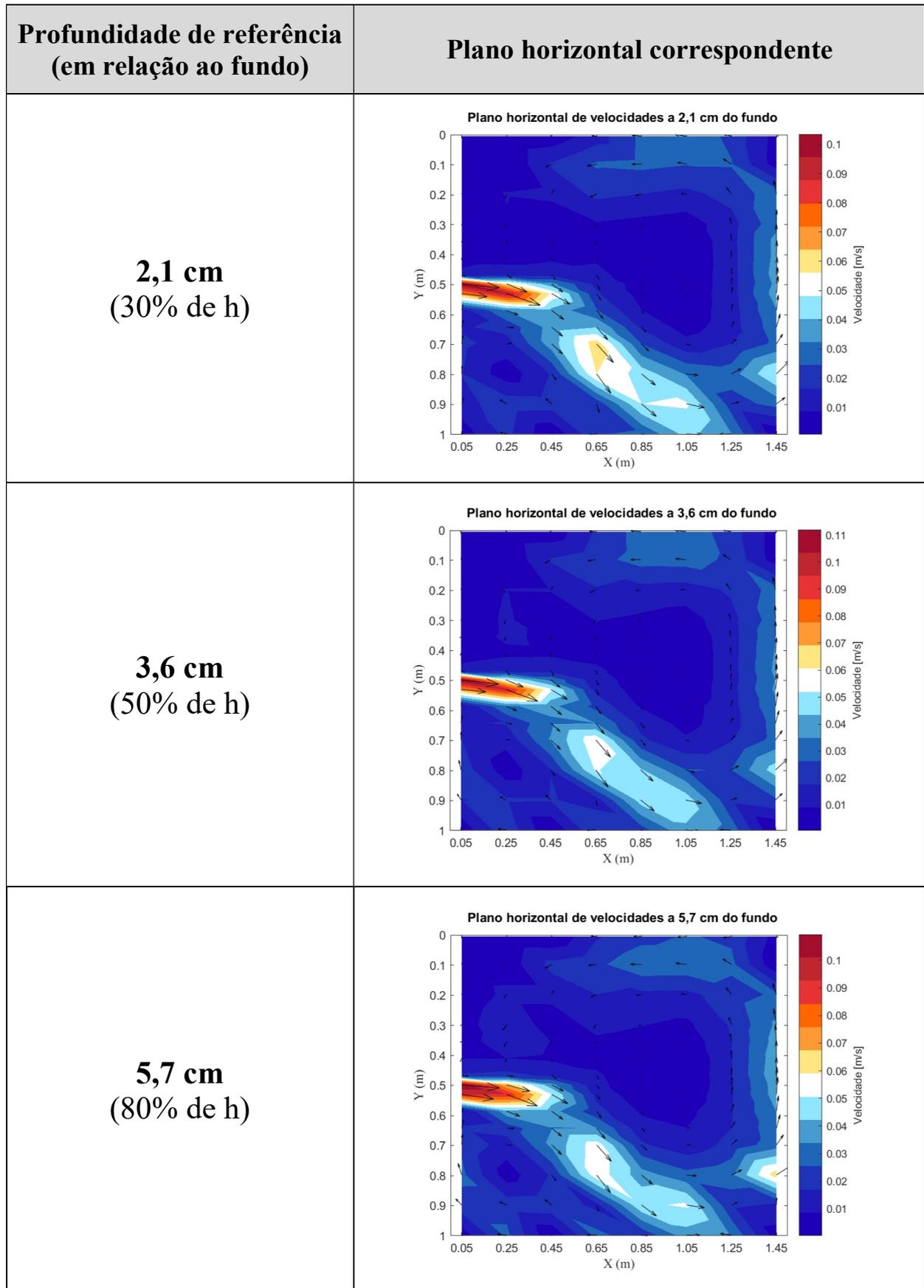
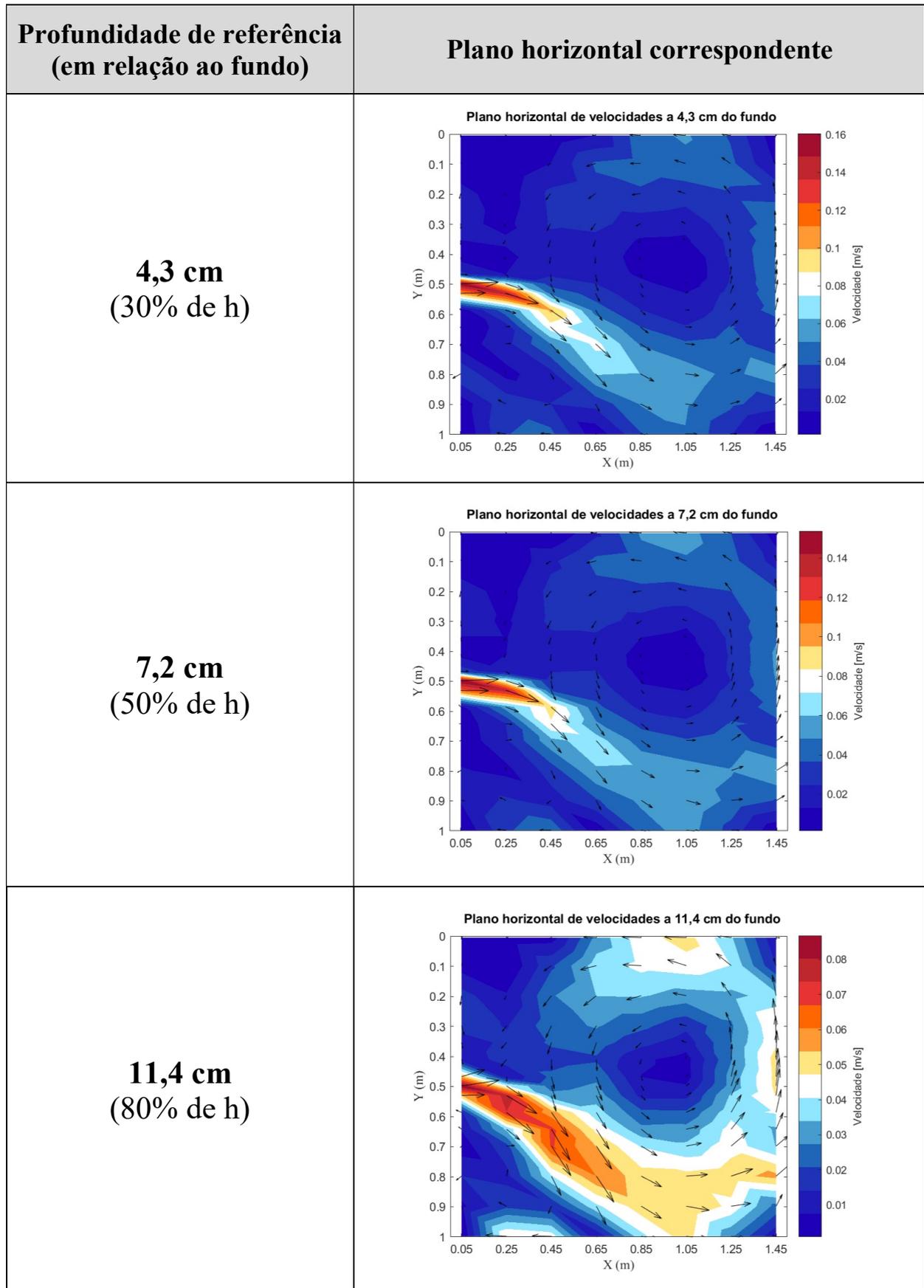


FIGURA 6.14 – Planos horizontais de velocidade para a configuração geométrica CR – Q = 1,00 L/s e h = 14,3 cm



6.1.3 Caracterização de tendências de deposição de sedimentos baseada nos ensaios realizados no LH-IST

Para avaliação da deposição de sedimentos no âmbito do programa experimental estabelecido para o LH-IST, foram realizados 5 ensaios com uso de baquelite granular, isto é, um para cada configuração geométrica (CC, LL, LC, LR e CR), conforme detalhado em Materiais e Métodos. A vazão líquida de referência foi de 1,00 L/s, em regime permanente, e a profundidade líquida foi mantida aproximadamente constante, com 14,3 cm, mesmo valor adotado para os ensaios com água limpa. Além disso, adotou-se uma concentração constante de 3,0 g/L de baquelite granular, inserida a montante do canal de entrada do reservatório de ensaios.

As figuras a seguir (FIGURAS 6.15 A 6.19) referem-se aos resultados obtidos para as cinco configurações geométricas de referência no que tange à evolução morfológica do início ao término de cada ensaio.

Com relação à configuração geométrica CC, simétrica, a Figura 6.15 possibilitou observar que:

- Apesar da simetria geométrica, por conta do alinhamento dos canais de entrada e de saída com o eixo longitudinal do reservatório retangular, houve uma assimetria inicial quanto ao aspecto de deposição sólida. Tal observação pode ser tomada pela análise da figura obtida, por exemplo, com 1h de ensaio e de sua respectiva fotografia;
- Ainda com relação à primeira hora de ensaio, verificou-se ter havido a formação de um depósito não desprezável de baquelite concentrado entre a entrada e a zona central do reservatório, desviado para o lado esquerdo. Mais a jusante, ainda do lado esquerdo, a espessura de sedimentos dificilmente ultrapassou 1 cm. Do lado direito do reservatório, em contrapartida, praticamente não ocorreu sedimentação até aquele instante;
- Quanto ao fato de a sedimentação ter se concentrado inicialmente do lado esquerdo do reservatório, tal comportamento estaria associado, nos primeiros minutos de ensaio, ao padrão de escoamento dominante do processo observado. De acordo com o que foi registrado nos ensaios de água limpa, o desvio do jato verificado durante as medições

de velocidade em profundidade com o *Vectrino* deu-se para o lado direito. Por outro lado, a determinação do padrão de escoamento superficial com emprego da técnica do LSPIV resultou num desvio do jato para a esquerda (ensaios do LH-IST). Pelo que consta da experiência relatada por outros pesquisadores em suas publicações, dentre os quais Kantoush (2008) e Dufresne *et al.* (2010a,b), ambos os comportamentos já foram observados experimentalmente em superfície. Tal distinção hidrodinâmica também foi verificada em superfície nos ensaios análogos do LH-IST e do CPH-UFMG, conforme já destacado. Diante de todas essas considerações, associa-se a concentração inicial de sedimentos decantados do lado esquerdo ao desvio do jato para o mesmo lado, sendo o jato o responsável pelo transporte sólido por arrastamento. O fato de que isto tenha ocorrido (desvio para a esquerda), diferentemente do que se observou com água limpa, reforça a ideia de que deve haver considerável influência de fatores tais como algum sutil desalinhamento dos canais de entrada e/ou de saída ou ainda por conta de alguma variação da vazão líquida à entrada do reservatório. Cabe ainda enfatizar que ambos os fatores foram avaliados numericamente com uso do programa computacional Autodesk® CFD, porém, sem ter sido alcançado qualquer resultado expressivo que pudesse ratificar as condições verificadas na prática;

- Decorridas 2 horas desde o início do ensaio, verificou-se no laboratório e também por meio da figura correspondente que a sedimentação concentrou-se progressivamente mais para o interior do reservatório, diminuindo a assimetria observada nos minutos iniciais entre seus dois lados (esquerdo e direito). Por conta da sedimentação do lado esquerdo e conseqüente modificação da rugosidade de fundo, o jato tendeu a ficar mais retilíneo e alinhado com os dois canais. Verificou-se que a sedimentação da baquelite ocorreu predominantemente ao longo desse jato. Uma vez decantadas, as partículas sólidas formaram pilhas de material sedimentado que foi escorregando paulatinamente para suas laterais, o que resultou no aumento contínuo da área de sedimentação dentro do reservatório. Esse comportamento é válido não só para a configuração CC, como para as demais experimentadas no laboratório (LL, LC, LR e CR);
- Já na terceira hora completa, a assimetria morfológica tornou-se ainda mais reduzida. A partir desse instante, correspondente à metade da duração do ensaio, a sedimentação começou a se concentrar também nas proximidades do canal de saída, formando

dentro do mesmo uma espécie de rampa de baquelite. Isso resultou no início e aumento progressivo do transporte sólido para fora do reservatório. Em outras palavras, a retenção no reservatório de baquelite introduzida pelo canal de entrada começou a decrescer continuamente, com conseqüente aumento da concentração de material sólido a jusante do aparato experimental;

- Durante a segunda metade do ensaio, verificou-se sempre o mesmo comportamento: o sedimento começou a deslizar para as laterais do reservatório e para seu lado de montante, ampliando a área de deposição;
- O equilíbrio das vazões sólidas entre a entrada e a saída do reservatório foi alcançado decorridas 6h de alimentação contínua de baquelite. Neste instante, o ensaio foi interrompido para posterior levantamento topográfico da morfologia de fundo;
- Ainda no que se refere à morfologia de fundo, esta resultou, em planta, em um polígono com formato similar ao de uma pera: menos largo nas proximidades do canal de entrada, com cerca de um terço da largura do reservatório nos primeiros 50 cm de sua extensão longitudinal; com largura superior a dois terços da do reservatório deste ponto até os 20 cm finais de seu comprimento; e curvado para dentro do reservatório em sua porção final;
- Observou-se a formação de duas zonas mortas (ou de estagnação) na zona de montante do reservatório, sobre as quais não houve sedimentação. Tais zonas mortas foram simétricas e espelhadas em relação ao eixo longitudinal do reservatório, sendo uma do lado esquerdo e outra do lado direito. Além disso, em planta, possuíam um formato similar ao de um triângulo retângulo com base paralela à parede de montante (cerca de 30 cm) e “altura” paralela à parede lateral do reservatório (em torno de 80 cm).

FIGURA 6.15 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica CC – $Q = 1,00$ L/s

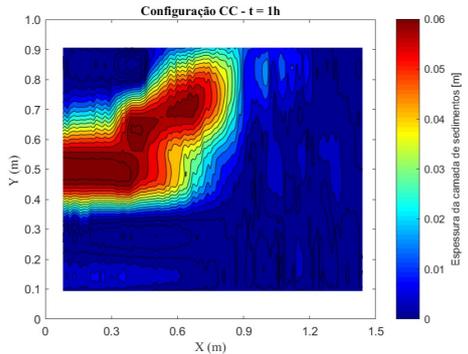
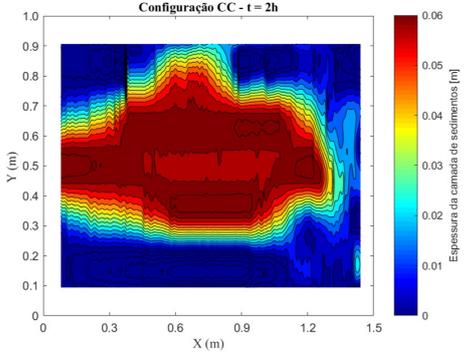
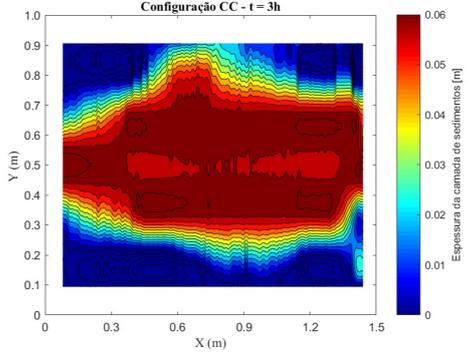
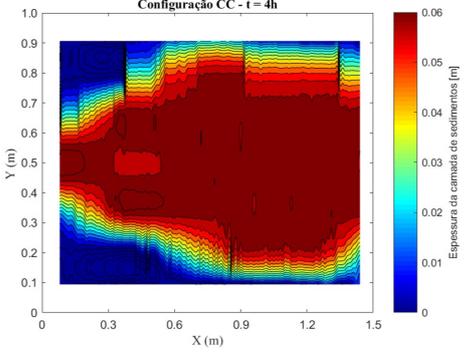
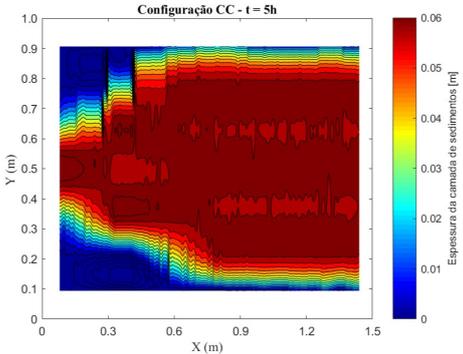
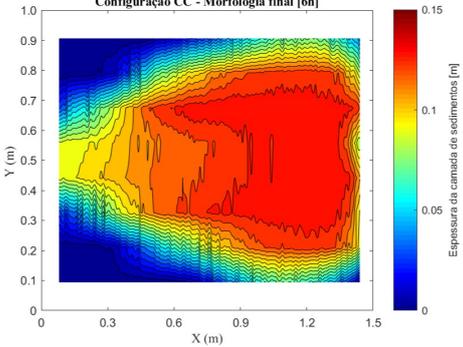
Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>1h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>2h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>3h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>4h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

FIGURA 6.15 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica CC – $Q = 1,00$ L/s (continuação)

Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>5h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>6h</p> <p>[Equilíbrio]</p>		

No que tange à configuração geométrica LR, cuja evolução morfológica é apresentada na Figura 6.16, pode-se destacar que:

- A predominância dos depósitos de sedimento, desde os instantes iniciais do ensaio, deu-se pelo lado esquerdo do reservatório. Este comportamento foi diretamente influenciado pelo posicionamento do canal de entrada e respeitou o mesmo padrão de escoamento observado nos ensaios com água limpa, isto é, com desvio do jato para o lado esquerdo;
- Na figura correspondente à primeira hora completa de alimentação sólida, assim como na fotografia correlata, foi possível observar uma concentração de baquelite mais próxima ao canal de entrada, como era de se esperar. Nessa região, a deposição expandiu-se lateralmente dentro do reservatório, por efeito de deslizamento dos grãos que foram se empilhando ao longo do alinhamento do jato. Os sedimentos avançaram até quase toda a extensão do reservatório sem, contudo, alcançar o canal de saída;

- Ao final de 2 horas de experimento, notou-se a formação de um grande depósito sólido do lado esquerdo, numa área com formato aproximadamente retangular quando vista em planta;
- Com o passar do tempo, conforme se vê ao analisar as imagens correspondentes a 3 e 4h de duração do ensaio, verificou-se que a deposição de sedimentos expandiu-se lateralmente, seguindo uma trajetória aproximadamente oblíqua, no alinhamento entre os canais de entrada e de saída. Essa tendência deveu-se à alteração gradual do percurso realizado pelo jato, em função da alteração da rugosidade na região afetada pela sedimentação. Pode-se verificar, assim como nos demais ensaios, que o jato tendeu a curvar-se cada vez menos à medida que o processo de decantação foi intensificado;
- Com cerca de 4h de experimento, pouco menos que a metade do tempo demandado até o equilíbrio das vazões sólidas, os depósitos sedimentares começaram a ocupar a região próxima ao canal de saída. Com isso, deu-se início ao aparecimento de sólidos a jusante daquele canal;
- Entre 4 e 6h do início da alimentação sólida, observou-se um aumento gradual da área de decantação para a direita e para montante, com alcance da parede lateral direita a partir de 6h;
- O equilíbrio foi alcançado ao fim de 9h;
- Considerável volume do reservatório retangular foi ocupado pelos sólidos decantados, sendo perceptível a formação de uma única área de estagnação à direita e a montante, com formato aproximado ao de um triângulo retângulo com base e “altura” de cerca de 40 cm.

FIGURA 6.16 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica LR – Q = 1,00 L/s

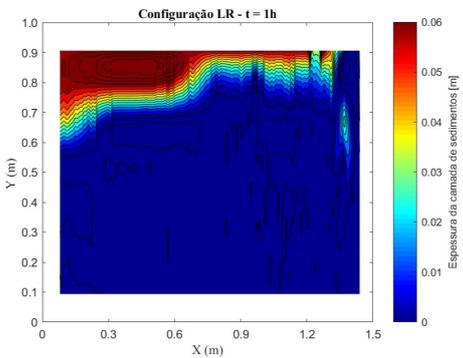
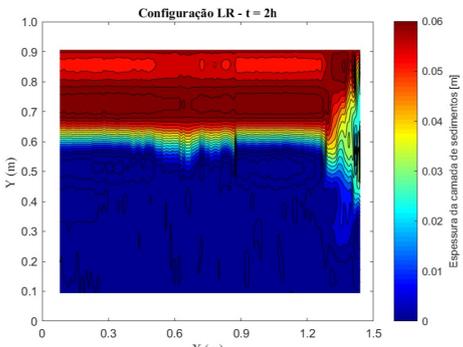
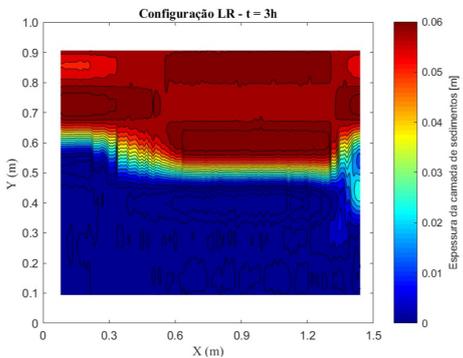
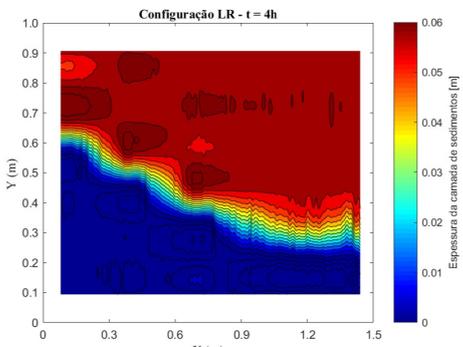
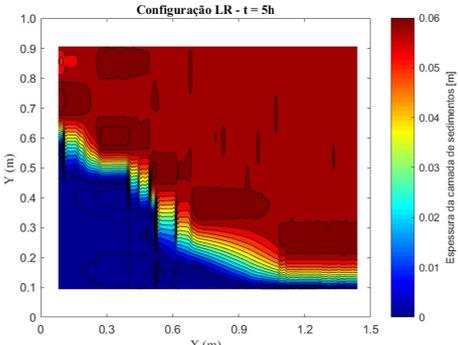
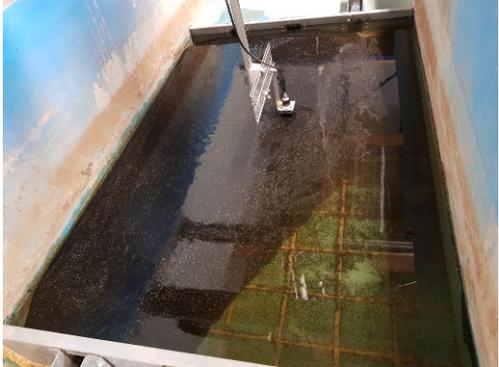
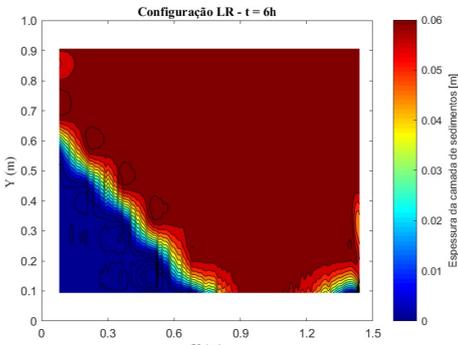
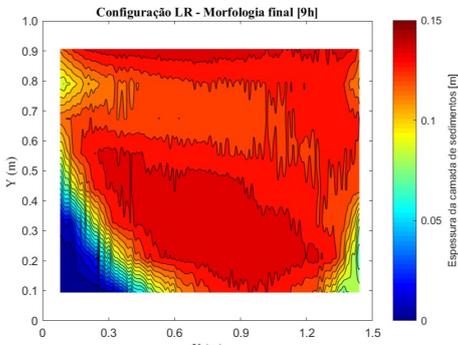
Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>1h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>2h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>3h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>4h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

FIGURA 6.16 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica LR – $Q = 1,00$ L/s (*continuação*)

Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>5h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>	 <p>Configuração LR - t = 5h</p>	
<p>6h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>	 <p>Configuração LR - t = 6h</p>	
<p>9h</p> <p>[Equilíbrio]</p>	 <p>Configuração LR - Morfologia final [9h]</p>	

A Figura 6.17 corresponde à evolução morfológica observada para a configuração geométrica CR, em que foi possível observar que:

- A deposição inicial de sedimentos, vista nas imagens correspondentes a 1h de ensaio, concentrou-se pelo lado direito do reservatório, por influência do posicionamento do canal de saída, instalado daquele mesmo lado. Tal tendência de sedimentação foi

coerente com o padrão de escoamento observado nos ensaios com água limpa, seja em profundidade, seja superficialmente, em que o jato desviou-se para a direita;

- Após 2h desde o início da inserção de baquelite, verificou-se um aumento significativo da deposição de sedimento, que alcançou praticamente toda a extensão longitudinal do reservatório e expandiu-se lateralmente;
- Decorridas 4h de ensaio, observou-se uma significativa ocupação da área do reservatório pelos sedimentos decantados. Pode-se visualizar uma faixa de cerca de 30 cm de largura em toda a extensão do reservatório, do lado esquerdo deste, em que não houve sedimentação. Ademais, visualizou-se outra pequena zona morta com formato de triângulo retângulo na quina direita de montante do reservatório. Não foi observada significativa distinção, em termos morfológicos, na hora seguinte do experimento (t = 5h);
- Ainda com relação à figura correspondente às 4h de ensaio, nesta altura já se observou a deposição de sedimentos junto ao canal de saída, resultando no aparecimento de vazão sólida a jusante do mesmo;
- Com 6h de experimento, houve uma ligeira expansão dos depósitos sólidos para o lado esquerdo do reservatório em seu terço final (porção de jusante);
- O experimento atingiu a condição de equilíbrio sólido após 7 horas de seu início, resultando, assim como para a configuração CC, em uma figura geométrica com formato de uma pera, neste caso, ligeiramente deslocada para a direita, em função do posicionamento do canal de saída.

FIGURA 6.17 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica CR – $Q = 1,00$ L/s

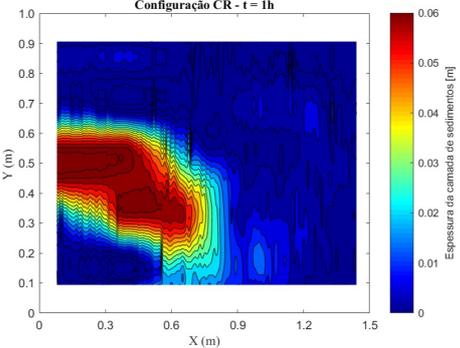
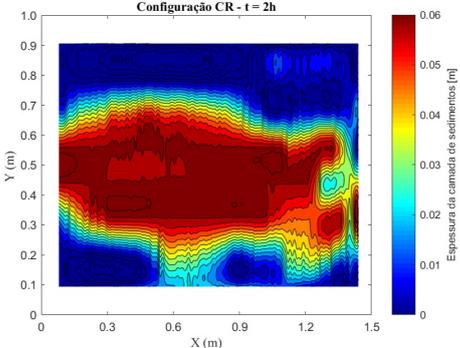
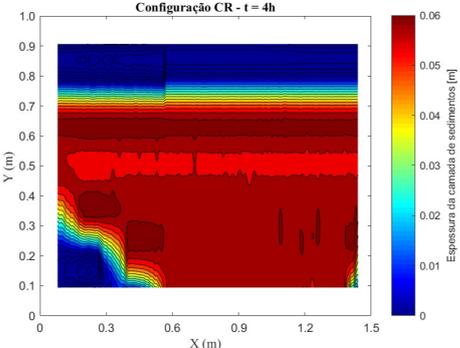
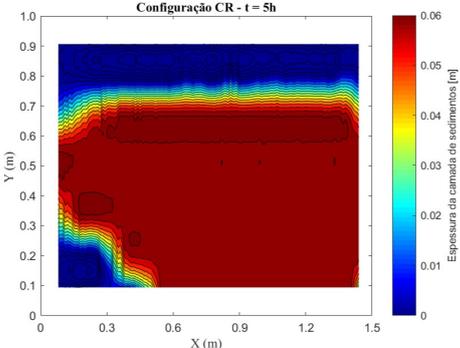
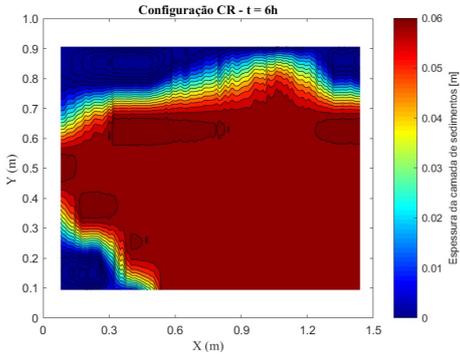
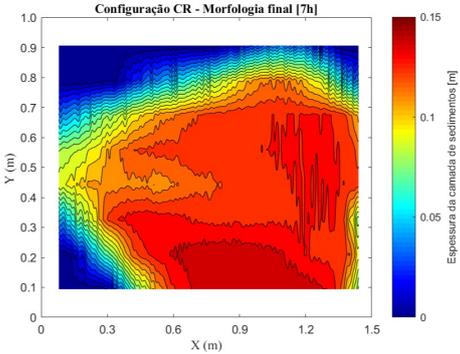
Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>1h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>2h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>4h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>5h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

FIGURA 6.17 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica CR – $Q = 1,00$ L/s (*continuação*)

Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>6h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>	 <p>Configuração CR - t = 6h</p>	
<p>7h</p> <p>[Equilíbrio]</p>	 <p>Configuração CR - Morfologia final [7h]</p>	

Referente à configuração geométrica LL, cujas imagens são apresentadas na Figura 6.18, foi possível destacar que:

- A evolução morfológica observada no reservatório foi relativamente similar ao que foi verificado para a configuração LR (FIGURA 6.16), com expansão lateral da área de deposição da esquerda para a direita. Observou-se novamente uma tendência de sedimentação em zonas adjacentes à da trajetória percorrida pelo jato. Para a geometria em pauta e conforme destacado nos ensaios com água limpa, esse jato desviou-se para o lado esquerdo, por influência da parede lateral do reservatório. O processo de sedimentação, governado inicialmente pelo padrão de escoamento com água limpa, pode ser visualizado na representação batimétrica e na fotografia concernentes à primeira hora de experimento;
- No que se refere às representações batimétricas de 2 e de 3h de ensaio, pode ser constatada a citada expansão lateral, para a direita, da sedimentação no reservatório.

Ao final da terceira hora, já se observava uma pequena quantidade de baquelite a jusante do canal de saída;

- Nas horas seguintes de realização do ensaio, isto é, entre 4 e 6 horas, averiguou-se a formação progressiva de uma expansão de depósitos sólidos segundo uma trajetória oblíqua em direção à parede lateral direita do reservatório;
- O equilíbrio das vazões sólidas foi verificado ao final de 6 horas de experimento. Para essa condição, puderam ser identificadas duas grandes zonas de estagnação onde não houve deposição de baquelite: uma maior à direita e na porção de montante do reservatório, com formato semelhante ao de um triângulo retângulo e outra também com mesmo formato, do lado direito e a jusante. As duas áreas de estagnação foram ligadas por um grande corredor formado em toda a extensão do reservatório, em seu lado direito, onde também não houve sedimentação;
- A configuração LL foi, indubitavelmente, aquela que mais contou com a presença de áreas de estagnação, não ocupadas pelo processo de decantação da baquelite. Estimase que em cerca de um terço da superfície retangular do reservatório não houve sedimentação.

FIGURA 6.18 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica LL – $Q = 1,00$ L/s

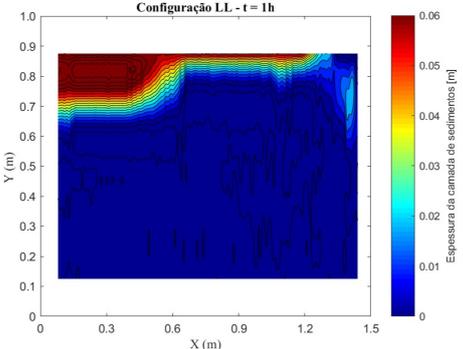
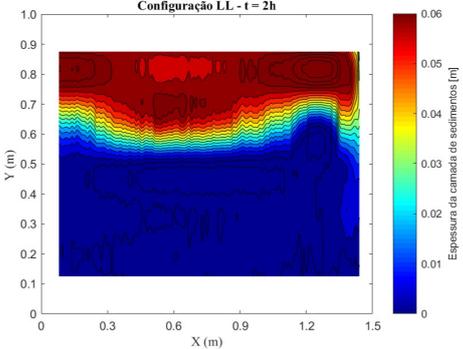
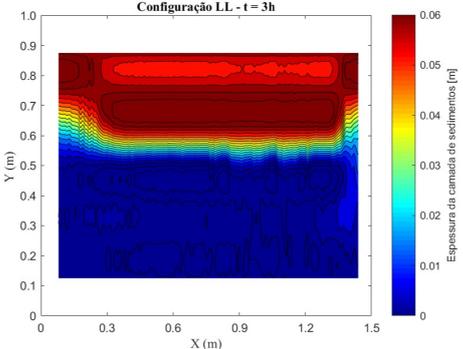
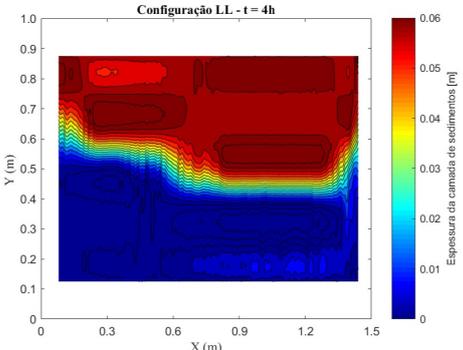
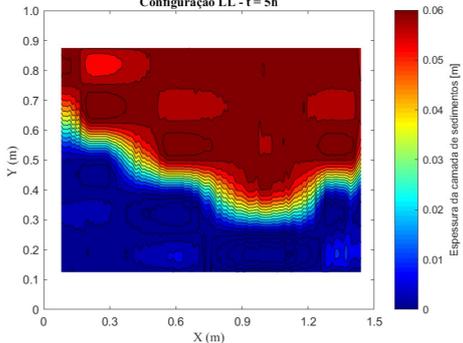
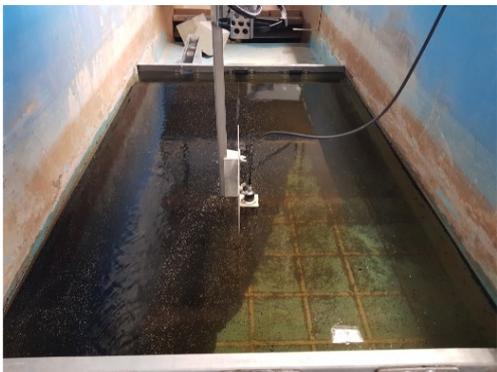
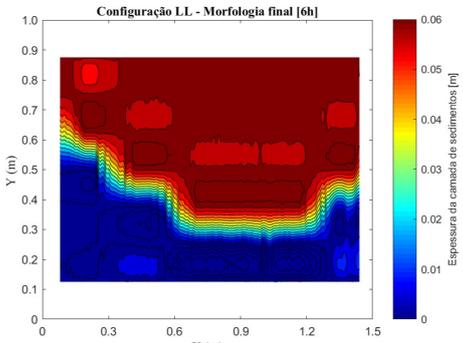
Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>1h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>2h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>3h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>4h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

FIGURA 6.18 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica LL – $Q = 1,00$ L/s (*continuação*)

Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>5h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>6h*</p> <p>[Equilíbrio]</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

Por fim, no que concerne à configuração geométrica LC, de acordo com a Figura 6.19, pode-se destacar que:

- Até o término da segunda hora de ensaio, não foi observada nenhuma diferença significativa em termos da tendência de sedimentação quando comparada às configurações LR (FIGURA 6.16) e LL (FIGURA 6.18);
- Decorridas 4h desde o início da alimentação sólida, foi verificada uma crescente expansão lateral, da esquerda para a direita, da deposição de sedimentos. Houve ainda uma tendência de aumento da largura da área de deposição de montante para jusante;
- Entre 6 e 9h após o início da inserção contínua de baquelite, verificou-se uma expansão da área de sedimentação obliquamente em direção à parede direita, sobretudo nos terços médio e final do reservatório, e para montante;

- O experimento foi interrompido ao final de 9 horas de alimentação sólida, em função do atingimento da condição de equilíbrio das vazões sólidas entre entrada e saída. Constatou-se a formação de duas zonas mortas, em que não houve deposição de sedimentos, ambas do lado direito do reservatório: a primeira delas a montante e a segunda área, de menor proporção, mais a jusante;
- Comparativamente à configuração LR (FIGURA 6.16), a forma da área de deposição de sedimentos foi bastante similar. Por outro lado, naquele caso, as zonas de estagnação foram menores, por influência da extensão do percurso desenvolvido pelo jato, maior, graças ao maior desalinhamento entre os canais de entrada e de saída. No que se refere ao tempo para alcance do equilíbrio sólido, ambas as configurações foram interrompidas com 9h desde o início do respectivo ensaio.

FIGURA 6.19 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica LC – $Q = 1,00$ L/s

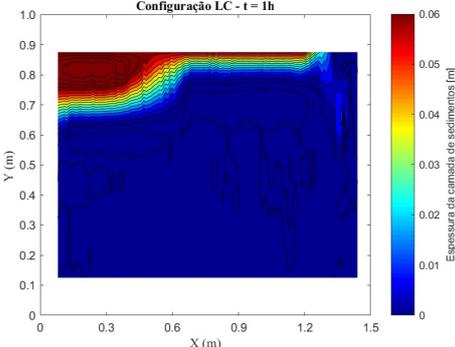
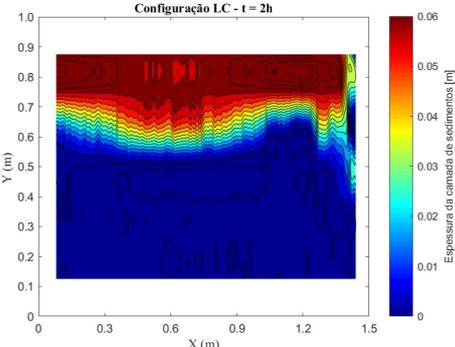
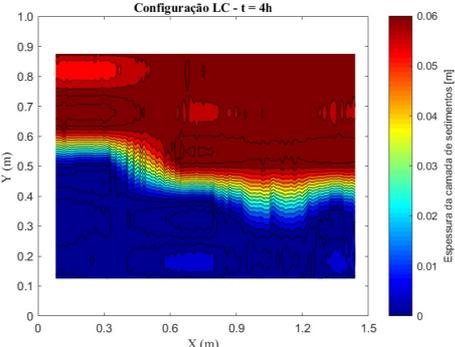
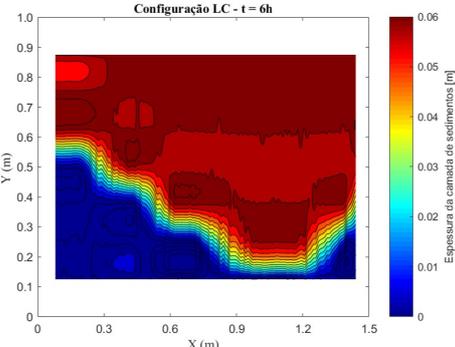
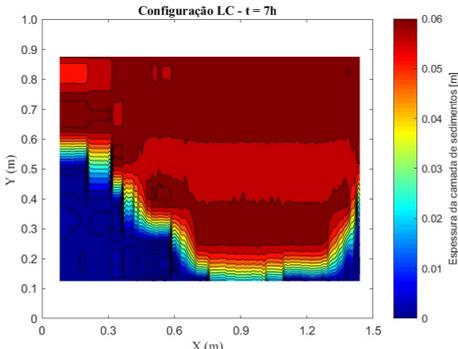
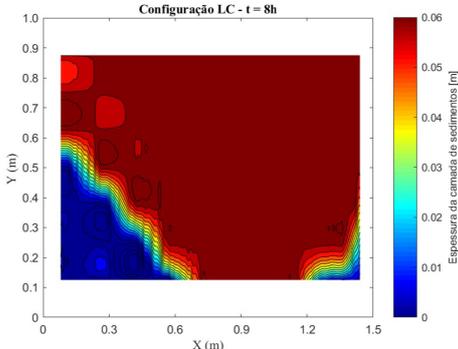
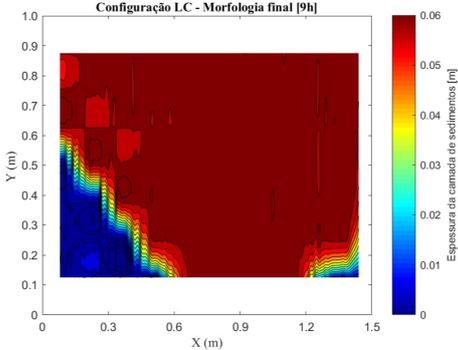
Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>1h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>2h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>4h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>6h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

FIGURA 6.19 – Evolução temporal da deposição de sedimentos para a configuração geométrica LC – $Q = 1,00$ L/s (*continuação*)

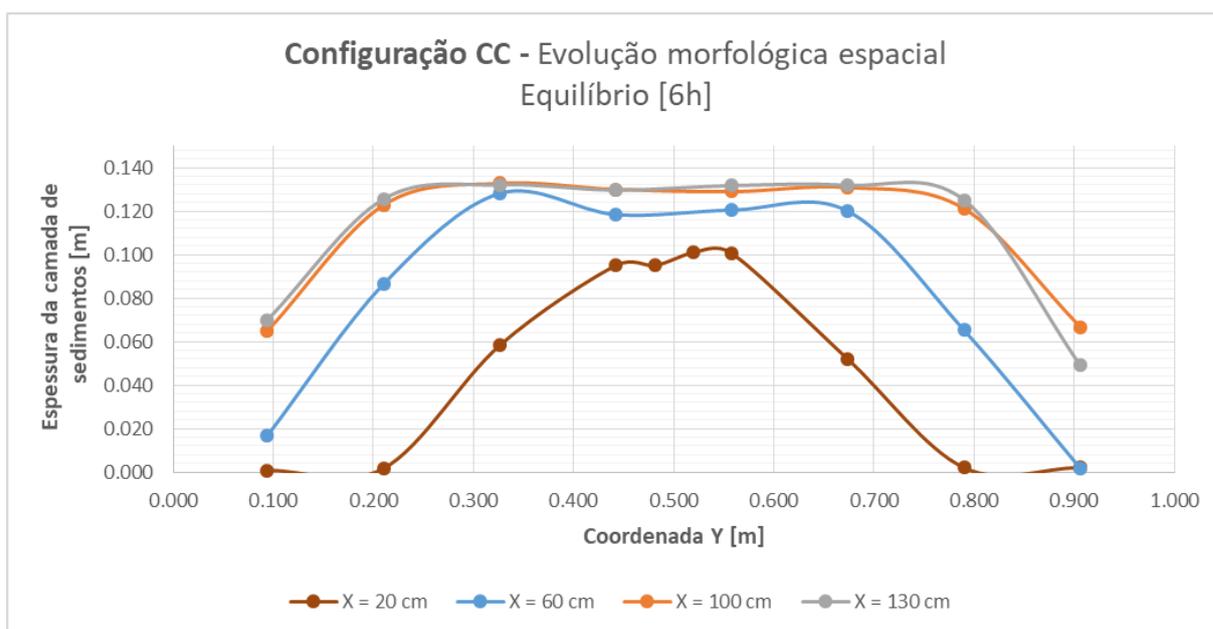
Tempo [h]	Medição	Imagem correspondente
<p>7h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>8h*</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		
<p>9h*</p> <p>[Equilíbrio]</p> <p>*representação de até 6,1 cm de espessura de sedimentos</p>		

No que se refere especificamente às três configurações geométricas em que foi possível reproduzir, de forma completa, a morfologia final pós-inserção de baquelite (configurações CC, LR e CR), serão apresentados a seguir gráficos contendo a evolução morfológica em 4 seções transversais de referência. Nesse sentido, foram selecionadas aquelas que distavam de 20, 60, 100 e 130 cm em relação à parede de montante do reservatório.

Relativo à configuração geometricamente simétrica CC (FIGURA 6.20), observou-se para as todas as seções transversais uma configuração praticamente simétrica da deposição de

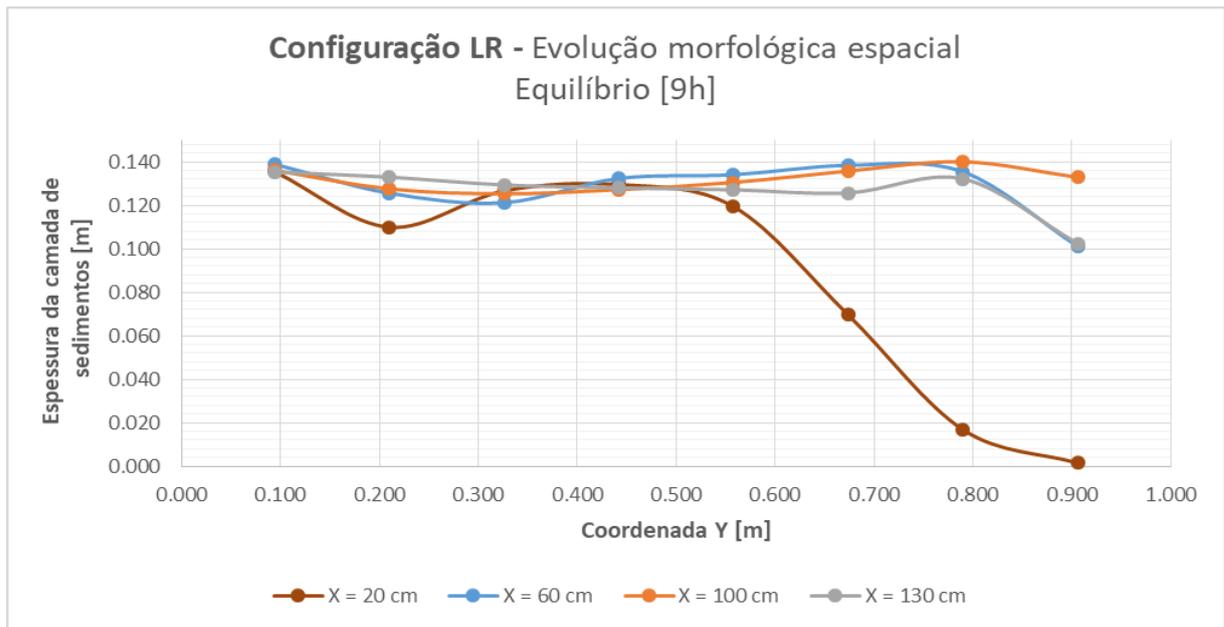
sedimentos. Além disso, foi possível constatar que: (1) na entrada do reservatório ($X = 20$ cm), a espessura da camada de sedimentos formada foi aproximadamente igual a 10 cm, no centro da seção, e chegou a 13,3 cm nas demais seções transversais ($X = 60, 100$ e 130 cm), o que correspondeu a 1 cm a menos que a profundidade líquida; (2) sobretudo para $X = 20$ cm, $X = 60$ cm e $X = 100$ cm, verificou-se ter aparecido uma discreta zona de escavação na parte central da seção devido à ação do jato, que se tornou alinhado longitudinalmente com os canais de entrada e de saída.

FIGURA 6.20 – Evolução morfológica espacial da configuração geométrica CC



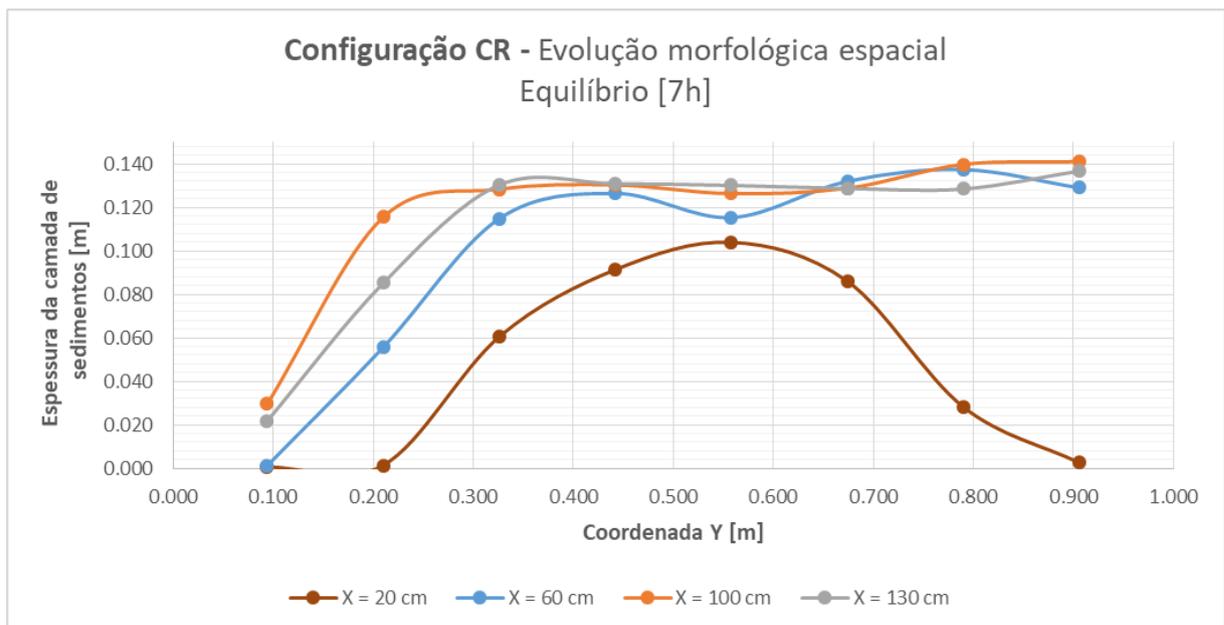
Com base na análise espacial da morfologia final referente à configuração geométrica LR (FIGURA 6.21), foi possível observar que: (1) houve um depósito de sedimento mais espesso do lado direito do reservatório nas seções $X = 60$ cm, $X = 100$ cm e $X = 130$ cm, comparativamente à seção mais a montante, com $X = 20$ cm; (2) em todas as quatro seções, a espessura máxima da camada de sedimentos, ao menos localmente, alcançou entre 13,5 e 14,0 cm, resultando em uma lâmina d'água inferior a 1,0 cm; (3) foi possível constatar a formação de uma zona de escavação, como um canal, por onde transitou o jato. Na seção $X = 20$ cm, tal escavação foi evidentemente alinhada com o canal de entrada, mas se deslocou para a direita e tornou-se mais aberta, ou menos encaixada, nas seções seguintes. Indiscutivelmente, essa tendência erosiva seguiu o alinhamento entre o canal de entrada e o de saída.

FIGURA 6.21 – Evolução morfológica espacial da configuração geométrica LR



Com relação à configuração geométrica CR (FIGURA 6.22) e tendo em vista a condição final alcançada ao término de 7 horas, observou-se uma tendência transversalmente simétrica de sedimentação para a seção $X = 20$ cm, diferentemente da assimetria característica das demais seções. Constatou-se para a seção $X = 60$ cm a formação de uma zona de escavação, por ação do deslocamento do jato, que se tornou mais alargada e menos profunda nas seções mais a jusante ($X = 100$ cm e $X = 130$ cm).

FIGURA 6.22 – Evolução morfológica espacial da configuração geométrica CR



Em termos de espessura da camada de sedimentos, esta ultrapassou por pouco os 10,0 cm próximo ao eixo do canal de entrada na seção mais a montante ($X = 20$ cm). Por outro lado, alcançou o intervalo entre 13,7 e 14,1 cm nas seções seguintes, resultando na formação de uma lâmina d'água inferior a 1,0 cm de altura.

6.1.4 Avaliação do volume de sedimentos retidos baseada nos ensaios realizados no LH-IST

A partir do levantamento topobatimétrico realizado no âmbito dos ensaios do LH-IST ao final de cada experimento, foi possível determinar os volumes de baquelite decantados, associados às diferentes configurações geométricas deste estudo. Estes volumes foram obtidos para as geometrias CC, CR e LR, já que se dispunha, nestes casos, das curvas de nível completas.

O volume sólido aferido referiu-se à região de monitoramento da sonda topobatimétrica utilizada. Com efeito, levou-se em conta nesta abordagem parte considerável do volume do reservatório, cobrindo longitudinalmente a extensão de 1,36 m, transversalmente a largura de 0,812 m e verticalmente a profundidade máxima de 0,143 m. As dimensões horizontais corresponderam à amplitude de deslocamento da sonda empregada nos ensaios com sedimentos; por sua vez, a espessura máxima passível de ser formada estava vinculada à profundidade estabelecida para o ensaio com vazão igual a 1,00 L/s. Tendo em vista suas dimensões e a profundidade líquida (1,5 m x 1,0 m x 0,143 m), o volume total do reservatório foi de 0,215 m³, porém, as considerações que se seguem foram relativas ao volume de monitoramento de 0,158 m³.

Para determinação dos volumes decantados, utilizou-se o programa computacional MatLab e, mais especificamente, a função ConvHull, para triangulação dos pontos tridimensionais obtidos em cada ensaio e avaliação dos volumes relativos a sólidos convexos. Os valores resultantes, referentes aos volumes decantados, são apresentados na Tabela 6.8. Ademais, calculou-se para cada configuração geométrica a parcela do volume do reservatório afetado pela sedimentação, em termos percentuais, dividindo-se o volume decantado pela capacidade máxima de decantação (0,158 m³).

De acordo com a Tabela 6.6, foi possível constatar que a geometria de reservatório CC foi aquela em que houve menor deposição de sedimentos (68,97% do volume de monitoramento),

seguido da configuração CR (71,12%) e da configuração LR (77,90%), a de maior eficiência de retenção.

TABELA 6.6 – Volumes de sedimentos retidos e percentual de deposição sólida nos ensaios do LH-IST

Configuração geométrica	Volume de monitoramento ocupado por baquelite	Parcela do reservatório afetado pela sedimentação
	[m ³]	[%]
CC	0,1089	68,97
CR	0,1123	71,12
LR	0,1230	77,90

Quando observadas novamente as morfologias finais obtidas para cada cenário (Figuras 6.15 a 6.17 para as configurações CC, LR e CR, respectivamente), tem-se a impressão clara de que os resultados são bastante coerentes com as áreas de deposição. Segundo a Figura 6.16, era esperado que a área de sedimentação para a configuração LR, maior que as das outras geometrias, correspondesse ao maior volume decantado. Por se tratar da configuração geométrica com maior desalinhamento entre os canais de entrada e de saída, correspondeu à situação de maior percurso do jato, por meio do qual o sedimento foi arrastado, decantando-se ao longo dessa trajetória e lateralmente, por escorregamento.

Para as configurações geométricas LL e LC, não foram determinados os respectivos percentuais de deposição sólida no reservatório, pois não se dispunha de levantamento topográfico final. Contudo, levando-se em conta aspectos tais como a área de deposição alcançada ao final de cada ensaio (Figuras 6.18 e 6.19, respectivamente), a duração de cada experimento, os registros fotográficos e as observações em laboratório, pode-se aperceber que a configuração LL foi, indubitavelmente, aquela com menor eficiência de retenção sólida. O ensaio em pauta foi paralisado 6 horas após o início da alimentação sólida e correspondeu à formação de amplas áreas de estagnação, maiores que as dos demais ensaios. Além disso, representou uma das configurações em que os dois canais encontravam-se alinhados, porém, a sedimentação foi lateralmente limitada pela presença da parede esquerda do reservatório, o que não ocorreu para a configuração CC. No que se refere à configuração LC, cuja duração do ensaio foi de 9 horas, semelhante à da geometria LR, e cujos canais foram tão desalinhados quanto os da geometria CR, acredita-se que a respectiva taxa de sedimentação tenha sido ligeiramente inferior à do tipo LR e próxima à da configuração CR.

Globalmente, para o comprimento relativo L/B igual a 1,5 (comprimento do reservatório de 1,5 m e largura de 1,0 m) e com base na realização dos ensaios com sedimento para 5 diferentes configurações geométricas, pode-se inferir que: (1) a maior retenção de sedimentos foi observada para o caso com maior desalinhamento entre os canais de entrada e de saída (geometria LR), e isso se explica em função do percurso do jato, mais extenso do que nos outros casos. Reitera-se que o jato foi o responsável pelo arrastamento dos sólidos sedimentáveis; (2) por outro lado, a eficiência de retenção sólida foi menor nas situações em que os canais de entrada e de saída estiveram alinhados, o que se constatou quantitativamente para a configuração CC e qualitativamente para a configuração LL. Nestes casos, o trajeto percorrido pelo jato foi o menor possível dentre as 5 geometrias de referência. Supôs-se, sem se comprovar numericamente, que o tipo LL armazenou ainda menos sedimentos que o tipo CC, pois os sólidos decantados ficaram limitados de se expandirem lateralmente por conta da proximidade dos canais com a parede lateral esquerda do reservatório e; (3) as demais configurações geométricas, LC e CR representaram situações intermediárias dos casos extremos citados em (1) e em (2).

6.1.5 Análise dos padrões de escoamento obtidos pós-deposição de sedimentos no reservatório do LH-IST

Além da caracterização da morfologia final, realizada para cada uma das cinco configurações geométricas de referência dos ensaios do LH-IST (CC, LC, LL, LR e CR), avaliaram-se os padrões de escoamento ao final de cada ensaio com sedimentos.

Para tanto, procedeu-se à realização de 2 ou 3 filmagens para cada configuração geométrica, durante cerca de 5 minutos. Utilizou-se novamente a técnica do LSPIV para determinação dos vetores de velocidade superficial.

A seguir, apresentam-se na Figura 6.23 os resultados relativos aos padrões de escoamento encontrados para os cinco ensaios com sedimentos. A partir da análise da referida figura, foi possível identificar aspectos semelhantes e distintos entre os padrões de escoamento relativos a cada configuração geométrica avaliada. Além disso, buscou-se avaliar a ocorrência ou não de alterações no comportamento hidrodinâmico, em cada configuração, provocada pela deposição sólida no reservatório. Para tanto, compararam-se os padrões de escoamento pós-sedimentação com aqueles obtidos nos ensaios com água limpa.

FIGURA 6.23 – Padrões de escoamento pós-deposição de sedimentos

Q = 1,00 L/s

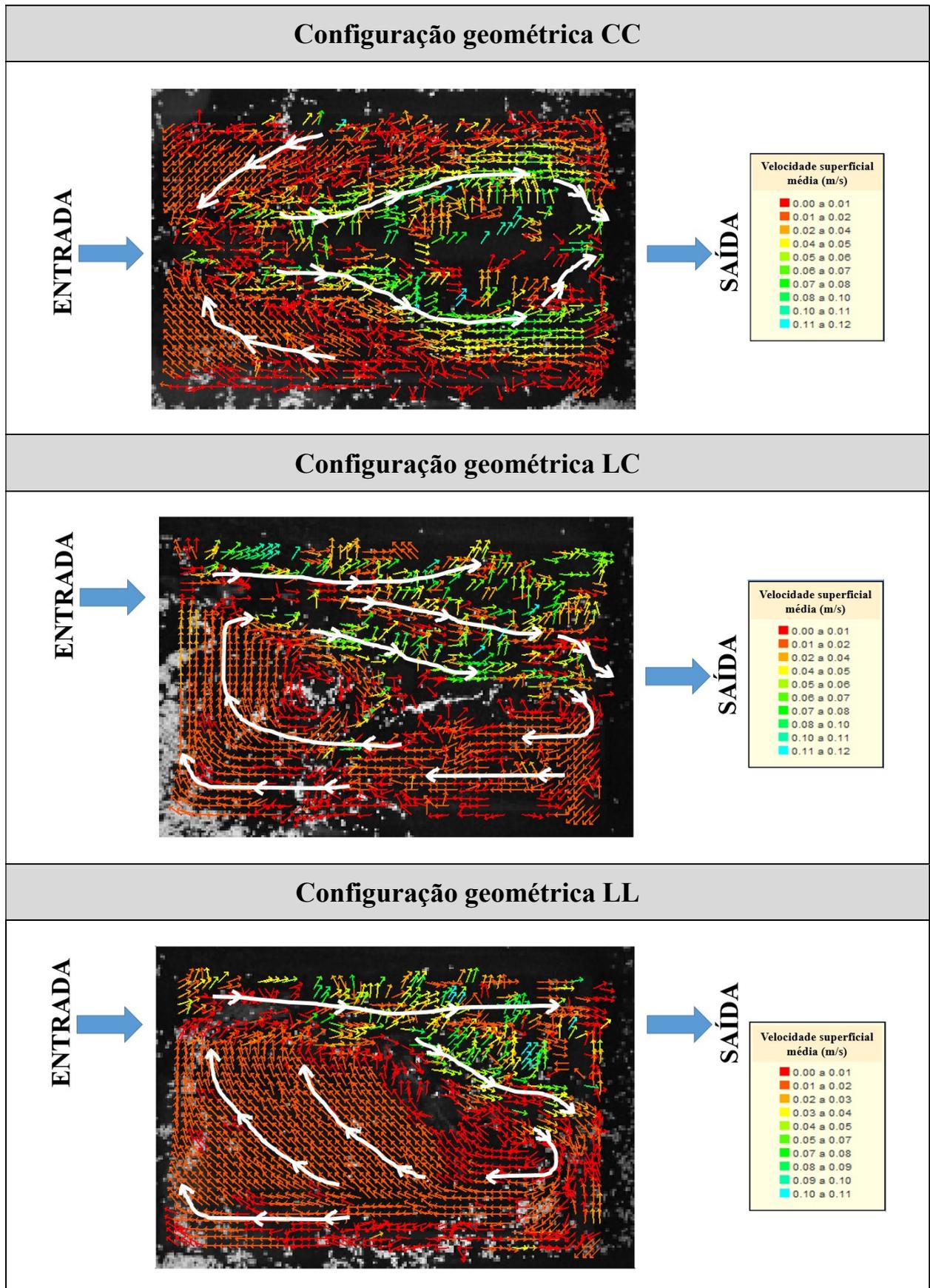
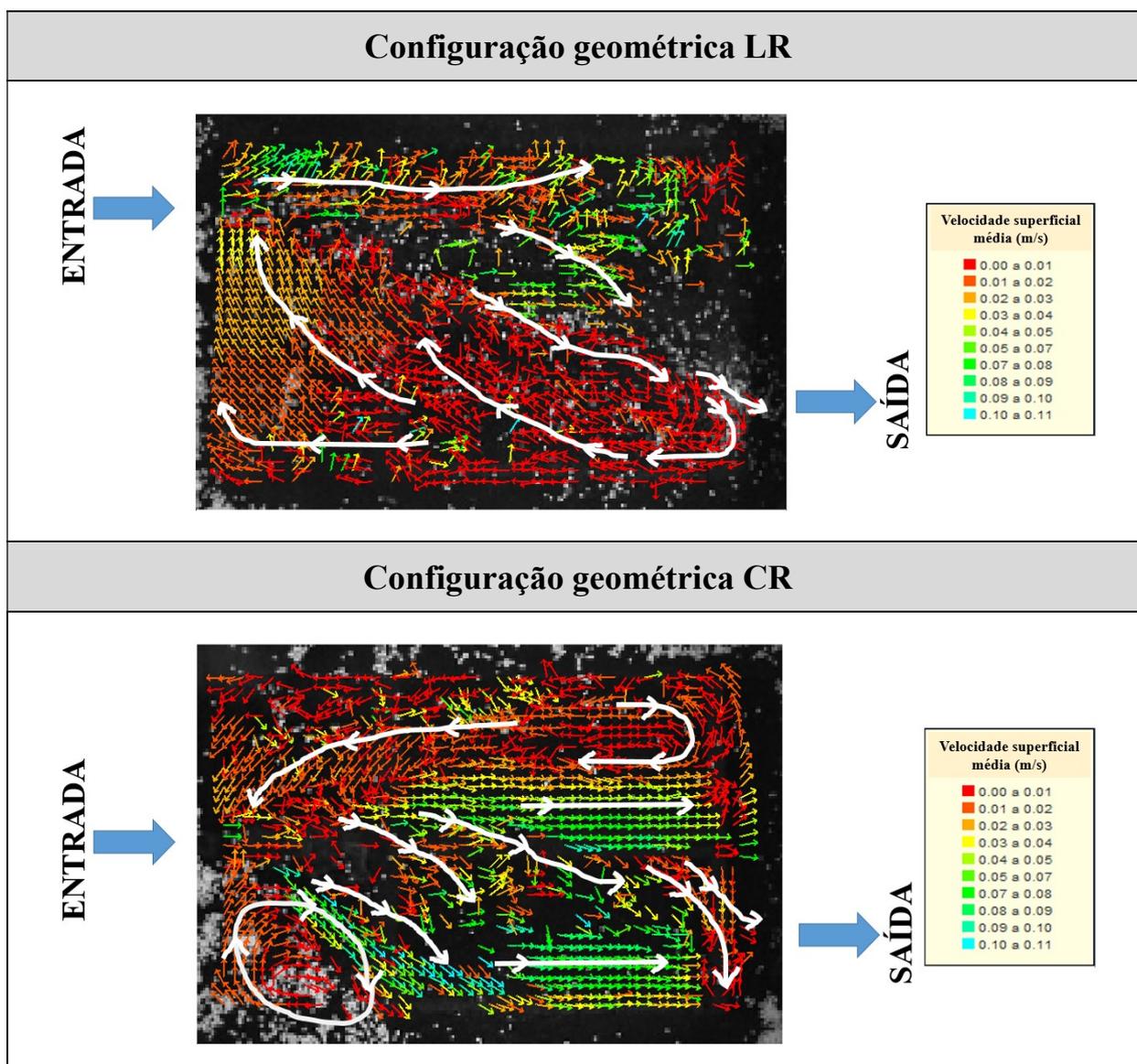


FIGURA 6.23 – Padrões de escoamento pós-deposição de sedimentos

Q = 1,00 L/s (continuação)



A configuração geométrica CC foi aquela cujo padrão de escoamento pós-deposição de sedimentos foi o mais alterado em relação ao respectivo ensaio com água limpa. Enquanto no ensaio sem a presença de sedimentos foi verificada, para a vazão de 1,00 L/s, assimetria hidrodinâmica, após a inserção de baquelite houve simetria. Com efeito, o jato aparentou dividir-se em dois escoamentos espelhados e divergentes, ligeiramente defletidos para as laterais do reservatório. Em seus cantos de montante, tanto à esquerda quanto à direita, observou-se a formação de uma recirculação do escoamento, de jusante para montante, direcionada para o centro. Nessas localidades, formaram-se duas zonas de estagnação, em que praticamente não houve deposição de sedimentos, conforme salientado anteriormente.

Já para as demais configurações geométricas, isto é, para os tipos LC, LL, LR e RC, o comportamento hidrodinâmico foi relativamente similar ao do correspondente experimento com água limpa. Especificamente para as configurações LC, LL e LR, houve espalhamento lateral do jato sobre o depósito de baquelite, sobretudo, do meio para a porção de jusante do reservatório. Tal espalhamento ocorreu sempre à esquerda de um segmento de reta imaginário ligando o canal de entrada e de saída. À direita deste segmento, nos três casos, verificou-se a formação de um vórtice de grande proporção, em sentido horário, similar ao observado no ensaio com água limpa, porém, mais achatado junto à porção de jusante do reservatório.

Dentre as cinco configurações geométricas abordadas no âmbito do LH-IST, o tipo CR correspondeu àquele cujo comportamento hidrodinâmico foi o mais parecido com o observado no ensaio com água limpa análogo. Com efeito, o jato desviou-se segundo uma trajetória aproximadamente retilínea, entre os canais de entrada e de saída. À esquerda dele, foi averiguado um vórtice em sentido anti-horário de maior proporção, apesar de também ter sido identificada alguma recirculação com rotação invertida no interior daquele vórtice maior. À direita do jato, formou-se outro vórtice junto à extremidade direita de montante do reservatório, com sentido de rotação horário.

No que se refere às velocidades superficiais determinadas pós-sedimentação, verificou-se em todos os casos que estas foram significativamente aumentadas em relação à condição isenta de sedimentos, conforme indicado na Tabela 6.7 (velocidades máximas observadas, sempre ao longo do jato). Tal aumento nas velocidades foi em decorrência da redução da profundidade do escoamento, sem que houvesse diminuição da vazão líquida, e da recirculação desta vazão.

TABELA 6.7 – Valores máximos observados para as velocidades superficiais antes e após a realização dos ensaios com sedimentos no LH-IST

Configuração geométrica	Velocidade máxima antes do ensaio com sedimentos	Velocidade máxima após o ensaio com sedimentos
	[m/s]	[m/s]
CC	0,06	0,12
LC	0,05	0,12
LL	0,06	0,11
LR	0,04	0,11
CR	0,06	0,11

6.1.6 Avaliação da influência da sedimentação sobre a velocidade de escoamento no reservatório do LH-IST

Como parte da realização dos 5 ensaios com utilização de baquelite (configurações geométricas CC, LC, LL, LR e CR) no LH-IST, optou-se por monitorar as velocidades em profundidade em 12 verticais previamente estabelecidas. Objetivou-se, nesta etapa da pesquisa, avaliar a influência do processo de deposição de sedimentos sobre as velocidades medidas nesses pontos. Tal monitoramento foi intercalado com os levantamentos batimétricos horários, a partir de 1,5 hora do início da alimentação sólida e, em seguida, a cada 2 horas, por exemplo, com 3,5 e 5,5 horas, até a interrupção do respectivo ensaio.

Ainda com relação às 12 verticais de monitoramento, estas foram distribuídas da seguinte forma: 3 delas na primeira seção transversal de referência para os ensaios com água limpa (a 5 cm da parede de montante do reservatório), 3 verticais na seção transversal seguinte (20 cm a jusante da primeira), 3 verticais numa seção localizada na porção média do reservatório (a 85 cm da parede de montante) e 3 verticais na seção transversal mais próxima da parede de jusante, distando de 5 cm desta. Das 3 verticais de cada seção, escolheu-se uma mais à esquerda do eixo longitudinal do reservatório, outra alinhada com o eixo e uma terceira mais à direita. Além disso, para cada vertical, tomaram-se velocidades instantâneas por 60 segundos nas mesmas profundidades de referência dos ensaios com água limpa com vazão igual a 1,00 L/s (a 4,3 cm, 7,2 cm e 11,4 cm em relação ao fundo do reservatório). Para tanto, utilizou-se novamente a sonda *Vectrino* (do tipo *side looking probe*). Após tratamento dos dados coletados, determinaram-se as médias das componentes u , v e w das velocidades. Os valores médios foram utilizados na plotagem de representações tridimensionais de vetores de velocidade nos pontos de referência para cada instante de tempo das medições e de planos horizontais bidimensionais representativos das componentes u e v da velocidade, para cada profundidade considerada. Julgou-se conveniente, para realização da análise que se segue, apresentar os resultados concernentes aos planos bidimensionais, ao longo do tempo de ensaio, unicamente para a profundidade de 11,4 cm, em relação ao fundo do reservatório (FIGURAS 6.24 a 6.28). Verificou-se também, nesta etapa do estudo, que as velocidades medidas nas três profundidades de referência de uma mesma vertical eram muito próximas, o que justifica a exibição do mapeamento vetorial para uma altura apenas.

Cabe destacar que, à medida que foram se formando os depósitos de sedimento dentro do reservatório, os pontos de medição comprometidos por tal processo foram sendo eliminados.

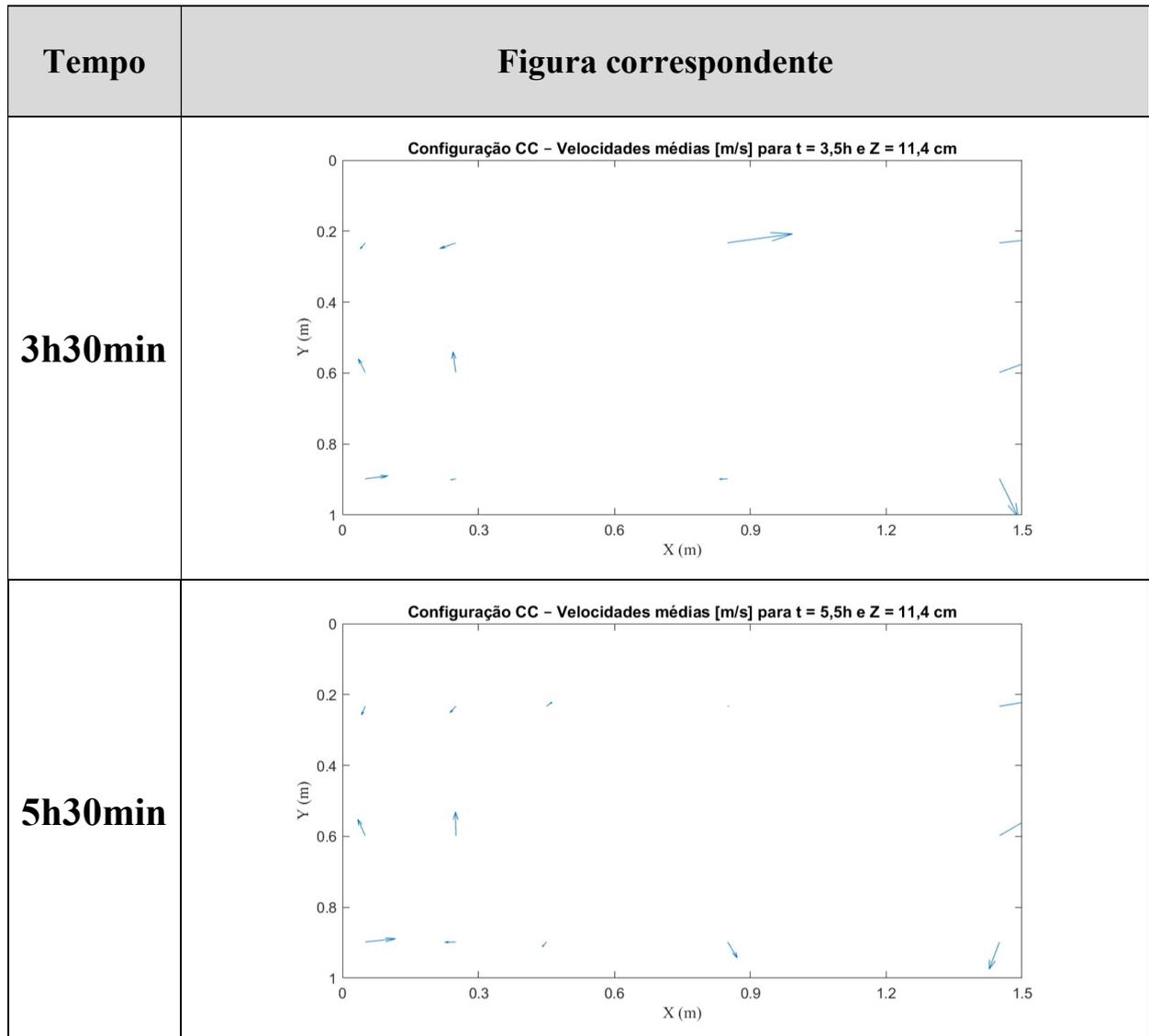
Para a última coleta de velocidades antes da interrupção de cada ensaio, privilegiou-se o monitoramento, não só daqueles pontos previamente selecionados, mas também de outros posicionados, sobretudo, nas zonas de estagnação que se formaram no reservatório.

A Figura 6.24 corresponde às medições de velocidade para a configuração geométrica CC, nos instantes $t = 0$ (antes do início da inserção de baquelite), $t = 1,5$ hora, $t = 3,5$ horas e $t = 5,5$ horas (antes da interrupção do ensaio). Observou-se para $t = 1,5$ hora ter havido a centralização do deslocamento do jato, indicada pelo maior vetor, resultante da alteração morfológica promovida pela deposição da baquelite.

FIGURA 6.24 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica CC – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ cm)

Tempo	Figura correspondente
0h	<p>Configuração CC - Velocidades médias [m/s] para $t = 0$h e $Z = 11,4$ cm</p>
1h30min	<p>Configuração CC - Velocidades médias [m/s] para $t = 1,5$h e $Z = 11,4$ cm</p>

FIGURA 6.24 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica CC – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ cm) - *continuação*



É pertinente ressaltar que a figura relativa a $t = 0$, no caso da geometria CC, foi gerada a partir de dados do ensaio com água limpa para a vazão de 1,0 L/s. Naquela condição, o jato defletiu-se para o lado direito do reservatório. Entretanto, segundo a Figura 6.15, a qual contém a evolução morfológica temporal para a configuração CC nos ensaios com sedimento, verificou-se um desvio do jato para o lado oposto. Ainda assim, considerou-se pertinente apresentar a informação na Figura 6.24. Convém ainda observar que a discussão acerca desse comportamento hidrodinâmico espelhado para a configuração geométrica CC, entre os ensaios com água limpa e com sedimentos, já havia sido apresentada no subitem 6.1.4.

No decorrer do ensaio, para $t = 3,5$ horas e $t = 5,5$ horas, notou-se uma diminuição gradual das velocidades medidas, tendo em vista a diminuição dos comprimentos dos vetores indicados

nas figuras correlatas. Os locais de medição das velocidades foram aqueles em que a profundidade líquida foi superior a 3,0 cm, portanto, externamente às grandes áreas de sedimentação e coincidentes com as zonas de estagnação do reservatório. Já se esperava obter velocidades reduzidas nessas zonas de estagnação e é exatamente por tal razão que ali não houve deposição de baquelite, já que o material sólido não pode ser arrastado.

Para as três configurações em que o canal de entrada foi posicionado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório, isto é, para as geometrias LC, LL e LR (Figuras 6.25 a 6.27, respectivamente), observou-se ter havido uma variação temporal das velocidades medidas de forma bastante similar. Com efeito, foi visível uma tendência de pequena alteração na direção do jato, indicada pelos vetores maiores de cada figura, que inicialmente apontavam para a parede lateral esquerda do reservatório ($t = 0$) e que passaram a seguir uma trajetória paralela ao canal de entrada (a partir de $t = 1,5$ h). Para as demais regiões do reservatório em que houve registro de velocidades, verificou-se uma progressiva diminuição nos módulos destas, alcançando valores próximos de zero. Assim como para a configuração CC, corresponderam às zonas de estagnação do reservatório, com profundidade líquida superior a 3,0 cm e isentas da deposição de sedimentos.

Mais adiante, apresenta-se a Figura 6.28, relacionada à configuração geométrica CR. Neste caso, não foi possível identificar uma tendência clara de deslocamento do jato, sobretudo pelo fato de que muitas das velocidades que seriam tomadas nessa região não foram realizadas em função da espessa camada de baquelite. De qualquer forma, tendo como referência a Figura 6.17, pode-se observar que os módulos das velocidades foram maiores nas áreas em que havia depósito de sedimentos expressivo. Essas áreas corresponderam às localidades em que os vetores de velocidades são mais extensos ($t = 1,5$ hora a $t = 6,5$ horas). Por outro lado, em outras regiões as velocidades foram bastante reduzidas e, por esta razão, não houve deposição de sedimentos (zonas de estagnação).

FIGURA 6.25 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica LC – $Q = 1,00 \text{ L/s}$ ($z = 11,4 \text{ cm}$)

Tempo	Figura correspondente
0h	
1h30min	
3h30min	

FIGURA 6.25 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica LC – $Q = 1,00 \text{ L/s}$ ($z = 11,4 \text{ cm}$) - *continuação*

Tempo	Figura correspondente
5h30min	
7h30min	
9h	

FIGURA 6.26 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica LL – $Q = 1,00 \text{ L/s}$ ($z = 11,4 \text{ cm}$)

Tempo	Figura correspondente
<p style="text-align: center;">0h</p>	
<p style="text-align: center;">1h30min</p>	
<p style="text-align: center;">6h</p>	

FIGURA 6.27 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica LR – $Q = 1,00 \text{ L/s}$ ($z = 11,4 \text{ cm}$)

Tempo	Figura correspondente
<p style="text-align: center;">0h</p>	
<p style="text-align: center;">1h30min</p>	
<p style="text-align: center;">3h30min</p>	

FIGURA 6.27 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica LR – $Q = 1,00 \text{ L/s}$ ($z = 11,4 \text{ cm}$) - *continuação*

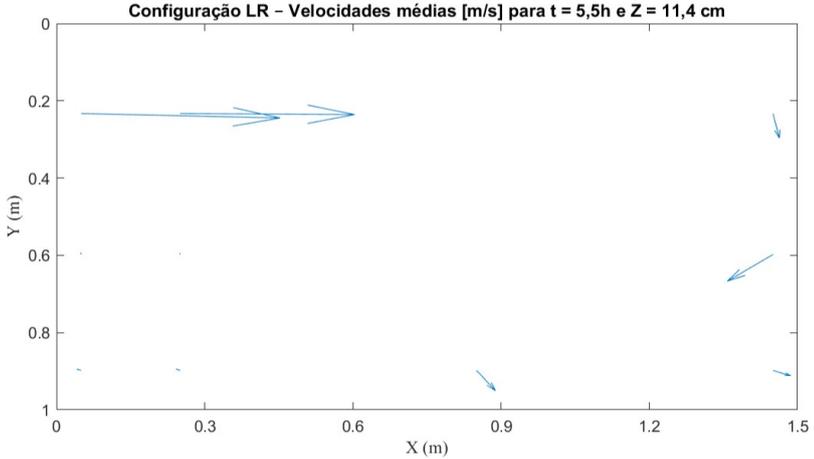
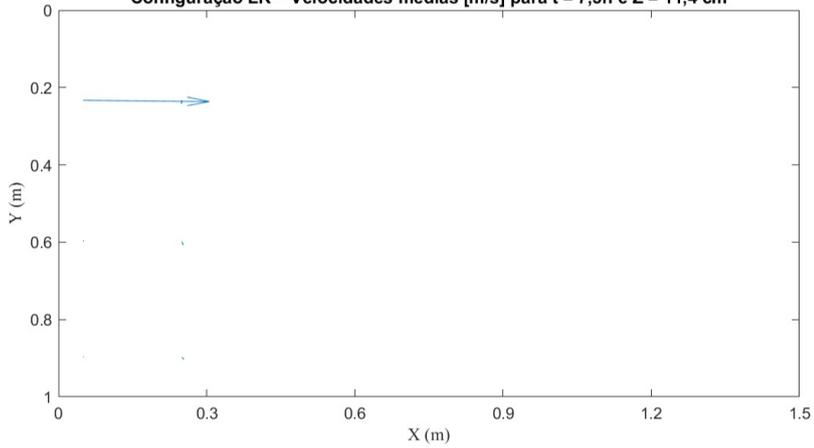
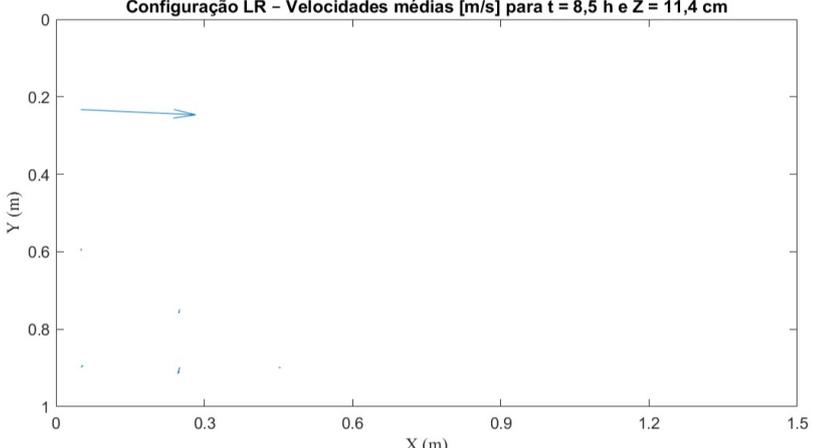
Tempo	Figura correspondente
5h30min	 <p>Configuração LR – Velocidades médias [m/s] para $t = 5,5h$ e $Z = 11,4 \text{ cm}$</p>
7h30min	 <p>Configuração LR – Velocidades médias [m/s] para $t = 7,5h$ e $Z = 11,4 \text{ cm}$</p>
8h30min	 <p>Configuração LR – Velocidades médias [m/s] para $t = 8,5 \text{ h}$ e $Z = 11,4 \text{ cm}$</p>

FIGURA 6.28 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica CR – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ cm)

Tempo	Figura correspondente
<p style="text-align: center;">0h</p>	
<p style="text-align: center;">1h30min</p>	
<p style="text-align: center;">3h30min</p>	

FIGURA 6.28 – Vetores de velocidade obtidos em ensaio com baquelite para a configuração geométrica CR – $Q = 1,00$ L/s ($z = 11,4$ cm) - *continuação*

Tempo	Figura correspondente
5h30min	
6h30min	

6.2 Modelagem numérica

6.2.1 Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no CPH-UFMG: *WOLF 2D*

Os 18 experimentos realizados com água limpa no âmbito do CPH-UFMG foram também simulados numericamente. Em uma primeira abordagem, empregou-se o programa computacional acadêmico *WOLF 2D*, desenvolvido pela Universidade de Liège (Bélgica).

De modo geral, as simulações demandaram, cada uma, cerca de 10-12h de processamento computacional ininterrupto, correspondendo a pelo menos 11.000 iterações registradas,

espaçadas de intervalos de tempo Δt de um segundo. Foram interrompidas tão logo tenha sido atingida a solução estacionária.

Os campos de velocidade superficial obtidos com uso do programa WOLF 2D foram agrupados na Figura 6.29 e ordenados em função da configuração geométrica (CC, LC, LL, LR, RC e CR) e da vazão de referência (0,50, 1,25 e 3,40 L/s).

Procurou-se segmentar a apresentação dos resultados numéricos em duas etapas: a primeira, referente à caracterização dos padrões de escoamento para cada configuração geométrica modelada e em função de suas três vazões de referência; a segunda, por sua vez, através de análise comparativa do comportamento hidrodinâmico observado em todos os cenários numéricos, de um modo geral, e a confrontação desses resultados com aqueles obtidos experimentalmente.

De acordo com a interpretação da Figura 6.29, no que se refere à configuração CC, foi possível verificar a indicação de um padrão de escoamento simétrico característico do tipo S0 definido por Dufresne *et al.* (2010a,b), independentemente da vazão. Com efeito, observou-se em todos os três casos que o jato não sofreu deflexão lateral significativa, tendo se deslocado segundo uma trajetória praticamente retilínea e alinhada com o eixo longitudinal do reservatório. Observou-se ainda o desenvolvimento de dois vórtices de proporções similares, relativamente extensos, um à esquerda e outro à direita do jato.

As áreas indicadas pela cor azul escuro, em cada figura, simbolizaram regiões em que a velocidade do escoamento foi nula ou próxima disso.

Cumprir destacar que os padrões de escoamento referentes às configurações geométricas assimétricas (LL, LC, LR, RC e CR) não foram classificados segundo a abordagem estabelecida por Dufresne *et al.* (2010a,b) e Camnasio, Orsi e Schleiss (2011). A padronização definida pelos autores em pauta foi instituída para uma disposição dos canais de entrada e de saída do tipo CC.

Quanto à configuração LC, verificou-se que o jato formado na entrada do reservatório sofreu deflexão para a esquerda no caso das maiores vazões (1,25 e 3,40 L/s), aparentando aderir-se à parede lateral esquerda e direcionando o escoamento até o canal de saída numa trajetória de forma parabólica e em sentido horário. No restante do reservatório, notou-se a formação de

um grande vórtice ao longo de toda a sua extensão longitudinal. Em contrapartida, o resultado numérico indicou um comportamento distinto para a vazão de 0,50 L/s, já que o jato direcionou-se para o canal de saída sem significativo desvio lateral para a esquerda. Observou-se, neste caso em particular, a formação de duas zonas de recirculação, uma maior à direita e outra mais alongada à esquerda do jato.

É conveniente, nesta etapa, discutir a razão pela qual o comportamento hidrodinâmico é distinto em função da vazão, como foi observado para a configuração LC. De maneira geral, o escoamento proveniente de montante vai divergindo e alargando para jusante. Para o fluido chegar até o canal de saída, vai sofrer uma curvatura que faz com que parte das partículas estejam animadas de movimento transversal, predominantemente dirigido da esquerda para a direita. Parte destas partículas não entra no canal de saída e vai voltar para montante, obrigado pela parede direita. Desse modo, acumula-se matéria (água) do lado direito que faz com que se estabeleça uma grande circulação e aumente a pressão, por aumento do nível de água. O jato é assim forçado a desviar-se para a esquerda. Ainda que haja partículas que façam o movimento simétrico, serão em muito menor quantidade, de modo que seu efeito seja menos significativo em termos dos fluxos de massa e de quantidade de movimento. Quando a vazão é menor, o efeito destacado acima é menos acentuado, já que o fluxo de retorno é menor. Por tal razão, não há adesão do jato à parede esquerda para vazões pequenas. Trata-se da manifestação do efeito Coanda, conforme relatado na literatura (SHAPIRA; DEGANI; WEIHS, 1990; DEWALS *et al.*, 2008).

A configuração geométrica LL, por sua vez, caracterizou-se por apresentar um padrão de escoamento bastante similar para as todas as três vazões de referência. Nesses casos, o jato desviou-se para a esquerda e deslocou-se aderido à parede lateral do reservatório, formando a sua direita uma grande zona de recirculação. Neste caso, o jato tende a arrastar consigo matéria de ambos os lados e, inicialmente, em iguais quantidades. Como a matéria disponível à esquerda é em menor quantidade e há forças de atrito mobilizadas na camada limite junto à parede esquerda, o decréscimo da massa por unidade de área (em planta) é maior à esquerda, o que faz com que se crie um gradiente de pressão com valores de pressão (e níveis) menores à esquerda do que à direita. Uma vez aderindo à parede, o jato tende a entrar descentralizado no canal de saída e o efeito discutido anteriormente passa a prevalecer e a impedir o descolamento do jato da parede esquerda.

No que tange à configuração geométrica LR, foi possível verificar um padrão de escoamento equivalente para as vazões maiores, quais sejam, de 1,25 L/s e 3,40 L/s. Nesses casos, o jato sofreu deflexão para o lado esquerdo e percorreu uma trajetória rente às paredes laterais do reservatório, até sua chegada ao canal de saída, resultando na formação de uma grande zona de recirculação a sua direita. Por outro lado, o resultado numérico não indicou o desvio lateral do jato para a menor vazão. De forma distinta ao que foi notado para as vazões maiores, caracterizou-se pela formação de dois vórtices, um de cada lado do jato. Quando confrontado com os experimentos realizados no CPH-UFMG (FIGURA 5.1), verifica-se que tal comportamento numérico para a menor vazão não corresponde ao que se observou em laboratório.

A configuração RC, do ponto de vista geométrico, representou a forma “espelhada” da configuração LC. Em termos qualitativos, sua resposta numérica relativa ao comportamento hidrodinâmico pareceu corresponder à mesma semelhança geométrica, independentemente da vazão.

Finalmente, a configuração CR indicou a formação de um vórtice em sentido anti-horário e do lado esquerdo do reservatório (em relação ao sentido do escoamento), para as três vazões modeladas. O jato, por sua vez, foi desviado para o lado direito, sem contudo ficar aderido à parede lateral do reservatório. À direita do jato, notou-se a formação de uma grande “zona morta” sinalizada pela cor azul escuro, com possível desenvolvimento de pequenos vórtices, os quais não são claramente identificados pela figura.

A avaliação global dos resultados numéricos em questão possibilitou estabelecer duas tendências características: (1) quando o canal de entrada foi posicionado à esquerda ou à direita em relação ao eixo longitudinal do reservatório, ocorreu o desvio do jato rumo à parede lateral mais próxima (exceto para a vazão de 0,50 L/s das configurações LC e LR). Além disso, o jato aderiu-se à parede lateral mais próxima no caso das maiores vazões, e para a menor vazão de referência, apenas quando o canal de saída esteve alinhado com o de entrada (geometria LL) e; (2) quando o canal de entrada foi instalado na posição central, alinhado com o eixo longitudinal do reservatório, o desvio do jato foi inexistente ou bastante sutil. De toda forma, esse jato não alcançou qualquer parede lateral, independentemente da vazão dentre aquelas simuladas.

FIGURA 6.29 – Campos de velocidade dos ensaios realizados no CPH-UFMG obtidos numericamente com emprego do software WOLF 2D

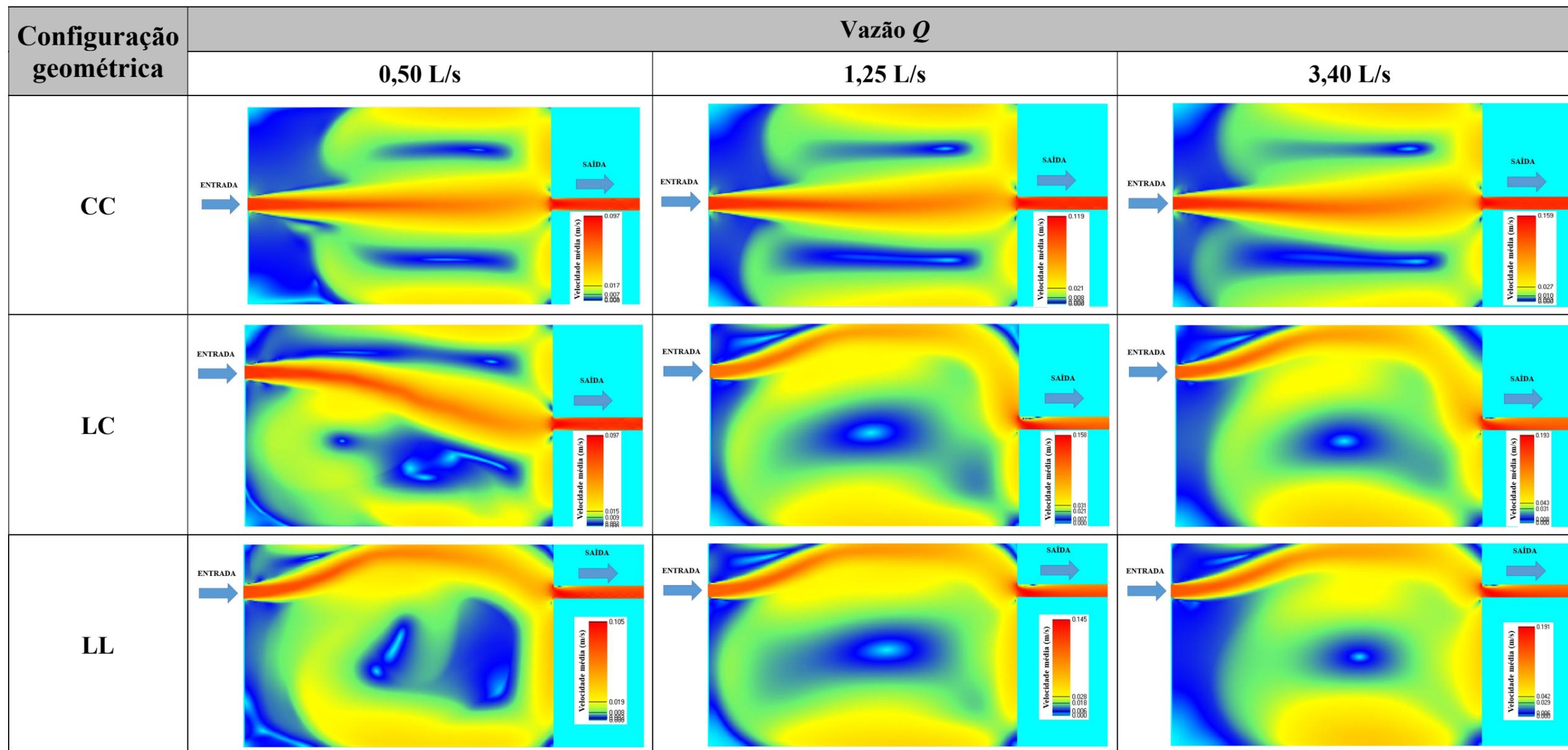
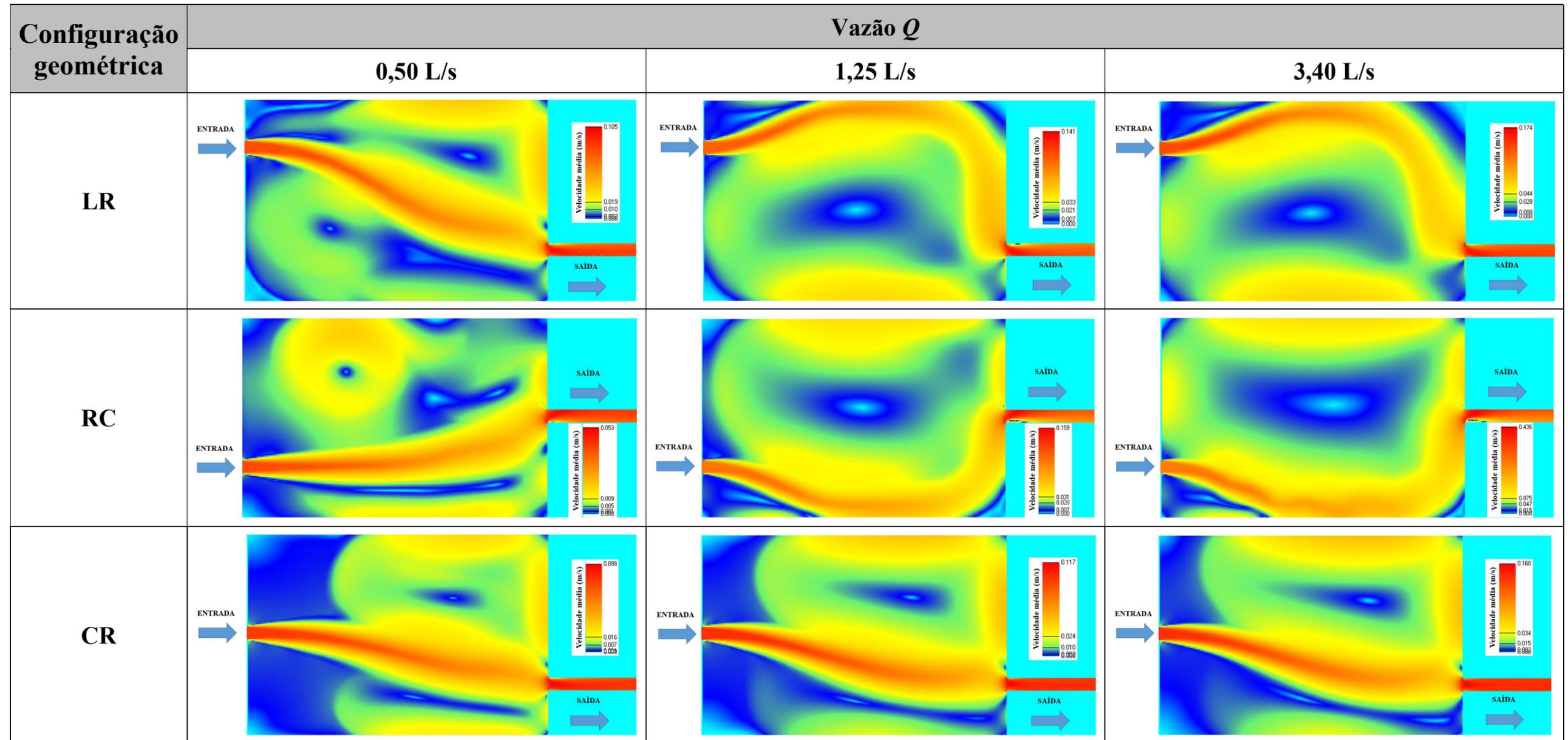


FIGURA 6.29 – Campos de velocidade dos ensaios realizados no CPH-UFMG obtidos numericamente com emprego do *software* WOLF 2D (continuação)



Com o intuito de tornar mais tangível e simplificada a comparação entre os resultados experimentais, no âmbito do CPH-UFMG, e os numéricos (WOLF 2D), elaborou-se o Quadro 6.3. Destacou-se com a cor verde a linha correspondente a cada ensaio em que houve divergência entre os resultados experimental e numérico.

QUADRO 6.3 – Comparativo de aspectos hidrodinâmicos identificados experimental e numericamente (WOLF 2D) – Experimentos do CPH-UFMG com água limpa

Config.	Vazão (L/s)	Resultados experimentais		Resultados numéricos	
		Padrão de escoamento	Desvio do jato	Padrão de escoamento	Desvio do jato
CC	0,50	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente
	1,25	ASSIMÉTRICO (A1)	Direita	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente
	3,40	ASSIMÉTRICO (A1)	Direita	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente
LC	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Inexistente
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
LL	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
LR	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Inexistente
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
RC	0,50	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Discreto para a direita
	1,25	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Direita
	3,40	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Direita
CR	0,50	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Inexistente
	1,25	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Discreto para a direita
	3,40	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Discreto para a direita

Com relação à configuração CC, observou-se a indicação de simetria hidrodinâmica por parte dos resultados numéricos para todas as três vazões consideradas. Por outro lado, experimentalmente, essa condição foi observada apenas para $Q = 0,50$ L/s. Em laboratório, aparentemente bastaria existir um pequeno desalinhamento entre os canais ou aleatoriedade da forma do jato no início do ensaio (condição inicial) para justificar a existência de assimetria hidrodinâmica tal como observada para as vazões de 1,25 e 3,40 L/s.

Quanto ao uso do modelo WOLF 2D, considerou-se como condição de contorno de montante uma distribuição da vazão específica ligeiramente perturbada, conforme recomendado por Dewals *et al.* (2008) e Dewals *et al.* (2012). Caso contrário, não haveria possibilidade, do

ponto de vista numérico, de se obter um resultado assimétrico para a configuração CC, similar ao que ocorreu experimentalmente. Por outro lado, a existência dessa condição de contorno de montante ligeiramente perturbada não impediria que uma simulação convergisse para um resultado simétrico, uma vez que o cálculo atenuaria essa assimetria. Contudo, o cumprimento de tal recomendação não resultou na obtenção de um padrão de escoamento assimétrico, coerente com as observações experimentais.

No que se refere às configurações LC, LR e RC, o padrão de escoamento numérico para a menor vazão (0,50 L/s) também não correspondeu exatamente ao que se observou no CPH-UFMG. Enquanto, experimentalmente, o jato desviou-se rumo à parede lateral mais próxima, aderindo-se a ela, não se constatou o mesmo comportamento em sua correspondente solução numérica. Acredita-se que o modelo de turbulência $k-\epsilon$, utilizado no âmbito das simulações com o modelo acadêmico WOLF 2D seja menos preciso para representar situações cujo regime de escoamento é mais dependente da influência das forças viscosas. Trata-se de uma hipótese que deve ser mais bem avaliada em estudos futuros. De acordo com a experiência da literatura, já havia sido constatada a dificuldade de se reproduzir, utilizando o WOLF 2D, a transição entre os padrões de escoamento simétrico e assimétrico em reservatório rasos com geometria do tipo CC (DUFRESNE *et al.*, 2011).

Atinente à configuração CR, os resultados experimentais e numéricos para todas as vazões avaliadas foram relativamente divergentes em função do desvio do jato para a direita. Experimentalmente, houve uma deflexão mais acentuada, não reproduzida através do programa WOLF 2D.

6.2.2 Comparação entre resultados numéricos de caracterização dos padrões de escoamento com água limpa do CPH-UFMG: WOLF 2D x Autodesk CFD

Como ferramenta acessória à avaliação da capacidade de reprodução, por parte do modelo WOLF 2D, das condições hidrodinâmicas observadas experimentalmente no reservatório do CPH-UFMG, utilizou-se também o programa computacional Autodesk® CFD para posterior comparação dos resultados. Nesse sentido, foram gerados 18 cenários de simulação numérica, apresentados na Figura 6.30, referentes às 6 configurações geométricas de referência para o reservatório brasileiro (CC, LC, LL, LR, RC e CR), assim como as 3 vazões consideradas para cada uma delas, em regime permanente (0,50 L/s, 1,25 L/s e 3,40 L/s).

FIGURA 6.30 – Campos de velocidade dos ensaios realizados no CPH-UFMG obtidos numericamente com emprego do software Autodesk® CFD

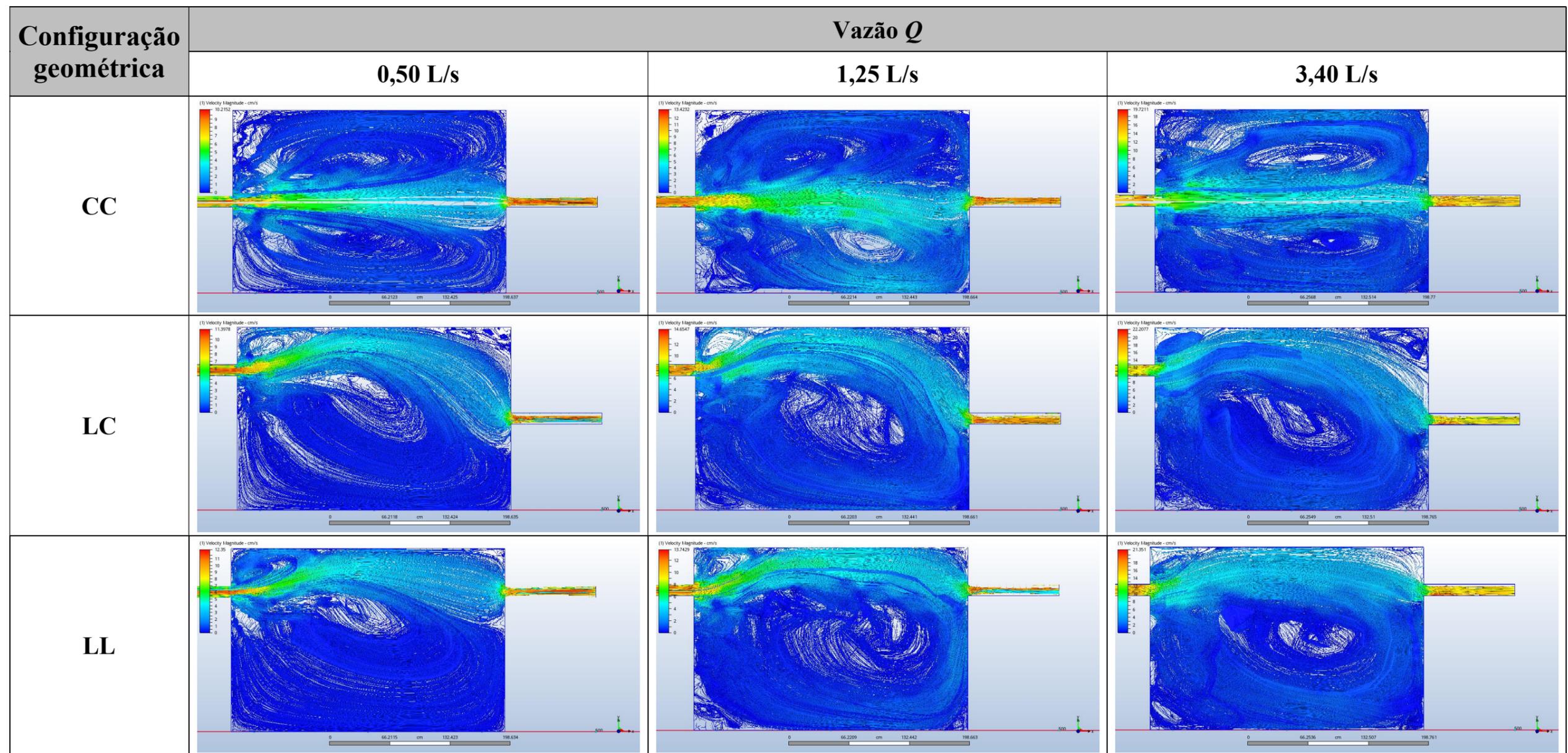
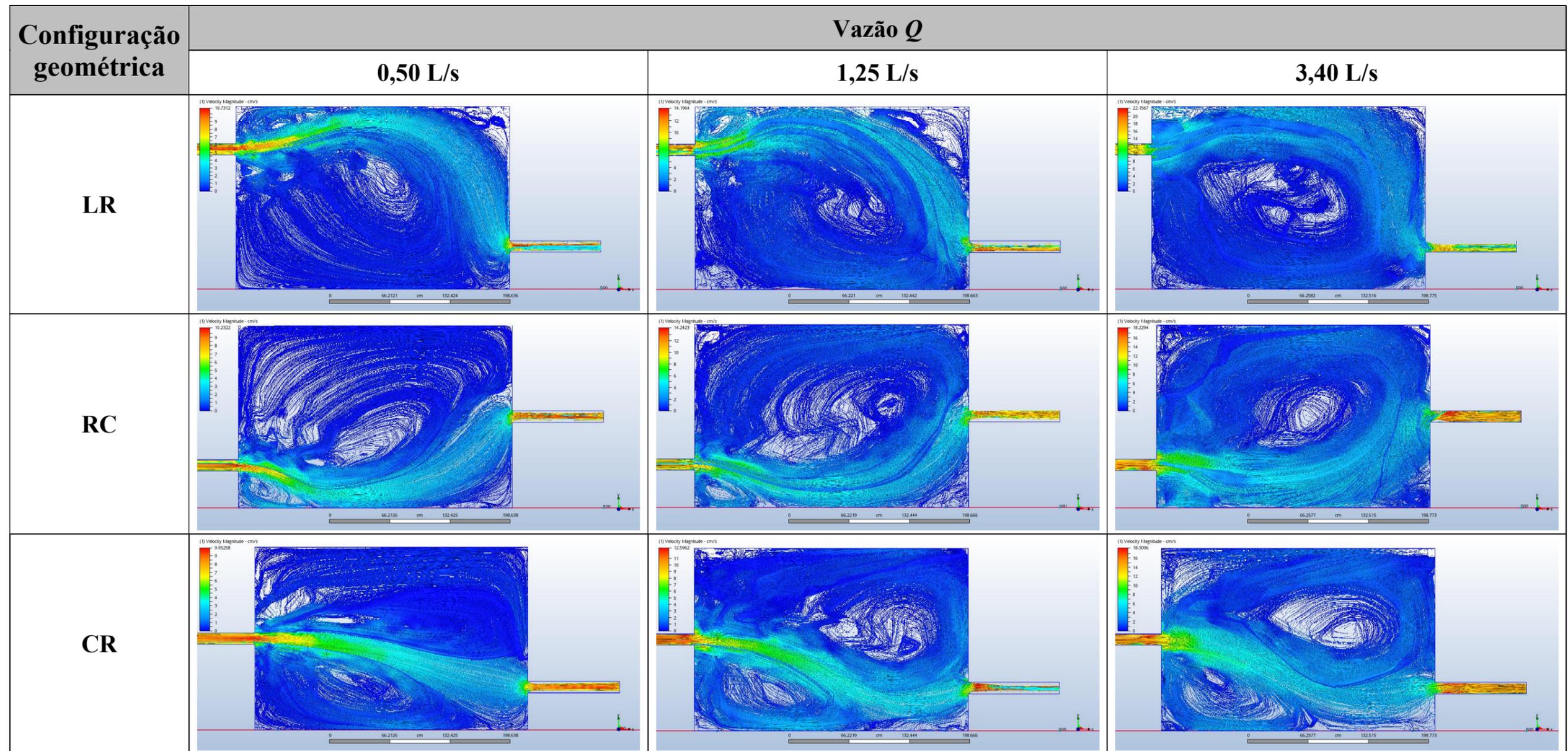


FIGURA 6.30 – Campos de velocidade dos ensaios realizados no CPH-UFMG obtidos numericamente com emprego do software Autodesk® CFD (continuação)



Para comparação qualitativa dos resultados numéricos obtidos com os dois programas computacionais (WOLF 2D e Autodesk® CFD), optou-se por condensar no Quadro 6.4 informações acerca do padrão de escoamento observado e sobre a trajetória de deslocamento do jato. Convém relembrar que os resultados referentes ao WOLF 2D foram apresentados na Figura 6.29.

Visando facilitar a comparação entre os resultados numéricos, foram destacadas com sombreamento verde as linhas do quadro em que houve divergência nos resultados.

QUADRO 6.4 – Comparativo de aspectos hidrodinâmicos numéricos entre WOLF 2D e Autodesk® CFD – Experimentos do CPH-UFMG com água limpa

Config.	Vazão (L/s)	WOLF 2D		Autodesk® CFD	
		Padrão de escoamento	Desvio do jato	Padrão de escoamento	Desvio do jato
CC	0,50	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente
	1,25	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente
	3,40	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente	SIMÉTRICO (S0)	Inexistente
LC	0,50	ASSIMÉTRICO	Inexistente	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
LL	0,50	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
LR	0,50	ASSIMÉTRICO	Inexistente	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	1,25	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
	3,40	ASSIMÉTRICO	Esquerda	ASSIMÉTRICO	Esquerda
RC	0,50	ASSIMÉTRICO	Discreto para a direita	ASSIMÉTRICO	Direita
	1,25	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Direita
	3,40	ASSIMÉTRICO	Direita	ASSIMÉTRICO	Direita
CR	0,50	ASSIMÉTRICO	Inexistente	ASSIMÉTRICO	Inexistente
	1,25	ASSIMÉTRICO	Discreto para a direita	ASSIMÉTRICO	Direita
	3,40	ASSIMÉTRICO	Discreto para a direita	ASSIMÉTRICO	Direita

Com base na interpretação do Quadro 6.4, foi possível constatar que, do ponto de vista qualitativo, o modelo WOLF 2D foi suficientemente robusto para reproduzir os padrões de escoamento simulados pelo programa Autodesk® CFD.

Essencialmente, o WOLF 2D considera em seu cálculo uma profundidade média de escoamento, simplificando nas equações bidimensionais de conservação da massa e da

quantidade de movimento todos os termos de ordem z . Por outro lado, o Autodesk® CFD modela o problema baseando-se na resolução das equações de Reynolds em sua forma completa. Em ambos os casos, considerou-se o mesmo modelo de turbulência ($k-\epsilon$).

As divergências identificadas no Quadro 6.4 estão relacionadas à menor vazão de referência (0,50 L/s), no caso das configurações LC, LR e RC, e às maiores vazões (1,25 L/s e 3,40 L/s) da configuração CR. É muito conveniente pontuar que a diferença básica entre aqueles resultados que apresentaram divergência, de forma geral, está associada à deflexão do jato e de que modo isso foi representado numericamente. Observou-se, nestes casos, que o programa Autodesk® CFD representou a mencionada deflexão usualmente de forma mais curvada, ao passo que o desvio daquele jato tendeu a ser menos pronunciado ou com um aspecto mais retilíneo no caso do modelo 2D. Isso deve estar relacionado à habilidade numérica que cada *software* possui para reproduzir situações em que o regime de escoamento é dependente dos efeitos viscosos. Trata-se de uma hipótese levantada que deve ser comprovada em estudos futuros.

Quando observados os resultados obtidos fisicamente no reservatório do CPH-UFGM, apresentados na Figura 6.1, pode-se notar divergência entre os padrões de escoamento experimentais e numéricos apenas para a configuração geométrica CC, no caso das maiores vazões (1,25 L/s e 3,40 L/s). Vale reiterar que as discussões acerca dessa divergência de resultados foram apresentadas no subitem anterior.

Por fim, é fundamental ressaltar que, apesar de todas as simplificações desta análise qualitativa, julgou-se que o modelo acadêmico WOLF 2D tenha apresentado um grau de robustez bastante apreciável para caracterização do padrão de escoamento em reservatórios retangulares rasos. Tendo em vista a análise há pouco apresentada, considera-se que este *software* seja mais preciso quando de fato não há muita variação no perfil vertical de velocidades, característica dos escoamentos rasos e, sobretudo, quando se pretende modelar escoamentos com elevados números de Reynolds.

6.2.3 Caracterização dos padrões de escoamento com água limpa baseada nos ensaios realizados no LH-IST: Autodesk CFD

A Figura 6.31 apresenta os campos de velocidade obtidos numericamente com auxílio do programa computacional Autodesk® CFD. Para tanto, foram contemplados os 15

experimentos realizados no LH-IST com água limpa, considerando as 5 configurações geométricas de referência (CC, LC, LL, LR e CR), cada qual ensaiada com 3 vazões distintas em regime permanente (0,15 L/s, 0,37 L/s e 1,00 L/s).

De forma geral, verificou-se que o padrão de escoamento observado para as configurações em que o canal de entrada esteve posicionado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório (LL, LC e LR) foi bastante similar às condições verificadas experimentalmente (FIGURA 6.5). Mais uma vez, manifesta-se de forma clara o comportamento hidrodinâmico elucidado pelo efeito Coanda, em que o jato tende a se dirigir rumo à parede lateral mais próxima do canal de entrada, no caso, a esquerda.

Por outro lado, houve discordância entre as simulações numéricas e os resultados experimentais para as maiores vazões da configuração CC (neste caso, 0,37 L/s e 1,00 L/s), tal como observado com os resultados do CPH-UFMG.

Procurou-se investigar a razão pela qual os modelos numéricos (Autodesk® CFD e WOLF 2D) não foram capazes de reproduzir o padrão de escoamento verificado experimentalmente no CPH-UFMG e no LH-IST para as maiores vazões da configuração CC. No caso do programa Autodesk® CFD, foram realizadas simulações numéricas alternativas, com ligeira rotação do canal de entrada e/ou do canal de saída em relação ao plano horizontal (entre 1 e 5% de rotação horária ou anti-horária). Cogitou-se a possibilidade de ter havido influência de algum aspecto geométrico daquela natureza, imperceptível a olho nu. Contudo, após a realização de tais simulações complementares, não se observou qualquer alteração significativa no padrão de escoamento que pudesse corresponder adequadamente ao observado em laboratório. Em princípio, isso eliminaria a hipótese de se tratar de uma influência geométrica.

Provavelmente, o efeito de autoalimentação da assimetria hidrodinâmica, responsável pela deflexão lateral do jato e resultante de qualquer tipo de assimetria geométrica existente ou, mais provavelmente, da aleatoriedade da forma do jato no início do ensaio não seja algo passível de ser reproduzido por modelos do tipo RANS, como os que foram utilizados nesta pesquisa. Assume-se que os padrões de escoamento assimétricos observados para a configuração CC, tanto no CPH-UFMG quanto no LH-IST, só tenham ocorrido por conta de alguma alteração da forma do jato na entrada do reservatório. Tal hipótese é bastante plausível e explicaria qualquer tipo de desvio do jato para esquerda ou para a direita, neste estudo e em

outros já realizados anteriormente em que isso foi constatado, dentre os quais o de Kantoush (2008) e o de Dufresne *et al.* (2010a,b). Recomendar-se-ia, numericamente, a avaliação de um modelo de turbulência do tipo LES (*Large Eddy Simulation*), baseado na utilização de um filtro que separa as grandes estruturas da turbulência, ou seja, os grandes vórtices que transportam massa e quantidade de movimento, das pequenas estruturas, representadas pelos pequenos vórtices. A possível reprodução da assimetria hidrodinâmica de configurações CC em modelos do tipo LES, tal como observada experimentalmente, seria suficiente para confirmar ou refutar a hipótese formulada acima para reservatórios com canais ligeiramente desalinhados.

Já no que se refere à configuração geométrica CR, houve concordância entre a simulação numérica e o observado experimentalmente (FIGURA 6.5) apenas para a maior vazão ensaiada (1,00 L/s). Em contrapartida, para as menores vazões (0,15 L/s e 0,37 L/s), o jato foi desviado rumo à parede esquerda do reservatório durante o experimento no laboratório, enquanto a deflexão do jato indicada numericamente deu-se em direção à parede lateral oposta. Mais uma vez, considera-se que esse comportamento tenha sido decorrente da existência de alguma assimetria geométrica que tenha se manifestado diferentemente conforme a vazão e em função das trocas de massa e de quantidade de movimento dentro do reservatório.

Comparando-se de forma qualitativa os resultados numéricos obtidos a partir do modelo acadêmico WOLF 2D, mostrados na Figura 6.29, e com o programa computacional Autodesk® CFD (FIGURA 6.31), notou-se haver grande semelhança entre eles, embora o primeiro tenha se referido ao reservatório do CPH-UFMG. Atribui-se tal semelhança ao fato de que ambos os programas são baseados nas equações de Reynolds.

FIGURA 6.31 – Campos de velocidade dos ensaios realizados no LH-IST obtidos numericamente com emprego do software Autodesk® CFD

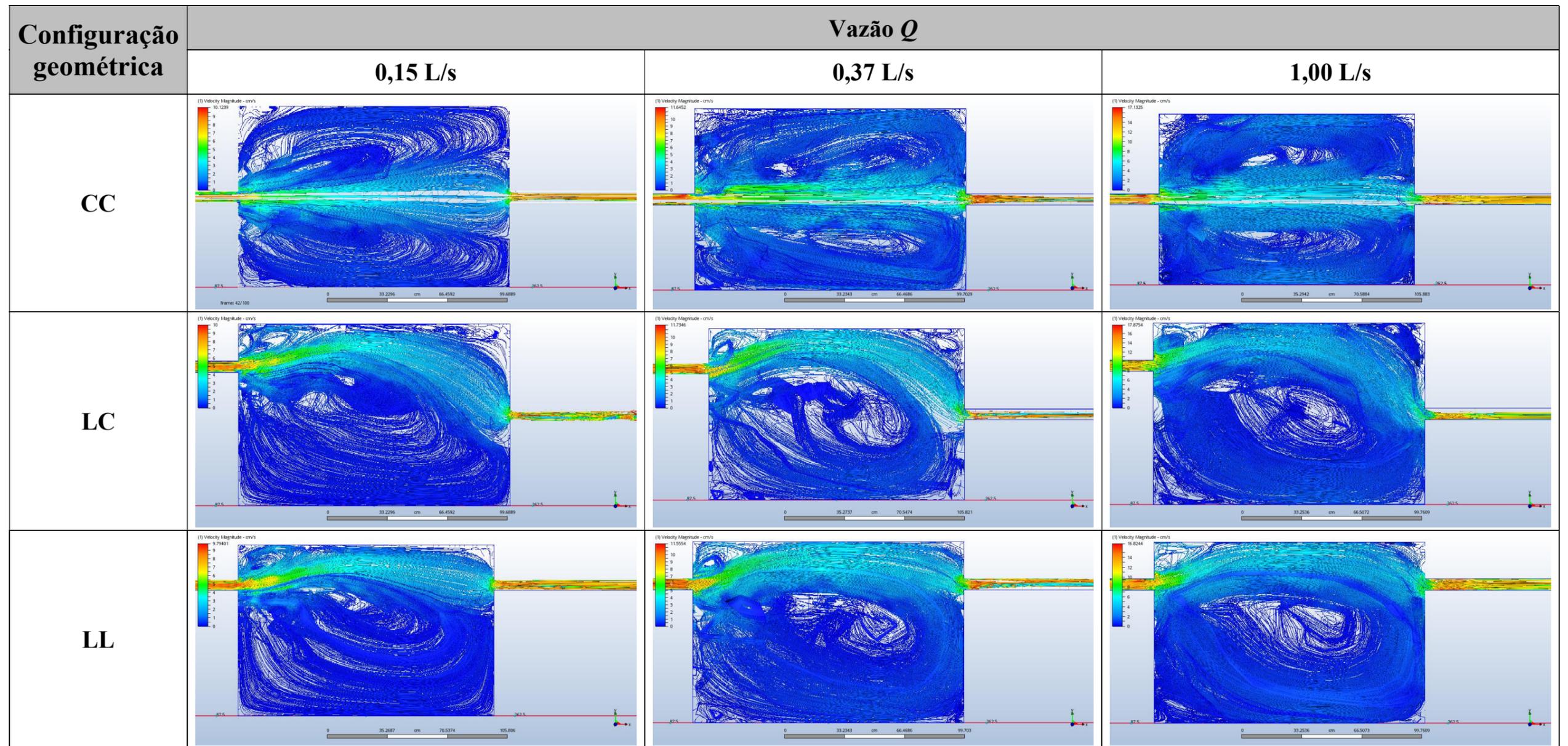
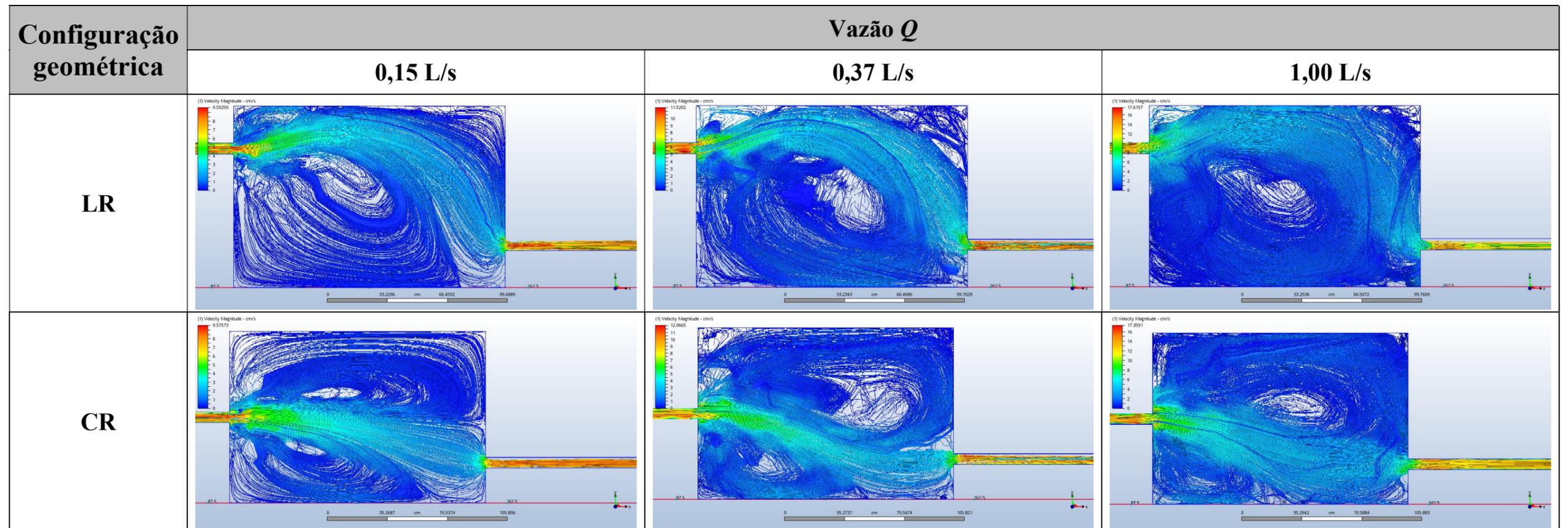


FIGURA 6.31 – Campos de velocidade dos ensaios realizados no LH-IST obtidos numericamente com emprego do software Autodesk® CFD (*continuação*)



7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo contribuir para a consolidação do conhecimento científico acerca dos escoamentos rasos. Mais especificamente, buscou-se avaliar, por meio de abordagem experimental e numérica, a influência do posicionamento variável dos canais de entrada e de saída sobre o comportamento hidrodinâmico e sobre a deposição de sedimentos em dois reservatórios retangulares rasos.

Julgou-se pertinente traçar as principais conclusões desta investigação a partir da reavaliação de cada objetivo específico estabelecido.

Tendo sido avaliadas em laboratório essencialmente cinco configurações geométricas distintas dos canais de entrada e de saída e três diferentes vazões em regime permanente, para os ensaios com água limpa, em dois reservatórios com dimensões horizontais relacionados na escala 1:2, e considerando a realização das simulações numéricas correlatas, concluiu-se que:

- De acordo com os subitens 6.1.1, 6.1.2 e 6.2, as configurações geométricas cujo canal de entrada foi posicionado à esquerda do eixo longitudinal do reservatório (configurações LL, LC e LR) tiveram sempre resultados comparáveis, guardadas as devidas correspondências, independentemente da vazão ou da escala do reservatório. Em todos os casos, observou-se uma deflexão do jato em direção à parede lateral esquerda do reservatório, a mais próxima do canal de entrada por onde o jato é introduzido no reservatório. A referida deflexão é o resultado da ocorrência de uma troca desigual de massa e de quantidade de movimento entre os dois lados deste jato, que promove um maior arrastamento de fluido para o lado direito do reservatório, estabelecendo em tal lado uma grande circulação e um aumento das pressões locais;
- Contudo, para as configurações geométricas CC e CR, observou-se em algumas situações não haver convergência entre resultados experimentais e numéricos (subitens 6.1.1, 6.1.2 e 6.2). Especificamente para a configuração CC e tendo em vista as observações experimentais, a ocorrência do comportamento hidrodinâmico assimétrico para as maiores vazões estaria associada à existência de uma condição inicial assimétrica, isto é, devido à aleatoriedade na forma do jato à entrada do reservatório. Numericamente, ainda para a configuração CC, o padrão de escoamento

foi simétrico em todos os casos avaliados, isto é, para ambos os reservatórios e para as três vazões consideradas. Mesmo quando foram realizadas pequenas alterações geométricas como aquelas há pouco mencionadas, o padrão de escoamento numérico resultante não correspondeu ao observado experimentalmente, levando à suspeita de que os modelos do tipo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) poderiam não ser suficientemente capazes de reproduzir as trocas de massa e de quantidade de movimento reais, responsáveis pela amplificação do desvio do jato em direção a uma das paredes do reservatório. A discussão correspondente foi apresentada, sobretudo, no subitem 6.2;

- Ainda com relação à divergência constatada em alguns casos entre observações experimentais e simulações numéricas, desta vez considerando-se a configuração CR, atribuiu-se tal fato à possível não perpendicularidade do canal de entrada em relação à parede de montante do reservatório. Os resultados e discussões concernentes estão presentes nos subitens 6.1.1, 6.1.2 e 6.2. Na época em que os ensaios foram realizadas, não se atentou a este pormenor. Cabe reiterar que, para as menores vazões do LH-IST, foi verificado experimentalmente um desvio do jato lateral para a esquerda, lado oposto ao de instalação do canal de saída, o que foi contrário ao que se esperava observar;
- Relativo à influência da escala do aparato experimental na caracterização do padrão de escoamento, houve situações em que o número de Reynolds dentro do canal de entrada foi relativamente pequeno, com valores pouco maiores que 1000 (calculados em função do raio hidráulico daquela seção), conforme disposto nos subitens 6.1.1 e 6.1.2. Embora em todos os casos o regime de escoamento tenha sido classificado como turbulento, deve ser destacada a provável influência de forças viscosas, sobretudo para as menores vazões adotadas nos experimentos do LH-IST, cujos números de Reynolds foram ainda menores do que para as maiores vazões;
- Não se averiguou grande distinção, em termos quali-quantitativos, entre o comportamento hidrodinâmico observado em profundidade, a diferentes alturas, em relação ao correspondente em superfície, de acordo com o subitem 6.1.2;

- Do ponto de vista numérico, foram realizadas simulações envolvendo dois programas computacionais, o WOLF 2D e o Autodesk® CFD. Quanto à capacidade de reprodução das condições hidrodinâmicas observadas experimentalmente, obtiveram-se resultados semelhantes com ambos os programas, sobretudo para as maiores vazões análogas, cujos números de Reynolds foram mais elevados. Constatou-se nos subitens 6.2.2 e 6.2.3 que o modelo WOLF 2D, baseado nas equações bidimensionais do tipo RANS de conservação da massa e da quantidade de movimento, apresentou soluções numéricas frequentemente muito parecidas com as situações análogas modeladas com o programa Autodesk® CFD, que envolve a solução completa das citadas equações, ou seja, com termos tridimensionais. Os resultados obtidos numericamente foram comparáveis devido à adoção de *softwares* do tipo RANS e de um mesmo modelo de turbulência ($k-\epsilon$). O fato de ter havido boa correspondência entre os dois modelos computacionais ratifica as premissas de adoção das SWE (*shallow water equations*), ou equações de águas rasas, para as aplicações consideradas nesta pesquisa.

Realizaram-se também, no âmbito do LH-IST, cinco ensaios envolvendo a alimentação sólida (um para cada configuração geométrica de referência), de forma contínua e com concentração constante. Para tanto, utilizou-se baquelite granular, previamente misturada à vazão líquida e transportada por arrastamento. Com base nas observações durante os ensaios e nos resultados obtidos, concluiu-se que:

- O percurso do jato desde o início do ensaio até sua interrupção foi significativamente afetado pela alteração da morfologia do fundo, decorrente do processo de sedimentação, conforme destacado no subitem 6.1.3. Na primeira hora de cada ensaio, este percurso foi naturalmente semelhante ao observado sem a presença de sedimentos e, com o passar do tempo, o jato passou a seguir uma trajetória aproximadamente retilínea e alinhada com os dois canais;
- A deposição sólida foi mais pronunciada ao longo do percurso desenvolvido pelo jato, isto é, nas áreas adjacentes a essa trajetória (subitem 6.1.3). Progressivamente, com a alteração daquele percurso, que passou a ser alinhado com os dois canais, houve maior expansão das áreas de deposição;

- Até cerca de metade da duração dos ensaios com sedimentos, toda a carga sólida introduzida pelo canal de entrada foi depositada no reservatório, conforme salientado no subitem 6.1.3. A partir desse instante, recolheu-se baquelite a jusante do canal de saída em taxas crescentes até o estabelecimento do equilíbrio sólido;
- De acordo com o subitem 6.1.5, a configuração geométrica CC foi aquela cujo padrão de escoamento foi o mais significativamente alterado por conta da deposição sólida. Com efeito, nos ensaios com água limpa era assimétrico e tornou-se simétrico com o passar do tempo, resultando em uma morfologia de fundo igualmente simétrica. Para as demais configurações, as alterações no padrão de escoamento foram menos acentuadas;
- A configuração geométrica LR foi aquela em que houve maior retenção de sedimentos dentro do reservatório, com cerca de 78% de seu volume ocupado desde o início da alimentação sólida até o atingimento da condição de equilíbrio das vazões sólidas na entrada e na saída. Esta geometria correspondeu ao caso de maior desalinhamento entre os canais, dentre todas aquelas geometrias testadas, conforme observado no subitem 6.1.4;
- Por outro lado, a configuração LL seria aquela com menor retenção sólida dentro do reservatório, de acordo com a avaliação realizada no subitem 6.1.4. Este caso foi avaliado de forma qualitativa, a partir da estimativa da correspondente área de deposição, a menor das cinco configurações estudadas. Correspondeu, por consequência, à geometria em que houve maior presença de zonas de estagnação, em que não houve sedimentação;
- Com base em medições de velocidades em profundidade, obtidas periodicamente durante a realização dos ensaios com sedimentos, verificou-se no subitem 6.1.6 a tendência de diminuição das velocidades nas zonas de estagnação formadas e de aumento das mesmas nas regiões de espalhamento do jato, em decorrência da diminuição da altura d'água sem mudança de vazão líquida.

Como recomendações para a sequência deste estudo e/ou para realização de outros trabalhos atinentes ao estudo dos reservatórios rasos, sugere-se o seguinte:

- Realização de simulações numéricas baseadas na utilização de modelos numéricos do tipo LES (*Large Eddy Simulation*), a fim de se verificar sua capacidade de reproduzir as mesmas condições encontradas experimentalmente para as configurações CC e CR. Recomenda-se a realização de simulações envolvendo não só a geometria convencional das citadas configurações, como também a avaliação de cenários alternativos com canais ligeiramente perturbados. Se possível, sugere-se também que sejam realizadas simulações baseadas em distribuição irregular da vazão através do jato. A última condição é avaliada com a hipótese mais plausível para justificar a ocorrência de padrões de escoamento assimétricos no caso da configuração CC, em que se esperava que o comportamento hidrodinâmico fosse simétrico em todos os casos avaliados;
- Realização de simulações numéricas envolvendo a alimentação sólida, a fim de se confrontar as observações experimentais obtidas nesta pesquisa com os resultados das simulações. Neste caso, sugere-se que a inserção de sedimentos seja avaliada até a condição de equilíbrio sólido, tal como se realizou nos experimentos do LH-IST;
- Do ponto de vista prático, quando se pretende conceber um reservatório retangular a ser utilizado para aumentar a retenção sólida, indica-se a adoção de configurações tais como a do tipo LR, cujos canais são opostamente posicionados em relação ao eixo longitudinal do reservatório. Por outro lado, caso seja requerida uma condição de minimização de sólidos decantados, recomenda-se para reservatórios retangulares que seus canais estejam alinhados e, de preferência, afastados do eixo longitudinal do reservatório, como no caso do tipo LL. Neste caso, os sedimentos ficam limitados de se espalhar para um dos lados do reservatório, o que torna menor sua área de deposição;
- Realização de estudos experimentais e numéricos envolvendo o posicionamento variável dos canais de entrada e de saída associado a: reservatórios de diferentes formatos, além do retangular; adoção de vazões em regime não permanente e; análise de sensibilidade às variações do número de Froude.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, H. R.; NASR, R.; SEIF, H. Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p.25-34, 2006.
- ABBOTT, D. E.; KLINE, S.J. Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps. **J. Basic Eng**, Nova Iorque, v. 84, n. 1, p.317-325, 1962.
- AUTODESK (San Rafael, EUA). **Autodesk CFD**. 2018. Disponível em: < <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>>. Acesso em: 11 jan. 2019.
- BAPTISTA, M. B., LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 4ª ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG 2016. 477p.
- BAUMER (Frauenfeld, Suíça). **Distance sensors OADM 13I7480/S35A**: Catálogo comercial. 2017. Disponível em: < http://pfinder.baumer.com/pfinder_sensor/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Optoelektronische_Sensoren/OADM_13I7480_S35A_web_EN.pdf >. Acesso em: 04 jul. 2017.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 431p.
- CAMNASIO, E., ORSI, E., SCHLEISS, A.J. Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs. **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v. 49, n. 3, p.352-358, 2011.
- CAMNASIO, E. **Investigation of flow patterns and sedimentation in rectangular shallow reservoirs**. 2012. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Dell'ambiente e Delle Infrastrutture, Politecnico di Milano, Milão, 2012.
- CAMNASIO, E., PIROTON, M., ERPICUM, S., DEWALS, B. Experimental and numerical investigation of a meandering jet in a shallow rectangular reservoir under different hydraulic conditions. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SHALLOW FLOWS, 3., 2012, Iowa. **Proceedings...** . Iowa: 2012.
- CAMNASIO, E., ERPICUM, S., ORSI, E., PIROTON, M., SCHLEISS, A., DEWALS, B.J. Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v. 51, n. 5, p.535-547, 2013.
- CARDOSO, A.H. **Hidráulica Fluvial**. Lisboa: Fundação Calouse Gulbenkian, 1998. 315p.
- CARMER, C.F.V., JIRKA, G.H. On Turbulence and Transport in Shallow Wake Flow. In: IAHR CONGRESS, 29., 2001, Pequim. **Proceedings...** . Pequim: 2001. p. 80 - 86.
- CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª edição revisada e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.
- CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 585p.
- CHAO, K., MOISES, V.A., SHANDAS, R., ELKADI, T., SAHN, D.J., WEINTRAUB, R. Influence of the Coanda effect on color Doppler jet area and color encoding. **Circulation**, Dallas, v. 85, n. 1, p.333-341, 1992.

- CHAUVIN, J.L. Similitude des modèles de cours d'eau à fond mobile. **Bulletin CREC n.º 1**. EDF, Chatou, p. 64-90, 1962.
- CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1958. 680p.
- CIESLIK, A.R., KAMP, L.P.J., CLERCX, H.J.H., VAN HEIJST, G.J.F. Three-dimensional structures in a shallow flow. **Journal of Hydro-environment Research**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p.89-101, 2010.
- DEWALS, B.J., KANTOUSH, S.A., ERPICUM, S., PIROTON, M., SCHLEISS, A.J. Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. **Environ. Fluid Mech.**, n. 6, p.31-54, 2008.
- DUFRESNE, M. **La modélisation 3D du transport solide dans les basins en assainissement: du pilote expérimental à l'ouvrage réel**. 2008. 226 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mathématiques, Sciences de l'Information e de l'Ingénieur, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2008.
- DUFRESNE, M., DEWALS, B.J., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M. Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. **Int. J. Sediment Res.**, v. 25, n. 3, p.258-270, 2010a.
- DUFRESNE, M., DEWALS, B.J., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M. Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v. 48, n. 2, p.197-204, 2010b.
- DUFRESNE, M., DEWALS, B.J., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M. Numerical investigation of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. **Eng. Appl. Comp. Fluid Mech.**, v. 5, n. 2, p.247-258, 2011.
- ERPICUM, S., MEILE, T., DEWALS, B. J., PIROTON, M., SCHLEISS, A. J. 2D numerical flow modelling in a macro-rough channel. **Int. J. Numer. Methods Fluids**, v. 61, n. 11, p.1227-1246, 2009.
- FERRARA, V., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B.J. Flow field in shallow reservoir with varying inlet and outlet position. **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v. 56, n. 5, p.689-696, 2018.
- GHIDAOU, M.S., KOLYSHKIN, A.A. Linear Stability Analysis of Lateral Motions in Compound Channels With Free Surface. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 125, n. 8, p.871-880, 1999.
- GIRI, S., NARAYAN, P. On sediment-induced problems under the dam rehabilitation and improvement project in India. **Hydrolink**, n.3, p.83-86, 2018.
- GRAF, W. H. **Hydraulique Fluviale: Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple**. 2. ed. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008. 628 p. (Traité de Génie Civil de l'EPFL, Volume 16). En collaboration avec M.S. Altinakar.
- HUSSAIN, I., CATTAPAN, A., FRANCA, J. Impacts of land use change on the sedimentation of the Mangla reservoir, Pakistan. **Hydrolink**, n.3, p.89-91, 2018.
- INCONTROL (São Paulo). **Medidor de vazão eletromagnético**: Catálogo comercial. 2011. Disponível em: <<http://www.incontrol.ind.br/downloads/catalogo86.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

- JANSONS, K., LAW, S. The hydraulic efficiency of simple stormwater ponds. In: INTERNATIONAL RAINWATER CATCHMENT SYSTEMS CONFERENCE, 13., 2007, Sydney. **Proceedings...** . Sydney: 2007.
- JIRKA, G. H., UIJTTEWAAL, W. S. J. Shallow flows. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SHALLOW FLOWS, 4, 2004, Delft. **Proceedings...** . Delft: Taylor & Francis, 2004.
- KANTOUSH, S. A., BOLLAERT, E., BOILLAT, J.L., SCHLEISS, A.J. Suspended load transport in shallow reservoirs. IN: IAHR CONGRESS, 31, 2005, Seul. **Proceedings...** . Seul: p. 1787-1799., 2005.
- KANTOUSH, S. A., BOLLAERT, E., SCHLEISS, A.J. Experimental and numerical modelling of sedimentation in a rectangular shallow basin. **International Journal of Sediment Research**, v. 23, p.212-232, 2008.
- KANTOUSH, S.A. **Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments**. 2008. 542 f. Tese (Doutorado) - Curso de Environnement, EPFL, Lausanne, 2008.
- KOLYSHKIN, A., NAZAROV, S. On the stability of wake flows in shallow water. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL MODELLING AND ANALYSIS, 10, 2005, Trakai. **Proceedings...** .Trakai: Technika, p. 103-109, 2005.
- KRAICHNAN, R.H. Inertial ranges in two-dimensional turbulence. **The Physics of Fluids**, Melville, v. 10, n. 7, p.1414-1423, 1967.
- LI, M., ZHANG, H., LEMCKERT, C., LU, Z., LEI, L.-M., STRATTON, H. Three-dimensional Investigation of Retention Time Distribution of Waste Stabilisation Ponds. IN: MODSIM, 2013, Adelaide. **Proceedings...** . Adelaide: 2013.
- MASALÓ, I. **Hydrodynamic characterisation of aquaculture tanks and design criteria for improving self-cleaning properties**. 2008. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Food and Agriculture Biotechnology and Sustainability, Universitat Politècnica de Catalunya BARCELONATECH, Barcelona, 2008.
- MCMULLAN, W.A., GARRETT, S.J. The Effect of Initial Conditions on Streamwise Vortices in the Plane Turbulent Mixing Layer. In: AIAA COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS CONFERENCE, 22, 2015, Dallas. **Proceedings...** . Dallas: 2015.
- MCMULLAN, W.A., GARRETT, S.J. Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Waters Flows. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 59, p.20-32, 2016.
- MESELHE, E.A., PEEVA, T., MUSTE, M. Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Waters Flows. **Journ. Hydr. Eng.**, v. 130, n. 9, p.937-940, 2004.
- MIRANDA, D.A., REIS, A.M., ALVES, E., CARDOSO, A.H., COELHO, M.M.L.P. Experimental study of the influence of inlet and outlet conditions on the flow pattern of a rectangular shallow reservoir. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDRAULIC STRUCTURES, 7, 2018, Aachen. **Proceedings...** . Aachen: 2018a.
- MIRANDA, D.A., REIS, A.M., COELHO, M.M.L.P. Experimental and numerical investigation of the flow patterns in shallow rectangular reservoirs with symmetrically positioned inlet and outlet channels. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 19, p.1-12, 2018b.

MIRANDA, D.A., ALVES, E., COELHO, M.M.L.P, CARDOSO, A.H.. Análise comparativa de padrões de escoamento em reservatórios retangulares rasos de diferentes escalas. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 28, 2018, Buenos Aires. **Trabajos completos...** . Buenos Aires: 2018c.

NASIF, G., BARRON, R.M., BALACHANDAR, R. DES evaluation of near-wake characteristics in a shallow flow. **Journal of Fluids and Structures**, v. 45, p.153-163, 2014.

NORTEK (Rud, Noruega). **Vectrino**: Catálogo comercial. 2013. Disponível em: <<http://www.nortek-as.com/lib/brochures/vectrino-ii>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

NOVAK, P.. MOFFAT, A.I.B.; NAILLURI, C.; NSRAYANAN; R. **Hydraulic Structures**. 4th edition. Abington: Taylor & Francis, 2007. 700p.

OCA, J., MASALÒ, I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. **Aquacultural Engineering**, v. 36, p.36-44, 2007.

OLIVEIRA, F. S. C.; POLITO, P. S. Caracterização dos sinais associados às ondas de Rossby e vórtices de meso-escala no Atlântico sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** . Natal: Inpe, 2009. p. 6611 - 6618. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.01.10/doc/6611-6618.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2017.

OLIVEIRA, W. R. **Uma análise sobre inversores de frequência e distorções harmônicas e inter-harmônicas**. 2013. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/8247/1/2013_WesleyRodriguesdeOliveira.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2017.

OLUKANNI, D., DUCOSTE, J. Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 11, p.1878-1888, 2011.

PELTIER, Y., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B. J. Experimental and numerical investigation of meandering jets in shallow reservoir: potential impacts on deposit patterns. In: THESIS, Two-phase modelling for sediment dynamics in geophysical flows, 2013, Chatou. **Proceedings...** . Chatou: 2013.

PELTIER, Y., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B. Meandering jets in shallow rectangular reservoirs: POD analysis and identification of coherent structures. **Experiments in Fluids**, v. 55, p.1-16, 2014a.

PELTIER, Y., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B. Experimental investigation of meandering jets in shallow reservoirs. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 14, p.699-710, 2014b.

PELTIER, Y., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B. Can meandering flows in shallow rectangular reservoir be modelled with the 2D shallow water equations? **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 141, n.6, 2015.

PELTIER, Y., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B. Numerical modelling of meandering jets in shallow rectangular reservoir using two different turbulent closures. In: IAHR EUROPE CONGRESS, 4, 2016, Liège. **Proceedings...** . Liège: 2016.

PERSSON, J., SOMES, N.L.G., WONG, T.H.F. Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 40, n.3, p.291-300, 1999.

- PERSSON, J. The hydraulic performance of ponds of various layouts. **Urban Water**, n. 2, p.243-250, 2000.
- PERSSON, J., WITTGREN, H.B. How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds. **Ecological Engineering**, v. 21, p. 259-269, 2003.
- POTTER, M.C., WIGGERT, D.C. **Mecânica dos Fluidos**. Tradução da 3ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 690p.
- QUIANI, A., GLOWINSKI, R., CANIC, S. **A computational study on the generation of the Coanda effect in a mock heart chambre**. 2016. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/A-computational-study-on-the-generation-of-the-in-a-Quainia-Glowinski/9c540ec1b66b83fdcf7f894e1cfdc6c4a870e986#similar-papers>>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- RASHID, M. H. **Power Electronics: circuits, devices and applications**. 2ª edição. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- REDE AGRONOMIA. **Projeto de Drenagem Urbana**. 2019. Disponível em: <http://agronomos.ning.com/profiles/blog/show?id=3071024%3ABlogPost%3A314683&commentId=3071024%3AComment%3A315943&xcg_source=activity>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- RESOLVED ANALYTICS. **Comparing CFD Software Part 1: CAD Embedded CFD**. 2018. Disponível em: <<https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software-part-1-cad-embedded-cfd>>. Acesso em: 11 jan. 2019.
- SHAPIRA, M., DEGANI, D., WEIHS, D. Stability and existence of multiple solutions for viscous flows in suddenly enlarged channels. **Comp. and Fluids**, v.18, n.3, p.239-258, 1990.
- STOKER; J.J. **Water waves**. Nova Iorque: Interscience Publishers, 1957. 567p.
- STOVIN, V.R. **The prediction of sediment deposition in storage chambers based on laboratory observations and numerical simulations**. 1996. 305 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil and Structural Engineering. University of Sheffield, Sheffield, 1996.
- SUMI, T., KANTOUSH, S.A. Innovative strategies for managing reservoir sedimentation in Japan. **Hydrolink**, n.4, p.100-104, 2018.
- TALSTRA, H. **Large-scale turbulence structures in shallow separating flows**. 2011. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Environmental Fluid Mechanics Laboratory, Delft University Of Technology, Rotterdam, 2011.
- WALTERS, R.A., HANERT, E., PIETRZAK, J., LE ROUX, D.Y. Comparison of unstructured, staggered grid methods for the shallow water equations. **Ocean Modelling**, v. 28, p.106-117, 2009.
- WEITBRECHT, V., KÜHN, G., JIRKA, G. H. Large scale PIV measurements at the surface of shallow water flows. **Flow Meas. and Instr.**, v. 13, p.227-245, 2002.
- WOOD, M.G., HOWES, T., KELLER, J., JOHNS, M.R. Two dimensional computational fluid dynamic models for waste stabilization ponds. **Wat. Res.**, v.32, n.3, p.958-963, 1998.

APÊNDICE I – Modos de transporte de sedimentos

Segundo Carvalho (2008), o deslocamento das partículas de sedimento que chegam aos cursos e corpos d'água dependerá das forças que nelas atuam. Por esta razão, tais partículas poderão manter-se em suspensão ou em contato com o leito ou fundo, podendo saltar por influência do escoamento, deslizar ou rolar.

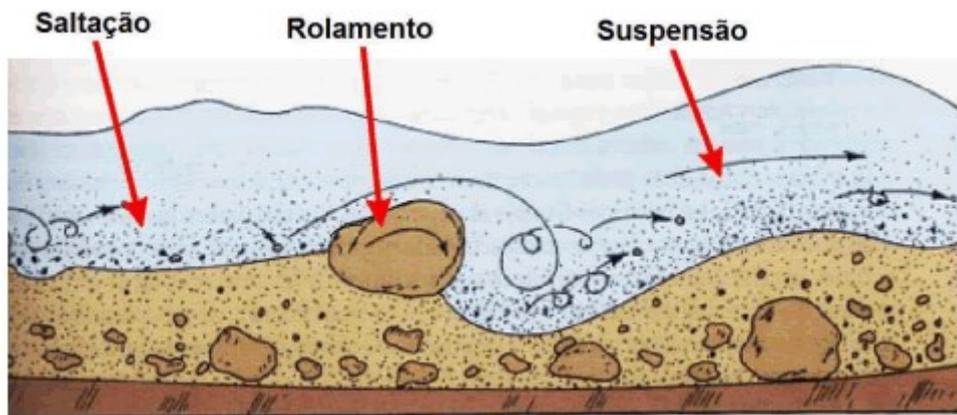
Os principais fatores que condicionaram os modos de transporte de sedimento estão relacionados ao tamanho da partícula, seu peso e sua forma, ao tipo de escoamento, se laminar ou turbulento, à velocidade da corrente e à eventual presença de obstáculos. Ademais, dependem da declividade do fundo, da forma do leito ou do reservatório, da temperatura da água, dentre outros aspectos (CARVALHO, 2008).

Conforme citado por Cardoso (1998), Graf (2008) e Carvalho (2018), os modos de transporte de sedimento por influência do escoamento podem ser classificados da seguinte forma:

- Transporte sólido por arrastamento: refere-se à fração do sedimento que rola ou escorrega sobre o fundo, paralelamente ao escoamento. Tais partículas de sedimento costumam estar na maior parte do tempo em contato com o leito ou com o fundo;
- Transporte sólido por saltação: compreende a parcela de partículas que salta ao longo do curso ou corpo d'água por influência do escoamento ou em função do impacto de outras partículas. Tais partículas podem ainda deslocar-se por escorregamento ou rolamento sobre o fundo;
- Transporte sólido em suspensão: envolve as partículas suficientemente pequenas que se mantêm em suspensão por serem suportadas pelas componentes verticais das velocidades do escoamento turbulento, isto é, por ação da turbulência. São transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades.

A Figura I.1 apresenta, de forma sintética, os modos de transporte de sedimento descritos acima, quais sejam, por saltação e por rolamento (arrastamento) e em suspensão.

FIGURA I.1 – Modos de transporte de partículas de sedimento em cursos e corpos d'água



Fonte: REDE AGRONOMIA, 2019.

APÊNDICE II – Modelagem física

II.1 Vantagens de utilização de modelagem física em Hidráulica

De acordo com Chanson (2004), Novak *et al.* (2007) e Brunetti (2008), um modelo físico, em Engenharia Hidráulica, corresponde à reprodução a uma dada escala das condições relativas a um fenômeno observado em tamanho real (protótipo). Por essa razão, as condições de contorno, tais como o fundo e as paredes laterais de um reservatório, e as condições iniciais devem ser adequadamente escaladas.

Ainda segundo Chanson (2004), a utilização de modelos físicos reduzidos permite aos projetistas avaliarem e otimizarem uma dada estrutura, antes que a mesma seja efetivamente construída. Em outras palavras, é possível que os gestores envolvidos com o projeto visualizem o comportamento hidráulico da estrutura estudada por meio de modelagem física antes de projetá-la conforme seus requisitos e objetivos.

Apesar do grande benefício de utilização de modelos físicos para avaliação do comportamento hidráulico de dispositivos tais como os reservatórios rasos, Kantoush (2008, p.43) salienta que o uso dessa alternativa para investigar os fenômenos inerentes aos escoamentos rasos é restrito. De acordo com o autor, o número de Reynolds em pequenas escalas costuma ser bastante reduzido e o número de Froude, muito elevado. Assim sendo, deve-se estabelecer um compromisso entre a necessidade de se representar adequadamente a limitada profundidade desejada e a exequibilidade do modelo físico.

II.2 Princípios de semelhança entre protótipo e modelo

A semelhança de um fenômeno físico está associada a sua representação física normalmente em diferentes dimensões, isto é, das condições que poderiam ser observadas em um protótipo a partir de sua reprodução em modelos (POTTER; WIGGERT, 2009).

Segundo Chanson (2004), Novak *et al.* (2007) e Potter e Wiggert (2009), para que as condições de escoamento em um modelo físico sejam representativas daquelas de um protótipo de referência, necessita-se que haja semelhança de forças (semelhança dinâmica), que será geralmente aproximada. Tal semelhança dinâmica implica também a semelhança de forma (semelhança geométrica) e de movimento (semelhança cinemática).

A semelhança geométrica resulta do fato de que as razões entre os comprimentos característicos do protótipo e os respectivos comprimentos do modelo sejam iguais para todas as dimensões lineares. Em outras palavras, o modelo e o protótipo, embora possam ter dimensões distintas, deverão ter a mesma forma. No que se refere à semelhança cinemática, a relação entre as velocidades características do protótipo e as velocidades do modelo deve ser constante. Por sua vez, a semelhança dinâmica preconiza que os quocientes entre as forças que agem em massas correspondentes no escoamento do protótipo e no escoamento do modelo estejam na mesma proporção, em toda a extensão do escoamento (CHANSON, 2004; BRUNETTI, 2008; POTTER; WIGGERT, 2009).

Chanson (2004) salienta que as semelhanças geométricas e cinemáticas, quando combinadas, fornecem as razões de semelhança entre o protótipo e o modelo para o tempo, a aceleração, a vazão, a velocidade angular, dentre outras grandezas.

Ainda de acordo com Chanson (2004), os parâmetros básicos necessários em qualquer análise dimensional podem ser agrupados nas seguintes categorias:

- Propriedades dos fluidos e constantes físicas: compreendem a massa específica da água ρ (kg/m^3), a viscosidade dinâmica da água μ ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$), a tensão superficial do ar e da água σ (N/m^2), o módulo de elasticidade da água E_b (N/m^2) e a aceleração da gravidade g (m/s^2);
- Propriedades geométricas: incluem os comprimentos característicos L (m);
- Propriedades do escoamento: compreendem as velocidades V (m/s), a aceleração da gravidade g (m/s^2), a profundidade do escoamento h (m) e as diferenças de pressão ΔP (N/m^2).

Em escoamentos com superfície livre, como os que ocorrem em canais, rios e reservatórios, os efeitos gravitacionais costumam ser predominantes. Utiliza-se comumente para estabelecer a relação de semelhança entre modelo e protótipo a chamada semelhança de Froude, baseada na igualdade do número de Froude entre o modelo e o protótipo (Equação II.1):

$$Fr_p = Fr_m \quad (\text{Equação II.1})$$

O índice ‘p’ é utilizado para designar o protótipo e o índice ‘m’, o modelo.

A semelhança de Froude deve ser adotada para os casos em que as perdas de energia por ação da viscosidade são pequenas e quando o escoamento é puramente turbulento. São aplicações típicas dessa condição os vertedouros de barragens, os escoamentos sobre soleiras, ao redor de pilares de pontes, dentre outras. Destaca-se a preocupação com efeitos de escala induzidos por forças viscosas, os quais violam as relações da semelhança de Froude. Outro problema que pode ocorrer relativo aos efeitos de escala consiste na influência da tensão superficial, por exemplo, quando há incorporação de ar pela superfície livre (CHANSON, 2004). Isso vai ao encontro da ressalva feita por Kantoush (2008), referente ao fato de que as pequenas escalas dos modelos costumam estar associadas a reduzidos números de Froude, com conseqüente dependência da viscosidade, além da significativa influência da tensão superficial.

O Quadro II.1 destaca as relações de escala entre um modelo e seu protótipo baseado no princípio da semelhança de Froude. Para tanto, definem-se o parâmetro λ , que representa a relação de um comprimento característico do modelo e seu comprimento correspondente relativo ao protótipo, e o parâmetro ρ_r , o qual corresponde à relação de escala entre a massa específica da água para o modelo e para o protótipo.

QUADRO II.1 - Relações de escala baseadas na semelhança de Froude

Parâmetro	Unidade	Razão de escala
<i>Propriedades geométricas</i>		
Comprimento	m	λ
Área	m ²	λ^2
<i>Propriedades cinemáticas</i>		
Velocidade	m/s	$\lambda^{1/2}$
Vazão específica (por unidade de largura)	m ³ /s.m	$\lambda^{3/2}$
Vazão	m ³ /s	$\lambda^{5/2}$
Tempo	s	$\lambda^{1/2}$
<i>Propriedades dinâmicas</i>		
Força	N	$\rho_r \lambda^3$
Pressão	N/m ²	$\rho_r \lambda$
Massa específica	kg/m ³	ρ_r
Viscosidade dinâmica	N.s/m ²	$\rho_r^{1/2} \lambda^{3/2}$
Tensão tangencial	N/m	λ^2

Fonte: CHANSON, 2004 (*adaptado*).

Em alguns casos, devido à limitação de espaço físico ou em função de algum interesse específico, opta-se pela concepção de modelos distorcidos. Por definição, um modelo

distorcido corresponde a um modelo físico em que a escala geométrica é distinta entre cada direção principal. Tipicamente, os modelos fluviais costumam ser projetados de modo que as razões entre dimensões lineares horizontais sejam maiores que a razão entre dimensões lineares verticais. É conveniente ressaltar que esse tipo de distorção de escala usualmente não representa grande distorção no padrão de escoamento e costuma resultar em uma boa correspondência entre os fenômenos observados no modelo em relação ao seu protótipo (CHANSON, 2004).

No que se refere às aplicações envolvendo escoamentos de superfície livre, os modelos distorcidos também são projetados baseando-se na semelhança de Froude, sendo, portanto, aplicável a Equação II.1. Neste caso, o número de Froude leva em conta a razão entre dimensões verticais do modelo em relação ao protótipo. Assim como para os modelos não distorcidos, é aconselhável neste caso que o escoamento seja turbulento, conforme salienta Chanson (2004).

Como consequência da adoção de um modelo distorcido, destacam-se algumas vantagens em relação ao modelo não distorcido: (1) as velocidades do escoamento e a turbulência no modelo são maiores; (2) a escala de tempo torna-se menor; (3) o número de Reynolds do modelo é maior, o que melhora a semelhança dinâmica entre o protótipo e o modelo e; (4) a escala vertical é maior, o que favorece uma maior precisão das medições de profundidade do escoamento. Por outro lado, é recomendável que a distorção do modelo (relação λ_x/λ_z) seja inferior a 5-10. Caso contrário, as distorções de variáveis tais como as velocidades tornam-se importantes e passam a comprometer a caracterização física do modelo e sua representatividade em relação ao protótipo (CHANSON, 2004).

Quando os valores do número de Reynolds relativos a problemas envolvendo escoamentos com superfície livre são pequenos, a influência das forças viscosas não deve ser desprezada. Por outro lado, por estarem associados à presença de uma superfície livre, devem respeitar as premissas da semelhança de Froude. Portanto, esse tipo de aplicação demanda a consideração de alguma teoria que concilie adequadamente a semelhança de Froude, sem negligenciar o efeito causado pelas forças viscosas.

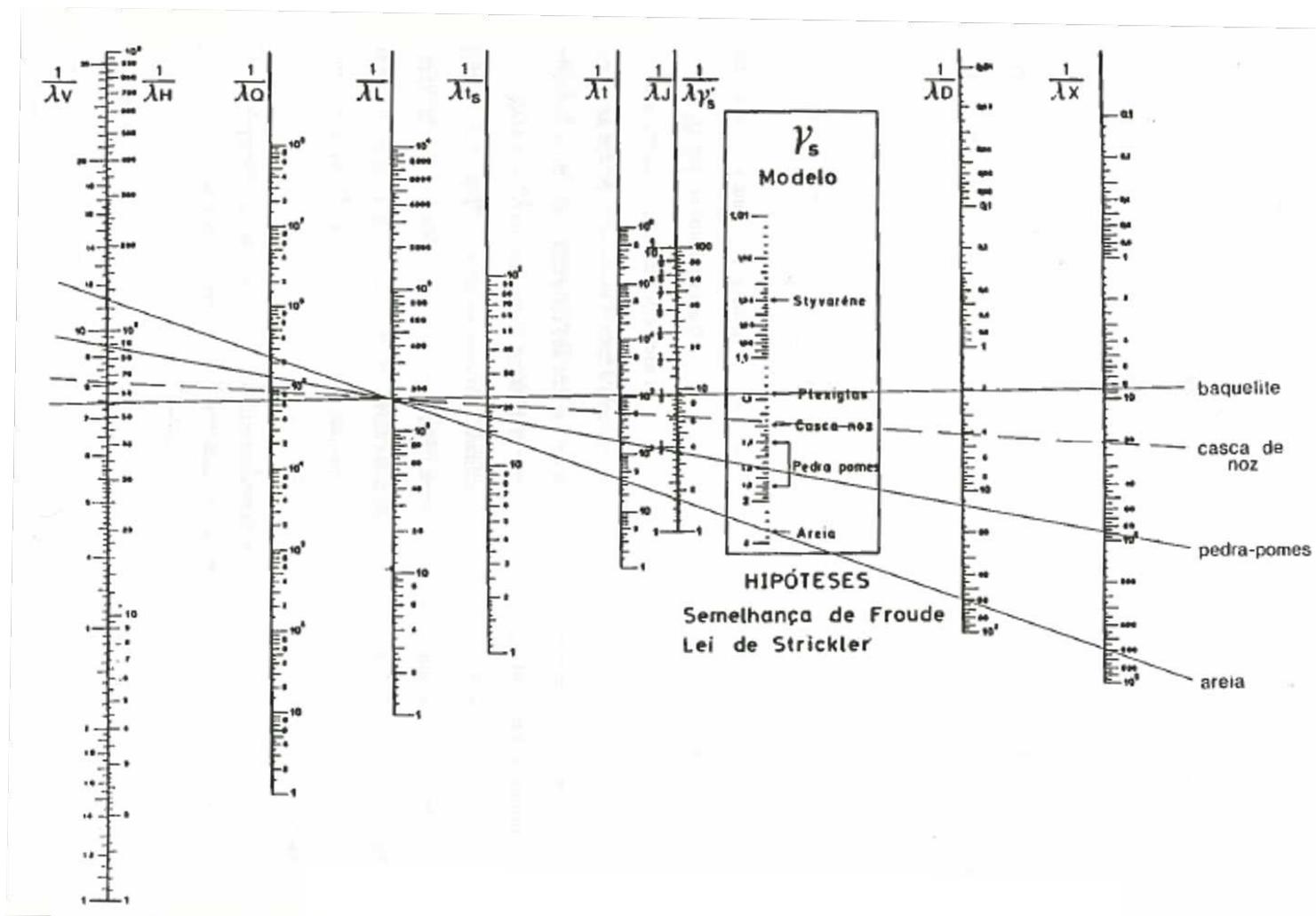
Uma alternativa interessante, nesse contexto, baseia-se na metodologia apresentada por Chauvin (1962). Trata-se de uma teoria relativa a modelos distorcidos de cursos d'água com

leito móvel. Neste tipo de teoria envolvendo leitos móveis, há grande dificuldade de reproduzir através de um modelo as mesmas condições físicas encontradas em um protótipo. Isso porque é necessário escalar simultaneamente as grandezas relativas ao movimento do fluido e do sedimento. Ademais, a rugosidade do fundo, por ser variável ao longo do tempo, torna-se uma função de sua geometria e do transporte de sedimentos (CHANSON, 2004).

De acordo com Chauvin (1962), só é possível conceber um modelo representativo de um protótipo caso se abdique das premissas da semelhança de Reynolds ou da semelhança de Froude, ou ainda distorcendo-o ou alterando sua declividade. Tendo em vista tal ressalva, Chauvin propôs um ábaco (FIGURA II.1) para definição das escalas entre modelo e protótipo, sendo o modelo distorcido. O ábaco em questão foi estabelecido a partir das seguintes premissas: (1) validade da semelhança de Froude (com ligeira distorção); (2) os materiais utilizados para caracterização do leito móvel são semelhantes quanto a sua granulometria, com escala dos diâmetros d_{50} igual à dos diâmetros d_{90} ; (3) a escala das declividades das linhas de energia deve ser igual ao quociente entre a escala dos comprimentos verticais e a dos comprimentos verticais e ; (4) aplica-se a lei de Strickler.

O método proposto por Chauvin (1962) baseou-se na proposição de uma série de relações de semelhança estabelecidas, independente das leis de transporte sólido e dependente apenas de uma lei de perda de carga. Conforme é possível observar na Figura II.1, é necessário que se conheçam duas escalas para que as demais sejam determinadas em função delas. O ábaco de Chauvin envolve as seguintes razões de escala entre modelo e protótipo: escala das velocidades (λ_v), escala dos comprimentos horizontais (λ_H), escala das vazões (λ_Q), escala dos comprimentos horizontais (λ_L), escala do tempo sedimentológico (λ_{ts}), escala de tempo do escoamento (λ_t), escala das declividades da linha de energia (λ_J), escala dos diâmetros das partículas sólidas (λ_D), escala dos pesos específicos aparentes úmidos ($\lambda_{\gamma'_s}$) e escala dos números de Reynolds de arrastamento (λ_X). Além disso, apresenta-se uma escala com valores indicativos para o peso específico do material sólido e o material sugerido para cada faixa de valores (baquelite, casca de noz, pedra-pomes e areia).

FIGURA II.1 – Ábaco de Chauvin para semelhança de modelos de fundo móvel



Fonte: CHAUVIN, 1962 (adaptado).

Para uso do ábaco, demanda-se o estabelecimento de duas dessas relações de escala entre modelo e protótipo, conforme mencionado, e a marcação gráfica, na escala correspondente, do valor de $1/\lambda$. O parâmetro λ refere-se ao valor correspondente à razão de uma dada grandeza, dentre aquelas citadas, entre modelo e protótipo, necessariamente nessa ordem. Os valores referentes às demais escalas podem ser determinados graficamente, a partir do traçado de uma reta que conecta os dois pontos marcados inicialmente no ábaco e leitura, na respectiva escala, da relação $1/\lambda$ correspondente.

II.3 Técnicas para medição de parâmetros hidráulicos

Para monitoramento de determinadas variáveis hidráulicas, tais como velocidade do escoamento e concentração de sedimentos, em escala de laboratório, diversos equipamentos podem ser encontrados à disposição no mercado. Dentre muitas técnicas para medição existentes, apresentam-se neste capítulo aquelas de interesse desse estudo, em sua maioria utilizadas durante os experimentos. São elas: LSPIV (*large scale particle image velocimetry*), para determinação de velocidades superficiais; e *Vectrino*, sonda do tipo ADV (*acoustic Doppler velocimeter*) para medição de velocidades em três dimensões; inversor de frequência e/ou medidor de vazão eletromagnético, propriamente dito para monitoramento da descarga líquida; sensor *laser*, para medição da espessura dos depósitos de sedimento.

II.3.1 Monitoramento das velocidades: LSPIV e Vectrino

Uma das técnicas para monitoramento de velocidades superficiais do escoamento de menor custo dentre outras existentes corresponde ao LSPIV (*large scale particle image velocimetry*).

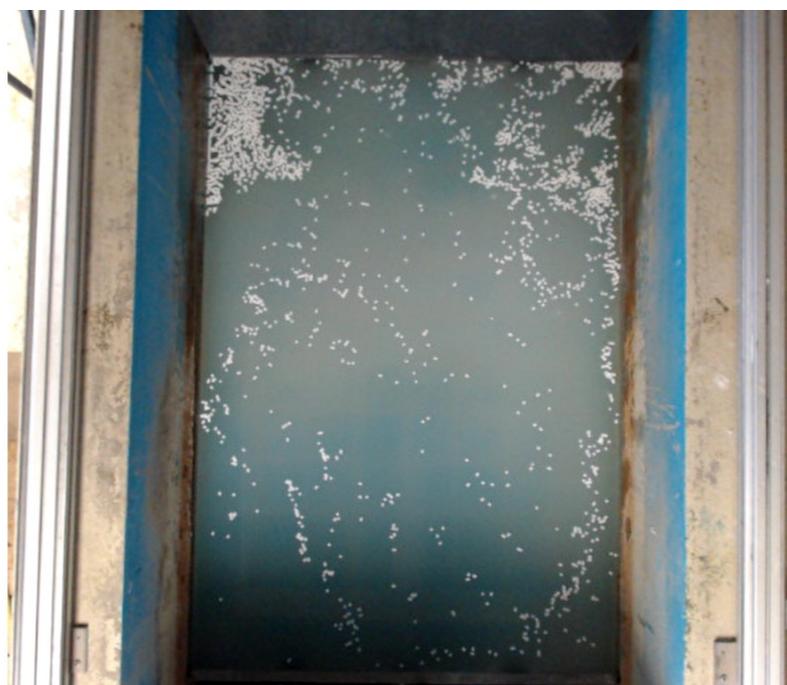
De forma sucinta, a técnica envolve a instalação de uma vídeo-câmera de alta resolução sobre uma determinada área em que se deseja caracterizar o campo de velocidades superficiais. Durante um período de tempo pré-estabelecido, de acordo com o interesse do estudo, realiza-se a gravação de um vídeo ou a captura de imagens espaçadas de mesmo intervalo temporal Δt . Para tanto, durante a filmagem ou aquisição de imagens, é necessária a utilização de traçadores cujas trajetórias possam ser mapeadas na sequência de registros tomados no decorrer do experimento. Em seguida, com o auxílio de um programa computacional específico baseado no cálculo da média estatística para estimação dos deslocamentos dos traçadores, realiza-se a transformação de uma sequência de imagens em campos

bidimensionais de velocidade superficial do escoamento (WEITBRECHT; KÜHN; JIRKA, 2002; MESELHE; PEEVA; MUSTE, 2004).

No que se refere à utilização de traçadores na água, Meselhe, Peeva e Muste (2004) ressaltam que devem ser escolhidas partículas que sejam grandes o suficiente para serem detectadas pela câmera, porém, pequenas e leves o suficiente para flutuarem sobre a superfície líquida e auxiliarem no adequado mapeamento das velocidades.

A Figura II.2 corresponde a uma fotografia capturada de um dos ensaios realizados com água limpa no âmbito deste estudo, no LH-IST, em que se aplicou a técnica do LSPIV.

FIGURA II.2 - Imagem capturada de um dos ensaios realizados com água limpa no LH-IST

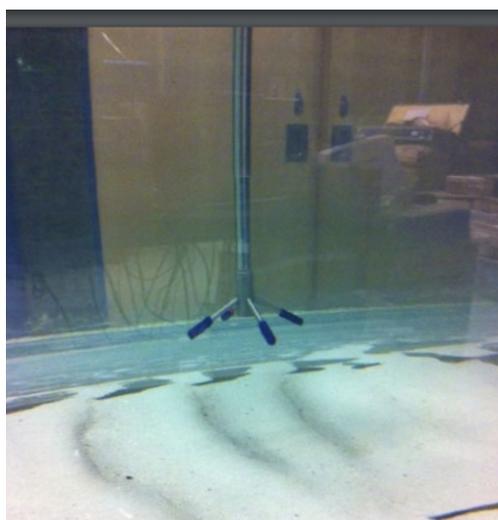


Um dos programas computacionais existentes para processamento de imagens e transformação das mesmas em campos de velocidade, utilizado nesta pesquisa, denomina-se FUDAA-LSPIV. O programa, de origem francesa, foi desenvolvido pela empresa estatal do setor energético Electricité de France – Pesquisa e Desenvolvimento e Divisão Técnica Geral (*EDF R&D* e *EDF DTG*) e pelo IRSTEA (Instituto Nacional de Pesquisa em Ciências e Tecnologias Ambientais e Agrícolas, na sigla em francês) e pode ser obtido gratuitamente na página de Internet de seus desenvolvedores.

Quando se tem o interesse em obter campos tridimensionais de velocidade, pode ser utilizado um dispositivo do tipo ADV (*acoustic Doppler velocimeter*). Um exemplo de dispositivo ADV consiste na sonda *Vectrino* (FIGURA II.3), baseada na medição de velocidades instantâneas tridimensionais a partir da emissão de feixes acústicos Doppler (NORTEK, 2013). Tal sonda necessita ser deslocada ponto a ponto, ao longo de uma malha, durante a aquisição dos dados.

Ainda de acordo com a empresa desenvolvedora do equipamento, a Nortek (2013), o *Vectrino* pode ser empregado quando se deseja realizar estudos de camada-limite e de movimentação de fundo, bem como de turbulência. A precisão do equipamento, segundo o fornecedor, é igual a $\pm 1\%$ do valor medido ± 1 mm/s. O equipamento possui interface como o programa computacional MatLab.

FIGURA II.3 – Sonda do tipo *Vectrino*



Fonte: NORTEK, 2013.

Diferentemente dos sensores UVP (*ultrasonic Doppler velocity profiler*), a sonda *Vectrino* não demanda a utilização de um conjunto de três sondas, já que integra todos os dispositivos necessários para caracterização das velocidades tridimensionais. O equipamento pode ser encontrado no mercado nas versões *downlooking* (com medições de velocidade 5 cm abaixo do dispositivo integrado à sonda), conforme Figura II.3, e *sidelooking* (com medição de velocidade lateralmente à sonda, 5 cm à frente do mesmo dispositivo).

VII.3.2 Monitoramento das vazões: inversor de frequência e medidor eletromagnético

A medição indireta de vazão líquida pode ser realizada mediante utilização de um inversor de frequência (FIGURA II.4). ‘Inversor de frequência’ corresponde ao termo utilizado para designar um dispositivo que permite transformar a tensão elétrica da rede, de amplitude e frequências pré-estabelecidas, em valores correspondentes variáveis, conforme interesse do utilizador. Deste modo, é possível variar a velocidade de rotação e o torque do motor de uma bomba hidráulica de forma controlada, de acordo com a necessidade de operação do sistema (RASHID, 1993 *apud* OLIVEIRA, 2013). Dito de outra forma, o inversor de frequência pode ser entendido como uma fonte de tensão alternada de frequência variável.

Tecnicamente, os inversores de frequência não são aparelhos destinados à medição de vazão líquida, mas para controle da vazão captada por um sistema de bombeamento em função do ajuste da frequência elétrica. Em contrapartida, é possível calibrar valores de rotação do motor do sistema e correlacioná-los às respectivas vazões líquidas, que devem ser medidas inicialmente com o emprego de outra técnica de monitoramento, por exemplo, por meio da instalação de um vertedor em um ponto de interesse. Assim sendo, realiza-se indiretamente a aquisição da vazão por meio de processo de medição volumétrica (balde e cronômetro). Em suma, desde que se tenham mapeadas as rotações do motor de um sistema de bombeamento *versus* as vazões líquidas correspondentes, pode-se admitir que um inversor de frequência seja utilizado como um medidor de vazão indireto.

FIGURA II.4 - Inversores de frequência para controle da velocidade de rotação do motor de sistemas de bombeamento, marca Weg, modelo CFW 09.



Os medidores de vazão eletromagnéticos (FIGURA II.5), por sua vez, são equipamentos baseados na lei de indução de Faraday, em que o fluido em movimento funciona como condutor móvel.

FIGURA II.5 - Medidor de vazão de marca Endress-Hauser modelo Promag.



Ao atravessar um campo magnético cortando as linhas de campo, há o aparecimento de uma força eletromotriz no fluido proporcional a sua velocidade. Com o auxílio de um transmissor de vazão instalado na tubulação entre flanges, é possível aferir a descarga líquida correspondente (INCONTROL, 2011).

II.3.13 Monitoramento da espessura dos depósitos de sedimento: sensor de distância a *laser*

Outra variável de interesse para avaliação dos depósitos de sedimentos em modelagem física de reservatórios rasos consiste na espessura desses depósitos no fundo do reservatório.

No estudo de Camnasio (2012), utilizou-se um sensor de distância a *laser* da marca Baumer, modelo OADM 13, indicado na Figura II.6. Segundo informações do fabricante (BAUMER, 2017), esse sensor permite realizar medições em distâncias de até 550 mm em relação à fonte emissora do *laser*, demanda um tempo de resposta inferior a 2 minutos e o diâmetro do feixe *laser* emitido é de 1 mm.

FIGURA II.6 - Sensor de distância a laser da marca Baumer, modelo OADM 1317480/S35A



Fonte: BAUMER, 2017.

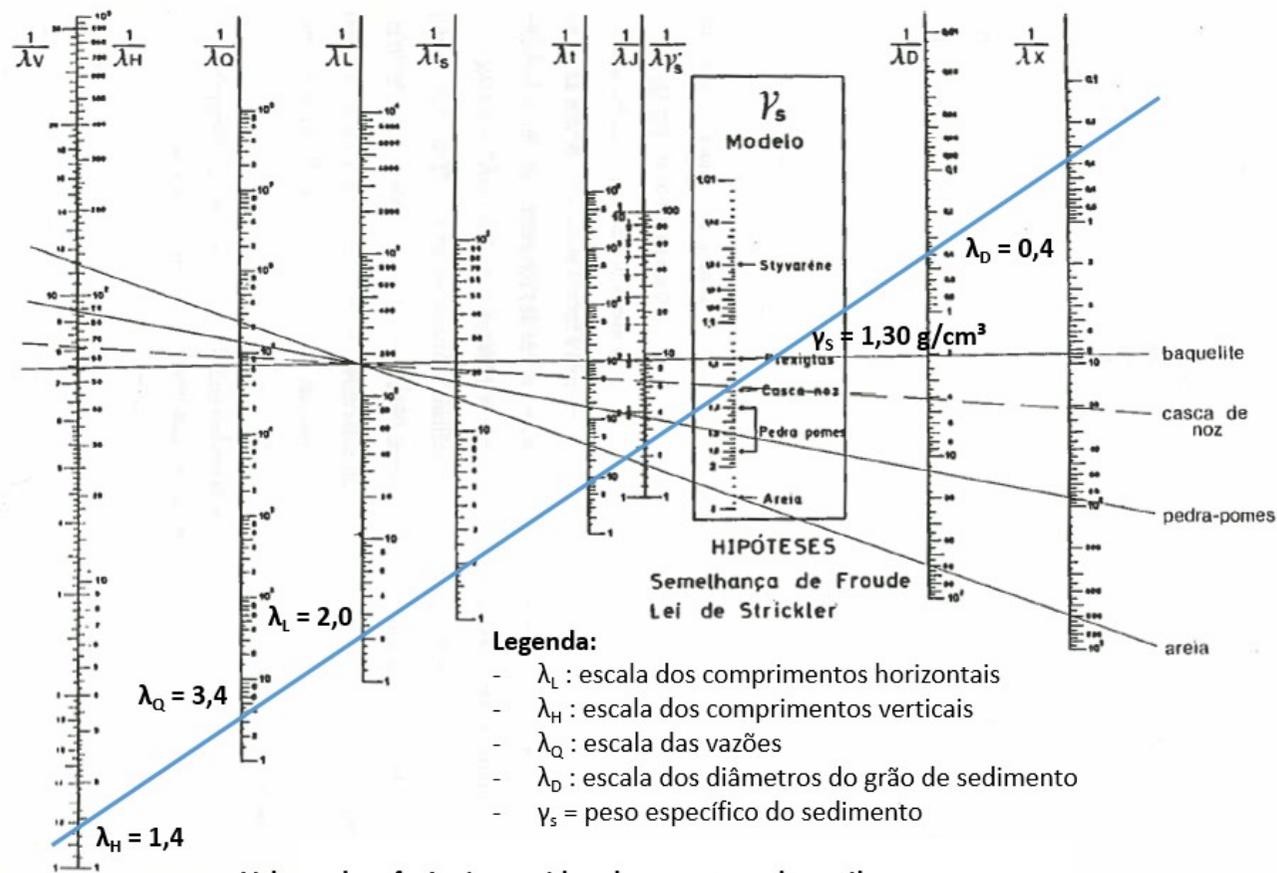
A Figura II.7 corresponde a uma imagem da instalação do dispositivo em questão em um suporte móvel, permitindo, desse modo, a aquisição dos dados de espessura dos depósitos de sedimento.

FIGURA II.7 - Sensor de distância a *laser* instalado sobre uma barra metálica acima do reservatório monitorado



Fonte: CAMNASIO, 2012.

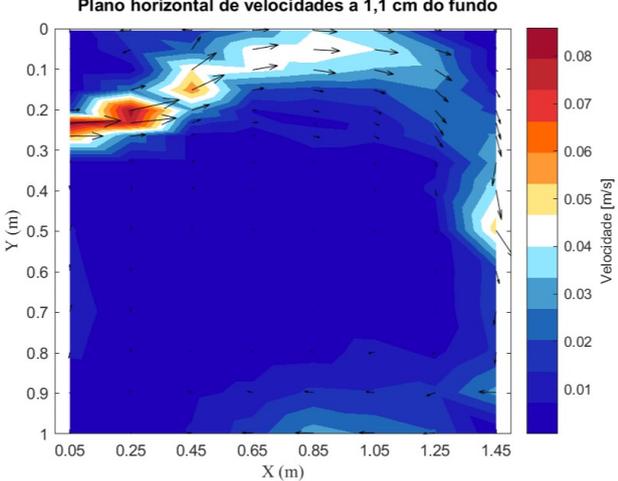
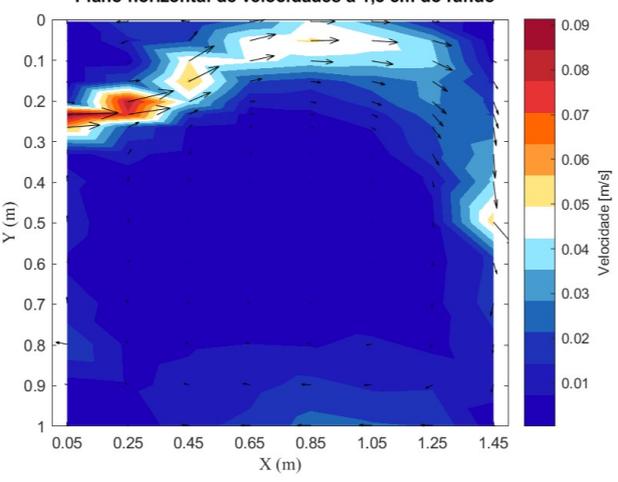
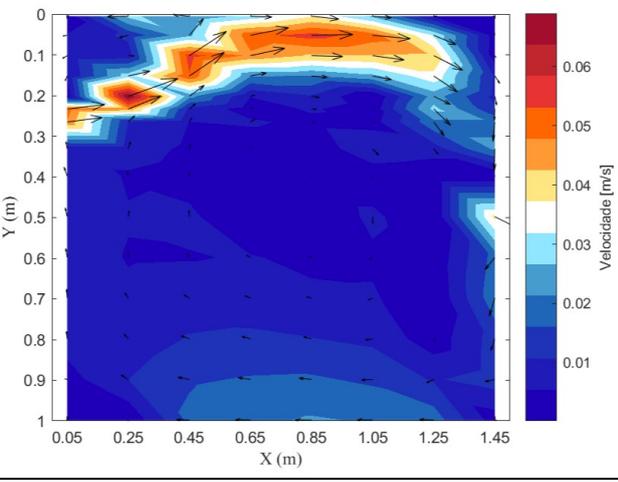
APÊNDICE III – Ábaco de Chauvin e relações de proporção estabelecidas entre as grandezas físicas empregadas nos ensaios do CPH-UFMG e os do LH-IST



Valores de referência considerados para traçado no ábaco:

- Escala dos comprimentos horizontais ($\lambda_L = 2,0$)
- Peso específico aproximado do grão de baquelite ($\gamma_s = 1,30 \text{ g/cm}^3$)

APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa

Configuração LC – $Q = 0,15 \text{ L/s}$ e $h = 3,6 \text{ cm}$	
Profundidade de referência (em relação ao fundo)	Plano horizontal correspondente
<p>1,1 cm (30% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 1,1 cm do fundo</p> 
<p>1,8 cm (50% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 1,8 cm do fundo</p> 
<p>2,9 cm (80% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 2,9 cm do fundo</p> 

APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa (continuação)

Configuração LC – $Q = 0,37$ L/s e $h = 7,1$ cm	
Profundidade de referência (em relação ao fundo)	Plano horizontal correspondente
2,1 cm (30% de h)	<p>Plano horizontal de velocidades a 2,1 cm do fundo</p>
3,6 cm (50% de h)	<p>Plano horizontal de velocidades a 3,6 cm do fundo</p>
5,7 cm (80% de h)	<p>Plano horizontal de velocidades a 5,7 cm do fundo</p>

APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa (continuação)

Configuração LL – $Q = 0,15 \text{ L/s}$ e $h = 3,6 \text{ cm}$	
Profundidade de referência (em relação ao fundo)	Plano horizontal correspondente
<p>1,1 cm (30% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 1,1 cm do fundo</p>
<p>1,8 cm (50% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 1,8 cm do fundo</p>
<p>2,9 cm (80% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 2,9 cm do fundo</p>

APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa (continuação)

Configuração LL – $Q = 0,37$ L/s e $h = 7,1$ cm	
Profundidade de referência (em relação ao fundo)	Plano horizontal correspondente
<p>2,1 cm (30% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 2,1 cm do fundo</p>
<p>3,6 cm (50% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 3,6 cm do fundo</p>
<p>5,7 cm (80% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 5,7 cm do fundo</p>

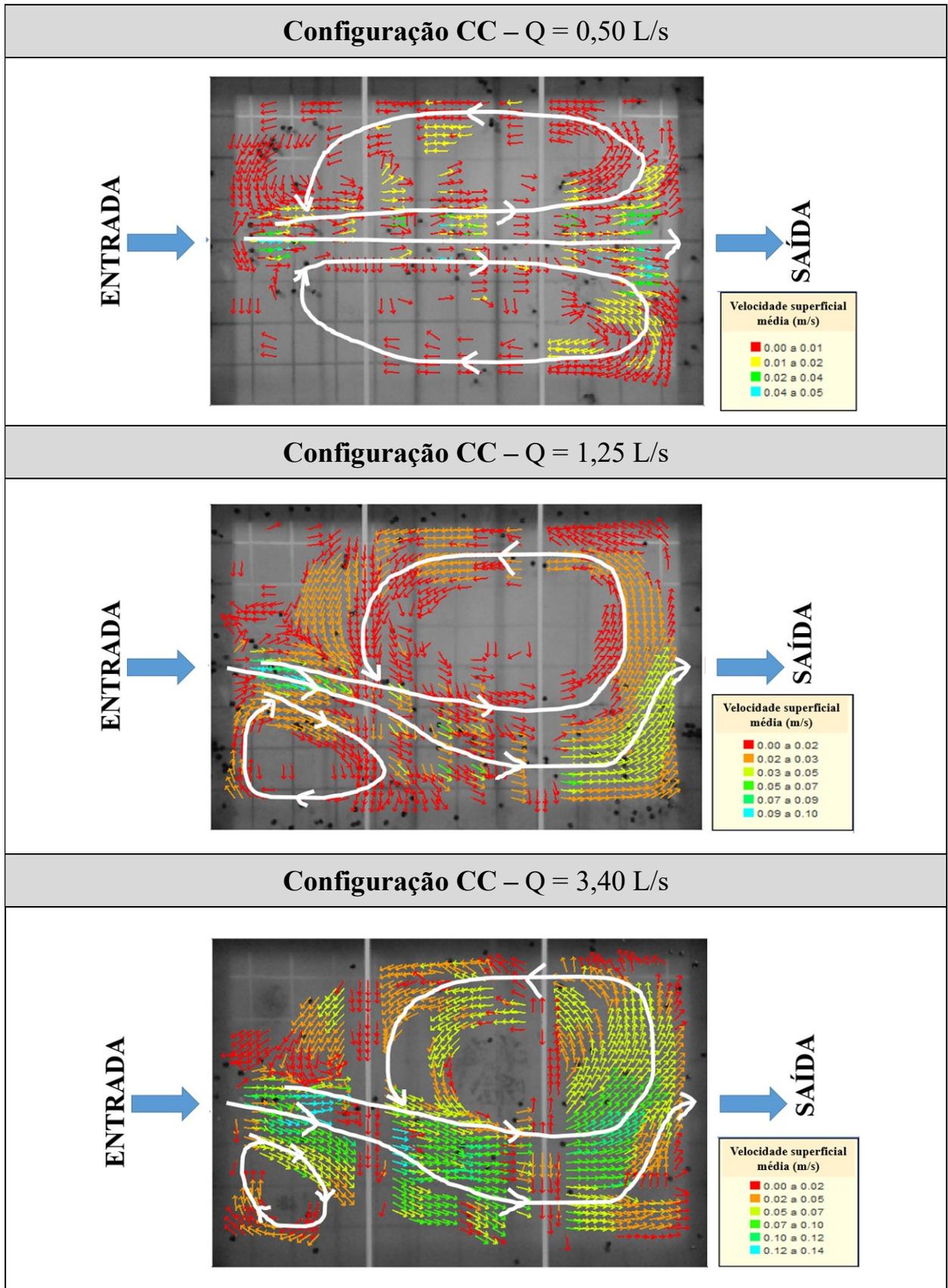
APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa (continuação)

Configuração LR – $Q = 0,15 \text{ L/s}$ e $h = 3,6 \text{ cm}$	
Profundidade de referência (em relação ao fundo)	Plano horizontal correspondente
<p>1,1 cm (30% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 1,1 cm do fundo</p>
<p>1,8 cm (50% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 1,8 cm do fundo</p>
<p>2,9 cm (80% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 2,9 cm do fundo</p>

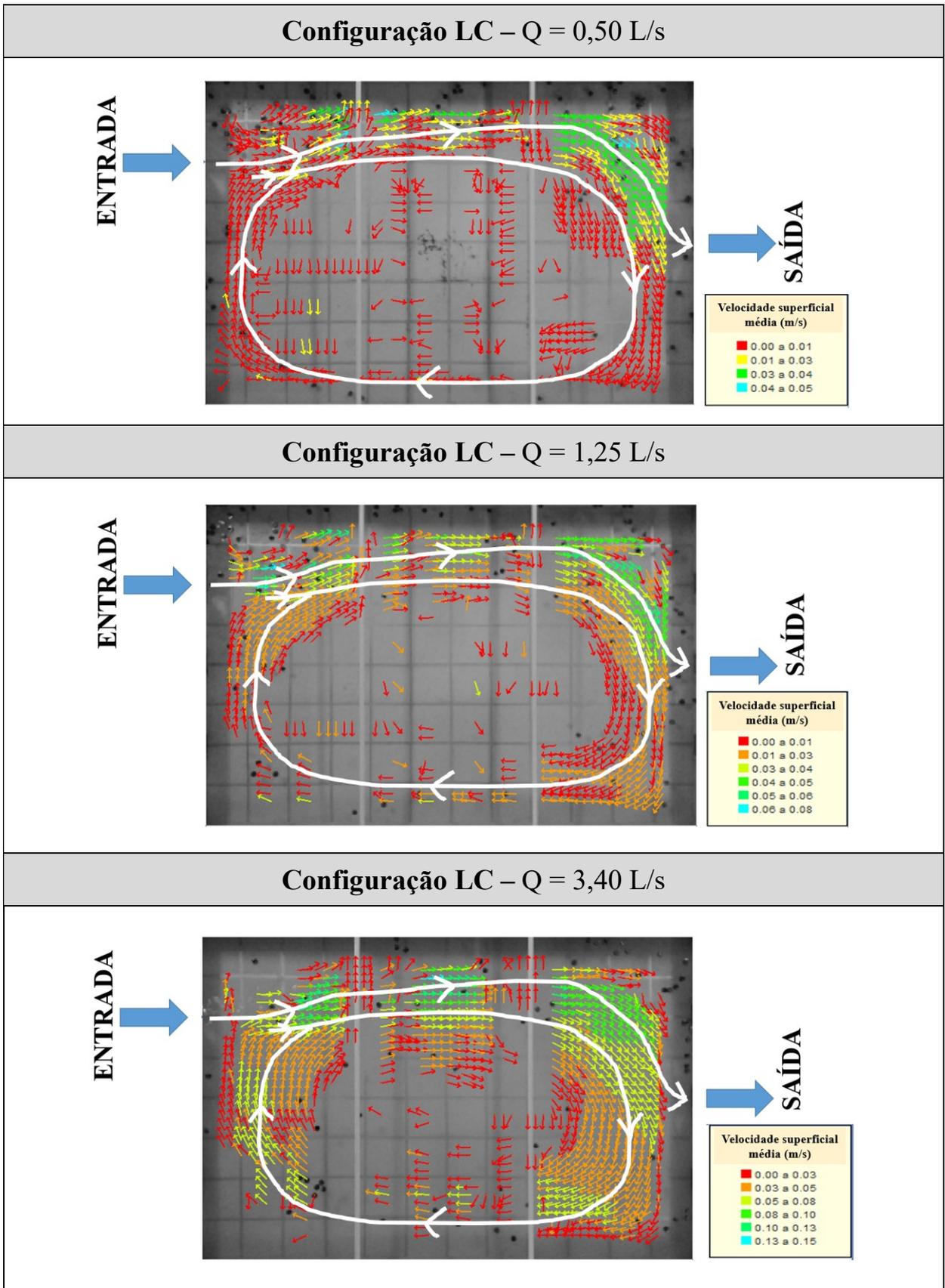
APÊNDICE IV – Planos horizontais de velocidade em profundidade referentes aos experimentos do LH-IST com água limpa (continuação)

Configuração LR – $Q = 0,37$ L/s e $h = 7,1$ cm	
Profundidade de referência (em relação ao fundo)	Plano horizontal correspondente
<p>2,1 cm (30% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 2,1 cm do fundo</p>
<p>3,6 cm (50% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 3,6 cm do fundo</p>
<p>5,7 cm (80% de h)</p>	<p>Plano horizontal de velocidades a 5,7 cm do fundo</p>

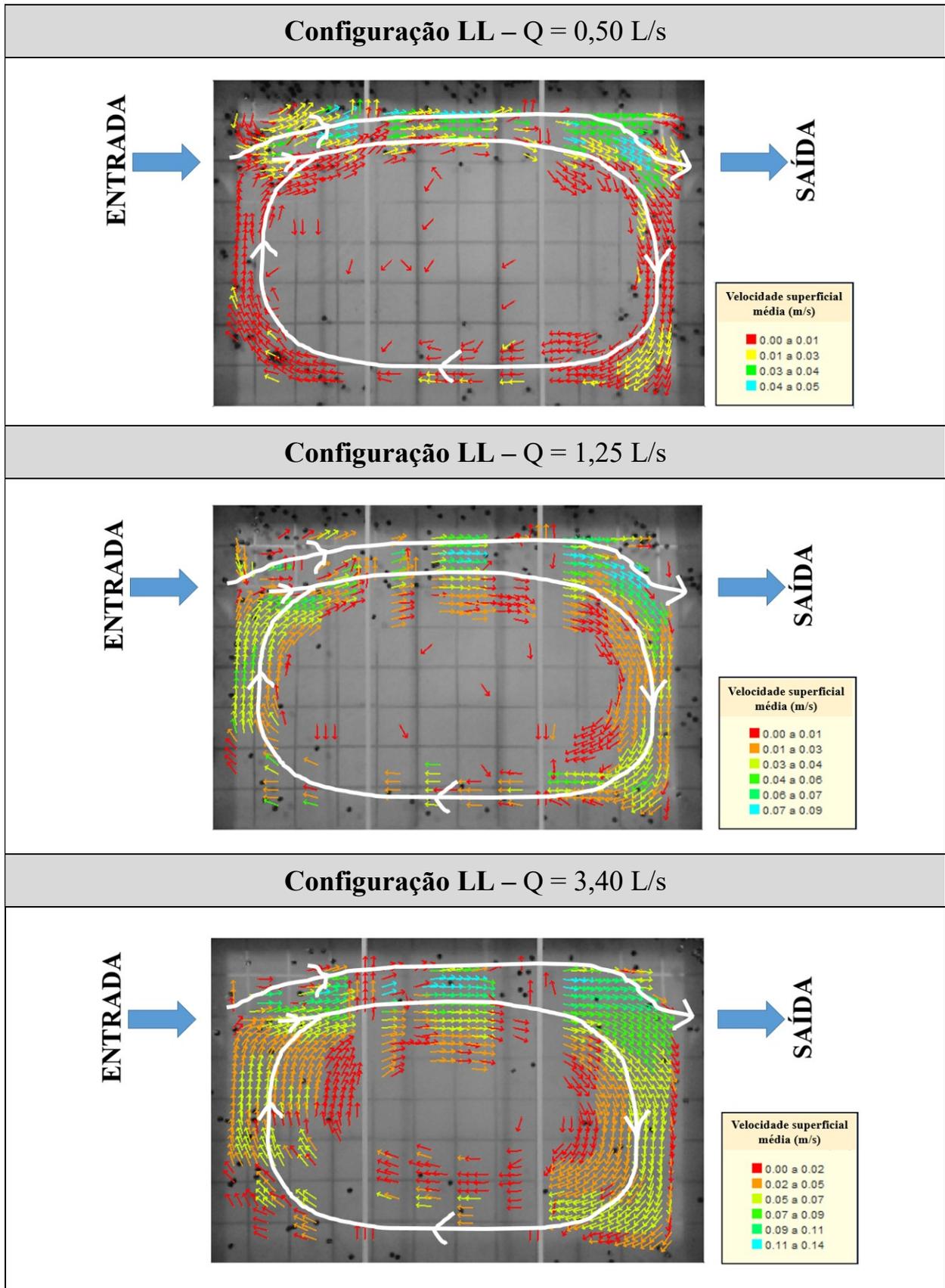
APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG



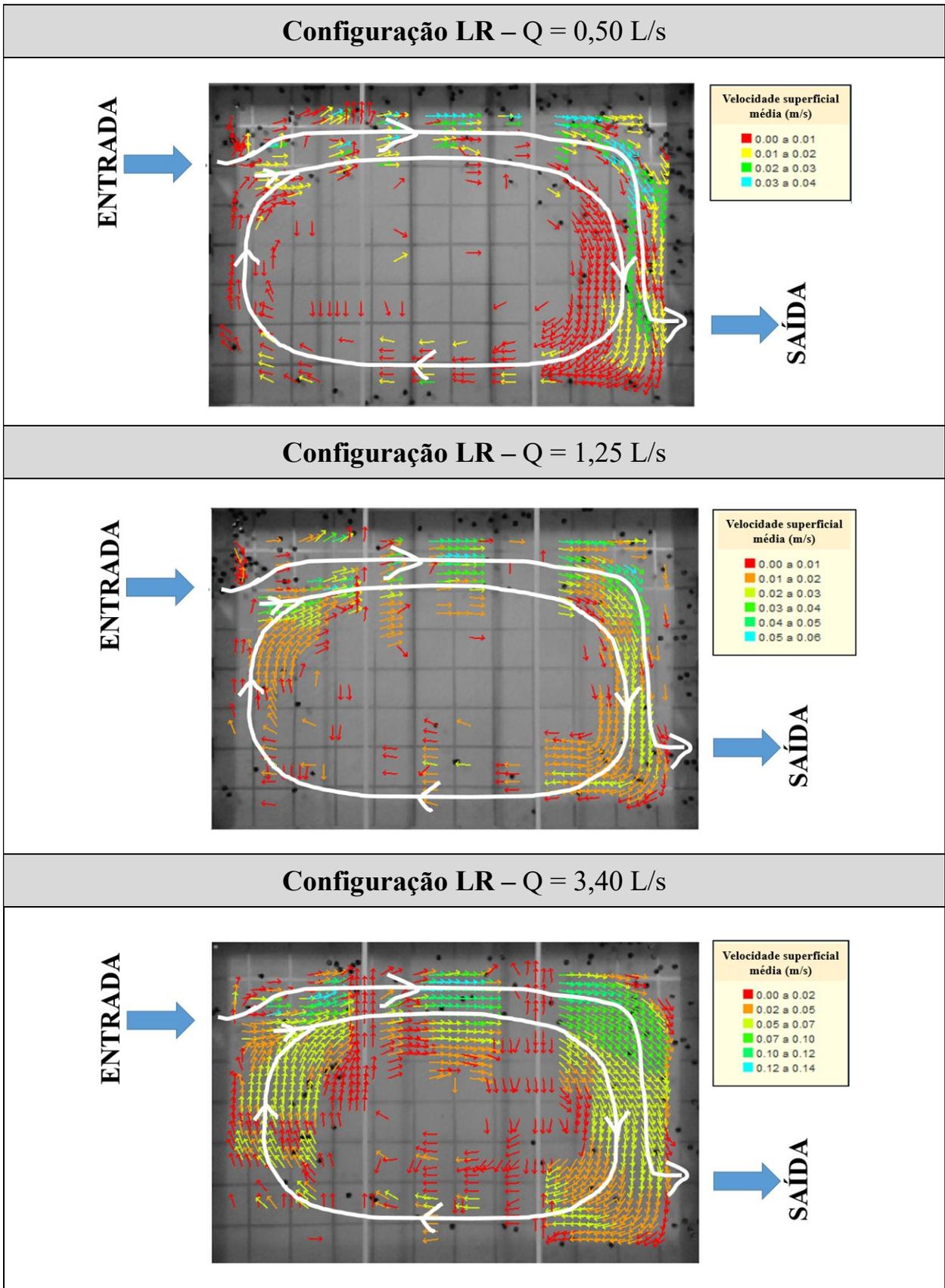
APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG (continuação)



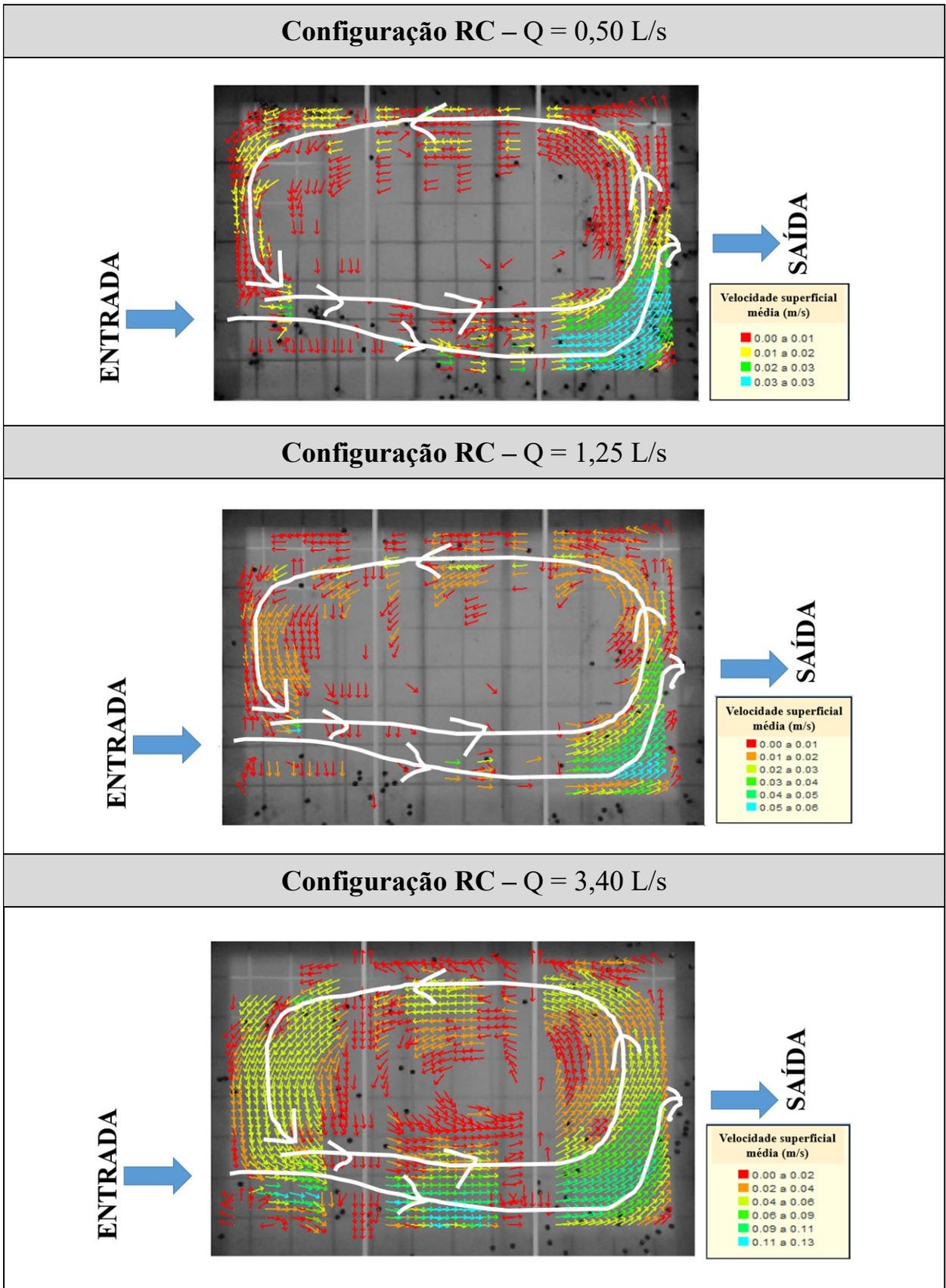
APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG (continuação)



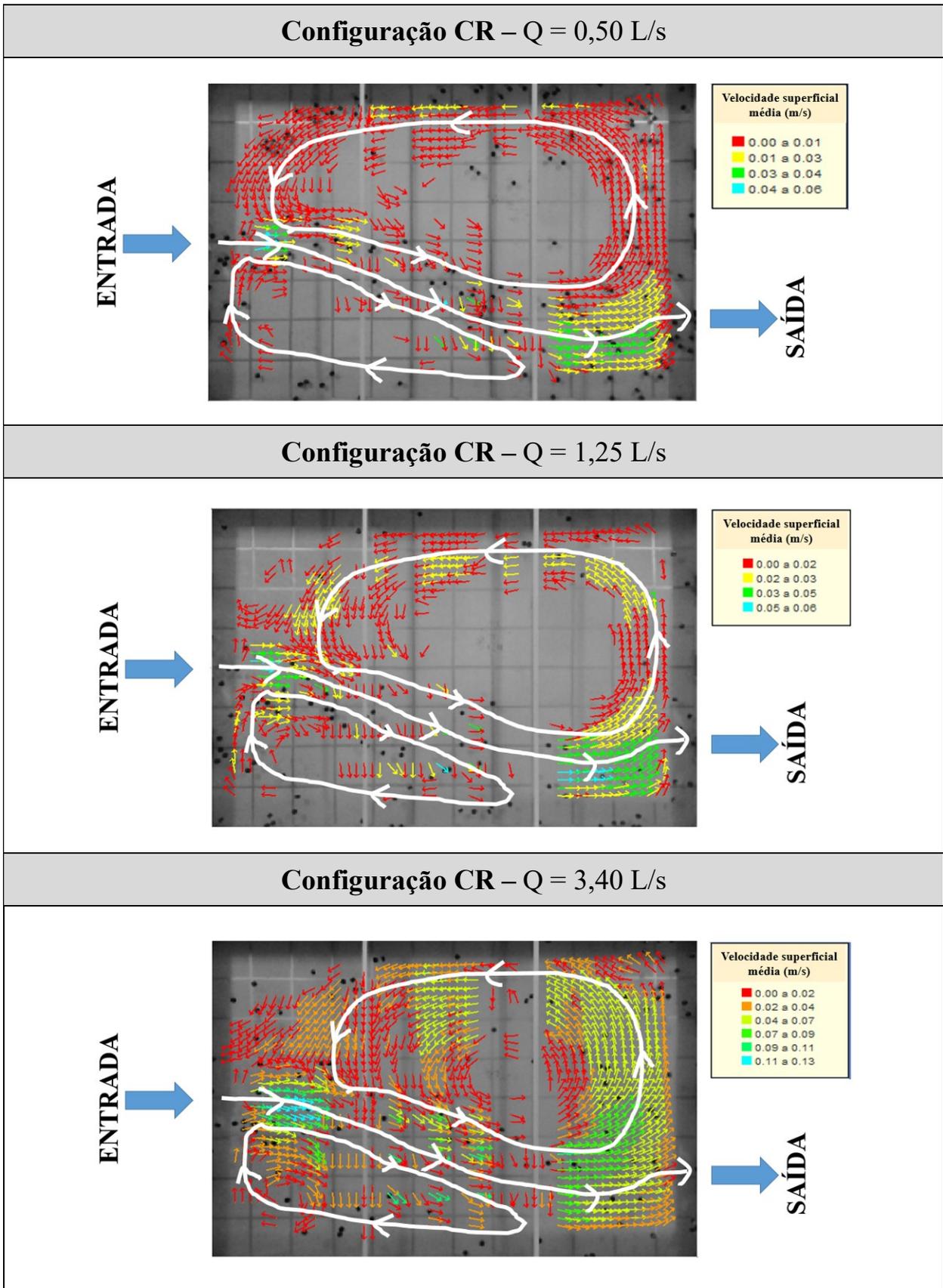
APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG (continuação)



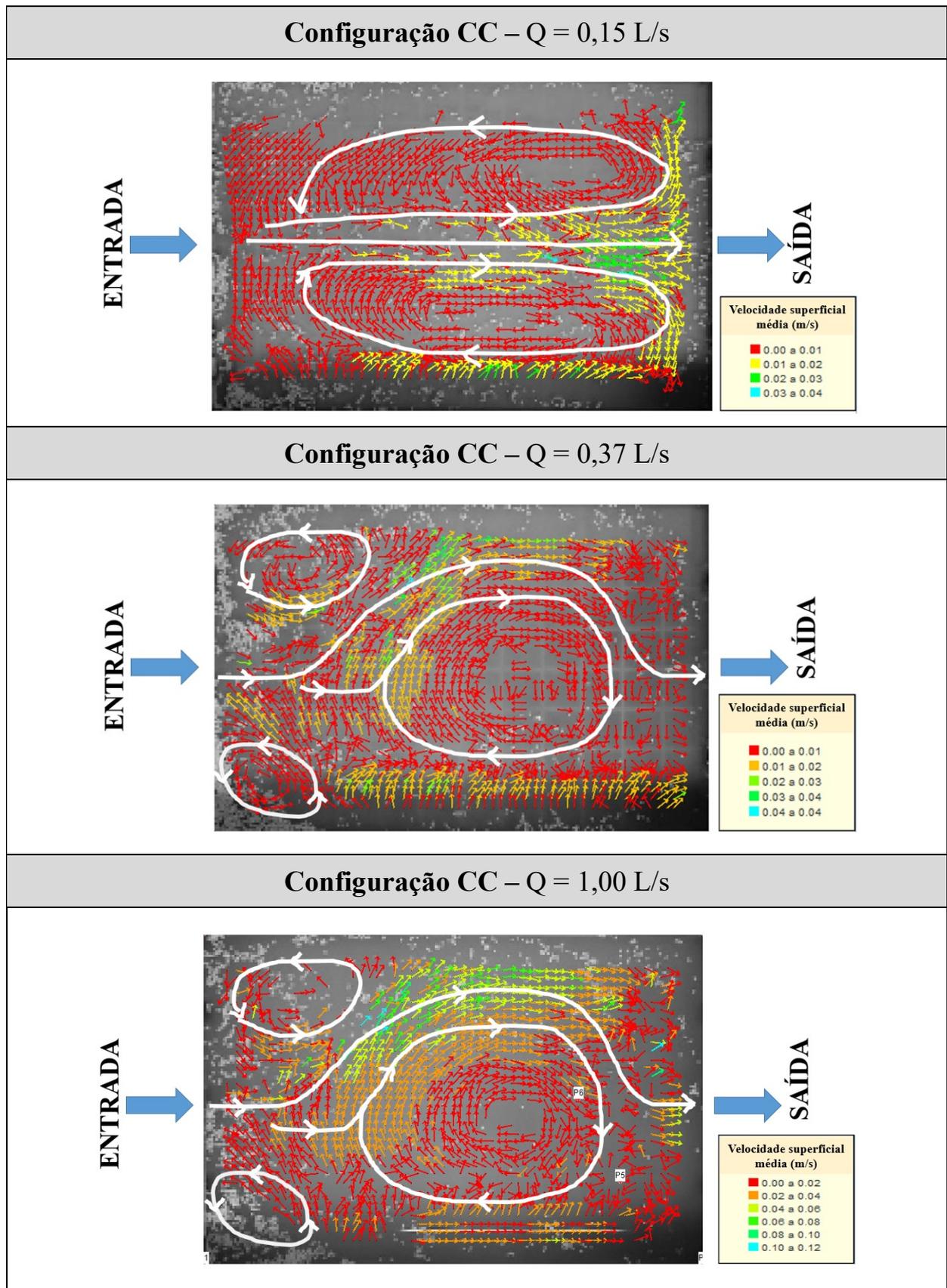
APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG (continuação)



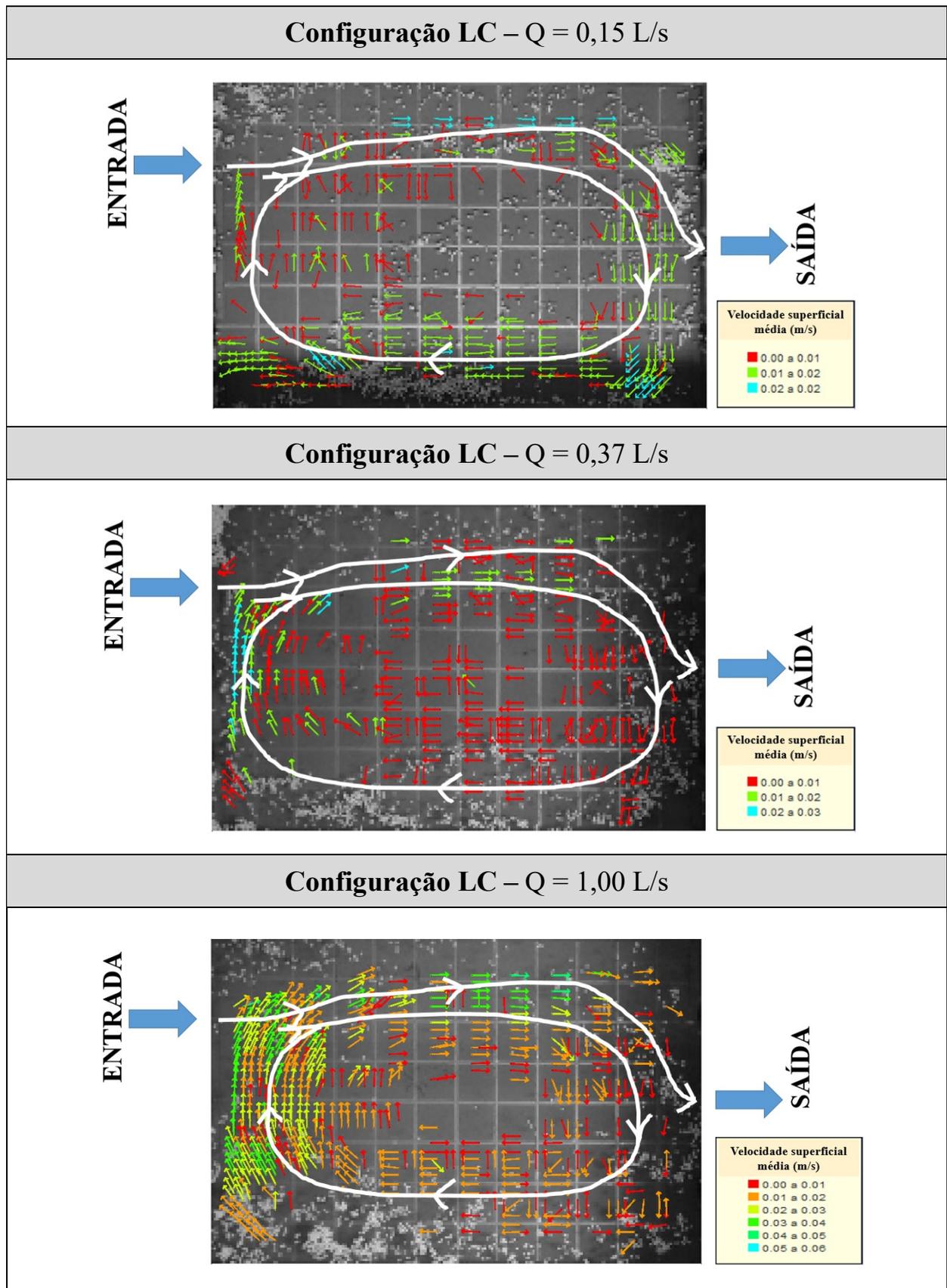
APÊNDICE V – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do CPH-UFMG (continuação)



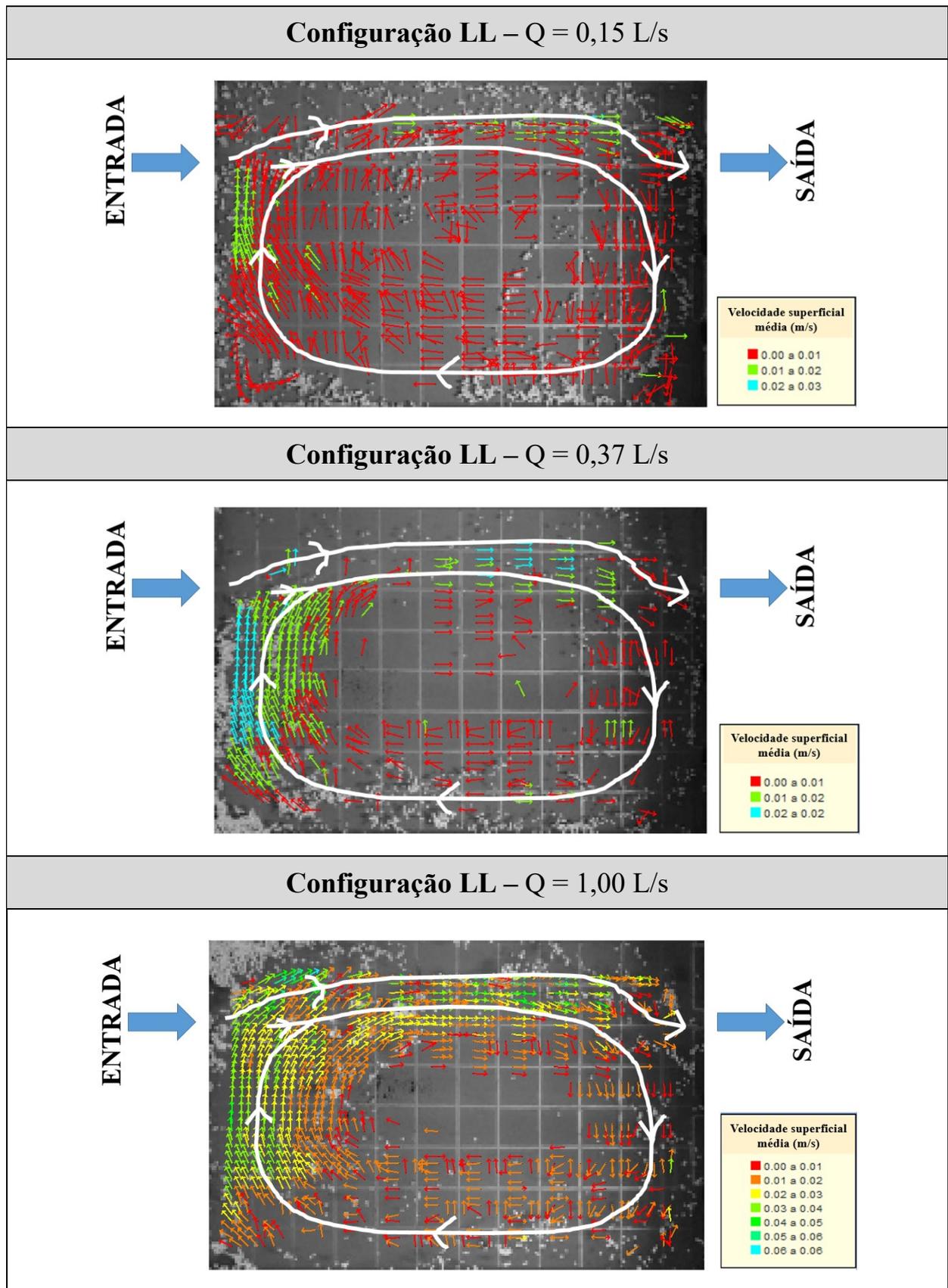
APÊNDICE VI – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST



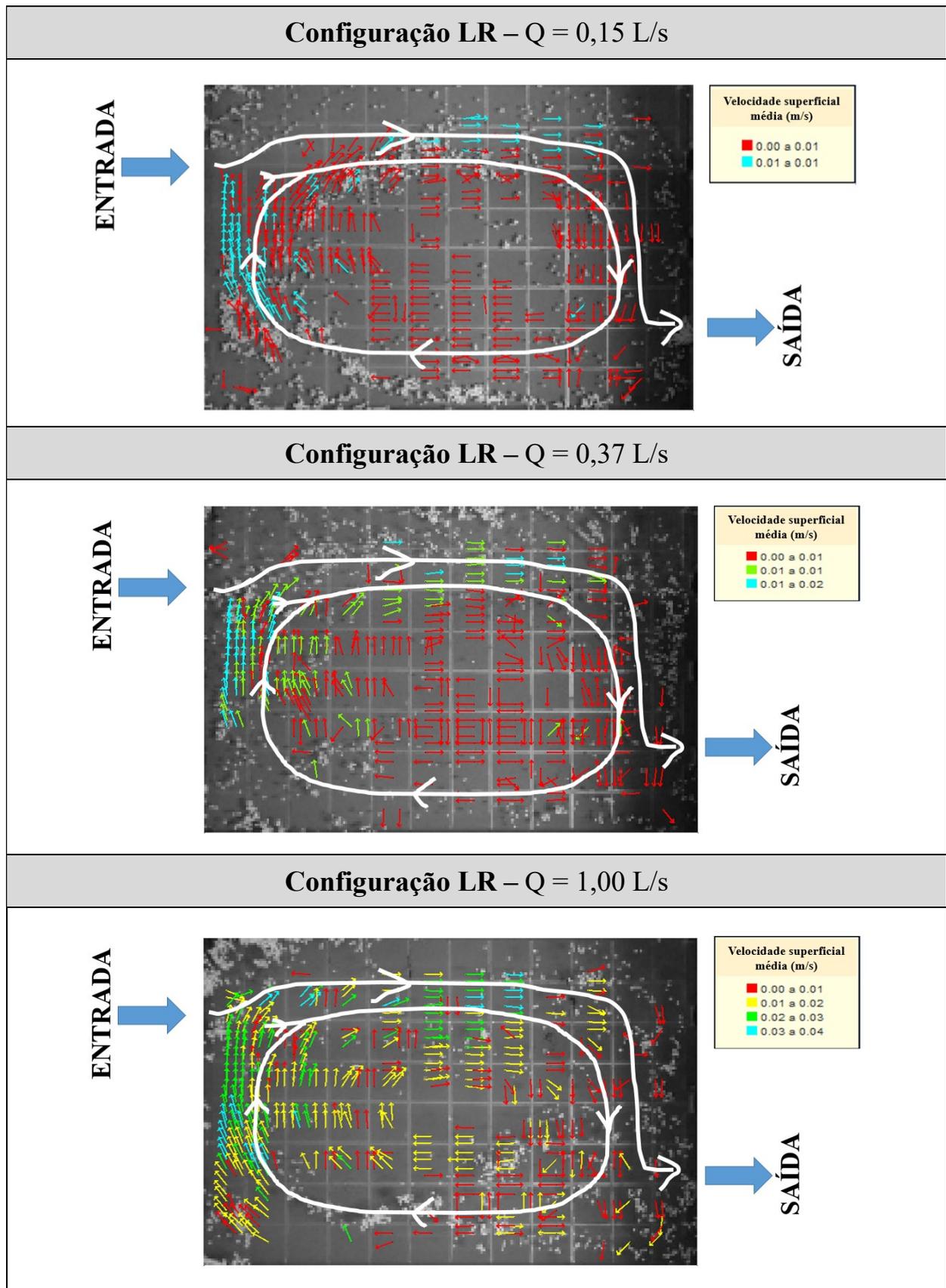
APÊNDICE VI – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST (continuação)



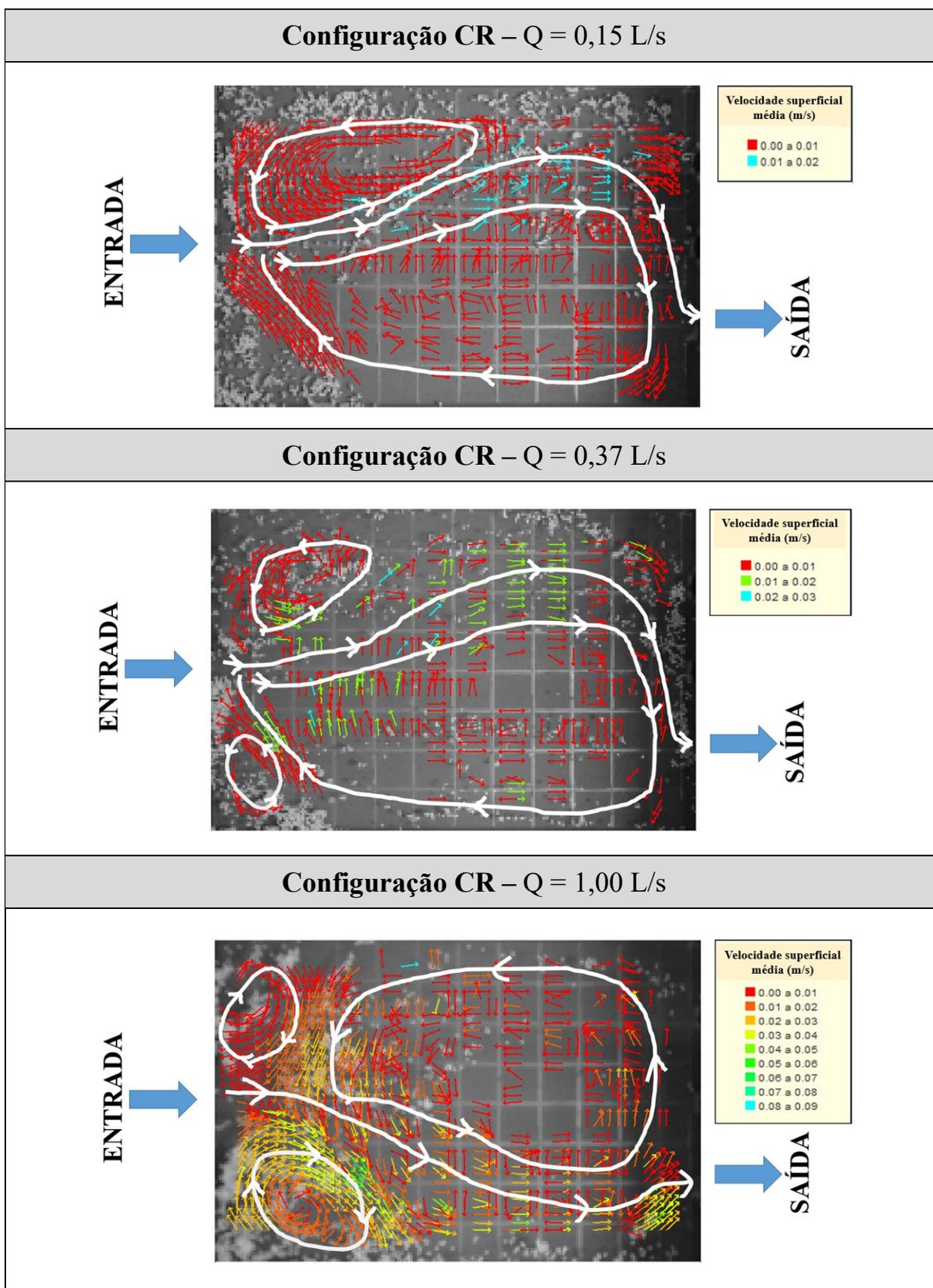
APÊNDICE VI – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST (continuação)



APÊNDICE VI – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST (continuação)



APÊNDICE VI – Campos de velocidade superficial referentes aos ensaios com água limpa do LH-IST (continuação)



APÊNDICE VII – Distribuição transversal de velocidades em profundidade – Ensaios com água limpa do LH-IST

O conteúdo integral deste Apêndice VII foi disponibilizado no seguinte link de compartilhamento:

<https://drive.google.com/file/d/1D23xq0Q0E68rYzmrKZwTwZBZO3IbZa8V/view?usp=sharing>