

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ABLAIL PAULA PINHEIRO

**CAPTURA DE EFEITOS DE TURBULÊNCIA DE ESCOAMENTOS EM
CANAIS HIDRÁULICOS POR MODELOS RANS E LES**

Belo Horizonte
Agosto de 2021

CAPTURA DE EFEITOS DE TURBULÊNCIA DE ESCOAMENTOS EM CANAIS HIDRÁULICOS POR MODELOS RANS E LES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Doutora Hersília de Andrade e Santos

Belo Horizonte

2021

Pinheiro, Ablail Paula
P654c Captura de efeitos de turbulência de escoamentos em canais
hidráulicos por modelos Rans e Les / Ablail Paula Pinheiro. – 2021.
125 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Civil.

Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.

Bibliografia: f. 119-125.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Canais (Engenharia hidráulica) – Teses. 2. Fluxo de canal aberto –
Teses. 3. Dinâmica de fluidos computacional – Teses. 4. OpenFOAN
(Software) – Teses. 5. Mecânica dos fluidos – Teses. 6. Turbulência –
Teses. I. Santos, Hersília de Andrade e. II. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 627.042

RESUMO

A turbulência é um fenômeno em que as partículas do fluido se misturam de forma desordenada caracterizado pela presença de flutuações de velocidades instantâneas irregulares e aparentemente aleatórias. A aplicação de modelos numéricos para a análise do escoamento em estruturas de transposição da ictiofauna permite uma melhor compreensão do escoamento turbulento, visto que a turbulência é um aspecto notável para explicação do movimento de peixes. As equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ têm sido o principal modelo numérico para caracterizar o escoamento em escadas para peixes. Mais recentemente, a simulação LES (*Large Eddy Simulation*) foi relatada como sendo melhor para caracterização da turbulência em escoamentos incompressíveis. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar se os modelos numéricos RANS e LES são capazes de capturar os efeitos de turbulência de um escoamento hidráulico em dois modelos físicos: 1) escada para peixe do tipo ranhura vertical central em escala reduzida e 2) canal circular para estudo do comportamento de larvas de peixes. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de Dinâmica de Fluidos Computacional (em inglês, *Computational Fluid Dynamics* - CFD) utilizando o software OpenFOAM. Tais modelos mostraram-se uma ferramenta eficiente para determinação dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica, mas os modelos LES tiveram melhor aderência aos resultados laboratoriais em ambos os canais. A sensibilidade dos modelos LES foi maior do que dos modelos RANS na simulação de escoamentos turbulentos em canais para estudos de peixes. Na escada para peixes, os resultados foram validados com os dados ADV para todas as faixas de velocidade e para os menores valores de energia cinética turbulenta ($<0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Já no canal curvo, os modelos tiveram resultados validados através da velocidade. A aplicação do modelo LES em canais para estudos de peixes será útil para melhorar a compreensão do desempenho da passagem de peixes.

Palavras-chaves: Canal livre; Dinâmica de Fluidos Computacional; OpenFOAM; Turbulência.

ABSTRACT

Turbulence is a phenomenon in which the fluid particles mix disorderly and where there are instantaneous fluctuations in velocities that are irregular and apparently random. The application of numerical models for the analysis of the flow in transposition structures of the ichthyofauna allows for a better understanding of turbulent flow, since turbulence is a notable aspect for explaining fish movement. The RANS equations (Reynolds Averaged Navier Stokes) with the $k-\epsilon$ turbulence model have been the main numerical model to characterize the flow in fish passages. More recently, a LES (Large Eddy Simulation) simulation was reported to be better for characterizing turbulence in incompressible flows. Thus, this work aimed to evaluate whether the numerical models RANS and LES are able to capture the turbulence effects of a free surface hydraulic flow measured in two physical model: 1) fish ladder of central vertical slot in reduced scale, and 2) curve channel for fish juvenile. Therefore, a Computational Fluid Dynamics (CFD) model was developed using OpenFOAM. In order to validate the model, velocity measurements with ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) were made to compare and adjust the results of the simulations. The LES kEqn model was better than RANS $k-\epsilon$ in representing turbulence. An application of the LES model in flumes will be useful to improve the understanding of fish passage performance. Such models proved to be an efficient tool for determining the profiles of velocity, turbulent kinetic energy, vorticity and hydraulic strain, but the LES models had better adherence to laboratory results in both channels. Thus, it is concluded that the sensitivity of the LES models is greater than that of the RANS models in simulating turbulent flows in channels for fish studies. In the vertical slot fishway, the models had its results validated validated with ADV data for all speed ranges and for the lowest turbulent kinetic energy values ($<0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2$). In the racetrack flume, the models had results validated with the velocity. The application of the LES model in channels for fish studies will be useful to improve the understanding of fish passage performance.

Keywords: Open channel; Computational Fluid Dynamics; OpenFOAM; Turbulence

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Professora Dra. Hersília, por todos conhecimentos transmitidos ao longo dos anos de iniciação científica, monitoria e mestrado e por toda sua contribuição científica para que este trabalho fosse realizado.

Ao Ricardo, por ceder o modelo físico da escada para peixes para medição, por compartilhar sua experiência comigo e por aceitar participar da banca.

Aos professores Daniela Guzzon Sanagiotto e Lineker Max Goulart Coelho por aceitarem o convite de participar da minha banca e por contribuírem para a realização deste trabalho.

Ao Itamar, por ter construído o carrinho das medições da escada para peixes.

Aos meus colegas de laboratório GAEA, por terem me ensinado sobre OpenFOAM e terem compartilhado esta experiência com tanta alegria e disposição em ajudar. Em especial Ludmila, Isabella, Paulo e Thati.

Às minhas amigas de mestrado, Evelyn e Ludmylla, por terem me alegrado e compartilhado todos os momentos de mestrado.

Aos meus pais, Francisco e Joseilda, por sempre acreditarem em mim, por todo incentivo e por me amarem sem limites.

Às minhas irmãs Abgail e Ana Luiza, por sempre estarem ao meu lado, por todo companheirismo e por todas as aulas de mecânica dos fluidos.

Ao João Vitor, pelo amor, carinho e ajuda nas medições na escada para peixes.

Aos meus avós, por todas as orações e pela torcida para conclusão deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Por fim, obrigada a todos que torceram por mim!!!

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Medição típica de velocidade pontual em fluxo turbulento..... | 18 |
| Figura 2 - Tipos de malhas (a) estruturada; (b) não-Estruturada; (c) híbrida | 24 |
| Figura 3 - Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) | 26 |
| Figura 4 - Fluxograma do enquadramento metodológico da pesquisa..... | 30 |
| Figura 5 - Modelo físico: a) o canal em Estudo; b) detalhe da ranhura e c) placa entre a ranhura vertical..... | 31 |
| Figura 6 – A) Canal hidráulico laboratorial em estudo localizado na <i>La Trobe University</i> (Austrália) e b) detalhe da borracha circular com pás | 32 |
| Figura 7 - Fluxograma das etapas da modelagem CFD e softwares utilizados..... | 33 |
| Figura 8 - Estrutura dos arquivos em casos do Openfoam | 34 |
| Figura 9 – Desenho feito no Autocad para criação das ranhuras verticais na escada para peixes..... | 35 |
| Figura 10 – Desenho feito no Autocad para criação da malha do <i>racetrack flume</i> ... | 36 |
| Figura 11 - Malha dos modelos RANS e LES para o escoamento da escada para peixes do tipo ranhura vertical..... | 38 |
| Figura 12 - Malha do canal hidráulico curvo..... | 39 |
| Figura 13 – Condições de contorno dos modelos RANS e LES para o escoamento da escada para peixes | 40 |
| Figura 14 – Condições de contorno dos modelos RANS e LES para o escoamento do canal circular | 40 |
| Figura 15 - Pontos de medição com ADV na escada para peixes: a) na piscina a montante; b) na piscina a jusante..... | 48 |
| Figura 16 - Suporte móvel utilizado para realização das medições | 49 |
| Figura 17 – Medição do cenário <i>slow</i> no canal circular. as células em cinza escuro indicam pontos de medição..... | 50 |
| Figura 18 – Medidor do tipo molinete utilizado para medição da velocidade pontual do escoamento principal | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 - Detalhes da malha para os modelos RANS e LES na escada para peixes | 37 |
| Tabela 2 - Refinamento das malhas no canal hidráulico curvo | 37 |
| Tabela 3 - Condições de contorno no OPENFoam usadas para os modelos RANS e LES da escada para peixes do tipo ranhura vertical | 41 |
| Tabela 4 - Condições iniciais e de contorno que serão adotadas | 42 |
| Tabela 5 – Cenários simulados no canal hidráulico de formato oval..... | 43 |
| Tabela 6 - Esquemas de tempo, discretização espacial e o método de acoplamento pressão-velocidade adotado para a escada para peixes do tipo ranhura vertical em estudo no OPENFoam | 44 |
| Tabela 7 - Especificações numéricas utilizadas | 46 |
| Tabela 8 - Métodos de solução e tolerâncias adotadas | 46 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ADV | <i>Acoustic Doppler Velocimeter</i> |
| CFD | <i>Computacional Fluid Dynamics</i> |
| DES | <i>Detached Eddy Simulation</i> |
| DNS | <i>Direct Numerical Simulation</i> |
| GIT | <i>Grid Independence Test</i> |
| LES | <i>Large Eddy Simulations</i> |
| MTP | Mecanismos de Transposição para Peixes |
| OpenFOAM | <i>Open Field Operation And Manipulation</i> |
| PISO | <i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i> |
| RANS | <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> |
| SIMPLE | <i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i> |
| VOF | <i>Volume of Fluid</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|---|
| u | Vetor velocidade |
| t | Tempo |
| Re | Número de Reynolds |
| ρ | Densidade |
| p | Pressão |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| \bar{u} | Velocidade média |
| u' | Flutuação de velocidade |
| \bar{p} | Pressão média |
| μ_t | Viscosidade turbulenta |
| δ_{ij} | Delta de Kronecker |
| k | Energia cinética turbulenta |
| ε | Taxa de dissipação turbulenta |
| C_μ | Coefficiente de proporcionalidade |
| σ_k | Número turbulento de Prandtl para energia cinética turbulenta |
| σ_ε | Número turbulento de Prandtl para taxa de dissipação turbulenta |
| G_k | Geração de energia cinética turbulenta |
| k_{sgs} | Energia cinética da escala da submalha |
| D_{ij} | Tensor de taxa de deformação em escala resolvida |
| ν_{sgs} | Viscosidade turbulenta da submalha |
| Δ | Comprimento característico do corte do filtro |
| ω | Vorticidade |
| S | Deformação hidráulica |
| τ_{ij} | Tensor de Reynolds |
| α | Fração de volume do elemento |
| ∇ | Operador diferencial ou gradiente |
| $\nabla \cdot$ | Operador divergente |
| ∇^2 | Operador laplaciano |
| Co | Número de Courant |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | PERGUNTA DE PESQUISA | 16 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 16 |
| 1.2.1 | Objetivo geral | 16 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 16 |
| 1.3 | RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES | 17 |
| 2 | REVISÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1 | TURBULÊNCIA | 18 |
| 2.2 | EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES | 19 |
| 2.2.1 | Médias de Reynolds | 19 |
| 2.2.2 | Hipótese de Boussinesq | 20 |
| 2.2.3 | Modelo de fechamento de turbulência k-épsilon | 21 |
| 2.2.4 | LES (Large Eddy Simulations) | 22 |
| 2.2.5 | Modelo de fechamento de turbulência de viscosidade turbulenta de uma equação (em inglês, <i>one-equation subgrid-scale</i>) | 22 |
| 2.2.6 | DNS (Direct Numerical Simulation) | 23 |
| 2.3 | MODELO NUMÉRICO | 23 |
| 2.3.1 | Malhas | 24 |
| 2.4 | VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE MODELOS | 24 |
| 2.5 | ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) | 25 |
| 2.6 | OPEN FIELD OPERATION AND MANIPULATION (OPENFOAM) | 26 |
| 2.7 | VARIÁVEIS HIDRÁULICAS | 27 |
| 2.7.1 | Magnitude de velocidade | 27 |
| 2.7.2 | Deformação hidráulica | 28 |
| 2.7.3 | Energia cinética turbulenta | 28 |
| 2.7.4 | Vorticidade | 28 |
| 2.7.5 | Tensor de Reynolds | 28 |
| 3 | METODOLOGIA | 30 |
| 3.1 | MÉTODO DE ABORDAGEM | 30 |
| 3.2 | MÉTODO DE PROCEDIMENTO | 31 |
| 3.2.1 | Modelos físicos | 31 |
| 3.2.2 | Modelos numéricos | 32 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.2.3 | Análise estatística | 51 |
| 4 | RESULTADOS | 52 |
| 4.1 | ESCOAMENTO TURBULENTO EM UMA ESCADA PARA PEIXES DO TIPO RANHURA-VERTICAL: AVALIAÇÃO NUMÉRICA COM ESQUEMAS RANS E LES (ARTIGO 1) | 52 |
| 4.3 | DISCUSSÃO DOS ARTIGOS | 116 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 117 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 117 |
| | REFERÊNCIAS..... | 119 |

1 INTRODUÇÃO

A turbulência é definida como o movimento tridimensional, temporal e espacial dependente das flutuações irregulares da velocidade instantânea e pontual em um fluido (KIRKBRIDE, 1993). O estado de escoamento turbulento de um fluido, por sua vez, é caracterizado por possuir variações físicas no tempo e no espaço, que normalmente não são lineares e que resultam em dissipação de energia (FRIEDRICH *et al.*, 2001).

A construção de estruturas hidráulicas ao longo dos rios, como barragens e diques, altera as características do escoamento, o que pode refletir em mudanças dos padrões turbulentos desse movimento da água. Assim, a construção dessas estruturas pode afetar os movimentos da ictiofauna local, uma vez que os custos da natação dos peixes (LIAO *et al.*, 2003), a eficiência da captura por espécies predadoras (ENDERS; BOISCLAIR; ROY, 2003), a seleção de habitat (COTEL; WEBB; TRITICO, 2006) e a densidade dos peixes (SMITH *et al.*, 2006) estão relacionados aos processos turbulentos existentes no meio de locomoção desses seres vivos. Assim, a magnitude da turbulência é capaz de atrair ou repelir peixes, auxiliando ou impedindo seus movimentos migratórios (SILVA *et al.*, 2012a).

Visando a preservação de espécies que habitam cursos d'água, foram criados mecanismos de transposição para peixes (MTP): estruturas hidráulicas que permitem a passagem de peixes possibilitando que estes superem obstáculos antropogênicos (BAO *et al.*, 2019). Essas estruturas são construídas sempre que exigidas legalmente por considerações ecológicas em empreendimentos que causam impacto à continuidade de um rio, como, por exemplo, em usinas hidrelétricas (RAJARATNAM; VAN DER VINNE; KATOPODIS, 1986).

Assim, os MTP devem ser concebidos de modo a atrair peixes e permitir que eles entrem, passem e saiam de maneira segura, ou seja, sem ferimentos e sem estresse (LIU, MINNAN; RAJARATNAM; ZHU., 2006). Dentre os tipos de MTP existentes, as escadas para peixes são as mais populares no mundo (CLAY, 1995; FAO/DVWK, 2002; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; LARINIER, 2002) e podem ser descritas como canais artificiais com obstáculos internos, que reduzem a velocidade da água através de um processo de dissipação de energia do escoamento.

Historicamente, seu projeto foi baseado nas características de natação dos peixes, que estão relacionadas principalmente às velocidades máximas de escoamento e às taxas de dissipação de energia (KATOPODIS, 1992, 2005).

Em geral, para cumprir com as considerações ecológicas definidas durante a fase de projeto, as escadas devem gerar um escoamento hidráulico compatível com as demandas de velocidade e de turbulência da ictiofauna local (KATOPODIS, 1992). Entretanto, estudos mostram que apesar de alguns tipos de escadas permitirem a passagem de espécies alvo, algumas espécies de peixes são capturadas em grandes zonas de recirculação e não conseguem atingir rapidamente as áreas de montante dos mecanismos. Em escadas como as do tipo ranhura vertical é possível dividir o escoamento em principal e secundário, este último caracterizado por áreas de recirculação do fluido (TARRADE *et al.*, 2008). No caso dessas obras hidráulicas associadas a passagens de peixes é comum o estudo em modelos reduzidos (MENDONÇA, 2013).

Outro modelo experimental para estudos hidrobiológicos e ecológicos são os canais curvos, em inglês *racetrack flumes* (FARHADI *et al.*, 2018a; FARHADI *et al.*, 2018b; GLAS, *et al.*, 2017; ZENS *et al.*, 2018). Muitos estudos analisam como as larvas de peixes ribeirinhas se movem. Para isso, os experimentos são conduzidos em um canal curvo em cenários cobrindo a faixa de velocidade de habitats naturais. Os resultados obtidos são geralmente aplicados a sistemas hidrelétricos de grande escala.

Ainda hoje, a caracterização dos escoamentos de escada para peixes e em canais laboratoriais para futuras aplicações em rios continua a ser uma motivação de pesquisa (BENCHIKH LE HOCINE; LACEY; PONCET, 2019). Um escoamento turbulento pode exercer diferentes efeitos sobre o movimento dos peixes dependendo de sua magnitude, podendo ajudar ou retardar seus movimentos migratórios (SILVA *et al.*, 2012a).

Modelos físicos têm sido usados para estudos de turbulência em escoamentos de passagens para peixes (BAKI; ZHU; RAJARATNAM, 2015; CABONCE; WANG; CHANSON, 2018; SILVA *et al.*, 2012a; TARRADE *et al.*, 2008), mas o desenvolvimento de modelos numéricos também tem contribuído para uma

compreensão abrangente dos padrões de escoamento turbulento em passagens para peixes (BAKI; ZHU; RAJARATNAM, 2016; BOMBAČ *et al.*, 2015; DUGUAY; LACEY; GAUCHER, 2017; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; MARRINER *et al.*, 2014; QUARANTA *et al.*, 2017; SANAGIOTTO; ROSSI; BRAVO, 2019; SANTOS *et al.*, 2020; STAMOU *et al.*, 2018).

Considerando aspectos de mecânica dos fluidos, todo escoamento de uma única fase de um fluido pode ser descrito pelas equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem de Navier-Stokes, as quais são derivadas dos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento (WHITE, 2003) e que não possuem solução exata. As análises numéricas de escoamentos de fluidos nestas condições são um ramo da dinâmica computacional de fluidos (em inglês *Computational Fluid Dynamics* – CFD) que em geral tem como objetivo determinar variáveis de interesse do escoamento de forma a embasar decisões em projetos de engenharia.

Em escoamentos turbulentos, a variedade de escalas de comprimento e a complexidade dos fenômenos envolvidos na turbulência encarecem computacionalmente a maioria das abordagens de modelagens: a resolução necessária para resolver todas as escalas envolvidas na turbulência tem demanda computacional significativa (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Nesses casos são criados modelos numéricos para aproximar fenômenos turbulentos não resolvidos.

Um dos modelos mais antigos para simplificação tridimensional da turbulência é o de Navier-Stokes com média de Reynolds (em inglês - *Reynolds Averaged Navier-Stokes* - RANS) e esta abordagem para representação numérica da turbulência consiste em calcular a velocidade média e modelar o termo da tensão aparente conhecido como tensor de Reynolds que é de segunda ordem. Em 1970, outro modelo conhecido como Simulação das grandes escalas (em inglês *Large Eddy Simulation* - LES) foi explorado por Deardorff (1970) e basicamente consiste em calcular as grandes escalas e modelar as pequenas escalas de turbulência, sendo estas menores que a malha numérica.

Em termos de demandas computacionais, os modelos LES exigem mais do que modelos RANS. Por outro lado, em escoamentos livres, isto é, regidos pela pressão atmosférica, estudos sugerem que os modelos LES são capazes de modelar com precisão regiões do escoamento onde ocorre o descolamento da camada limite do fluido, bem como outras regiões regidas por forças viscosas significativas como áreas de escoamento secundário (normalmente em direção diferente da direção do escoamento principal). Já o modelo RANS é incapaz de reproduzir esses processos (VAN BALEN; BLANCKAERT; UIJTTEWAAL, 2010; RAMAMURTHY; HAN; BIRON, 2013) devido a restrições computacionais que o impedem de capturar várias fontes de turbulência, como atrito no fundo, tensão de cisalhamento do vento e quebra de ondas (NADAOKA; YAGF, 1998).

Entretanto, estudos de modelos RANS e LES do escoamento em escadas para peixes do tipo ranhura vertical indicaram que, ambos tiveram uma boa aproximação a dados medidos em modelo físico de escoamento turbulento considerando os parâmetros de energia cinética e vorticidade, mas não tiveram boa aproximação do Tensão de Reynolds (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018). Por outro lado, trabalhos apontam a tensão de Reynolds como o principal fator que explica o sucesso da passagem e o tempo de trânsito de peixes em determinados tipos de escadas (SILVA *et al.*, 2012a).

Canais curvos em laboratório têm sido empregados para observar as trajetórias larvais (FARHADI *et al.*, 2018a; GLAS *et al.*, 2017; ZENS *et al.*, 2018) e nesse tipo de estudo o campo das variáveis hidráulicas é importante para conhecimento de limites hidráulicos impostos pelo escoamento a esses estágios iniciais da vida de peixes. Esses estudos concentram-se em estudar a variável hidráulica velocidade. Assim, informações como “velocidade crítica do escoamento”, ou seja, acima da qual as larvas de peixes não são capazes de manter constantemente sua posição na coluna d'água, são obtidas nesses canais. Modelos numéricos têm auxiliado esses estudos e se concentram principalmente em estudos hidrodinâmicos 3D com emprego de equações RANS nos modelos de fechamento da turbulência $k-\epsilon$ padrão ou $k-\omega$. Boas validações têm sido obtidas comparando as velocidades dos modelos numéricos aos dados experimentais. No entanto, em relação à comparação dos perfis de energia cinética turbulenta, os perfis simulados e medidos exibem correlações bastante fracas.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a captura dos fenômenos de turbulência pelos modelos numéricos RANS e LES de escoamentos em dois modelos reduzidos de canais abertos utilizados para estudos de peixes. Pretende-se responder a seguinte pergunta de pesquisa: a sensibilidade dos modelos LES é maior do que dos modelos RANS na simulação de escoamentos turbulentos em canais para estudos de peixes?

Para isto, será utilizado o software de código livre de CFD OpenFOAM (*Open Field Operation And Manipulation*), uma vez que este possui técnicas numéricas eficientes e robustas (LIU, XIAOFENG; GARCIA, 2010). As estruturas físicas estudadas foram o canal hidráulico curvo La Trobe University (Austrália), utilizado para estudos de ovos e larvas de peixes de água doce do local e o modelo reduzido de uma escada para peixe do tipo ranhura vertical (Belo Horizonte).

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

A sensibilidade dos modelos LES é maior do que dos modelos RANS na simulação de escoamentos turbulentos em canais para estudos de peixes?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a captura dos fenômenos de turbulência pelos modelos numéricos RANS e LES em escoamentos turbulentos criados em canais abertos relacionados a estudos de peixe.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mapear o escoamento hidráulico nos canais dos estudos de caso com ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*).
- Identificar as regiões do escoamento principal e do escoamento secundário na escada de peixe em estudo;
- Apresentar os resultados de um modelo numérico e comparar com os de um modelo reduzido em escoamentos turbulentos;

- Comparar os resultados de validação, considerando os parâmetros de velocidade e de turbulência dos modelos numéricos RANS e LES em diferentes vazões e diferentes malhas.

1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES

As restrições e limitações deste trabalho serão melhor discutidas e apresentadas no item discussão. Ressaltam-se que as principais foram:

- Compatibilização do equipamento ADV com o tamanho dos modelos reduzidos, o que limitou de certa forma o número de dados coletados;
- Limitação dos modelos numéricos em modelar toda turbulência do escoamento uma vez que isso demandaria muito processamento computacional.

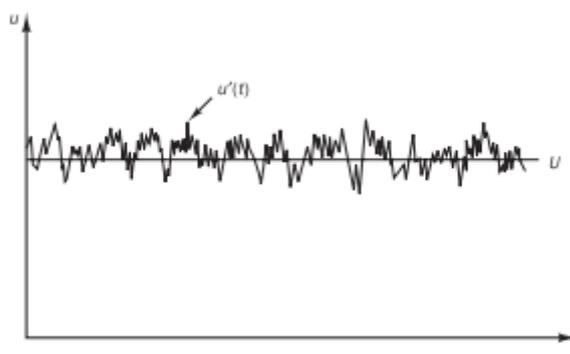
2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 TURBULÊNCIA

Turbulência é um estado de escoamento do fluido caracterizado pela presença de flutuações de velocidades instantâneas irregulares e aparentemente aleatórias (WHITE, 2003). A natureza aleatória de um fluxo turbulento impede os cálculos com base em uma descrição completa do movimento de todas as partículas de fluido, e sua complexidade dos escoamentos turbulentos não permite somente abordagem analítica do problema. Assim, caracteriza-se um fluxo turbulento (Equação 1) pelos valores médios das propriedades do fluxo e pelas propriedades estatísticas de suas flutuações (Figura 1) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$u(t) = U + u'(t) \quad (\text{EQ. 1})$$

Figura 1 - Medição típica de velocidade pontual em fluxo turbulento



FONTE: Adaptado de VERSTEEG; MALALASEKERA (2007)

O estado de escoamento turbulento de um fluido é caracterizado por irregularidade no tempo e no espaço, mistura eficiente, não linearidade, altos números de Reynolds, dissipação e espectros contínuos de escalas de comprimento e tempo (FRIEDRICH *et al.*, 2001). A turbulência é uma característica do escoamento, não do fluido. O estado de escoamento turbulento de um fluido é caracterizado por ser altamente difusivo, rotacional e tridimensional, altamente dissipativo, fenômeno contínuo, por acontecer a altos números de Reynolds e ter espectro de energia.

A classificação do escoamento quanto à trajetória (laminar, de transição ou turbulento) pode ocorrer pelo número de Reynolds, sendo esse a relação entre a força

de inércia e a força viscosa. Em estudos de canais, o número de Reynolds é expresso pela Equação 2 (PORTO, 2004).

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (\text{EQ. 2})$$

onde ρ é a massa específica do fluido (Kgm^{-3}), u é a velocidade média na seção considerada (ms^{-1}), L é uma dimensão geométrica característica (m) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido (mPas^{-1}).

O número de Reynolds é adimensional e permite classificar os escoamentos em três tipos, sendo eles: laminar para $Re < 500$, de transição para $500 < Re < 2000$ e turbulento para $Re > 4000$ (PORTO, 2004).

2.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

As equações que modelam o escoamento de fluidos são conhecidas como equações de Navier-Stokes e derivam-se dos princípios de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento (WHITE, 2003). A complexidade matemática dessas equações, equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem, não permite que análises teóricas encontrem soluções analíticas (FORTUNA, 2000).

Para fluidos incompressíveis, isotérmicos e newtonianos, as equações de Navier-Stokes são expressas pelas Equações 3 e 4, sendo u o vetor velocidade (ms^{-1}), ρ a densidade (Kgm^{-3}), t o tempo (s), g a gravidade (ms^{-2}), p a pressão (Pa) e μ a viscosidade dinâmica (Pas).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{EQ. 3})$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (\text{EQ. 4})$$

2.2.1 Médias de Reynolds

O caráter aleatório de escoamentos turbulentos é descrito matematicamente pelas equações de Reynolds. Ao usarem-se as médias de Reynolds, as variáveis são decompostas em duas componentes: valor médio e flutuação, como apresentado na

Equação 1. Isso se deve à complexidade de solucionar as equações de Navier-Stokes, já que não é possível obter-se uma solução matemática exata (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 1979). Assim, opta-se por modelar explicitamente apenas o escoamento médio, adotando-se simplificações na modelagem dos vórtices e flutuações (ARIS, 1989; KOLDITZ, 2002).

As equações de Navier-Stokes com as médias de Reynolds (RANS) para fluidos incompressíveis, isotérmicos e newtonianos em coordenadas cartesianas são dadas pelas Equações 5 e 6, sendo \bar{u} a velocidade média (ms^{-1}), ρ a densidade (Kgm^{-3}), t o tempo (s), \bar{p} a pressão média (Pa), μ a viscosidade dinâmica (Pas) e u' a flutuação de velocidade. Elas têm a mesma forma das Equações 3 e 4, as equações de Navier-Stokes, mas com a adição do termo de tensão turbulenta de Reynolds (MIRANDA; NASCIMENTO JUNIOR; REZENDE, 2013).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{EQ. 5})$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (\text{EQ. 6})$$

2.2.2 Hipótese de Boussinesq

Quando se adotam as médias de Reynolds, negligencia-se o comportamento do escoamento referente às flutuações instantâneas, por isso surge o termo adicional tensões de Reynolds que representa os efeitos de turbulência, que necessitam modelos de fechamento de turbulência para descrevê-los. Baseadas na hipótese de Boussinesq, as tensões de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade, sendo a viscosidade turbulenta a constante de proporcionalidade, assumindo-a como uma grandeza escalar isotrópica (KOLDITZ, 2002; SOUZA *et al.*, 2011). A hipótese de Boussinesq é a base para a formulação do modelo de turbulência k-épsilon e k-ômega.

As tensões de Reynolds são modeladas pela Equação 7, sendo u' a flutuação de velocidade, ρ a densidade (Kgm^{-3}), μ_t a viscosidade turbulenta (Pas) e k a energia cinética turbulenta (m^2s^{-2}), definida pela Equação 8 (SILVEIRA NETO, 2002).

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (\text{EQ. 7})$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u'_i)^2} = \frac{1}{2} \overline{(u'^2 + v'^2 + w'^2)} \quad (\text{EQ. 8})$$

2.2.3 Modelo de fechamento de turbulência k-épsilon

A turbulência é um fenômeno em que as partículas do fluido se misturam de forma desordenada, em trajetórias irregulares e é caracterizada por um elevado número de Reynolds. Em simulações numéricas é descrita através de modelos de turbulência, como o modelo *k*-épsilon (HEUERT e KHATCHATOURIAN, 2007). O modelo *k*-épsilon foi desenvolvido a fim de representar os mecanismos que afetam a energia cinética, por meio das variáveis *k*, a energia cinética, e épsilon, a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta. Ao resolver as duas equações de transporte separadamente, modelos de turbulência de duas equações, como o *k*-épsilon, permitem que a velocidade turbulenta e as escalas de comprimento sejam determinadas de modo independente, representando mais detalhadamente as propriedades de escoamentos turbulentos (LAUNDER; SPALDING, 1983).

A viscosidade turbulenta utilizada para o cálculo das tensões de Reynolds é obtida a partir dos parâmetros *k* e épsilon do modelo de turbulência, densidade ρ (Kgm^{-3}) e uma constante de proporcionalidade C_μ . O modelo assume que a viscosidade turbulenta é função da energia cinética turbulenta, e a dissipação é dada pela relação da Equação 9 (LAUNDER; SPALDING, 1983).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{EQ. 9})$$

As Equações 10 e 11 mostram como *k* e épsilon são resolvidas, sendo *u* a velocidade (ms^{-1}), ρ a densidade (Kgm^{-3}), μ a viscosidade dinâmica (Pas), μ_t a viscosidade turbulenta (Pas), σ_k e σ_ε os números turbulentos de Prandtl para *k* e épsilon, e G_k , o qual é calculado pela Equação 12, representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade médios (SILVEIRA NETO, 2002).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (\text{EQ. 10})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{EQ. 11})$$

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{EQ. 12})$$

O modelo k-épsilon é o modelo de turbulência mais utilizado e validado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.2.4 LES (Large Eddy Simulations)

O LES (*Large Eddy Simulations*) também calcula as equações de Navier Stokes. No entanto, diferente do RANS, a proposta do LES é calcular as grandes escalas da turbulência que contêm energia (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Movimentos turbulentos tridimensionais instáveis maiores são representados diretamente, enquanto os efeitos dos movimentos em escala menor (escala submalha, em inglês, *subgrid*, SGS) são modelados.

A ideia do LES é calcular o fluxo médio e os grandes turbilhões que contêm energia (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). No entanto, os métodos LES geralmente requerem maior refinamento da malha e, deste modo, exigem mais em termos computacionais (POPE, 2001).

2.2.5 Modelo de fechamento de turbulência de viscosidade turbulenta de uma equação (em inglês, *one-equation subgrid-scale*)

O modelo de fechamento de turbulência *one-equation subgrid-scale* é utilizada para modelar a turbulência SGS, as pequenas escalas de turbulência. O ponto principal desse modelo SGS é calcular a energia cinética da escala da submalha, k_{sgs} (m^2s^{-2}), resolvido pela Equação 13 (HUANG; LI, 2009). O modelo de uma equação de viscosidade turbulenta resolve a equação de transporte apresentada na Equação 14 (YOSHIZAWA; HORIUTI, 1985).

Desse modo:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \tau_{kk} \quad (\text{EQ. 13})$$

$$\frac{\partial(\rho k_{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k_{sgs})}{\partial x_j} - \frac{\partial \left[\rho (v + \nu_{sgs}) \frac{\delta k_{sgs}}{\delta x_j} \right]}{\partial x_j} = -\rho \tau_{ij} : \bar{D}_{ij} - C_\epsilon \frac{\rho k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (\text{EQ. 14})$$

onde ν é a viscosidade cinética (m^2s^{-1}), C_ϵ é uma constante do modelo, τ_{ij} é o tensor de tensão da escala da submalha (Nm^{-2}) dado pela Equação 15, D_{ij} é o tensor de taxa de deformação em escala resolvida (Nm^{-2}) dado pela Equação 16, ν_{sgs} é a viscosidade turbulenta da submalha (m^2s^{-1}) dada pela Equação 17, e Δ é o comprimento característico de corte do filtro (m).

$$\tau_{ij} \approx \frac{2}{3}k_{sgs}\delta_{ij} - 2\nu_{sf}dev(\bar{D})_{ij} \quad (\text{EQ. 15})$$

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \quad (\text{EQ. 16})$$

$$\nu_{sgs} = C_k\Delta\sqrt{k_{sgs}} \quad (\text{EQ. 17})$$

2.2.6 DNS (Direct Numerical Simulation)

Já o DNS (*Direct Numerical Simulation*) resolve as equações de Navier-Stokes com todas as escalas de movimento, com condições iniciais e de contorno apropriadas ao fluxo considerado (DE SOUZA *et al.*, 2011). Assim, tem potencial de capturar os efeitos de turbulência com maior precisão que o LES e o RANS.

O custo é muito alto, visto as exigências de malhas bastante refinadas e passos de tempo bem curtos. Os requisitos de computador são muito altos e aumentam de acordo com o número de Reynolds, por isso a aplicabilidade da abordagem é limitada a escoamentos de números baixos ou moderados de Reynolds (SILVEIRA NETO, 2002).

2.3 MODELO NUMÉRICO

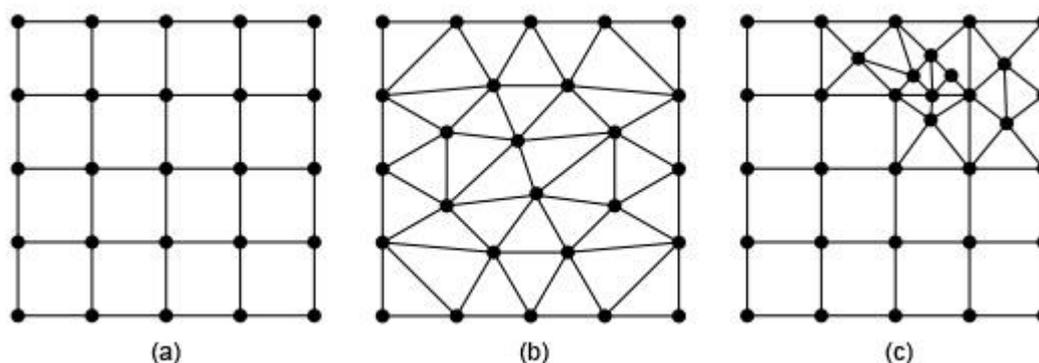
Segundo White (2003), Dinâmica de Fluidos Computacional (em inglês, *Computational Fluid Dynamics* - CFD) é o emprego de métodos numéricos no escoamento de fluidos e em processos de transferência de massa e de calor por meio de simulação computacional. Considera-se uma simulação, a reprodução ou imitação de um fenômeno de determinado sistema (HIRSCH, 2007). Assim, pode-se dizer que simulação é aplicada no emprego de métodos numéricos para solucionar as leis que governam o movimento dos fluidos. A aplicação de métodos numéricos permite a obtenção de soluções aproximadas de relativa precisão e é viável tendo em vista os avanços computacionais (DHOTRE *et al.*, 2013).

2.3.1 Malhas

A discretização do domínio computacional, ou seja, a geração de malha, delimita onde as variáveis de interesse serão calculadas. É considerada a etapa mais complexa da simulação numérica, pois influencia na qualidade dos resultados da simulação (MALISKA, 2004).

Malhas podem ser estruturadas, não estruturadas ou híbridas. As malhas estruturadas são caracterizadas por seus volumes elementares serem formados por linhas coordenadas. Já as malhas não-estruturadas não seguem um determinado sistema coordenado. Elas são, portanto, consideradas as mais flexíveis e ajustam-se melhor a problemas de geometria complexa. Por fim, as malhas híbridas são compostas pela combinação das malhas estruturadas e não-estruturadas (Figura 2) (BATISTA, 2005).

Figura 2 - Tipos de malhas (a) Estruturada; (b) Não-estruturada; (c) Híbrida



FONTE: (BATISTA, 2005)

2.4 VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE MODELOS

Os modelos são imagens simplificadas de um fenômeno que se pretende estudar. Validação é o processo de determinar o grau em que um modelo é uma representação precisa do mundo real a partir da perspectiva dos usos pretendidos com o modelo (AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 2002). Para validação de um modelo consiste na comparação dos resultados experimentais disponíveis com os resultados numéricos e assim, avaliar se os resultados são realísticos.

A validação examina se os modelos computacionais implementados no código CFD e a simulação computacional concordam com as observações do mundo real para um determinado domínio. A estratégia é identificar e quantificar erros e incertezas através da comparação de resultados de simulação com dados experimentais (SLATER, 2008).

O processo de avaliação de validação de uma simulação de CFD pode ser descrito em 6 fases quanto à(s): convergência iterativa (geralmente, os métodos de CFD envolvem algum esquema iterativo para chegar aos resultados da simulação), consistência, convergência espacial, convergência temporal, comparação dos resultados do CFD com os dados experimentais e incertezas do modelo (SLATER, 2008).

Embora um modelo tenha sido validado experimentalmente, é recomendável a sua calibração. Isto porque mesmo que os dados de campo estejam sujeitos às suas variabilidades inerentes, os resultados apresentados por um modelo podem ser ajustados para simular seus valores médios através de mudanças de parâmetros (ROCHA *et al.*, 2016). O processo de calibração foi definido como uma série de operações que estabelecem, sob condições específicas, uma relação entre medidas instrumentais e os valores correspondentes à propriedade de interesse realizados em padrões (WILLIAN; BRAGA E RONEI; POPPI, 2004).

2.5 ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)

O *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) é um equipamento utilizado para medição de velocidade indireta das partículas presentes na água nos 3 eixos, x, y e z (Figura 3). A medição de velocidade é feita através do efeito Doppler, medindo a mudança na frequência do som refletido das partículas na água e utilizando um transmissor (DURGESH *et al.*, 2014).

O transmissor gera um pulso curto de som de frequência conhecida, quando o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções das partículas da água. Os receptores acústicos captam a energia refletida, medindo a velocidade pela diferença da frequência do eco (ANDERSON; LOHRMANN, 1995; CABRAL, 2014)

Figura 3 - Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)



Fonte: (CABRAL, 2014)

O ADV tem sido amplamente utilizado em estudos experimentais em condutos e em campo (SHARMA; MADDIRALA; KUMAR, 2018). A principal vantagem de usar o ADV é que ele pode medir a velocidade instantânea tridimensional, características turbulentas e densidade espectral de potência. Além disso, pode ser intrusivo ou não intrusivo. Os ADV's rapidamente se tornaram ferramentas valiosas para laboratório e investigações do fluxo do rio, canais, reservatórios, oceanos e em torno de estruturas hidráulicas e modelos em escala de laboratório (HOSSEINI; SHAMSAI; ATAIE-ASHTIANI, 2006).

2.6 OPEN FIELD OPERATION AND MANIPULATION (OPENFOAM)

O OpenFOAM (*Open Field Operation And Manipulation*) é um software livre de CFD gratuito, em linguagem C++ e de código aberto. Em 1993, a criação do FOAM (*Field Operation and Manipulation*), por Henry Weller e Hrvoje Jasak, gerou a base do software atual. Em 2004, o programa teve seu código liberado sob licença da GNU (*General Public License*) e passou a ser chamado de OpenFOAM (LIU, XIAOFENG; GARCIA, 2010).

De acordo com Jasak *et al.* (2007), o software tem uma grande quantidade de recursos para resolver questões relacionadas à fluxos de fluidos complexos envolvendo reações químicas, turbulência e transferência de calor, para dinâmica sólida e eletromagnetismo. Seus solucionadores são baseados no Método de Volume

Finito. Assim, apresenta uma grande base de usuários na maioria das áreas de engenharia e ciência, tanto de organizações comerciais como acadêmicas.

A vantagem de o OpenFOAM ser de código livre é que ele permite que pequenas empresas, profissionais individuais e estudantes possam acessar esta ferramenta sem ter o custo de adquirir o software CFD ou sua licença anual. Como desvantagens pode-se considerar a dificuldade para lidar com a interface e para aprender a editar o código. Além disso, o OpenFOAM foi desenvolvido para ser operado no Linux, o que pode representar uma dificuldade (LEIDIG; TEEUW, 2015).

Assim, o OpenFOAM tem sido bastante utilizado em simulações hidráulicas. É possível observar que na simulação numérica de um canal aberto realizada por Juha; Zhang; Tejada-Martínez (2017) implementada no código OpenFOAM foi validada em laboratório. Os resultados apresentaram boa concordância em termos de velocidade média, temperatura média, tensão de cisalhamento da parede e componentes de tensão de Reynolds. Também é possível observar bons resultados na utilização do software por Pinheiro e Santos (2017) que validou o modelo numérico de um bueiro *stair pipe* feito no OpenFOAM com base na velocidade máxima no jato do tanque central medida no protótipo do bueiro *stair pipe* construído no INBO (Instituto Belga de Pesquisa da Natureza e Floresta). Esse modelo numérico desenvolvido apresentou-se como uma ferramenta para avaliação inicial da viabilidade de implantação do bueiro *stair pipe*, cumprindo os objetivos de se realizar simulações para ajustar as características geométricas e operacionais às características do local de implantação (PINHEIRO; SANTOS, 2017).

2.7 VARIÁVEIS HIDRÁULICAS

2.7.1 Magnitude de velocidade

A magnitude de velocidade, u , é uma variável hidráulica importante no escoamento de obras hidráulicas (MARTINEZ; SANTOS; POMPEU, 2009) e importante na caracterização de fluxos turbulentos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A equação de magnitude de velocidade é expressa pela Equação 18, sendo u_x a velocidade no eixo x (ms^{-1}), u_y a velocidade no eixo y (ms^{-1}) e u_z a velocidade no eixo z (ms^{-1}).

$$u \equiv \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (\text{EQ. 18})$$

2.7.2 Deformação hidráulica

A deformação hidráulica, S , é uma medida da distorção total incorporando todos os mecanismos de deformação e rotação que podem ser criadas integrando as informações contidas no tensor gradiente de velocidade espacial (NESTLER *et al.*, 2008). A equação de deformação hidráulica é expressa pela Equação 19, sendo u a velocidade (ms^{-1}).

$$S = \sum \left| \frac{\partial u}{\partial x_j} \right| = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial y} + \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial u_k}{\partial y} \quad (\text{EQ. 19})$$

2.7.3 Energia cinética turbulenta

A energia cinética turbulenta, k , é a energia cinética por unidade de massa das flutuações turbulentas da velocidade em um fluxo turbulento (TENNEKES; LUMLEY, 1972). A equação de energia cinética turbulenta é expressa pela Equação 20, sendo u'_i a flutuação de turbulência (ms^{-1}).

$$k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2_x} + \overline{u'^2_y} + \overline{u'^2_z}) = \frac{3}{2} u'^2 \quad (\text{EQ. 20})$$

2.7.4 Vorticidade

A vorticidade é uma variável hidráulica que mede a rotação de um elemento de fluido conforme ele se move no campo de escoamento (DAVIDSON, 2015). A equação de vorticidade é expressa pela Equação 21, sendo ω o vetor vorticidade (s^{-1}) e u o vetor velocidade (ms^{-1}).

$$\omega = \nabla \times u \quad (\text{EQ. 21})$$

Todos os fluxos turbulentos são caracterizados por altos níveis de vorticidade flutuante (TENNEKES; LUMLEY, 1972). Portanto, temos que fazer um estudo cuidadoso do papel das flutuações de vorticidade na dinâmica da turbulência.

2.7.5 Tensor de Reynolds

O tensor de Reynolds está associado as correlações envolvendo flutuações de velocidade que são as componentes deste tensor e que representam tensões turbulentas, é a tensão exercida no fluido pelas flutuações turbulentas (KUNDU; COHEN; DOWLING, 2016). A equação de tensor de Reynolds é expressa pela

Equação 22, sendo τ o tensor de Reynolds (Nm^{-2}), ρ a massa específica do fluido (Kgm^{-3}), u a velocidade (ms^{-1}),

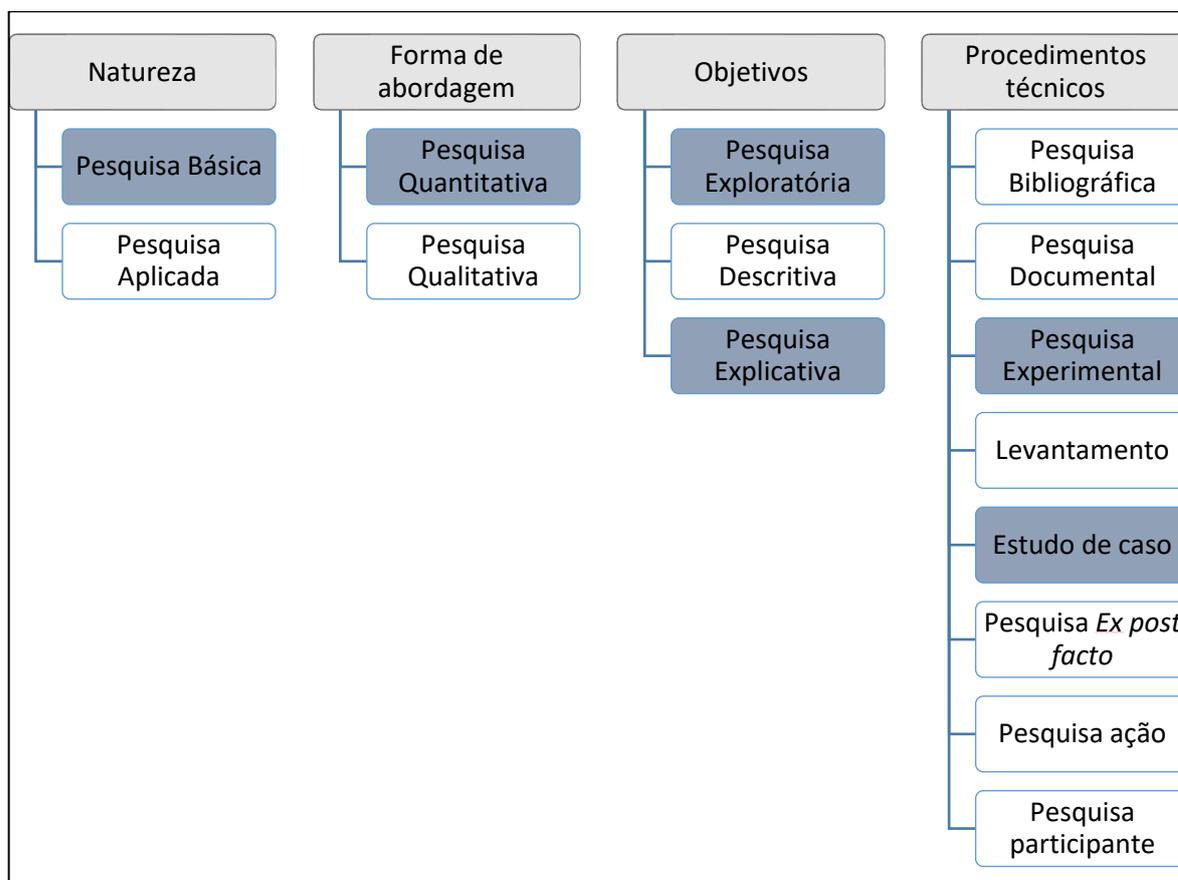
$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'^2} \quad (\text{EQ. 22})$$

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM

Classifica-se a pesquisa desenvolvida neste trabalho quanto à sua natureza como uma pesquisa básica, visto que o estudo propõe gerar conhecimentos para projetos de novos canais hidráulicos, mas não haverá alteração nos canais estudados. Quanto aos objetivos tem-se uma pesquisa explicativa e exploratória, uma vez que o estudo irá explicar como a variação da geometria de canais hidráulicos influencia no escoamento e irá explorar se um modelo numérico de escoamento hidráulico é capaz de capturar os efeitos de turbulência medidos em modelo físico. Em relação aos procedimentos, a pesquisa é classificada como experimental e com dois estudos de caso. Além disso, a pesquisa apresenta uma abordagem quantitativa do problema. O fluxograma do enquadramento metodológico está apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do enquadramento metodológico da pesquisa



Fonte: a autora

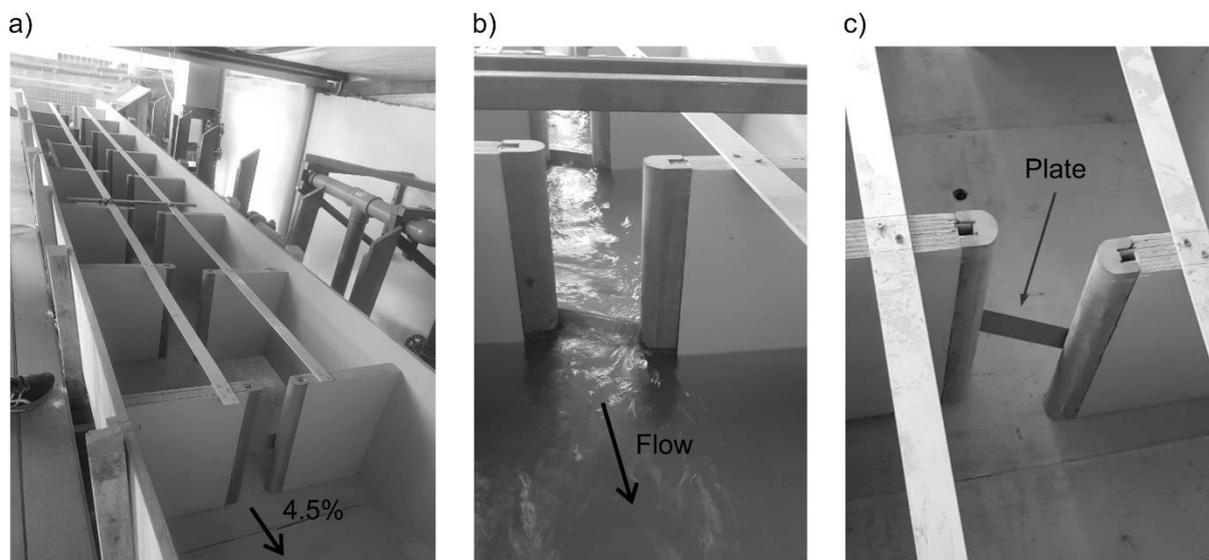
Os métodos e procedimentos adotados na criação e na validação do modelo numérico utilizado para avaliar o escoamento livre de canais hidráulicos laboratoriais e a parte experimental será descrita a seguir.

3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTO

3.2.1 Modelos físicos

Neste trabalho foram estudados dois canais hidráulicos. O primeiro modelo físico foi uma escada para peixes localizado em um laboratório particular no bairro Cinquentenário, em Belo Horizonte. A escada tem as seguintes dimensões: declive de 4,5%, comprimento de 5,5 m, largura de 0,78 m e parede lateral de 0,6 m de altura (Figura 5a). Ao longo do seu comprimento, sete piscinas foram criadas com ranhuras cuja largura (b_0) era de 10 cm (Figura 5b). As dimensões de cada piscina eram 0,60 m ($6 b_0$) de comprimento e 0,78 m ($7,8 b_0$) de largura. O escoamento passa pela ranhura vertical central que possuía uma placa (dimensões 0,10 m x 0,04 m) localizada a 0,13 m do fundo do canal (Figura 5c).

Figura 5 - Modelo físico: a) o canal em estudo; b) detalhe da ranhura e c) placa entre a ranhura vertical.

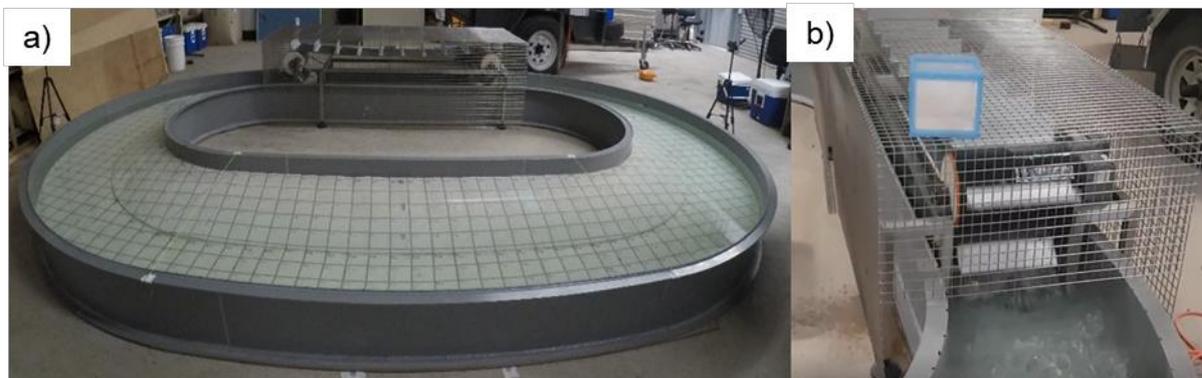


Fonte: a autora

O segundo modelo físico em estudo (Figura 6a) está localizado na *La Trobe University*, na Austrália. Ele é composto por duas seções retas de 2 m de comprimento e duas curvas de semicírculo em cada extremidade com um raio externo de 1,5 m. O

escoamento da água foi gerado por meio da movimentação no sentido horário de uma borracha circular com pás, posicionada por duas engrenagens (Figura 6b).

Figura 6 – a) Canal hidráulico laboratorial em estudo localizado na *La Trobe University* (Austrália) e b) detalhe da borracha circular com pás

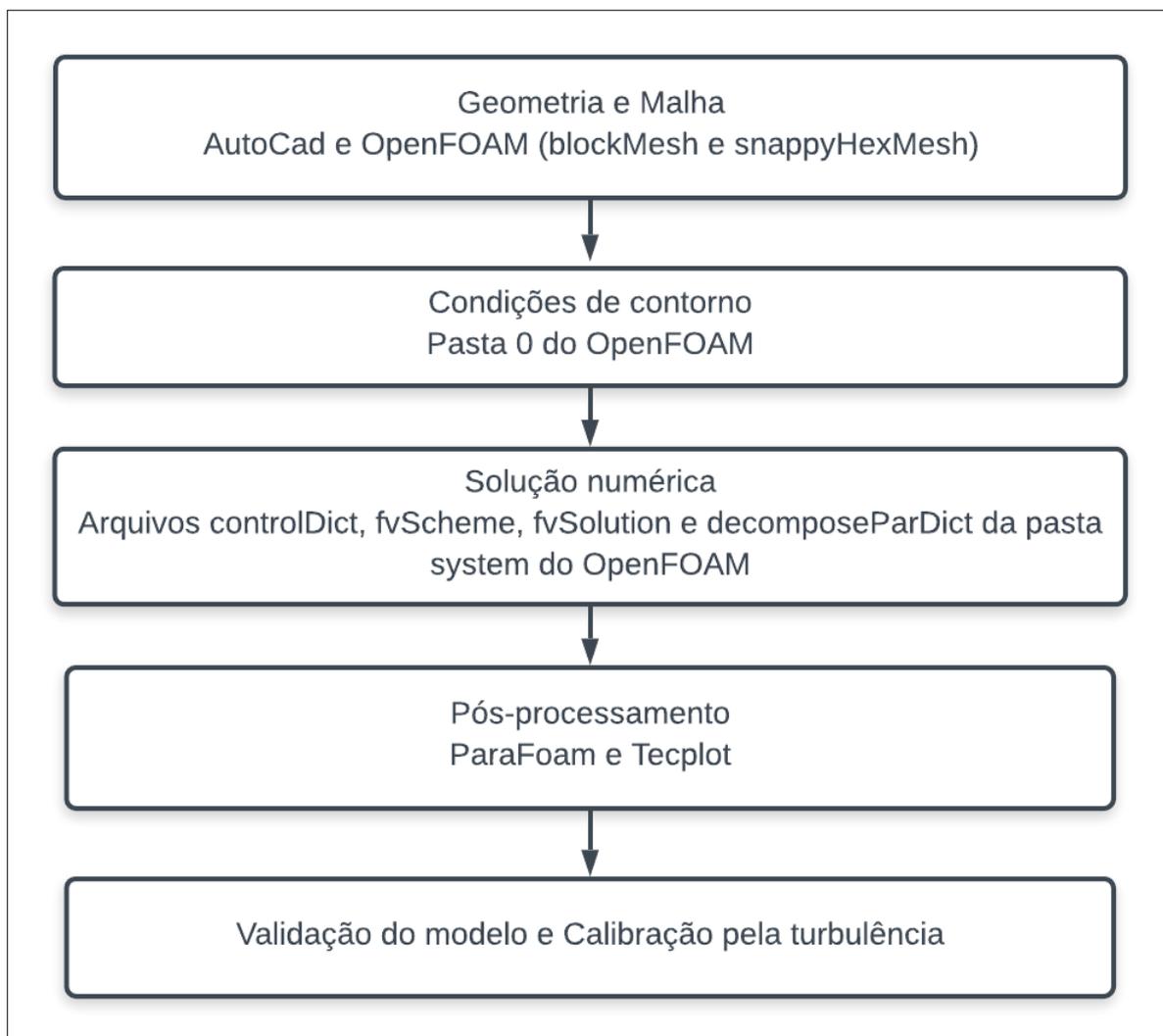


Fonte: (Nogueira, 2019)

3.2.2 Modelos numéricos

Modelagem CFD pode ser dividida em cinco etapas, sendo elas: pré-processamento, solução numérica (*solver*), pós-processamento e validação do modelo numérico. No pré-processamento da modelagem CFD, é definido o domínio de simulação (geometria), construída a malha e definidas as condições de contorno e inicial. Posteriormente, na etapa de solução numérica, as equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento com seus diversos fenômenos físicos são resolvidas. Em seguida, na etapa de pós-processamento, os resultados são visualizados e apresentados de forma gráfica. Por fim, o modelo é validado por meio da comparação dos resultados obtidos numericamente com dados obtidos de medição em campo. As etapas e softwares utilizados neste trabalho estão citados na Figura 7.

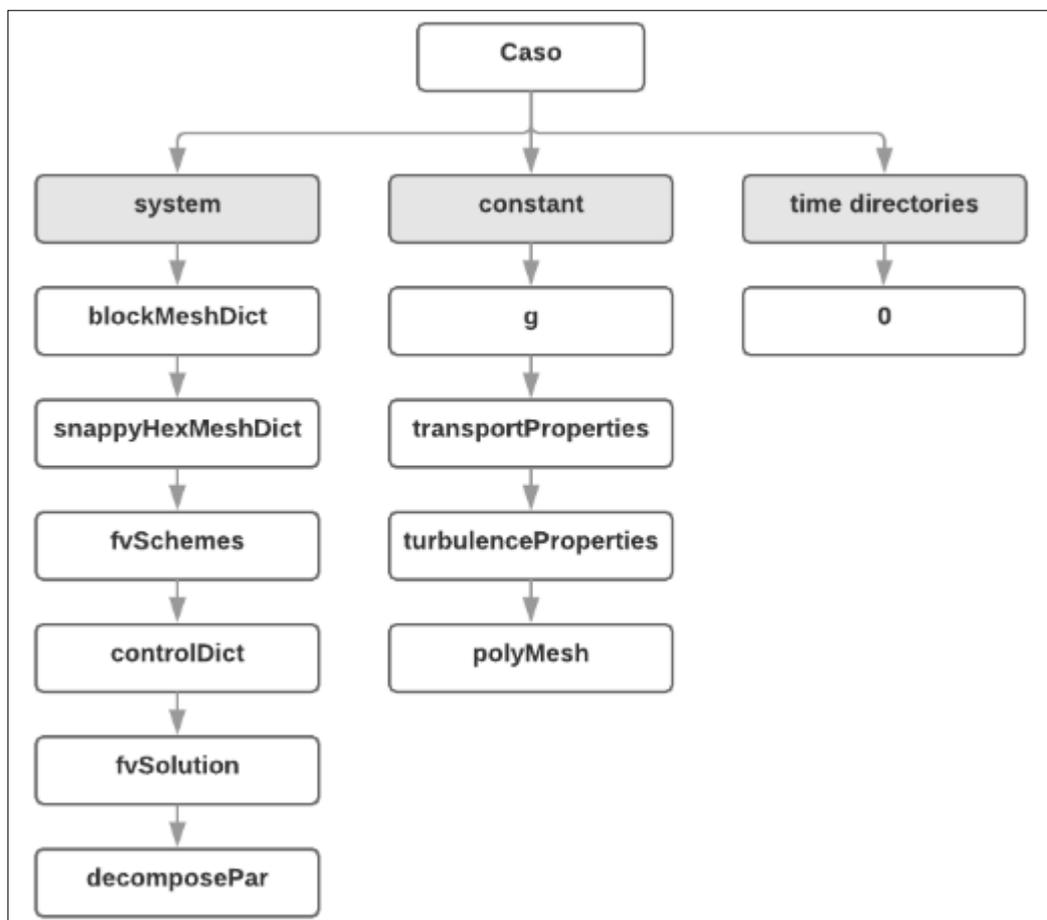
Figura 7 - Fluxograma das etapas da modelagem CFD e softwares utilizados



Fonte: a autora

Para modelagem CFD deste trabalho, optou-se por utilizar o software OpenFOAM, por ser um software livre e gratuito e por apresentar bons resultados em estruturas hidráulicas. A estrutura de diretórios e arquivos básica para rodar um caso de simulação neste software está apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura dos arquivos em casos do OpenFOAM



Fonte: a autora

O primeiro passo de uma simulação em CFD é definir a geometria e a malha da estrutura simulada. A discretização da malha é o processo que ocorre para que a solução das equações de Navier-Stokes que definem o fenômeno de transporte seja feita para cada nó contido dentro de cada célula computacional. As equações de transporte necessitam de um modelo numérico e uma malha computacional para que as equações diferenciais parciais que governam os escoamentos dos fluidos sejam resolvidas em cada volume de controle (WANG; KOLDITZ, 2007; LOPES *et al.*, 2018).

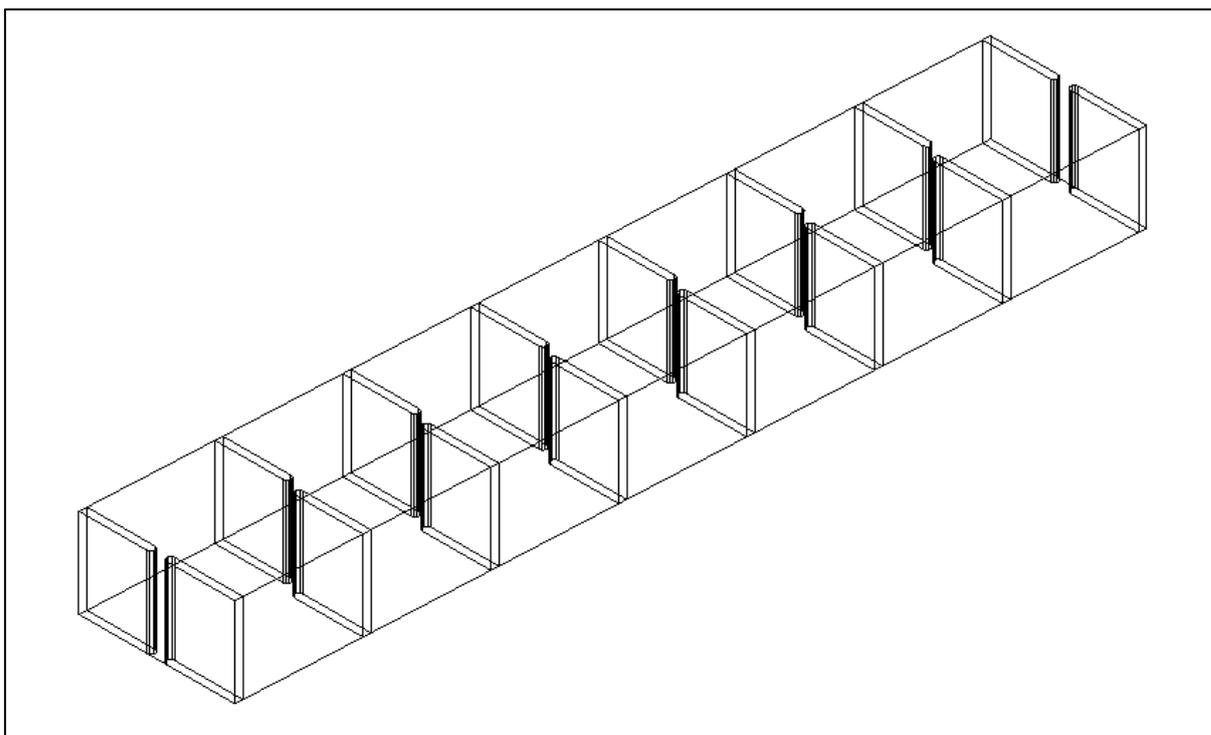
3.2.2.1 Sensibilidade da malha

Neste trabalho adotou-se o método dos volumes finitos para discretização, no espaço, por meio da adoção do *software* OpenFOAM. Antes de comparar os diferentes modelos de turbulência, testou-se a sensibilidade do tamanho das malhas, analisando 3 malhas. Isso exclui uma influência potencial da malha em comparação subsequente dos resultados. O teste de independência de malha (em inglês, *Grid*

Independence Test - GIT) determina o espaçamento de malha ideal a fim de evitar refinamento excessivo ou perda de detalhes do escoamento em estudo devido a um tamanho de elemento grosso (FARHADI *et al.*, 2018a).

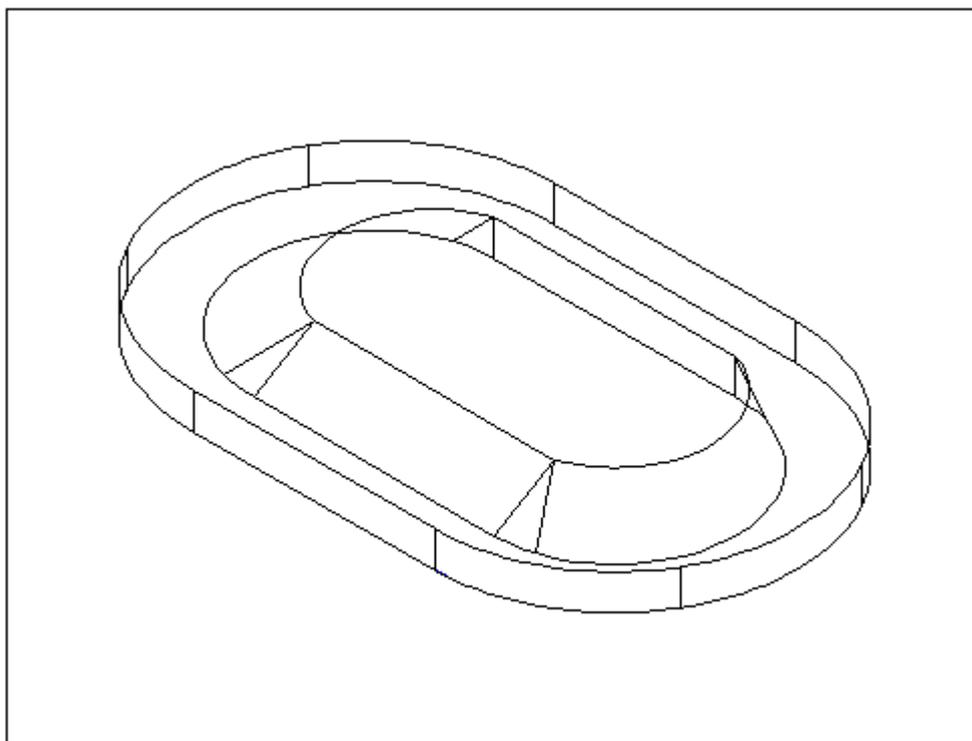
Tanto na escada para peixes quanto no canal curvo, a discretização dos domínios foi iniciada com a ferramenta *blockMesh*, criando-se uma malha hexaédrica estruturada dos dois canais. O próximo passo, para a escada para peixes, foi inserir as ranhuras verticais na escada para peixes e, para o canal curvo, excluir o meio do canal que não pertencia a região de escoamento. Para isso, estes elementos foram desenhados no AutoCAD e exportados no formato STL, pelas ferramentas *surfaceFeatureExtract* e *snappyHexMesh*. Este último utilitário também foi aplicado para refinar e criar uma malha não estruturada em torno das ranhuras verticais (Figura 9) e próximo à área excluída do meio do canal curvo (Figura 10). Após a criação da malha, sua qualidade foi testada usando a ferramenta *checkMesh*, e a discretização de domínio só foi usada nos modelos CFD se ela passou em todos os testes desta ferramenta (caixa delimitadora, direções não vazias ou não cunha, razão de aspecto, volumes de célula, não ortogonalidade e assimetria).

Figura 9 – Desenho feito no AutoCAD para criação das ranhuras verticais na escada para peixes



Fonte: a autora

Figura 10 – Desenho feito no AutoCAD para criação da malha do *racetrack flume*



Fonte: a autora

Na escada para peixes, a efetividade da malha foi testada para os seguintes tamanhos de elemento: $\Delta x = 0,015, 0,020$ e $0,025$ m, para a menor vazão ($6,0$ l/s) nos modelos RANS e LES (Tabela 1). A análise de incerteza devido à discretização foi baseada nos critérios da ASME (CELIK *et al.*, 2008). O erro relativo aproximado entre duas malhas (por exemplo, malhas 1 e 2 – Equação 23) e o índice de convergência de grade fina (em inglês, *fine-grid convergence* GCI) Equação 24 foram calculados para as profundidades da água e velocidades pontuais para um plano na meia largura ($y = 39$ cm).

Desse modo,

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (\text{EQ. 23})$$

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^{pa} - 1} \quad (\text{EQ. 24})$$

onde ϕ_i é a solução na i -ésima grade (neste estudo, é a velocidade ou profundidade da água), pa é a ordem aparente e r é o fator de refinamento dos elementos entre duas malhas (CELIK *et al.*, 2008).

Tabela 1 - Detalhes da malha para os modelos RANS e LES na escada para peixes

| Vazão (l/s) | Número da malha | Tamanho do elemento Δx (m) | Número de elementos | Número de hexaedros | Número de prismas | Número de poliedros |
|-------------|-----------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 6 | 3 | 0.025 | 818042 | 728496 | 18265 | 71281 |
| 6 | 2 | 0.02 | 444171 | 376736 | 15196 | 52239 |
| 6 | 1 | 0.015 | 310385 | 256902 | 11430 | 42053 |
| 9.4 | 1' | 0.015 (na profundidade de 0.01) | 888661 | 766262 | 31841 | 90558 |

Fonte: a autora

Já no canal curvo, foram testadas três malhas com os seguintes tamanho de elemento nos eixos x e y: $\Delta x = 0,040, 0,045$ e $0,050$ m no cenário *slow* (velocidade de entrada d'água de $0,13$ m/s) (Tabela 2). O erro relativo aproximado entre duas malhas do canal curvo e o índice de convergência de grade fina foram calculados para as velocidades pontuais e não foram calculadas para profundidade, já que se considerou a profundidade constante ao longo do canal.

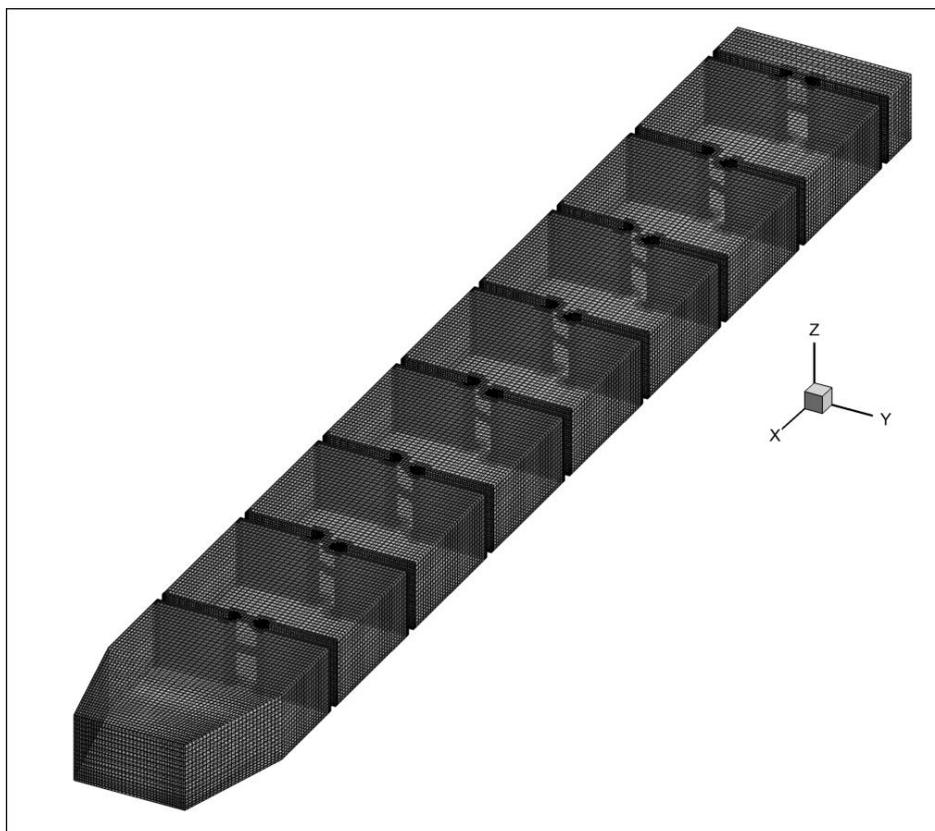
Tabela 2 - Refinamento das malhas no canal hidráulico curvo

| | Malha 1 | Malha 2 | Malha 3 |
|--|----------|----------|----------|
| Tamanho do elemento no eixo x (Δx) | 4 cm | 4,5 cm | 5 cm |
| Tamanho do elemento no eixo y (Δy) | 4 cm | 4,5 cm | 5 cm |
| Tamanho do elemento no eixo z (Δz) | 0.256 cm | 0.256 cm | 0.256 cm |
| Número de elementos | 578010 | 465865 | 377261 |

Fonte: a autora

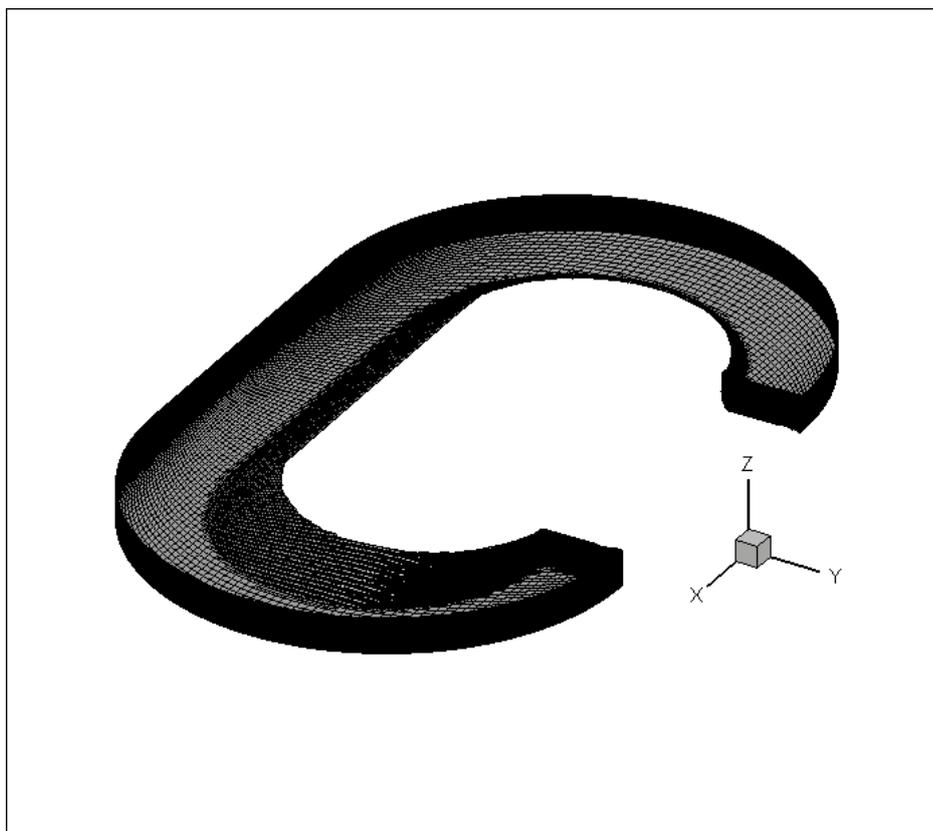
Após as análises de incerteza de discretização, uma malha única foi selecionada para ambos os modelos CFD (Figuras 11 e 12). A malha de tamanho selecionada foi aplicada para os outros cenários em estudo.

Figura 11 - Malha dos modelos RANS e LES para o escoamento da escada para peixes do tipo ranhura vertical



Fonte: a autora

Figura 12 - Malha do canal hidráulico curvo

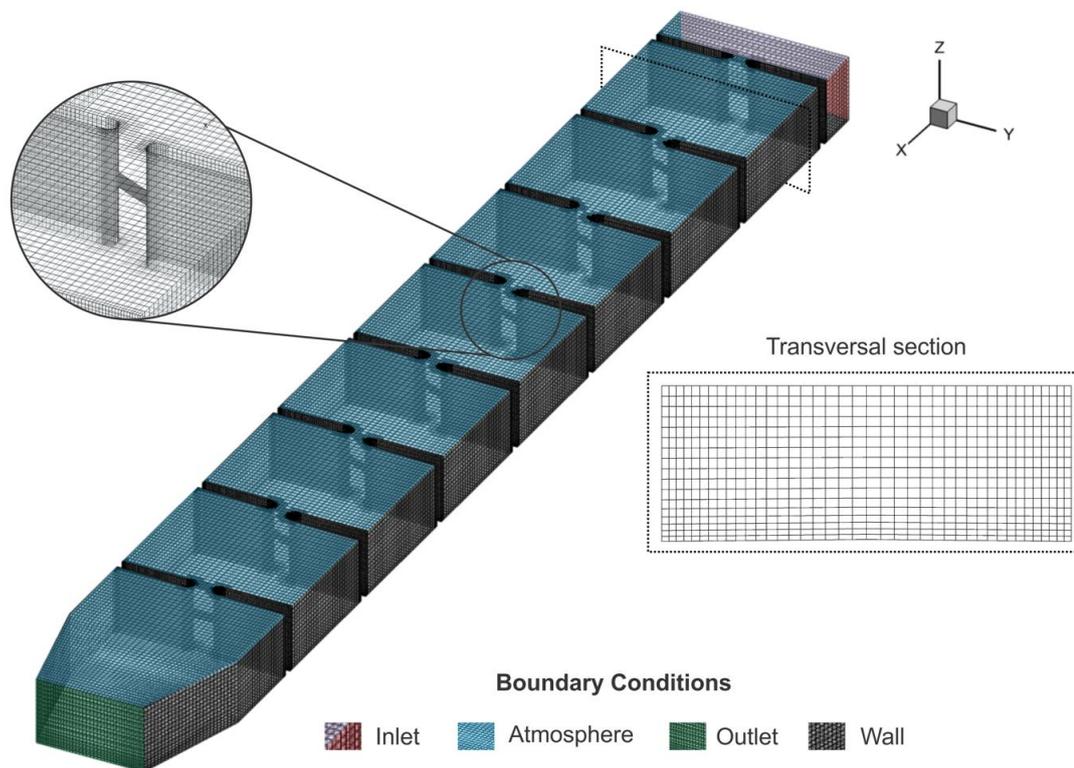


Fonte: a autora

3.2.2.2 Cenários e condições de contorno

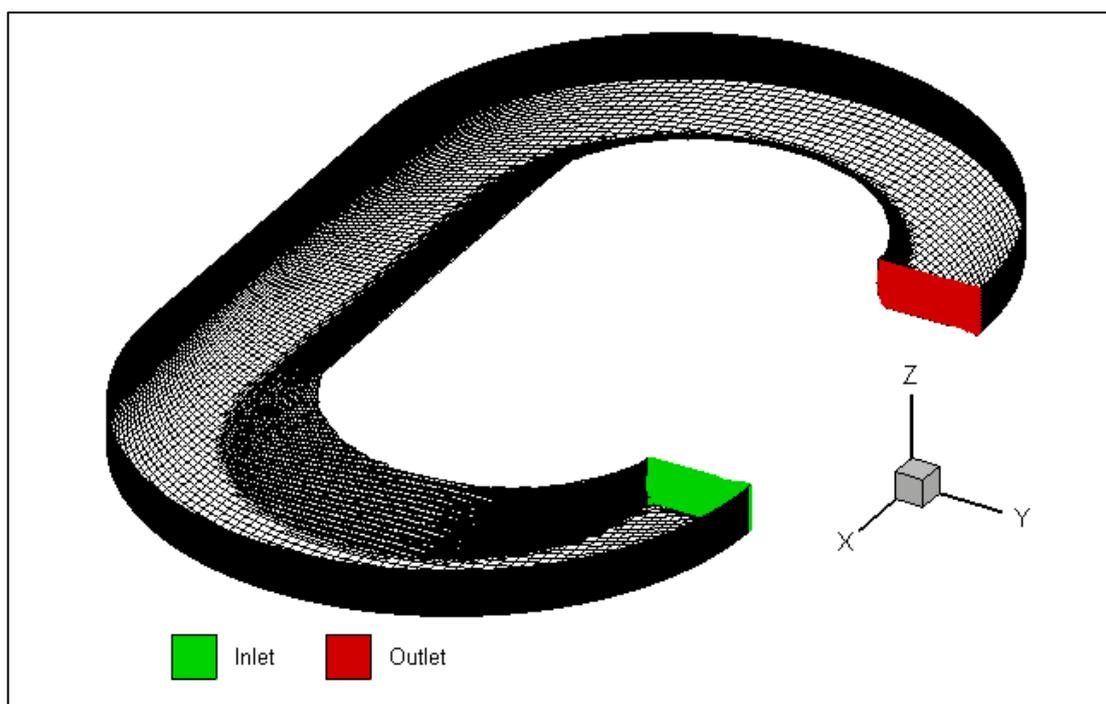
As malhas deste trabalho possuíam quatro condições de contornos (Figuras 13 e 14), sendo elas: 1) parede (no fundo e nas laterais dos canais); 2) entrada; 3) saída, e topo. Como no modelo da escada para peixes foi simulado o escoamento bifásico (água e ar) adotou-se na condição de contorno topo a atuação da pressão atmosférica. Já no canal curvo, devido à pouca variação da superfície da água (o canal não possui inclinação e o escoamento tem baixas velocidades), adotou-se a profundidade de água fixa em 23 cm, simulando apenas o fluido água por *rigid lid*.

Figura 13 – Condições de contorno dos modelos RANS e LES para o escoamento da escada para peixes



Fonte: a autora

Figura 14 – Condições de contorno dos modelos RANS e LES para o escoamento do canal circular



Fonte: a autora

As condições de contorno foram criadas como blocos de malha no arquivo de geometria (usando a ferramenta *blockMesh*), e diferentes combinações de configurações foram testadas com base em OpenCFD (2012), Nextfoam (2017) e FUENTES-PÉREZ *et al.* (2018). A combinação com a melhor estabilidade para o modelo numérico da escada para peixes de ranhura vertical (Tabela 3) envolveu permitir a oscilação da profundidade da água por meio de *variableHeightFlowRate* e fixar a vazão por meio de *variableHeightFlowRateInletVelocity* na entrada (Nextfoam, 2017). A configuração para saída foi *zeroGradient* para o *Volume of Fluid* (alfa), o que determinou que o gradiente da quantidade alfa seria zero na direção perpendicular ao limite, e *inletOutlet* para a velocidade. Esse último tem significado semelhante à condição de contorno *zeroGradient*, mas ele é alterado para *fixedValue* no caso de escoamento no sentido contrário ao escoamento principal próximo à região de contorno (NEXTFOAM, 2017). Na atmosfera, foram definidos o *pressureInletOutletVelocity* para a velocidade e *totalPressure* para a pressão, e essa combinação é frequente em limites onde ocorre algum escoamento inverso e a velocidade do escoamento de entrada é desconhecida (GREENSHIELDS, 2018). A condição de não escorregamento foi criada para paredes usando *zeroGradient* para *Volume of Fluid*, *fixedValue* para velocidade e *fixedFluxPressure* para pressão. Foram simulados 2 cenários de vazão, sendo eles: 6,0 l/s e 9,4 l/s.

Tabela 3 - Condições de contorno no OpenFOAM usadas para os modelos RANS e LES da escada para peixes do tipo ranhura vertical

| Condição de contorno | Entrada | Saída | Atmosfera | Paredes |
|------------------------|--|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Volume of Fluid (alfa) | <i>variableHeightFlowRate</i> | <i>zeroGradient</i> | <i>inletOutlet</i> | <i>zeroGradient</i> |
| Velocidade | <i>variableHeightFlowRateInletVelocity</i> | <i>inletOutlet</i> | <i>pressureInletOutletVelocity</i> | <i>fixedValue</i> |
| Pressão | <i>fixedFluxPressure</i> | <i>fixedFluxPressure</i> | <i>totalPressure</i> | <i>fixedFluxPressure</i> |

| | | | | | |
|------|---------|------------|-------------|-------------|---------------------|
| LES | Nut | Calculated | Calculated | Calculated | nutkWallFunction |
| RANS | K | fixedValue | inletOutlet | inletOutlet | kqRWallFunction |
| | épsilon | fixedValue | inletOutlet | inletOutlet | epsilonWallFunction |

Fonte: a autora

A Tabela 4 apresenta as condições adotadas para velocidade, pressão, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação turbulenta e viscosidade turbulenta no canal circular. O valor da velocidade de entrada foi alterado de acordo com o cenário simulado.

Tabela 4 - Condições iniciais e de contorno adotadas

| Condição de contorno | Entrada | Saída | Topo | Paredes | |
|----------------------|--------------|---|--------------|--------------|---------------------|
| Velocidade | fixedValue | zeroGradient | Slip | fixedValue | |
| Pressão | zeroGradient | fixedValue | Slip | zeroGradient | |
| LES | Nut | Calculated | Calculated | Slip | nutkWallFunction |
| RANS | K | turbulentIntensity KineticEnergy | zeroGradient | Slip | kqRWallFunction |
| | Épsilon | turbulentMixingLength DissipationRateInlet | zeroGradient | Slip | epsilonWallFunction |

Fonte: a autora

Para o canal hidráulico curvo foram simulados quatro cenários (Tabela 5), estes cenários foram escolhidos por questões biológicas e de acordo com a capacidade da

esteira que promovia a circulação da água. Para cada cenário alterou-se a velocidade de entrada d'água. Os cenários foram definidos de acordo com a capacidade natatória das larvas estudadas pela pesquisadora Lorena Nogueira, quem fez as medições de velocidade *in loco*.

Tabela 5 – Cenários simulados no canal hidráulico de formato oval

| Cenário | Velocidade de entrada d'água no canal (m/s) |
|-----------|---|
| Fast | 0.30 |
| Moderate | 0.20 |
| Slow | 0.13 |
| Regulated | 0.04 |

Fonte: a autora

3.2.2.3 Solucionadores numéricos

O OpenFOAM usa a metodologia de acoplamento pressão-velocidade padrão com o preditor de velocidade, solucionador de pressão e corretor de velocidade para resolver as equações governantes. As configurações dos esquemas de tempo, discretização espacial e o método de acoplamento pressão-velocidade para os modelos da escada para peixes do tipo ranhura vertical encontram-se resumidos na Tabela 6. Aplicou-se o PIMPLE, que é um algoritmo que combina operador de divisão implícito de pressão (PISO) e o algoritmo com pressão de equações vinculadas (SIMPLE). PISO e PIMPLE são procedimentos iterativos para equações de acoplamento de momento e conservação de massa e foram sugeridos para aplicações em problemas transitórios (GREENSHIELDS, 2020). O escoamento do tipo transiente foi simulado usando *interFoam*, que pode simular dois fluidos imiscíveis, incompressíveis e isotérmicos com base no método de *Volume of Fluid* (VOF) para resolver as equações de continuidade e transporte de Navier-Stokes (OPENCFD, 2012d).

Tabela 6 - Esquemas de tempo, discretização espacial e o método de acoplamento pressão-velocidade adotado para a escada para peixes do tipo ranhura vertical em estudo no OpenFOAM

| Esquemas de tempo | Discretização especial | | | | | | | | | | Acoplamento pressão velocidade |
|-------------------|------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Euler (1-E) | Gradiente | Divergente | | | | | | Laplaciano de superfície normal | Interpolação | Gradiente de superfície normal | Pimple |
| | Gauss linear | div(rhoPhi, U) | div(phi, alpha) | div(phi, alpha) | div(phi, k) | div(phi, epsilon) | div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))))) | Gauss linear corrected | Linear | Corrected | |
| | | Gauss linearUpwind grad(U) | Gauss vanLeer | Gauss interface Compression | Gauss upwind | Gauss upwind | Gauss linear | | | | |

Fonte: a autora

O número de Courant é utilizado para definir a condição necessária para manter a estabilidade numérica na resolução de equações diferenciais parciais, ele depende da velocidade, do tamanho do elemento da malha e do intervalo de tempo (COURANT; FRIEDRICHS; LEWYT, 1967), sendo definido pela Equação 25, em que δt é o passo de tempo (s), $|\mathbf{u}|$ é a magnitude da velocidade (ms^{-1}) através do elemento e δx é o tamanho do elemento (m) na direção da velocidade.

$$Co = \frac{\delta t |\mathbf{u}|}{\delta x} \quad (\text{EQ. 25})$$

O OpenFOAM permite o uso do limitador multidimensional para solução explícita (MULES) em problemas de VOF (*interFOAM*), método adotado na escada para peixes, que é relatado como um método eficaz para garantir a delimitação de campos escalares e estabilidade mesmo em números de Courant arbitrariamente grandes (GREENSHIELDS, 2014).

A solução MULES controla dinamicamente o intervalo de tempo até o número máximo de Courant. Assim, se os momentos iniciais tipo não permanente não forem considerados nas análises, o modelo CFD pode ser acelerado usando um número de Courant maior que 1 (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; MOONEY; VOSKUILEN, 2014). No entanto, números de Courant maiores que 6 não devem ser usados (WOLF DYNAMICS, 2020). No modelo CFD da escada para peixes, o número máximo de Courant era 6 até que a convergência de massa fosse atingida, e o passo de tempo variou de 0,0001 s a 0,08 s dependendo do cenário. A estação de trabalho para executar o modelo CFD tinha 32 GB de RAM DDR4 ECC e um processador de cache de 3,7 Ghz e 10 Mb com quatro núcleos e oito processadores virtuais.

Já no canal curvo adotou-se o *SIMPLE method* (FARHADI *et al.*, 2018a) usado para escoamentos com a presença de um fluido incompressível, isotérmico e imiscível, usando o método *rigid lid* para tratamento da superfície que delimita a profundidade da água, sendo adotado somente um fluido. Visando obter estabilidade numérica e precisão temporal do *solver*, no *controlDict* adotou-se passo de tempo de 0,1 s de modo que o número de Courant não fosse superior a 0,5. Na Tabela 7 estão os esquemas numéricos para resolução das equações diferenciais parciais. Para as derivadas temporais, foi adotado *Steady State*, método que define as contribuições das derivadas temporais como zero. Para os termos gradientes, foi adotado o método

de Gauss linear, que especifica o padrão de discretização para o método de volume finito como sendo de integração Gaussiana, interpolando a variável do centro do elemento para o centro da face. Na interpolação da variável da célula para a face aplicou-se o esquema de interpolação linear, um esquema de segunda ordem não-limitado (OPENCFD, 2012b). Para os termos divergentes, foi adotado o esquema *upwind* que é de primeira ordem e limitado, prezando pela precisão da solução. Para os termos laplacianos, adotou-se o método de Gauss linear corrigido em função da não ortogonalidade dos elementos. Para a interpolação dos valores entre dois elementos consecutivos foi adotado o esquema padrão linear. Por fim, foi adotado uma correção ao gradiente normal à superfície, avaliando-se o gradiente normal ao centro da face comum a dois elementos.

Tabela 7 - Especificações numéricas utilizadas

| Termo | Esquema numérico |
|------------------|------------------------|
| Temporal | Steady State |
| Gradiente | Gauss linear |
| Divergente | Gauss Upwind |
| Laplaciano | Gauss linear corrected |
| Interpolação | Linear |
| Gradiente normal | Corrected |

Fonte: a autora

No arquivo *fvSolution* foram escolhidos os métodos iterativos de resolução das equações discretizadas de cada variável, especificando cada *solver* linear que foi utilizado conforme mostrado na Tabela 8, com suas respectivas tolerâncias absolutas e relativas.

Tabela 8 - Métodos de solução e tolerâncias adotadas

| | P | U k épsilon |
|--------------------------------|-------------|--------------|
| Solver | GAMG | smoothSolver |
| Pré-condicionador / Suavizador | GaussSeidel | GaussSeidel |

| | | |
|---------------------|--------------------|--------------------|
| Tolerância absoluta | 1×10^{-7} | 1×10^{-8} |
| Tolerância relativa | 0.1 | 0.1 |

Fonte: a autora

Foi determinado que as simulações ocorressem em doze processadores em paralelo a fim de se reduzir o tempo necessário para convergência, ou seja, para que ocorresse a estabilização das variáveis. Simulações em paralelo no OpenFOAM são feitas por meio da decomposição do domínio. Tanto a geometria, quanto as variáveis de cálculo foram divididas em um determinado número de partes e alocadas em diferentes processadores.

Foi definido no arquivo *g* gravidade igual a $9,81 \text{ m/s}^2$, na direção *z*. No arquivo *transportProperties* foi adotado água como fluido newtoniano, com viscosidade constante e as propriedades adotadas estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades adotadas para o fluido

| Propriedades | Dimensões | Nomenclatura no OpenFOAM | Fluido água |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| Viscosidade cinemática | m^2s^{-1} | Nu | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| Densidade | kgm^{-3} | Rho | $1,0 \times 10^3$ |
| Tensão superficial | Nm^{-1} | Sigma | $7,0 \times 10^{-2}$ |

Fonte: a autora

As simulações ocorreram em RANS com o modelo de fechamento de turbulência *k-ε* e em LES com modelo de fechamento de turbulência *keqn* para resolução das equações de Navier-Stokes. Para *k-ε*, adotaram-se os valores padrões para suas constantes: $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,3$, $C_{1\epsilon} = 1,44$, e $C_{2\epsilon} = 1,92$ (OPENCFD, 2012a). Para *keqn*, adotaram-se os valores padrões para suas constantes: $C_k = 0,094$ e $C_\epsilon = 1,048$ (OPENCFD, 2012c).

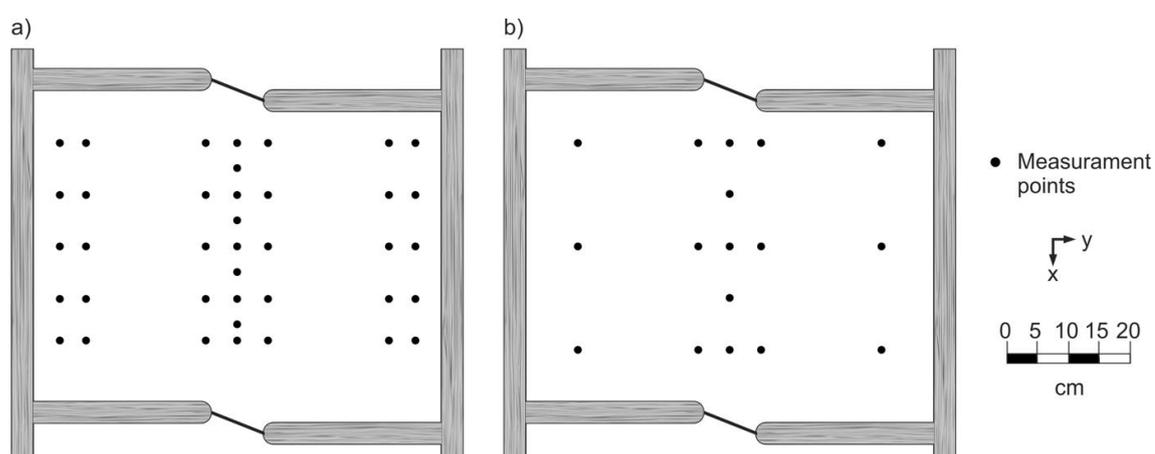
3.2.2.4 Medições laboratoriais

As medições laboratoriais da escada para peixes foram realizadas no modelo físico utilizando um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV). As medições foram realizadas na quarta e quinta piscinas (de montante a jusante), que foram menos afetadas pelos padrões de fluxo de entrada e saída nas duas vazões (6,0 l/s e 9,4 l/s).

As vazões foram geradas por uma bomba, reguladas por válvulas tipo gaveta e borboleta e medidas por um medidor de vazão eletromagnético. A escada era conectada a um reservatório de montante, que possuía laminadores de fluxo, por meio de um canal plano de 1,5 m de comprimento e a um reservatório de jusante por meio de um canal plano de 1,0 m de comprimento, que possuía, em sua extremidade jusante, uma comporta deslizante horizontal de duas folhas para regular o nível d'água a jusante.

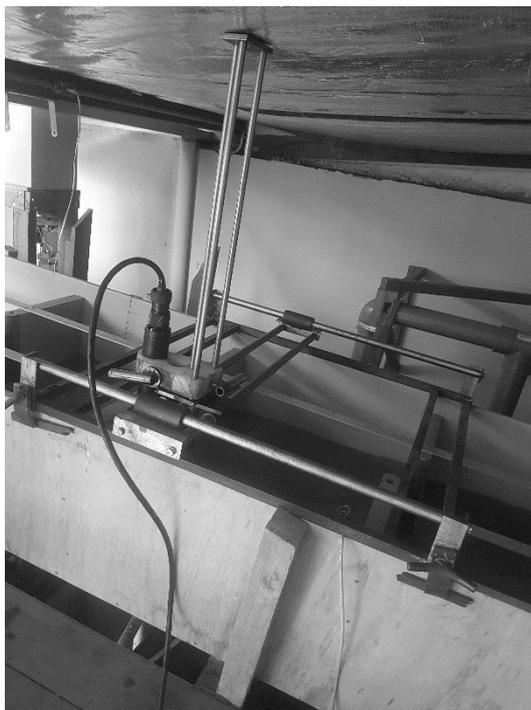
As medições de velocidade foram feitas no plano de profundidade 7 cm do fundo do canal (fc) para uma vazão de 6,0 l/s e nos planos de profundidade 7 cm e 14 cm fc para 9,4 l/s. O ADV foi posicionado em 34 pontos na quarta piscina (de montante a jusante), denominada piscina a montante, (Figura 15a) e em 17 pontos na quinta piscina (de montante a jusante), denominada piscina a jusante (Figura 15b). Um suporte do tipo carrinho móvel (Figura 16) posicionou o ADV em diferentes posições de medição ao longo da piscina. As barras de apoio dos defletores criavam limitações para a colocação do carrinho e impediam a amostragem de algumas regiões das piscinas com o ADV. Estes pontos foram escolhidos de acordo com limitações impostas em campo.

Figura 15 - Pontos de medição com ADV: a) na piscina a montante; b) na piscina a jusante



Fonte: a autora

Figura 16 - Suporte móvel utilizado para realização das medições



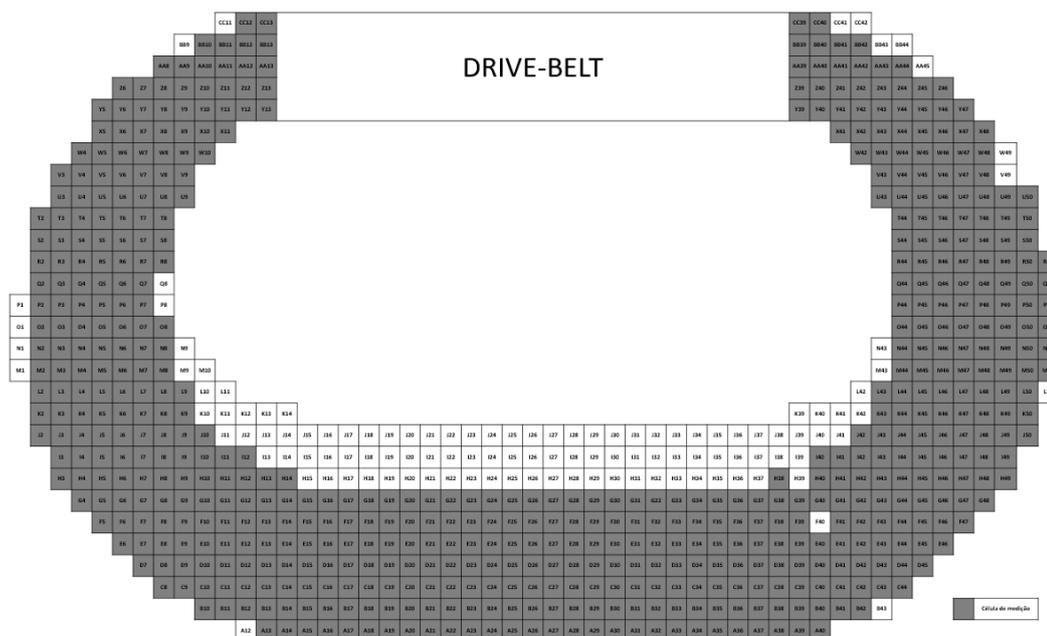
Fonte: a autora

As medições de velocidade foram realizadas com um ADV da marca Sontek modelo YSI 16-MHz Micro-ADV com resolução de 0,01 cm/s. O programa HorizonADV (v. 1.20, SonTek, San Diego, CA, EUA) foi usado para adquirir os dados no computador. Os parâmetros de configuração foram os seguintes: 1) frequência de 50 Hz; 2) faixa de velocidade de 100 cm/s; 3) tempo de amostragem de 42 segundos (considerando a compatibilidade com o modelo numérico e a disponibilidade de tempo no laboratório); 4) temperatura da água de 25 °C. Os dados adquiridos foram filtrados pelo método de limiar de espaço de fase (PSTM), que foi desenvolvido por Goring e Nikora (2002) e modificado / implementado por Wahl (2003) em WinADV (v. 2.031, Bureau of Reclamation, Denver, CO, EUA). A aplicação desses filtros removeu outliers, preservando uma grande porcentagem dos dados (mais de 80% do total de dados neste estudo).

Já no canal curvo, as medições foram feitas em 667 pontos (Figura 17), na profundidade de 15 cm do fundo do canal (fc) para o cenário slow. Nos demais cenários foram feitas medições em 52 pontos no total, em três profundidades diferentes: 6 cm, 12 cm e 18 cm. Estas medições foram feitas e cedidas pela pesquisadora Lorena Nogueira da *La Trobe University*, com utilização de um medidor

do tipo molinete, *flow watch* (Figura 18). A hélice do molinete foi posicionada na direção do escoamento principal e foram coletados 30 valores de velocidade em cada ponto.

Figura 17 – Medição do cenário *s/low* no canal circular. As células em cinza escuro indicam pontos de medição



Fonte: a autora

Figura 18 – Medidor do tipo molinete utilizado para medição da velocidade pontual do escoamento principal



Fonte: (Nogueira, 2019)

3.2.3 Análise estatística

Para avaliar a concordância dos modelos RANS e LES com os dados experimentais, as seguintes métricas foram calculadas para a velocidade (m/s) e energia cinética turbulenta (m^2/s^2): erro absoluto médio (em inglês *Mean Absolute Error*, MAE), correlação quadrada de Pearson e correlação de Spearman. A diferença entre os modelos físicos e numéricos foi verificada pelos testes de normalidade (Shapiro Wilk) e Wilcoxon, realizados no software R 2019 (v. 3.5.3, *The R Foundation for Statistical Computing*, Viena, Áustria). Para todos os testes, o nível de significância foi de 0,05. Boxplots e gráficos de correlação de Spearman foram incluídos no software R.

Para amostrar os valores das características hidráulicas nas zonas de interesse, os dados experimentais foram processados e interpolados por meio do software Tecplot 360 2015 (Tecplot, Bellevue, WA, EUA). Os dados de entrada do Tecplot foram as coordenadas, velocidade e flutuação da velocidade. Assim, as variáveis deformação hidráulica, energia cinética turbulenta e vorticidade foram calculadas como apresentadas nas Equações 19, 20 e 21.

4 RESULTADOS

Os resultados relativos aos canais em estudo neste trabalho serão apresentados em forma de artigo. O texto apresentado no item 4.1 foi traduzido e adequado para a dissertação, sendo o texto original enviado em inglês como artigo científico na Revista *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (American Society of Civil Engineers, ASCE)* em maio de 2021.

Já o texto apresentado no item 4.2 é a base inicial de um artigo a ser submetido em uma Revista Científica.

4.1 ESCOAMENTO TURBULENTO EM UMA ESCADA PARA PEIXES DO TIPO RANHURA-VERTICAL: AVALIAÇÃO NUMÉRICA COM ESQUEMAS RANS E LES (ARTIGO 1)

Hersilia de Andrade e Santos¹

Ablail Paula Pinheiro²

Ludmila Moura Moreira Mendes³

Ricardo Ahouagi Carneiro Junho⁴

Artigo aceito para revisão em 11 de junho de 2021 na revista *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (American Society of Civil Engineers)*.

RESUMO

A aplicação de modelos numéricos para a análise do escoamento em passagem para peixes permite uma melhor compreensão da estrutura do escoamento turbulento, que é uma covariável importante para explicação do movimento de peixes. As equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) com o modelo de turbulência K- ϵ tem sido o principal modelo numérico para caracterizar o escoamento em escadas para peixes. Mais recentemente, a simulação LES (*Large Eddy Simulation*) foi relatada como sendo melhor na captura de turbulência em escoamentos incompressíveis. As escadas para peixes do tipo ranhura vertical são mecanismos muito estudados, mas ainda são necessários estudos que abordem o efeito dos parâmetros hidráulicos ao longo das piscinas. Assim, o escoamento de um tipo de escada de ranhura vertical foi simulado no software *opensource* OpenFOAM, e dois modelos foram aplicados: 1) RANS com fechamento K- ϵ e 2) LES com esquema kEqn. Os resultados numéricos foram

comparados aos dados de *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) coletados no modelo físico. O escoamento em uma piscina central da escada de peixes do tipo ranhura vertical criou duas áreas de recirculação de escoamento lateral e um escoamento central para diferentes vazões e profundidades dentro da piscina. Os modelos RANS $k-\epsilon$ e LES $kEqn$ foram comparáveis aos dados obtidos com ADV para todas as faixas de velocidade e para a menor energia cinética turbulenta ($<0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$). O modelo LES $kEqn$ foi ligeiramente melhor do que RANS $k-\epsilon$ na representação de turbulência. A aplicação do modelo LES em escadas para peixes será útil para melhorar a compreensão do desempenho da passagem de peixes.

Introdução

Mecanismos de transposição para peixes (MTPs) são estruturas hidráulicas projetadas para permitir o movimento seguro e oportuno dos peixes através de uma barreira (SILVA *et al.*, 2018), que se concentra principalmente na passagem para montante de peixes migradores (COOKE e HINCH, 2013). As escadas para peixes são as passagens para peixes mais populares no mundo (CLAY, 1995; FAO / DVWK, 2002; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; LARINIER, 2002) e podem ser descritas como canais artificiais com obstáculos internos, que reduzem a velocidade da água através de um processo de dissipação de energia do escoamento. Historicamente, seu projeto foi baseado nas características de natação dos peixes, que estão principalmente relacionadas às velocidades máximas de escoamento e às taxas de dissipação de energia (BIRNIE-GAUVIN *et al.*, 2019; KATOPODIS, 1992, 2005).

Alguns tipos de escoamentos gerados por escadas de peixes podem exercer uma seleção sobre as espécies de peixes que podem usá-las (KEEFER *et al.*, 2011; WANG e CHANSON, 2018). Além disso, testes em MTPs enfatizam um desafio comum entre a atração dos peixes e a eficiência da passagem, onde as características do escoamento hidráulico muitas vezes excedem suas necessidades dos peixes para uma passagem ideal (AARESTRUP *et al.*, 2003; BUNT *et al.*, 1999; HARD e KYNARD, 1997 ; PRATT *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2012b). Embora a conservação de peixes seja muito mais complexa do que considerar apenas a instalação de um MTP (LIRA *et al.*, 2017; PELICICE *et al.*, 2020), a avaliação dos processos internos nas

passagens para peixes contribui para a compreensão da biomecânica, cinemática e energética da natação de peixes (WANG e CHANSON, 2018).

Os escoamentos em escadas para peixes têm sido estudados há anos (KATOPODIS e WILLIAMS, 2012) e a estrutura complexa desses escoamentos é normalmente gerada pela 1) geometria tridimensional da escada, 2) elevada intensidade de turbulência e 3) interação entre vórtices e obstruções sucessivas. Ainda hoje, a caracterização dos escoamentos de escada para peixes continua a ser uma motivação de pesquisa (BENCHIKH LE HOCINE *et al.*, 2019). Um escoamento turbulento pode exercer diferentes efeitos sobre o movimento dos peixes dependendo de sua magnitude (por exemplo, atrair ou repelir peixes, ajudar ou retardar seus movimentos migratórios) (SILVA *et al.*, 2012a), uma vez que está relacionado aos custos de natação (LIAO, 2003), eficiência de captura por espécies predatórias (ENDERS *et al.*, 2003) e seleção de habitat (COTEL *et al.*, 2006).

Modelos físicos têm sido usados para estudos de turbulência em escoamentos de passagem para peixes (BAKI *et al.*, 2015; CABONCE *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2012a; TARRADE *et al.*, 2008), mas o desenvolvimento de modelos numéricos também tem contribuído para uma compreensão abrangente dos padrões de escoamento turbulento em passagens para peixes (BAKI *et al.*, 2016; BOMBAČ *et al.*, 2015; DUGUAY *et al.*, 2017; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; MARRINER *et al.*, 2014; QUARANTA *et al.*, 2017; STAMOU *et al.*, 2018 ; SANAGIOTTO *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021). Diversas abordagens têm sido aplicadas numericamente para representar o processo turbulento, e a seleção dessas abordagens está relacionada aos custos computacionais para resolver diferentes escalas de turbulência (BENCHIKH LE HOCINE *et al.*, 2019). A maioria dos estudos se concentra em escadas do tipo ranhura vertical, que foram amplamente construídas no mundo (LARINIER, 2002). O escoamento desse tipo de escada forma um jato ao passar pela ranhura e a energia é dissipada pela mistura do escoamento na piscina (RAJARATNAM *et al.*, 1986). Assim, as piscinas desse tipo de escada geram zonas de recirculação de fluido, que são definidas como áreas sem escoamento principal (TARRADE *et al.*, 2008), e o número de zonas de recirculação depende da localização da ranhura (RAJARATNAM *et al.*, 1986).

A escolha das equações governantes que representam o escoamento hidráulico e abordagem de turbulência continua a ser a questão principal nas análises de escoamentos turbulentos em passagens para peixes (BENCHIKH LE HOCINE *et al.*, 2019; DUGUAY *et al.*, 2017; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018). Uma das abordagens computacionais mais antigas para turbulência tridimensional é *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS) e consiste em adicionar o termo de tensão aparente conhecido como tensor de Reynolds, que é de segunda ordem (RODI, 2017; XIE *et al.*, 2013). Nesse caso, a turbulência não é resolvida, mas modelada estatisticamente, o que reduz o custo computacional. Recentemente, modelos de simulação *Large Eddy Simulation* (LES) foram aplicados em estudos de passagem para peixes (BENCHIKH LE HOCINE *et al.*, 2019; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018). Eles envolvem a exclusão das pequenas escalas de turbulência aplicando um filtro às equações de Navier-Stokes (RODI, 2017). A aplicação dessas abordagens de turbulência começou na década de 1970 (DEARDORFF, 1970).

O uso de um modelo LES pode demandar mais gastos computacionais do que um modelo RANS, dependendo da complexidade do escoamento. No entanto, estudos em escoamentos de superfície livre sugerem que os modelos LES podem modelar com precisão regiões onde a camada limite de fluido se separa, e outras regiões governadas por forças viscosas significativas, como áreas de escoamento secundário (geralmente em uma direção diferente da direção do escoamento principal) (VAN BALEN *et al.*, 2010). Os modelos RANS não conseguem reproduzir esses processos (RAMAMURTHY *et al.*, 2013) devido a restrições computacionais e à presença de várias fontes de turbulência em escoamentos de superfície livre, como atrito de fundo, tensão de cisalhamento do vento e quebra de onda (NADAOKA e YAGI, 1998).

Estudos dos modelos RANS com abordagens K- ϵ padrão e LES com abordagens Smagorinsky padrão em escadas do tipo ranhura vertical indicam que ambos os modelos se aproximam bem dos dados de escoamento turbulento em termos de parâmetros de vorticidade, mas não são tão bons para a energia cinética e a tensão de Reynolds (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018). Estes parâmetros turbulentos foram identificados como os principais fatores que explicam o sucesso da passagem e o tempo de trânsito dos peixes em determinados tipos de escadas (DUARTE *et al.*,

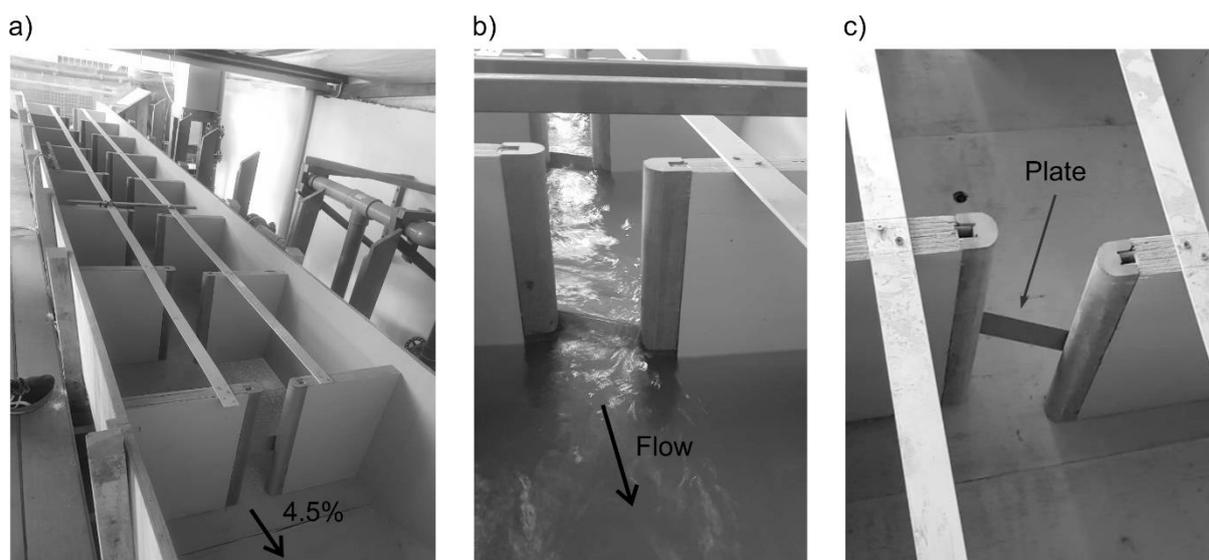
2012; SILVA *et al.*, 2012a). Além disso, estudos de Dinâmica de Fluidos Computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamic*, CFD) em escoamentos gerados por escada para peixe geralmente não abordam a capacidade do modelo em capturar turbulência em diferentes zonas de piscina, que são naturalmente diferentes. Em termos de comparação do esquema LES, o modelo Smagorinsky padrão não mostrou melhor concordância do que o modelo *Wall-Adapting Local Eddy-viscosity* (WALE) para dados de *Particle Image Velocimetry* (PIV), que foram medidos em um escoamento turbulento de esteira atrás de um corpo submerso em forma de D, que é comum na natureza como passagens para peixes (BENCHIKH LE HOCINE *et al.*, 2019). Assim, questões relacionadas à representação numérica de escoamentos turbulentos em passagens para peixes ainda exigem análises mais profundas sobre as aplicações do esquema LES, sua capacidade e sua comparação com abordagens RANS para capturar o processo turbulento em diferentes partes dos escoamentos em escada para peixes.

Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar a captura do fenômeno de turbulência pelos métodos RANS com modelo de turbulência K- ϵ padrão e LES com esquema de viscosidade turbulenta de uma equação (kEqn) para o escoamento de uma escada do tipo ranhura vertical central (Fig. 1). Embora os detalhes do escoamento em uma piscina de um tipo semelhante de ranhura vertical tenham sido descritos em algumas primeiras publicações sobre a hidráulica de passagens para peixes (RAJARATNAM *et al.*, 1986, 1992), este projeto de ranhura vertical é diferente daquele normalmente estudado ou construído (QUARANTA *et al.*, 2017). Nossas hipóteses são: 1) o modelo LES pode capturar melhor os processos de turbulência em áreas de recirculação do que o modelo RANS; 2) os modelos LES e RANS não capturam toda a faixa de turbulência, que é um fator importante na movimentação dos peixes dentro das piscinas. Os modelos numéricos foram construídos no software de código aberto OpenFOAM (v. 5.0, The OpenFOAM Foundation Ltd, Londres, Reino Unido), (GREENSHIELDS, 2020), que usa o método de volume de fluido (VOF) para modelagem de escoamento de superfície livre. Os resultados foram comparados aos dados do *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) coletados em modelo reduzido.

Instalação Experimental e Instrumentação

As medições laboratoriais foram realizadas em um modelo físico utilizando um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV). O canal (Fig. 1a) possuía um declive de 4,5%, 5,5 m de comprimento e 0,78 m de largura e parede lateral de 0,6 m de altura. Ao longo do seu comprimento, sete piscinas foram criadas com ranhuras cuja largura (b_0) era de 10 cm (Fig. 1b). As dimensões de cada piscina eram 0,60 m ($6 b_0$) de comprimento e 0,78 m ($7,8 b_0$) de largura. O escoamento passa pela ranhura vertical central que possuía uma placa (dimensões 0,10 m x 0,04 m) localizada a 0,13 m do fundo do canal (Fig. 1c). Essa estrutura foi proposta como um possível aspecto construtivo para um projeto de escada para peixes *in situ*. As medições com ADV foram realizadas na quarta e quinta piscinas (de montante a jusante), que foram menos afetadas pelos padrões de fluxo de entrada e saída nas duas vazões (6,0 l/s e 9,4 l/s). As vazões foram geradas por uma bomba, reguladas por uma comporta e válvulas tipo borboleta e medidas por um medidor de vazão eletromagnético. A escada era conectada a um reservatório de montante, que possuía laminadores de fluxo, por meio de um canal plano de 1,50 m de comprimento e a um reservatório de jusante por meio de um canal plano de 1,0 m de comprimento. No final do sistema havia uma comporta deslizante horizontal de duas folhas para regular o nível d'água a jusante.

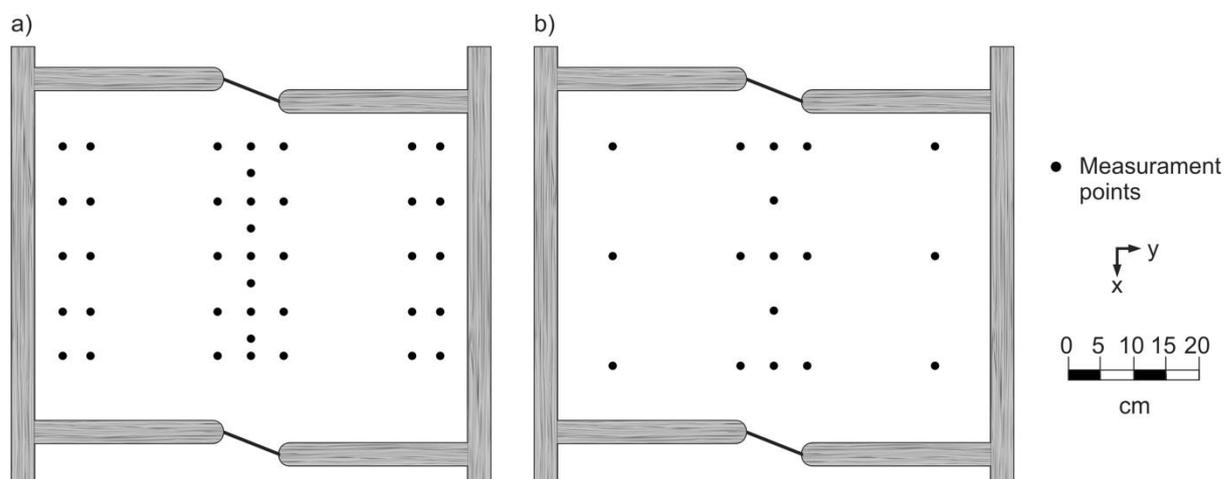
Fig. 1. Modelo físico: a) o canal em estudo; b) detalhe da ranhura e c) placa entre a ranhura vertical.



As medições de velocidade foram feitas no plano de profundidade 7 cm do fundo do canal (fc) para uma vazão de 6,0 l/s e nos planos de profundidade 7 cm e 14 cm fc para 9,4 l/s. O ADV foi posicionado em 34 pontos na quarta piscina (a montante)

(piscina a montante) (Fig. 2a) e em 17 pontos na quinta piscina (a montante) (piscina a jusante) (Fig. 2b). Um suporte do tipo carrinho móvel posicionou o ADV em diferentes posições de medição ao longo da piscina. As barras de apoio dos defletores criavam limitações para a colocação do carrinho e impediam a amostragem de algumas regiões das piscinas com o ADV (Fig. 2a).

Fig. 2. Pontos de medição com ADV na piscina a montante (a) e na piscina a jusante (b)



As medições de velocidade foram realizadas com um ADV da marca Sontek modelo YSI 16-MHz Micro-ADV com resolução de 0,01 cm/s. O programa HorizonADV (v. 1.20, SonTek, San Diego, CA, EUA) foi usado para adquirir os dados no computador. Os parâmetros de configuração foram os seguintes: 1) frequência de 50 Hz; 2) faixa de velocidade de 100 cm/s; 3) tempo de amostragem de 42 segundos (considerando a compatibilidade com o modelo numérico e a disponibilidade de tempo no laboratório); 4) temperatura da água de 25 °C. Os dados adquiridos foram filtrados pelo método de limiar de espaço de fase (PSTM), que foi desenvolvido por Goring e Nikora (2002) e modificado / implementado por Wahl (2003) em WinADV (v. 2.031, Bureau of Reclamation, Denver, CO, EUA). A aplicação desses filtros removeu outliers, preservando uma grande porcentagem dos dados (mais de 80% do total de dados neste estudo).

Equações governantes

O modelo numérico 3D foi implementado usando OpenFOAM, que é um software de CFD gratuito e de código aberto (GREENSHIELDS, 2020). O escoamento do tipo transiente foi simulado usando *interFoam*, que pode simular dois fluidos

imiscíveis, incompressíveis e isotérmicos com base no método de *Volume of Fluid* (VOF) para resolver as equações de continuidade e transporte de Navier-Stokes (OPENCFD, 2012a).

A equação de continuidade e as equações de Navier-Stokes em sua forma incompressível foram usadas para modelar o escoamento. O caráter aleatório dos escoamentos turbulentos foi matematicamente descrito pelas equações de Reynolds. A velocidade pontual ao longo de um determinado período de tempo foi decomposta em dois componentes: valor da velocidade média (\bar{u}) e flutuação da velocidade (u') (WHITE, 2015). Aplicamos as equações RANS (Eq. 1 e Eq. 2) para simular o escoamento numérico na escada de peixes:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

onde \bar{u} é o vetor de velocidade média, u' é o vetor de flutuação de velocidade, p é a pressão, μ é a viscosidade cinemática, e ρ é a massa específica do fluido.

A coexistência de dois fluidos (água e ar) nas equações foi gerenciada pelo método *Volume of Fluid* (VOF), que determina um valor de fração de fase (α) para cada célula no domínio computacional Eq. (3).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha) = 0 \quad (3)$$

Células com $\alpha = 1$ contêm apenas água, e aquelas com $\alpha = 0$ contêm apenas ar. Os valores fracionários entre 0 e 1 aproximam-se de onde reside a superfície livre (HIRT e NICHOLS, 1981).

Fechamento da turbulência

Nas simulações numéricas RANS, é necessário incluir modelos de turbulência (POPE, 2001). O modelo k- ϵ foi desenvolvido para estimar as variáveis energia cinética (k) e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ) usando as equações de transporte (Eqs. (4) e (5)). Ao resolver duas equações de transporte

separadamente, os modelos de turbulência de duas equações, como k-ε, permitem que as escalas de velocidade e comprimento turbulentas sejam determinadas de forma independente, que representam as propriedades dos escoamentos turbulentos em mais detalhes (LAUNDER e SPALDING, 1974).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

onde σ_k e σ_ε são os constantes de Prandtl para k e épsilon, μ_t é a viscosidade da turbulência (Eq. (6)), G_k é a geração de energia cinética turbulenta (Eq. (7)), e C_μ é uma constante de proporcionalidade (LAUNDER e SPALDING, 1974).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

O modelo de turbulência e o tipo de escoamento determinaram os valores de σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$. Os seguintes valores foram usados: $\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$ e $C_{2\varepsilon} = 1,92$ (CHUNG *et al.*, 2002).

A simulação LES foi explorada por Deardorff (1970) e aplica um filtro às equações de Navier Stokes, que exclui as pequenas escalas de turbulência. Movimentos turbulentos tridimensionais instáveis maiores no LES são representados diretamente, enquanto os efeitos dos movimentos em escala menor (em inglês *subgrid*, SGS) são modelados. Em outras palavras, a ideia do LES é calcular as grandes escalas da turbulência que contêm energia (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2008).

A equação de viscosidade turbulenta (keqn) foi aplicada para modelar a turbulência SGS. O ponto principal desse modelo SGS é calcular a energia cinética da escala da submalha (k_{sgs}) Eq. (8) (HUANG e LI, 2009). Enquanto o modelo de Smagorinsky usa o equilíbrio local para calcular k_{sgs} , o modelo de uma equação de

viscosidade turbulenta resolve uma equação de transporte (Eq. (9)) (YOSHIKAWA e HORIUTI, 1985).

Desse modo:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \tau_{kk} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho k_{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k_{sgs})}{\partial x_j} - \frac{\partial \left[\rho (v + \nu_{sgs}) \frac{\delta k_{sgs}}{\delta x_j} \right]}{\partial x_j} = -\rho \tau_{ij} : \bar{D}_{ij} - C_\epsilon \frac{\rho k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (9)$$

onde ν é a viscosidade cinética, C_ϵ é uma constante do modelo, τ_{ij} é o tensor de tensão da escala da submalha Eq. (10), \bar{D}_{ij} é o tensor de taxa de deformação em escala resolvida Eq. (11), ν_{sgs} é a viscosidade turbulenta da submalha dada pela Eq. (12), e Δ é o comprimento característico de corte do filtro.

$$\tau_{ij} \approx \frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} - 2\nu_{sf} dev(\bar{D})_{ij} \quad (10)$$

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

$$\nu_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (12)$$

Para a abordagem de viscosidade turbulenta de uma equação, C_k é 0,094 e C_ϵ é 1,048 (OPENCFD, 2012b).

Diferenças na suposição de equilíbrio local entre a produção e dissipação de energia na submalha podem ocorrer em modelos algébricos de viscosidade turbulenta, especialmente para escoamentos não homogêneos, situações de escoamentos de alto número de Reynolds ou resolução de malha com grande espaçamento. O modelo de viscosidade turbulenta de uma equação foi desenvolvido para evitar esta deficiência e tem vantagens em comparação com outros modelos de submalha, por exemplo, pode prever movimento de contra escoamento (em inglês *backscattering*) (HUANG e LI, 2009). Os escoamentos dentro de uma passagem para peixes de ranhura vertical geralmente não são homogêneos em todas direções (SILVA *et al.*, 2012b). Assim, a viscosidade turbulenta de uma equação pode fornecer estatísticas melhores das escalas de movimento que contêm energia nesse tipo de escada de peixe do que em outros modelos.

MALHA E INCERTEZA DA DISCRETIZAÇÃO

A discretização do domínio foi iniciada com a ferramenta *blockMesh*, criando-se uma malha hexaédrica estruturada de todo o canal inclinado. O próximo passo foi inserir as ranhuras verticais, fornecidas no formato STL, pelas ferramentas *surfaceFeatureExtract* e *snappyHexMesh*. Este último utilitário também foi aplicado para refinar e criar uma malha não estruturada em torno das ranhuras verticais (Fig. 3). Após a criação da malha, a qualidade da malha foi testada usando a ferramenta *checkMesh*, e a discretização de domínio só foi usada nos modelos CFD se ela passou em todos os testes desta ferramenta (caixa delimitadora, direções não vazias ou não cunha, razão de aspecto, volumes de célula, não ortogonalidade e assimetria).

A efetividade da malha foi testada usando três tamanhos de elemento ($\Delta x = 0,015, 0,02$ e $0,025$ m) para a menor vazão (6,0 l/s) nos modelos RANS e LES (Tabela 1). A análise de incerteza devido à discretização foi baseada nos critérios da ASME (CELIK *et al.*, 2008). O erro relativo aproximado entre duas malhas (por exemplo, malhas 1 e 2 – Eq. (13)) e o índice de convergência de grade fina (em inglês, *fine-grid convergence* GCI) Eq. (14) foram calculados para as profundidades da água e velocidades pontuais para um plano na meia largura ($y = 39$ cm).

Desse modo,

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (13)$$

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^{pa} - 1} \quad (14)$$

onde ϕ_i é a solução na i -ésima grade (neste estudo, é a velocidade ou profundidade da água), pa é a ordem aparente e r é o fator de refinamento dos elementos entre duas malhas (CELIK *et al.*, 2008).

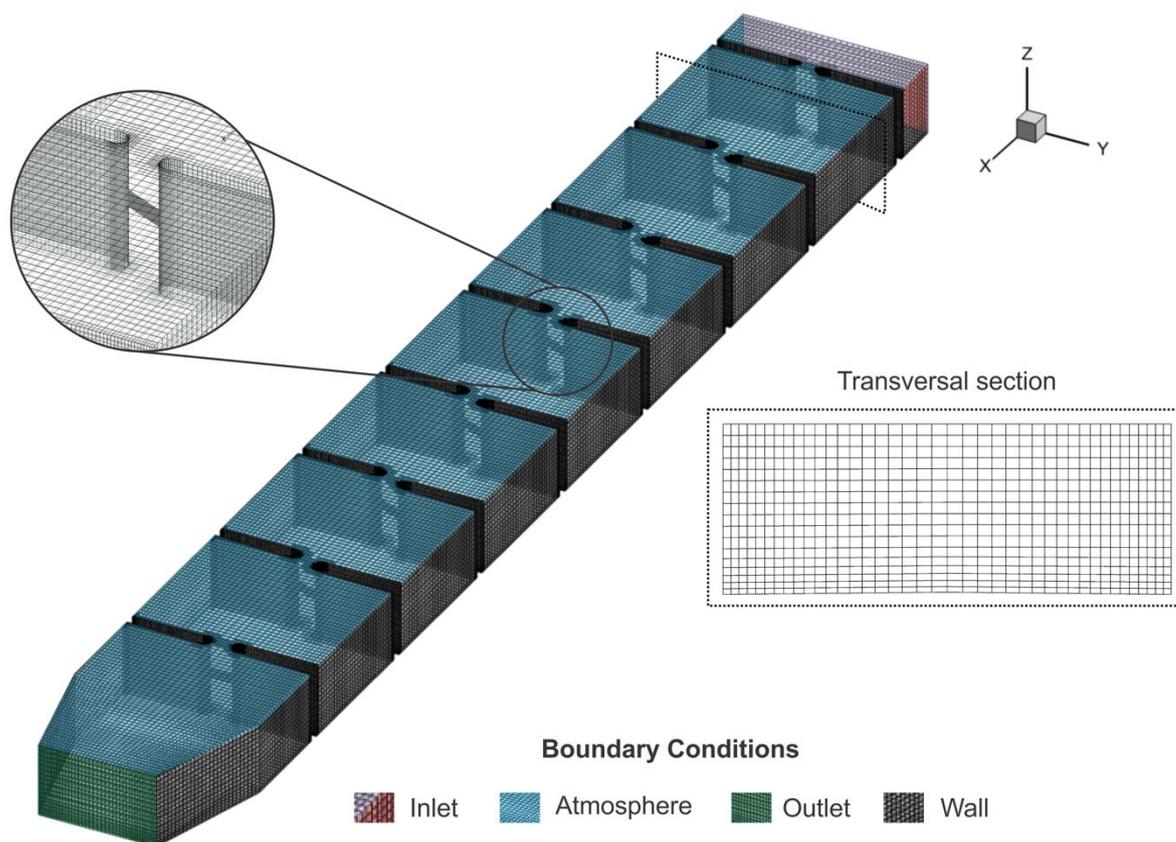
Tabela 1 – Detalhes da malha para os modelos RANS e LES

| VAZÃO (L/S) | NÚMERO DA MALHA | TAMANHO DO ELEMENTO ΔX (M) | NÚMERO DE ELEMENTO S | NÚMERO DE HEXAEDRO S | NÚMERO DE PRISMAS | NÚMERO DE POLIEDRO S |
|----------------|--------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 6 | 3 | 0.025 | 818042 | 728496 | 18265 | 71281 |
| 6 | 2 | 0.02 | 444171 | 376736 | 15196 | 52239 |
| 6 | 1 | 0.015 | 310385 | 256902 | 11430 | 42053 |
| 9.4 | 1' | 0.015 (NA PROFUNDI DADE DE 0.01) | 888661 | 766262 | 31841 | 90558 |

As abordagens LES também apresentam imprecisões relacionadas ao desempenho do modelo em escala submalha, e é difícil separar os efeitos dos erros de malha do processamento de filtragem LES (CELIK *et al.*, 2009). Assim, definimos o critério de resolução da submalha como $M = k_{sgs} / (k_{resolved} + k_{sgs})$ para analisar as grandezas turbulentas modeladas pela abordagem LES. A variação M varia de 0 (onde todas as flutuações de velocidade são capturadas pelo modelo) a 1 (onde todas as faixas turbulentas são modeladas como RANS) (BOUDIER *et al.*, 2008). Uma boa prática para LES é adotar M superior a 0,8 em todo o domínio (ANSYS, 2016).

Após as análises de incerteza de discretização, uma malha única foi selecionada para ambos os modelos CFD. A malha de tamanho selecionada foi aplicada para ambas as vazões, embora um refinamento ao longo da profundidade (tamanho do elemento de 1 cm) tenha sido criado para a maior vazão (9,4 l/s), que apresentou maiores de lâmina d'água do que o cenário da menor vazão (6,0 l/s). Uma vez que a solução dos modelos de turbulência depende da região de escoamento viscoso perto dos limites sólidos (VON KÁRMÁN, 1931), um refinamento de malha foi aplicado para áreas perto das paredes (Fig. 3) para atingir uma distância de parede adimensional (y^+) de 30-300 (BAYON *et al.*, 2016).

Fig. 3. Malha e condições de contorno dos modelos RANS e LES para o escoamento da escada para peixes



CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONDIÇÕES INICIAIS

As condições de contorno foram criadas como blocos de malha no arquivo de geometria (usando a ferramenta *blockMesh*), e diferentes combinações de configurações foram testadas com base em OpenCFD (2012b), Nextfoam (2017) e Fuentes-Pérez *et al.* (2018). A combinação com a melhor estabilidade para os modelos numéricos desta passagem para peixes de ranhura vertical específica (Tabela 2) envolveu permitir a oscilação da profundidade da água por meio de *variableHeightFlowRate* e fixar a vazão por meio de *variableHeightFlowRateInletVelocity* na entrada (Nextfoam, 2017). A configuração para saída foi *zeroGradient* para o *Volume of Fluid* (alfa), o que determinou que o gradiente da quantidade alfa seria zero na direção perpendicular ao limite, e *inletOutlet* para a velocidade. Esse último tem significado semelhante à condição de contorno *zeroGradient*, mas ele é alterado para *fixedValue* no caso de escoamento no sentido contrário ao escoamento principal próximo à região de contorno (Nextfoam, 2017). Na atmosfera, foram definidos o *pressureInletOutletVelocity* para a velocidade e *totalPressure* para a pressão, e essa combinação é frequente em limites onde ocorre

algum escoamento inverso e a velocidade do escoamento de entrada é desconhecida (GREENSHIELDS, 2018). A condição de não escorregamento foi criada para paredes usando *zeroGradient* para *Volume of Fluid*, *fixedValue* para velocidade e *fixedFluxPressure* para pressão.

Tabela 2. Condições de contorno no OpenFOAM usadas para os modelos RANS e LES da escada para peixes do tipo ranhura vertical

| Condição de contorno | | Entrada | Saída | Atmosfera | Paredes |
|------------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| Volume of Fluid (alfa) | | variableHeightFlowRate | zeroGradient | inletOutlet | zeroGradient |
| Velocidade | | variableHeightFlowRateInletVelocity | inletOutlet | pressureInletOutletVelocity | fixedValue |
| Pressão | | fixedFluxPressure | fixedFluxPressure | totalPressure | fixedFluxPressure |
| LES | nut | Calculated | calculated | Calculated | nutkWallFunction |
| RANS | K | fixedValue | inletOutlet | inletOutlet | kqRWallFunction |
| | épsilon | fixedValue | inletOutlet | inletOutlet | epsilonWallFunction |

DISCRETIZAÇÃO DE VOLUMES FINITOS E SOLUCIONADORES DE CFD

O OpenFOAM usa a metodologia de acoplamento pressão-velocidade padrão com o preditor de velocidade, solucionador de pressão e corretor de velocidade para resolver as equações governantes. As configurações dos esquemas de tempo,

discretização espacial e o método de acoplamento pressão-velocidade para os modelos da escada para peixes do tipo ranhura vertical foram resumidos na Tabela 3. Aplicou-se o PIMPLE, que é um algoritmo que combina operador de divisão implícito de pressão (PISO) e o algoritmo com pressão de equações vinculadas (SIMPLE). PISO e PIMPLE são procedimentos iterativos para equações de acoplamento de momento e conservação de massa e foram sugeridos para aplicações em problemas transitórios (GREENSHIELDS, 2020).

Tabela 3. Esquemas de tempo, discretização espacial e o método de acoplamento pressão-velocidade adotado para a escada para peixes do tipo ranhura vertical em estudo no OpenFOAM.

| Esquemas de tempo | Discretização especial | | | | | | | | | | Acoplamento pressão velocidade |
|-------------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Euler (1-E) | Gradiente | Divergente | | | | | | Laplaciano de superfície normal | Interpolação | Gradiente de superfície normal | Pimple |
| | Gauss linear | div(rhoPhi, U) | div(phi, alpha) | div(phi, alpha) | div(phi, k) | div(phi, epsilon) | div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) | Gauss linear corrected | Linear | Corrected | |

O OpenFOAM permite o uso do limitador multidimensional para solução explícita (MULES) em problemas de VOF (*interFOAM*), que é relatado como um método eficaz para garantir a delimitação de campos escalares e estabilidade mesmo em números de Courant arbitrariamente grandes (GREENSHIELDS, 2014). A solução MULES controla dinamicamente o intervalo de tempo até o número máximo de Courant. Assim, se os momentos iniciais tipo não permanente não forem considerados nas análises, o modelo CFD pode ser acelerado usando um número de Courant maior que 1 (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; MOONEY *et al.*, 2014). No entanto, números de Courant maiores que 6 não devem ser usados (WOLF DYNAMICS, 2020). Nos modelos CFD em estudo, o número máximo de Courant era 6 até que a convergência de massa fosse atingida, e o intervalo de tempo variou de 0,0001 a 0,08 dependendo do cenário. A estação de trabalho para executar o modelo CFD tinha 32 GB de RAM DDR4 ECC e um processador de cache de 3,7 Ghz e 10 Mb com quatro núcleos e oito ameaças.

VALIDAÇÃO DOS DADOS

Para avaliar a concordância dos modelos RANS e LES com os dados experimentais, as seguintes métricas foram calculadas para a velocidade (m/s) e energia cinética turbulenta (m^2/s^2): erro absoluto médio (em inglês *Mean Absolute Error*, MAE), correlação quadrada de Pearson e correlação de Spearman. As análises envolveram a comparação das informações pontuais em duas piscinas amostradas para vazões de 6,0 l/s e 9,4 l/s em dois planos diferentes. A diferença entre os modelos físicos e numéricos foi verificada pelos testes de normalidade (Shapiro Wilk) e Wilcoxon, realizados no software R 2019 (v. 3.5.3, *The R Foundation for Statistical Computing*, Viena, Áustria). Para todos os testes, o nível de significância foi de 0,05. Boxplots e gráficos de correlação de Spearman foram incluídos no software R.

MAPEAMENTO HIDRÁULICO

Para amostrar os valores das características hidráulicas nas zonas de interesse, os dados experimentais foram processados e interpolados por meio do software Tecplot 360 2015 (Tecplot, Bellevue, WA, EUA). Os dados de entrada do Tecplot foram as coordenadas, velocidade e flutuação da velocidade. Assim, as

variáveis energia cinética (Eq. 15), magnitude da vorticidade (Eq. 16) e deformação hidráulica (Eq. 17) foram calculadas de acordo com White (2002).

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2}) \quad (15)$$

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} \quad (16)$$

$$S = \sum \left| \frac{\partial u}{\partial x_j} \right| = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial y} + \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial u_k}{\partial y} \quad (17)$$

RESULTADOS

Incerteza da discretização

A malha mais fina (Malha 1) apresentou os maiores níveis de água e as menores velocidades ao longo do plano central (Fig. 4) para ambas as abordagens (RANS e LES). Porém, o GCI médio para as lâminas d'água das três malhas foi de 10,40% e -12,42% para as velocidades da água (Tabela 4). Assim, a simulação numérica teve um pequeno efeito devido à resolução da malha. A malha 1 foi selecionada ($\Delta x = 1,5$ cm); para ambas as vazões, a resolução M foi superior a 80% no modelo LES. A convergência de massa foi obtida para todos os cenários, e o modelo LES apresentou maiores oscilações do que o modelo RANS próximo às condições de contorno de saída do domínio (Fig. 5).

Tabela 4. Erro relativo aproximado entre duas malhas e o índice de convergência de malha fina para a profundidade e velocidade da água nos modelos RANS e LES para a passagem para peixes da ranhura vertical central.

| Variável | Modelo numérico | e21a (%) | e32a (%) | GCI21 (%) | GCI32 (%) |
|---------------|-----------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Lâmina d'água | RANS | 8,48 | 11,01 | 10,60 | 13,64 |
| | LES | 8,32 | 9,71 | 10,40 | 12,42 |
| Velocidade | RANS | 7,45 | 9,52 | 9,31 | 13,00 |
| | LES | 6,42 | 7,60 | 8,02 | 8,44 |

Fig. 4. Velocidade e profundidade da água na malha 1 ($\Delta x = 1,5$ cm), malha 2 ($\Delta x = 2$ cm) e malha 3 ($\Delta x = 2,5$ cm) para o modelo RANS (a -b) e modelo LES (c -d)

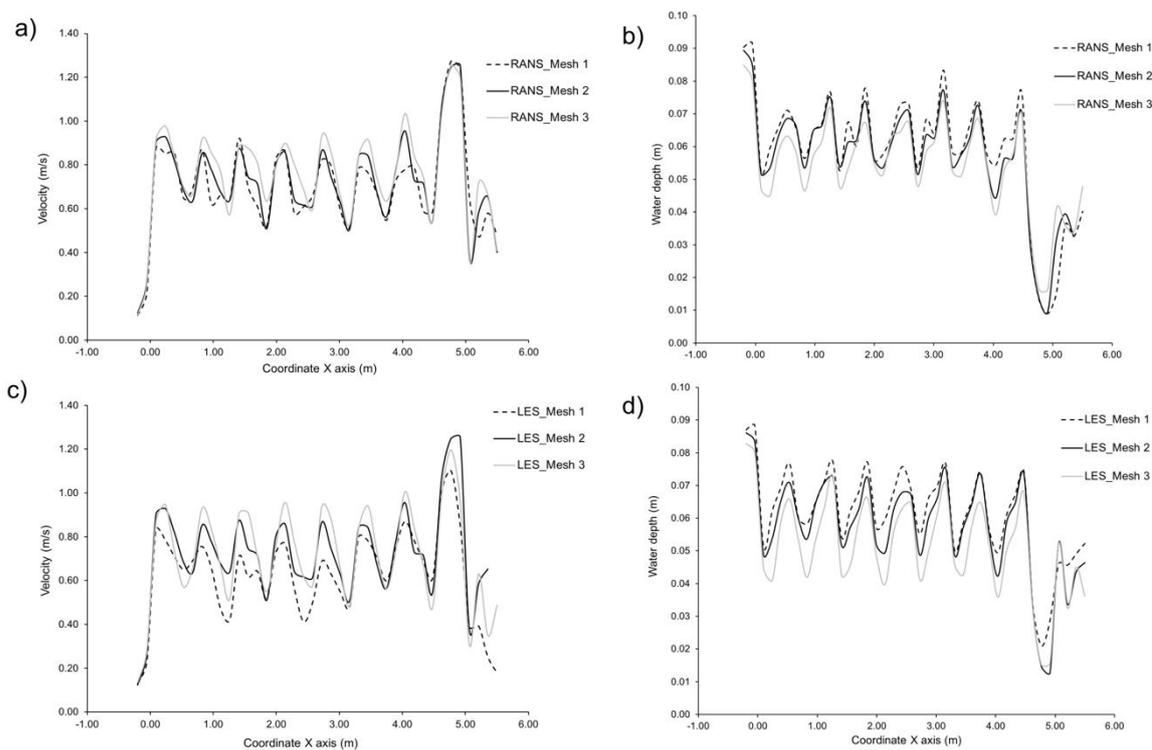
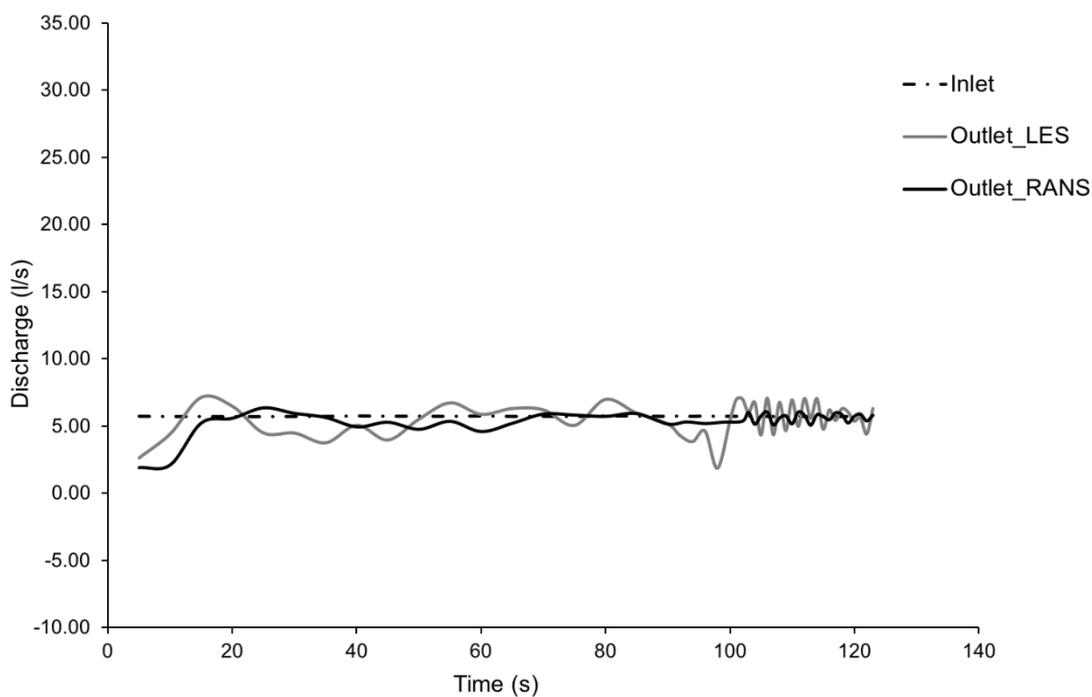


Fig. 5. Convergência do escoamento para a vazão de 6,0 l/s



Validação dos dados

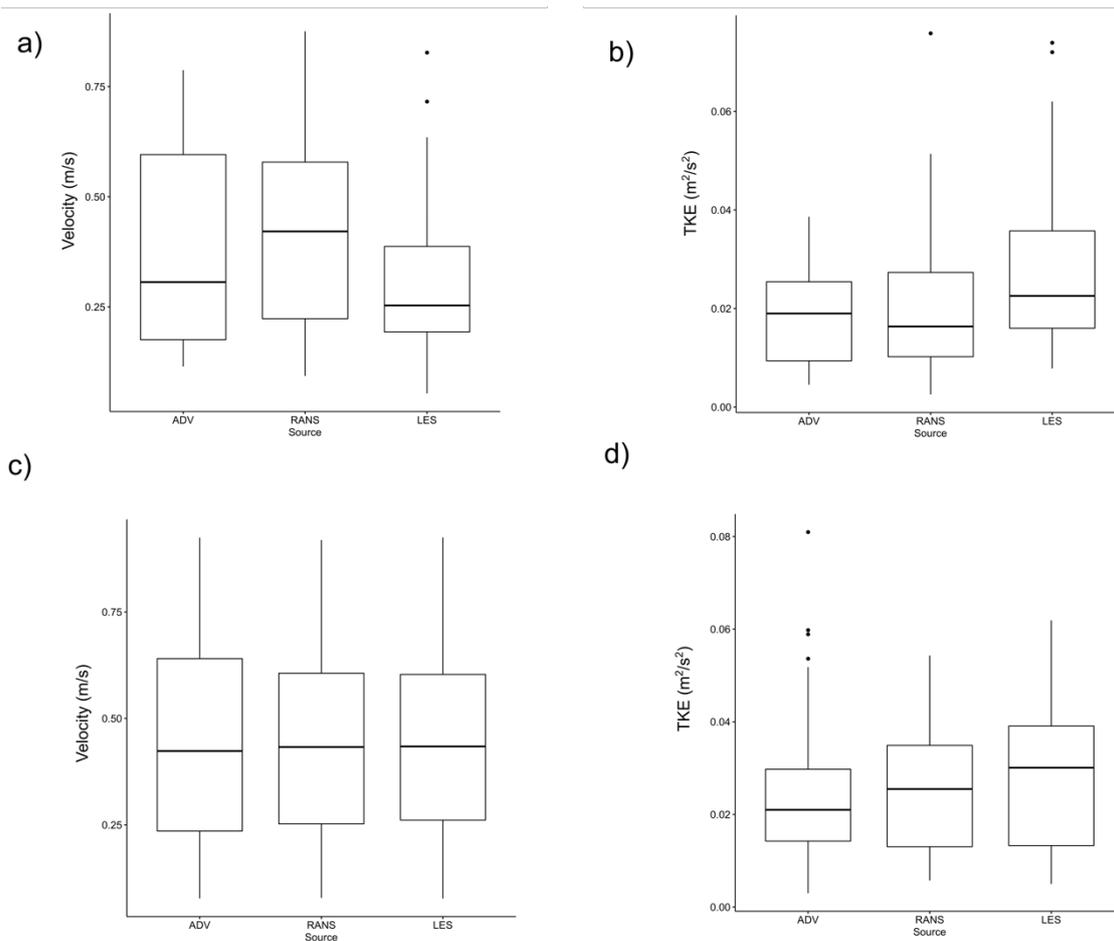
Tanto os dados de velocidade como de energia cinética turbulenta provenientes do ADV e dos modelos RANS e LES não seguiram distribuição normal (Tabela 5). O

teste de Wilcoxon indicou uma diferença significativa nos dados de energia cinética turbulenta entre os modelos ADV e LES apenas para 6,0 l/s (Tabela 5). Embora nenhuma diferença entre os dados ADV e os resultados numéricos tenha sido indicada pelo teste de Wilcoxon para a velocidade, os valores do modelo RANS para 6,0 l/s tiveram uma mediana mais alta do que os dados ADV e os valores do modelo LES (Fig. 6a). Para ambas as vazões, o modelo LES apresentou uma mediana de energia cinética turbulenta mais alta do que os dados ADV e os valores do modelo RANS (Figs. 6b-d).

Tabela 5. *P*-valor da normalidade de Shapiro Wilk para os dados de velocidade e energia cinética turbulenta da amostragem ADV, valores dos modelos RANS e LES; Teste de Wilcoxon para comparação entre ADV-LES e ADV-RANS

| Normalidade de Shapiro Wilk | | | | |
|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|
| | 6,0 l/s | | 9.4 l/s | |
| | Velocidade | Energia cinética turbulenta | Velocidade | Energia cinética turbulenta |
| ADV | < 0.05 | < 0.05 | < 0.05 | < 0.05 |
| RANS | < 0.05 | < 0.05 | < 0.05 | 0.11 |
| LES | < 0.05 | < 0.05 | < 0.05 | 0.13 |
| Teste Wilcoxon | | | | |
| | 6,0 l/s | | 9.4 l/s | |
| | Velocidade | Energia cinética turbulenta | Velocidade | Energia cinética turbulenta |
| ADV-LES | 0.213 | < 0.05 | 0.979 | 0.07 |
| ADV-RANS | 0.398 | 0.77 | 0.979 | 0.285 |

Fig. 6. Boxplots para os dados de velocidade e energia cinética turbulenta para as vazões de 6,0 l/s (a -b) e 9,4 l/s (c-d)



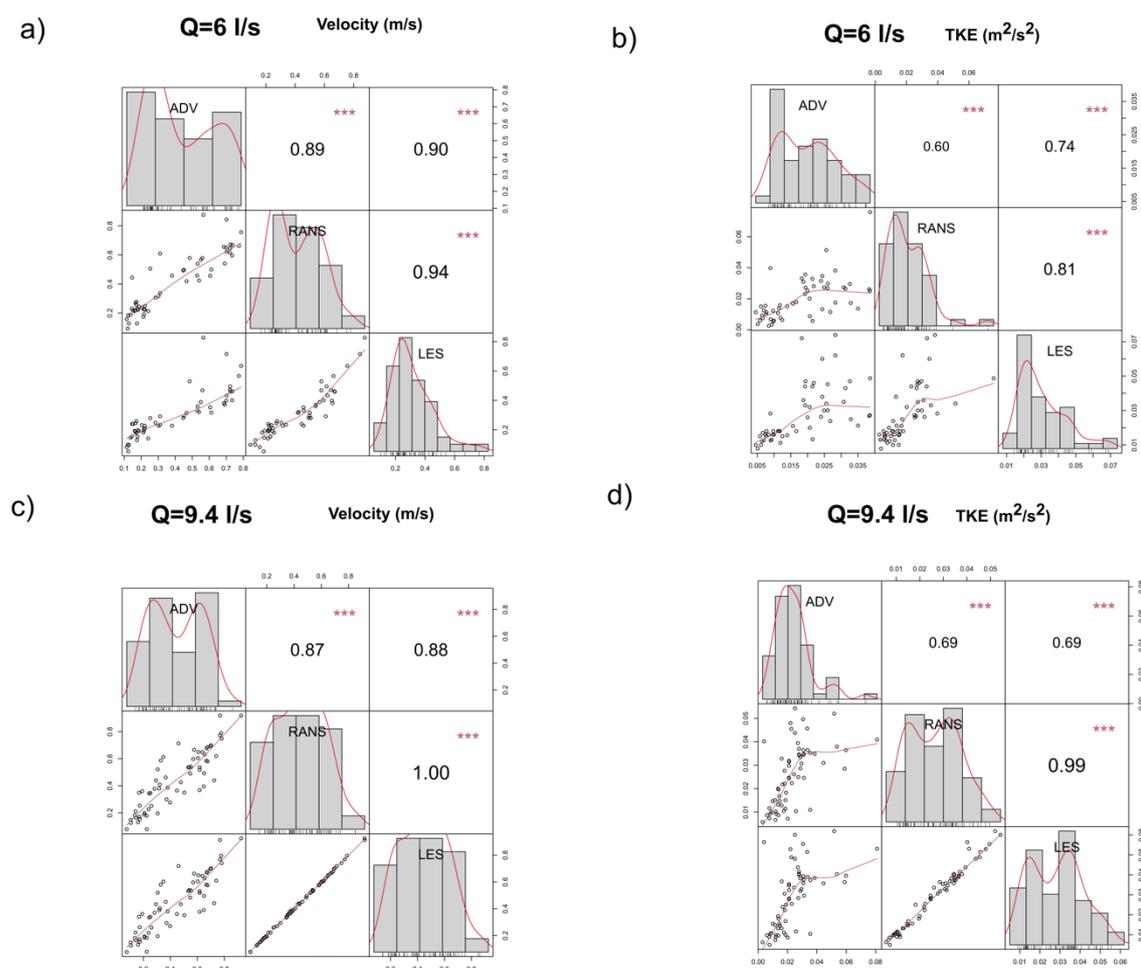
O modelo RANS apresentou MAE menor para velocidade (0,08 m/s) do que o modelo LES (0,12 m/s) para a vazão de 6,0 l/s ao longo dos planos a 7 cm fc (Tabela 6). A vazão mais alta (9,4 l/s) permitiu a comparação entre ADV e os resultados do modelo para os planos a 7 e 14 fc, e ambos os modelos tiveram MAEs semelhantes para velocidade (0,10 m/s) (Tabela 6). As análises de energia cinética turbulenta indicam MAEs semelhantes para ambos os modelos em ambas as vazões (6,0 l/s e 9,4 l/s) (Tabela 6).

Tabela 6. Erro absoluto médio (em inglês, *Mean Absolute Error*, MAE) e resumo da correlação de Pearson para a piscina jusante e a piscina montante para os modelos RANS e LES

| Vazão (l/s) | Modelo numérico | Piscina | Distância do fundo do canal (cm) | Número de pontos | Velocidade | | Energia cinética turbulenta | |
|-------------|-----------------|----------|----------------------------------|------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| | | | | | MAE (m/s) | Correlação de Pearson | MAE (m ² /s ²) | Correlação de Pearson |
| 6 | RANS | Jusante | 7 | 16 | 0.08 | 0.88 | 0.012 | 0.62 |
| | | Montante | 7 | 37 | 0.08 | | 0.007 | |
| | LES | Jusante | 7 | 16 | 0.13 | 0.80 | 0.010 | 0.62 |
| | | Montante | 7 | 37 | 0.12 | | 0.012 | |
| .4 | RANS | Jusante | 7 | 13 | 0.12 | 0.82 | 0.010 | 0.57 |
| | | Jusante | 14 | 17 | 0.10 | | 0.009 | |
| | | Montante | 14 | 34 | 0.09 | | 0.008 | |
| | LES | Jusante | 7 | 13 | 0.12 | 0.81 | 0.016 | 0.59 |
| | | Jusante | 14 | 17 | 0.10 | | 0.001 | |
| | | Montante | 14 | 34 | 0.09 | | 0.008 | |

A correlação de Pearson foi superior a 80% para velocidade em ambos os modelos e nas duas vazões (Tabela 6). A correlação da energia cinética turbulenta foi menor que a correlação da velocidade, e a vazão de 6,0 l/s apresentou coeficiente de Pearson maior (62%) do que a vazão de 9,4 l/s (aproximadamente 58%) (Tabela 6). Os valores de velocidade e energia cinética turbulenta de ambos os modelos foram significativamente correlacionados com os dados ADV de acordo com o teste de Spearman (Fig. 7). Em relação aos dados de energia cinética turbulenta, o histograma e o gráfico de correlação indicam que os valores dos modelos LES e RANS não tiveram boa concordância com os valores coletados pelo ADV para as faixas mais altas (0,02 m²/s² para 6,0 l/s e 0,03 m²/s² para 9,4 l/s) (Fig. 7).

Fig. 7. Histograma, gráfico de correlação e teste de Spearman para os dados de velocidade e energia cinética turbulenta nas vazões de 6,0 l/s (a-b) e 9,4 l/s (c-d)

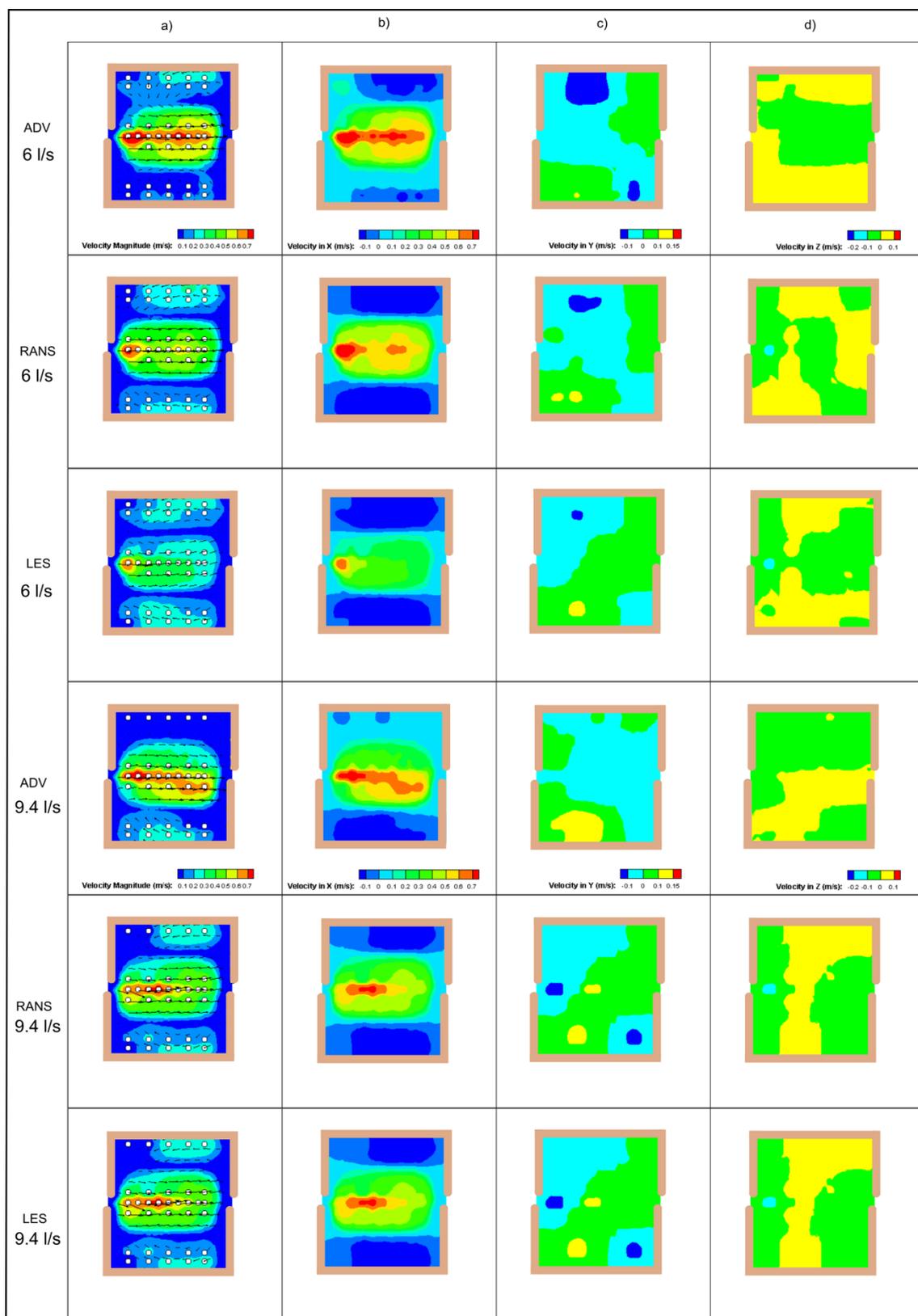


Mapeamento hidráulico

Os modelos RANS e LES criam campos de velocidade semelhantes aos mapas ADV para ambas as vazões (Fig. 8). No entanto, as velocidades mais altas do escoamento principal não foram capturadas pelos modelos RANS e LES nas partes do meio e a jusante para a vazão mais baixa (6,0 l/s) e na parte a jusante para 9,4 l/s (Fig. 8a). A concordância entre o componente de velocidade na direção y foi boa entre: 1) dados ADV e valores RANS para a vazão de 6,0 l/s e 2) dados ADV e valores RANS / LES para 9,4 l/s. Com relação a componente de velocidade em z , os valores LES e dados ADV foram semelhantes para a vazão de 6,0 l/s, e ambos os modelos tiveram uma boa aproximação aos dados ADV para 9,4 l/s (Figs. 8 b-d).

Fig. 8. Mapas de velocidade média coletados com ADV e simulados em modelos RANS e LES para a piscina a montante (PM) no plano a 7 cm do fundo do canal para 6,0 l/s e a 14 cm para

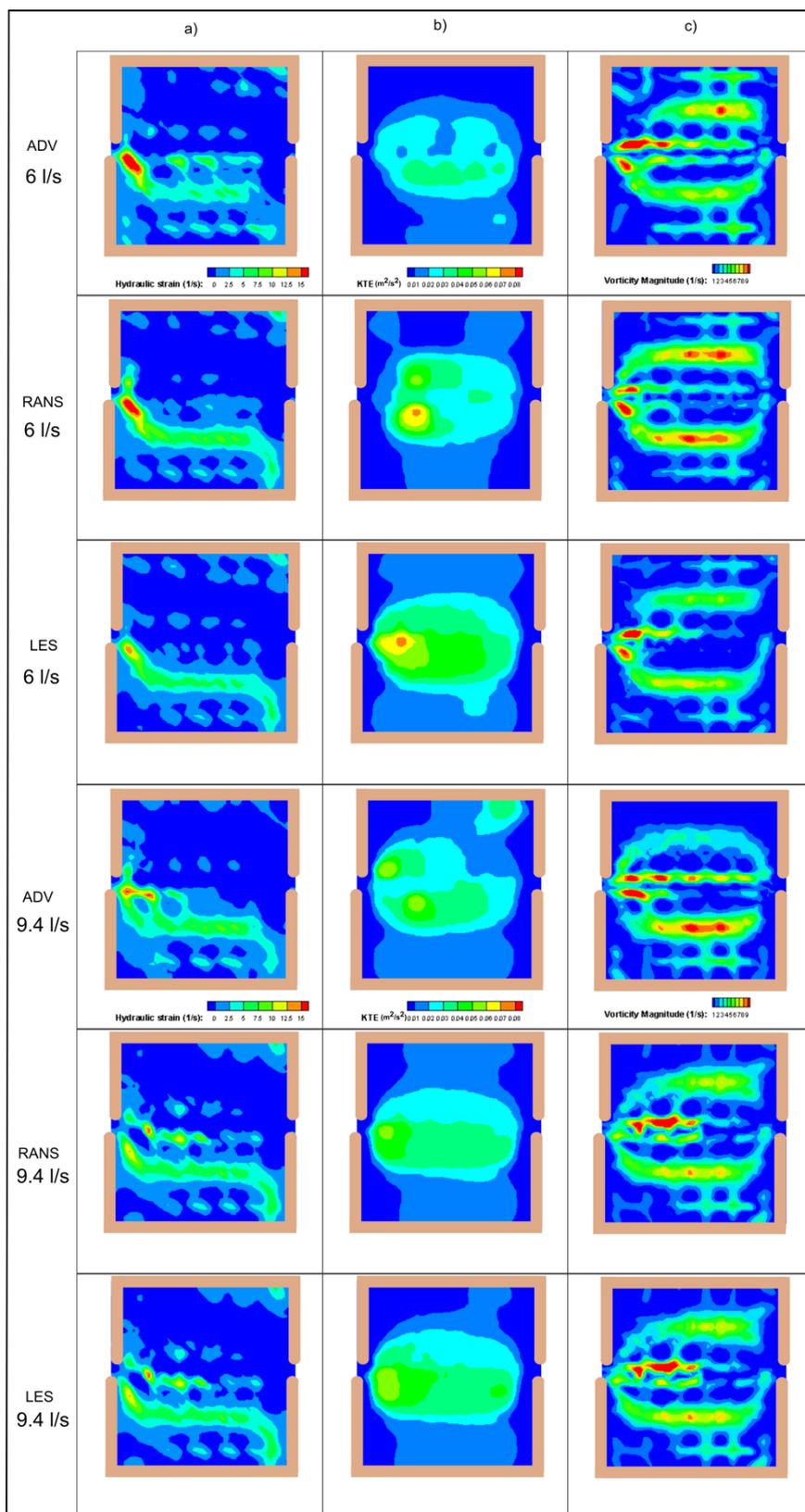
9,4 l/s: a) magnitude média da velocidade (m/s); b) velocidade média em x (m/s); c) velocidade média em y (m/s); d) velocidade média em z (m/s).



A passagem para peixes da ranhura vertical central criou a linha “S” com os valores mais altos de deformação hidráulica. O campo de deformação hidráulica foi consistente entre o ADV e os modelos numéricos (Fig. 9a), especialmente a 9,4 l/s.

Os modelos RANS e LES geraram campos de energia cinética turbulenta semelhantes ao obtido com o ADV (Fig. 9b), e esse tipo de passagem para peixes em ranhura vertical gerou uma elipse com os maiores valores. Os modelos RANS e LES produziram pequenas regiões com energia cinética turbulenta mais alta do que ADV para a vazão de 6,0 l/s (Figura 9b). Finalmente, os campos de vorticidade foram semelhantes nos modelos numéricos e ADV. A principal diferença entre os mapas está novamente relacionada aos valores mais altos (Fig. 9c).

Fig. 9. Mapas de contorno para amostragem ADV, resultados de RANS e LES para piscina a montante (PM) no plano a 7 cm do fundo para 6,0 l/s e a 14 cm para 9,4 l/s: a) tensão hidráulica (1/s); b) energia cinética turbulenta (m^2/s^2); d) vorticidade (1/s).



Discussão

Os padrões de escoamento hidráulico criados por escadas são a chave para entender o movimento dos peixes dentro desse tipo de MTP (KATOPODIS, 1992), e

suas características podem auxiliar a compreender melhor os desafios relacionados à migração otimizada realizada pelos peixes migradores. Modelos numéricos têm contribuído para detalhar os aspectos importantes do escoamento em passagens para peixes (BAKI *et al.*, 2016; BOMBAČ *et al.*, 2015; DUGUAY *et al.*, 2017; FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; MARRINER *et al.*, 2014; QUARANTA *et al.*, 2017; STAMOU *et al.*, 2018; LE HOCINE *et al.*, 2019; SANAGIOTTO *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021). A abordagem LES é apontada como fornecendo uma representação de escoamento melhor do que o modelo RANS, especialmente para aspectos turbulentos (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; LE HOCINE *et al.*, 2019). Apesar da ampla aplicação de modelos numéricos para compreensão dos escoamentos em MTPs, ainda existem poucos estudos físicos descrevem os padrões de escoamento das passagens para peixes com ranhuras verticais centrais.

Os modelos numéricos do presente trabalho indicam que este tipo de escada cria duas áreas de recirculação lateral e um escoamento principal central em diferentes vazões e níveis de água em relação à magnitude da velocidade. As análises do campo de deformação hidráulica mostraram uma forma em “S” com os maiores valores, e uma elipse central com os valores de energia cinética turbulenta mais elevados. Os modelos RANS com a abordagem turbulenta $k-\varepsilon$ e o LES com o esquema $kEqn$ tiveram uma boa concordância com os dados ADV para todas as faixas de velocidade e para os menores valores de energia cinética turbulenta ($<0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$).

O presente estudo forneceu diferentes padrões de recirculação em relação aos obtidos em um modelo com geometria semelhante (número 7) testado por Rajaratnam *et al.* (1986, 1992). A diferença nas proporções das piscinas (largura ($7,8 b_o$) e comprimento ($6 b_o$)), as diferentes inclinações (em Rajaratnam *et al.* (1986), os declives foram de 5,6% e 10% e neste estudo, de 4,5%) e a diferença de alinhamento da ranhura vertical entre os modelos pode explicar a ausência no presente estudo de escoamento cruzado, que foi detectado em Rajaratnam *et al.* (1986, 1992). A magnitude da velocidade e os valores de energia cinética turbulenta foram comparáveis aos obtidos no modelo numérico de uma ranhura vertical tradicional com uma largura de canal semelhante (SANAGIOTTO *et al.*, 2019). No entanto, os valores mais altos de energia cinética turbulenta e da vorticidade criaram um padrão diferente daquele observado para a ranhura vertical tradicional (MARRINER *et al.*, 2014;

FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; SANAGIOTTO *et al.*, 2019 STAMOU *et al.*, 2018). Poucos estudos descrevem o campo de deformação hidráulica para passagens para peixes de ranhuras verticais tradicionais (SHUANGKE SUN *et al.*, 2021); com base neste trabalho escasso, a ranhura vertical central também produz um padrão diferente.

Os modelos LES e RANS apresentaram desempenho semelhante à concordância dos dados com as medidas pelo ADV, apesar da existência de pequenas diferenças. O modelo RANS fornece os melhores resultados de velocidade em uma vazão de 6,0 l/s, e o modelo LES fornece os melhores resultados energia cinética turbulenta para ambas as vazões (em relação à correlação de Pearson e MAE). Os resultados do MAE foram comparáveis à literatura. Por exemplo, Fuentes *et al.* (2018) obtiveram concordância de velocidade (coeficiente de Pearson > 0,89 e MAE > 0,044) e energia cinética turbulenta (coeficiente de Pearson > 0,68 e MAE > 0,008) para uma ranhura vertical tradicional usando a amostragem de ADV de um perfil único a 60% da profundidade da água. As diferenças no tamanho do modelo físico, distribuição de pontos ADV e amostragem nas duas piscinas de passagem para peixes podem explicar a variação nos resultados. No entanto, Fuentes-Pérez *et al.* (2018) concluem que o modelo LES produz uma melhoria pequena e significativa em comparação com a abordagem RANS.

O ganho com a aplicação do LES em relação ao uso dos modelos RANS parece ser pequeno em escadas de peixes, e essas análises devem envolver a avaliação de custos computacionais. Apesar do recente emprego dos modelos LES a estudos de passagem para peixes, Benchikh Le Hocine *et al.* (2019) sugerem que esse tipo de abordagem seja aplicada com o modelo de turbulência do tipo Wale, uma vez que esse apresentou melhor concordância dos valores simulados de velocidade e de energia cinética turbulenta com os resultados de PIV, em uma esteira turbulenta formada atrás de um corpo cilindro imerso. O LES com o esquema kEqn pode capturar os pequenos valores de energia cinética turbulenta na ranhura vertical central. Áreas com baixa energia cinética turbulenta são preferíveis para espécies de peixes migratórios potamódromos que usam passagens para peixes em ranhuras verticais em testes de laboratório (SHUANGKE SUN *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2012). No entanto, a explicação do desempenho biológico das passagens para peixes *in situ* depende de outros preditores (CASTRO-SANTOS *et al.*, 2009), uma vez que uma

passagem de peixes bem-sucedida também está ligada a outras covariáveis, como a presença de outras espécies, características individuais e o período diário (GOERIG e CASTRO-SANTOS, 2017). Além disso, a decisão do movimento dos peixes é baseada na percepção de um amplo campo hidráulico (GOODWIN *et al.*, 2006), e deve ser considerada em análises que combinam aspectos de engenharia e biologia.

A caracterização do escoamento turbulento de passagens para peixes por LES pode ser melhorada usando outros modelos. O modelo kEqn (uma equação) tem vantagens em comparação com o modelo Smagorinsky e até mesmo em relação ao modelo Smagorinsky dinâmico, como a capacidade de previsão do movimento de contra escoamento (em inglês *backscattering*), e a adição de equações de transporte para quantidades relevantes é a principal razão para esses benefícios (YILMAZ e DAVIDSON, 2015). O modelo de viscosidade turbulenta de adaptação local de paredes (em inglês *Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity - Wale*) pode ser um bom candidato porque mostrou um desempenho melhor ou semelhante a outros modelos, por exemplo, Smagorinsky dinâmico (YILMAZ e DAVIDSON, 2015; PONCET *et al.*, 2014). Análises futuras também devem considerar as diferenças no desempenho hidráulico desse tipo de modelo de escada de ranhura vertical causada por diferentes vazões. No presente estudo, velocidades na direção z foram verificadas e variaram com a alteração da vazão, o que pode contribuir para as estruturas de escoamento turbulento.

Finalmente, as questões da passagem dos peixes envolvem aspectos científicos e de pesquisa que devem ser relevantes para aplicações reais (SILVA *et al.*, 2017), e estudos teóricos sobre escoamento turbulento detalhado permitem uma melhor compreensão do desempenho da passagem dos peixes e da locomoção dos peixes (CASTRO-SANTOS *et al.*, 2009). A modelagem de dinâmica de fluidos computacional tem contribuído para fornecer uma significativa descrição dos aspectos hidráulicos dos MTPs, e os avanços nesta tecnologia contribuirão para melhores projetos de novas estruturas ou adequação das passagens para peixes já instaladas.

CONCLUSÃO

A Dinâmica de Fluidos Computacional é uma ferramenta promissora para a compreensão da estrutura do escoamento turbulento em passagens para peixes, e a

seleção de um modelo adequado para representação do escoamento considerando sua abordagem de turbulência é uma questão importante para obtenção de resultados próximos aos obtidos em modelos físicos. Uma avaliação dos modelos RANS k- ϵ e LES kEqn foi realizada para caracterizar o escoamento em duas vazões diferentes em uma escada do tipo ranhura vertical central, e cujo escoamento não é bem descrito na literatura. A validação de dados utilizou os dados ADV que foram amostrados em um modelo físico.

O escoamento nesse MTP cria duas áreas de recirculação lateral e um escoamento principal central. Esse padrão difere dos descritos na literatura. O perfil horizontal criado pelos valores mais altos de outras variáveis hidráulicas também é diferente dos observados em escadas do tipo ranhura vertical tradicional: 1) o campo de deformação hidráulica forma em “S” e 2) o campo de energia cinética turbulenta forma uma elipse, quando observados em um plano com vista superior da piscina.

Os modelos RANS k- ϵ e LES kEqn tiveram resultados validados com os dados ADV para todas as faixas de velocidade e para valores de energia cinética turbulenta menores $0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$, valor apontado na literatura como limite para a área preferível para passagem de peixes em mecanismos do tipo ranhura vertical. O modelo LES kEqn é ligeiramente melhor do que RANS k- ϵ na captura dos valores de turbulência, mas melhorias podem ser obtidas com a aplicação de outros modelos de submalha LES. A caracterização do escoamento pode permitir uma melhor compreensão do desempenho da passagem e locomoção dos peixes, e melhorias nesta área serão úteis para questões práticas da passagem para peixes.

Referências

Aarestrup, K., Lucas, M. C., and Hansen, J. A. 2003. “Efficiency of a nature-like bypass channel for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry.” *Ecology of Freshwater Fish*, 12(3), 160–168.

Baki, A. B. M., Zhu, D. Z., and Rajaratnam, N. 2015. “Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014075.

Baki, A. B. M., Zhu, D. Z., and Rajaratnam, N. 2016. “Flow Simulation in a Rock-Ramp Fish Pass.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10), 04016031.

van Balen, W., Blanckaert, K., and Uijttewaal, W. S. J. 2010. “Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS.” *Journal of Turbulence*, 11, N12.

- Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F. José, and López-Jiménez, P. A. 2016. "Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump." *Environmental Modelling & Software*, 80, 322–335.
- Benchikh Le Hocine, A. E., Lacey, R. W. J., and Poncet, S. 2019. "Turbulent flow over a D-section bluff body: a numerical benchmark." *Environmental Fluid Mechanics*, 19(2), 435–456.
- Birnie-Gauvin, K., Franklin, P., Wilkes, M., and Aarestrup, K. 2019. "Moving beyond fitting fish into equations: Progressing the fish passage debate in the Anthropocene." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 29(7), 1095–1105.
- Bombač, M., Novak, G., Mlačnik, J., and Četina, M. 2015. "Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations." *Ecological Engineering*, 84, 476–484.
- Bunt, C. M., Katopodis, C., and McKinley, R. S. 1999. "Attraction and Passage Efficiency of White Suckers and Smallmouth Bass by Two Denil Fishways." *North American Journal of Fisheries Management*, 19(3), 793–803.
- Cabonce, J., Wang, H., and Chanson, H. 2018. "Ventilated Corner Baffles to Assist Upstream Passage of Small-Bodied Fish in Box Culverts." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(8), 04018020.
- Celik, I. B., Ghia, U., and Roache, P. . 2008. "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications." *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 078001.
- Chung, Y. M., Sung, H. J., and Krogstad, P. A. 2002. "Modulation of near-wall turbulence structure with wall blowing and suction." *AIAA Journal*, 40, 1529–1535.
- Clay, C. H. 1995. *Design of fishways and other fish facilities*. CRC Press, Boca Raton.
- Cooke, S. J., and Hinch, S. G. 2013. "Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice." *Ecological Engineering*, 58, 123–132.
- Cotel, A. J., Webb, P. W., and Tritico, H. 2006. "Do Brown Trout Choose Locations with Reduced Turbulence?" *Transactions of the American Fisheries Society*, 135(3), 610–619.
- Deardorff, J. W. 1970. "A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers." *Journal of Fluid Mechanics*, 41(2), 453–480.
- Duarte, B. A. de F., Ramos, I. C. R., and Santos, H. de A. e. 2012. "Reynolds shear-stress and velocity: positive biological response of neotropical fishes to hydraulic parameters in a vertical slot fishway." *Neotropical Ichthyology*, 10(4), 813–819.
- Duguay, J. M., Lacey, R. W. J., and Gaucher, J. 2017. "A case study of a pool and weir fishway modeled with OpenFOAM and FLOW-3D." *Ecological Engineering*, 103, 31–42.
- Enders, E. C., Boisclair, D., and Roy, A. G. 2003. "The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*)." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60(9), 1149–1160.
- FAO/DVWK. 2002. *Fish passes – design, dimensions and monitoring*. FAO, Rome.

- Fuentes-Pérez, J. F., Silva, A. T., Tuhtan, J. A., García-Vega, A., Carbonell-Baeza, R., Musall, M., and Kruusmaa, M. 2018. "3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways." *Environmental Modelling & Software*, 99, 156–169.
- Goring, D. G., and Nikora, V. I. 2002. "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117–126.
- Greenshields, C. J. 2014. "OpenFOAM 2.3.0: Multiphase Modelling Predictor-Corrector Semi-Implicit MULES." Accessed Feb. 4, 2021. <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase/>.
- Greenshields, C. J. 2018. "OpenFOAM v6 User Guide: 5.2 Boundaries." Accessed Feb. 4, 2021. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-boundaries/>.
- Greenshields, C. J. 2020. *OpenFOAM-The Open Source CFD Toolbox-User Guide*. OpenCFD Ltd, Bracknell.
- Hard, A., and Kynard, B. 1997. "Video Evaluation of Passage Efficiency of American Shad and Sea Lamprey in a Modified Ice Harbor Fishway." *North American Journal of Fisheries Management*, 17(4), 981–987.
- Hirt, C. ., and Nichols, B. . 1981. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries." *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.
- Huang, S., and Li, Q. S. 2009. "A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, n/a-n/a.
- von Kármán, T. 1931. *Mechanical similitude and turbulence*. National Advisory Committee on Aeronautics, Washington.
- Katopodis, C. 1992. *Introduction to Fishway Design*. Winnipeg.
- Katopodis, C. 2005. "Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works." *Journal of Hydraulic Research*, 43(5), 451–467.
- Katopodis, C., and Williams, J. G. 2012. "The development of fish passage research in a historical context." *Ecological Engineering*, 48, 8–18.
- Keefer, M. L., Peery, C. A., Lee, S. R., Daigle, W. R., Johnson, E. L., and Moser, M. L. 2011. "Behaviour of adult Pacific lamprey in near-field flow and fishway design experiments." *Fisheries Management and Ecology*, 18(3), 177–189.
- Larinier, M. 2002. *Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels*. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*.
- Lauder, B. E., and Spalding, D. B. 1974. "The numerical computation of turbulent flows." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269–289.
- Liao, J. C. 2003. "Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity." *Science*, 302(5650), 1566–1569.
- Lira, N. A., Pompeu, P. S., Agostinho, C. S., Agostinho, A. A., Arcifa, M. S., and Pelicice, F. M. 2017. "Fish passages in South America: an overview of studied facilities and research effort." *Neotropical Ichthyology*, 15(2).
- Marriner, B. A., Baki, A. B. M., Zhu, D. Z., Thiem, J. D., Cooke, S. J., and Katopodis, C. 2014. "Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway." *Ecological Engineering*, 63, 88–101.

- Mooney, K., Voskuilen, T., and Papper, J. 2014. "Performance Evaluation of Existing and new VoF simulation techniques: solving, interface treatment, and dynamic meshes." Zagreb.
- Nadaoka, K., and Yagi, H. 1998. "Shallow-Water Turbulence Modeling and Horizontal Large-Eddy Computation of River Flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(5), 493–500.
- Nextfoam. 2017. *Boundary Conditions - OpenFOAM-4.1*. NextTfoam, Seul.
- OpenCFD. 2012a. "interFoam." *OpenFOAM: Manual Pages*, Accessed Feb. 4, 2021. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/man/interFoam.html>.
- OpenCFD. 2012b. "kEqn(BasicTurbulenceModel) Class Template Reference." *OpenFOAM: API Guide*, Accessed Apr. 2, 2021. https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/classFoam_1_1LESModels_1_1kEqn.html.
- OpenCFD. 2012c. "Common Combinations." *OpenFOAM: User Guide*, Accessed Feb. 4, 2021. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-bcs-common-combinations.html>.
- Pelicice, F. M., Pompeu, P. S., and Agostinho, A. A. 2020. "Fish conservation must go beyond the concrete: A comment on Celestino et al. (2019)." *River Research and Applications*, 36(7), 1373–1376.
- Pope, S. B. 2001. "Turbulent Flows." *Measurement Science and Technology*, 12(11), 2020–2021.
- Pratt, T. C., O'Connor, L. M., Hallett, A. G., McLaughlin, R. L., Katopodis, C., Hayes, D. B., and Bergstedt, R. A. 2009. "Balancing Aquatic Habitat Fragmentation and Control of Invasive Species: Enhancing Selective Fish Passage at Sea Lamprey Control Barriers." *Transactions of the American Fisheries Society*, 138(3), 652–665.
- Quaranta, E., Katopodis, C., Revelli, R., and Comoglio, C. 2017. "Turbulent flow field comparison and related suitability for fish passage of a standard and a simplified low-gradient vertical slot fishway." *River Research and Applications*, 33(8), 1295–1305.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Solanki, S. 1992. "New designs for vertical slot fishways." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(3), 402–414.
- Rajaratnam, N., Van der Vinne, G., and Katopodis, C. 1986. "Hydraulics of Vertical Slot Fishways." *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(10), 909–927.
- Ramamurthy, A. S., Han, S. S., and Biron, P. M. 2013. "Three-Dimensional Simulation Parameters for 90° Open Channel Bend Flows." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(3), 282–291.
- Rodi, W. 2017. "Turbulence Modeling and Simulation in Hydraulics: A Historical Review." *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(5), 03117001.
- Sanagiotto, D. G., Rossi, J. B., Lauffer, L. L., and Bravo, J. M. 2019. "Three-dimensional numerical simulation of flow in vertical slot fishways: validation of the model and characterization of the flow." *RBRH*, 24.
- Santos, H. A., Dupont, E., Aracena, F., Dvorak, J., Pinheiro, A., Teotonio, M., and Paula, A. 2021. "Stairs pipe culverts: flow simulations and implications for the passage of European and Neotropical fishes." *Journal of Ecohydraulics*, 6(1), 36–52.

Silva, A. T., Katopodis, C., Santos, J. M., Ferreira, M. T., and Pinheiro, A. N. 2012a. "Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow." *Ecological Engineering*, 44, 314–328.

Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., Aarestrup, K., Pompeu, P. S., O'Brien, G. C., Braun, D. C., Burnett, N. J., Zhu, D. Z., Fjeldstad, H.-P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J. G., and Cooke, S. J. 2018. "The future of fish passage science, engineering, and practice." *Fish and Fisheries*, 19(2), 340–362.

Silva, L. G. M. da, Nogueira, L. B., Maia, B. P., and Resende, L. B. de. 2012b. "Fish passage post-construction issues: analysis of distribution, attraction and passage efficiency metrics at the Baguari Dam fish ladder to approach the problem." *Neotropical Ichthyology*, 10(4), 751–762.

Stamou, A. I., Mitsopoulos, G., Rutschmann, P., and Bui, M. D. 2018. "Verification of a 3D CFD model for vertical slot fish-passes." *Environmental Fluid Mechanics*, 18(6), 1435–1461.

Tarrade, L., Texier, A., David, L., and Larinier, M. 2008. "Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways." *Hydrobiologia*, 609(1), 177–188.

Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. 2008. *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Volume Finite Method*. (P. Hall, ed.).

Wahl, T. L. 2003. "Discussion of 'Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data' by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora." *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 484–487.

Wang, H., and Chanson, H. 2018. "On upstream fish passage in standard box culverts: interactions between fish and turbulence." *Journal of Ecohydraulics*, 3(1), 18–29.

White, F. 2015. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education.

Wolf Dynamics. 2020. "Tips and tricks in OpenFOAM." Accessed Feb. 2, 2021. <http://www.wolfdynamics.com/wiki/tipsandtricks.pdf>.

Xie, Z., Lin, B., and Falconer, R. A. 2013. "Large-eddy simulation of the turbulent structure in compound open-channel flows." *Advances in Water Resources*, 53, 66–75.

Yoshizawa, A., and Horiuti, K. 1985. "A Statistically-Derived Subgrid-Scale Kinetic Energy Model for the Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows." *Journal of the Physical Society of Japan*, 54(8), 2834–2839.

Contribuição dos autores

As contribuições dos autores em cada uma das áreas da construção do artigo foram:

- PINHEIRO, A. P.: conceituação, metodologia, simulação numérica, análise, validação, coleta de dados e escrita.
- SANTOS, H. A.: conceituação, metodologia, simulação numérica, análise, validação, tratamento de dados, análise estatística, escrita, supervisão, administração do projeto.
- MENDES, L. M. M.: simulação numérica, análise estatística, tratamento das figuras e escrita.

- JUNHO, R. A. C.: coleta de dados e escrita.

4.2 AVALIAÇÃO NUMÉRICA COM ESQUEMAS RANS E LES DE UM CANAL CURVO (ARTIGO 2)

Hersilia de Andrade e Santos¹

Ablail Paula Pinheiro²

Lorena Bettinelli Nogueira³

Introdução

A construção de estruturas hidráulicas ao longo dos rios, como por exemplo barragens, diques entre outros, altera as características do escoamento, o que pode refletir em mudanças dos padrões turbulentos desse movimento da água. Assim, a construção dessas estruturas pode afetar os movimentos da ictiofauna local, uma vez que os custos da natação dos peixes (LIAO *et al.*, 2003), a eficiência da captura por espécies predadoras (ENDERS; BOISCLAIR; ROY, 2003), a seleção de habitat (COTEL; WEBB; TRITICO, 2006) e a densidade dos peixes (SMITH *et al.*, 2006) estão relacionados aos processos turbulentos existentes no meio de locomoção desses seres vivos. Assim, tem-se que dependendo da magnitude da turbulência, esta é capaz de atrair ou repelir peixes, auxiliando ou impedindo seus movimentos migratórios (SILVA *et al.*, 2012a).

Ainda hoje, a caracterização dos escoamentos em canais laboratoriais para futuras aplicações em rios continua a ser uma motivação de pesquisa (BENCHIKH LE HOCINE; LACEY; PONCET, 2019), isso geralmente é feito usando um campo de escoamento simulado numericamente (FARHADI; *et al.*, 2018a). Um escoamento turbulento pode exercer diferentes efeitos sobre o movimento dos peixes dependendo de sua magnitude, ajudando ou retardando seus movimentos migratórios (SILVA *et al.*, 2012a).

Os canais curvos, em inglês *racetrack flumes*, são configurações experimentais utilizadas para estudos biológicos e ecodinâmicos (FARHADI; *et al.*, 2018a; FARHADI; *et al.*, 2018b; GLAS *et al.*, 2017; ZENS *et al.*, 2018). Esses são estruturas hidráulicas amplamente utilizadas para estudos de variáveis hidráulicas e de natação de larvas de peixes. Muitos estudos analisam como as larvas de peixes ribeirinhas se

movem. Para isso, os experimentos são conduzidos em um canal curvo em cenários cobrindo a faixa de velocidade de habitats naturais. Além da velocidade média, as variáveis de turbulência são importantes para determinar o trajeto e a migração das larvas.

Considerando aspectos de mecânica dos fluidos, todo escoamento de uma única fase de um fluido pode ser descrito pelas equações parciais não lineares de segunda ordem de Navier-Stokes, as quais são derivadas dos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento (WHITE, 2003) e que não possuem solução exata. As análises numéricas de escoamentos de fluidos nestas condições são um ramo da dinâmica computacional de fluidos (em inglês *computational fluid dynamics* – CFD) que em geral tem como objetivo determinar velocidades pontuais do escoamento de forma embasar decisões em projetos de Engenharia.

Em escoamentos turbulentos, a variedade de escalas de comprimento e a complexidade dos fenômenos envolvidos na turbulência encarecem computacionalmente a maioria das abordagens de modelagens: a resolução necessária para resolver todas as escalas envolvidas na turbulência tem demanda computacional significativa (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Nesses casos são criados modelos numéricos para aproximar fenômenos turbulentos não resolvidos.

Um dos modelos mais antigos para simplificação tridimensional da turbulência é o de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) e esta abordagem para representação numérica da turbulência consiste em calcular a velocidade média e modelar o termo da tensão aparente conhecido como tensor de Reynolds que é de segunda ordem. Em 1970, o outro modelo conhecido como *Large Eddy Simulation* (LES) foi explorado por Deardorff (1970) e basicamente consiste em calcular as grandes escalas e modelar as pequenas escalas de turbulência, sendo estas menores que a malha numérica.

Em termos de demandas computacionais, os modelos LES exigem mais do que modelos RANS. Por outro lado, os modelos LES são capazes de modelar com precisão regiões do escoamento onde ocorre o descolamento da camada limite do

fluido, bem como outras regiões regidas por forças viscosas significativas como áreas de escoamento secundário (normalmente em direção diferente da direção do escoamento principal). Já o modelo RANS é incapaz de reproduzir esses processos (VAN BALEN; BLANCKAERT; UIJTTEWAAL, 2010; RAMAMURTHY; HAN; BIRON, 2013) devido a restrições computacionais que o impedem de capturar várias fontes de turbulência, como atrito no fundo, tensão de cisalhamento do vento e quebra de ondas.

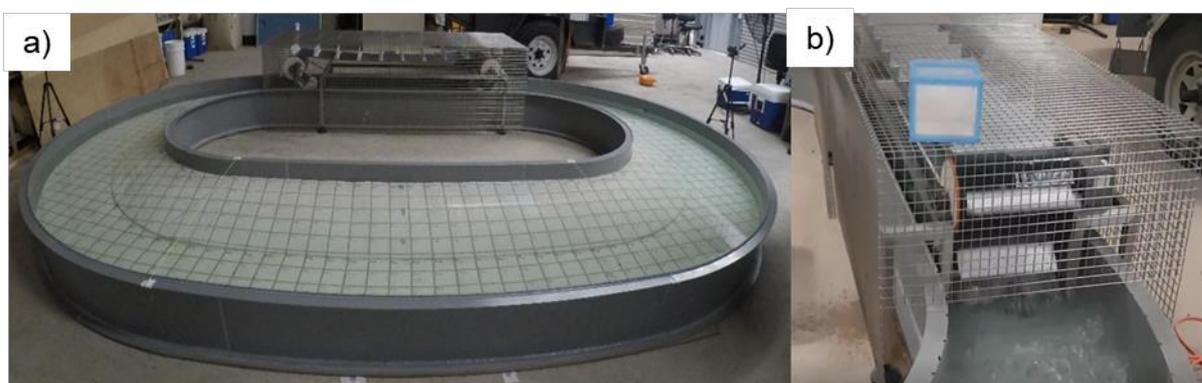
Os canais curvos em laboratório têm sido empregados para observar as trajetórias larvais (FARHADI *et al.*, 2018a; GLAS *et al.*, 2017; ZENS *et al.*, 2018) e nesse tipo de estudo o campo das variáveis hidráulicas é importante para conhecimento de limites hidráulicos impostos pelo escoamento a esses estágios iniciais da vida de peixes. Esses estudos concentram-se em estudar a variável hidráulica velocidade. Assim, informações como “velocidade crítica do escoamento”, ou seja, acima da qual as larvas de peixes não são capazes de manter constantemente sua posição na coluna d'água, são obtidas nesses canais. Modelos numéricos têm auxiliado esses estudos e se concentram principalmente estudos hidrodinâmicos 3D com emprego de equações RANS nos modelos de fechamento da turbulência $k-\epsilon$ padrão ou $k-\omega$. Boas validações têm sido obtidas comparando as velocidades dos modelos numéricos aos dados experimentais. No entanto, não foi encontrado na literatura estudos que comparassem a aplicação de modelos RANS e LES neste tipo de canal.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a captura dos fenômenos de turbulência pelos modelos numéricos RANS e LES, utilizando o software OpenFOAM, em escoamento criado em um canal curvo localizado na *La Trobe University*, na Austrália e que atualmente é utilizado para estudo de larvas de espécies locais. Pretende-se responder a seguinte pergunta de pesquisa: a sensibilidade dos modelos LES é maior do que dos modelos RANS na simulação de escoamentos turbulentos em canais curvos? Para este estudo, os modelos numéricos foram construídos no software de código aberto OpenFOAM (v. 5.0, The OpenFOAM Foundation Ltd, Londres, Reino Unido), (GREENSHIELDS, 2020), que usa o método *rigid lid* para modelagem de escoamento uma única fase. Os resultados foram comparados aos dados do *Flow watch* coletados em modelo reduzido.

Modelo físico

O modelo físico em estudo está localizado na *La Trobe University*, na Austrália (Figura 1). O canal é composto, longitudinalmente, por duas seções retas de 2 m de comprimento e duas curvas de semicírculo em cada extremidade com um raio externo de 1,5 m (Figura 1a). O escoamento da água foi gerado por meio da movimentação no sentido horário de uma borracha circular com pás, posicionada por duas engrenagens (Figura 1b). A parede externa do canal não possui inclinação enquanto a parede interna possui e esta varia ao longo do canal.

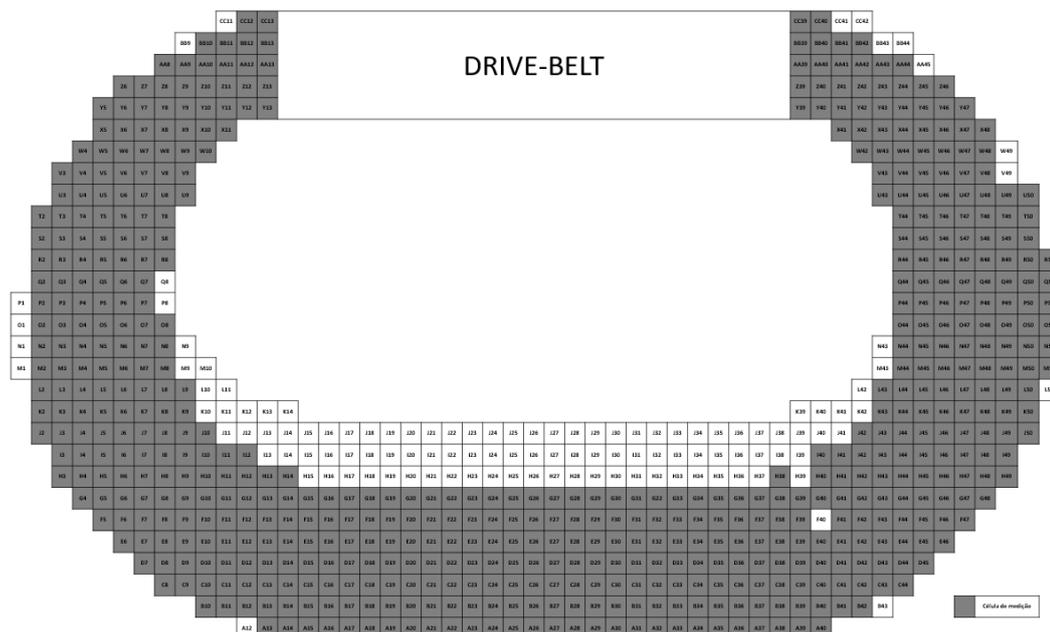
Figura 1 – a) Canal hidráulico laboratorial em estudo localizado na *La Trobe University* (Austrália) e b) detalhe da borracha circular com pás



Fonte: (Nogueira, 2019)

Para validação dos resultados, foram realizadas medições laboratoriais de velocidade em dois cenários de velocidade *slow* e o *moderate* (que serão detalhados mais à frente) Para o cenário *slow* foram feitas medições em 667 pontos (Figura 2) na profundidade de 15 cm do fundo do canal. Para o cenário *moderate*, foram feitas medições em 52 pontos no total, em três profundidades diferentes: 6 cm, 12 cm e 18 cm. Estas medições foram feitas utilizando um medidor do tipo molinete, *flow watch* da marca General, modelo FW450 (Figura 3). A hélice do molinete foi posicionada na direção do escoamento principal e foram coletados 30 valores de velocidade em cada ponto.

Figura 2 –Medição do cenário *slow* no canal circular. As células em cinza escuro indicam pontos de medição



Fonte: a autora

Figura 3 – Medidor do tipo molinete utilizado para medição da velocidade pontual do escoamento principal



Fonte: a autora

Equações de Governo

O modelo numérico 3D foi implementado usando OpenFOAM, que é um software de CFD gratuito e de código aberto (GREENSHIELDS, 2020). para resolver as equações de continuidade e de transporte de Navier-Stokes (OPENCDF, 2012a).

As equações que modelam o escoamento de fluidos são conhecidas como equações de Navier-Stokes e derivam-se dos princípios de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento (WHITE, 2003). Para fluidos incompressíveis, isotérmicos e newtonianos, as equações de Navier-Stokes são expressas pelas Equações 1 e 2, sendo u o vetor velocidade (ms^{-1}), ρ a densidade (Kgm^{-3}), t o tempo (s), g a gravidade (ms^{-2}), p a pressão (Pa) e μ a viscosidade dinâmica (Pas).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{EQ. 1})$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (\text{EQ. 2})$$

Essas equações são resolvidas nos modelos RANS e LES. No RANS opta-se por calcular explicitamente apenas o escoamento médio, adotando-se simplificações na modelagem dos vórtices e flutuações (ARIS, 1989; KOLDITZ, 2002). Já no LES, os movimentos turbulentos tridimensionais instáveis maiores são calculados diretamente, enquanto os efeitos dos movimentos em escala menor (escala submalha, em inglês, *subgrid*, SGS) são modelados.

Fechamento da turbulência

Nas simulações numéricas RANS e LES, é necessário incluir modelos de turbulência (POPE, 2001). Neste trabalho, em RANS adotou-se o modelo k- ϵ , que foi desenvolvido a fim de representar os mecanismos que afetam a energia cinética, por meio das variáveis k , a energia cinética, e ϵ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, usando as equações de transporte (Equações 3 e 4). Ao resolver duas equações de transporte separadamente, modelos de turbulência de duas equações, como o k- ϵ , permitem que a velocidade turbulenta e as escalas de comprimento sejam determinadas de modo independente, representando mais detalhadamente as propriedades de escoamentos turbulentos (LAUNDER; SPALDING, 1983).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (\text{EQ. 3})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (\text{EQ. 4})$$

onde σ_k e σ_ϵ são as constantes de Prandtl para k e épsilon, μ_t é a viscosidade da turbulência (Equação 5), G_k é a geração de energia cinética turbulenta (Equação 6), e C_μ é uma constante de proporcionalidade (LAUNDER e SPALDING, 1974).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{EQ. 5})$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{EQ. 6})$$

O modelo de turbulência e o tipo de escoamento determinaram os valores de σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ e $C_{2\epsilon}$. Os seguintes valores foram usados: $\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,3$, $C_{1\epsilon} = 1,44$ e $C_{2\epsilon} = 1,92$ (CHUNG *et al.*, 2002).

Já a simulação LES foi explorada por Deardorff (1970) e aplica um filtro às equações de Navier Stokes, que exclui as pequenas escalas de turbulência. Movimentos turbulentos tridimensionais instáveis maiores no LES são representados diretamente, enquanto os efeitos dos movimentos em escala menor (em inglês *subgrid*, SGS) são modelados. Em outras palavras, a ideia do LES é calcular as grandes escalas da turbulência que contêm energia (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2008).

O modelo de fechamento de turbulência *one-equation subgrid-scale* é utilizada para modelar a turbulência SGS, as pequenas escalas de turbulência. A equação de viscosidade turbulenta, implementada no OpenFOAM como keqn foi aplicada para modelar a turbulência SGS. O ponto principal desse modelo SGS é calcular a energia cinética da escala da submalha, k_{sgs} (m^2s^{-2}), resolvido pela Equação 7 (HUANG; LI, 2009). O modelo de uma equação de viscosidade turbulenta resolve uma única equação de transporte, Equação 8 (YOSHIZAWA; HORIUTI, 1985).

Desse modo:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \tau_{kk} \quad (\text{EQ. 7})$$

$$\frac{\partial(\rho k_{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_j} k_{sgs})}{\partial x_j} - \frac{\partial \left[\rho (v + v_{sgs}) \frac{\delta k_{sgs}}{\delta x_j} \right]}{\partial x_j} = -\rho \tau_{ij} \dot{D}_{ij} - C_\epsilon \frac{\rho k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (\text{EQ. 8})$$

onde ν é a viscosidade cinética, $C\epsilon$ é uma constante do modelo, τ_{ij} é o tensor de tensão da escala da submalha (Equação 9), D_{ij} é o tensor de taxa de deformação em escala resolvida (Equação 10), ν_{sgs} é a viscosidade turbulenta da submalha dada pela Equação 11, e Δ é o comprimento característico de corte do filtro.

$$\tau_{ij} \approx \frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} - 2\nu_{sf} dev(\dot{D})_{ij} \quad (\text{EQ. 9})$$

$$\dot{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{EQ. 10})$$

$$\nu_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (\text{EQ. 11})$$

Para a abordagem de viscosidade turbulenta de uma equação, C_k é 0,094 e $C\epsilon$ é ,048 (OPENCDF, 2012b).

Malha e análise de sensibilidade

Antes de comparar modelos de turbulência RANS e LES, testou-se a sensibilidade do tamanho das malhas, analisando 3 malhas. Isso exclui uma influência potencial da malha em comparação subsequente dos resultados. O teste de independência de malha (em inglês, *Grid Independence Test* - GIT) determina o espaçamento de malha ideal a fim de evitar refinamento excessivo ou perda de detalhes do escoamento em estudo devido a um tamanho de elemento grosso (FARHADI *et al.*, 2018a).

A discretização do domínio foi iniciada com a ferramenta *blockMesh*, criando-se uma malha hexaédrica estruturada de todo o canal. O próximo passo foi excluir o meio do canal curvo que não pertencia a região de escoamento. Para isso, esta região foi desenhada no AutoCAD e exportada no formato STL, pelas ferramentas *sufarceFeatureExtract* e *snappyHexMesh*. Este último utilitário também foi aplicado para refinar e criar uma malha não estruturada e próximo a área excluída do meio do canal curvo (Figura 4 e 5). Após a criação da malha, a qualidade da malha foi testada usando a ferramenta *checkMesh*, e a discretização de domínio só foi usada nos modelos CFD se ela passou em todos os testes desta ferramenta (caixa delimitadora, direções não vazias ou não cunha, razão de aspecto, volumes de célula, não ortogonalidade e assimetria). Foram testadas três malhas com os seguintes tamanho

de elemento nos eixos x e y: $\Delta x = 0,04, 0,045$ e $0,05$ m no cenário *slow* (velocidade de entrada d'água de $0,13$ m/s) (Tabela 2).

Tabela 1 - Refinamento das malhas no canal hidráulico curvo

| | Malha 1 | Malha 2 | Malha 3 |
|--|----------|----------|----------|
| Tamanho do elemento no eixo x (Δx) | 4 cm | 4,5 cm | 5 cm |
| Tamanho do elemento no eixo y (Δy) | 4 cm | 4,5 cm | 5 cm |
| Tamanho do elemento no eixo z (Δz) | 0.256 cm | 0.256 cm | 0.256 cm |
| Número de elementos | 578010 | 465865 | 377261 |

Fonte: a autora

O erro relativo aproximado entre duas malhas (por exemplo, malhas 1 e 2 – Equação 12) e o índice de convergência de grade fina (em inglês, *fine-grid convergence* GCI) Equação 13 foram calculados para as profundidades da água e velocidades pontuais para um plano de $z = 0.362$ cm, que corresponde a um plano situado no meio da largura da parte reta do canal (Figura 5).

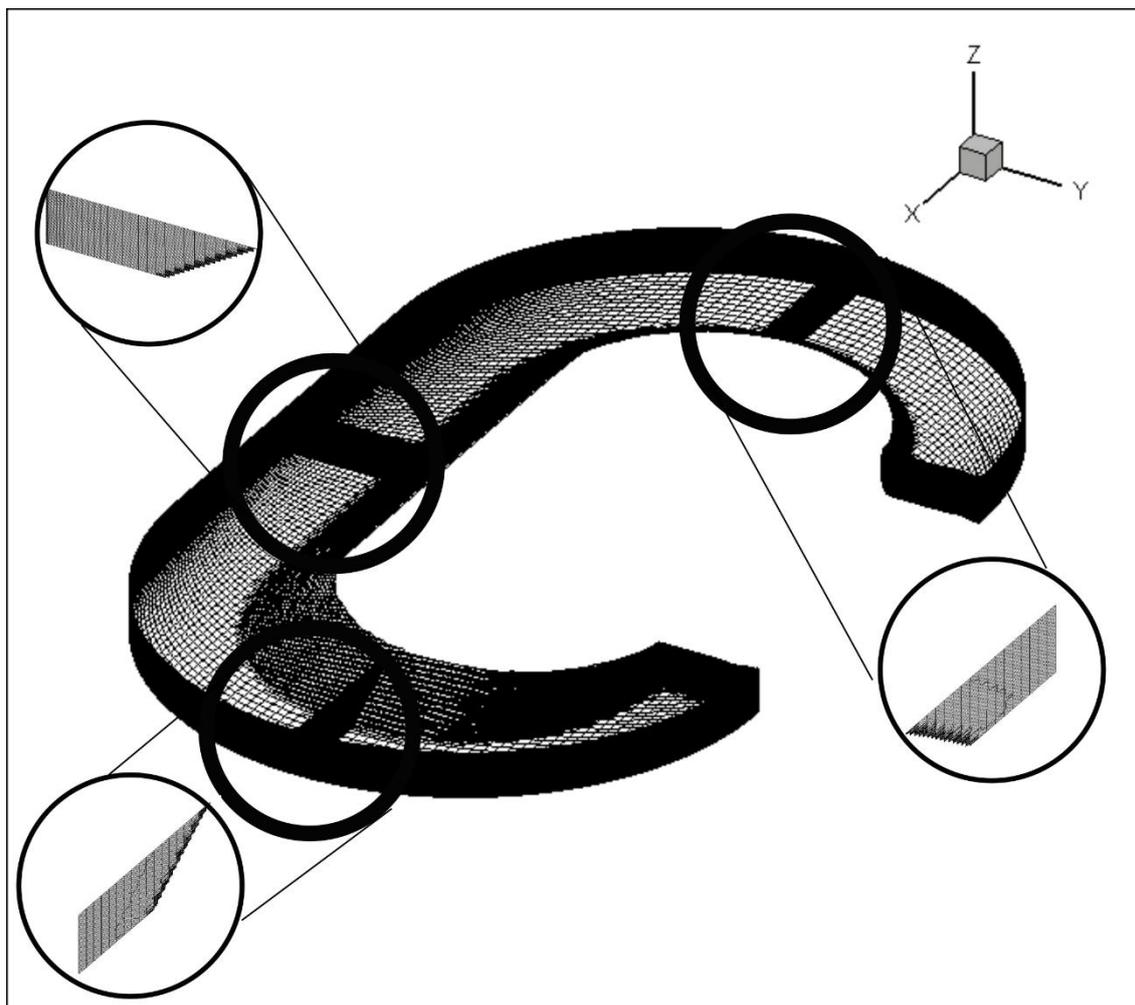
Desse modo,

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (\text{EQ. 12})$$

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^{pa} - 1} \quad (\text{EQ. 13})$$

onde ϕ_i é a solução na i -ésima grade (neste estudo, é a velocidade), pa é a ordem aparente e r é o fator de refinamento dos elementos entre duas malhas (CELIK *et al.*, 2008). Após as análises de incerteza de discretização, uma malha única foi selecionada. A malha de tamanho selecionada foi aplicada para os outros cenários em estudo (Figura 4).

Figura 4 – Malha adotada para simulações. Em destaque, as seções transversais estudadas



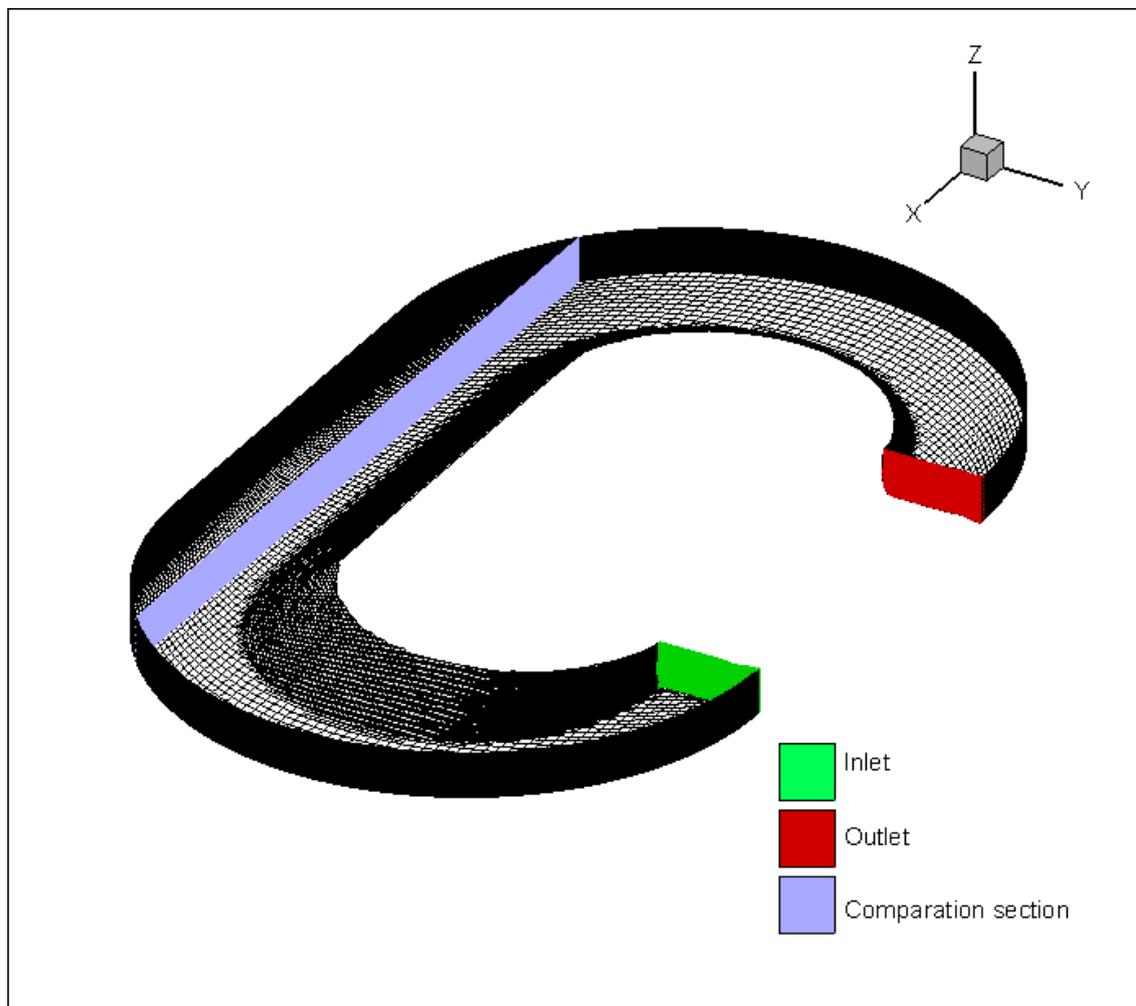
Fonte:

a autora

Condições de contorno

As malhas deste trabalho possuíam quatro condições de contornos (Figura 5), sendo elas: 1) parede (no fundo e nas laterais dos canais); 2) entrada; 3) saída, e topo. Devido à pouca variação da superfície da água (o canal não possui inclinação e o escoamento tem baixas velocidades), adotou-se a profundidade de água fixa em 23 cm, simulando apenas o fluido água.

Figura 5 – Condições de contorno dos modelos RANS e LES para o escoamento do canal circular e seção utilizada para comparação das diferentes malhas



Fonte: a autora

As condições de contorno foram criadas como blocos de malha no arquivo de geometria (usando a ferramenta *blockMesh*). A Tabela 4 apresenta as condições adotadas para velocidade, pressão, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação turbulenta e viscosidade turbulenta no canal circular. O valor da velocidade de entrada foi alterado de acordo com o cenário simulado.

Tabela 2 - Condições iniciais e de contorno que serão adotadas

| Condição de contorno | | Entrada | Saída | Topo | Paredes |
|----------------------|---------|---|--------------|------|---------------------|
| Velocidade | | fixedValue | zeroGradient | Slip | fixedValue |
| Pressão | | zeroGradient | fixedValue | Slip | zeroGradient |
| LES | Nut | Calculated | Calculated | Slip | nutkWallFunction |
| RANS | K | turbulentIntensity KineticEnergy | zeroGradient | Slip | kqRWallFunction |
| | Épsilon | turbulentMixingLength DissipationRateInlet | zeroGradient | Slip | epsilonWallFunction |

Fonte: a autora

Foram simulados quatro cenários (Tabela 5). Para cada cenário alterou-se a velocidade de entrada d'água. Os cenários foram definidos de acordo com a capacidade natatória das larvas estudadas na *La Trobe University*.

Tabela 3 – Cenários simulados no canal hidráulico de formato oval

| Cenário | Velocidade de entrada d'água no canal (m/s) |
|-----------|---|
| Fast | 0.30 |
| Moderate | 0.20 |
| Slow | 0.13 |
| Regulated | 0.04 |

Fonte: a autora

Limites de convergência

O número de Courant é a condição necessária para manter a estabilidade numérica na resolução de equações diferenciais parciais, ele depende da velocidade,

do tamanho do elemento da malha e do intervalo de tempo (COURANT; FRIEDRICHS; LEWYT, 1967), sendo definido pela Equação 14, em que δt é o passo de tempo (s), $|u|$ é a magnitude da velocidade (ms^{-1}) através do elemento e δx é o tamanho do elemento (m) na direção da velocidade.

$$C_o = \frac{\delta t |u|}{\delta x} \quad (\text{EQ. 14})$$

No canal curvo adotou-se o *SIMPLE method* (FARHADI *et al.*, 2018a) usado para escoamentos com a presença de um fluido incompressível, isotérmico e imiscível, usando o método *rigid lid* para tratamento da superfície que delimita a profundidade da água, sendo adotado somente um fluido. Visando obter estabilidade numérica e precisão temporal do *solver*, no *controlDict* adotou-se passo de tempo de 0,1 s de modo que o número de Courant não fosse superior a 0,5. Na Tabela 7 estão os esquemas numéricos para resolução das equações diferenciais parciais. Para as derivadas temporais, foi adotado *Steady State*, método que define as contribuições das derivadas temporais como zero. Para os termos gradientes, foi adotado o método de Gauss linear, que especifica o padrão de discretização para o método de volume finito como sendo de integração Gaussiana, interpolando a variável do centro do elemento para o centro da face, na interpolação da variável da célula para a face aplica-se o esquema de interpolação linear, um esquema de segunda ordem não-limitado (OPENCFD, 2012b). Para os termos divergentes, foi adotado o esquema *upwind* que é de primeira ordem e limitado, prezando pela precisão da solução. Para os termos laplacianos, adotou-se o método de Gauss linear corrigido em função da não ortogonalidade dos elementos. Para a interpolação dos valores entre dois elementos consecutivos foi adotado o esquema padrão linear. Por fim, foi adotado uma correção ao gradiente normal à superfície, avaliando-se o gradiente normal ao centro da face comum a dois elementos.

Tabela 4 - Especificações numéricas utilizadas

| Termo | Esquema numérico |
|------------|------------------|
| Temporal | Steady State |
| Gradiente | Gauss linear |
| Divergente | Gauss Upwind |

| | |
|------------------|------------------------|
| Laplaciano | Gauss linear corrected |
| Interpolação | Linear |
| Gradiente normal | Corrected |

Fonte: a autora

Os métodos iterativos de resolução das equações discretizadas de cada variável estão apresentados na Tabela 8, nele especifica cada *solver* linear que foi utilizado, com suas respectivas tolerâncias e tolerâncias relativas. E foi adotado água como fluido newtoniano, com viscosidade constante e as propriedades adotadas estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 5 - Métodos de solução e tolerâncias adotadas

| | P | U k épsilon |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Solver | GAMG | smoothSolver |
| Pré-condicionador / Suavizador | GaussSeidel | GaussSeidel |
| Tolerância | 1×10^{-7} | 1×10^{-8} |
| Tolerância relativa | 0.1 | 0.1 |

Fonte: a autora

Tabela 6 - Propriedades adotadas para o fluido

| Propriedades | Dimensões | Nomenclatura no OpenFOAM | Fluido água |
|------------------------|-------------|--------------------------|----------------------|
| Viscosidade cinemática | m^2s^{-1} | Nu | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| Densidade | kgm^{-3} | Rho | $1,0 \times 10^3$ |
| Tensão superficial | Nm^{-1} | Sigma | $7,0 \times 10^{-2}$ |

Fonte: a autora

Foi determinado que as simulações ocorressem em doze processadores em paralelo a fim de se reduzir o tempo necessário para convergência, ou seja, para que ocorra a estabilização das variáveis. Simulações em paralelo no OpenFOAM são

feitas por meio da decomposição do domínio. Tanto a geometria, quanto as variáveis de cálculo foram divididas em um determinado número de partes e alocadas em diferentes processadores.

Verificação e análise de dados

Para avaliar a concordância dos modelos RANS e LES com os dados experimentais, as seguintes métricas foram calculadas para a velocidade (m/s): erro absoluto médio (em inglês *Mean Absolute Error*, MAE), correlação quadrada de Pearson e correlação de Spearman. A diferença entre os modelos físicos e numéricos foi verificada pelos testes de normalidade (Shapiro Wilk) e Wilcoxon, realizados no software R 2019 (v. 3.5.3, *The R Foundation for Statistical Computing*, Viena, Áustria). Para todos os testes, o nível de significância foi de 0,05. Boxplots e gráficos de correlação de Spearman foram incluídos no software R.

Para amostrar os valores das características hidráulicas nas zonas de interesse, os dados experimentais foram processados e interpolados por meio do software Tecplot 360 2015 (Tecplot, Bellevue, WA, EUA). Os dados de entrada do Tecplot foram as coordenadas e velocidade. Assim, as variáveis energia cinética (Eq. 15), magnitude da vorticidade (Eq. 16) e deformação hidráulica (Eq. 17) foram calculadas de acordo com White (2002).

$$k = \frac{1}{2} \left(u_1'^2 + u_j'^2 + u_k'^2 \right) \quad (\text{EQ. 15})$$

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} \quad (\text{EQ. 16})$$

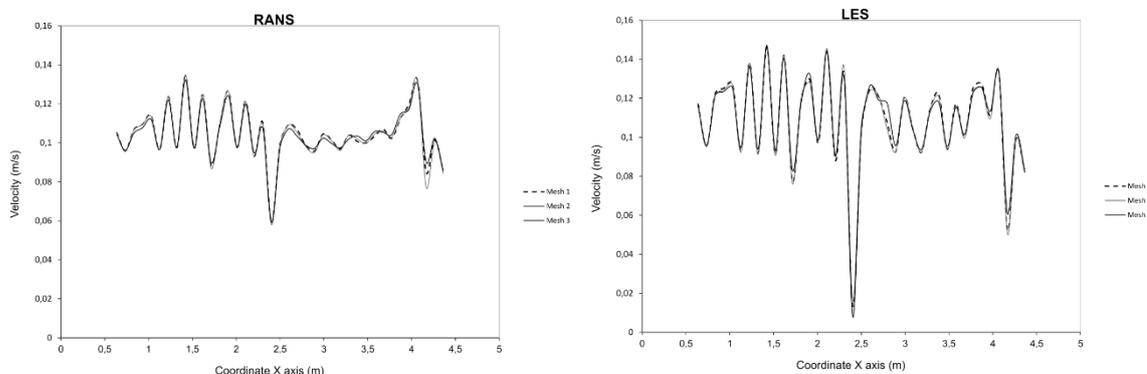
$$S = \sum \left| \frac{\partial u}{\partial x_j} \right| = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial y} + \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial u_k}{\partial y} \quad (\text{EQ. 17})$$

RESULTADOS

A malha intermediária (Malha 2) apresentou as menores velocidades ao longo do plano central (Figura 6) para ambas as abordagens (RANS e LES). O erro médio relativo entre as malhas foi menor no modelo RANS (< 1,79%) que no modelo LES (< 3,87%) que também teve um erro máximo foi maior no LES (52,38%) (Tabela 7). Como a discretização média foi menor do que 10%, critério indicado por Celik *et al.* (2008),

as três malhas apresentaram resultados semelhantes e decidiu-se adotar a malha mais grosseira ($\Delta x = 5$ cm), que demandava menor custo computacional.

Figura 6 – Velocidades na malha 1 ($\Delta x = 4,5$ cm), malha 2 ($\Delta x = 4$ cm) e malha 3 ($\Delta x = 5$ cm) para o modelo RANS e modelo LES



Fonte: a autora

Tabela 7 - Erro relativo aproximado entre duas malhas e o índice de convergência de malha fina para a velocidade da água nos modelos RANS e LES

| Variável | Modelo | Estatística | e21a (%) | e32a (%) | GCI21 (%) | GCI32 (%) |
|------------|--------|-------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Velocidade | RANS | Máximo | 9,08 | 16,64 | 11,36 | 20,88 |
| | | Média | 0,75 | 1,79 | 0,93 | 2,15 |
| | LES | Máximo | 20,47 | 52,38 | 25,38 | 65,47 |
| | | Média | 1,49 | 3,87 | 1,85 | 4,78 |

Fonte: a autora

Validação dos dados

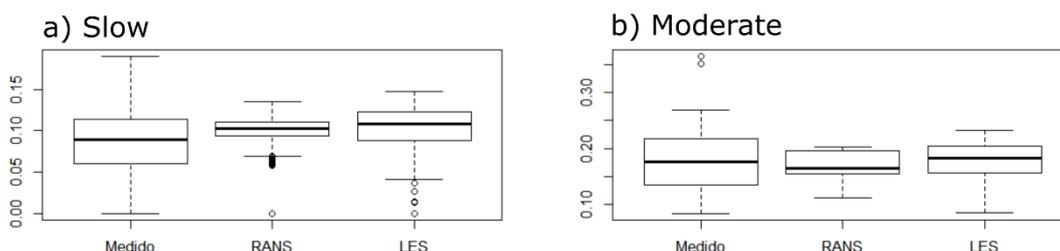
Os dados de velocidade provenientes da medição *in loco* e dos modelos RANS e LES não seguiram distribuição normal, exceto o modelo LES no cenário *moderate* (Tabela 8). O teste de Wilcoxon indicou uma diferença significativa entre os dados medidos e os modelos RANS e LES ($p < 0.05$) para o cenário *slow* (Tabela 8). Já no cenário *moderate*, não houve diferença significativa.

Tabela 8 - P-valor da normalidade de Shapiro Wilk para os dados de velocidade da amostragem *flow watch*, valores dos modelos RANS e LES; Teste de Wilcoxon para comparação entre *flow watch*-LES e *flow watch*-RANS

| Shapiro Wilk Normality | | |
|-------------------------|----------|----------|
| | Slow | Moderate |
| <i>flow watch</i> | < 0.05 | < 0.05 |
| RANS | < 0.05 | < 0.05 |
| LES | < 0.05 | 0.11 |
| Wilcoxon test | | |
| | Slow | Moderate |
| <i>flow watch</i> -LES | 2.64E-18 | 0.802 |
| <i>flow watch</i> -RANS | 1.32E-28 | 0.153 |

Fonte: a autora

Figura 7 – Boxplots para os dados de velocidade para os cenários *slow* e *moderate*



Fonte: a autora

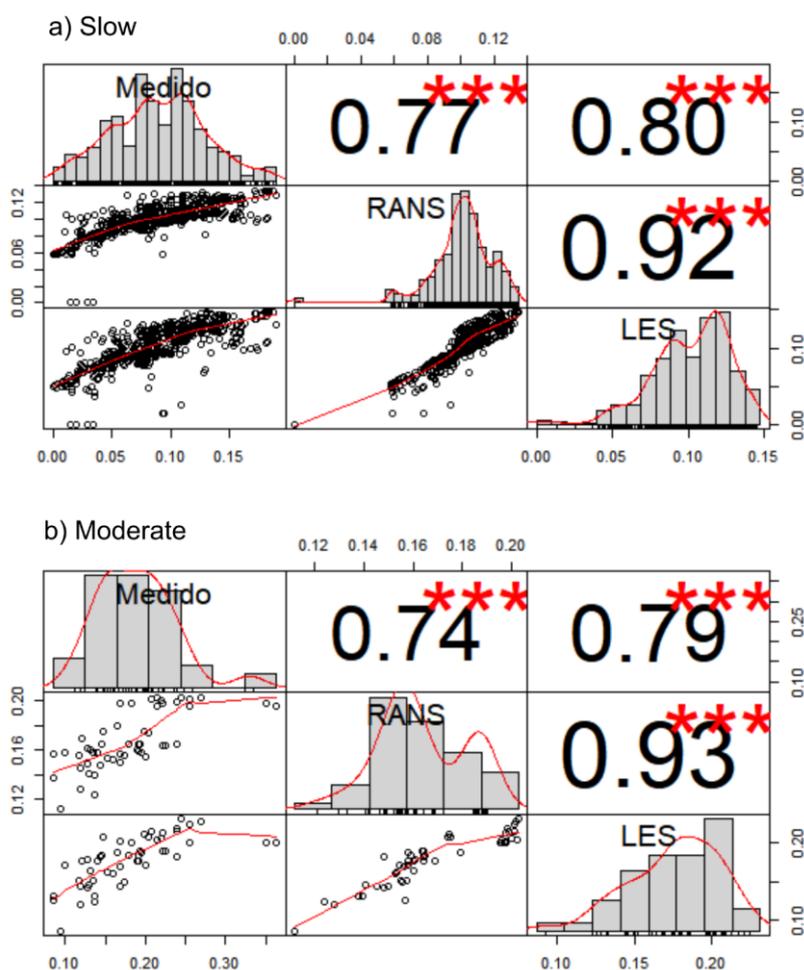
O modelo LES apresentou os menores valores de erro absoluto médio (em inglês, *Mean Absolute Error*, MAE) em ambos os cenários comparados: *slow* e *moderate*. O maior valor de MAE acontece no modelo RANS para o cenário *moderate*. Já a correlação de Pearson, foi superior a 70% em todos os modelos e cenários, apresentando maiores valores em LES. Além disso, verificou-se que o modelo LES superou o RANS ao comparar as correlações com os dados do *flow watch*, conforme mostrado na Tabela 9 e na Figura 8.

Tabela 9 - Erro absoluto médio (em inglês, *Mean Absolute Error*, MAE) e resumo da correlação de Pearson para os modelos RANS e LES

| Cenário | Modelo | Velocidade |
|---------|--------|------------|
|---------|--------|------------|

| | | MAE (m/s) | Correlação de Pearson |
|----------|------|-----------|-----------------------|
| Slow | RANS | 0,025 | 0,77 |
| | LES | 0,023 | 0,80 |
| Moderate | RANS | 0,035 | 0,74 |
| | LES | 0,029 | 0,79 |

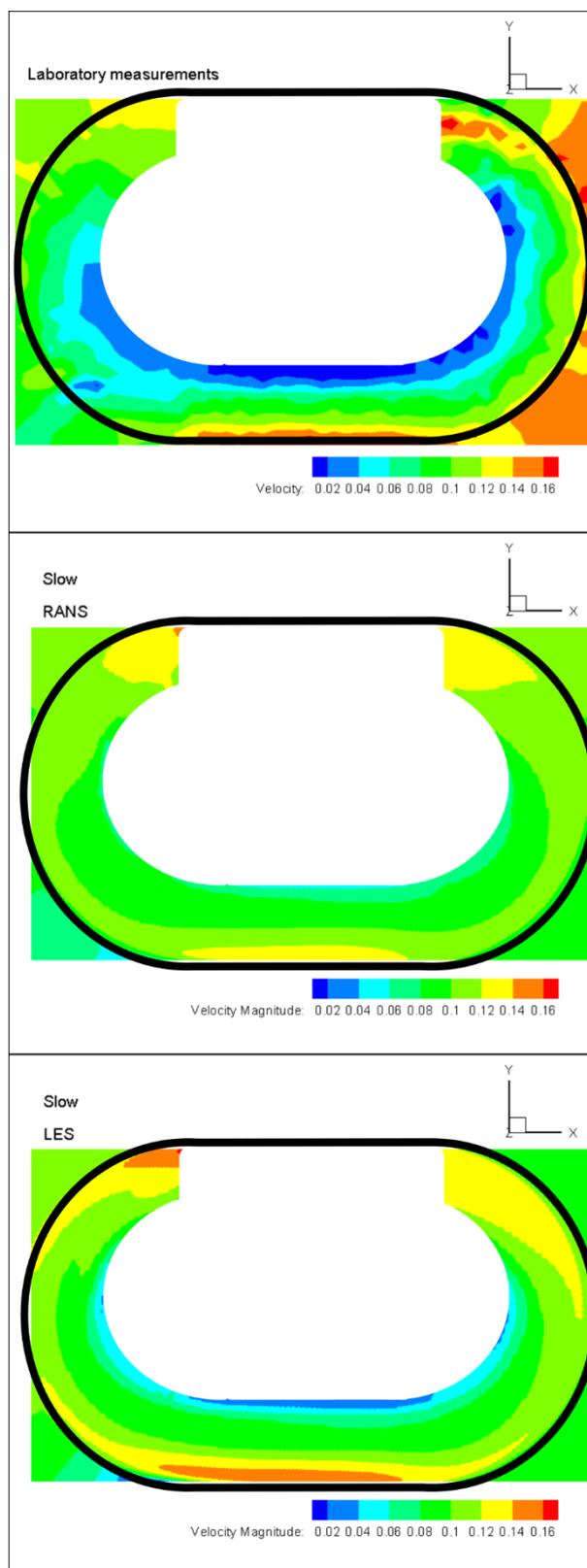
Figura 8 – Histograma, gráfico de correlação e teste de Spearman para a velocidade nos cenários *slow* (a) e *moderate* (b)



Fonte: a autora

Os modelos RANS e LES criaram campos de velocidade semelhantes ao mapa medido em campo pelo *flow watch* para o cenário *slow* (Figura 9), principalmente nas regiões centrais do escoamento. Regiões de maiores velocidades (> 0.14 m/s) e de menores velocidades (< 0.04 m/s) no modelo físico foram melhores representadas pelo modelo LES do que o modelo RANS.

Figura 9 – Mapas de velocidade média (m/s) coletados com *Flow watch* e simulados em modelos RANS e LES no plano de 15 cm do fundo do canal

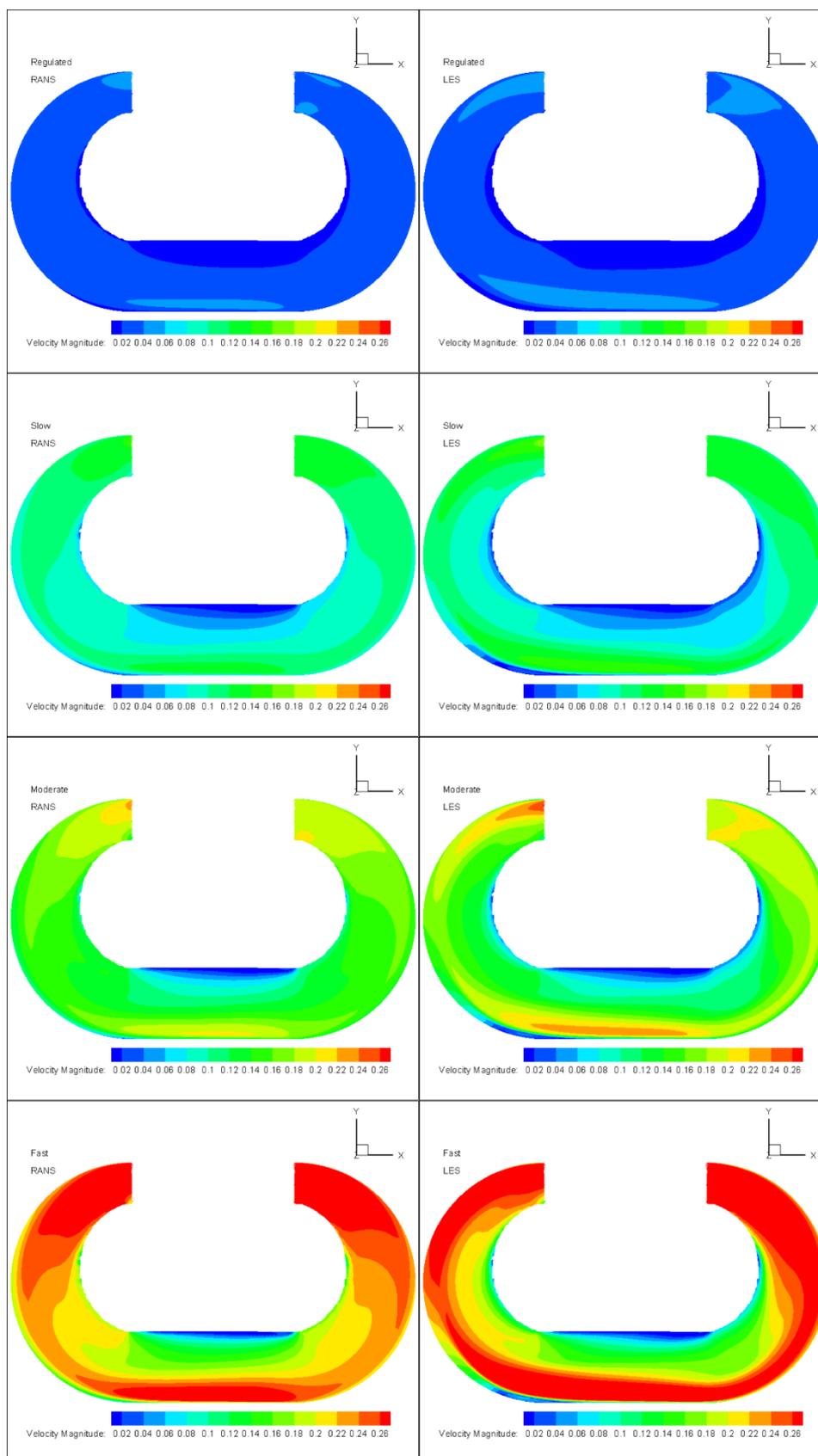


Fonte: a autora

Na entrada, foi imposto um perfil de velocidade uniforme baseado nos cenários estudados com larvas de peixes. Os quatro cenários avaliados (*slow*, *moderate*, *regulated* e *fast*) apresentaram campos de velocidades diferentes entre eles (Figura 10). Em todos os cenários, a primeira curva do canal gera uma região de baixa velocidade próxima à parede interna do sistema e uma região de velocidade mais alta próxima à parede externa (sem inclinação) do sistema na parte reta do canal. Tal região de baixa velocidade estende-se por toda extensão da seção reta longitudinal do canal (Figura 11).

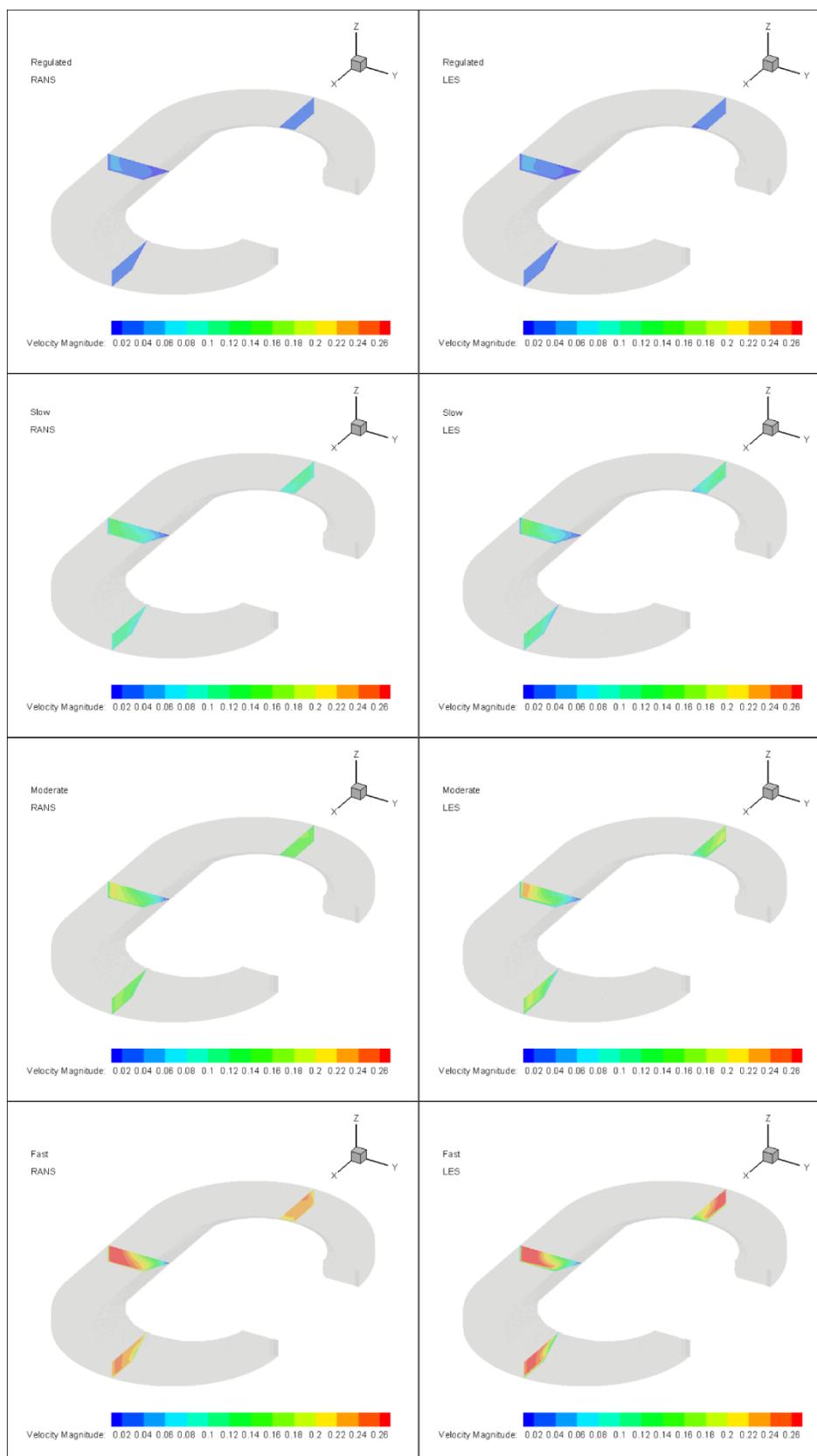
Ao longo da seção longitudinal, percebe-se que o modelo RANS fornece um perfil mais simétrico de distribuição de velocidades do que modelo LES, principalmente relacionado ao efeito de mudança de escoamento causado pela primeira curva. A medida que a velocidade aumenta nos diferentes cenários, essa ausência de similaridade no cenário LES fica mais evidente no perfil.

Figura 10 – Resultados de velocidade (m/s) em RANS e LES nos cenários *regulated*, *slow*, *moderate* e *fast*



Fonte: a autora

Figura 11 – Resultados de velocidade (m/s) em seções transversais dos modelos RANS e LES nos cenários *regulated*, *slow*, *moderate* e *fast*

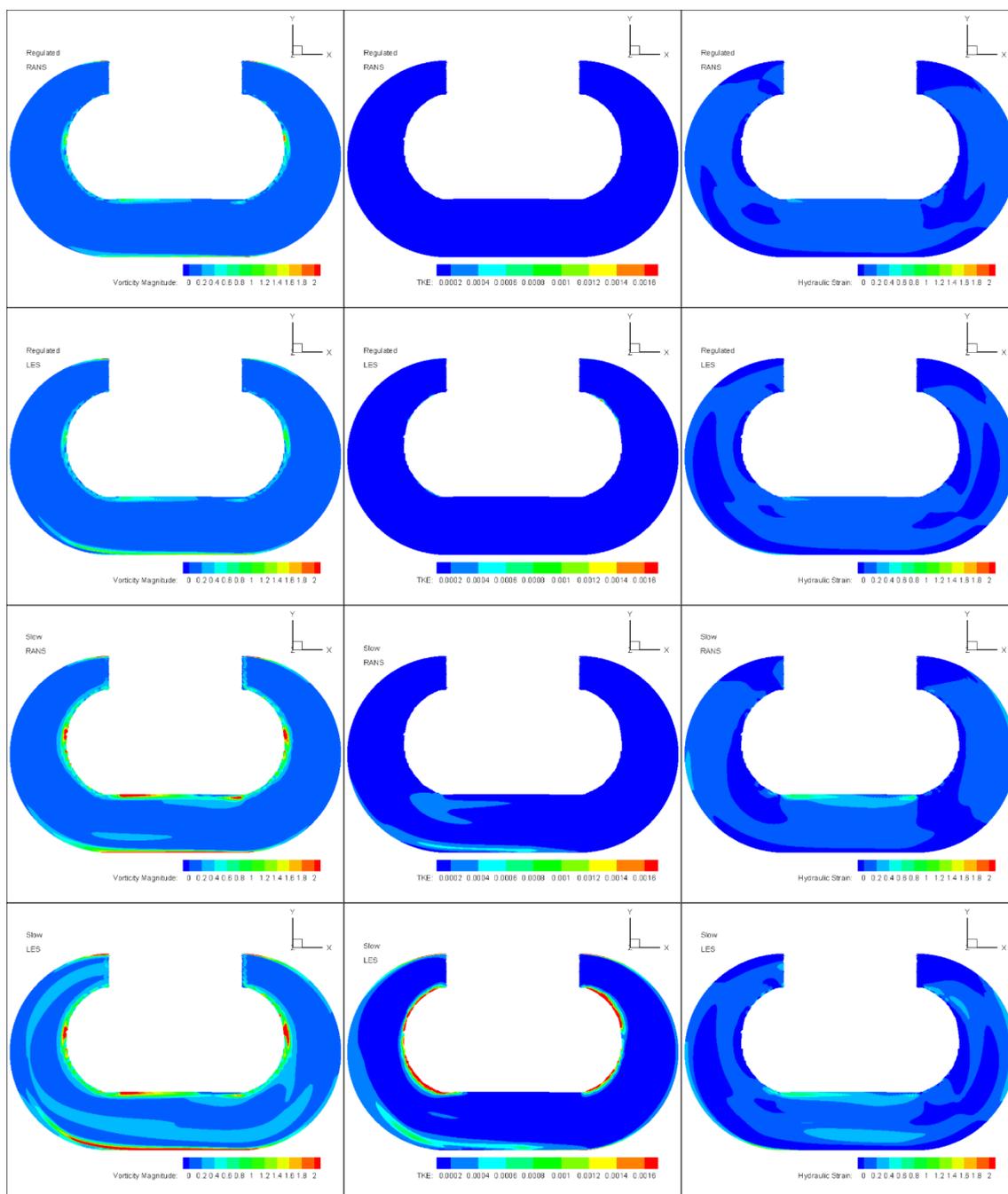


Fonte: a autora

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados das variáveis turbulentas vorticidade, energia cinética turbulenta e deformação hidráulica simuladas nos modelos RANS e LES para os cenários *regulated*, *slow*, *moderate* e *fast*. A energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica dos cenários *regulated* e *slow* são semelhantes, apesar dos efeitos da curva já serem observados nos perfis do cenário *slow* (Figura 12). Os perfis de energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica para *moderate* e *fast* (Figura 13) são bastante distintos dos cenários *regulated* e *slow* (Figura 12).

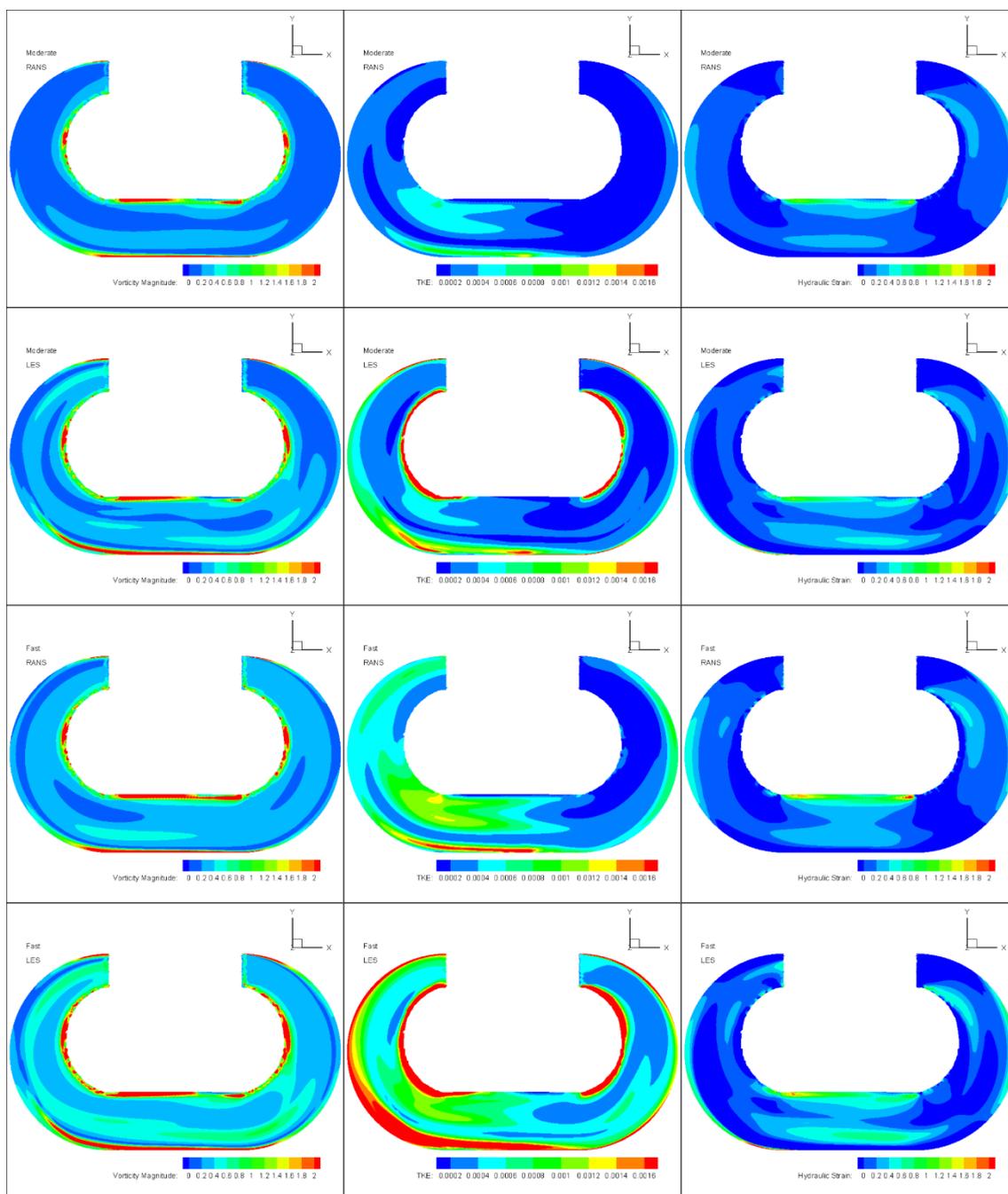
É possível observar que a medida que a velocidade aumenta, os valores das variáveis turbulentas também aumentam. Além disso, observa-se que os valores de energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica são maiores nos modelos LES do que nos modelos RANS.

Figura 12 – Resultados de RANS e LES nos cenários *regulated* e *slow*: vorticidade (1/s), energia cinética turbulenta (m^2/s^2) e deformação hidráulica (1/s)



Fonte: a autora

Figura 1319 – Resultados de RANS e LES nos cenários *moderated* e *fast*: vorticidade (1/s), energia cinética turbulenta (m²/s²) e deformação hidráulica (1/s)



Fonte: a autora

Discussão

Os experimentos em canais laboratoriais têm um grande potencial para compreensão da movimentação de larvas de peixes (LECHNER; KECKEIS; HUMPHRIES, 2016). Glas *et al.* (2017), por exemplo, comprovaram em estudo que os padrões de movimento das larvas *Chondrostoma nasus* dependem da velocidade

do escoamento. Modelos hidrodinâmicos 3D nesses canais têm contribuído para detalhar as variáveis hidráulicas importantes na natação de larvas (FARHADI; *et al.*, 2018a; FARHADI; *et al.*, 2018b; GLAS *et al.*, 2017; ZENS *et al.*, 2018). A abordagem LES utilizada em simulações é apontada como uma representação de escoamento melhor do que o modelo RANS, especialmente para aspectos turbulentos (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2018; LE HOCINE *et al.*, 2019). Apesar da ampla aplicação de modelos numéricos para compreensão dos escoamentos em canais hidráulicos circulares, a literatura não aborda a comparação de modelos numéricos em RANS e LES em canais dessa geometria. Entretanto, literatura sobre representação de canais naturais curvos tem mostrado que os modelos LES e *Detached Eddy Simulation* (DES) podem contribuir para uma melhor representação desses escoamentos com possíveis fluxos reversos.

Os modelos LES reproduzem adequadamente a perda de energia por atrito medida experimentalmente na curva, enquanto RANS superestima essa perda (VAN BALEN; BLANCKAERT; UIJTTEWAAL, 2010), desse modo as velocidades calculadas em RANS ficaram abaixo daquelas calculadas pelos modelos LES. O diferencial do LES sobre o RANS é que ele fornece informações detalhadas sobre a estrutura turbulenta intermitente do escoamento e que reproduz melhor as características importantes do escoamento em geometrias com curvatura (BOOIJ, 2003).

Com os resultados deste trabalho, pode-se afirmar que os modelos RANS com fechamento de turbulência $k-\epsilon$ e LES com fechamento $keqn$ foram capazes de fornecer resultados compatíveis quando comparados às medições feitas em laboratório. Observou-se que o LES teve melhores resultados na validação da velocidade medida em modelo físico que o RANS para canais de baixa turbulência. Além disso, os modelos LES foram capazes de capturar efeitos de curva causados no escoamento nas bordas internas e externas dos trechos pós-curva. Isso acontece, pois, o LES reproduz melhor as variáveis hidráulicas turbulentas no escoamento em geometrias com curvatura (BOOIJ, 2003). Os cenários estudados apresentaram diferentes campos de velocidade, vorticidade energia cinética turbulenta, e deformação, apresentando maiores valores para os cenários LES. Os efeitos da curva sobre todas as variáveis ficaram evidentes para cenários com maiores velocidades (*moderate e fast*).

Mesmo as correlações de Pearson tendo apresentado bons resultados, o teste de Wilcoxon indicou uma diferença significativa entre os dados medidos e os resultados dos modelos RANS e LES para o cenário *slow*, o que não foi observado no cenário *moderate*. Esta diferença pode ser explicada pela perturbação causada na introdução do *flow watch* na medição, já que ele é um equipamento intrusivo que altera o campo de velocidade próximo a onde foi inserido. Em velocidades menores, estas diferenças são mais significativas.

Em geral, as diferenças entre os modelos numéricos e o modelo físico foram semelhantes aos na literatura. Por exemplo, Alvarez et al. Obtiveram um MAE de 0,29 m/s em estudo de seção com curvatura com DES, Marriner *et al.*, (2014) observaram um MAE para velocidade de 0,06 m/s usando o modelo RANS com fechamento k- ϵ e Fuentes-Pérez *et al.*, (2018) observaram um MAE de 0,056 m/s usando o modelo LES com fechamento Smagorinsky. Quanto à correlação de Pearson o modelo LES apresentou uma correlação linear em relação aos dados do modelo físico melhor do que comparado a RANS. Fuentes-Pérez *et al.* (2018) também concluíram que o modelo LES apresentava melhores valores de correlação de Pearson em comparação com a abordagem RANS. Além disso, os resultados de correlação de Pearson foram melhores no cenário de menor velocidades/*low*, o que pode indicar que um aumento da complexidade do escoamento devido a uma maior vazão pode exigir um refinamento adicional para obter o mesmo erro em velocidades maiores.

O perfil de velocidade apresentado nos resultados deste trabalho está de acordo com outros trabalhos desenvolvidos em canais similares (FARHADI; *et al.*, 2018a; FARHADI; *et al.*, 2018b; GLAS *et al.*, 2017). O padrão de velocidade do escoamento na seção transversal consiste em um núcleo de alta velocidade circundado por contornos de velocidade decrescentes em direção às paredes (FARHADI *et al.*, 2018a).

Simular numericamente e fisicamente diferentes cenários de condições hidráulicas são importantes para diversos estudos relacionados à preservação e manutenção de ecossistemas (deslocamento de larvas e sedimentos). No presente estudo, as diferenças nos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica estavam relacionadas a diferentes velocidades impostas pelo sistema de movimentação da água e pela curva criada no canal. O aumento da

vorticidade nesse tipo de canal está diretamente relacionado com o número de Froude (FARHADI *et al.*, 2018b). Os efeitos turbulentos foram evidenciados pelos modelos LES, quando comparados com os modelos RANS. Entretanto, resultados de energia cinética de modelos RANS com fechamento de turbulência típicos ($k-\epsilon$, $k-\omega$) em simulações de escoamentos com correntes secundárias, como as que podem ser criadas por curvas, devem ser interpretados com cuidado (FARHADI *et al.*, 2018a).

Transferir os resultados de canais laboratoriais para os ecossistemas fluviais é uma prática comum, isso geralmente é feito usando um modelo hidrodinâmico 3D. Estudar a turbulência em canais que dão suporte a estudos de peixes é de suma importância para avaliar o padrão de comportamento de larvas de peixes, já que é comprovado que seu deslocamento é influenciado pelas variáveis hidráulicas turbulentas. A validação de modelos numéricos envolvendo canais hidráulicos pode ser melhorada usando outras variáveis hidráulicas que caracterizam a turbulência, como por exemplo energia cinética turbulenta.

Conclusão

O presente estudo propôs uma avaliação do escoamento hidráulico em um canal curvo por meio de modelos numéricos tridimensionais com equações RANS com fechamento de turbulência $k-\epsilon$ e LES com fechamento $k\epsilon_{qn}$. Tais modelos se mostram uma ferramenta eficiente para determinação dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica em canais curvos. Ambos os modelos são capazes de fornecer resultados compatíveis quando comparados as medições feitas em laboratório, mas os modelos LES tiveram melhor aderência aos resultados laboratoriais.

Em canais curvos, as mudanças dos perfis de variáveis hidráulicas são causadas por efeitos de alteração da velocidade principal do escoamento, causada pelo sistema de acionamento de movimentação da água, e pelos efeitos das curvas. No geral, para diferentes cenários de velocidade principal do escoamento, modelos LES capturam melhor efeitos gerados por mudanças na direção do escoamento, impostas por curvas na geometria, do que os modelos RANS.

A compreensão do escoamento hidráulico em canais curvos pode contribuir para avanços em medidas de mitigação e preservação de ecossistemas aquáticos,

em especial atenção aos processos relacionados à locomoção das larvas de peixes e transporte de sedimentos.

Referências

ARIS, Rutherford. *Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics*. [S.l.]: Dover Publications, 1989.

BENCHIKH LE HOCINE, Alla Eddine; LACEY, R. W. Jay; PONCET, Sébastien. Turbulent flow over a D-section bluff body: a numerical benchmark. *Environmental Fluid Mechanics* 2018 19:2, v. 19, n. 2, p. 435–456, 6 out. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10652-018-9634-4>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

BOOIJ, R. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes*. *Journal of Turbulence*, v. 4, n. 1, p. 008, 19 mar. 2003. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-5248/4/1/008>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

CELIK, Ismail B. *et al.* Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 1 jul. 2008. Disponível em: <http://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-pdf/130/7/078001/5491455/078001_1.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2021.

COTEL, Aline J.; WEBB, Paul W.; TRITICO, Hans. Do Brown Trout Choose Locations with Reduced Turbulence? *Transactions of the American Fisheries Society*, v. 135, n. 3, p. 610–619, maio 2006.

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWYT, H. Courant-Friedrichs-Lewy. *IBM Journal*, n. March, p. 215–234, 1967. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5391985/>>. Acesso em: 31 out. 2019.

DEARDORFF, James W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Boeing Symposium on Turbulence*, v. 41, n. 2, p. 453, 1970. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/S0022112070000691>>. Acesso em: 3 jul. 2020.

ENDERS, Eva C.; BOISCLAIR, Daniel; ROY, André G. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 60, n. 9, p. 1149–1160, 1 set. 2003. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/f03-101>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

FARHADI, Alireza; MAYRHOFER, Arno; *et al.* Accuracy and comparison of standard k- ϵ with two variants of k- ω turbulence models in fluvial applications. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 12, n. 1, p. 216–235, 6 jan. 2018a.

FARHADI, Alireza; SINDELAR, Christine; *et al.* An investigation on the outer bank cell of secondary flow in channel bends. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 18, p. 1–11, 1 fev. 2018b.

FUENTES-PÉREZ, J.F. *et al.* 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental Modelling & Software*, v. 99, p. 156–169, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136481521630843X>>. Acesso em: 10 maio 2019.

GLAS, Martin *et al.* Modelling the dispersal of riverine fish larvae: from a raster-based analysis of movement patterns within a racetrack flume to a rheoreaction-based correlated random walk (RCRW) model approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 74, n. 9, p. 1474–1489, 2017.

HUANG, Shenghong; LI, Q. S. A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 81, n. 7, p. 835–865, 12 fev. 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/nme.2715>>. Acesso em: 29 jul.

2021.

KOLDITZ, Olaf. *Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2002.

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS. *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, p. 96–116, 1 jan. 1983.

LECHNER, Aaron; KECKEIS, Hubert; HUMPHRIES, Paul. Patterns and processes in the drift of early developmental stages of fish in rivers: a review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 2016 26:3, v. 26, n. 3, p. 471–489, 7 jun. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11160-016-9437-y>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

LIAO, James C. *et al.* Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity. *Science*, v. 302, n. 5650, p. 1566–1569, 28 nov. 2003. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1088295>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

MARRINER, Bryan A. *et al.* Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway. *Ecological Engineering*, v. 63, p. 88–101, 1 fev. 2014.

NADAOKA, Kazuo; YAGF, Hiroshi. *SHALLOW-WATER TURBULENCE MODELING AND HORIZONTAL LARGE-EDDY COMPUTATION OF RIVER FLOW*. . [S.l.: s.n.], 1998.

OPENCFD. *OpenFOAM: API Guide: Finite volume numerical schemes*. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/group__grpFvSchemes.html>. Acesso em: 4 abr. 2021.

RAMAMURTHY, A. S.; HAN, S. S.; BIRON, P. M. Three-Dimensional Simulation Parameters for 90° Open Channel Bend Flows. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 27, n. 3, p. 282–291, 17 maio 2013. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000209>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

SILVA, Ana T. *et al.* Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering*, v. 44, p. 314–328, jul. 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857412001334>>. Acesso em: 18 maio 2019.

SMITH, David L. *et al.* Use of the Average and Fluctuating Velocity Components for Estimation of Volitional Rainbow Trout Density. *Transactions of the American Fisheries Society*, v. 135, n. 2, p. 431–441, mar. 2006.

VAN BALEN, W.; BLANCKAERT, K.; UIJTTEWAAL, W. S.J. *Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 11.

VERSTEEG, Henk Kaarle;; MALALASEKERA, Weeratunge. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. [S.l.]: Pearson education, 2007.

WHITE, Frank. *Mecânica dos Fluidos*. [S.l.: s.n.], 2003.

YOSHIZAWA, Akira; HORIUTI, Kiyosi. A Statistically-Derived Subgrid-Scale Kinetic Energy Model for the Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows. <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.54.2834>, v. 54, n. 8, p. 2834–2839, 29 nov. 1985. Disponível em: <<https://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.54.2834>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

ZENS, Bernhard *et al.* Movement patterns and rheoreaction of larvae of a fluvial specialist (nase, *Chondrostoma nasus*): The role of active versus passive components of behaviour in dispersal. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 75, n. 2, p. 193–200, 2018. Disponível em: <www.nrcresearchpress.com/cjfas>. Acesso em: 29 jun. 2021.

As contribuições dos autores em cada uma das áreas da construção do artigo foram:

- PINHEIRO, A. P.: conceituação, metodologia, simulação numérica, análise, validação, análise estatística e escrita.
- SANTOS, H. A.: conceituação, metodologia, simulação numérica, análise, validação, análise estatística, escrita, supervisão, administração do projeto.
- NOGUEIRA, L. B.: coleta de dados.

4.3 DISCUSSÃO DOS ARTIGOS

Em ambos os artigos, observou-se que os modelos RANS e LES mostram-se uma ferramenta eficiente para determinação dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica, mas os modelos LES tiveram melhor aderência aos resultados laboratoriais.

Através desses estudos, também se observou que os perfis de velocidade próximo a superfície d'água e próximo ao fundo são diferentes. Isso pode ser explicado pela proximidade com a parede, onde a velocidade é nula.

5 CONCLUSÃO

A Dinâmica de Fluidos Computacional é uma ferramenta promissora para a compreensão da estrutura do escoamento turbulento em canais para estudos de peixes, e a seleção de um modelo adequado para representação do escoamento considerando sua abordagem de turbulência é uma questão importante para obtenção de resultados próximos aos obtidos em modelos físicos. O presente estudo propôs uma avaliação do escoamento hidráulico em uma escada para peixes e em um canal curvo por meio de modelos numéricos tridimensionais com equações RANS com fechamento de turbulência $k-\varepsilon$ e LES com fechamento $kEqn$. Tais modelos mostraram-se uma ferramenta eficiente para determinação dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta, vorticidade e deformação hidráulica, mas os modelos LES tiveram melhor aderência aos resultados laboratoriais em ambos os estudos. Assim, conclui-se que a sensibilidade dos modelos LES é maior do que dos modelos RANS na simulação de escoamentos turbulentos em canais para estudos de peixes

Na escada para peixes, os modelos RANS $k-\varepsilon$ e LES $kEqn$ tiveram resultados validados com os dados ADV para todas as faixas de velocidade e para os menores valores de energia cinética turbulenta ($<0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$), que é apontado na literatura como a área preferível para passagem de peixes em mecanismos do tipo ranhura vertical. Já no canal curvo, os modelos RANS $k-\varepsilon$ e LES $kEqn$ tiveram resultados validados com os dados medidos com *flow watch* para os cenários *slow* e *moderate*.

O estudo do escoamento hidráulico em canais como os estudados pode permitir uma melhor compreensão do desempenho da passagem e locomoção dos peixes e contribuir para avanços em medidas de mitigação e preservação de ecossistemas aquáticos. Melhorias nesta área serão úteis para questões práticas da passagem para peixes.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, a autora considera o estudo com a aplicação de outros modelos de submalha LES e o estudo com a modelagem híbrida da Turbulência (DES – *Detached Eddy Simulation*). Além disso, também se sugere a escada para peixes alterando a ranhura vertical, para verificar sua influência nas

variáveis turbulentas. Por fim, sugere-se incluir medições de flutuação de velocidade no modelo físico do canal curvo para validar o modelo numérico por uma variável turbulenta e aumentar o número de pontos de medição.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations AIAA G-077-1998 Guide Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. 2002.

ANDERSON, Steven; LOHRMANN, Atle. Open water test of the SonTek acoustic Doppler velocimeter. 1995, [S.l.: s.n.], 1995. p. 188–192.

ARIS, Rutherford. *Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics*. [S.l.]: Dover Publications, 1989.

BAKI, Abul Basar M.; ZHU, David Z.; RAJARATNAM, Nallamuthu. Flow Simulation in a Rock-Ramp Fish Pass. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 142, n. 10, p. 04016031, 17 maio 2016. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001166>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

BAKI, Abul Basar M.; ZHU, David Z.; RAJARATNAM, Nallamuthu. Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 141, n. 2, p. 04014075, 5 nov. 2015. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000962>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

BAO, Jianghui *et al.* Quantitative assessment of fish passage efficiency at a vertical-slot fishway on the Daduhe River in Southwest China. *Ecological Engineering*, v. 141, 1 dez. 2019.

BATISTA, Vicente Helano Feitosa. *Geração de Malhas Não-Estruturadas Tetraédricas Utilizando um Método de Avanço de Fronteira*. 2005a. Rio de Janeiro: COPPE, 2005.

BATISTA, Vicente Helano Feitosa. *Geração de malhas não estruturadas tetraédricas utilizando um método de avanço de fronteira*. Rio de Janeiro: Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005b.

BENCHIKH LE HOCINE, Alla Eddine; LACEY, R. W. Jay; PONCET, Sébastien. Turbulent flow over a D-section bluff body: a numerical benchmark. *Environmental Fluid Mechanics* 2018 19:2, v. 19, n. 2, p. 435–456, 6 out. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10652-018-9634-4>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

BIRNIE-GAUVIN, Kim *et al.* Moving beyond fitting fish into equations: Progressing the fish passage debate in the Anthropocene. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 29, n. 7, p. 1095–1105, 1 jul. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aqc.2946>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

BOMBAČ, Martin *et al.* Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations. *Ecological Engineering*, v. 84, p. 476–484, 1 nov. 2015.

BOOIJ, R. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes*. *Journal of Turbulence*, v. 4, n. 1, p. 008, 19 mar. 2003. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-5248/4/1/008>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

CABONCE, Joseph; WANG, Hang; CHANSON, Hubert. Ventilated Corner Baffles to Assist Upstream Passage of Small-Bodied Fish in Box Culverts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 144, n. 8, p. 04018020, 15 jun. 2018. Disponível em:

<<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001329>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

CABRAL, Helenesio Carlos Borges. *UTILIZAÇÃO DE VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV) PARA AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO*. [S.l.: s.n.], 2014.

CELIK, Ismail B. *et al.* Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 1 jul. 2008. Disponível em: <http://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-pdf/130/7/078001/5491455/078001_1.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2021.

CLAY, Charles H. Design of Fishways and Other Fish Facilities. *Design of Fishways and Other Fish Facilities*, p. 1–248, 14 dez. 1995. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315141046/design-fishways-fish-facilities-charles-clay-eng>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

COTEL, Aline J.; WEBB, Paul W.; TRITICO, Hans. Do Brown Trout Choose Locations with Reduced Turbulence? *Transactions of the American Fisheries Society*, v. 135, n. 3, p. 610–619, maio 2006.

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWYT, H. Courant-Friedrichs-Lewy. *IBM Journal*, n. March, p. 215–234, 1967. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5391985/>>. Acesso em: 31 out. 2019.

DAVIDSON, Peter Alan. *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=uZUUDAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=davidson+turbulence++&ots=3TCmj4xJua&sig=vOQjUV029TpH85um9W8IZbgd0_s#v=onepage&q=davidson+turbulence&f=false>. Acesso em: 29 jun. 2019.

DE SOUZA, José Francisco Almeida *et al.* *Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem*. *Revista Brasileira de Geofísica*. [S.l.]: SBGf. , jan. 2011

DEARDORFF, James W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Boeing Symposium on Turbulence*, v. 41, n. 2, p. 453, 1970. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/S0022112070000691>>. Acesso em: 3 jul. 2020.

DHOTRE, Mahesh *et al.* Advances in computational fluid dynamics. *International Journal of Chemical Engineering*, 2013.

DUGUAY, J.M. M.; LACEY, R.W.J. W.J.; GAUCHER, J. A case study of a pool and weir fishway modeled with OpenFOAM and FLOW-3D. *Ecological Engineering*, v. 103, p. 31–42, jun. 2017.

DURGESH, Vibhav *et al.* Noise correction of turbulent spectra obtained from acoustic doppler velocimeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 37, p. 29–41, 2014.

ENDERS, Eva C.; BOISCLAIR, Daniel; ROY, André G. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 60, n. 9, p. 1149–1160, 1 set. 2003. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/f03-101>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

FAO/DVWK. Fish Passes: Design, Dimensions, and Monitoring. *Reports*, 1 jan. 2002.

Disponível em: <https://scholarworks.umass.edu/fishpassage_reports/4>. Acesso em: 29 jul. 2021.

FARHADI, Alireza; MAYRHOFER, Arno; *et al.* Accuracy and comparison of standard k- ϵ with two variants of k- ω turbulence models in fluvial applications. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 12, n. 1, p. 216–235, 6 jan. 2018.

FARHADI, Alireza; SINDELAR, Christine; *et al.* An investigation on the outer bank cell of secondary flow in channel bends. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 18, p. 1–11, 1 fev. 2018.

FORTUNA, Armando de Oliveira. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações*. [S.l.]: Edusp, 2000.

FRIEDRICH, R *et al.* Direct numerical simulation of incompressible turbulent flows. *Computers & Fluids*, v. 30, n. 5, p. 555–579, jun. 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045793001000068>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

FUENTES-PÉREZ, J.F. *et al.* 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental Modelling & Software*, v. 99, p. 156–169, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136481521630843X>>. Acesso em: 10 maio 2019.

GLAS, Martin; *et al.* Numerical and physical particle tracing in a racetrack flume for larval dispersal experiments. n. 1, 2012.

GLAS, Martin *et al.* Modelling the dispersal of riverine fish larvae: from a raster-based analysis of movement patterns within a racetrack flume to a rheoreaction-based correlated random walk (RCRW) model approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 74, n. 9, p. 1474–1489, 2017.

GORING, Derek G.; NIKORA, Vladimir I. Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 1, p. 117–126, 1 jan. 2002. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282002%29128%3A1%28117%29>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

GREENSHIELDS, C. J. *OpenFOAM-The Open Source CFD Toolbox-User Guide*. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

GREENSHIELDS, C. J. *OpenFOAM 2.3.0: Multiphase Modelling | OpenFOAM*. Disponível em: <<https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase/>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

GREENSHIELDS, C. J. *OpenFOAM v6 User Guide: 5.2 Boundaries*. Disponível em: <<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-boundaries/>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

HIRSCH, Ch. *Numerical computation of internal and external flows: fundamentals of computational fluid dynamics*. [S.l.]: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2007.

HOSSEINI, S. A.; SHAMSAI, A.; ATAIE-ASHTIANI, B. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 17, n. 1, p. 59–68, mar. 2006.

HUANG, Shenghong; LI, Q. S. A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 81, n. 7, p. 835–865, 12 fev. 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/nme.2715>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

JASAK, Hrvoje *et al.* *OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations. International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics IUC*. [S.l.: s.n.], 2007.

JUHA, Mario J.; ZHANG, Jie; TEJADA-MARTÍNEZ, Andrés E. Large scale structures in LES of an oscillating open channel flow under the influence of surface cooling. *Computers and Fluids*, v. 158, p. 96–106, 24 nov. 2017.

KATOPODIS, Christos. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. <http://dx.doi.org/10.1080/00221680509500144>, v. 43, n. 5, p. 451–467, 2005. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221680509500144>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

KATOPODIS, Christos. *INTRODUCTION TO FISHWAY DESIGN*. [S.l.: s.n.], 1992. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/267095265>>. Acesso em: 1 nov. 2019.

KIRKBRIDE, A. D. Observations of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth limited flows over gravel beds. *Turbulence: perspectives on flow and sediment transport*, 1993.

KOLDITZ, Olaf. *Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2002.

KUNDU, Pijush K.; COHEN, Ira M.; DOWLING, David R. Turbulence. *Fluid Mechanics*, p. 603–697, 1 jan. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124059351000125>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

LARINIER, M. POOL FISHWAYS, PRE-BARRAGES AND NATURAL BYPASS CHANNELS. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, n. 364 supplément, p. 54–82, 2002.

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS. *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, p. 96–116, 1 jan. 1983.

LECHNER, Aaron; KECKEIS, Hubert; HUMPHRIES, Paul. Patterns and processes in the drift of early developmental stages of fish in rivers: a review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 2016 26:3, v. 26, n. 3, p. 471–489, 7 jun. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11160-016-9437-y>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

LEIDIG, Mathias; TEEUW, Richard. *Free software: A review, in the context of disaster management. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. [S.l.]: Elsevier B.V., 2015

LIAO, James C. *et al.* Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity. *Science*, v. 302, n. 5650, p. 1566–1569, 28 nov. 2003. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1088295>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

LIU, Minnan; RAJARATNAM, Nallamuthu; ZHU., David Z. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, n. 8, p. 765–777, ago. 2006.

LIU, Xiaofeng; GARCIA, Marcelo H. Computational Fluid Dynamics Modeling for the Design of Large Primary Settling Tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 137, n. 3, p. 343–355, 3 ago. 2010.

LOPES, Muller Moreira *et al.* An ideal compressible magnetohydrodynamic solver with parallel block-structured adaptive mesh refinement. *Computers and Fluids*, v. 173, p. 293–298, 15 set. 2018.

MALISKA, Clovis R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2004.

MARRINER, Bryan A. *et al.* Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a

vertical slot fishway. *Ecological Engineering*, v. 63, p. 88–101, 1 fev. 2014.

MARTINEZ, CARLOS; SANTOS, Hersília; POMPEU, Paulo. Estabelecimento de Parâmetros Hidráulicos para Escadas de Peixes do Tipo Ranhura Vertical Baseados em Características de Espécies Neotropicais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 1, p. 99–112, 2009.

MENDONÇA, Mateus. *ESTUDO HIDRÁULICO EM MODELO REDUZIDO DE DESCARREGADORES DE CHEIAS: UTILIZAÇÃO DE CONCHAS DE ROLO NA DISSIPACÃO DE ENERGIA DO ESCOAMENTO*. . [S.l: s.n.], 2013.

MIRANDA, Wendel Rodrigues; NASCIMENTO JUNIOR, Edson Dias; REZENDE, Andre Luiz Tenorio. Simulação numérica de uma bolha de separação em bordo arredondado utilizando equações médias de Reynolds. 17 out. 2013, [S.l: s.n.], 17 out. 2013.

MOONEY, Kyle G; VOSKUILEN, Tyler. Performance Evaluation of Existing and new VoF simulation techniques: solving, interface treatment, and dynamic meshes. 2014. Disponível em: <www.iconCFD.com>. Acesso em: 4 ago. 2021.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. *Deep-sea research. Part B, Oceanographic literature review*. [S.l.]: Pergamon Press, 1979. v. 10.

NADAOKA, Kazuo; YAGF, Hiroshi. *SHALLOW-WATER TURBULENCE MODELING AND HORIZONTAL LARGE-EDDY COMPUTATION OF RIVER FLOW*. . [S.l: s.n.], 1998.

NESTLER, J. M. *et al*. Optimum fish passage and guidance designs are based in the hydrogeomorphology of natural rivers. *River Research and Applications*, v. 24, n. 2, p. 148–168, 1 fev. 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rra.1056>. Acesso em: 4 ago. 2021.

NEXTFOAM. *Boundary Conditions - OpenFOAM-4.1*. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:sgkg_zFVR0cJ:www.nextfoam.co.kr/lib/download.php%3Fidx%3D135228%26sid%3D235c1d3fc28364657dbb43ccfe025b25+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 4 ago. 2020.

OPENCFO. *OpenFOAM: API Guide: continuousGasKEpsilon< BasicTurbulenceModel > Class Template Reference*. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/classFoam_1_1RASModels_1_1continuousGasKEpsilon.html>. Acesso em: 4 ago. 2021a.

OPENCFO. *OpenFOAM: API Guide: Finite volume numerical schemes*. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/group__grpFvSchemes.html>. Acesso em: 4 abr. 2021b.

OPENCFO. *OpenFOAM: API Guide: kEqn< BasicTurbulenceModel > Class Template Reference*. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/classFoam_1_1LESModels_1_1kEqn.html>. Acesso em: 4 abr. 2021c.

OPENCFO. *OpenFOAM: User Guide: interFoam*. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-multiphase-interFoam.html>. Acesso em: 4 abr. 2021d.

PINHEIRO, Abgail Paula; SANTOS, Hersília de Andrade e. BUEIRO STAIR PIPE PARA

PASSAGEM DE PEIXES : MODELO COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL. 2017.

POPE, Stephen B. Turbulent Flows. *Measurement Science and Technology*, v. 12, n. 11, p. 2020, 2001.

PORTO, Rodrigo de Melo. *Hidráulica básica*. [S.l.]: EESC, 2004.

QUARANTA, E. *et al.* Turbulent flow field comparison and related suitability for fish passage of a standard and a simplified low-gradient vertical slot fishway. *River Research and Applications*, v. 33, n. 8, p. 1295–1305, 2017.

RAJARATNAM, Nallamuthu; VAN DER VINNE, Gary; KATOPODIS, Christos. Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 112, n. 10, p. 909–927, 1986.

RAMAMURTHY, A. S.; HAN, S. S.; BIRON, P. M. Three-Dimensional Simulation Parameters for 90° Open Channel Bend Flows. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 27, n. 3, p. 282–291, 17 maio 2013. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000209>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

ROCHA, P. A. Costa *et al.* A case study on the calibration of the k- ω SST (shear stress transport) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils. *Energy*, v. 97, p. 144–150, 15 fev. 2016.

SANAGIOTTO, Daniela; ROSSI, Júlia; BRAVO, Juan. Applications of Computational Fluid Dynamics in The Design and Rehabilitation of Nonstandard Vertical Slot Fishways. *Water*, v. 11, n. 2, p. 199, 24 jan. 2019. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/199>>. Acesso em: 18 maio 2019.

SANTOS, Hersilia A. *et al.* Stairs pipe culverts: flow simulations and implications for the passage of European and Neotropical fishes. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1713918>, v. 6, n. 1, p. 36–52, 2 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24705357.2020.1713918>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

SHARMA, Anurag; MADDIRALA, Ajay Kumar; KUMAR, Bimlesh. Modified singular spectrum analysis for despiking acoustic Doppler velocimeter (ADV) data. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 117, p. 339–346, 1 mar. 2018.

SILVA, Ana T. *et al.* Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering*, v. 44, p. 314–328, jul. 2012a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857412001334>>. Acesso em: 18 maio 2019.

SILVA, Ana T. *et al.* Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering*, v. 44, p. 314–328, jul. 2012b.

SILVEIRA NETO, Aristeu. *Fundamentos da turbulência nos fluidos*. [S.l.: s.n.], 2002.

SLATER, J. *Tutorial on CFD Verification & Validation*. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/tutorial.html>>. Acesso em: 29 nov. 2019.

SMITH, David L. *et al.* Use of the Average and Fluctuating Velocity Components for Estimation of Volitional Rainbow Trout Density. *Transactions of the American Fisheries Society*, v. 135, n. 2, p. 431–441, mar. 2006.

SOUZA, José Francisco Almeida De *et al.* Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, n. 1, p. 21–41, mar. 2011.

STAMOU, Anastasios I. *et al.* Verification of a 3D CFD model for vertical slot fish-passes. *Environmental Fluid Mechanics* 2018 18:6, v. 18, n. 6, p. 1435–1461, 1 jun. 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10652-018-9602-z>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

TARRADE, Laurent *et al.* Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. 16 set. 2008, [S.l.]: Springer, 16 set. 2008. p. 177–188. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-008-9416-y>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

TENNEKES, Hendrik;; LUMLEY, John; *A First Course in Turbulence*. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=h4coCj-IN0cC&printsec=frontcover&dq=a+first+course+in+turbulence&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKewi60p_L8vTIAhW6FbkGHUiZATYQ6AEIKTAA#v=onepage&q=a first course in turbulence&f=false](https://books.google.com.br/books?id=h4coCj-IN0cC&printsec=frontcover&dq=a+first+course+in+turbulence&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKewi60p_L8vTIAhW6FbkGHUiZATYQ6AEIKTAA#v=onepage&q=a%20first%20course%20in%20turbulence&f=false)>. Acesso em: 18 nov. 2019.

VAN BALEN, W.; BLANCKAERT, K.; UIJTTEWAAL, W. S.J. *Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS*. [S.l: s.n.], 2010. v. 11.

VERSTEEG, Henk Kaarle;; MALALASEKERA, Weeratunge. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. [S.l.]: Pearson education, 2007.

WAHL, Tony L. Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. v. 128, n. 1, p. 117–126, 2003.

WANG, Wenqing; KOLDITZ, Olaf. Object-oriented finite element analysis of thermo-hydro-mechanical (THM) problems in porous media. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 69, n. 1, p. 162–201, 1 jan. 2007.

WHITE, Frank. *Mecânica dos Fluidos*. [S.l: s.n.], 2003.

WILLIAN, Jez; BRAGA E RONEI, B; POPPI, Jesus. *VALIDAÇÃO DE MODELOS DE CALIBRAÇÃO MULTIVARIADA: UMA APLICAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DE PUREZA POLIMÓRFICA DE CARBAMAZEPINA POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO*. *Quim. Nova*. [S.l: s.n.], 2004.

WOLF DYNAMICS. *Tips and tricks in OpenFOAM®*. 2020.

YOSHIZAWA, Akira; HORIUTI, Kiyosi. A Statistically-Derived Subgrid-Scale Kinetic Energy Model for the Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows. <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.54.2834>, v. 54, n. 8, p. 2834–2839, 29 nov. 1985. Disponível em: <<https://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.54.2834>>. Acesso em: 29 jul. 2021.

ZENS, Bernhard *et al.* Movement patterns and rheoreaction of larvae of a fluvial specialist (nase, *Chondrostoma nasus*): The role of active versus passive components of behaviour in dispersal. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 75, n. 2, p. 193–200, 2018. Disponível em: <www.nrcresearchpress.com/cjfas>. Acesso em: 29 jun. 2021.