

ESTUDO CFD DE SOLEIRAS DO TIPO PIANO KEYS

Comparação entre Tipo A e Tipo B

JÚLIA SOFIA REIS SIMÕES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS
E AMBIENTE**

Orientador: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

Coorientador: Doutor Lourenço Sassetti Janeira da Silva Mendes

JUNHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e ao meu irmão

It's conflict, and it's compromise, (...) and it's very, very exciting.

La La Land (2016)

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, a Professora Doutora Elsa Carvalho pela sua simpatia, tempo disponibilizado, motivação e conhecimento, e o Doutor Lourenço Sassetti Mendes, que me deu a conhecer a Modelação de Flúidos Computacional, uma área que me era totalmente desconhecida, pela sua disponibilidade, constante ajuda e palavras de incentivo, sem dúvida ambos um pilar indispensável para a conclusão desta etapa.

Aos meus amigos em casa, Fátima, – o Martim, os Tiagos, os Guilhermes, o Marco, o Catarino, o Ricardo, o Kiko e os demais – o grupinho dos meninos que me viu crescer e que sempre estiveram presentes. Que daqui a uns anos nos continuemos a juntar para jogar Monopólio.

À Inês, mais que uma melhor amiga, quase uma irmã, que celebra as minhas vitórias como se fossem dela.

Às que fizeram do Porto casa – a Leonor, a Bea e a Sofia – e tornaram estes 5 anos mais leves apenas pela sua amizade. Que os cafés no DEC, os almoços na cantina e as jantaradas no 1266 deem lugar a novos encontros, com o equivalente que a vida adulta nos trouxer, juntas.

Aos meus amigos da água - a Isabela, o Alex, o Chico e o Lino – que durante o mestrado se tornaram a companhia de todos os dias e pelos quais estou muito agradecida.

Um agradecimento especial à minha família, os meus Pais e o meu irmão, pela compreensão, paciência e apoio incondicional, não só durante a escrita da dissertação, mas ao longo dos 5 anos de curso.

RESUMO

A segurança e eficiência de infraestruturas hidráulicas, em particular durante a descarga de caudais em eventos de cheia, são fatores determinantes no seu estudo e dimensionamento. As soleiras do tipo *Piano Key Weir* (PKW) são caracterizadas por uma geometria que permite um maior comprimento de descarga sem a necessidade de aumentar a largura da barragem ou do canal em que sem encontram instaladas. Por este motivo, nos últimos anos têm sido utilizadas como uma alternativa inovadora a soleiras retilíneas ou de labirinto.

Esta dissertação apresenta um estudo comparativo do desempenho hidráulico de soleiras do tipo *Piano Keys* (PKW), focando-se nas configurações do tipo A e tipo B. A investigação foi desenvolvida com recurso a modelação CFD, através do *software* de código aberto *OpenFOAM v2412*, utilizando o modelo *interFoam*, adequado para escoamentos multifásicos com superfície livre, como é característico em estruturas hidráulicas.

A metodologia adotada envolveu a definição de um caso de estudo baseado no caudal médio das soleiras PKW existentes no mundo, a criação de modelos geométricos tridimensionais em ambiente CAD (*FreeCAD*), a geração de malhas computacionais adaptadas para simulações bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), o cálculo CFD e análise dos resultados. As simulações bidimensionais permitiram estimar o desempenho isolado e aproximado de teclas interiores e exteriores, enquanto as simulações tridimensionais ofereceram uma visão global e realista do escoamento sobre a estrutura completa.

Foram ainda aplicadas abordagens teóricas para estimar a capacidade de descarga de cada tipologia, permitindo a comparação dos resultados obtidos numericamente com previsões analíticas. Esta comparação revelou coerência nas tendências observadas, apesar de algumas limitações no que diz respeito aos limites dos modelos simulados.

Os resultados demonstraram que, na gama de caudais analisados, a configuração tipo B apresentou maior eficiência hidráulica, com carga hidráulica sobre a soleira inferior para o mesmo valor de caudal. Esta superioridade manteve-se ao longo de todas as simulações realizadas, confirmando o melhor desempenho da tipologia B no caso estudado.

A presente dissertação contribui assim para uma melhor compreensão do comportamento hidráulico das soleiras PKW e para a promoção de soluções mais eficientes e seguras em projetos de descarregadores de barragens, destacando o papel da modelação CFD como ferramenta de apoio ao projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Soleiras tipo Piano Keys, Estruturas hidráulicas, Comportamento hidráulico, CFD, *OpenFOAM*.

ABSTRACT

The safety and efficiency of hydraulic structures, particularly during the flow discharge in flood events, are determining factors in their study and design. Piano Key Weir (PKW) type sills are characterized by a geometry that provides a higher discharge length without the need to increase the width of the dam or channel in which are installed. For this reason, in recent years they have been used as an innovative alternative to traditional straight or labyrinth sills.

This dissertation presents a comparative study of the hydraulic performance of Piano Keys weirs (PKW), focusing on the type A and type B configurations. The research was carried out using CFD modelling, through the open-source software *OpenFOAM*, using the *interFoam* solver, suitable for two-phase flows with a free surface, characteristic of hydraulic structures.

The adopted methodology involved the creation of geometric models in a CAD software (*FreeCAD*), the generation of computational meshes adapted for two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) simulations and the definition of a case study based on the average flow of the existing PKW. The two-dimensional simulations made it possible to assess the isolated performance of inlet and outlet keys, while the three-dimensional simulations offered a global and realistic view of the flow over the entire structure.

Theoretical approaches were also applied to estimate the discharge capacity of each typology, allowing to compare the obtained numerical results with analytical predictions. This comparison revealed consistency in the trends observed, despite some limitations in the geometric ratios of the simulated models.

The results showed that, for the range of analysed flow rates, the type B configuration was more hydraulically efficient, with lower values of the hydraulic head for the same flow rate. This superiority was maintained throughout all the simulations carried out, confirming the good performance of type B in the case studied.

This dissertation contributes to a better understanding of the hydraulic behaviour of the Piano Key weirs and to the promotion of more efficient and safer solutions in dam spillway designs, highlighting the role of CFD modelling as a design support tool.

KEYWORDS: Piano Key Weir, Hydraulic structures, Hydraulic behaviour, CFD, *OpenFOAM*

ÍNDICE GERAL	
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS.....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	3
2.1. DESCARREGADORES DE CHEIAS	3
2.2. SOLEIRAS DESCARREGADORAS	5
2.3. SOLEIRAS DO TIPO PIANO KEYS	6
2.3.1. GEOMETRIA.....	7
2.3.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS A E B.....	9
2.3.3. CAPACIDADE DE VAZÃO DE SOLEIRAS DO TIPO PIANO KEYS	12
2.3.4. AS SOLEIRAS TIPO PIANO KEYS PELO MUNDO	16
2.4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM ESTRUTURAS HIDRÁULICAS	19
2.4.1. EVOLUÇÃO DA MODELAÇÃO: DA FÍSICA À COMPUTACIONAL	19
2.4.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES	19
2.4.3. EQUAÇÕES GOVERNANTES	21
2.4.4. MÉTODOS E MODELOS NUMÉRICOS.....	24
2.4.5. MÉTODOS E MODELOS NUMÉRICOS ALTERNATIVOS	25
3. METODOLOGIA DO ESTUDO NUMÉRICO	27
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS (TIPO A E TIPO B).....	27
3.2. MODELAÇÃO GEOMÉTRICA EM CAD.....	29
3.3. GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL	34
3.3.1. MALHA 2D.....	35
3.3.2. MALHA 3D.....	37
3.4. SOFTWARE OPENFOAM E SOLVER INTERFOAM	39
3.5. CONFIGURAÇÃO DO CASO DE ESTUDO EM OPENFOAM.....	39

3.6. EXEMPLOS DE SIMULAÇÕES	41
3.6.1. SIMULAÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D).....	41
3.6.2. SIMULAÇÕES TRIDIMENSIONAIS (3D).....	42
 4. ANÁLISE DE RESULTADOS	 45
4.1. ESTIMATIVA TEÓRICA DA VAZÃO	45
4.1.1. KABIRI-SAMANI E JAVAHERI (2012)	46
4.1.2. LEITE RIBEIRO ET AL. (2012).....	47
4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 2D.....	49
4.2.1. CURVA DE VAZÃO	49
4.2.2. CAMPO DE VELOCIDADE.....	55
4.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 3D.....	58
4.3.1. CURVA DE VAZÃO	58
4.3.2. CAMPO DE VELOCIDADE.....	60
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM TEÓRICA E NUMÉRICA	63
4.5. COMPARAÇÕES ENTRE SIMULAÇÕES 2D E SIMULAÇÕES 3D.....	64
 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	 67
5.1. CONCLUSÕES E SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS	67
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	69
ANEXOS	I
ANEXO A.1 – VISTA TRIDIMENSIONAL (100, 150 E 170 M ³ /s)	I
ANEXO A.2 – VISTA SUPERIOR (100, 150 E 170 M ³ /s).....	III
ANEXO A.3 – CAMPO DE VELOCIDADE (A EXTERIOR: 100, 150 E 170 M ³ /s).....	V
ANEXO A.4 – CAMPO DE VELOCIDADE (A INTERIOR: 100, 150 E 170 M ³ /s)	VI
ANEXO A.5 - CAMPO DE VELOCIDADE (B EXTERIOR: 100, 150 E 170 M ³ /s).....	VII
ANEXO A.6 – CAMPO DE VELOCIDADE (B INTERIOR: 100, 150 E 170 M ³ /s)	VIII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Traçado das soleiras em labirinto (Blancher, Montarros e Laugier, 2011)	6
Figura 2 - Barragem de Santa Justa, soleira em labirinto trapezoidal (Minds, [s.d.])	6
Figura 3 - Soleiras em Labirinto (à esquerda) e soleiras em piano (à direita) (Blancher, Montarros e Laugier, 2011)	7
Figura 4 - Distinção entre teclas interiores (<i>inlet key</i>) e exteriores (<i>outlet key</i>) (Pralong <i>et al.</i> , 2011)....	7
Figura 5 - Geometria (a) e módulo (b) de uma soleira do tipo PKW (Pralong <i>et al.</i> , 2011).	9
Figura 6 - Corte Transversal (à esquerda) e visão em planta (à direita) de uma PKW (Pralong <i>et al.</i> , 2011).	9
Figura 7 - Tipos de soleiras tipo Piano Keys (adaptado de Eltarabily <i>et al.</i> , 2024).....	10
Figura 8 - Esquemas do Tipo A (a) e Tipo B (b) das PKW (Anderson, 2011).....	11
Figura 9 - Condições de escoamento livre (a)) e escoamento submerso (b)) (Kabiri-Samani e Javaheri, 2012)	11
Figura 10 – Coeficientes de vazão para diferentes tipos de soleiras (Blancher <i>et al.</i> 2011, cit. por Denys, 2017)	12
Figura 11 - Comparação entre curvas de vazão (Pfister & Schleiss, 2013a referido em Denys 2017).	15
Figura 12 - Barragem de Goulours (<i>Monograph Barrage de Goulours</i> , [s.d.]).....	16
Figura 13 - Barragem de Malarce (<i>Data Sheet (PKW Malarce, EDF)</i> , [s.d.]; <i>Monograph Barrage de Malarce</i> , [s.d.]).....	17
Figura 14 - Localização das soleiras PKW pelo mundo (<i>World Register of Piano Key weirs prototypes</i> , 2020).	17
Figura 15 - Desenvolvimento tradicional vs. abordagem com CFD	20
Figura 16 – a) Barragem de Campauleil (<i>Data Sheet (PKW Campauleil, EDF)</i> , [s.d.]) e b) esquema dos parâmetros da soleira PKW	28
Figura 17 - Perfil Transversal estimado da soleira PKW da barragem de Campauleil	29
Figura 18 - Elementos constituintes, modelados individualmente: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)	30
Figura 19 - Variáveis de parametrização no <i>FreeCAD 1.0</i> para Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)	30
Figura 20 - Resultado da operação booleana <i>Fuse</i> no <i>FreeCAD 1.0</i> : Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita).....	31
Figura 21 - Resultado do espelhamento simétrico no <i>FreeCAD 1.0</i> : Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita).....	31
Figura 22 - Geometria final, resultado da repetição linear do módulo: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita).....	31

Figura 23 - Vista em planta da soleira: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)	32
Figura 24 - Vista lateral da soleira: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)	32
Figura 25 - <i>Pads</i> posicionados para a obtenção dos perfis verticais: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita).....	33
Figura 26 - Perfil 2D: Tecla Exterior Tipo A	33
Figura 27 - Perfil 2D: Tecla Interior Tipo A.....	33
Figura 28 - Perfil 2D: Tecla Exterior Tipo B	34
Figura 29 - Perfil 2D: Tecla Interior Tipo B.....	34
Figura 30 - Sequência de geração da malha	35
Figura 31 - Exemplo de fronteiras do domínio 2D: <i>inlet</i> (a verde), <i>atmosphere</i> (a azul), <i>outlet</i> (a vermelho) e <i>lowerWall</i> (a cinzento).....	36
Figura 32 - Tipos de fronteiras e grupos atribuídos (Malha 2D)	37
Figura 33 - Exemplo de fronteiras 3D: <i>front</i> e <i>back</i> (a cinzento transparente), <i>inlet</i> (a verde), <i>atmosphere</i> (a azul), <i>outlet</i> (a vermelho) e <i>lowerWall</i> (a cinzento opaco).....	38
Figura 34 - Tipos de fronteiras e grupos atribuídos (Malha 3D)	38
Figura 35 - Exemplo da definição do caudal a simular nas simulações 2D	42
Figura 36 - Exemplo da definição do caudal a simular nas simulações 3D	43
Figura 37 - Curva teórica da capacidade de descarga (Método de Kabiri-Samani e Javaheri).....	47
Figura 38 - Curva teórica da capacidade de descarga (Kabiri-Samani et al. vs Leite Ribeiro et al.)	48
Figura 39 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 190 \text{ m}^3/\text{s}$).....	50
Figura 40 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 170 \text{ m}^3/\text{s}$).....	50
Figura 41 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$).....	50
Figura 42 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$).....	51
Figura 43 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$).....	51
Figura 44 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) para ambas as teclas do Tipo A.....	53
Figura 45 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) para ambas as teclas do Tipo B.....	53
Figura 46 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) das teclas exteriores	54
Figura 47 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) das teclas interiores	54
Figura 48 - Campo de velocidades (2D, A-Exterior, $190 \text{ m}^3/\text{s}$).....	55
Figura 49 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, A-Exterior, $190 \text{ m}^3/\text{s}$).....	56
Figura 50 - Campo de velocidades (2D, B-Exterior, $190 \text{ m}^3/\text{s}$).....	56
Figura 51 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, B-Exterior, $190 \text{ m}^3/\text{s}$).....	56
Figura 52 - Campo de velocidades (2D, A-Interior, $190 \text{ m}^3/\text{s}$)	57

Figura 53 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, A-Interior, 190 m ³ /s)	57
Figura 54 - Campo de velocidades (2D, B-Interior, 190 m ³ /s).....	57
Figura 55 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, B-Interior, 190 m ³ /s)	58
Figura 56 - Relação entre o caudal (<i>Q</i>) e a carga hidráulica (<i>H</i>) obtidas das simulações tridimensionais	59
Figura 58 - Vista tridimensional da soleira de Tipo A (190 m ³ /s)	60
Figura 59 - Vista tridimensional da soleira de Tipo B (190 m ³ /s)	61
Figura 60 - Vista superior da soleira de tipo A (190 m ³ /s)	61
Figura 61 - Vista superior da soleira de Tipo B (190 m ³ /s).....	61
Figura 62 - Vista tridimensional da soleira de Tipo A (120 m ³ /s)	62
Figura 63 - Vista tridimensional da soleira de Tipo B (120 m ³ /s)	62
Figura 64 - Vista superior da soleira de Tipo A (120 m ³ /s).....	62
Figura 65 - Vista superior da soleira de Tipo B (120 m ³ /s).....	63
Figura 65 - Comparação entre as curvas teóricas (tracejado) e as simuladas (contínuas).....	64
Figura 66 - Campo de velocidades (3D, A Exterior, Q=190 m ³ /s, H=1,59 m).....	64
Figura 67 - Campo de velocidades (3D, A Interior, 190 m ³ /s, H=1,59 m)	65
Figura 68 - Campo de velocidades (3D, B Exterior, 190 m ³ /s, H=1,48 m)	65
Figura 69 - Campo de velocidades (3D, B Interior, 190 m ³ /s, H = 1,48 m)	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos e características de descarregadores (Lencastre, 2001)	4
Tabela 2 – Características geométricas de uma soleira do tipo Piano Keys (Pralong <i>et al.</i> , 2011)	8
Tabela 3 – Limites de Aplicabilidade (Pfister e Schleiss 2013a, Machiels et al. 2014, cit. por Denys 2017)	13
Tabela 4 - Características de algumas soleiras descarregadoras PKW existentes (<i>World Register of Piano Key weirs prototypes</i> , [s.d.])	18
Tabela 5 - Valores de <i>phase fraction</i> no método <i>Volume of Fluid</i>	22
Tabela 6 - Coeficientes empíricos padrão (Modelo RANS <i>k-ε</i>)	23
Tabela 7 - modelos numéricos utilizados (<i>system/fvSchemes</i>).....	24
Tabela 8 - Características geométricas da soleira PKW da barragem de Campauleil, França	27
Tabela 9 - Parâmetros de apoio à análise da soleira de Campauleil (Gomes, 2018).....	28
Tabela 10 - Parâmetros geométricos finais para as simulações numéricas	29
Tabela 11 - Função e localização dos ficheiros da configuração de um caso <i>OpenFOAM</i>	40
Tabela 12 – Exemplo de parâmetros de controlo da simulação (<i>system/controlDict</i>)	41
Tabela 13- Propriedades dos fluídos (<i>constant/ transportProperties</i>).....	41
Tabela 14 - Parâmetros Geométricos (<i>Data Sheet (PKW Campauleil, EDF)</i> , [s.d.])	46
Tabela 15 - Rácios de referência (Gomes, 2018).....	46
Tabela 16 - Parâmetros calculados	46
Tabela 17 - Valores de H expectáveis pelo método teórico	47
Tabela 18 - Resultados retirados das simulações 2D	52
Tabela 19 - Resultados retirados das simulações 3D	59

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- a – Fator corretivo da fórmula de Leite Ribeiro *et. al* (2012) [-]
- b - Fator corretivo da fórmula de Leite Ribeiro *et. al* (2012) [-]
- B – Comprimento total da soleira PKW [m]
- B_b - Comprimento da base da soleira PKW [m]
- B_i – Comprimento da tecla interior [m]
- B_o – Comprimento tecla exterior [m]
- C_{1ε}, C_{2ε} - Constantes de ajustamento do modelo *k-ε* [-]
- C_d - Coeficiente de vazão [-]
- C_o – Número de Courant [-]
- C_μ - Coeficiente de viscosidade dinâmica [-]
- D_ε – Coeficiente de difusão efetivo de ε [m²/s]
- D_k - Coeficiente de difusão efetivo de k [m²/s]
- $\vec{F}_\sigma$ – Força de tensão superficial [kg/m²/s²]
- $\vec{g}$ - Vetor da aceleração gravítica [m/s²]
- H – Carga hidráulica acima da soleira [m]
- k – Energia cinética turbulenta [m²/s²]
- $\vec{k}$ – Curvatura entre ambas as fases do escoamento [m⁻¹]
- K_{wi}, K_{wo} – Coeficiente de variação da velocidade na fórmula de Machiels (2012) [-]
- L – Comprimento não linear da crista descarregadora [m]
- N – Número de módulos de uma soleira PKW [-]
- p* - Pressão pseudo-dinâmica [kg/m/s²]
- p - Fator corretivo da fórmula de Leite Ribeiro *et. al* (2012) [-]
- P – Altura da soleira PKW [m]
- P_b – Altura da base da soleira PKW [m]
- P_e – Altura equivalente da soleira PKW [m]
- P_i – Altura da tecla interior [m]
- P_m – Altura da crista até ao centro do fundo inclinado [m]
- P_o – Altura da tecla exterior [m]
- P_T – Altura total (soleira + barragem onde está instalada) [m]
- q – Caudal unitário por comprimento não linear da soleira [m³/s/m]
- Q – Caudal [m³/s]

- q_d – Caudal unitário da projeção a montante [$m^3/s/m$]
 Q_{PKW} – Caudal descarregado por uma soleira PKW [m^3/s]
 Q_s – Caudal descarregado por uma soleira convencional [m^3/s]
 q_s – Caudal unitário paredes laterais [$m^3/s/m$]
 q_u – Caudal unitário da projeção a jusante [$m^3/s/m$]
 r – Razão entre o caudal descarregado por uma soleira PKW e uma soleira convencional [-]
 R – Altura do parapeito das teclas [m]
 S – Tensor de deformação [s^{-1}]
 S_i – Inclinação da tecla interior [-]
 S_o – Inclinação da tecla exterior [-]
 t – Tempo (s)
 T – Espessura da parede de uma soleira PKW [m]
 U – Velocidade [m/s]
 $\vec{V}$ – Vetor velocidade RANS [m/s]
 W – Largura total [m]
 W_i – Largura da tecla interior [m]
 W_o – Largura da tecla exterior [m]
 W_u – Largura de um módulo [m]
 $\vec{X}$ – Vetor posição [m]
 Z – Profundidade da água [m]
 α – Fração volumétrica de fase [-]
 α, β – Coeficientes de inclinação da tecla interior na fórmula de Machiels (2012) [-]
 ε – Taxa de dissipação da energia turbulenta [m^2/s^3]
 ν_t – Viscosidade cinemática turbulenta [m^2/s]
 ρ – Densidade [kg/m^3]
 σ – Coeficiente de tensão superficial [kg/s^2]
 μ – Viscosidade dinâmica do fluido [$kg/m/s$]
 μ_t – Viscosidade turbulenta [$kg/m/s$]

CAD – *Computer Aided Design*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DES – *Detached Eddy Simulation*

DNS – *Direct-Numerical Simulation*

HPC – *High Performance Computer*

LBM – *Lattice Boltzman Method*

LES – *Large Eddy Simulation*

PIMPLE - *Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations*

PISO - *Pressure-Implicit with Splitting Operators*

PKW – *Piano Key Weir*

RANS – *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*

SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

SPH – *Smoothed Particle Hydrodynamics*

STL – *Standard Triangle Language*

VoF – *Volume of Fluids*

WSL – *Windows Subsystem for Linux*

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A segurança e eficiência de infraestruturas hidráulicas, nomeadamente a sua eficácia na descarga de caudais em eventos de cheia, são fatores determinantes no seu estudo e dimensionamento. Neste âmbito, as soleiras do tipo *Piano Key Weir* (PKW) surgem, ao longo dos últimos anos, como uma alternativa inovadora a soleiras retas ou de labirinto tradicionais. Esta solução hidráulica é caracterizada por uma geometria particular, que permite o aumento da descarga por unidade de largura sem a necessidade de aumentar a largura da barragem ou do canal em que se encontra instalada, o que se revela vantajoso para a sua aplicação em locais com limitações topográficas. Esta solução, desde 2006, tem vindo a ser adotada em diversas barragens a nível internacional.

As soleiras PKW apresentam diferentes configurações, sendo as mais comuns os tipos A e B, que se distinguem pela orientação das suas “teclas”. A compreensão do comportamento hidráulico de cada uma destas geometrias, nomeadamente no que diz respeito à sua capacidade de descarga e ao padrão de escoamento, é essencial para otimizar o seu desempenho, evidenciar as suas vantagens e promover aplicação destas estruturas em novos projetos.

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo comparativo da eficiência hidráulica, especificamente a vazão, entre as configurações do tipo A e tipo B das soleiras do tipo *Piano Keys*, através de técnicas de Dinâmica de Flúidos Computacional (CFD). Para tal, recorreu-se ao *OpenFOAM*, um software de código aberto, amplamente utilizado devido à sua vasta gama de modelos adaptados a diferentes tipos de escoamento. Um deles, designado *interFoam*, foi utilizado neste estudo por ser especificamente desenvolvido para simular escoamentos multifásicos com superfície livre, como é o caso de escoamentos ar-água característicos neste tipo de estruturas hidráulicas.

A modelação geométrica das soleiras foi desenvolvida em ambiente CAD (*Computer Aided Design*), recorrendo ao software *FreeCAD*, e serviu de base para a geração das malhas computacionais a utilizar nas simulações numéricas.

Resolveram-se as equações de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) pelo método dos volumes finitos, e a posição da interface ar-água foi determinada através do método *Volume of Fluid* (VoF).

Utilizando esta metodologia pretende-se, ao longo desta dissertação, caracterizar as soleiras PKW e as suas variantes geométricas, adquirir uma base de competências no domínio da modelação CFD aplicada a estruturas hidráulicas, e analisar e comparar o desempenho hidráulico de dois tipos de soleira (A e B), com simulações bidimensionais e tridimensionais.

Os resultados obtidos permitiram reforçar o conhecimento técnico recente sobre este tipo de soleiras e contribuir para a promoção de soluções mais eficientes e seguras no projeto de descarregadores de barragens.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De forma a proporcionar uma leitura fluida e organizada, esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos principais. Este primeiro capítulo introdutório, apresenta o enquadramento do tema, os objetivos e a estrutura do documento.

No segundo capítulo é realizado o enquadramento teórico do tema, resultante de uma revisão literatura existente. São descritas as soleiras do tipo *Piano Key Weir* (PKW), as suas configurações geométricas e aplicações, bem como os conceitos e equações fundamentais de Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD).

O terceiro capítulo é dedicado à metodologia do estudo numérico. Compreende a definição da geometria dos modelos a analisar, com base no caudal médio de soleiras PKW existentes, bem como a modelação geométrica das mesmas e o processo de geração das malhas computacionais, 2D para cada tecla e 3D para as geometrias completas. Descreve também a metodologia das simulações CFD realizadas, incluindo a definição das condições de fronteira, dos parâmetros de controlo e dos procedimentos utilizados.

No quarto capítulo procede-se à apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos, tanto os obtidos por estimativas teóricas como pelas simulações, comparando o funcionamento hidráulico das configurações do tipo A e tipo B, resultante das simulações 2D e 3D.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões gerais do estudo, destacando os principais contributos do trabalho, refletindo as suas limitações e sugerindo possíveis linhas de investigação futura.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. DESCARREGADORES DE CHEIAS

Os descarregadores são estruturas fundamentais na segurança das barragens, sendo concebidos para garantir o escoamento do caudal de cheia de projeto de forma eficiente, sem recorrer a outros dispositivos de descarga, como tomadas de água ou descargas de fundo. O funcionamento adequado destes órgãos é essencial para assegurar que os níveis de água máximos previstos nas albufeiras não são ultrapassados e que, a jusante de um aproveitamento, o caudal é restituído da forma mais semelhante possível ao escoamento natural, minimizando impactos ambientais e alterações hidrodinâmicas significativas.

A construção de uma barragem origina um desnível entre a superfície livre de água a montante e a jusante. Consequentemente, verifica-se uma diferença de carga hidráulica significativa.

Assim, é necessário induzir a dissipação da energia do escoamento na sua transição de montante para jusante, sendo frequentemente necessário construir dissipadores de energia, como por exemplo bacias de dissipação por ressalto hidráulico, jatos, complementando-as, por vezes, com proteções do leito do rio.

Os descarregadores de cheias podem ser classificados de acordo com dois critérios (Lencastre, 2001):

- A: Localização do descarregador no aproveitamento e meio de controlo do escoamento;
- B: Guiamento da lâmina líquida e tipo de dissipação de energia;

Tendo em conta os critérios apresentados, as características gerais dos diferentes tipos de descarregadores são as que se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos e características de descarregadores (Lencastre, 2001)

Critério	Classificação	Aplicabilidade	Controlo de escoamento
A. Localização e controlo do escoamento	A.1 Sobre a barragem	Barragens de Betão	Descarga livre, por sifão ou controlada por comporta
		Barragens de Aterro	Descarga livre
	A.2. Orifícios através da barragem	Barragens de Betão	Descarga controlada por comportas
	A.3. Canal de encosta	Barragens de qualquer tipo. Independente da estrutura.	Descarga livre ou controlada por comportas
	A.4. Poço, vertical ou inclinado	Barragens de terra ou de enrocamento. (poço, segundo de galeria sob a barragem) Barragens de qualquer tipo (galeria escavada)	Descarga livre ou controlada por comportas
	A.5 Fusível	Qualquer barragem (de emergência, lateral à barragem)	Descarga livre
B. Guiamento da lâmina líquida e tipo de dissipação	B.1. Queda livre e dissipação de energia no leito	Com e sem proteção do leito, com ou sem sobrelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1. ou A.2.	
	B.2. Queda guiada e trampolim de saída com dissipação no leito	Com e sem proteção do leito, com ou sem sobrelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1. ou A.2, A.3. e A.4.	
	B.3. Queda guiada e obra de dissipação de energia	Localização e controlo segundo A.1. ou A.2, A.3. e A.4.	

2.2. SOLEIRAS DESCARREGADORAS

Uma parte importante no projeto do descarregador de um aproveitamento hidráulico é o dimensionamento e definição da soleira descarregadora, estando estes condicionados pelo tipo de descarregador e pelas características do aproveitamento e do curso de água no qual se insere.

O dimensionamento da soleira é feito a partir de uma análise multicritério, cujo objetivo é a obtenção de soleiras que permitam uma descarga eficiente de caudais de cheia, a nível funcional, económico e de segurança.

A fixação de um nível máximo da superfície livre a montante do aproveitamento, correspondente à definição do valor de carga hidráulica máxima, $H_{\max}$, depende das seguintes variáveis (Carvalho, 2024):

- Carga hidráulica;
- Preço das comportas, se existirem;
- Capacidade de amortecimento de caudais de cheia;
- Áreas inundadas pela albufeira e custos de expropriação de terrenos;
- Tipo de descarga e a sua influência no escoamento a jusante.

A classificação das soleiras descarregadoras é realizada de acordo com diferentes critérios, como o perfil da superfície de contacto com a lâmina líquida ou o seu traçado em planta. Esta classificação é essencial para a compreensão do comportamento hidráulico de cada tipo de soleira e as respetivas características de descarga.

As soleiras descarregadoras podem ser classificadas como soleiras espessas ou soleiras delgadas, de acordo com a extensão da superfície de contacto com a lâmina líquida. Uma soleira é espessa quando o escoamento se faz ao longo de uma superfície de comprimento apreciável. Nas soleiras delgadas o escoamento é feito ao longo de uma aresta ou de um pequeno desenvolvimento (Carvalho, 2024).

No que respeita ao traçado em planta, as soleiras podem ser classificadas com base na configuração da crista descarregadora: retilíneas, em labirinto, em bico de pato, em leque, entre outros. De uma forma geral, a crista descarregadora com traçado não retilíneo permite um comprimento de descarga superior às soleiras retilíneas tradicionais para a mesma largura de implantação e, consequentemente, um aumento da vazão. Aproximadamente um terço das roturas de barragens ocorre devido à capacidade insuficiente de descarga dos descarregadores (Ouamane e F.Lempérière, 2006), sendo esta capacidade diretamente proporcional ao comprimento da crista. Por esse motivo, nos últimos anos tem-se privilegiado a adoção de soleiras cujas configurações permitam um desenvolvimento da crista superior ao do canal, permitindo uma maior vazão. Nestas configurações incluem-se as soleiras em labirinto e as soleiras do tipo *Piano Keys Weirs*, sendo estas últimas o foco desta dissertação.

As soleiras em labirinto são estudadas e adotadas há muitos anos e caracterizam-se pelo seu traçado poligonal, constituído por módulos cuja geometria pode ser retangular, trapezoidal ou triangular (Figuras Figura 1e Figura 2). Este tipo de soleira é muito utilizado quando a largura do descarregador é restrita ou quando o terreno de implantação apresenta limitações topográficas (Ouamane e F.Lempérière, 2006).

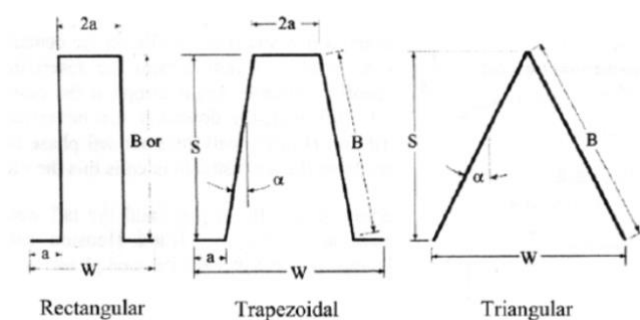


Figura 1 – Traçado das soleiras em labirinto (Blancher, Montarros e Laugier, 2011)



Figura 2 - Barragem de Santa Justa, soleira em labirinto trapezoidal (Minds, [s.d.])

As principais desvantagens deste tipo de soleiras, além dos custos elevados para caudais maiores, são o facto de não poderem ser usadas no topo de barragens de gravidade já existentes e requererem uma área maioritariamente plana para a sua implantação. Como resultado, a utilização das soleiras em labirinto é limitada, da ordem de uma em cada mil barragens (Ouamane, 2003).

As soleiras tipo *Piano Keys* constituem uma alternativa às soleiras em labirinto. Apresentam também um traçado da crista não retilíneo, permitindo um maior comprimento de descarga sem aumentar a base da estrutura e, consequentemente, uma maior capacidade de descarga, mas com a possibilidade de aplicação tanto em barragens novas como em estruturas pré-existentes.

2.3. SOLEIRAS DO TIPO PIANO KEYS

As soleiras do tipo *Piano Keys Weirs* (PKW) foram apresentadas como uma solução de construção simples e economicamente eficiente. Destacam-se pela sua aplicação em barragens de gravidade, tanto novas como pré-existentes, e pela capacidade de descarga de caudais específicos até $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (Ouamane, 2003; Ouamane e F.Lempérière, 2006).

Este tipo de soleira é muitas vezes referido como uma otimização das soleiras em labirinto (Schleiss, 2011), pois partilham características como o formato em planta retangular, que lhes confere a semelhança com as teclas de um piano, e o traçado descontínuo da crista descarregadora. No entanto, diferenciam-se pela redução da largura dos elementos e pelos seus fundos inclinados, com teclas alternadas, equilibradas em consola, que se projetam a montante e/ou a jusante, resultando numa área de base menor, quando comparada com uma soleira em labirinto retangular tradicional (Figura 3).

Uma das vantagens deste tipo de soleiras é o facto de, ao contrário da utilização de comportas mecânicas, que estão sujeitas a falhas, se não houver manutenções corretas, serem estruturas de segurança que, de forma permanente, conseguem aumentar o nível máximo de armazenamento ou a capacidade de descarga de um descarregador sem a necessidade de elevar toda a barragem (Denys, 2017).

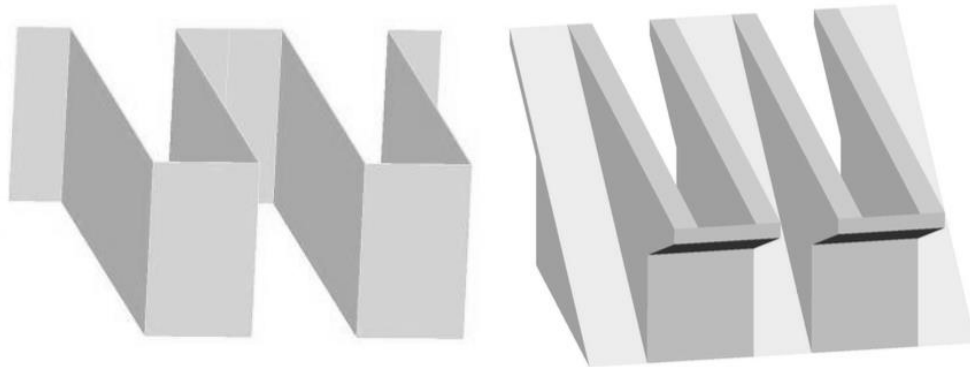


Figura 3 - Soleiras em Labirinto (à esquerda) e soleiras em piano (à direita) (Blancher, Montarros e Laugier, 2011)

2.3.1. GEOMETRIA

As soleiras tipo Piano Keys apresentam dois tipos de teclas: interiores (*inlet keys*) e exteriores (*outlet keys*) (Figura 4). As teclas interiores referem-se aos compartimentos alongados a jusante, delimitados por duas paredes laterais e a crista de jusante, enquanto as teclas exteriores correspondem aos compartimentos alongados a montante, delimitados igualmente por duas paredes e uma crista.

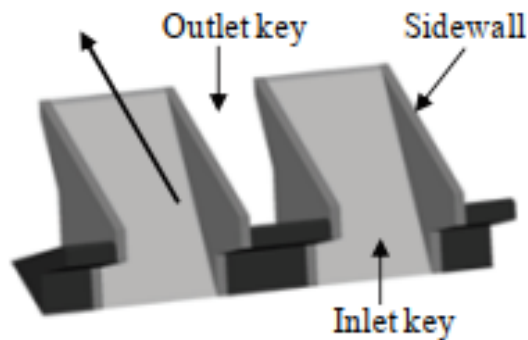


Figura 4 - Distinção entre teclas interiores (*inlet key*) e exteriores (*outlet key*) (Pralong *et al.*, 2011)

Pela sua geometria complexa, as características de descarga das soleiras do tipo PKW dependem de um maior número de parâmetros em comparação com outros tipos de soleiras. Para facilitar a sua investigação e o desenvolvimento de projetos, evitando ambiguidades, foi estabelecida uma nomenclatura uniforme para esses parâmetros (Pralong *et al.*, 2011), apresentados na Tabela 2 e ilustrados na Figura 5 e Figura 6.

Tabela 2 – Características geométricas de uma soleira do tipo Piano Keys (Pralong *et al.*, 2011)

Parâmetro	Sigla
Altura da tecla interior	P_i
Altura da tecla exterior	P_o
Altura da base	P_b
Altura da crista até ao centro do fundo inclinado	P_m
Altura da estrutura	P
Comprimento da tecla interior	B_i
Comprimento da tecla exterior	B_o
Comprimento da base	B_b
Comprimento total	B
Largura da tecla interior	W_i
Largura da tecla exterior	W_o
Largura total	W
Inclinação da tecla interior	S_i
Inclinação da tecla exterior	S_o
Espessura da parede	T_s
Comprimento não linear da crista	L

Pela análise da Tabela 2, destaca-se a forma como são agrupados os diferentes parâmetros: B é usado para comprimentos, W para larguras, P para alturas, L para o desenvolvimento da crista descarregadora, S para inclinações e T para espessuras, com índices i , o e b conforme se referem, respetivamente, às teclas interiores (*inlet*), teclas exteriores (*outlet*) ou base da estrutura. É importante ainda referir que muitas vezes estas estruturas são caracterizadas, não como um todo, mas em função do número de módulos (N). Um módulo representa a menor parte de uma estrutura completa, é composto por uma tecla interior completa (*inlet key*), uma parede lateral e uma metade de uma tecla exterior (*outlet key*) em cada lado, e caracterizado pela sua largura (W_u), como ilustrado na Figura 5b) (Pralong *et al.*, 2011).

Na literatura, em especial nos estudos de eficiência, a caracterização deste tipo de soleiras, é frequentemente realizada através de rácios obtidos a partir destes mesmos parâmetros geométricos, como por exemplo o comprimento da crista do descarregador em relação à largura da estrutura ($n=L/W$), os comprimentos das projeções interiores e exteriores (B_i/B_o), a relação entre as larguras das teclas interior e exterior (W_i/W_o) e a espessura relativa da parede em relação à altura total da estrutura (T_s/P) (Anderson, 2011).

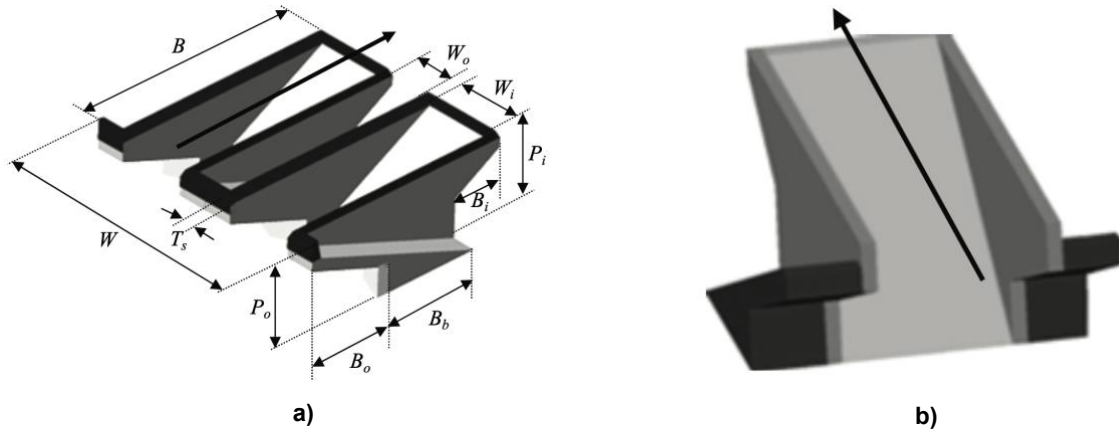


Figura 5 - Geometria (a) e módulo (b) de uma soleira do tipo PKW (Pralong *et al.*, 2011).

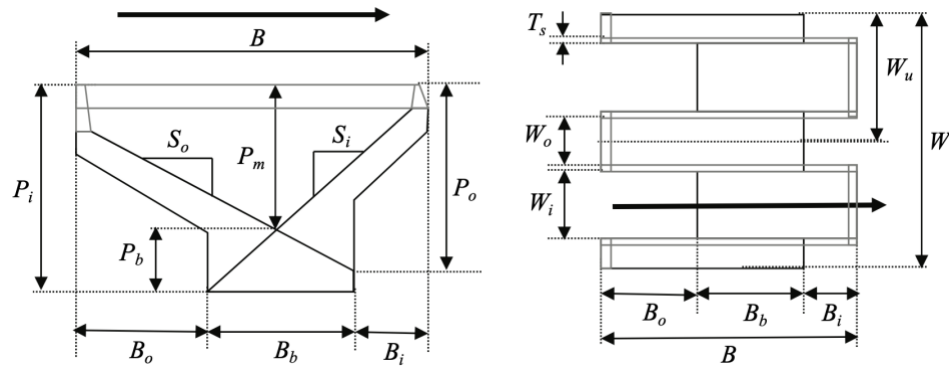


Figura 6 - Corte Transversal (à esquerda) e visão em planta (à direita) de uma PKW (Pralong *et al.*, 2011).

Nos últimos anos foram realizados vários estudos com o objetivo de analisar o efeito das características geométricas deste tipo de soleiras na sua capacidade de descarga (Eltarabily *et al.*, 2024), destacando-se as conclusões de Leite Ribeiro *et al.* (2012) e Anderson e Tullis (2013), citados por Eltarabily *et al.* (2024). De acordo com estes autores, as soleiras PKW têm maior capacidade de descarga quando o rácio entre os comprimentos das projeções das teclas (W_i/W_o) é cerca de 1,60, e que valores superiores deste rácio resultam numa diminuição da capacidade de descarga.

2.3.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS A E B

O estudo das soleiras tipo *Piano Keys* resultou na definição de quatro configurações que se distinguem pela sua geometria, nomeadamente na orientação das projeções das teclas e na simetria do seu arranjo (Figura 7): soleiras tipo A, com projeções a montante e a jusante; soleiras tipo B, com projeções apenas a montante; soleiras tipo C, com projeções apenas a jusante; e soleiras tipo D, sem projeções.

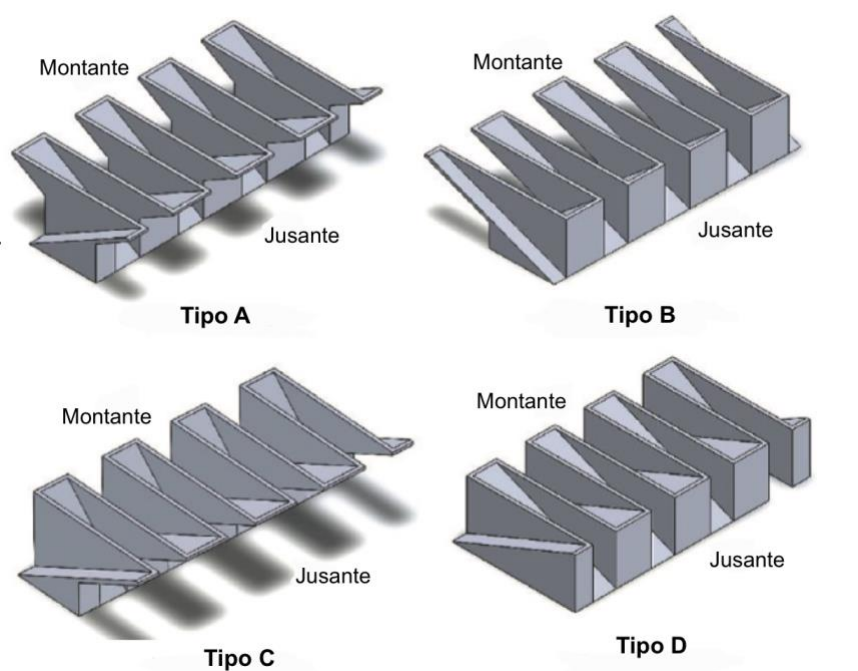


Figura 7 - Tipos de soleiras tipo Piano Keys (adaptado de Eltarabily *et al.*, 2024).

Das quatro configurações referidas destacam-se, nesta dissertação, os tipos A e B, dado que são as mais frequentemente utilizadas.

O Tipo A de soleiras do tipo *Piano Keys* (Figura 8a) caracteriza-se pela sua simetria, com projeções idênticas para montante e para jusante, ou seja, com alturas e comprimentos iguais ($P_i = P_o$ e $B_i = B_o$). Esta simetria garante uma distribuição uniforme das pressões hidrostáticas ao longo da estrutura. São estruturas autoequilibradas e possuem uma fundação reduzida, o que facilita a sua instalação em barragens de gravidade já existentes, contribuindo para o aumento da sua capacidade de vazão. Esta configuração facilita a utilização de betão pré-fabricado, permitindo a sua aplicação para valores do caudal específico até $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (Ouamane, 2003).

As soleiras do Tipo B (Figura 8b) diferenciam-se pela ausência de projeções das teclas interiores ($B_i = 0 \text{ m}$), apresentando apenas as teclas exteriores, alongadas a montante ($B_o > 0 \text{ m}$). Esta configuração é particularmente adequada para novas barragens, pois resulta em menores cargas estruturais para caudais específicos elevados (Ouamane, 2003).

As soleiras do tipo B apresentam duas vantagens principais (Ouamane, 2003):

- O caudal específico é superior ao da configuração Tipo A, para o mesmo comprimento, altura e custo.
- As cargas estruturais são inferiores para os prolongamentos a montante, uma vez que o peso do betão reduz a pressão da água em vez de a aumentar.

No entanto, nas soleiras Tipo B é mais complexa a utilização de elementos pré-fabricados, o que pode limitar a sua aplicabilidade em determinados projetos, em comparação com o Tipo A.

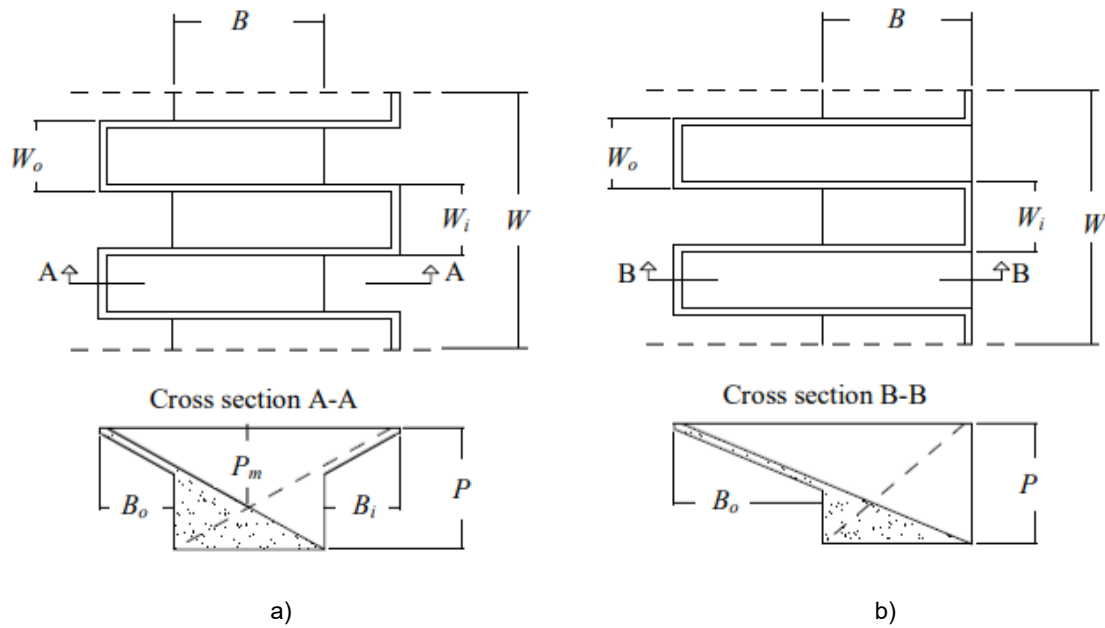


Figura 8 - Esquemas do Tipo A (a) e Tipo B (b) das PKW (Anderson, 2011).

As diferenças entre estas configurações, no que diz respeito ao efeito da existência ou não de prolongamentos das teclas na capacidade de descarga, e ao seu comportamento para condições de escoamento submerso ou escoamento livre (Figura 9) são também estudadas por diferentes autores.

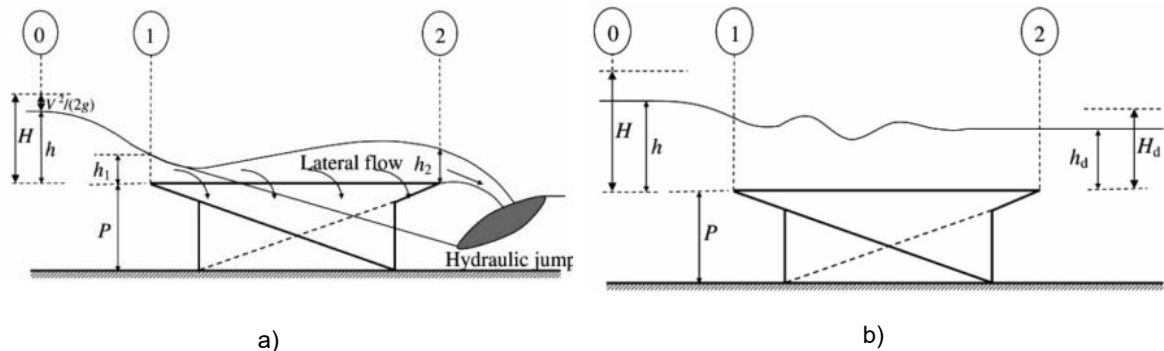


Figura 9 - Condições de escoamento livre (a) e escoamento submerso (b)) (Kabiri-Samani e Javaheri, 2012)

O estudo desenvolvido por Torre-Gómez et al. (2023) considera uma soleira mais eficiente quando, para uma determinada carga, é descarregado um maior volume de água. Nesse âmbito, comparou duas configurações de soleiras PKW: o modelo de tipo A, simétrico, e um modelo de tipo B, com as mesmas características do tipo A mas com uma distribuição diferente. Os seus resultados mostraram que soleiras PKW do tipo B serão mais eficientes para cargas hidráulicas mais baixas, porém, quando o prolongamento a montante fica submerso, a eficiência desta tipologia B é reduzida e, nessa fase, o modelo de tipo A revela-se mais eficiente.

Em condições de escoamento submerso, uma soleira de tipo A é entre 40% a 70% mais eficiente que soleiras mais convencionais e Tullis et al. (2007) define que a sensibilidade à submersão é superior em soleiras PKW do tipo B do que em soleiras do tipo A. (Bhukya et al., 2022)

Cicero (2016) demonstrou que a capacidade de descarga de uma soleira do tipo B é cerca de 5 a 15% superior a uma soleira do tipo A. Bekheet et al. (2022), num estudo levado a cabo com CFD (*software*

Anslys-Fluent), revelaram que o coeficiente de descarga (C_d) de uma soleira do tipo B é cerca de 2 a 4,5% superior a uma soleira do tipo A (Eltarabily *et al.*, 2024).

Eltarabily *et al.* (2024), no seu próprio estudo de comparação das diferentes tipologias de soleiras PKW, conclui também que uma soleira de tipo B é a recomendada para cargas hidráulicas mais baixas, para rácios entre a carga hidráulica a montante da soleira e a altura da mesma (H/P) inferiores a 0,40, devido aos seus prolongamentos a montante superiores. Porém, para cargas hidráulicas mais elevadas as PKW de tipo A têm uma eficiência superior e a sua escolha será também recomendada tendo em conta critérios estruturais, nomeadamente o facto de ser uma estrutura autoequilibrada.

Ouamane (2003), aquando da apresentação deste tipo de soleiras, demonstrou também que para rácios (H/P) inferiores a 0,40, a capacidade de descarga de uma soleira PKW de tipo B é cerca de 12% superior a uma do tipo A.

São poucos os estudos da dissipação de energia a jusante deste tipo de soleiras (Eltarabily *et al.*, 2024). Citados por Eltarabily *et al.* (2024), Al-Shukur e Al-Khafaji (2018) estudaram experimentalmente o efeito da inclinação longitudinal do canal imediatamente a jusante na dissipação de energia em soleiras do tipo B, concluindo que a mesma diminui para inclinações do canal mais reduzidas.

Esling e Crookston (2020) avaliaram a influência do rácio entre as larguras das projeções (W_i/W_o) na dissipação de energia em soleiras do tipo A. Os autores concluíram que, para valores dentro do intervalo ($0,20 < H/P < 0,80$), o aumento desta razão resulta numa redução da energia dissipada. No entanto, para valores fora desse intervalo, a dissipação de energia mantém-se constante (Eltarabily *et al.*, 2024).

Singh e Kumar (2022) concluíram que, nas estruturas do tipo B, para a mesma largura de canal, a energia dissipada aumenta com um maior número de módulos (N) (Eltarabily *et al.*, 2024).

2.3.3. CAPACIDADE DE VAZÃO DE SOLEIRAS DO TIPO PIANO KEYS

As soleiras com traçado não retilíneo, como as soleiras PKW e as soleiras em labirinto, destacam-se pela sua maior eficiência hidráulica em comparação a soleiras lineares. No entanto, essa vantagem é mais evidente para cargas hidráulicas (acima da cota da soleira) reduzidas. À medida que a carga hidráulica na soleira PKW aumenta, o efeito benéfico do maior comprimento efetivo da crista diminui, uma vez que o escoamento se torna mais uniforme e as reentrâncias da estrutura são progressivamente preenchidas. Como resultado, o comportamento hidráulico da soleira PKW tende a aproximar-se do de uma soleira convencional, evidenciando que a sua eficácia é maximizada quando operam com cargas hidráulicas mais baixas, para $H/P < 0.5$, como é evidenciado pela Figura 10 (Denys, 2017).

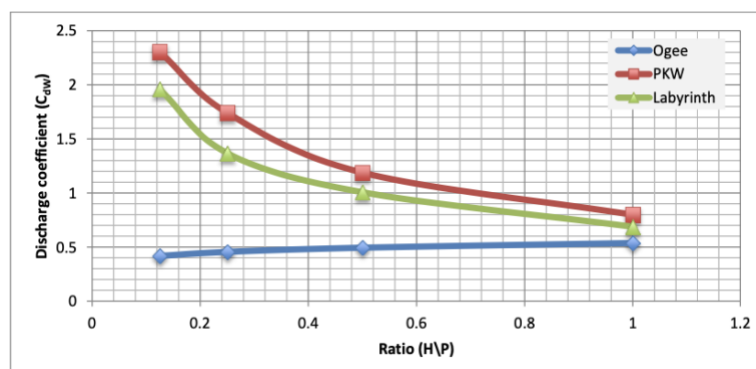


Figura 10 – Coeficientes de vazão para diferentes tipos de soleiras (Blancher *et al.* 2011, cit. por Denys, 2017)

Diversos estudos experimentais analisaram soleiras PKW para um intervalo de $0 < Ht/P < 3$, sendo Ht a carga hidráulica acima da soleira e P a sua altura (Denys, 2017), ou seja, a altura desde a plataforma de aproximação à crista (Figura 8).

As leis de vazão das soleiras do tipo *Piano Keys* resultam de extensivos estudos laboratoriais, conduzidos com o intuito de compreender e otimizar o seu desempenho hidráulico para que, apesar da sua natureza complexa, o comportamento hidráulico destas estruturas seja mais fácil de compreender. É de notar que as diferentes leis apresentadas nos diversos estudos foram definidas para limites específicos dos rácios de referência (Tabela 3).

Tabela 3 – Limites de Aplicabilidade (Pfister e Schleiss 2013a, Machiels et al. 2014, cit. por Denys 2017)

	L/W	H/P	Wi/Wo	B/P	Bi/B, Bo/B	P/Wu	Bi,P, Bo/P
Kabiri-Samani et al. (2012)	2,5-7,0	0,1-0,6	0,33-1,2	1,0-2,5	0,0-0,26	?	?
Leite Ribeiro et al. (2012)	3,0-7,0	0,1-2,8	0,5-2,00	1,5-4,6	0,20-0,40	0,29-0,65	0,25-4,0
Machiels (2012)	4,2-5,0	0,1-5,0	0,50-2,0	1,0-6,0	?	0,33-2,00	0,0-2,67

Citados por Denys (2017), Kabiri-Samani e Javaheri (2012) desenvolveram testes a soleiras PKW do tipo A, B e C de parede delgada (*sharp crested*) para caudais específicos entre os 25 e os 175 l/s/m, em situação de escoamento livre. A fórmula resultante (Eq. 1) baseia-se na equação de descarga tradicional,

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times W \times \sqrt{2gH^3} \quad (1)$$

em que W representa a largura do canal, g a aceleração da gravidade, H a carga hidráulica acima da soleira e o coeficiente de descarga, C_d (Eq. 2), é definido em função dos diversos parâmetros geométricos relevantes nas soleiras do tipo Piano Keys:

$$C_d = \left[0,212 \times \left(\frac{H}{P}\right)^{-0,675} \times \left(\frac{L}{W}\right)^{0,377} \times \left(\frac{Wi}{Wo}\right)^{0,426} \times \left(\frac{B}{P}\right)^{0,306} \times e^{1,504 \cdot \frac{Bo}{B} + 0,093 \cdot \frac{Bi}{B}} \right] + 0,606 \quad (2)$$

Leite Ribeiro *et al.* (2012) limitaram o seu estudo a soleiras PKW do tipo A, de crista arredondada, em condições de escoamento livre e para caudais específicos entre os 26 e os 440 l/s/m. A lei de razão resultante é expressa em função do rácio (r) entre o caudal descarregado de uma soleira PKW (Q_{PKW}) e o caudal descarregado por uma soleira delgada (Q_s) (Eq. 3). Este rácio (Eq.4) depende principalmente de quatro parâmetros, o desenvolvimento não linear da crista (L), a largura total da soleira (W), a altura da soleira (P), a carga hidráulica acima da soleira (H) e de alguns fatores corretivos incorporados para refletir a contribuição da largura das teclas (w – Eq. 5), a altura da soleira (p – Eq. 6), o comprimento da projeção das teclas (b – Eq. 7) e o efeito da existência de parapeitos nas teclas, Ro (a – Eq. 888).

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_s} = \frac{Q_{PKW}}{0,42 * W * \sqrt{2gH^3}} \quad (3)$$

$$r = 1 + 0,24 \times \left(\frac{(L - W) * P}{W * H} \right)^{0,9} (w \times p \times b \times a) \quad (4)$$

Com,

$$w = \left(\frac{Wi}{Wo} \right)^{0,05} \quad (5)$$

$$p = \left(\frac{Pi}{Po} \right)^{0,25} \quad (6)$$

$$b = \left(0,3 + \frac{Bo + Bi}{B} \right)^{-0,5} \quad (7)$$

$$a = 1 + \left(\frac{Ro}{Po} \right)^2 \quad (8)$$

Machiels (2012) realizou um estudo limitado a condições de escoamento livre e caudais específicos dos 13 aos 400 l/s/m, a soleiras PKW de crista plana, sem qualquer parapeito. A fórmula resultante do seu estudo é baseada na soma do caudal específico descarregado pelos três elementos principais de uma soleira desta geometria: a projeção a jusante (índice d), a projeção a montante (índice u) e as paredes laterais (índice s) (Eq. 9).

$$q = \frac{Q_{PKW}}{W} = q_u \times \frac{Wo}{Wu} + q_d \times \frac{Q_{PKW}}{Wu} + q_s \times \frac{2 * B}{Wu} \quad (9)$$

em que Wu é a largura de um módulo da soleira PKW, definida como a soma da largura da tecla interior (Wi) com a largura da tecla exterior (Wo) e duas vezes o valor da espessura das paredes laterais. Os caudais específicos de cada elemento são calculados pelas equações 10 a 12.

$$q_u = 0,374 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1,6} \right) \left(1 + 0,5 \times \left(\frac{H}{H + P_T} \right)^2 \right) \sqrt{2gH^3} \quad (10)$$

$$q_d = 0,445 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1,6} \right) \left(1 + 0,5 \times \left(\frac{H}{H + P} \right)^2 \right) \sqrt{2gH^3} \quad (11)$$

$$q_s = 0,410 \left(1 + \frac{1}{833H + 1,6} \right) \left(1 + 0,5 \times \left(\frac{0,833H}{0,833H + P_e} \right)^2 \right) \left(\frac{P_e^{\alpha + \beta}}{(0,833H + P_e)^{\alpha + \beta}} \right) K_{Wi} K_{Wo} \sqrt{2gH^3} \quad (12)$$

Cada uma das equações acima define a altura da soleira de forma distinta. P é a altura da soleira, tal como definida na nomenclatura de Pralong et al. (2011) (Figura 8), P_T é a altura total a montante, definida como a soma da altura da soleira com a altura da barragem na qual está instalada e P_e é definida como de mostra a seguinte equação 13.

$$P_e = P_T \frac{Bo}{B} + \frac{P}{2} \left(1 - \frac{Bo}{B} \right) \quad (13)$$

Os símbolos gregos (α e β), presentes na equação 12, definem a influência da inclinação da tecla interior (Si) (Eq. 14 a Eq. 16).

$$Si = \frac{P}{B - Bo} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{0,7}{Si^2} - \frac{3,58}{Si} + 7,55 \quad (15)$$

$$\beta = 0,029 \times e^{\frac{-1,446}{Si}} \quad (16)$$

O coeficiente K_{wi} (Eq. 17) define a influência da variação da velocidade do escoamento ao longo da crista lateral e o coeficiente K_{wo} (Eq. 18) descreve a forma como, à medida que a água escoar pelas teclas exteriores, as lâminas de água começam a sobrepor-se e a interferir umas com as outras e, eventualmente, causar efeitos locais de submersão.

$$K_{wi} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma + Wi^2} \quad (17)$$

$$\gamma = 0,0037 \times \left(1 - \frac{Wi}{Wo}\right)$$

$$K_{wo} = 1 \text{ para } \frac{H}{Wo} \leq \delta_1$$

$$K_{wo} = \frac{2}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \times \left(\frac{H}{Wo}\right)^3 - \frac{3(\delta_2 + \delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \times \left(\frac{H}{Wo}\right)^2 + \frac{6\delta_2\delta_1}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \times \left(\frac{H}{Wo}\right) + \frac{\delta_2^2(\delta_2 - 3\delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \text{ para } \delta_2 \leq \frac{H}{Wo} \leq \delta_2$$

$$K_{wo} = 1 \text{ para } \delta_2 \leq \frac{H}{Wo} \quad (18)$$

$$\text{com } \delta_1 = -0,788 \times S_o^{-1,88} + 5 \text{ e } \delta_2 = 0,236 \times S_o^{-1,94} + 5$$

Pfister & Schleiss (2013a), citados em Denys (2017), apresentam a comparação das fórmulas de vazão resultantes das metodologias acima apresentadas assim como as das soleiras convencional espessa (*Ogee*) e uma soleira espessa horizontal (*Broad-crested weir*). (Figura 11)

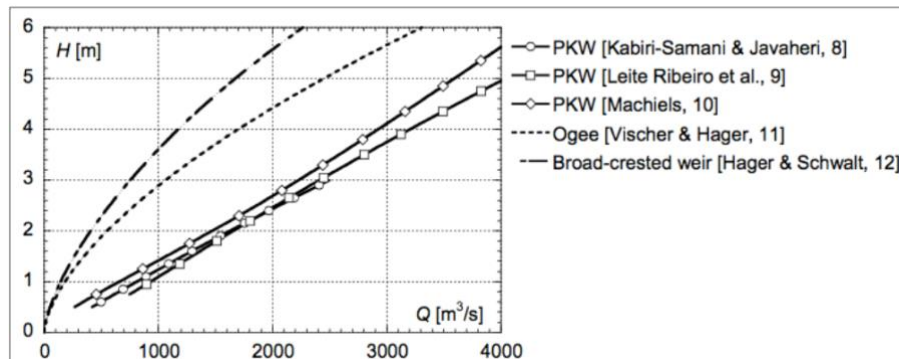


Figura 11 - Comparação entre curvas de vazão (Pfister & Schleiss, 2013a referido em Denys 2017).

A análise da Figura 11 permite concluir que as curvas de vazão obtidas para as soleiras Tipo PKW são semelhantes, com ligeiras diferenças que podem ser justificadas pelos vários tipos de soleira (crista) considerados. A metodologia proposta por Machiels (2012) é a mais conservadora das três apresentadas, ou seja, para uma determinada carga hidráulica resulta na menor descarga (Denys, 2017).

Pela sua natureza complexa, o estudo do dimensionamento de uma soleira do tipo PKW não deve limitar-se a estas fórmulas, sendo recomendados, para qualquer projeto, o recurso a modelos experimentais físicos ou numéricos para apoiar o estudo da sua eficiência.

2.3.4. AS SOLEIRAS TIPO PIANO KEYS PELO MUNDO

A primeira soleira do tipo Piano Keys foi instalada em 2006, na barragem de Goulours (Figura 12), em França, e desde então a *Electricité de France* (EDF) tem vindo a implementar este tipo de soleiras em algumas barragens francesas já existentes, de forma a aumentar a capacidade de descarga das mesmas. São exemplos as barragens de St. Marc, construída em 2008, Etroit em 2009, Gloriettes em 2010 e Malarce em 2012 (Schleiss, 2011).

A barragem de Malarce (Figura 13), no rio Chassezac, é uma barragem de gravidade construída originalmente no ano de 1968. Este aproveitamento hidroelétrico, com uma capacidade total de 2,3 milhões de metros cúbicos e uma área de 31 hectares, possui três comportas para descarga de cheias e, desde 2012, um descarregador com soleira do tipo *Piano Keys*. O novo descarregador permite aumentar a capacidade total de descarga da barragem para 4600 m³/s, cerca de 290 vezes o caudal médio natural do rio Chassezac. Cada tecla tem 13,5 m de comprimento e larguras de 1,25 m e 1,58 m nas teclas interiores e exteriores, respetivamente.



Figura 12 - Barragem de Goulours (*Monograph Barrage de Goulours*, [s.d.])



Figura 13 - Barragem de Malarce (*Data Sheet (PKW Malarce, EDF)*, [s.d.]; *Monograph Barrage de Malarce*, [s.d.])

As informações relativas às soleiras PKW construídas estão disponibilizadas no *World Register of Piano Key Weirs Prototypes*. Com a última atualização a 26 de junho de 2020, estão registadas 30 estruturas construídas após a barragem de Goulours (2006), em países como a Argélia, Canadá, Reino Unido, Vietname, Austrália, Índia, Sri Lanka e Estados Unidos (Figura 14).

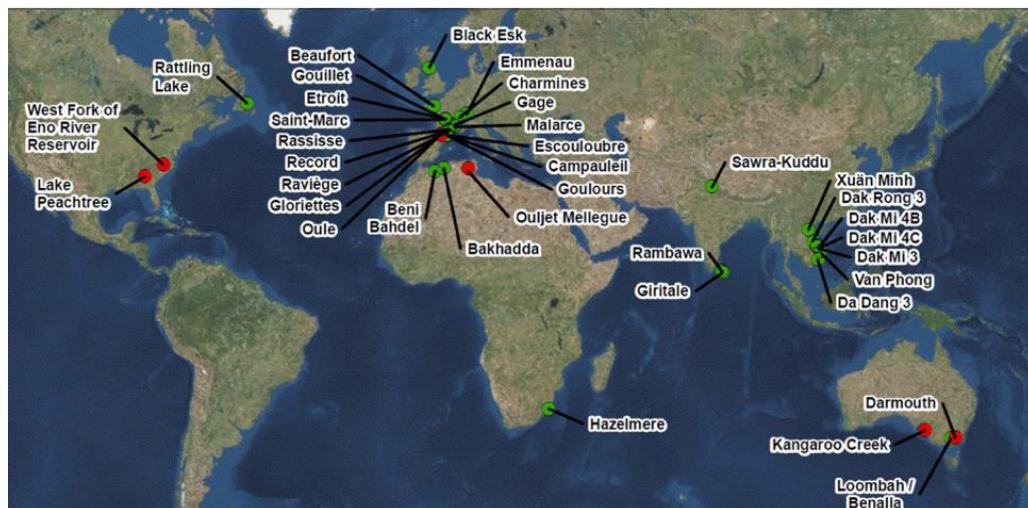


Figura 14 - Localização das soleiras PKW pelo mundo (*World Register of Piano Key weirs prototypes*, 2020).

Na Tabela 4 apresenta-se a listagem de alguns dos projetos com soleiras do tipo *Piano Keys* e respetivas características geométricas, de acordo com a definição dos parâmetros apresentada na Figura 5a.

Tabela 4 - Características de algumas soleiras descarregadoras PKW existentes (*World Register of Piano Key weirs prototypes*, [s.d.])

País	Nome	Ano	Tipo	Qd (m³/s)	B (m)	P (m)	W (m)	L (m)	Wi	Wo	Ts (m)
França	Goulours	2006	A	68	9,28	3,05	14,1	59,05	2,25 a 2,45	1,5 a 1,8	0,2
França	Saint-Marc	2008	A	134	12,05	5,15	15,1	79,93	3,2	2,2	0,35
França	L'Etroit	2009	A	97	12,19	5,02	11,67	62,61	2,34 a 2,62	1,5	0,35
França	Gloriettes	2010	A	90	9,96	3	16,5	86,74	2,3	1,5	0,35
França	Escouloubre	2011	A	13	5,1	1,77	4,85	21,85	1,3	0,9	0,3
França	Gouillet	2010	B	18,2	3,18	1,2	19,14	54,12	0,8	0,64	0,15
França	Malarce	2012	A	568	13,46	4,4	42,5	350	1,25	1,58	0,2 a 0,4
França	Beaufort	2013	A	76	3,16	1,28	15	70,5	0,85	0,43 a 0,58	0,15
RU	Black Esk	2013	-	183	4,4	2,1	54	238	1,6	0,8	0,2
Vietname	Dak MI 4B	2013	B	634	9	2,5	37,0	177	2,3	1,8	0,20 a 0,45
Sri Lanka	Giritale	2013	A	83	7,2	2,4	36,9	130	2,5	2,0	0,20
Australia	Loombah	2013	A	416	6,0	2,5	30,0	150,0	1,03	1,37	0,30
India	Sawra Kuddu	2013	A	2500	30,68	10,45	138	751,60	6,9	6,9	0,75
França	Campauleil	2014	A	190	13,1	5,35	16,55	115	1,55	1,55	0,35
França	Raviege	2015	A	284	13,24	4,67	25,8	177	2,1	1,65	0,25 a 0,4
Argélia	Ouldjet Mellegue	2018	A	3805	16,2	6,8	99,8	453,7	1,8 a 3,2	4,4 a 5,4	0,4

2.4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

2.4.1. EVOLUÇÃO DA MODELAÇÃO: DA FÍSICA À COMPUTACIONAL

Dada a complexidade da geometria e do funcionamento de estruturas hidráulicas, como soleiras descarregadoras, a modelação física das mesmas é ainda considerada como o procedimento de referência para a validação de projetos, porém, a utilização de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para o estudo de escoamentos em estruturas hidráulicas tem vindo a crescer entre investigadores e projetistas, principalmente devido à evolução dos computadores, capacidade de cálculo, e dos métodos numéricos.

A Modelação Numérica dos Flúidos, ou Dinâmica de Flúidos Computacional, quando traduzida diretamente da literatura inglesa (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), é uma área de mecânica dos flúidos dedicada à simulação de escoamentos, transferência de calor, reações químicas e outros fenómenos associados por meio de métodos numéricos e algoritmos computacionais (Bakker, 2008). A análise por CFD é uma ferramenta amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento. Entre estas, destaca-se a aerodinâmica, onde é aplicada ao estudo do escoamento do ar em torno de aviões, veículos automóveis e edificações; a hemodinâmica, que se ocupa do estudo do movimento do sangue e das forças envolvidas na sua circulação; e, particularmente relevante para o presente trabalho, a hidrodinâmica, centrada no escoamento da água e fundamental para o correto dimensionamento de portos, equipamentos e estruturas hidráulicas. A Modelação Numérica de Flúidos é descrita como a “terceira dimensão” do estudo da dinâmica de flúidos, complementando, mas nunca substituindo, a teoria pura e a prática pura (Anderson, 1995).

Nos dias de hoje, com os rápidos avanços tecnológicos, a fácil acessibilidade do CFD é ainda mais evidente, com a capacidade de executar simulações em infraestruturas de elevado desempenho (HPC) ou até computadores pessoais, através de programas comerciais ou *softwares opensource*, sem qualquer custo de licença de utilização, como é o caso do *OpenFOAM*, utilizado neste trabalho. Adicionalmente, os *softwares* comerciais mais utilizados em engenharia hidráulica são: *FLOW-3D*, *ANSYS Fluent* e *Star-CCM+*.

2.4.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

O CFD destaca-se pela sua portabilidade e facilidade de acesso, pois os *softwares* utilizados podem facilmente ser transportados e executados em diferentes dispositivos, por diferentes engenheiros, o que representa uma vantagem significativa em comparação à utilização de modelos físicos tradicionais (Anderson, 1995).

Outros benefícios do CFD são os custos relativamente reduzidos e a velocidade das simulações que se traduz numa rápida obtenção de resultados, sendo esta última dependente sempre da complexidade do que está a ser simulado. A capacidade de simular fenómenos e condições reais, muitas vezes difíceis ou impossíveis de reproduzir experimentalmente, proporcionando um controlo preciso sobre os parâmetros físicos em estudo é também uma vantagem que se destaca, assim como a qualidade da informação obtida, com acesso a um número muito mais elevado de pontos de análise na região de interesse, resultando num conjunto abrangente de parâmetros de estudo que dificilmente seria possível serem obtidos de forma experimental (Bakker, 2008).

Apesar das vantagens associadas, esta metodologia possui também algumas limitações que devem ser consideradas aquando da sua aplicação. A precisão dos resultados depende fortemente do modelo computacional adotado, no que diz respeito a reprodução de fenómenos complexos como a turbulência, a compressibilidade ou o escoamento multifásico. Isto significa que os resultados serão tão fiáveis quanto os modelos em que se baseiam. Para além disso, o cálculo introduz erros inevitáveis, como erros

de arredondamento ou truncatura inerentes aos métodos numéricos. No entanto, erros de truncatura podem ser mitigados, por exemplo através do refinamento da malha. Também os erros na definição do domínio computacional, na imposição das condições de fronteira ou no estabelecimento da malha podem levar a erros que comprometem a fiabilidade das simulações. (Cataño-Lopera *et al.*, 2023)

Especificamente, no que diz respeito à modelação numérica de estruturas hidráulicas, os desafios surgem nas grandes dimensões das estruturas, que exigem domínios computacionais extensos, que sejam capazes de representar a ampla gama de escalas temporais e espaciais do escoamento, também as elevadas velocidades, que podem originar níveis de turbulência muito intensos, e acresce a complexidade associada à presença de ar no escoamento, que obriga à utilização de modelos CFD mais avançados, que considerem simultaneamente as fases água, ar e as interações entre estas. (Sasseti Mendes, 2021).

É importante realçar que a validação e calibração de métodos numéricos utilizados no CFD é apenas possível dada a quantidade de dados que derivam dos modelos físicos e protótipos desenvolvidos ao longo dos anos, o que evidencia a relação de complemento entre as metodologias.

Em comparação ao desenvolvimento “tradicional” de um projeto, o CFD permite ultrapassar, numa fase inicial, o processo de construção de modelos físicos, o que se torna vantajoso. Desta forma, a construção de modelos poderá ocorrer apenas numa fase posterior à otimização dos parâmetros envolvidos evitando assim o ciclo dispendioso da constante alteração de soluções.

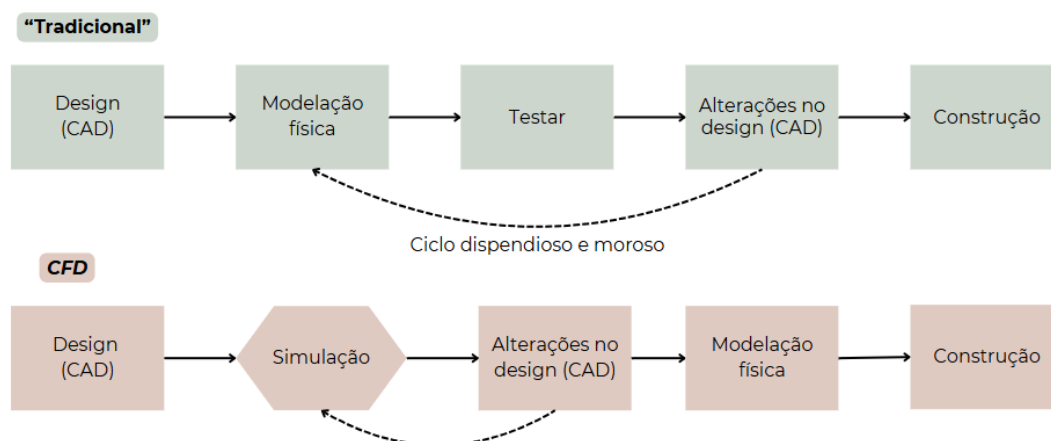


Figura 15 - Desenvolvimento tradicional vs. abordagem com CFD

Uma nova metodologia, a modelação integrada, combina a modelação física com a modelação computacional, atenuando as desvantagens de cada uma e potenciando as vantagens de ambas. Inicialmente, recorre-se a simulações de CFD com o objetivo de compreender as características do escoamento, antecipar zonas críticas de interesse, potenciais problemas e obter informações essenciais para o desenvolvimento do modelo físico. Seguidamente, realiza-se uma modelação física preliminar para analisar o projeto inicial da estrutura e recolher dados experimentais que possibilitem a calibração e validação do modelo CFD. Após esta etapa, procede-se à validação e calibração do modelo numérico com base nos dados do modelo físico, permitindo a realização de novos testes CFD com versões progressivamente aperfeiçoadas do projeto. A versão final, selecionada com base nestes estudos, é então sujeita a uma análise física detalhada. Por fim, o modelo CFD é utilizado para replicar com alta resolução o comportamento do modelo físico otimizado, fornecendo uma compreensão aprofundada dos padrões de escoamento e dos fenómenos associados. (Sasseti Mendes *et al.*, 2024)

2.4.3. EQUAÇÕES GOVERNANTES

A modelação numérica de escoamentos em estruturas hidráulicas exige, como ponto de partida, a definição das equações governantes, baseadas na mecânica dos fluidos, que descrevem a conservação da massa e da quantidade de movimento.

A abordagem mais frequente é a resolução das equações de Navier-Stokes, com algum grau de simplificação, normalmente RANS, e a utilização do método *Volume of Fluid* (VoF) para definição da superfície livre. No caso de estruturas hidráulicas, é prática considerar que o escoamento é incompressível, ou seja são desprezáveis possíveis variações de densidade, e de fluidos newtonianos

Nesta dissertação utilizou-se o modelo *interFoam*, do software *OpenFOAM versão 2412*, que resolve as equações apresentadas de seguida (Eq. 19 a 21). Trata-se de um modelo usado na simulação de escoamentos multifásicos de dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis, como é o caso da água-ar, e utiliza uma abordagem de definição de interface, a fronteira entre os dois fluidos, baseada na fração de fase VoF.

Estas simplificações são adequadas ao estudo de soleiras porque o escoamento se dá em regime lento a montante e crítico sobre a soleira, que é o ponto que condiciona a vazão, o objetivo deste estudo. Adicionalmente, não há mistura água-ar até esta parte, caso contrário teria de se optar por modelos mais complexos.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d \rho \vec{V}}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p^* - \vec{g} \vec{X} \cdot \nabla \rho + \nabla \cdot (2(\mu + \mu_t)S) + \vec{F}_\sigma \quad (20)$$

$$\vec{F}_\sigma = \sigma \vec{k} \nabla \alpha \quad (21)$$

A equação 19, denominada equação da continuidade, para escoamentos incompressíveis, garante a conservação da massa, afirmando que o volume do fluido é conservado. O operador vetorial *nabla* (∇), neste caso aplicado a um campo vetorial, representa a divergência do mesmo. A divergência do vetor velocidade ($\vec{V}$), ou seja, a variação do fluxo em cada direção espacial, é igual a zero pois o que entra num volume de controlo é igual ao que sai do mesmo.

A equação 20, da conservação da quantidade de movimento, ou momento linear, é a equação de Navier-Stokes, modificada e aplicada a um fluido com tensão superficial e turbulência. A equação contém a densidade (ρ), o tempo (t), a pressão pseudo-dinâmica (p^*), a aceleração gravítica ($\vec{g}$), o vetor posição ($\vec{X}$), a viscosidade dinâmica do fluido e a viscosidade turbulenta (μ e μ_t , respetivamente), o tensor de deformação (S) e a força de tensão superficial ($\vec{F}_\sigma$). (Sasseti Mendes, 2021)

Termo a termo, $\frac{d \rho \vec{V}}{dt}$ representa a variação temporal do momento; $\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V})$ é o transporte de quantidade de movimento pelo próprio escoamento; ∇p^* é a força resultante do gradiente de pressão e $\vec{g} \vec{X} \cdot \nabla \rho$ a força hidrostática.

A força de tensão superficial ($\vec{F}_\sigma$), calculada pela equação 21, modela a tensão superficial na superfície entre ambas as fases do escoamento, a água e o ar, com σ representativo do coeficiente de tensão

superficial no fluido, $\vec{k}$ a curvatura dessa interface e α a fração volumétrica da fase (Sasseti Mendes, 2021).

Para a definição da superfície livre, a fronteira entre os dois fluidos, o método *Volume of Fluid* calcula (Eq. 22 e 23) a fração de volume de cada fase em cada célula computacional, através de uma variável referida como α , cujo valor varia entre 0 e 1. α tem um valor nulo quando a célula está totalmente preenchida com ar ou unitário se estiver preenchido por água. Se a célula for um valor intermediário é aí que se tem uma fronteira entre a água e o ar. (Tabela 5) (Greenshields, 2024).

Tabela 5 - Valores de *phase fraction* no método *Volume of Fluid*

$\alpha = 0$	Célula totalmente preenchida com ar
$\alpha = 1$	Célula totalmente preenchida com água
$0 < \alpha < 1$	Célula cortada pela interface entre água e ar.

$$\frac{d\alpha}{dt} + \nabla \cdot \vec{V}\alpha + \nabla \cdot \vec{V}_{ic}\alpha(1 - \alpha) = 0 \quad (22)$$

$$\vec{V}_{ic} = C_{\alpha} |\vec{V}| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (23)$$

A equação 22 de transporte do escalar α , ou de fase, descreve a forma como a fração volumétrica da água evolui no espaço e no tempo, com $\frac{d\alpha}{dt}$ representativo da variação temporal de alfa no tempo, $\nabla \cdot \vec{V}\alpha$ o transporte convectivo da fase pela velocidade do escoamento e $\nabla \cdot \vec{V}_{ic}\alpha(1 - \alpha)$ o termo artificial de compressão, com o intuito de minimizar a espessura da interface.

Assim sendo, neste método, a interface entre os fluidos não é definida de forma explícita como uma superfície geométrica bem definida, esta fronteira é apenas uma aproximação baseada em valores intermediários de α e interpretada como a região onde este parâmetro muda de 0 para 1.

Na simulação numérica de escoamentos, o efeito da turbulência é de extrema importância para os estudos hidráulicos, porém, complexidade da mesma representa um dos desafios mais significativos para a simulação de escoamentos.

Nas últimas décadas, diferentes modelos têm vindo a ser adotados para a análise numérica de escoamentos turbulentos, baseados na aplicação das equações de *Navier-Stokes*, como por exemplo o método *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), *Detached Eddy Simulation* (DES), *Large Eddy Simulation* (LES) e *Direct-Numerical Simulation* (DNS). (Che Sidik *et al.*, 2020)

Para a presente dissertação, optou-se pela metodologia RANS, por ser o único que apresenta tempos de computação compatíveis com o estudo desenvolvido.

O método *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*, cujas equações resultam de uma média temporal das equações de Navier-Stokes, tem se destacado na simulação de escoamentos turbulentos por CFD pois decompõe o escoamento em flutuações turbulentas médias e velocidade média, permitindo tempos de cálculo significativamente reduzidos e, conseqüentemente, menos recursos computacionais. (Versteeg e Malalasekera, 2007)

Com as fórmulas de RANS, surgem novos termos associados às flutuações turbulentas. No presente trabalho, foi utilizado o modelo k - ε , um dos mais amplamente utilizados, que simula o transporte e a dissipação de energia turbulenta dentro do fluxo, com a introdução de equações adicionais (Eq. 24 e Eq. 25) e para a energia cinética turbulenta (k) e a sua taxa de dissipação (ε). (Cataño-Lopera *et al.*, 2023)

$$\frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot (D_k \nabla k) + G - \varepsilon + S_k \quad (24)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \nabla \cdot (D_\varepsilon \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (25)$$

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (26)$$

$$G = 2v_t |S|^2 \quad (27)$$

$$D_k = v + \frac{v_t}{\sigma_k} \text{ e } D_\varepsilon = v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (28)$$

O transporte da energia cinética turbulenta (k), representado pela equação 24, descreve como a energia da turbulência é transportada no tempo e no espaço, incluindo termos de produção, difusão e dissipação. D_k (Eq. 28) representa o coeficiente de difusão efetivo de k , G (Eq. 27) é o termo de produção de energia turbulenta, dependente da viscosidade turbulenta (v_t , Eq. 26), ε é a taxa de dissipação da energia turbulenta, e S_k é um termo fonte opcional.

A variação da taxa de dissipação da energia turbulenta (ε) é calculada pela equação 25. Nesta equação D_ε é a difusividade de ε (Eq. 28), e os termos adicionais representam a produção e auto-dissipação de ε com os coeficientes empíricos $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$, respectivamente.

Os valores dos coeficientes empíricos presentes nas equações têm valores padrão normalmente implantados aquando da implementação do *OpenFOAM*, baseada em Launder e Spalding, resumidos na tabela seguinte (Tabela 6) (Sassetti Mendes, 2021)

Tabela 6 - Coeficientes empíricos padrão (Modelo RANS k - ε)

Coeficiente	Valor padrão
$C_{1\varepsilon}$	1,44
$C_{2\varepsilon}$	1,92
C_μ	0,09
σ_k	1,0
σ_ε	1,3

2.4.4. MÉTODOS E MODELOS NUMÉRICOS

No CFD, é importante também esclarecer o que se entende por modelos numéricos. Um modelo numérico corresponde ao conjunto de procedimentos que permitem converter as equações diferenciais de *Navier-Stokes*, e outros sub-modelos, em sistemas algébricos iterativos que o computador consegue resolver. Para a escolha do conjunto de modelos numéricos adequado é preciso ter em consideração aquilo que se espera em termos de estabilidade, precisão, tempo de convergência e custos computacionais, sendo muitas vezes difícil de alcançar uma combinação de modelos que cumpra os quatro requisitos (Cataño-Lopera *et al.*, 2023).

Este trabalho utiliza a versão 2412 do software *OpenFOAM* que se baseia no método dos volumes finitos, que consiste na discretização do domínio físico em pequenas células de controlo, sobre as quais se aplicam as leis de conservação.

As equações de Navier–Stokes, em conjunto com as equações auxiliares do modelo de turbulência e da fração volumétrica de fase (*VoF*), descritas na secção 2.4.1, são convertidas em forma algébrica através da discretização temporal e espacial.

No *OpenFOAM*, cuja estrutura se descreve de forma mais detalhada mais à frente nesta dissertação (Secção 3.5), esta discretização é controlada no ficheiro *fvSchemes*, onde se definem os esquemas numéricos utilizados para os termos de tempo, gradiente, divergência e interpolação.

A resolução do sistema algébrico resultante é gerida pelo ficheiro *fvSolution*, onde se indicam os solvers utilizados para cada variável, os algoritmos de acoplamento de pressão-velocidade (como o *PIMPLE* ou *SIMPLE*), bem como os critérios de tolerância e número máximo de iterações por passo de tempo.

Para o acoplamento de pressão velocidade, nesta dissertação foi utilizado o algoritmo PISO (*Pressure-Implicit with Splitting Operators*), mais indicado para escoamentos transientes (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A descrição dos modelos numéricos utilizados na resolução do presente caso de estudo, para as simulações bidimensionais e as simulações tridimensionais, encontra-se em seguida (Tabela 7):

Tabela 7 - modelos numéricos utilizados (*system/fvSchemes*)

	Entrada	Bidimensional	Tridimensional
Discretização temporal	<i>ddtSchemes</i>	Euler	Euler
Termos de Divergência (<i>divSchemes</i>)	<i>div(rhoPhi,U)</i>	Gauss linear	Gauss upwind
	<i>div(phi,alpha)</i>	Gauss vanLeer	Gauss vanLeer
	<i>div(phirb,alpha)</i>	Gauss linear	Gauss linear
	<i>div(phi,k)</i>	Gauss upwind	Gauss upwind
	<i>div(phi,epsilon)</i>	Gauss upwind	Gauss upwind

Para a discretização temporal, foi utilizado o esquema *Euler*, um método implícito de primeira ordem que, apesar de menos preciso do que métodos de segunda ordem, garante maior robustez e estabilidade numérica, especialmente útil em simulações transientes com variações acentuadas nas fases iniciais. Esta estabilidade está diretamente relacionada com o número de *Courant* (*Co*), um parâmetro adimensional que expressa a razão entre a distância percorrida por uma partícula de fluido durante um

passo de tempo e o tamanho da célula da malha. Em termos simples, representa a quantidade de escoamento que “atravessa” uma célula por passo temporal. De modo a evitar erros de propagação e instabilidades no cálculo, em todas as simulações realizadas foi definido um valor máximo para o Co , iniciando com 0,25 e não ultrapassando 0,75.

No que diz respeito aos termos espaciais, foram aplicados diferentes esquemas de divergência consoante a variável em questão. O esquema *Gauss upwind* foi utilizado para a velocidade e variáveis como a energia cinética turbulenta k e a sua taxa de dissipação ϵ , devido à sua estabilidade numérica, ainda que à custa de alguma difusão. Para o campo de fração de fase α , foi adotado o esquema Gauss vanLeer, de segunda ordem, que garante uma boa definição da interface entre os fluidos (água e ar) sem introduzir oscilações numéricas. Em gradientes, recorreu-se ao esquema Gauss linear, um método centrado de segunda ordem que assegura maior precisão entre células vizinhas.

Para a realização de uma simulação o domínio computacional é discretizado em malha maioritariamente estruturada, não uniforme (resolução variável), do tipo cartesiano. O estado inicial do escoamento é definido por campos internos iniciais para as principais variáveis (velocidade, pressão, fração de fase, energia cinética turbulenta, etc.), e as condições de fronteira são impostas em todas as faces exteriores do domínio (*inlet*, *outlet*, *wall*, *atmosphere* ou *symmetry*) já que devido à forma diferencial das equações utilizadas, é necessário partir de um estado inicial e ter condições de fronteira nos limites do domínio para que haja solução nas equações a cada avanço temporal.

A geração da malha, definição dos campos iniciais e condições de fronteira para a resolução do caso de estudo são descritos em maior detalhe na secção 3.3, mais à frente nesta dissertação.

2.4.5. MÉTODOS E MODELOS NUMÉRICOS ALTERNATIVOS

Para além da abordagem tradicional utilizada para a resolução do caso de estudo desta dissertação, baseada nas equações de Navier–Stokes, existem métodos alternativos que podem ser vantajosos em diferentes situações específicas. Nesta secção, descrevem-se de forma breve outros dois métodos frequentemente utilizados.

O método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) é um método baseado numa formulação Lagrangiana, em que o fluido é representado por um conjunto de partículas que se movem no escoamento. Ao contrário dos métodos Eulerianos que utilizam uma malha fixa para descrever o movimento do fluido em estudo, o SPH acompanha diretamente a trajetória de inúmeras partículas ao longo do tempo, cada uma transporta as suas respetivas propriedades como massa, velocidade ou pressão. Este método é eficaz em escoamentos com superfícies livres muito deformáveis ou com interações complexas entre fluidos e estruturas, como a simulação de rotura de barragens, impacto de ondas, embora menos preciso em situações estacionárias. Na maioria dos casos, o SPH exige recursos computacionais bastante superiores (Monaghan, 2005).

Lattice Boltzman Method (LBM) é um método de base Euleriana, que simula o escoamento de fluidos a partir de uma perspetiva mesoscópica (escala intermédia), que utiliza uma grelha regular para resolver uma forma simplificada da equação de Boltzmann. A sua abordagem oferece vantagens em geometrias complexas e escoamentos multifásicos, embora seja limitado a baixos números de Mach e com modelos de turbulência ainda em desenvolvimento. (Badarch, Tokuzo e Narantsogt, 2016)

Este estudo opta pela abordagem baseada nos volumes finitos e nas equações de Navier–Stokes devido à sua robustez, fiabilidade e adequabilidade ao tipo de escoamento e estrutura em análise.

3

METODOLOGIA DO ESTUDO NUMÉRICO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS (TIPO A E TIPO B)

A definição da geometria e condições de descarga a utilizar na modelação numérica dos dois tipos de soleiras do tipo *Piano Keys*, Tipo A e Tipo B, foi realizada com base em casos reais, em particular nos apresentados na Tabela 4. Assim, os resultados do presente estudo poderão ser comparados com situações reais, tirando proveito da capacidade da modelação numérica de simular grandes caudais, permitindo uma análise mais robusta e relevante para o campo de estudo, além de proporcionar uma avaliação mais precisa do comportamento hidráulico e da eficiência das diferentes configurações destas soleiras.

A definição dos parâmetros essenciais das soleiras tem por base o conhecimento do valor do caudal a descarregar. Dada a ausência de casos reais com soleiras em *Piano Keys* em Portugal, que pudessem servir de referência, optou-se por analisar os valores dos caudais apresentados na Tabela 4. Da análise destes valores, verificou-se que o valor médio dos caudais é de 200 m³/s, sem considerar os dois valores mais elevados. Assim, optou-se por um caudal de 190 m³/s, próximo do valor médio e correspondente ao caudal de dimensionamento soleira do tipo *Piano Keys* da barragem de Campauleil, em França, cujas características se encontram disponíveis e podem servir de referência para o caso de estudo.

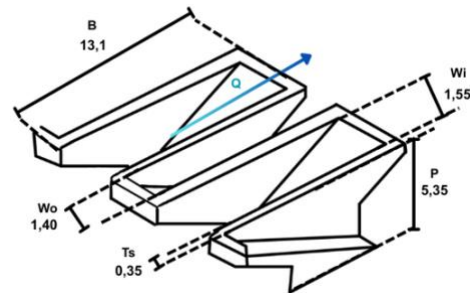
A soleira do tipo *Piano Keys* da barragem de Campauleil apresenta uma capacidade de descarga de 190 m³/s ao nível máximo de cheia. No caso de estudo adotou-se, para as simulações, uma soleira do tipo A com características geométricas semelhantes à desta estrutura (Tabela 8), cujo esquema se apresenta na Figura 16.

Tabela 8 - Características geométricas da soleira PKW da barragem de Campauleil, França

Q_{NMC} (m³/s)	B (m)	P (m)	W (m)	L (m)	Wi (m)	Wo (m)	Ts (m)
190	13,1	5,35	16,55	115	1,55	1,4	0,35



a)



b)

Figura 16 – a) Barragem de Campauleil (*Data Sheet (PKW Campauleil, EDF)*, [s.d.]) e b) esquema dos parâmetros da soleira PKW

Para a construção dos modelos, em particular para a definição dos cortes transversais da soleira (Figura 17), foi necessário definir dois parâmetros complementares aos apresentados na tabela anterior (Tabela 9), os comprimentos das teclas (Bi e Bo). Estes foram calculados através das equações (Eq.29 a 30), a partir da definição e valor da inclinação da soleira da barragem de Campauleil, obtido de Gomes (2018) (Tabela 9).

Tabela 9 - Parâmetros de apoio à análise da soleira de Campauleil (Gomes, 2018)

Q_d (m ³ /s)	P/W_i	Si
120	3,45	0,65

Conhecendo os valores da inclinação (Si) e da altura (P) da soleira, é possível determinar a soma dos comprimentos da base e da tecla interior ($Bb + Bi$), através da equação e, posteriormente, obtém-se o comprimento da tecla exterior (So), a partir do comprimento total da tecla (B) e considerando que o comprimento das teclas interior e exterior são iguais na soleira Tipo A, como exemplificado na equação 31.

$$Si = \tan \theta = \frac{5,35}{Bb + Bi} = 0,65 \Leftrightarrow Bb + Bi = \frac{5,35}{0,65} = 8,23 \text{ m} \quad (29)$$

$$B = 13,1 = Bb + Bi + Bo \Leftrightarrow 13,1 = 8,23 + Bo \Leftrightarrow Bo = 4,87 \text{ m} \quad (30)$$

$$(PKW \text{ Tipo A}) Bo = Bi = 4,87 \text{ m} \quad (31)$$

Foi necessário também ajustar os comprimentos da geometria, os parâmetros L e W , já que a soleira original possui uma tecla adaptada à sua aplicabilidade.

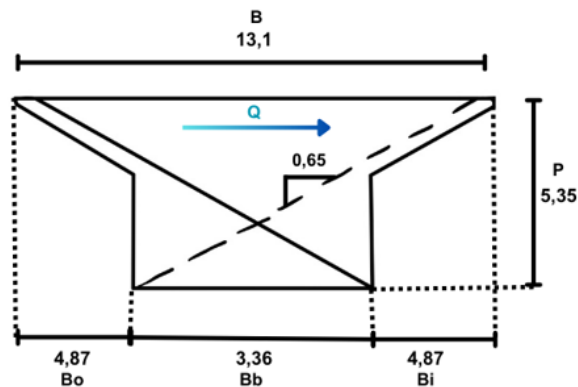


Figura 17 - Perfil Transversal estimado da soleira PKW da barragem de Campauleil

Para a soleira do tipo B, com o intuito de facilitar a comparação da eficiência e do comportamento hidráulico e dado que será dimensionada para o mesmo caudal foram definidos parâmetros idênticos. Assim, os valores da altura, da largura das teclas e do comprimento total da estrutura são os mesmos para ambos os tipos de soleiras.

Como referido, a principal diferença na geometria da soleira do tipo B reside na ausência de prolongamento a jusante ($Bi = 0$ m). Além disso, o prolongamento a montante (Bo) é, geralmente, mais longo comparativamente ao de uma soleira do tipo A.

Com base na análise de estudos anteriores, como os de Torre-Gomez *et al.* (2022) e Eltarabily (2024), e nos esquemas das mesmas (Figura 8), observa-se que o comprimento do prolongamento a montante (Bo) de uma soleira do tipo B é, em geral, o dobro do valor utilizado na soleira do tipo A com a qual está a ser comparada. Na Tabela 10 apresenta-se um resumo dos parâmetros geométricos dos dois tipos de soleiras a utilizar nas simulações.

Tabela 10 - Parâmetros geométricos finais para as simulações numéricas

	L (m)	W (m)	Wi (m)	Wo (m)	Ts (m)	B (m)	Bo (m)	Bi (m)	P (m)
Tipo A	116,6	14,6	1,55	1,40	0,35	13,1	4,87	4,87	5,35
Tipo B	116,6	14,6	1,55	1,40	0,35	13,1	9,74	0	5,35

3.2. MODELAÇÃO GEOMÉTRICA EM CAD

Com as dimensões definidas, as soleiras foram desenhadas em ambiente *CAD* (*Computer-Aided Design*), utilizando o *FreeCAD 1.0*, um software de modelação 3D, de código aberto, organizado em diferentes ambientes de trabalho (*workbenches*) - como *Assembly*, *BIM*, *Part Design*, entre outros- dedicados a tarefas específicas, o que o torna bastante adaptável a diferentes ramos de engenharia.

Para este caso, recorreu-se maioritariamente ao ambiente *Part Design*, em conjunto com o *Sketcher*, com o objetivo de, para uma fase inicial, criar partes mais simples paramétricas, que unidas formam sólidos 3D de elevada precisão. Esta metodologia permite alterar os parâmetros de dimensionamento numa tabela, sendo a geometria 3D é automaticamente atualizada.

A modelação de cada tipo de soleira PKW foi feita inicialmente considerando que as mesmas estão divididas em três corpos principais: meia tecla interior, meia tecla exterior e a parede lateral entre elas

(Figura 18), considerando a natureza simétrica dos módulos. Estes elementos foram desenhados separadamente e toda a sua geometria foi parametrizada em função das principais variáveis (Figura 19), de forma a garantir um maior controlo sobre as suas dimensões e facilitar qualquer alteração à geometria de cada componente.

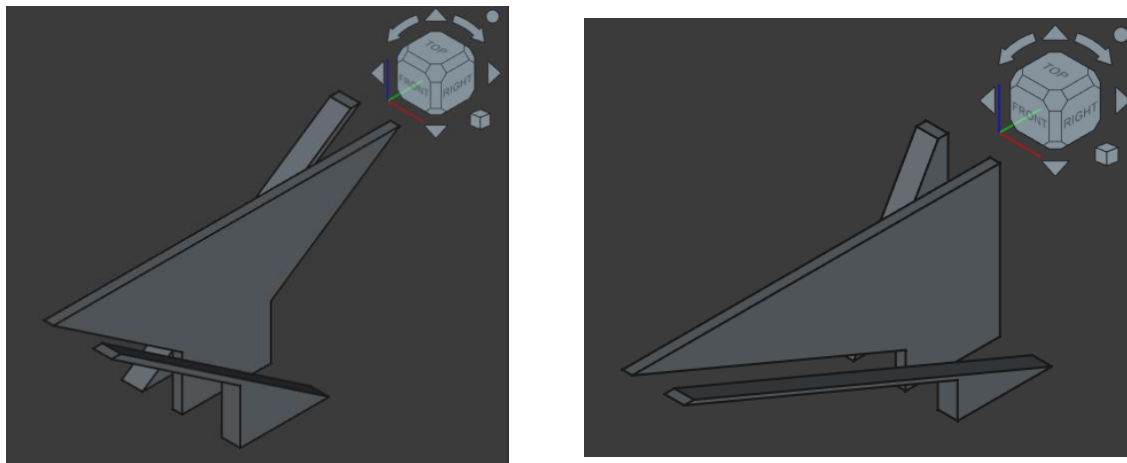


Figura 18 - Elementos constituintes, modelados individualmente: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

Base	
Label	Parametric Variables (A)
B	13,10 m
Bi Bo	4,87 m
P	5,35 m
Ts	0,35 m
Wi	1,55 m
Wo	1,40 m

Base	
Label	Parametric Variables (B)
B	13,10 m
Bo	9,74 m
P	5,35 m
Ts	0,35 m
Wi	1,55 m
Wo	1,40 m

Figura 19 - Variáveis de parametrização no FreeCAD 1.0 para Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

Após a sua criação, foi aplicada uma operação booleana do tipo *Fuse*, de forma a unir os três sólidos num único corpo (Figura 20). De seguida, com recurso à ferramenta *Mirror*, para gerar a simetria do corpo pela tecla exterior (Figura 21), é transformado numa tecla completa e num ciclo que pode ser replicado ao longo do comprimento, com o recurso *Linear Pattern* de forma a gerar a soleira completa (Figura 22). Optou-se pela representação de 4 teclas completas, interiores e exteriores, tal como a soleira da barragem de Campauleil.

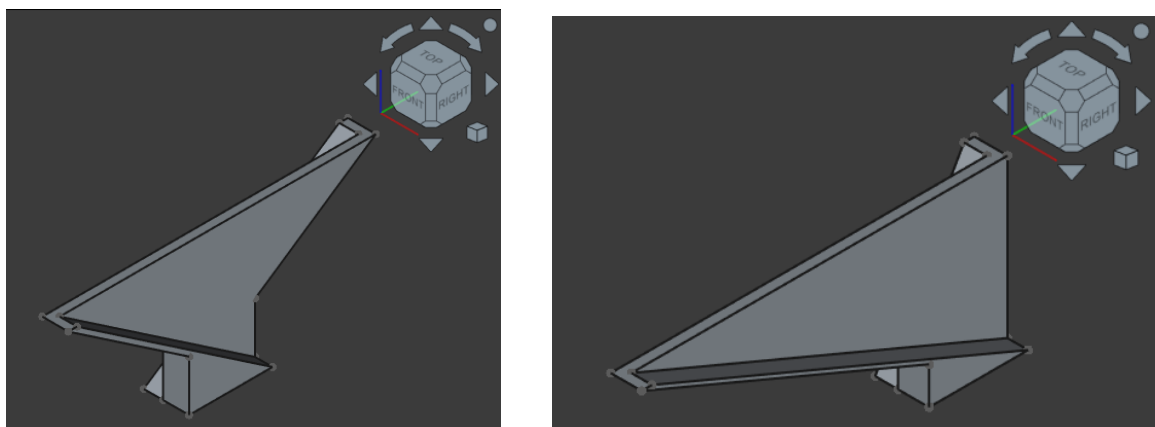


Figura 20 - Resultado da operação booleana *Fuse* no *FreeCAD 1.0*: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

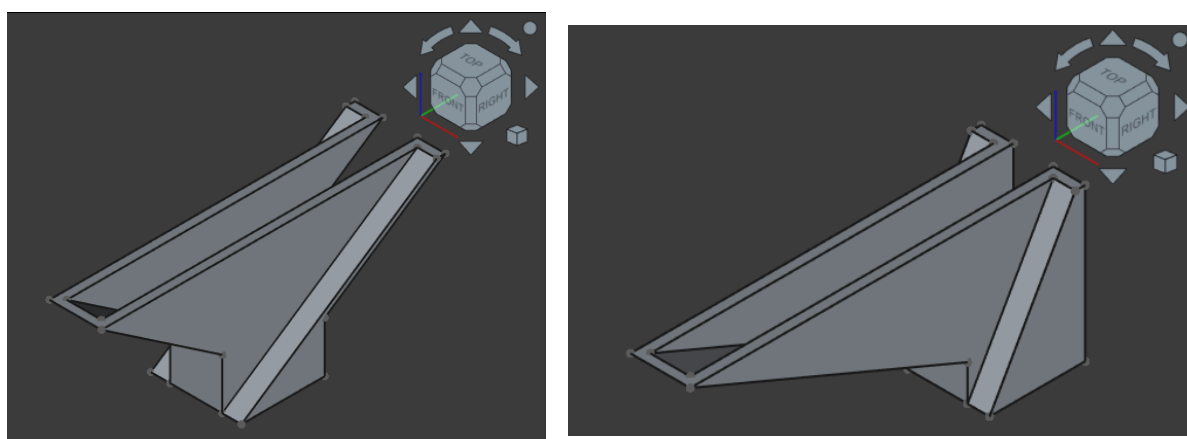


Figura 21 - Resultado do espelhamento simétrico no *FreeCAD 1.0*: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

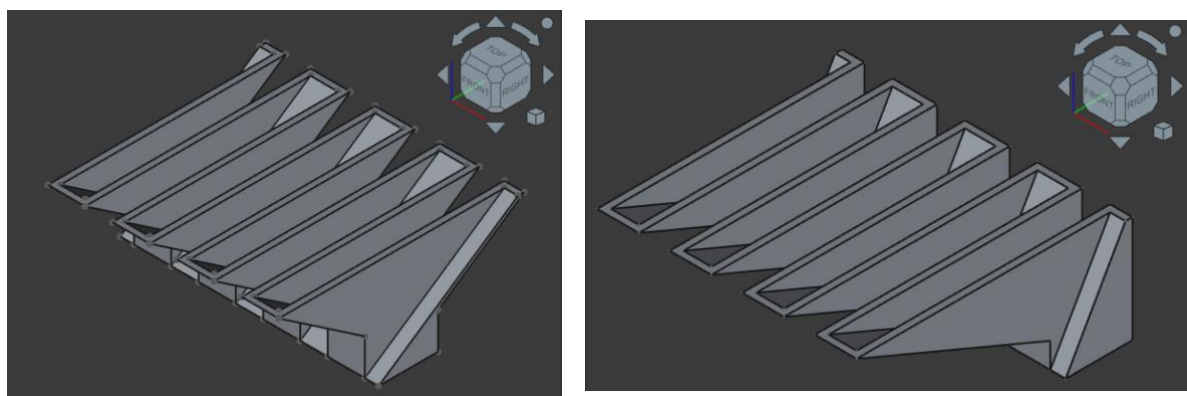


Figura 22 - Geometria final, resultado da repetição linear do módulo: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

Para documentar de forma clara a configuração geométrica de cada tipo de soleira e a geometria final dos dois modelos criados, recorreu-se ao ambiente *TechDraw* do *FreeCAD 1.0*, que elabora vistas 2D dos modelos tridimensionais (Figura 23 e Figura 24)

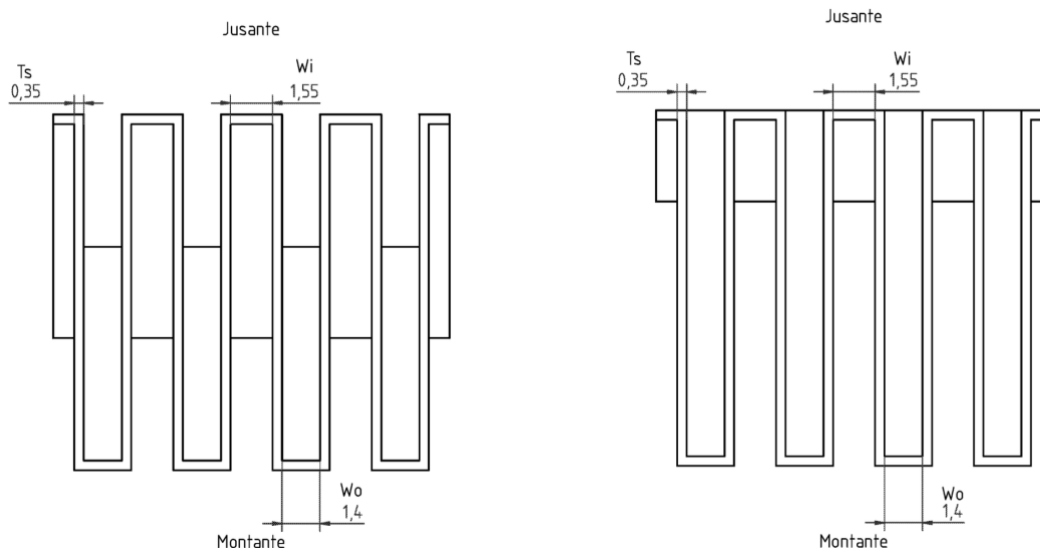


Figura 23 - Vista em planta da soleira: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

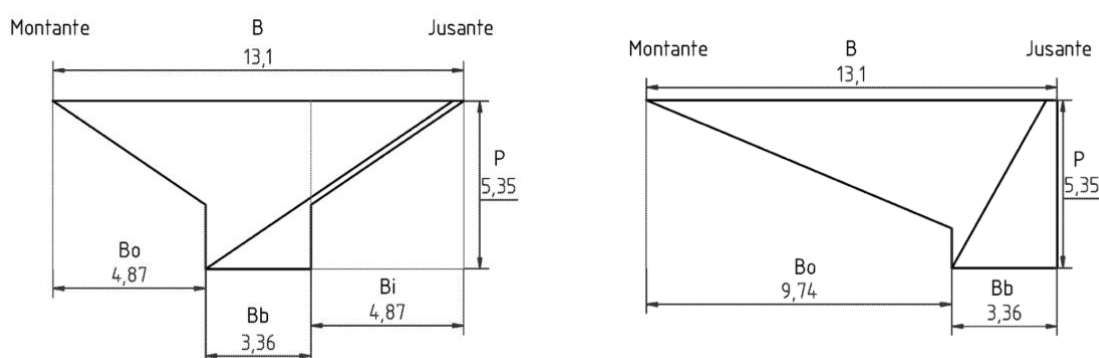


Figura 24 - Vista lateral da soleira: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

Na preparação dos modelos para as simulações *CFD*, para além da estrutura tridimensional, foram gerados perfis verticais representativos das teclas interiores e exteriores de cada tipo de soleira, recorrendo à criação de um *Pad* retangular, de espessura reduzida, colocado de forma a atravessar o modelo tridimensional (3D) nas zonas pretendidas (Figura 25). Esta interseção permitiu a obtenção de secções verticais simplificadas – modelos bidimensionais (2D) – para posteriormente servirem de base para a geração da malha computacional para as simulações bidimensionais. O objetivo é definir o domínio computacional, ou seja, o volume ou espaço, que pode ser preenchido por fluido.

Foram então criados quatro perfis verticais, com o rigor de ficarem todos com as mesmas dimensões e posicionamento relativo de cada soleira. Este detalhe assegura que as malhas computacionais a serem obtidas sejam equivalentes, com uniformidade entre as mesmas para uma comparação coerente dos resultados a surgir dos diferentes modelos.

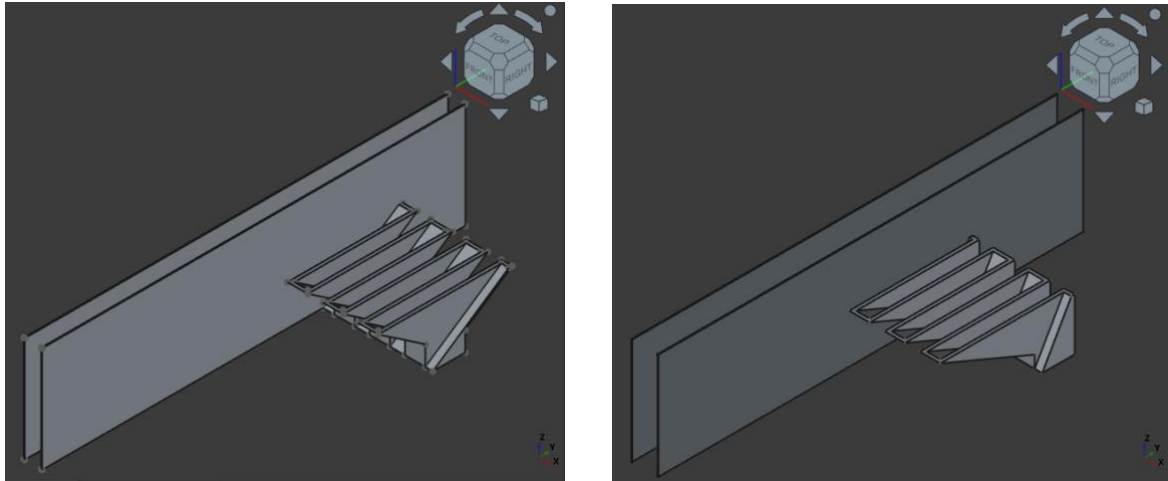


Figura 25 - *Pads* posicionados para a obtenção dos perfis verticais: Tipo A (à esquerda) e Tipo B (à direita)

Os perfis verticais são criados recorrendo, novamente, a uma operação booleana - neste caso do tipo *Cut* - que permite subtrair ao *Pad* a interseção com o modelo tridimensional completo. O resultado é o traçado das teclas no plano de corte, correspondente ao perfil 2D pretendido (Figura 26 a Figura 29)

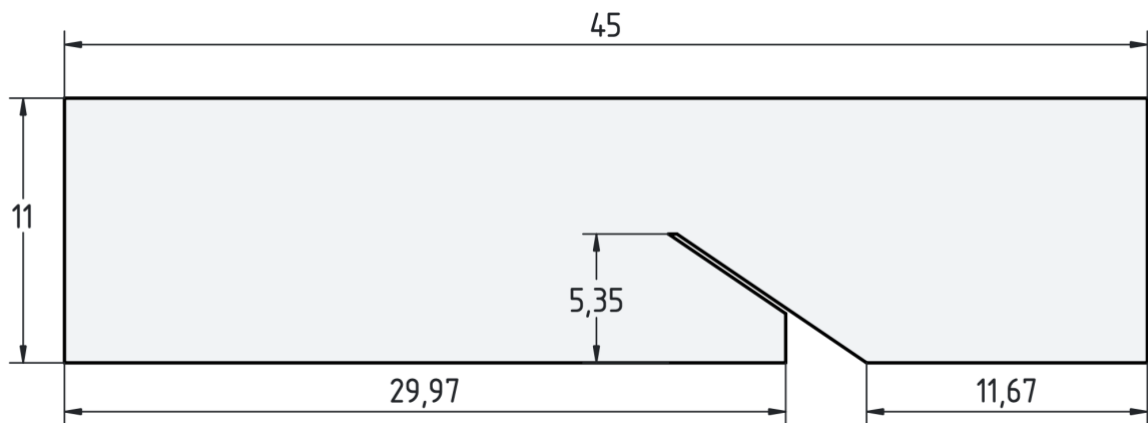


Figura 26 - Perfil 2D: Tecla Exterior Tipo A

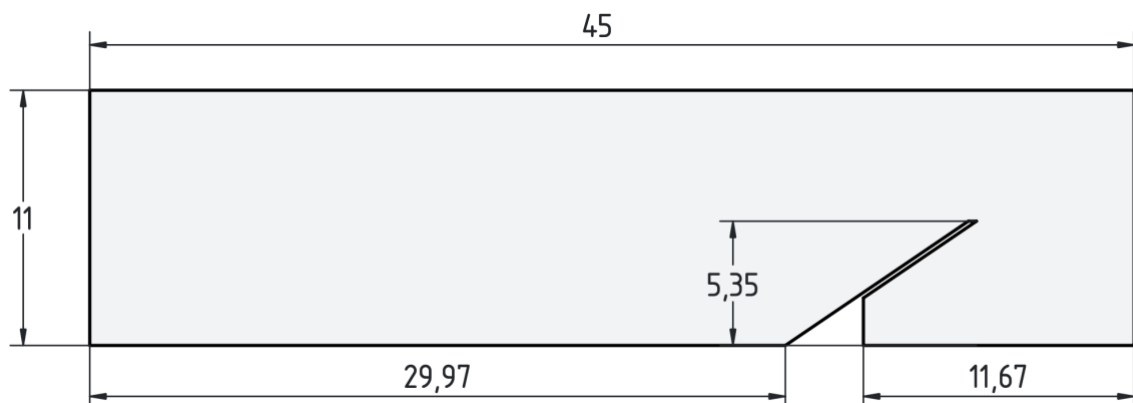


Figura 27 - Perfil 2D: Tecla Interior Tipo A

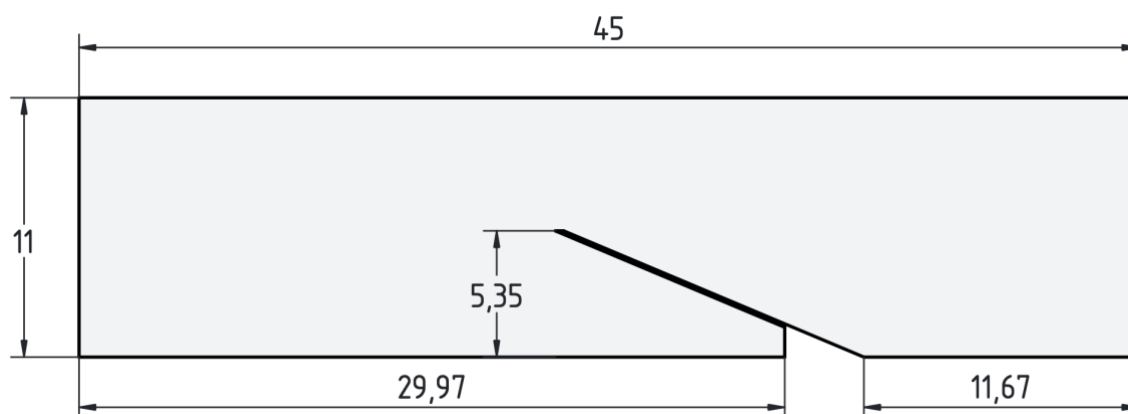


Figura 28 - Perfil 2D: Tecla Exterior Tipo B

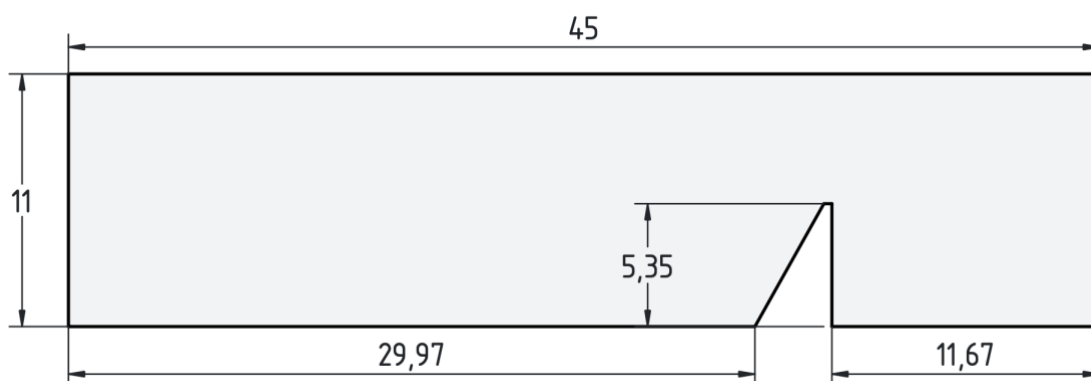


Figura 29 - Perfil 2D: Tecla Interior Tipo B

Finalmente, os limites dos perfis são exportados em formato STL (*Standard Triangle Language*), cada um dividido em quatro ficheiros: *inlet.stl*, *outlet.stl*, *wall.stl* e *top.stl* – para se proceder à geração da malha.

3.3. GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL

A malha é, no fundo, uma representação do modelo em estudo por meio de grelhas e pontos, que definem as células de cálculo (discretização em volumes finitos). No contexto da simulação numérica de fluidos, a escolha da malha é um fator importante para a precisão e estabilidade da solução, e deve ser feita de forma a considerar a fidelidade geométrica, qualidade de resultados esperada e os recursos computacionais disponíveis.

Uma malha computacional pode ser classificada como estruturada ou não estruturada. Malhas estruturadas são compostas por células organizadas de forma regular o que conduz a um melhor controlo da qualidade numérica, com menores erros de interpolação e menor exigência computacional. Por outro lado, malhas não estruturadas, com células de formas variadas, permitem que a resolução não seja uniforme, representar geometrias complexas com maior flexibilidade e utilizar mais eficientemente os recursos computacionais. Também requer algoritmos mais avançados.

A geração de uma malha computacional foi efetuada através do programa CF-MESH, versão *opensource* incluída no *OpenFOAM*, v2412 e segue uma sequência de etapas específica. Inicialmente, procede-se à importação dos ficheiros de geometria do modelo, seguida de uma verificação da qualidade dos mesmos, identificando possíveis imperfeições, com a aplicação de operações de reparação ou limpeza na necessidade de correção. Posteriormente, é gerada a malha em todo o volume, a qual pode ser sujeita a refinamento adicional em zonas de interesse e posteriormente novamente inspecionada de forma a avaliar a sua qualidade, por critérios como não ortogonalidade e continuidade para evitar instabilidades na simulação. Por fim, a malha final é guardada.

Para a análise em estudo, visto que serão feitas simulações bidimensionais e tridimensionais, foram geradas duas malhas diferentes, representativas dos domínios para cada situação.

3.3.1. MALHA 2D

Para as malhas representativas dos perfis 2D (Figura 26 a Figura 29), recorreu-se à ferramenta *cartesian2DMesh*, utilizada para gerar malhas estruturadas bidimensionais a partir de geometrias fornecidas no formato STL (*Standard Triangle Language*), neste caso as exportadas do *FreeCAD*. Dado que os perfis não possuem grandes complexidades - como buracos ou reentrâncias -, são desenhados num plano XZ e a terceira dimensão (Y) é irrelevante, esta ferramenta é uma solução eficaz e rápida para a geração da malha.

Tal como as simulações a realizar posteriormente, esta ferramenta não possui interface gráfica, utiliza apenas ficheiros de texto e execução de comandos recorrendo ao terminal *PowerShell Ubuntu 22*, uma *shell* de ambiente Linux instalada através do *Windows Subsystem for Linux (WSL)*.

A geração da malha, com base na sequência típica descrita anteriormente, é conseguida através de dois ficheiros *script Bash* – documentos de texto que agrupam uma sequência de comandos: *pre_geometry.sh* e *Allmesh.sh*. (Figura 30)

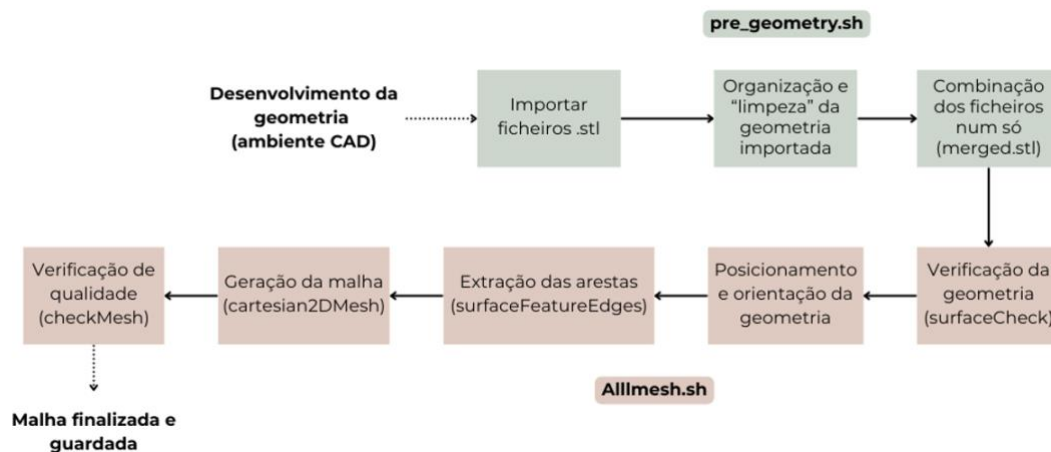


Figura 30 - Sequência de geração da malha

O primeiro *script* tem como objetivo a organização e “limpeza” de cada um dos ficheiros STL exportados, convertendo as unidades de milímetros para metros e corrigindo valores numéricos que possam comprometer a qualidade da malha. Após este pré-processamento, os quatro ficheiros STL são combinados num só (*merged.stl*), que representa o respetivo perfil. Esta abordagem assegura que a geometria é processada de forma uniforme, evitando erros.

O segundo *script* (*Allmesh.sh*) é o responsável por gerar a malha propriamente dita, recorrendo ao *cartesian2DMesh*. O processo começa com a eliminação de malha existentes – um passo indispensável no caso de possíveis alterações à malha – e a verificação da geometria importada através do *surfaceCheck*. A geometria é depois posicionada e orientada no espaço, com as rotações e translações necessárias para a alinhar com o plano XY e garantir que todas as coordenadas são positivas. Para preservar os contornos da geometria é realizada a extração das arestas com *surfaceFeatureEdges*. Após a malha ser gerada são feitas translações adicionais para a alinhar com o plano XZ e a sua qualidade é verificada com *checkMesh*. Todo este processo é registado em ficheiros de texto, que guardam as mensagens dos programas executados, de forma a garantir rastreabilidade e reprodutibilidade entre simulações.

Neste *script*, são também renomeados e configurados os *patches* (elementos) de fronteira, para assegurar correspondência entre os nomes das fronteiras na malha e os utilizados nas condições de fronteira, assim como definir os tipos de fronteira, *patch* ou *wall*, e os grupos funcionais (*inlets*, *outlets*, *walls*).

A distinção entre os tipos de fronteira é essencial para o *solver*, neste caso o *interFoam*, entender como tratar fisicamente cada fronteira do domínio (Figura 31) a simular. *patch* é normalmente atribuído a entradas, saídas, qualquer fronteira que pode ser atravessada pelo escoamento, enquanto *wall* representa uma superfície sólida do domínio, ou seja, as barreiras físicas aos fluidos.

No caso das malhas dos perfis 2D, o tipo *wall* é apenas atribuído à fronteira *lowerWall*, que representa a soleira e o fundo do canal. (Figura 32)

Importa também referir que, inicialmente, todas as malhas foram geradas com uma resolução (*maxCellSize*) de 0,4 metros, ou seja, nenhuma célula do domínio tem uma dimensão superior a 40 centímetros.

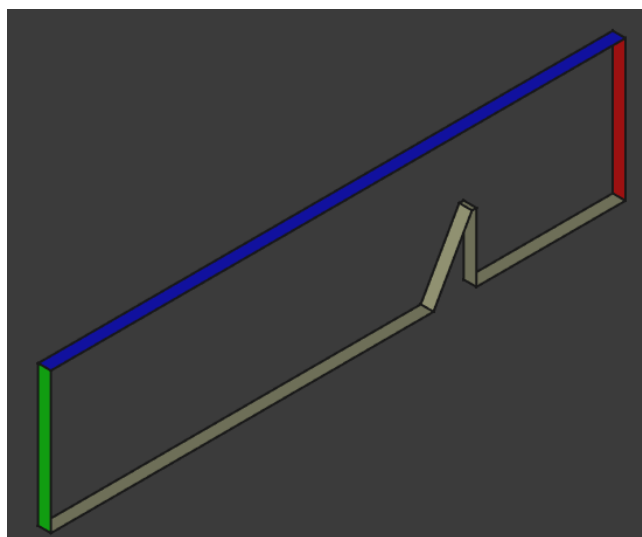


Figura 31 - Exemplo de fronteiras do domínio 2D: *inlet* (a verde), *atmosphere* (a azul), *outlet* (a vermelho) e *lowerWall* (a cinzento)

```

(
  inlet
  {
    type            patch;
    nFaces          28;
    startFace       6206;
    inGroups        2 ( inOut inlets );
  }
  outlet
  {
    type            patch;
    nFaces          28;
    startFace       6234;
    inGroups        2 ( inOut outlets );
  }
  atmosphere
  {
    type            patch;
    nFaces          114;
    startFace       6262;
    inGroups        3 ( inOut atmo top );
  }
  lowerWall
  {
    type            wall;
    nFaces          166;
    startFace       6376;
    inGroups        1 ( walls );
  }
  front
  {
    type            empty;
    nFaces          3187;
    startFace       6542;
  }
  back
  {
    type            empty;
    nFaces          3187;
    startFace       9729;
  }
)

```

Figura 32 - Tipos de fronteiras e grupos atribuídos (Malha 2D)

3.3.2. MALHA 3D

A malha do domínio tridimensional é feita pela ferramenta *cartesianMesh*, que permite gerar malhas estruturadas de geometrias tridimensionais, com controlo de resolução por região, que permitiria, no caso da análise destas geometrias mais completas, um refinamento mais detalhado próximo da superfície das soleiras, assegurando uma melhor resolução apenas geometria relevante e não de todo o domínio.

O domínio de cálculo da geometria 3D pode ser descrito como uma “caixa” que inclui, no seu interior uma configuração da soleira composta por uma tecla exterior e meia tecla interior de cada lado (semelhante às geometrias da Figura 21). Este volume mantém, no que diz respeito a comprimento, altura e posição da tecla as mesmas dimensões base do domínio bidimensional, para permitir, posteriormente, uma comparação direta e coerente entre os resultados. Os módulos de cada soleira foram exportados divididos em 6 ficheiros STL: *side_left*, *side_right*, *inlet*, *top*, *outlet* e *wall*. (Figura 33)

Esta abordagem, a definição do domínio apenas como um módulo da soleira PKW, serve para reduzir o custo computacional e tornar a simulação mais leve para o processador. A replicação e análise dos quatro módulos completos foi posteriormente efetuada no software de pós- processamento (*ParaView*), para se poder visualizar o comportamento hidráulico na totalidade da estrutura, que contém quatro módulos.

À semelhança daquilo que foi aplicado na geração da malha bidimensional, o *cartesianMesh* lida diretamente com a geometria importada em STL, previamente combinadas, escaladas e centradas por meio de um *script* igualmente denominado *pre_geometry.sh*. O processo foi também automatizado através de um *script* *Allmesh.sh*, que, após gerar a malha vai também configurar os *patches* com os tipos

de fronteira (Figura 34). Para cada tipologia de soleira, foram geradas uma malha em que a dimensão característica de 0,2 m na parte da água e 0,4 m na parte do ar.

Visto que este módulo a simular vai representar apenas um quarto da geometria final, é introduzido um novo tipo de fronteira - para além de *patch* ou *wall* – o *symmetry*. Esta condição, aplicada às fronteiras *front* e *back*, representa como que uma parede imaginária, uma fronteira onde não há fluxo perpendicular e que funciona como um “espelho”, em que o escoamento é simétrico em ambos os lados.

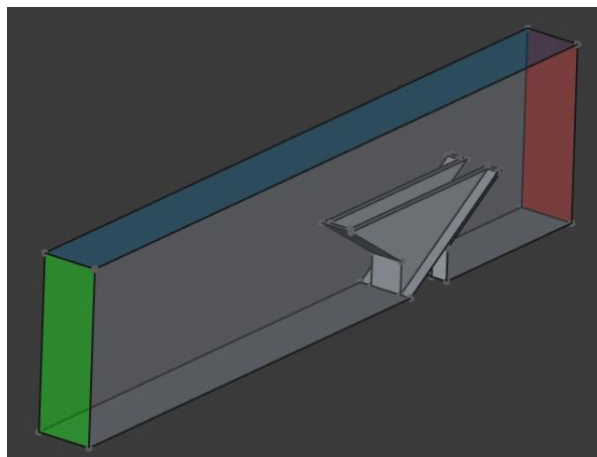


Figura 33 - Exemplo de fronteiras 3D: *front* e *back* (a cinzento transparente), *inlet* (a verde), *atmosphere* (a azul), *outlet* (a vermelho) e *lowerWall* (a cinzento opaco)

```
(
inlet
{
    type            patch;
    inGroups        2 ( inOut inlets );
    nFaces          772;
    startFace       431832;
}
outlet
{
    type            patch;
    inGroups        2 ( inOut outlets );
    nFaces          488;
    startFace       432604;
}
atmosphere
{
    type            patch;
    inGroups        3 ( inOut atmo top );
    nFaces          1140;
    startFace       433012;
}
lowerWall
{
    type            wall;
    inGroups        3 ( walls concrete wall );
    nFaces          8818;
    startFace       434152;
}
front
{
    type            symmetry;
    inGroups        2 ( symmetryPlane symmetry );
    nFaces          8777;
    startFace       442970;
}
back
{
    type            symmetry;
    inGroups        2 ( symmetryPlane symmetry );
    nFaces          8777;
    startFace       451747;
}
)
```

Figura 34 - Tipos de fronteiras e grupos atribuídos (Malha 3D)

3.4. SOFTWARE OPENFOAM E SOLVER INTERFOAM

O *OpenFOAM* é uma plataforma de código aberto, gratuita, amplamente utilizada para a Modelação Numérica de Fluidos. Este software permite realizar tanto o pré-processamento como o pós-processamento de dados e oferece uma grande flexibilidade e extensibilidade, pois tem a possibilidade de personalização de *solvers* e condições de fronteira, adaptando-se às necessidades específicas de cada caso.

Ao contrário de outros softwares, o *OpenFOAM* não possui uma interface gráfica nativa, sendo operado inteiramente através de ficheiros de texto e execução de comandos em terminal. Esta abordagem permite replicar os procedimentos e um controlo total sobre a definição dos casos de estudo, parâmetros numéricos e condições de fronteira, embora exija um maior conhecimento técnico e familiaridade com a linha de comandos *Linux*.

Um modelo (habitualmente solver na nomenclatura do *OpenFOAM*) é, no fundo, a ferramenta CFD que resolve todas as equações e métodos necessários. O software *OpenFOAM* tem vários modelos que o utilizador deve escolher em função do seu caso de estudo, se se trata de escoamento incompressível, multifásico, transferências de calor, entre outros.

O modelo usado na realização deste caso de estudo é o *interFoam*, usado para simulações de escoamentos bifásicos incompressíveis, ou seja, escoamentos em que duas fases distintas coexistem, como a água e o ar, e são ambas consideradas incompressíveis, ou seja, são desprezadas possíveis variações de densidade com a pressão.

Este modelo é baseado no método *Volume of Fluid (VoF)*, utilizado para definir a interface (fronteira) entre dois fluidos, no nosso caso a água e o ar.

As descrições detalhadas das equações, métodos e modelos utilizados neste caso de estudo são presentes no enquadramento teórico desta dissertação (Secção 2.4.3 e 2.4.4).

3.5. CONFIGURAÇÃO DO CASO DE ESTUDO EM OPENFOAM

Dada a inexistência de interface gráfica, os casos no *OpenFOAM* são configurados a partir de diferentes diretórios, cuja nomenclatura é padronizada para facilitar a acessibilidade e compreensão entre utilizadores e até mesmo reprodutibilidade para os diferentes casos estudados. A utilização do solver *interFoam* segue também estrutura tradicional, composta pelas pastas *0/*, *constant/* e *system* (Tabela 11).

A pasta *0/* armazena as condições iniciais. Os caudais de entrada, e valores de turbulência estão no ficheiro *0/include/initialConditions* e as condições de contorno em ficheiros de texto específicos para a velocidade (U), a pressão hidrostática (p_rgh) e a fração de fase, ou valor do *VoF*, (*alpha.water*), que define então a distribuição entre água e ar, e os campos da turbulência (k e ϵ)

A próxima pasta, *system/*, inclui os ficheiros que controlam a simulação: os tempos de simulação e a especificação do modelo (*interFoam*) encontram-se no ficheiro *controlDict*, o ficheiro *fvScheme* define os esquemas numéricos usados na discretização, descritos na secção 2.4.4 desta dissertação; e *fvSolution* configura os solvers numéricos e os parâmetros de correção da fronteira entre fases. Um quarto ficheiro, *setFieldsDict* é utilizado com a ferramenta *setFields* para definir o nível inicial da lâmina da água no domínio.

Na pasta *constant/* estão armazenados os ficheiros STL com a representação da geometria da soleira, e a respetiva malha gerada anteriormente (Secção 3.3). Este diretório contém também ficheiros que

contém as propriedades físicas dos fluidos e a definição do vetor da aceleração gravítica, essenciais para defini o comportamento físico dos fluidos, neste caso água e ar.

Tabela 11 - Função e localização dos ficheiros da configuração de um caso *OpenFOAM*

Localização	Ficheiro ou pasta/	Função principal
0/	U	Definição do campo de velocidade inicial e condições de contorno da velocidade.
	p_rgh	Pressão modificada inicial e as suas condições de contorno.
	alpha.water	Distribuição da água e as suas condições de contorno.
	include/initialConditions	Definição de valores iniciais, ex: caudal de entrada.
system/	controlDict	Controla o tempo de simulação, frequência de escrita de resultados e especificação do solver
	fvSchemes	Definição dos modelos numéricos usados para as derivadas espaciais e temporais
	fvSolution	Define métodos de resolução, tolerâncias e parâmetros de correção.
	setFieldsDict	Configuração da superfície da água com base nas regiões geométricas.
constant/	polyMesh/	Contém a malha do domínio a simular, gerada pelo cartesian2DMesh.
	triSurface/	Armazena os ficheiros STL usados na geração da malha.
	g	Define o vetor gravidade no domínio.
	transportProperties	Define as propriedades físicas dos fluidos, como viscosidade, densidade e tensão superficial.
	turbulenceProperties	Especifica se o escoamento é laminar ou turbulento e qual o modelo de turbulência utilizado.

No caso das dimensões bidimensionais, foram criados diretórios individuais para cada caso, ou seja, geometria (e respetiva malha) e caudal, todos com esta estrutura padronizada. Para as simulações tridimensionais, os diretórios são semelhantes, em função da geometria e do caudal, também cada um com esta estrutura padronizada.

Dos ficheiros acima descritos, de seguida apresentam-se os parâmetros mais relevantes especificados para a configuração das simulações a realizar. (Tabelas Tabela 12 e Tabela 13)

Tabela 12 – Exemplo de parâmetros de controlo da simulação (*system/controlDict*)

Campo	Definição	Valor utilizado
<i>application</i>	Nome do solver	<i>interFoam</i>
<i>startTime</i>	Tempo inicial	0
<i>endTime</i>	Tempo final da simulação	120
<i>deltaT</i>	Passo de tempo inicial	0.001
<i>writeInterval</i>	Intervalo de escrita dos resultados	10
<i>adjustTimeStep</i>	Adaptação automática do passo de tempo	<i>true</i>
<i>maxCo / maxAlphaCo</i>	Limites do número de Courant - que relaciona a velocidade do escoamento, o tamanho das células da malha e o passo temporal.	0.2

No que diz respeito às propriedades das duas fases simuladas, a água e o ar, foram modelados como incompressíveis, com densidades de 1000 kg/m^3 e 1 kg/m^3 , respetivamente. A viscosidade cinemática foi definida como $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e a tensão superficial de $0,07 \text{ N/m}$. (Tabela Tabela 13)

Tabela 13 - Propriedades dos fluídos (*constant/ transportProperties*)

Campo	Definição	Valor Utilizado
<i>phases</i>	Fases, neste caso água e ar	(<i>water air</i>)
<i>rho</i>	Densidade da fase	1000 (<i>water</i>); 1 (<i>air</i>)
<i>nu</i>	Viscosidade cinemática	$1\text{e-}06$ (<i>water</i>); $1,48\text{e-}05$ (<i>air</i>)
<i>sigma</i>	Tensão superficial	0,07

O vetor da aceleração gravítica (*constant/g*) foi definido por (0; 0 ; -9,81), pois a direção vertical considerada é o eixo Z.

3.6. EXEMPLOS DE SIMULAÇÕES

3.6.1. SIMULAÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D)

Cada simulação bidimensional foi então executada com o modelo *interFoam*, iniciando em $t=0 \text{ s}$ e com uma duração de 120 segundos, permitindo alcançar o regime permanente. Os campos das variáveis foram escritos a cada 10 segundos, com passo de tempo adaptativo controlado por um número de Courant (Co) máximo de 0,2, para garantir que a simulação decorre de forma estável e fisicamente coerente.

Com os perfis bidimensionais realizaram-se simulações para os mesmos cinco valores de caudal estudados no ponto 4.1 (100, 120, 150, 170 e $190 \text{ m}^3/\text{s}$), para analisar a formação da superfície livre e

os perfis de velocidades de forma a observar o comportamento do escoamento em torno de cada uma das teclas individualmente – exteriores e interiores. Foram efetuadas 20 simulações, com tempos de cálculo entre os 15 e os 20 minutos.

Importa salientar que esta abordagem, a simulação de um plano vertical pelo eixo de uma tecla, não captura os fenómenos que ocorrem ao longo de toda a soleira, já que a interação entre teclas é um fator determinante e o seu efeito está na base das vantagens da utilização de uma soleira do tipo Piano Keys. Porém, estas simulações fornecem análises relevantes já que se trata de zonas críticas das geometrias, possuem menores exigências computacionais, o que permite uma obtenção rápida de resultados, e são um complemento à análise tridimensional a desenvolver posteriormente.

A estrutura dos diretórios foi organizada em função do caudal a simular e da tecla em estudo. Foram criadas cinco pastas principais, uma para cada valor de caudal. No interior de cada uma foram incluídas quatro subpastas, correspondentes aos diferentes perfis bidimensionais a analisar, cada uma destas últimas continha a configuração típica de um caso *OpenFOAM*, conforme descrito no subcapítulo anterior (Secção 3.5).

Na correspondente pasta de cada perfil, o caudal de cada simulação é inserido no ficheiro correspondente às condições iniciais, *0.orig/include/initalConditions*, no parâmetro *designFlowRate* (Figura 35). Neste mesmo ficheiro, o parâmetro *inletFlowRate* corresponde ao caudal específico (q , $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$), o valor do caudal a simular, dividido pelo comprimento não linear da soleira em estudo (L), já que a espessura do domínio bidimensional é apenas correspondente a um metro.

```

Ubuntu-24.04 > home > juliasofiars > 1_2D > 150_m3s > 150x0_A_Ext > run > 0.orig > include > initialConditions
1  /*-----*-- C++ -*-----*/
2  | ===== |
3  | \ \ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  | \ \ / O peration | Version: v2412
5  | \ \ / A nd | Website: www.openfoam.com
6  | \ \ / M anipulation |
7  /*-----*/
8
9  designFlowRate 150;
10 inletFlowRate #eval{ $designFlowRate/115 };
11 pressure 101325;
12 turbulentKE 4.14e-03;
13 turbulentEpsilon 4.39e-05;
14
15 // ***** //

```

Figura 35 - Exemplo da definição do caudal a simular nas simulações 2D

3.6.2. SIMULAÇÕES TRIDIMENSIONAIS (3D)

As interações laterais entre teclas, a importância do comprimento não linear da soleira e o efeito que este tem na capacidade de vazão são efeitos provenientes da geometria completa, daí a importância de recorrer a simulações tridimensionais, o que distingue fortemente o funcionamento das soleiras PKW das soleiras retilíneas.

Esta representação fiel da totalidade da estrutura permite uma análise do escoamento mais próxima da realidade e evidência as diferenças de desempenho e comportamento hidráulico global entre os modelos de soleira PKW.

Tal como nas simulações bidimensionais, as simulações tridimensionais foram também executadas com o modelo *interFoam*, com início em $t=0$ s e duração de 80 segundos e simulados os mesmos cinco valores de caudal para ambas as tipologias. O propósito foi igualmente a obtenção da carga hidráulica acima da soleira e a análise do comportamento do escoamento em cada tecla, desta vez com a influência da geometria completa. Totalizaram-se 10 simulações, com tempos de cálculo entre as 5 e as 8 horas.

Os diretórios foram organizados em função da tipologia que lhes correspondia e o caudal simulado, inserido também na pasta correspondente às condições iniciais. Nesse ficheiro, o parâmetro *designFlowRate* corresponde ao caudal da simulação, *Q_inlet* corresponde ao caudal de 1 módulo, visto que se pretendem os resultados para 4 módulos, o caudal da simulação é dividido por quatro. No caso das simulações tridimensionais, o caudal foi programado para entrar de forma gradual, como se observa na linha *inletFlowRate* (Figura 36), onde é definida uma tabela de evolução temporal. O escoamento inicia sem caudal a entrar, aos 30 segundos escoam $10 \text{ m}^3/\text{s}$ e o valor total é atingido progressivamente entre os 60 e os 80 segundos.

```

Ubuntu-24.04 > home > juliasofiars > 1_3D > 3_simulations > A_1mod_Q190_M00 > 0.orig > include > initialConditions
1  |/*-----*- C++ -*-----*/
2  | =====
3  |  \ \      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  |  \ \      /  O peration  | Version: v2412
5  |   \ \    /  A nd         | Website: www.openfoam.com
6  |    \ \   /  M anipulation |
7  |/*-----*/
8
9  designFlowRate    190;
10 Q_inlet           #eval{ $designFlowRate/4 };
11 inletFlowRate     table ((0 0)(30 10)(60 $Q_inlet));
12
13 pressure          101325;
14 turbulentKE       4.14e-03;
15 turbulentEpsilon  4.39e-05;
16
17 // *****
18

```

Figura 36 - Exemplo da definição do caudal a simular nas simulações 3D

4

ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das diversas simulações realizadas com a metodologia descrita no capítulo anterior, assim como uma comparação com estimativas teóricas com base nos métodos descritos na revisão da literatura (Secção 2.3.3).

No final das simulações é gerado um ficheiro com extensão *.foam* na pasta do caso simulado. Esse ficheiro pode ser aberto no programa *ParaView*, que permite visualizar a representação de toda a malha e do escoamento, e, especificamente, aceder aos campos calculados da velocidade (U), pressão (p e p_rgh) e $\alpha.water$ em todo o domínio e em todos os instantes guardados.

Toda a análise que se segue é feita com recurso ao *ParaView*, que permite também efetuar medições adicionais, extrair perfis e aplicar filtros, permitindo a interpretação do comportamento hidráulico dos escoamentos simulados e a avaliação do desempenho das soleiras do tipo *Piano Keys*.

No que diz respeito à eficiência hidráulica, Torre-Gómez et al. (2023), referem que uma tipologia é mais eficiente se, para uma determinada carga hidráulica, consegue descarregar um maior volume de água. Nessa linha de raciocínio, visto que as simulações *OpenFOAM* são conduzidas com base em valores de caudais fixos, considerou-se que uma tipologia será mais eficiente quando, para o mesmo valor de caudal, exigir uma carga hidráulica inferior.

4.1. ESTIMATIVA TEÓRICA DA VAZÃO

Foi efetuado um estudo analítico, com o objetivo de estimar os resultados no que diz respeito ao comportamento hidráulico para soleiras do tipo *Piano Keys*, de forma a estabelecer uma base de comparação com os dados resultantes das simulações e validar os modelos numéricos utilizados. Esta fase, anterior ao CFD, é fundamental para o entendimento do problema e para a definição da metodologia do estudo CFD (modelo, malha, condições de fronteira, métodos).

Com base em dois dos métodos de cálculo de capacidade de vazão descritos no ponto 2.3.3, as metodologias de Kabiri-Samani e Javaheri (2012) e de Leite Ribeiro *et al* (2012), foram calculados os valores das cargas hidráulicas acima da soleira esperadas (H) para os dois tipos de soleira e para as diferentes condições de escoamento, definidas por cinco valores de caudal distintos: o caudal máximo (190 m³/s), o caudal de dimensionamento (120 m³/s), um caudal inferior (100 m³/s) e dois caudais intermédios (170 e 150 m³/s).

Importa realçar que, como foi referido no capítulo 2, os métodos selecionados apresentam limitações de aplicabilidade (Tabela 3), cujos valores não são totalmente cumpridos pelas geometrias em estudo. No entanto, reconhecendo que os valores obtidos poderão não refletir com precisão o comportamento real do escoamento, optou-se pela sua utilização, já que podem fornecer uma aproximação útil aos resultados a obter nas simulações.

Foram utilizados então os dados dos modelos, e alguns dos parâmetros calculados em função dos mesmos (Tabela 14 a Tabela 16).

Tabela 14 - Parâmetros Geométricos (*Data Sheet (PKW Campauleil, EDF)*, [s.d.])

B (m)	P (m)	W (m)	L (m)	Wi (m)	Wo (m)	Ts (m)
13,1	5,35	14,6	116,6	1,55	1,4	0,35

Tabela 15 - Rácios de referência (Gomes, 2018)

Q_d (m³/s)	Si	Q_d/W	H/P	L/W	P/Wi
120	0,65	8,21	0,17	7,98	3,45

Tabela 16 - Parâmetros calculados

Tipo PKW	Bo	Bi	Bi/B_i	Bo/B	Bi/P	Bo/P
Tipo A	4,87	4,87	0,37	0,37	0,91	0,91
Tipo B	9,74	0	0	0,74	0	1,82

O cálculo foi realizado com base na expressão da lei de vazão, que permite obter uma relação entre a carga hidráulica acima da soleira (H) e o caudal (Q). O traçado das curvas teóricas permite visualizar a curva de vazão das soleiras de tipo A e B e obter uma estimativa dos resultados esperados.

4.1.1. KABIRI-SAMANI E JAVAHERI (2012)

No método proposto por Kabiri-Samani e Javaheri, (2012), as diferenças de vazão (Eq. 32) entre o Tipo A e o Tipo B resultam dos comprimentos das teclas interior e exterior (B_i e B_o), cujos valores influenciam o coeficiente de vazão C_d (Eq. 34 e 35).

No gráfico da Figura 37 apresentam-se as curvas teóricas e os valores correspondentes às condições de escoamento estudadas, sendo evidentes as diferenças no comportamento hidráulico de cada tipo de soleira *Piano Keys* (PKW). Na Tabela 17 apresentam-se os valores da carga hidráulica obtidos para as tipologias e para os cinco caudais.

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times 14,6 \times \sqrt{2 \times 9,81 H^3} \quad (32)$$

$$C_d = \left[0,212 \times \left(\frac{H}{P} \right)^{-0,675} \times \left(\frac{L}{W} \right)^{0,377} \times \left(\frac{Wi}{Wo} \right)^{0,426} \times \left(\frac{B}{P} \right)^{0,306} \times e^{1,504 \cdot \frac{Bo}{B} + 0,093 \cdot \frac{Bi}{B}} \right] + 0,606 \quad (33)$$

$$C_d(A) = \left[0,212 \times \left(\frac{H}{5,35} \right)^{-0,675} \times \left(\frac{116,6}{14,6} \right)^{0,377} \times \left(\frac{1,55}{1,4} \right)^{0,426} \times \left(\frac{13,1}{5,35} \right)^{0,306} \times e^{1,504 \cdot \frac{4,87}{13,1} + 0,093 \cdot \frac{4,87}{13,1}} \right] + 0,606 \quad (34)$$

$$C_d(B) = \left[0,212 \times \left(\frac{H}{5,35} \right)^{-0,675} \times \left(\frac{116,6}{14,6} \right)^{0,377} \times \left(\frac{1,55}{1,40} \right)^{0,426} \times \left(\frac{13,1}{5,35} \right)^{0,306} \times e^{1,504 \times \frac{9,74}{13,1} + 0,093 \times \frac{0}{13,1}} \right] + 0,606 \quad (35)$$

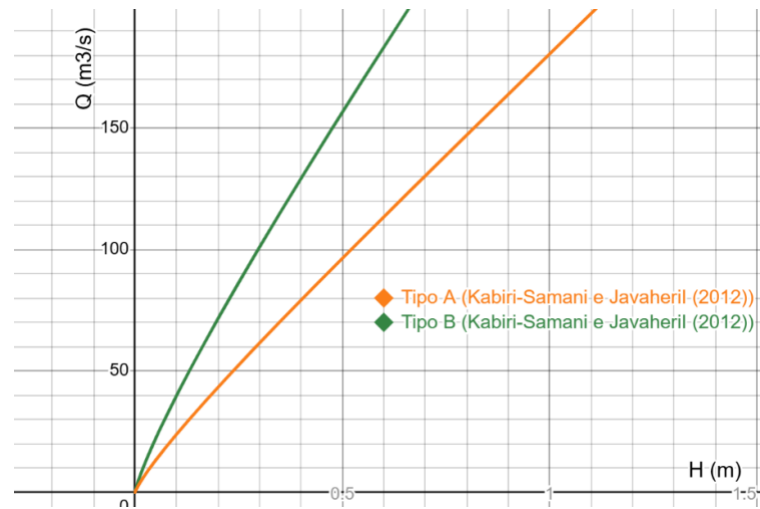


Figura 37 - Curva teórica da capacidade de descarga (Método de Kabiri-Samani e Javaheri)

Tabela 17 - Valores de H expectáveis pelo método teórico

Q (m³/s)	100	120	150	170	190
Tipologia A	0,521 m	0,639 m	0,817 m	0,937 m	1,057 m
Tipologia B	0,296 m	0,367 m	0,476 m	0,550 m	0,626 m

Ambas as curvas têm uma forma típica das relações empíricas, com o crescimento progressivo do nível da água com um aumento do caudal descarregado, porém, a vantagem relativa do Tipo B (linha verde) destaca-se por conseguir descarregar os mesmos valores de caudal que o Tipo A (linha laranja), com valores de carga hidráulica mais baixos, o que indica uma maior eficiência hidráulica. Repare-se, por exemplo, que para um caudal de 190 m³/s, correspondente a uma situação de cheia, segundo esta estimativa, a soleira de Tipo B conseguiria descarregá-lo com uma altura de água cerca de 41% mais baixa que o Tipo A.

4.1.2. LEITE RIBEIRO ET AL. (2012)

O segundo método baseia-se no rácio entre o caudal de uma soleira do tipo Piano Keys e o caudal de uma soleira delgada. (Eq. 36)

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_s} = \frac{Q_{PKW}}{0,42 * W * \sqrt{2gH^3}} = 1 + 0,24 \times \left(\frac{(L - W) * P}{W * H} \right)^{0,9} \quad (w \times p \times b \times a) \quad (36)$$

Para este método, o único valor que distingue as duas tipologias é o fator corretivo associado ao comprimento da projeção das teclas (b), uma vez que, no tipo B o valor de B_i é nulo. No entanto, visto

que o valor de Bo para o tipo B foi duplicado em relação ao de tipo A, o fator corretivo resultante mantém-se e a fórmula da capacidade de vazão será idêntica para ambas as tipologias (Eq. 39).

$$w = \left(\frac{Wi}{Wo} \right)^{0,05} = \left(\frac{1,55}{1,4} \right)^{0,05} = 1,01 \quad (37)$$

$$p = \left(\frac{Pi}{Po} \right)^{0,25} = (1)^{0,25} \quad (38)$$

$$b = \left(0,3 + \frac{Bo + Bi}{B} \right)^{-0,5} \left(0,3 + \frac{4,87 + 4,87}{13,1} \right)^{-0,5} = \left(0,3 + \frac{9,74 + 0}{13,1} \right)^{-0,5} \quad (39)$$

$$a = 1 + \left(\frac{Ro}{Po} \right)^2 = 1 + \left(\frac{0}{5,35} \right)^2 \quad (40)$$

De qualquer forma, a comparação entre esta curva e as propostas Kabiri-Samani e Javaheri, (2012) (Figura 38) permite verificar que para caudais inferiores, apresenta uma eficiência hidráulica mais próxima da obtida pelo método de Kabiri-Samani e Javaheri, (2012) para a tipologia B, enquanto que para caudais superiores, a curva vai-se aproximando da curva proposta para a Tipologia A. Assim, conclui-se que a aproximação do método de Leite Ribeiro, semelhante para os dois tipos, se encontra entre os valores obtidos pela metodologia Kabiri-Samani e Javaheri (2012) para os Tipos A e B.

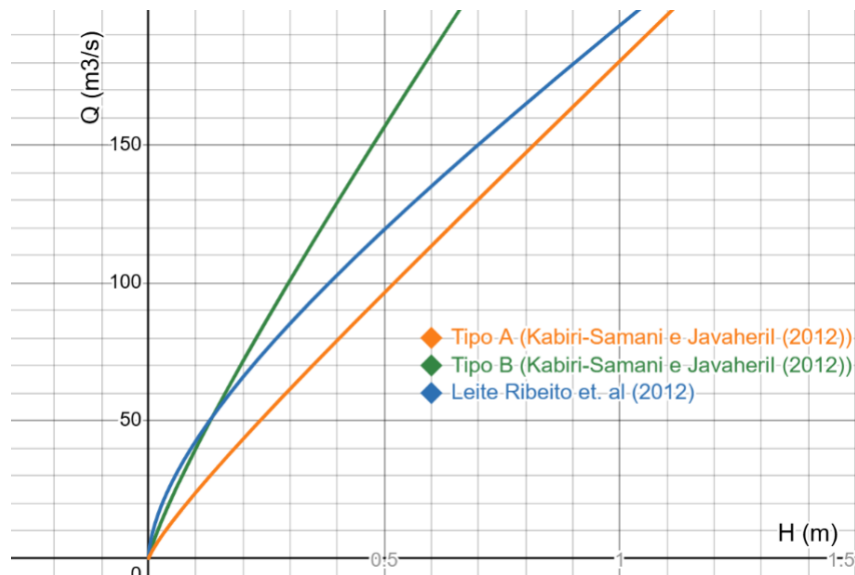


Figura 38 - Curva teórica da capacidade de descarga (Kabiri-Samani et al. vs Leite Ribeiro et al.)

Apesar de ser uma abordagem simplificada e empírica, mesmo com os limites teóricos a não serem totalmente cumpridos, estas análises são essenciais, especialmente em fases preliminares de projeto, quando não é possível recorrer imediatamente a simulações numéricas ou modelos físicos.

4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 2D

Os resultados em análise nesta secção correspondem ao instante em que o escoamento estabilizou, ou seja, quando o nível a montante da soleira PKW ficou constante e o caudal de saída, visualizado com recurso ao *ParaView*, igualou o valor do caudal de entrada (*inletFlow*), inserido aquando da configuração do caso de estudo.

Como referido anteriormente, definiu-se um tempo de simulação de 120 segundos, para o qual se verificou que, na maioria das condições de escoamento consideradas, o escoamento havia estabilizado. No entanto, tal não aconteceu nas simulações de caudais mais baixos (100 e 120 m³/s), pelo que nestes casos se considerou um tempo de simulação superior, 200 segundos.

O perfil da tecla interior da soleira de tipo A teve de ser simulado com uma malha de resolução ligeiramente diferente (0,3 m ao invés de 0,4 m), uma vez que, com a configuração utilizada nos restantes, a simulação falhava, possivelmente devido à necessidade de cálculos mais minuciosos para o que acontece a jusante da tecla e devido à definição geométrica da crista. Esta alteração evidencia a importância da definição da malha computacional para a precisão, estabilidade e sucesso de uma simulação.

Para cada simulação realizada, tirando proveito das funcionalidades do *ParaView*, foram visualizados elementos importantes como a linha de superfície livre e vetores velocidade.

4.2.1. CURVA DE VAZÃO

Para identificar quando o escoamento atinge o regime permanente é necessário analisar a evolução da superfície livre ao longo do tempo de simulação. Para tal foi aplicado o filtro *Contour* ao campo *alpha.water*, definindo um valor de 0,5, ou seja, o *ParaView* apresenta uma linha que representa, a cada instante a localização da superfície livre no domínio, na qual a fração entre água e ar é 0,5, com base na interpolação dos valores das células.

Foi calculado o valor máximo da coordenada vertical dessa linha, representando a profundidade de água a montante da soleira a cada instante e recorreu-se ao filtro *Plot Data Over Time* para representar graficamente a sua evolução. Considera-se que o escoamento atinge o regime permanente quando esta altura estabiliza, sendo este valor final interpretado como a profundidade da água na zona a montante da soleira (*Z*).

Nas seguintes figuras apresentam-se, para os diferentes caudais considerados, os gráficos da variação temporal da profundidade máxima obtidos para as duas teclas (interior e exterior) de cada um dos dois tipos (A e B). (Figura 39 a Figura 42)

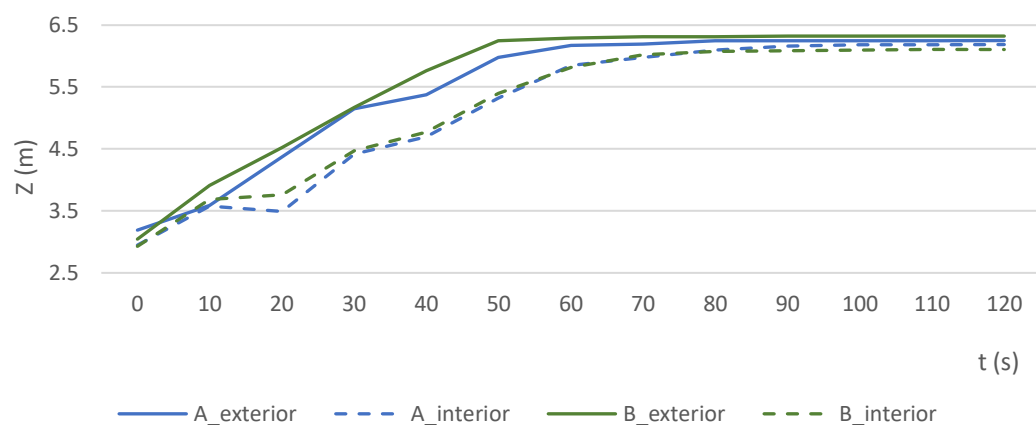


Figura 39 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 190 \text{ m}^3/\text{s}$)

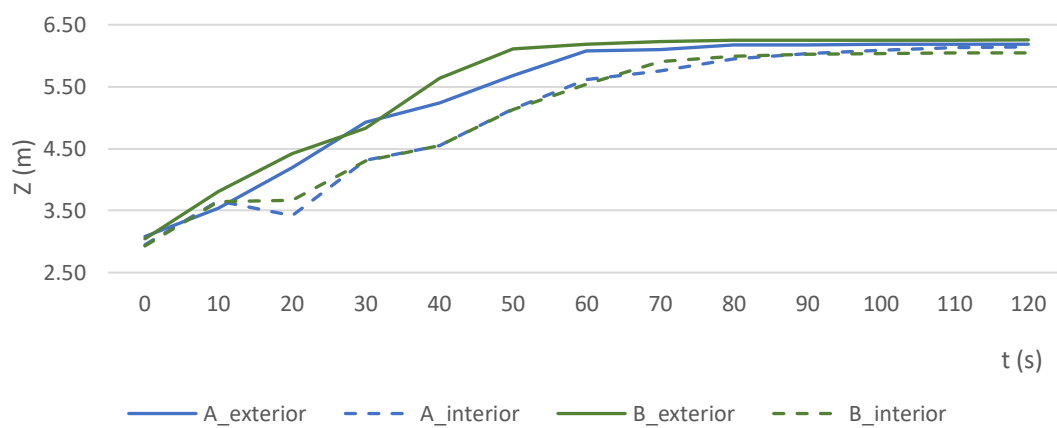


Figura 40 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 170 \text{ m}^3/\text{s}$)

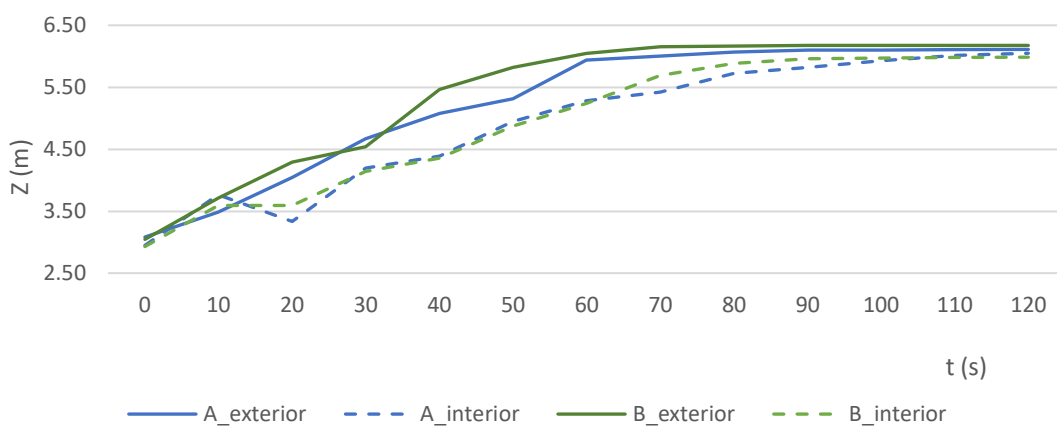


Figura 41 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$)

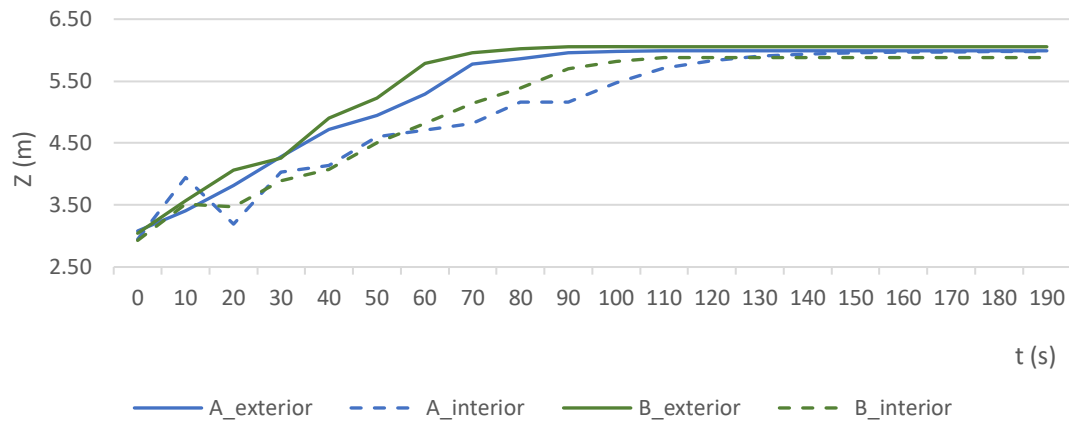


Figura 42 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$)

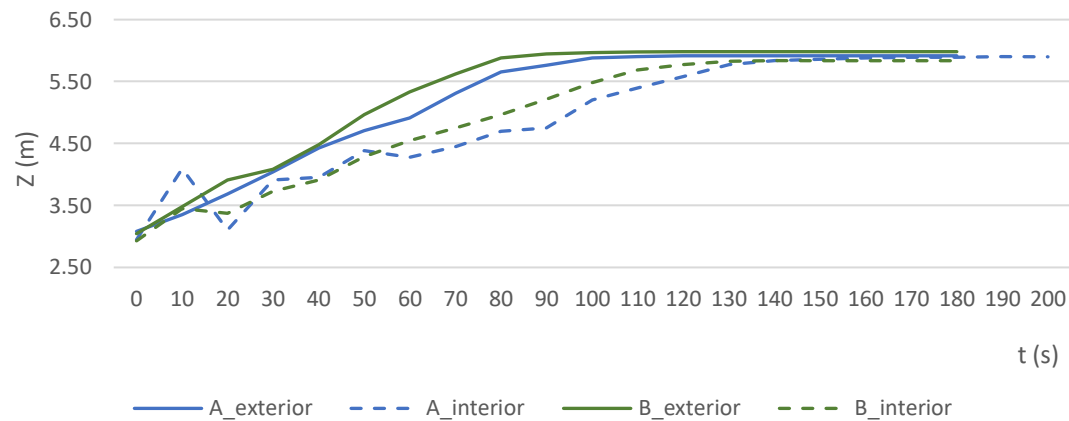


Figura 43 - Evolução temporal da profundidade da superfície livre ($Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Pela análise da Tabela 18, observa-se que a altura da superfície livre estabiliza em todos os casos, com tempos de estabilização entre os 120 e 200 segundos, e que, tal como esperado, em regime permanente a profundidade aumenta com o caudal.

Pode perceber-se que a geometria da soleira influencia a dinâmica de estabilização. Por exemplo, verifica-se que nas teclas exteriores, tanto do tipo A como do tipo B, a estabilização é mais rápida que nas teclas interiores, apesar destas últimas estabilizarem com valores de profundidade menores.

Para valores de caudais superiores, as geometrias interiores de ambas as tipologias (A e B) rondam valores de profundidade máxima semelhantes, apesar das evidentes diferenças geométricas, nomeadamente a inexistência de prolongamento da tecla interior da soleira de tipo B.

Para uma análise mais detalhada, foram comparados os valores da profundidade vertical (Z) no instante em que o regime estabiliza e o caudal unitário (q) nesse mesmo instante (Tabela 18).

Tabela 18 - Resultados retirados das simulações 2D

		(m ³ /s)				
Geometria		100	120	150	170	190
A Exterior	Z (m)	5,91	5,99	6,13	6,21	6,27
	H (m)	0,56	0,64	0,78	0,86	0,93
	q (m ³ /s/m)	0,85	1,01	1,29	1,46	1,63
	H/P	0,105	0,120	0,146	0,161	0,174
A Interior	Z (m)	5,9	5,98	6,05	6,14	6,19
	H (m)	0,55	0,63	0,7	0,79	0,84
	q (m ³ /s/m)	0,85	1,04	1,29	1,45	1,61
	H/P	0,103	0,118	0,131	0,148	0,157
B Exterior	Z (m)	5,98	6,06	6,18	6,26	6,32
	H (m)	0,63	0,71	0,83	0,91	0,97
	q (m ³ /s/m)	0,85	1,01	1,29	1,46	1,62
	H/P	0,159	0,133	0,155	0,170	0,181
B Interior	Z (m)	5,84	5,88	5,99	6,05	6,1
	H (m)	0,49	0,53	0,64	0,7	0,75
	q (m ³ /s/m)	0,86	1,02	1,27	1,43	1,64
	H/P	0,092	0,099	0,120	0,131	0,140
q esperado (m ³ /s/m)		0,87	1,04	1,30	1,48	1,65

O caudal unitário representa o valor do caudal que está a entrar no domínio (Q), dividido por unidade de comprimento não linear da soleira (L). (Eq. 41)

$$q = \frac{Q}{L} \text{ (m}^3\text{/s/m)} \quad (41)$$

De forma a validar a precisão da simulação, foram calculados os erros percentuais entre o valor de caudal unitário esperado, o valor de *inletFlow* inserido na simulação, e o caudal registado pelo *ParaView* quando o regime estabiliza. Foram obtidos valores entre os 0,3% e os 3,3%, dentro do aceitável, que se devem à resolução da malha e à interpolação do *ParaView*.

A carga hidráulica (H), definida como a altura de água acima da crista da soleira, pode ser determinada como a diferença entre a altura da superfície livre (Z) e a altura da crista da soleira (Z_{crista}), que neste caso, tem como valor 5,35 m, equivalente à altura das estruturas. (Eq. 42)

$$H = Z - Z_{\text{crista}} \text{ (m)} \quad (42)$$

Foi calculada também a razão entre a carga hidráulica (H) e a altura da soleira (P), de forma a comparar com os valores de referência encontrados na literatura, em que este rácio é geralmente inferior a 0,40.

Com os resultados da Tabela 18 foi possível representar graficamente as leis de vazão de cada geometria, em função do tipo de soleira (A e B) e da orientação da tecla, interior ou exterior (Figura 44 a Figura 47).

Foi adotado um ajuste linear, dado que a relação entre o caudal e a carga hidráulica revelou um comportamento aproximadamente linear em todas as simulações realizadas. Esta escolha é sustentada pelos elevados coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas regressões, que se aproximam de 1, indicando um excelente grau de correlação.

Do gráfico da Figura 44, verifica-se que, para soleiras *Piano Keys* do tipo A, a diferença entre os valores da carga hidráulica obtidos para as duas teclas é mais evidente para caudais elevados. Para estes caudais, observa-se que a geometria da tecla interior permite escoar o mesmo caudal com valores de carga hidráulica inferiores, o que indica uma melhor eficiência hidráulica em relação à tecla exterior.

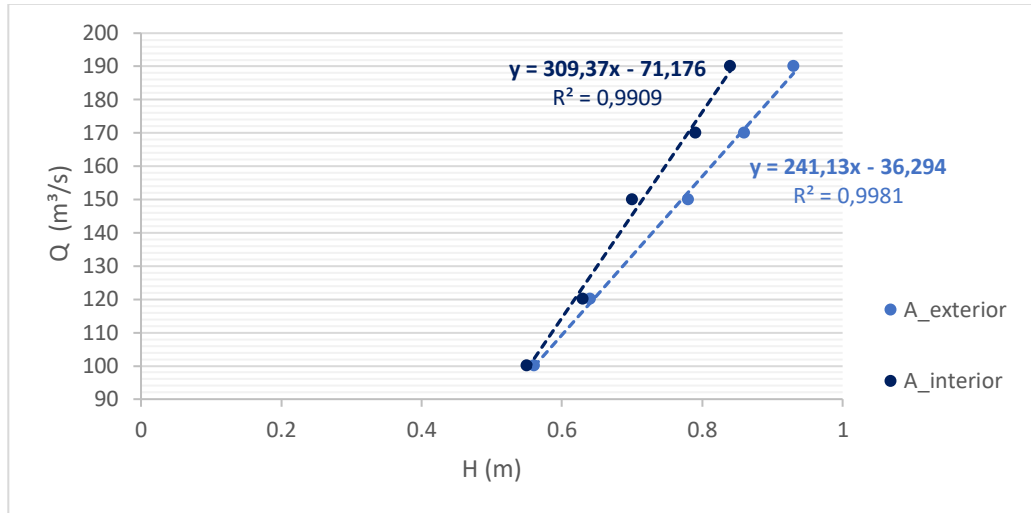


Figura 44 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) para ambas as teclas do Tipo A

Para as configurações da tipologia B (Figura 45), verifica-se que as diferenças entre teclas são mais significativas, tanto para baixos valores de caudal como para os mais elevados. À semelhança da tipologia A, a tecla interior demonstra uma melhor eficiência hidráulica, permitindo descarregar o mesmo caudal com menor carga hidráulica.

Este comportamento, ou seja, a menor eficiência observada nas teclas exteriores, está relacionado com a geometria da estrutura, que se traduz numa forma menos hidrodinâmica, menos alinhada com as direções do escoamento, resultando na formação de zonas de recirculação na região abaixo do prolongamento da tecla. A água retida nesta zona forma zonas de baixa velocidade, cria resistência adicional ao escoamento e leva a uma redução da eficiência da descarga.

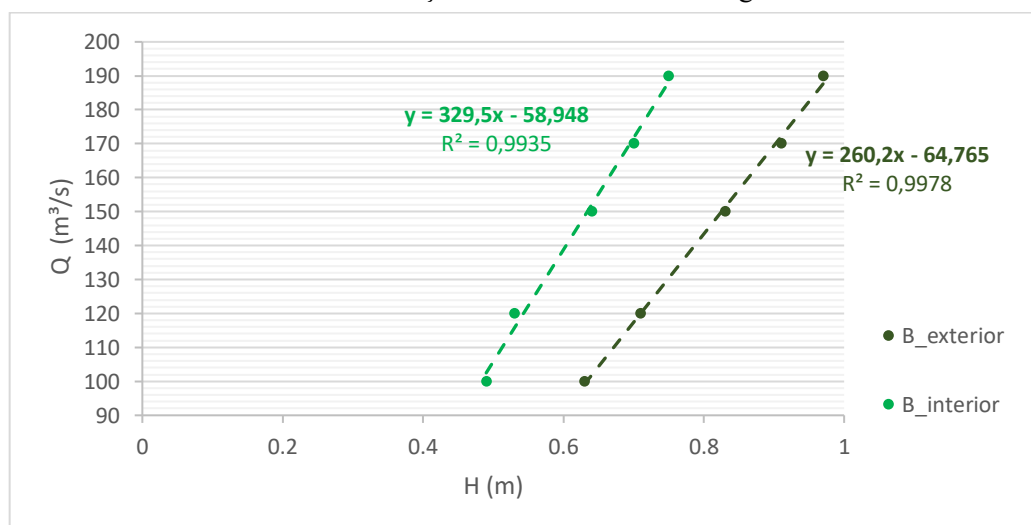


Figura 45 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) para ambas as teclas do Tipo B.

Comparando as geometrias exteriores de cada tipologia (Figura 46), verifica-se que a tecla exterior da tipologia A, cujo prolongamento da tecla (B_o) é metade do prolongamento da tipologia B, apresenta uma melhor eficiência, nomeadamente para valores de caudal mais baixos. Pela análise dos resultados, verifica-se que com a tipologia A seria possível descarregar um caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ com uma carga hidráulica aproximadamente 11,1% menor que com a tipologia B. Na descarga do caudal máximo a carga hidráulica conseguida com a tipologia A seria cerca de 4,1% menor que com a B.

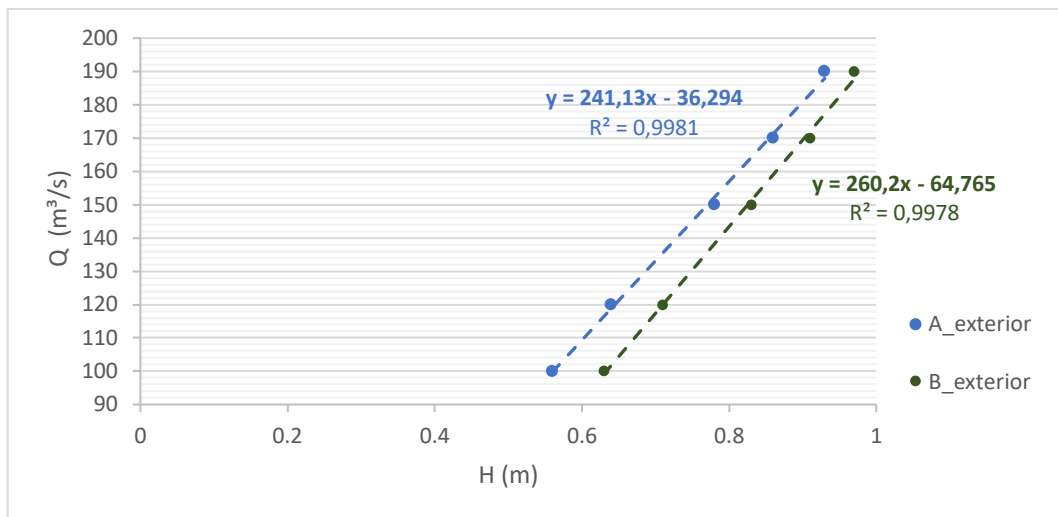


Figura 46 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) das teclas exteriores

Em relação às teclas interiores, pela análise da Figura 47, observa-se que a tipologia B apresenta melhor eficiência hidráulica e que, independentemente do valor do caudal descarregado, para esta tipologia, o valor da carga hidráulica é cerca de 11% inferior à obtida com tipologia A. Este resultado é particularmente relevante, pois sugere que, ao contrário do que seria intuitivo, o maior declive da tecla interior da soleira B poderá favorecer a eficiência hidráulica. Por outro lado, a geometria da crista também é distinta, sendo mais delgada no tipo A. Um aumento da resolução da malha poderá ser importante para esclarecer esta diferença.

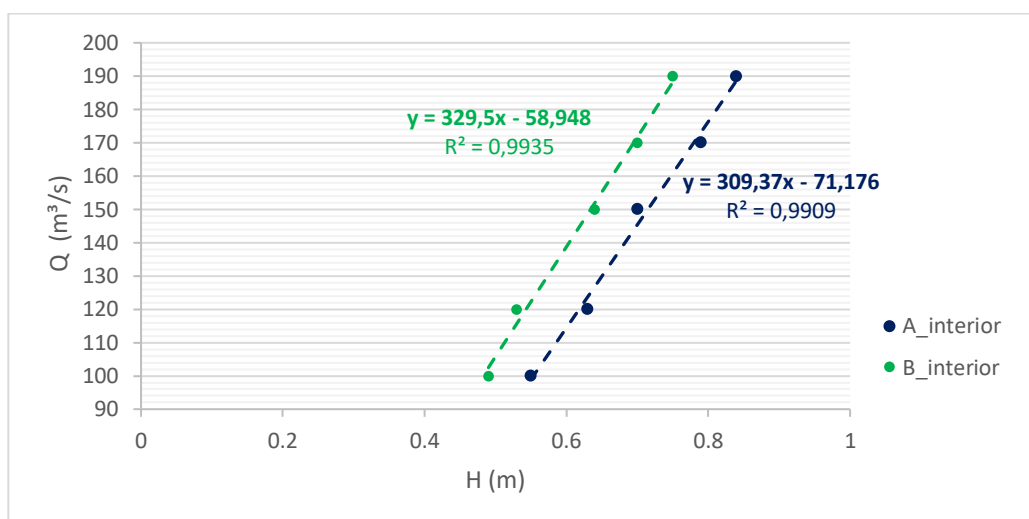


Figura 47 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) das teclas interiores

Estas observações reforçam a importância de uma análise integrada da geometria da soleira, num modelo tridimensional, já que o desempenho hidráulico deste tipo de estruturas não depende apenas da presença ou ausência de prolongamentos, mas sim do efeito conjunto das formas e ângulos que condicionam o escoamento.

4.2.2. CAMPO DE VELOCIDADE

Para aprofundar a análise do comportamento destas estruturas hidráulicas é importante analisar o campo de velocidade no domínio, de forma a identificar zonas de aceleração ou recirculação.

De seguida apresenta-se os campos de velocidade obtidos para o caudal de $190 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 49 a Figura 55) foram obtidos através do programa *ParaView*, com recurso ao filtro *Glyph*, que permite a visualização de campos vetoriais, como a velocidade..

Esta análise dos vetores de velocidade permite identificar as zonas de recirculação no escoamento, que se tornam evidentes pela inversão da direção do vetor velocidade ou pela formação de padrões circulares, em relação à direção do fluxo. A identificação destes padrões fornece informações importantes sobre o desempenho hidráulico e a capacidade de cada configuração para controlar o regime de escoamento.

Nas teclas exteriores (Figura 49 a Figura 51), quer na tipologia A como na tipologia B verifica-se a ocorrência de zonas de recirculação a montante, abaixo do prolongamento das teclas, o que afeta a eficiência hidráulica em relação às teclas interiores da sua geometria correspondente, conforme se observava no subcapítulo anterior.

A visualização apresentada para os campos de velocidade foi gerada com base nos valores por célula (*cell data*), sem interpolação, opção que, embora resulte numa imagem com transições abruptas entre células, assegura maior rigor na representação dos resultados numéricos.

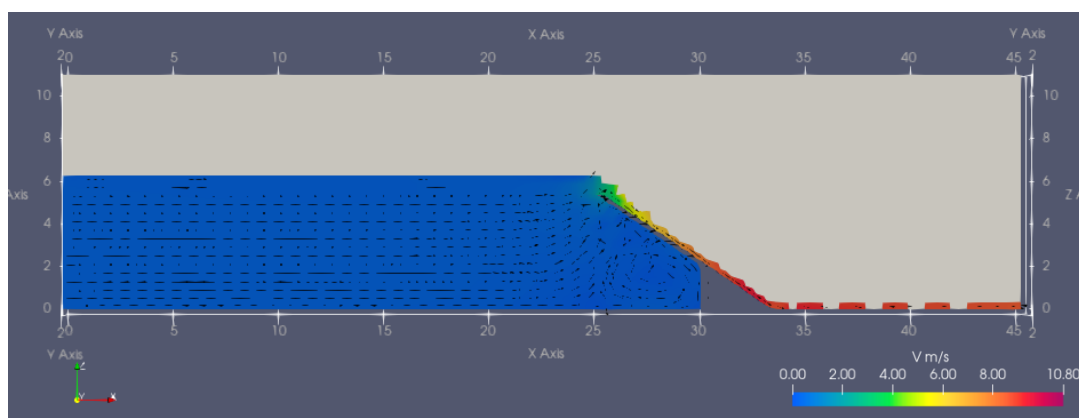


Figura 48 - Campo de velocidades (2D, A-Exterior, $190 \text{ m}^3/\text{s}$)

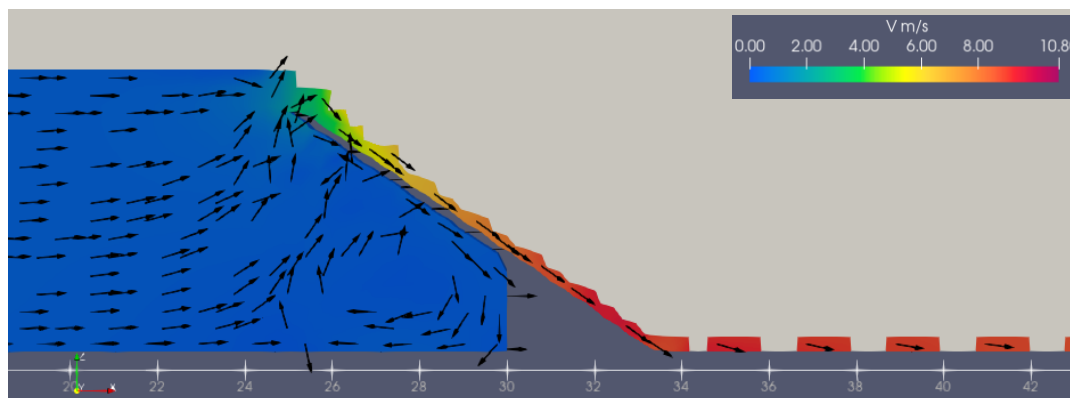


Figura 49 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, A-Exterior, 190 m³/s)

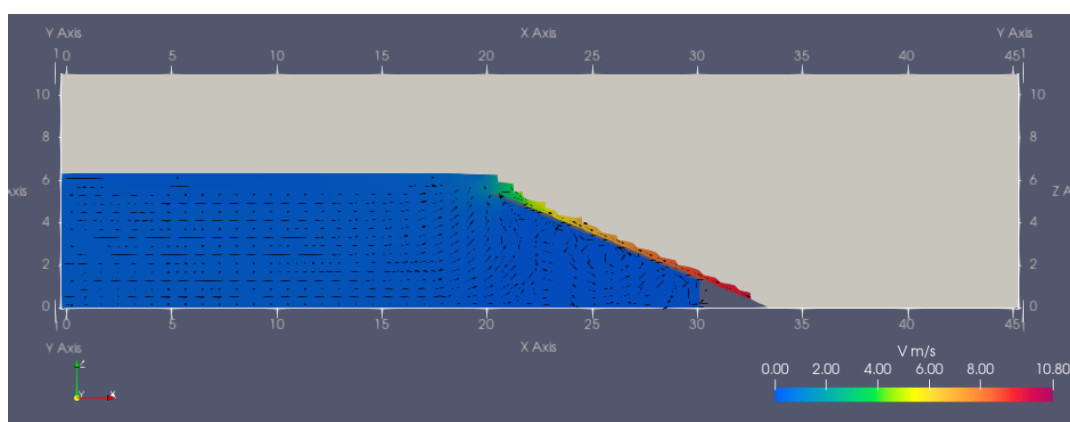


Figura 50 - Campo de velocidades (2D, B-Exterior, 190 m³/s)

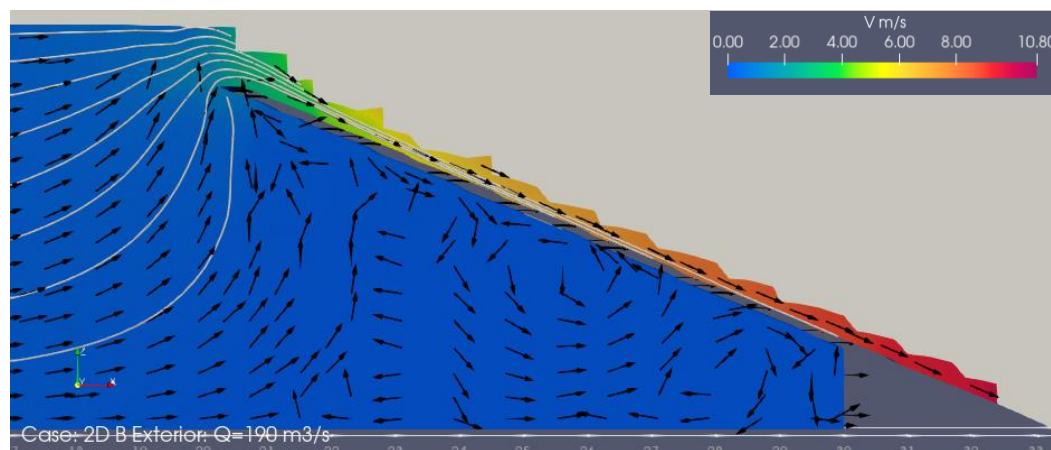


Figura 51 – Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, B-Exterior, 190 m³/s)

No caso da tecla interior da soleira de tipo A (Figura 52 e Figura 53) são evidentes as zonas de recirculação imediatamente após a queda, ou seja, a jusante, na zona abaixo da tecla, Figura 53, onde se observa um remoinho junto ao fundo do canal.

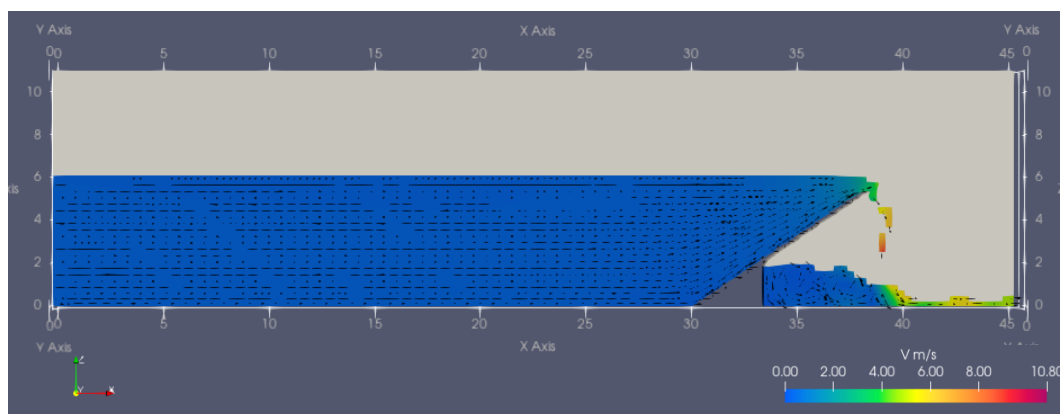


Figura 52 – Campo de velocidades (2D, A-Interior, 190 m³/s)

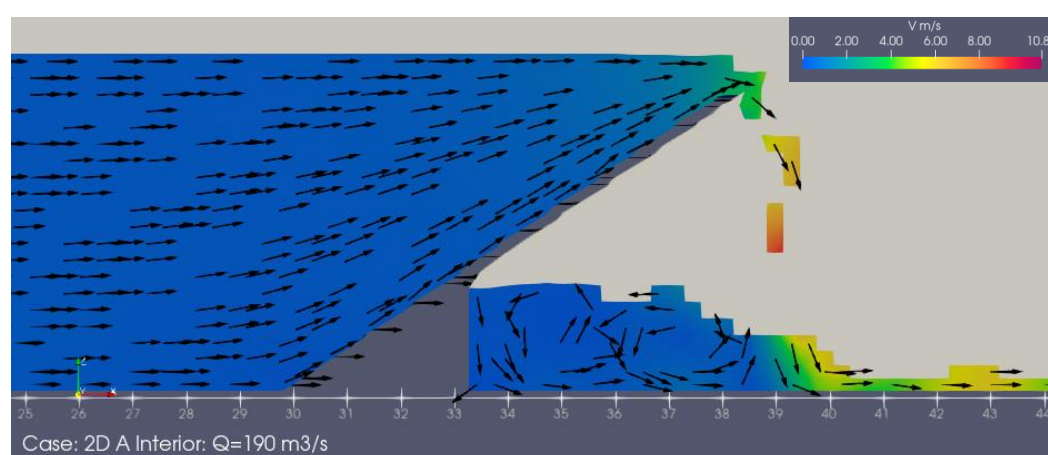


Figura 53 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, A-Interior, 190 m³/s)

Para a tecla interior da tipologia B (Figura 55), que na secção anterior apresentava melhor eficiência hidráulica em comparação com a tecla interior da tipologia A, os vetores de velocidade seguem trajetórias ordenadas e paralelas, sem evidência de recirculações, o que confirma um escoamento mais eficiente.

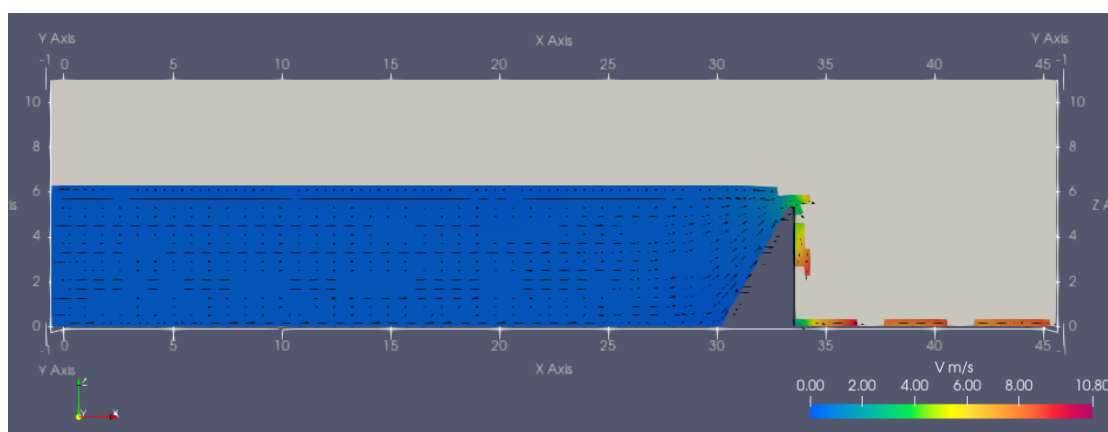


Figura 54 - Campo de velocidades (2D, B-Interior, 190 m³/s)

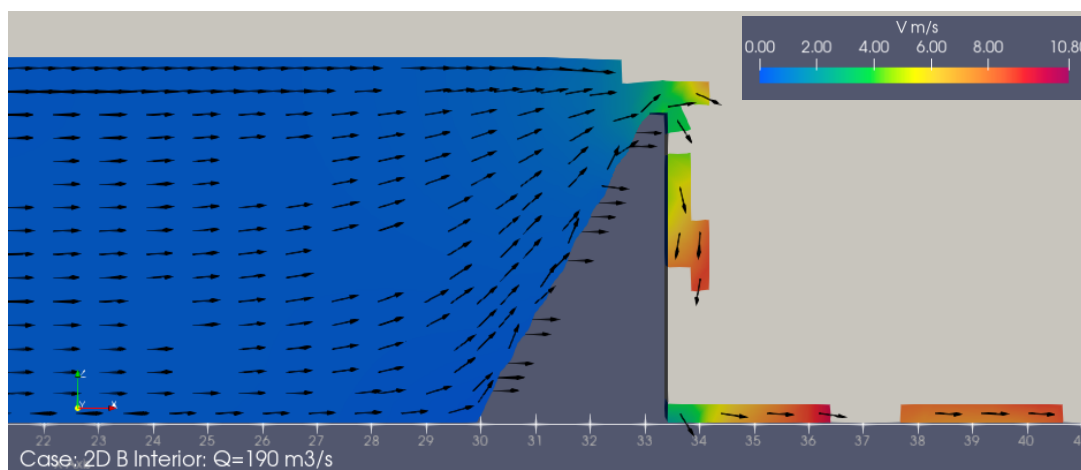


Figura 55 - Campo de velocidades: pormenor da zona da soleira (2D, B-Interior, 190 m³/s)

4.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 3D

A análise das simulações tridimensionais permite, em complemento à análise 2D apresentada, captar os efeitos espaciais do escoamento sobre as soleiras tipo *Piano Keys* (PKW).

Os resultados incluem as curvas de vazão $Q(H)$ para cada tipologia, analisando a evolução da carga hidráulica (Eq. 42) em função do caudal descarregado, permitindo comparar o desempenho hidráulico global das geometrias tridimensionais. Para além disso, apresenta-se o campo de velocidades, incluindo vetores de velocidade que permitem observar a direção do escoamento ao longo do canal e sobre as teclas. Por fim, são analisados perfis de velocidade verticais ao longo de cada tecla (interior e exterior), que, no 3D, compreendem os efeitos da geometria completa, incluindo interação entre módulos e influência lateral do escoamento.

4.3.1. CURVA DE VAZÃO

Para a obtenção das curvas de vazão $Q(H)$, foram retirados os valores da profundidade da água a montante da soleira em regime estabilizado (Z), com recurso ao *ParaView*, seguindo o procedimento aplicado também nas simulações bidimensionais, de forma a obter a carga hidráulica (H) para cada situação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 19, para as duas tipologias e para as cinco condições de escoamento em análise.

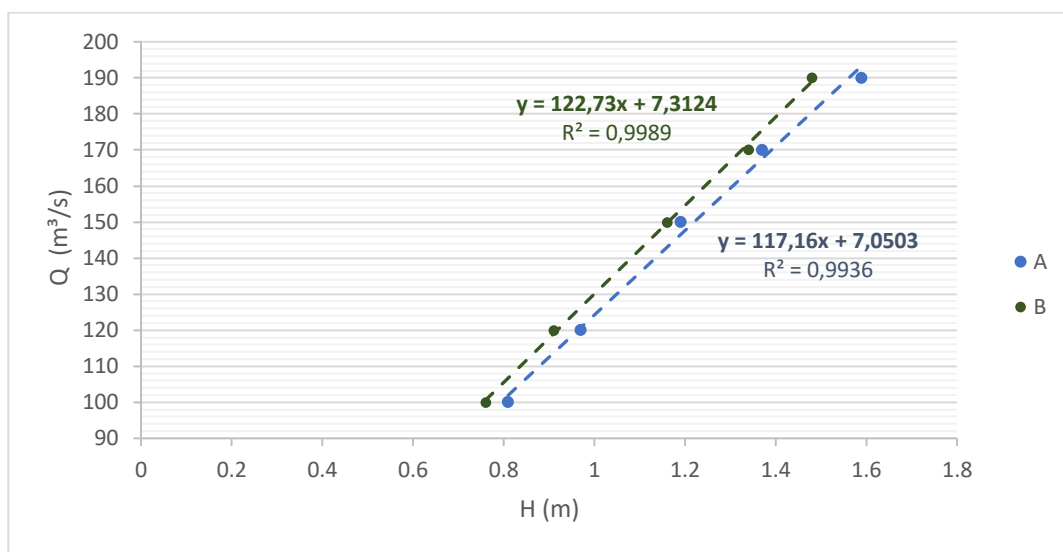
O valor de caudal (Q) apresentado na Tabela 19 refere-se ao escoamento em regime permanente. Os valores de base, o caudal para um módulo, não foram obtidos no *ParaView*, mas sim diretamente de um ficheiro de pós-processamento gerado automaticamente pelo *OpenFOAM*, localizado no diretório *postProcessing/frWater_inlet*. Os valores tabelados representam o valor de caudal para quatro módulos.

Tabela 19 - Resultados retirados das simulações 3D

		Q (m³/s)				
Geometria		100	120	150	170	190
A	Z (m)	6,16	6,32	6,54	6,72	6,93
	H (m)	0,81	0,97	1,19	1,37	1,59
	Q (m³/s)	99,4	119,8	149,6	169,9	189,7
	H/P	0,151	0,181	0,222	0,256	0,297
B	Z (m)	6,11	6,26	6,51	6,69	6,83
	H (m)	0,76	0,91	1,16	1,34	1,48
	Q (m³/s)	99,9	119,3	149,9	169,5	188,8
	H/P	0,142	0,170	0,217	0,250	0,277

De forma a avaliar a precisão numérica das simulações, foram calculados os erros percentuais entre esses valores de caudal obtidos do pós-processamento (Q) e os definidos inicialmente na simulação (100,120,150,170 e 190 m³/s). Foram obtidos erros percentuais muito baixos, entre os 0,05% e 0,61%, que confirma fiabilidade nos resultados.

Com os resultados obtidos, foi possível traçar graficamente as leis de vazão de cada tipologia (Figura 56) e obter as respetivas expressões por ajuste linear.

Figura 56 - Relação entre o caudal (Q) e a carga hidráulica (H) obtidas das simulações tridimensionais

De uma forma geral, é possível observar que a tipologia B apresenta uma vantagem em relação à tipologia A, já que para os mesmos valores de caudal apresenta valores inferiores da carga hidráulica. Verifica-se que a tipologia B apresenta valores de carga hidráulica (H) cerca de 6,2% inferiores aos da tipologia A para caudais inferiores (100 e 120 m³/s) e 7% para um caudal de 190 m³/s, que confirma as conclusões de Cicero (2016) que afirma que uma soleira de tipo B é cerca de 5 a 15% mais eficiente que uma soleira de tipo A.

Visto que os rácios entre as capacidades de carga (H) e a altura da soleira (P) se encontram abaixo de 0,4 para ambas as geometrias, estes resultados confirmam as conclusões de Eltarabily *et al.* (2024), segundo o qual a tipologia B é recomendada para valores de H/P inferiores a 0,4.

4.3.2. CAMPO DE VELOCIDADE

À semelhança do realizado nas simulações 2D, foram analisados os campos de velocidade no domínio, obtidos com recurso ao *ParaView*. Esta análise constitui um complemento fundamental para a caracterização completa do desempenho das soleiras tipo *Piano Key* em regime tridimensional, visto que os perfis de velocidade obtidos em regime tridimensional evidenciam variações transversais e longitudinais, que não poderiam ser detetados na simulação 2D.

Os campos de velocidade (Figura 57 a Figura 64) foram determinadas para as duas tipologias em estudo, no último instante de simulação (80 s), para o caudal máximo de $190 \text{ m}^3/\text{s}$ e para o caudal de $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Nos Anexos encontram-se os perfis de velocidade dos restantes caudais simulados (100 , 150 e $170 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para o caudal de dimensionamento $190 \text{ m}^3/\text{s}$, observa-se que o escoamento da soleira de tipo B (Figura 58 e Figura 60) apresenta uma distribuição mais uniforme da velocidade sobre soleira. A soleira de tipo A (Figura 57 e Figura 59) apresenta velocidade mais elevada na extremidade de montante, e ligeiramente mais elevada sobre a soleira.

Na zona de descarga, as velocidades atingidas são superiores na soleira de tipo B em comparação à soleira de tipo A, evidenciada pela tonalidade mais avermelhada a jusante da soleira de tipo B (Figura 60). Deve-se principalmente ao funcionamento da condição da fronteira de saída (*outlet*), colocada junto à soleira para poupar no domínio de estudo, reduzindo o tempo de cálculo. Uma vez que o âmbito deste estudo é apenas a vazão, esta zona não é relevante e não será discutida.

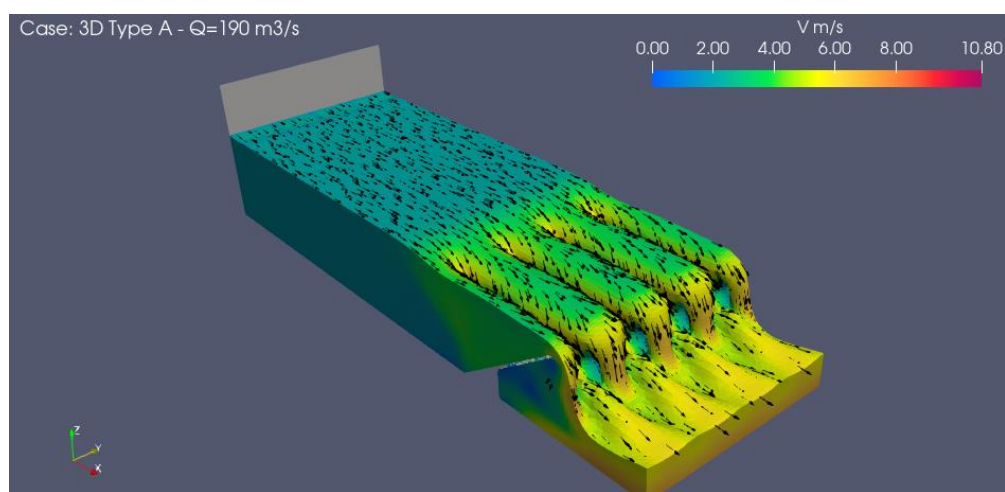


Figura 57 - Vista tridimensional da soleira de Tipo A ($190 \text{ m}^3/\text{s}$)

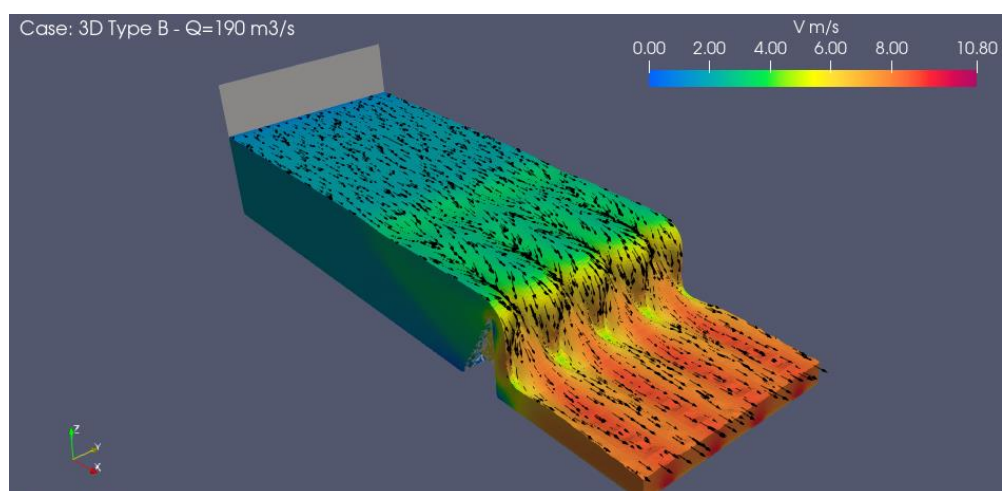


Figura 58 - Vista tridimensional da soleira de Tipo B ($190 \text{ m}^3/\text{s}$)

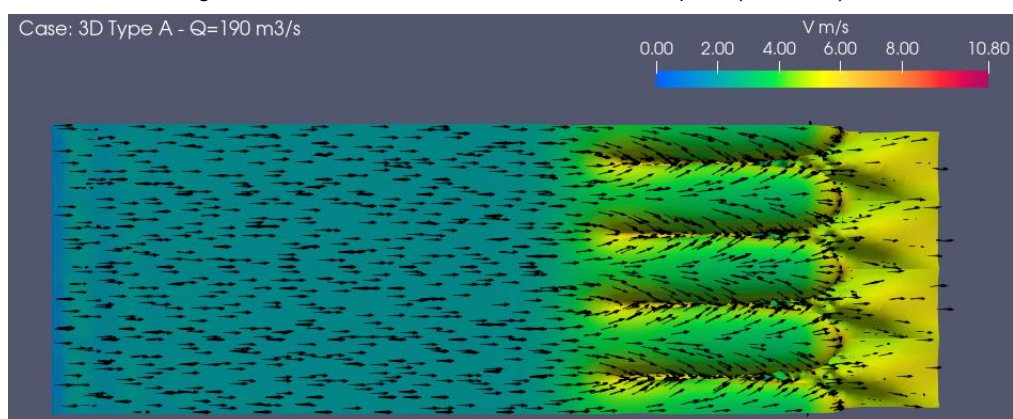


Figura 59 - Vista superior da soleira de tipo A ($190 \text{ m}^3/\text{s}$)

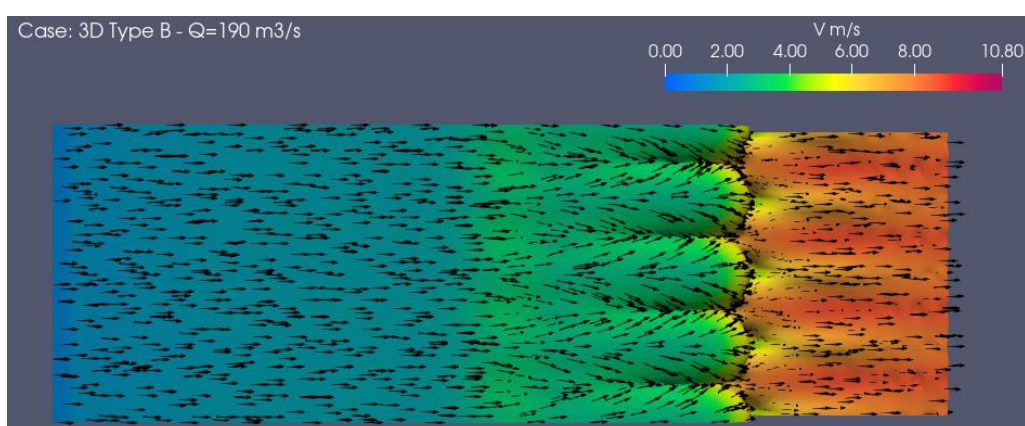


Figura 60 - Vista superior da soleira de Tipo B ($190 \text{ m}^3/\text{s}$)

Para um caudal de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 61 a Figura 64), observa-se um comportamento qualitativamente semelhante ao identificado nas simulações com caudal de $190 \text{ m}^3/\text{s}$, porém com velocidades inferiores e com as teclas menos submersas, especialmente na tipologia B.

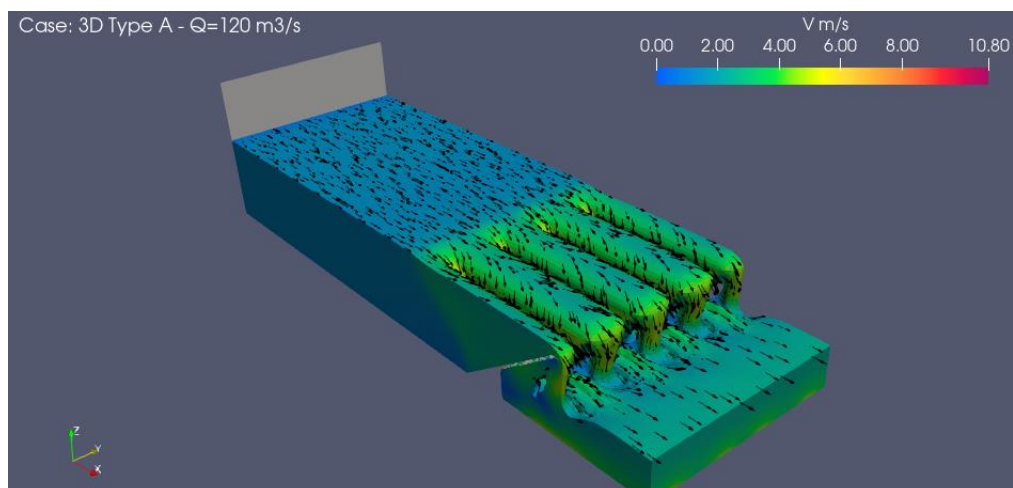


Figura 61 - Vista tridimensional da soleira de Tipo A ($120 \text{ m}^3/\text{s}$)

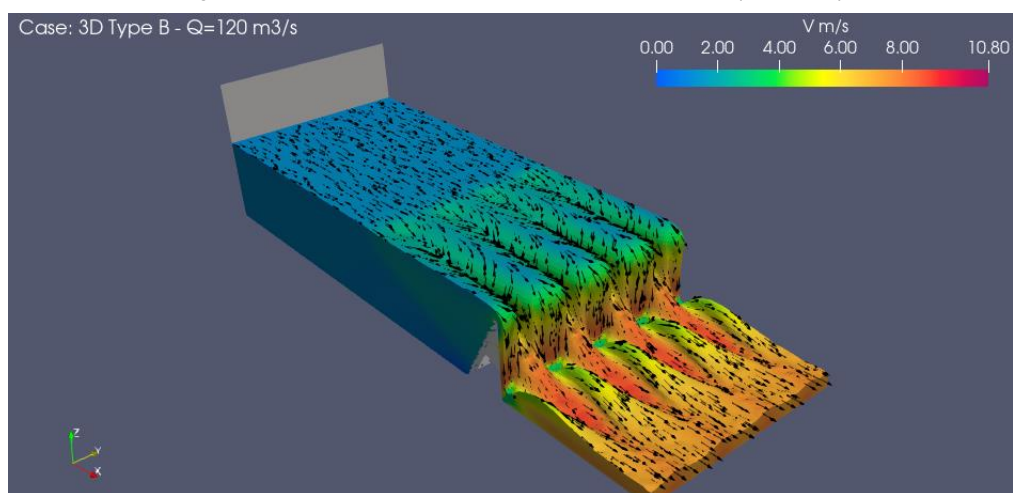


Figura 62 - Vista tridimensional da soleira de Tipo B ($120 \text{ m}^3/\text{s}$)

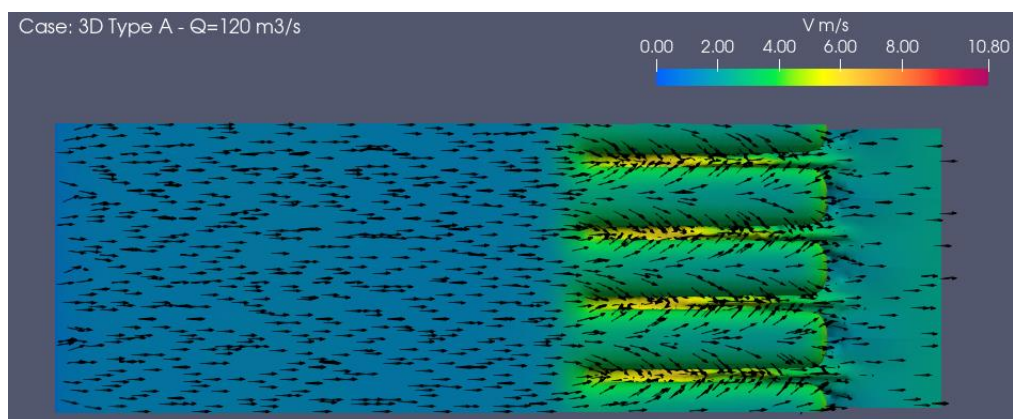


Figura 63 - Vista superior da soleira de Tipo A ($120 \text{ m}^3/\text{s}$)

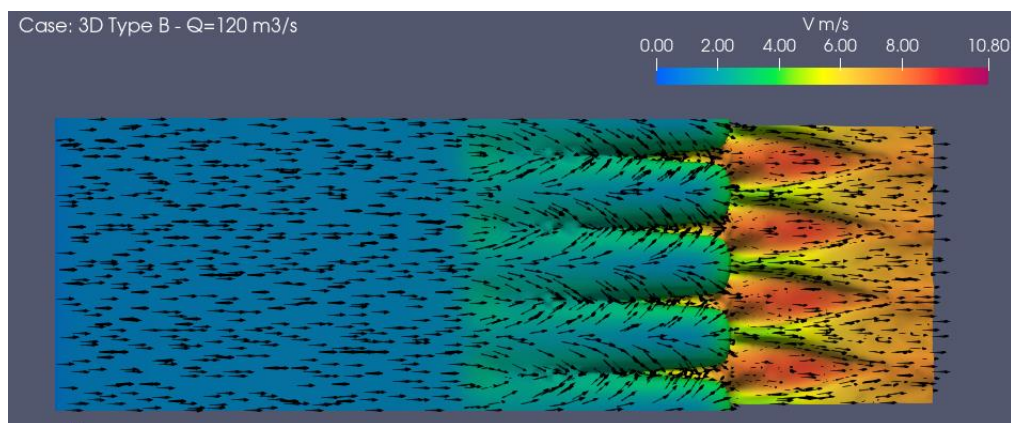


Figura 64 - Vista superior da soleira de Tipo B (120 m³/s)

Esta análise tridimensional permitiu observar tendências constantes nos padrões de escoamento e comportamento hidráulico das duas tipologias de soleira PKW. Nos casos observados, a geometria B apresenta uma distribuição mais uniforme da velocidade e da altura da água sobre soleira, com um melhor aproveitamento da superfície das teclas e da largura da estrutura. Esta característica, aliada à observação dos menores valores de carga hidráulica para o mesmo caudal, sugerem uma eficiência hidráulica superior da tipologia B em comparação com a tipologia A.

Para as restantes simulações efetuadas e apresentadas em anexo, os resultados assemelham-se aos apresentados, com coerência entre os padrões de escoamento.

4.4. COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM TEÓRICA E NUMÉRICA

Procedeu-se à comparação entre a curva de vazão $Q(H)$ obtida através do modelo computacional e a correspondente curva teórica estimada pela fórmula de Kabiri-Samani e Javaheri (2012), na secção 4.1.1.

A Figura 65 compara as curvas de vazão $Q(H)$ obtidas numericamente com as estimadas teoricamente. Considerando a mesma gama de caudais para ambas as tipologias de soleira, observa-se que os valores de carga hidráulica H obtidos nas simulações (linhas contínuas) são superiores aos previstos pelos modelos teóricos (linhas tracejadas).

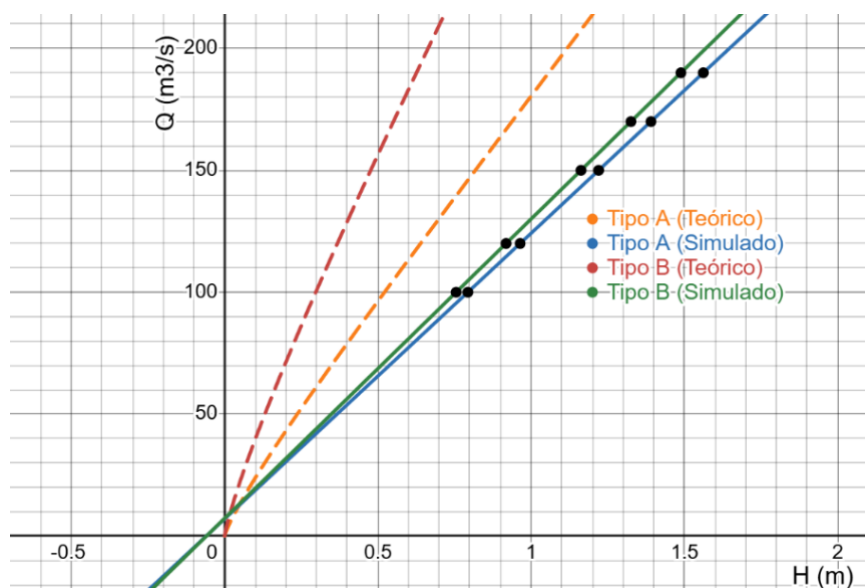


Figura 65 - Comparação entre as curvas teóricas (tracejado) e as simuladas (contínuas)

Pela análise do gráfico da Figura 65, verifica-se a tipologia tipo B é mais eficiente, quer pelas estimativas teóricas quer pelas simulações numéricas. No entanto, para os mesmos caudais, as simulações resultaram em valores superiores das cargas hidráulicas, relativamente às estimativas obtidas pela lei de vazão proposta por Kabiri-Samani e Javaheri (2012) e a eficiência das soleiras Tipo B não é tão evidente. Para a soleira PKW de tipo A, os valores de carga hidráulica obtidos pelos cálculos teóricos são cerca de 32% a 36% inferiores aos obtidos pelas simulações. Para a tipologia B, esta diferença é mais acentuada, entre os 58% e 61%.

Importa relembrar que as diferenças encontradas podem ser justificadas pelo não cumprimento de todos os limites de aplicabilidade do método empírico utilizado, pela resolução da malha e pelos métodos numéricos utilizados.

4.5. COMPARAÇÕES ENTRE SIMULAÇÕES 2D E SIMULAÇÕES 3D

Com recurso ao *ParaView*, filtro *Slice*, foram realizados cortes verticais à estrutura tridimensional, para comparação com os perfis bidimensionais analisados na secção 5.1.2. Esta abordagem permite avaliar o efeito da interação entre teclas e perceber se a simplificação do domínio para duas dimensões consegue reproduzir adequadamente os fenómenos hidráulicos relevantes. (Figura 66 a Figura 69)

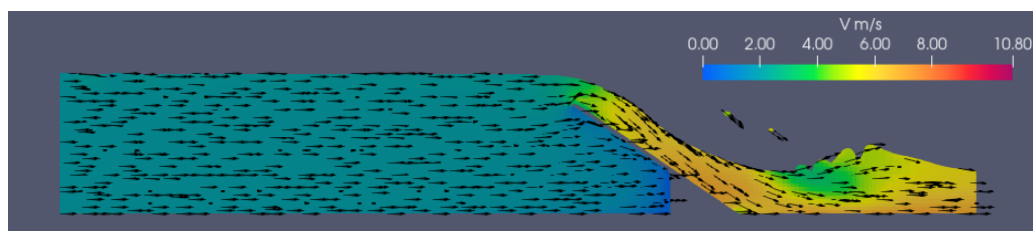


Figura 66 - Campo de velocidades (3D, A Exterior, $Q=190 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=1,59 \text{ m}$)

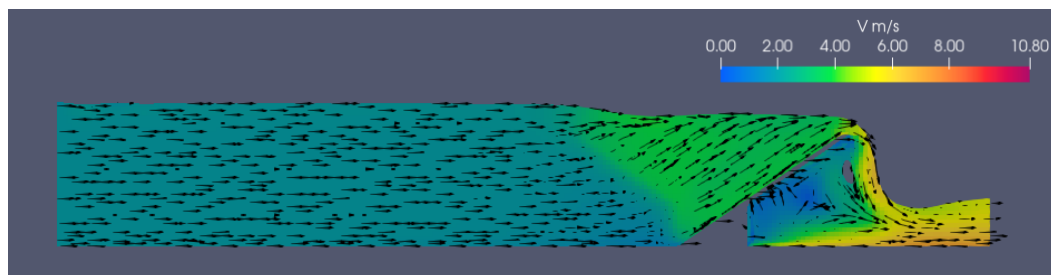


Figura 67 - Campo de velocidades (3D, A Interior, 190 m³/s, H=1,59 m)

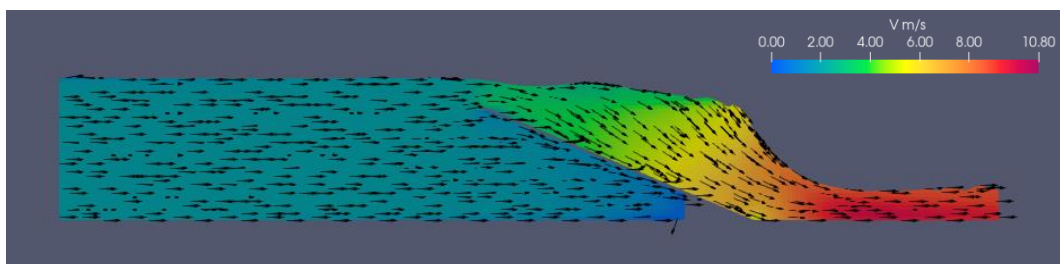


Figura 68 - Campo de velocidades (3D, B Exterior, 190 m³/s, H=1,48 m)

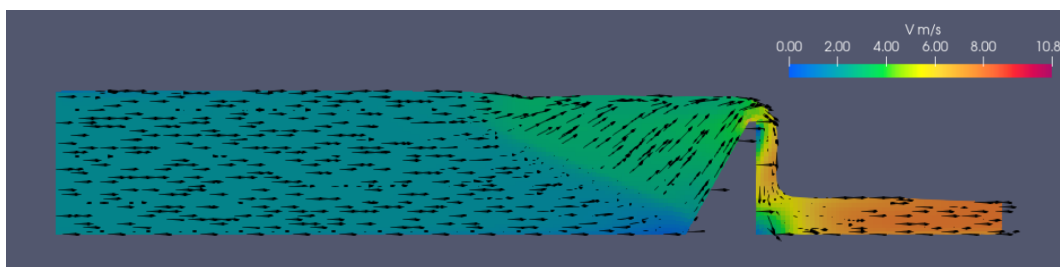


Figura 69 - Campo de velocidades (3D, B Interior, 190 m³/s, H = 1,48 m)

Para a tecla exterior da soleira PKW de tipologia A, a comparação entre o campo de velocidades da Figura 48 com o representado na Figura 66, revela diferenças significativas. Na simulação 3D, o nível de água atingido a montante da soleira é superior ao da simulação 2D e o volume de água a jusante é superior, que se justifica pela representação mais realista do confinamento da água entre teclas da simulação 3D. É também visível que a gama de velocidades da simulação tridimensional é muito mais dispersa e com uma transição mais gradual para velocidades superiores, porém, ao contrário da simulação bidimensional, não são tão predominantes velocidades entre os 8 e os 10,80 m/s, os tons vermelhos na escala cromática

No que diz respeito aos vetores de velocidade, a zona de recirculação abaixo do prolongamento visível na simulação 2D (Figura 49) desaparece na simulação tridimensional, que revela um escoamento mais controlado.

Em relação à tecla interior da tipologia A (Figura 67), em comparação ao campo representado anteriormente pela Figura 52, podem retirar-se conclusões semelhantes às vistas na tecla exterior. Também o nível de água atingido a montante é superior na simulação tridimensional, assim como a quantidade de água “acumulada” a jusante. É visível também uma gama mais variada de cores no que diz respeito à escala de velocidades. De notar que no campo de velocidades tridimensional, imediatamente sobre a soleira, tem-se velocidades que rondam os 4 m/s, ao contrário do que acontecia na simulação bidimensional.

Analisando a tecla exterior da tipologia B (Figura 68), em comparação com o campo de velocidade demonstrado na Figura 50, observa-se que os níveis de água obtidos pela simulação tridimensional são superiores. Apesar da evidente maior altura de água a jusante, justificada pela interação do escoamento com as paredes interiores das teclas, a gama cromática das velocidades é bastante semelhante entre as duas simulações, ambas com uma transição progressiva para velocidades superiores.

Sobre os vetores velocidade, ao contrário da simulação bidimensional, é notório que o escoamento tridimensional não possui zona de recirculação abaixo do prolongamento, mas sim vetores mais paralelos entre si.

Finalmente, em relação à tecla interior da soleira PKW de tipo B (Figura 69) comparativamente ao perfil bidimensional representado pela Figura 54, verifica-se que, à semelhança do observado para a tecla exterior, o nível de água é superior na simulação tridimensional e é evidente uma maior gama de velocidades, especialmente a montante.

Os vetores de velocidade na simulação bidimensional eram menos inclinados e quase paralelos ao fundo do canal até muito próximo da soleira, o que não acontece na simulação tridimensional, em que os vetores velocidade mudam de direção na zona que a água estará a entrar na tecla interior.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES E SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

O presente trabalho teve como objetivo principal a comparação do desempenho hidráulico das soleiras tipo *Piano Keys* nas configurações A e B, através da aplicação de modelação numérica CFD com o model *interFoam* do *OpenFOAM*, baseado no método *Volume of Fluid*. Através da construção de modelos geométricos detalhados, geração de malhas específicas e realização de simulações 2D e 3D, foi possível realizar uma análise abrangente da eficiência de descarga e do comportamento do escoamento em cada uma das configurações.

O caso de estudo foi definido com base na análise dos casos reais existentes, a partir dos quais se definiu o caudal de dimensionamento e a respetiva geometria da soleira PKW. Foram realizadas simulações 2D e 3D, para as duas tipologias e para cinco condições de escoamento, definidas por cinco caudais, num total de 30 simulações. Os modelos geométricos das soleiras completas e dos perfis verticais de cada tecla foram criados em ambiente CAD, com recurso ao software *FreeCAD*.

As simulações bidimensionais (2D), embora simplificadas, permitiram uma primeira avaliação do desempenho isolado das teclas interiores e exteriores, revelando diferenças entre as tipologias ao nível da distribuição de velocidades e da resposta à variação da carga hidráulica. Para este trabalho, as simulações dos perfis bidimensionais revelaram-se vantajosas especialmente para a aprender a trabalhar com o software *OpenFOAM* e para uma primeira obtenção rápida de resultados e entender o comportamento do escoamento sob as teclas. Estas análises iniciais mostraram um comportamento mais eficiente da tecla interior da tipologia B, com menor carga hidráulica acima da soleira para descarregar o mesmo caudal.

A análise tridimensional (3D) complementou os resultados obtidos com as simulações 2D, demonstrando o funcionamento da estrutura completa da soleira e a interação entre teclas ao longo da estrutura. Observou-se que, para todos os valores de caudal simulados, a soleira do tipo B manteve um desempenho superior, apresentando valores de carga hidráulica inferiores para o mesmo valor de caudal em comparação com a soleira do tipo A, pelo que se conclui numa eficiência hidráulica superior da configuração tipo B para o caso de estudo considerado.

A própria geometria das estruturas pode também indicar algumas hipóteses do porquê da melhor eficiência da tipologia B. Apesar de ambas as geometrias terem teclas exteriores, na tipologia B estas são menos inclinadas comparativamente à tipologia A. O escoamento na tipologia B percorre então um trajeto mais direto já que a água não precisa de contornar projeções tão inclinadas, esta diferença pode traduzir-se numa menor resistência ao escoamento e, conseqüentemente, numa menor altura de carga

(H) para um mesmo caudal, tal como se verificou nas simulações. Também as inclinações da tipologia A podem favorecer a formação de zonas “mortas” sob os prolongamentos das teclas, onde a água fica retida, que se traduz consequentemente numa menor eficiência na descarga da água para jusante.

De forma geral, os resultados obtidos ao longo deste estudo revelam-se coerentes com as tendências descritas na literatura relativamente ao desempenho hidráulico das soleiras tipo Piano Keys, nomeadamente Eterability *et al.* (2024) que concluiu que para rácio de H/P inferior a 0,4, uma soleira de Tipo B apresenta melhor eficiência hidráulica e Cicero (2016) que afirma que uma soleira de tipo B é cerca de 5 a 15% mais eficiente eu uma soleira de tipo A.

A comparação com métodos teóricos demonstrou ainda que, apesar de algumas limitações geométricas relativamente aos critérios de aplicabilidade, os resultados numéricos seguiram tendências compatíveis com as estimativas analíticas, validando a abordagem adotada.

O estudo confirmou a utilidade da modelação CFD como ferramenta de apoio ao projeto e dimensionamento de estruturas hidráulicas complexas, oferecendo uma base sólida para decisões técnicas e otimizações futuras, e ajudando a compreender o escoamento e os fenómenos envolvidos.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar dos resultados obtidos fornecerem uma base sólida para a compreensão do comportamento hidráulico das soleiras tipo *Piano Keys* nas configurações A e B, identificam-se oportunidades para investigações futuras.

Como complemento ao estudo realizado, poderia ser implementado um refinamento local da malha, concentrado exclusivamente na zona a montante da soleira e na região da crista, por se tratarem de áreas de maior interesse nesta análise. Considerando que os parâmetros mais relevantes são a espessura da lâmina de água sobre a soleira e a profundidade da água a montante, seria recomendável definir um número mínimo de células nessas regiões, assegurando uma discretização adequada que permita controlar o erro associado à medição desses valores. O dimensionamento da malha deveria, assim, ser cuidadosamente planeado de forma a garantir que o erro de simulação se mantenha dentro de limites aceitáveis, contribuindo para a fiabilidade dos resultados obtidos.

Poderiam ser realizadas novas simulações com caudais diferentes, de modo a testar relações H/P superiores aos valores de referência utilizados neste estudo, com o objetivo de confirmar a validade das conclusões obtidas para uma gama mais alargada de condições, melhorar a qualidade das simulações e explorar a aplicabilidade do modelo a outros casos de estudo.

O modelo de turbulência utilizado permitiu a obtenção de bons resultados e adequados ao caso de estudo, porém, com a possibilidade de utilização de equipamentos com melhores capacidades de cálculo, seria interessante simular também com modelos mais complexos, como LES ou DES, que poderiam melhorar a descrição de fenómenos locais, como as recirculações. A implementação de maias resolução, ou várias camadas de células mais finas, junto às paredes da soleira também iria melhorar o cálculo da turbulência e do perfil de velocidades.

Dada a importância de metodologias integradas da modelação numérica com a modelação física, a fase seguinte deste estudo poderia envolver ensaios em modelo físico experimental à escala das soleiras, para complementar e validar as simulações realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ANDERSON, John D. - **Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications**. [S.l.] : McGrawHill Education, 1995. ISBN 978-1-259-02596-9.
- BADARCH, Ayurzana; TOKUZO, Hosoyamada; NARANTSOGT, Nasanbayar - Hydraulics application of the free-surface Lattice Boltzmann method. Em **2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)** [Em linha] [Consult. 18 jun. 2025]. Disponível em WWW:<URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/7884225>>.
- BAKKER, André - Lectures on Applied Computational Fluid Dynamics, 2008. Disponível em WWW:<URL:www.bakker.org>.
- BHUKYA, Raj *et al.* - Discharge Estimation over Piano Key Weirs: A Review of Recent Developments. **Water**. 14:2022) 3029. doi: 10.3390/w14193029.
- BLANCHER, Benoit; MONTARROS, F.; LAUGIER, Frederic - Hydraulic comparison between Piano Key Weirs and labyrinth spillways. . ISSN 9780415682824. 2011) 141–150. doi: 10.1201/b12349-22.
- CARVALHO, Elsa - Apontamentos teóricos e práticos: UC Aproveitamentos Hidráulicos 24/25FEUP, 2024.
- CATAÑO-LOPERA, Yovanni *et al.* - Best Practices for Computational Fluid Dynamic Applications in Water Infrastructure. **Journal of Environmental Engineering**. 149:2023). doi: 10.1061/JOEEDU.EEENG-7289.
- CHE SIDIK, Nor Azwadi *et al.* - A Short Review on RANS Turbulence Models. **CFD Letters**. 12:2020) 83–96. doi: 10.37934/cfdl.12.11.8396.
- Data Sheet (PKW Campauleil, EDF) - , [s.d.]. [Consult. 8 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.uee.uliege.be/upload/docs/application/pdf/2020-06/20_-_pkw_campauleil.pdf>.
- Data Sheet (PKW Malarce, EDF) - , [s.d.]. [Consult. 3 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.uee.uliege.be/upload/docs/application/pdf/2020-06/10_-_pkw_malarce.pdf>.
- DENYS, Frank - **Piano Key Weir spillway standard design principles and flow induced vibrations**
- ELTARABILY, Mohamed *et al.* - Hydraulic Assessment of Different Types of Piano Key Weirs. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**. 31:2024) 1–24. doi: 10.1080/09715010.2024.2415938.
- GOMES, Rogério - **Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano**. Lisboa : Instituto Superior Técnico - Lisboa, jan. 2018
- GREENSHIELDS, Chris - **OpenFOAM v12 User Guide** [Em linha], atual. 9 jul. 2024. [Consult. 1 mar. 2025]. Disponível em WWW:<URL:<https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v12/dambreak/>>.
- KABIRI-SAMANI, Abdorreza; JAVAHERI, Amir - Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. **Journal of Hydraulic Research**. . ISSN 0022-1686. 2012). doi: 10.1080/00221686.2011.647888.
- LEITE RIBEIRO, Marcelo *et al.* - Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. **Journal of Hydraulic Research**. . ISSN 0022-1686. 2012). doi: 10.1080/00221686.2012.695041.
- LENCASTRE, Armando - **Hidráulica das Estruturas. Descarregadores - Vol. I**. [S.l.] : LNEC, 2001. ISBN 978-972-49-1880-8.
- MINDS, Creative - **Barragem de Santa Justa | TPF** [Em linha] [Consult. 3 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:<https://tpf.pt/obra.php?n=regadio&p=barragem-de-santa-justa>>.

MONAGHAN, Joseph - Smoothed Particle Hydrodynamics. **Reports on Progress in Physics**. . ISSN 0034-4885. 2005) 50. doi: 10.1088/0034-4885/68/8/R01.

Monograph Barrage de Goulours - , [s.d.]. [Consult. 3 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/monobar_goulours.pdf>.

Monograph Barrage de Malarce - , [s.d.]. [Consult. 3 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/monobar_malarce.pdf>.

OUAMANE, Ahmed - The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways. **International Journal on Hydropower and Dams**. 10:2003).

OUAMANE, Ahmed; F.LEMPÉRIÈRE - **Design of a new economic shape of weir**

PRALONG, Julien *et al.* - A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. . ISSN 978-0-415-68282-4. 2011) 271–278. doi: 10.1201/b12349-40.

SASSETTI MENDES, Lourenço - **Computational Fluid Dynamics of Aerated Flows in Spillways Chutes**. Santander : Universidad de Cantabria, 2021

SASSETTI MENDES, Lourenço *et al.* - **Why computational fluid dynamics is mandatory in physical modelling of large hydraulic structures: a six-step methodology of integration**

SCHLEISS, Anton - **From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review**. ISBN 978-0-415-68282-4.

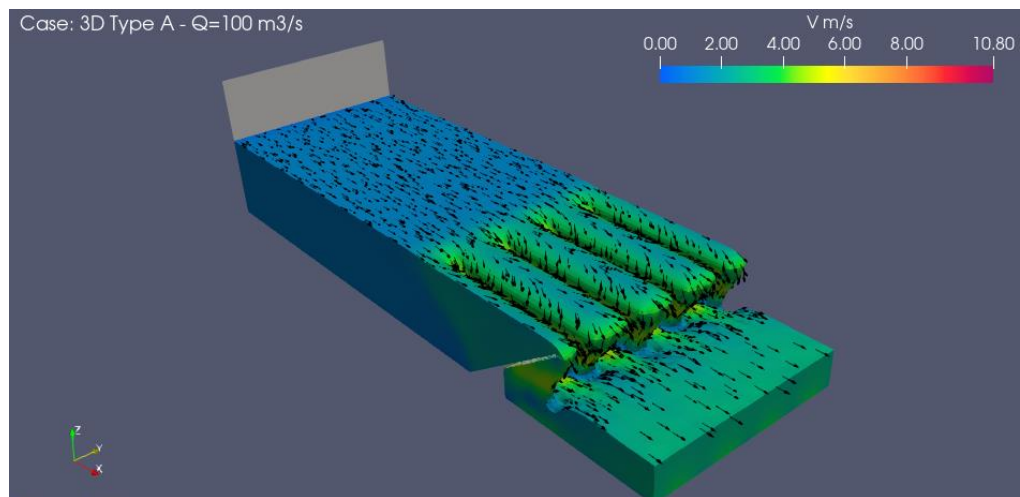
TORRE-GÓMEZ, Guadalupe *et al.* - Hydraulic Behavior Assessment of Type A and Type B Piano Key Weirs from Experimental and Numerical Results. **Environmental Sciences Proceedings**. . ISSN 2673-4931. 21:1 (2023) 84. doi: 10.3390/environsciproc2022021084.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA - **An Introduction To Computational Fluid Dynamics** [Em linha]. Second ed. [Consult. 19 mai. 2025]. Disponível em WWW:<URL:http://archive.org/details/AnIntroductionToComputationalFluidDynamics>.

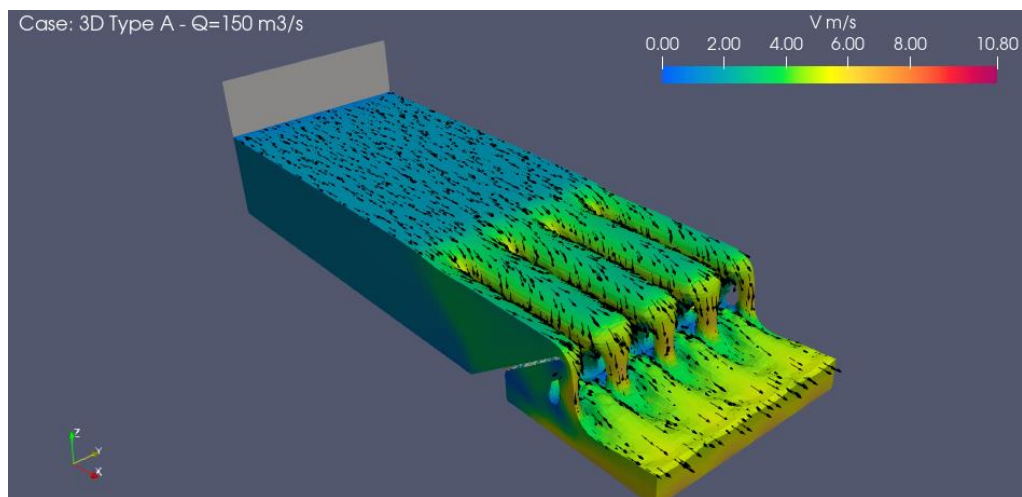
World Register of Piano Key weirs prototypes - [Em linha] [Consult. 3 abr. 2025]. Disponível em WWW:<URL:https://www.uee.uliege.be/cms/c_5026433/fr/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes>.

ANEXOS

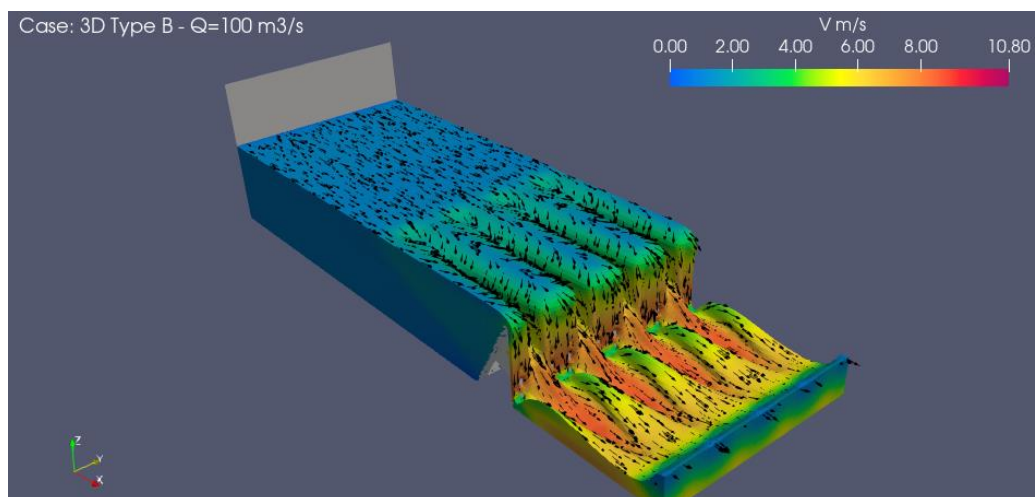
ANEXO A.1 – VISTA TRIDIMENSIONAL (100, 150 E 170 m³/s)



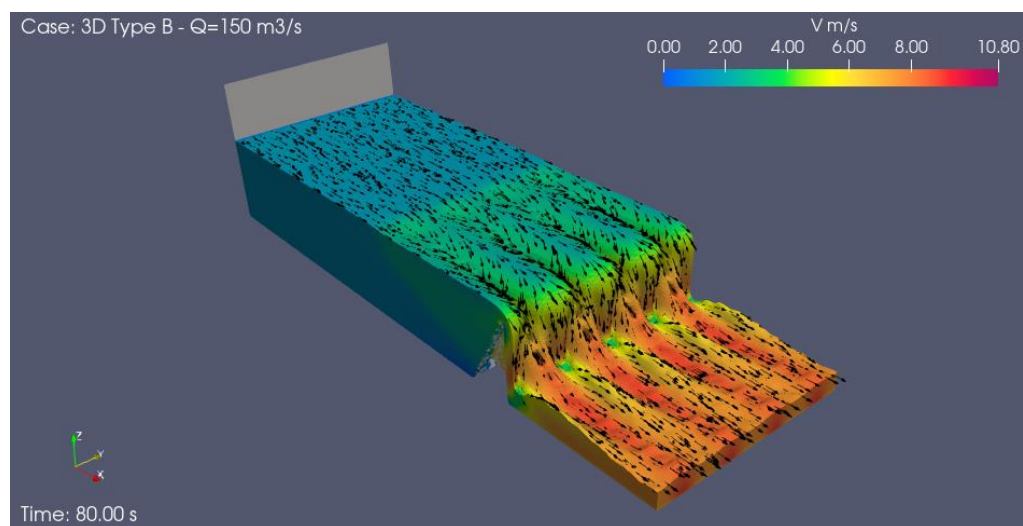
Anexo a – Vista tridimensional de soleira de Tipo A (100 m³/s)



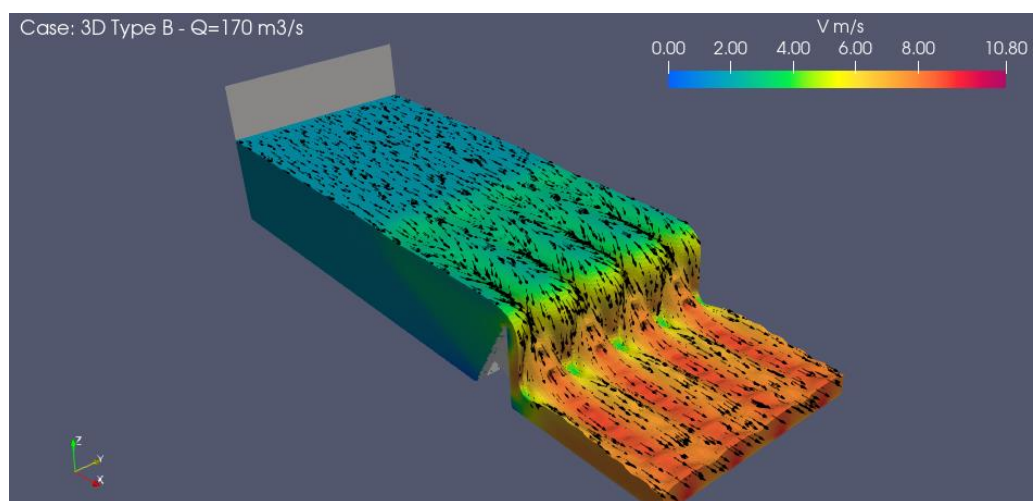
Anexo b - Vista tridimensional de soleira de Tipo A (150 m³/s)



Anexo c - Vista tridimensional de soleira de Tipo B ($100\text{ m}^3/\text{s}$)

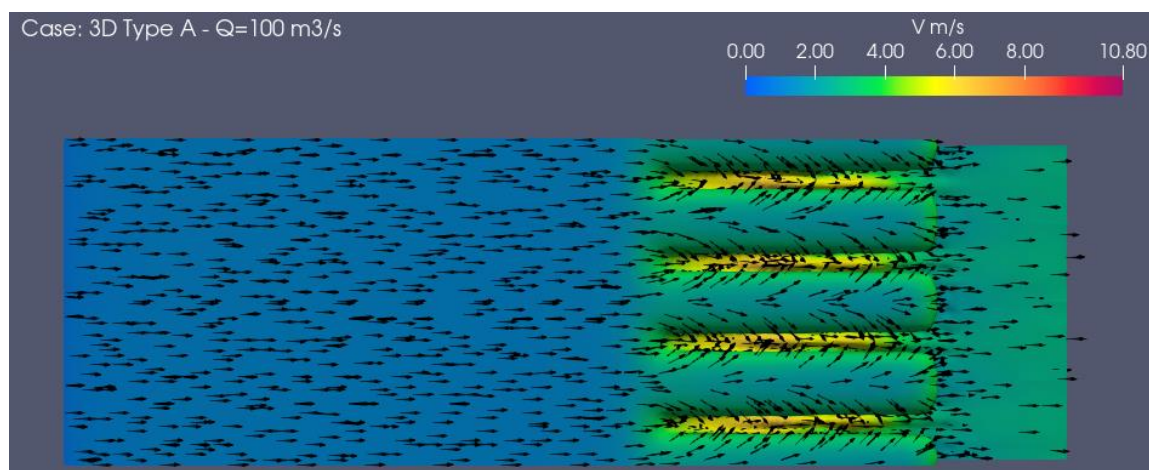


Anexo d - Vista tridimensional de soleira de Tipo B ($150\text{ m}^3/\text{s}$)

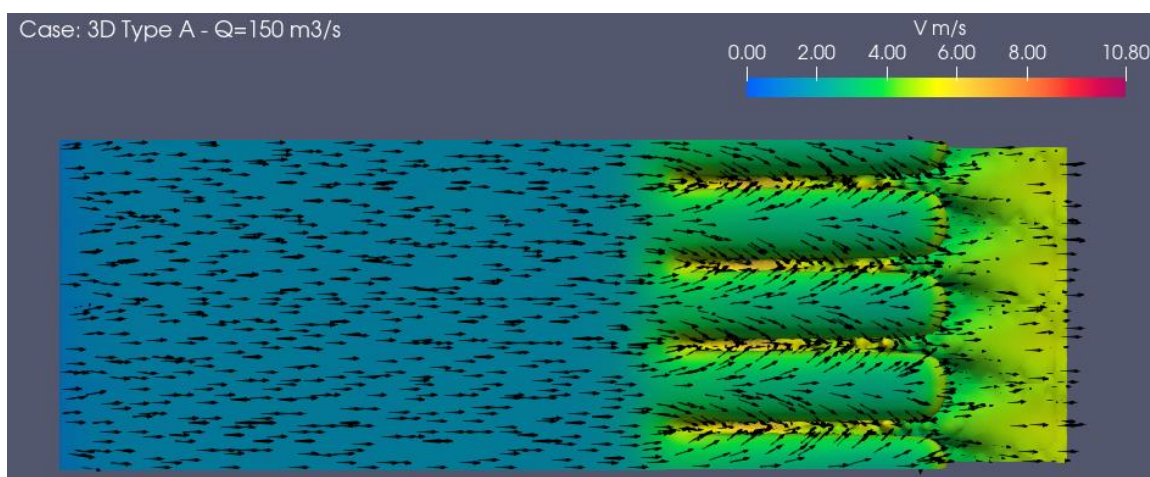


Anexo e - Vista tridimensional de soleira de Tipo B ($170\text{ m}^3/\text{s}$)

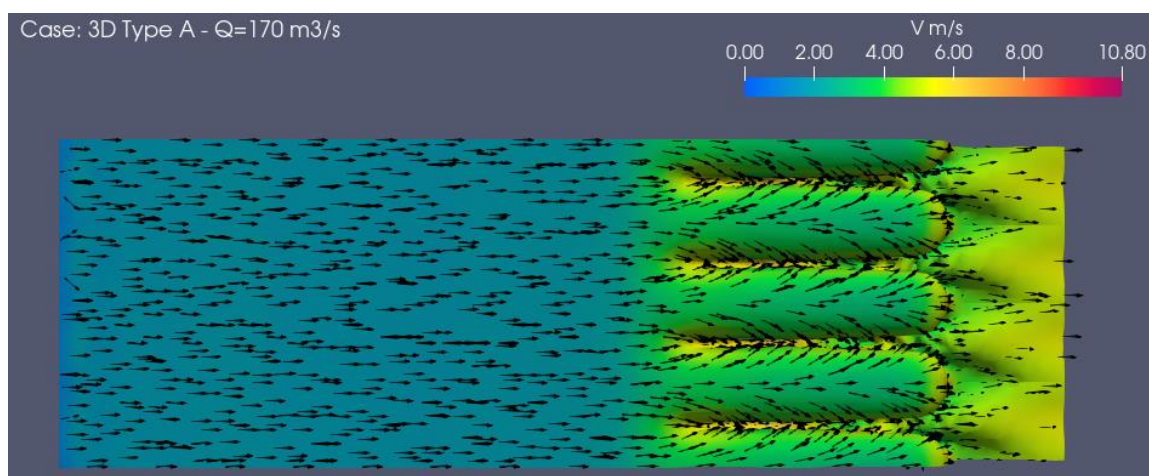
ANEXO A.2 – VISTA SUPERIOR (100, 150 E 170 m^3/s)



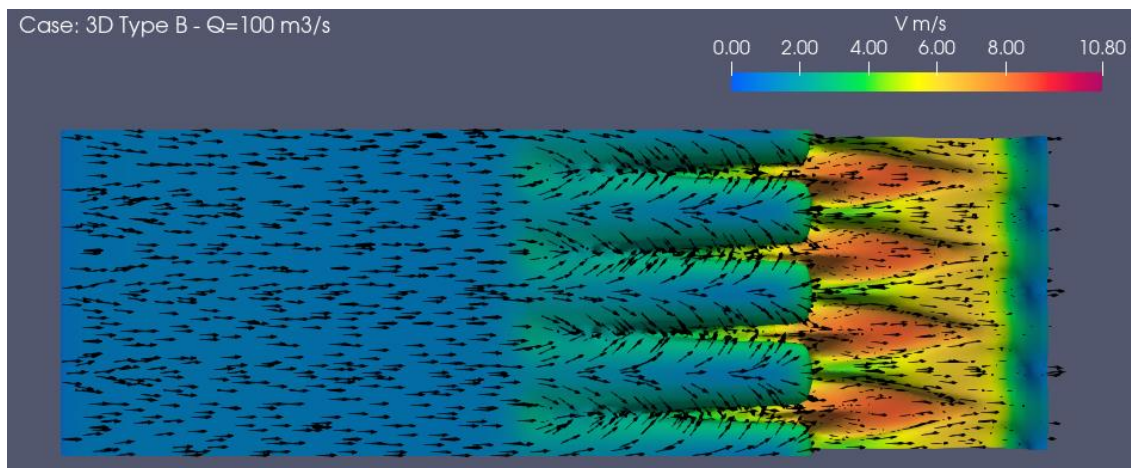
Anexo f - Vista superior de soleira de Tipo A ($100 \text{ m}^3/\text{s}$)



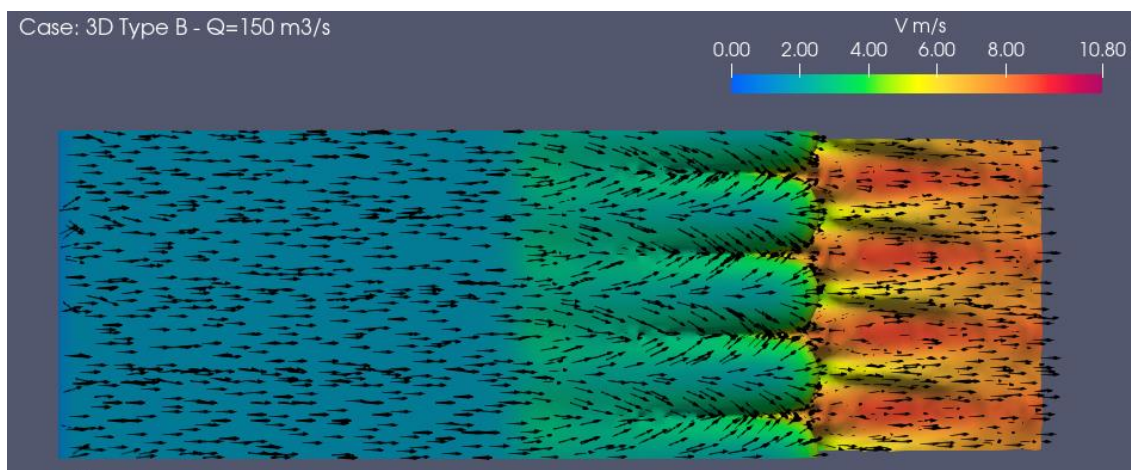
Anexo g - Vista superior de soleira de Tipo A ($150 \text{ m}^3/\text{s}$)



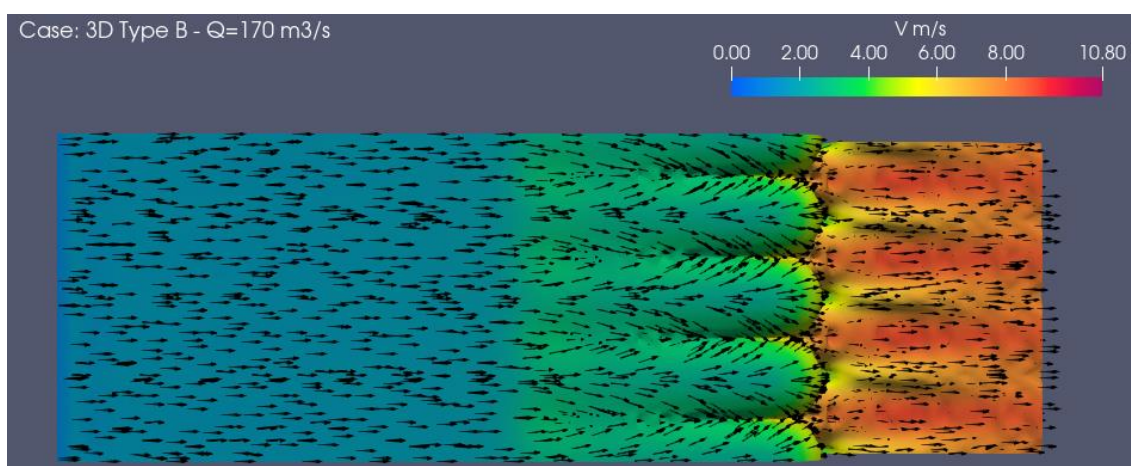
Anexo h - Vista superior de soleira de Tipo A ($170 \text{ m}^3/\text{s}$)



Anexo i - Vista superior de soleira de Tipo B ($100 \text{ m}^3/\text{s}$)

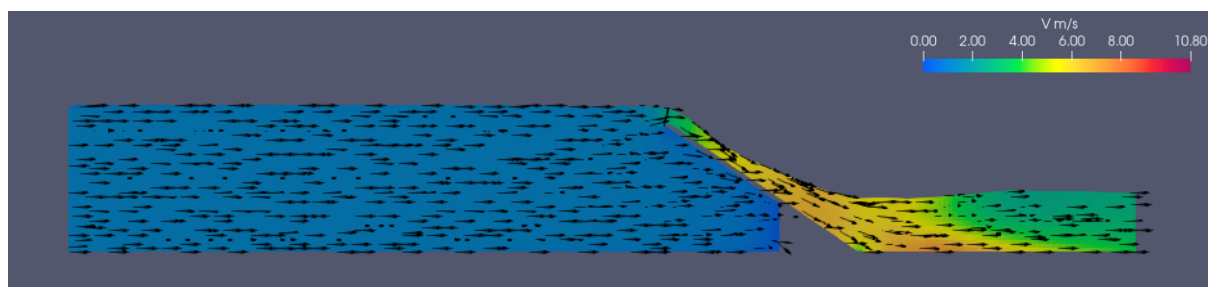


Anexo j - Vista superior de soleira de Tipo B ($150 \text{ m}^3/\text{s}$)

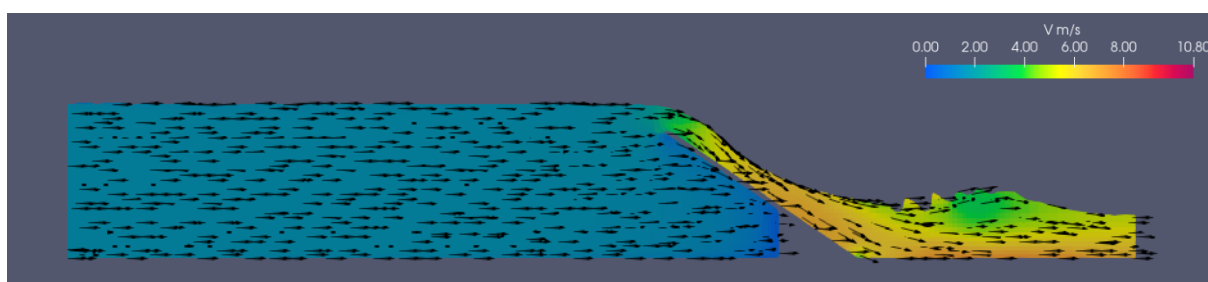


Anexo k - Vista superior de soleira de Tipo B ($170 \text{ m}^3/\text{s}$)

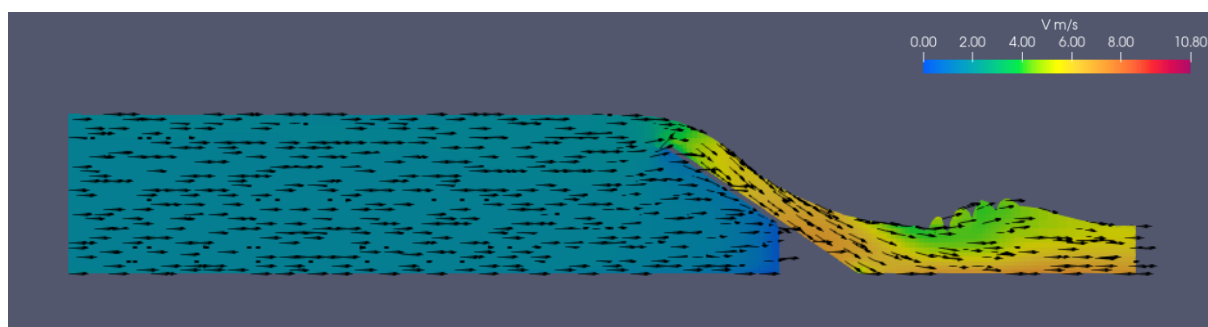
ANEXO A.3 – CAMPO DE VELOCIDADE (A EXTERIOR: 100, 150 E 170 m³/s)



Anexo I - Campo de velocidades (3D, A Exterior, Q= 100 m³/s, H =0,81 m)

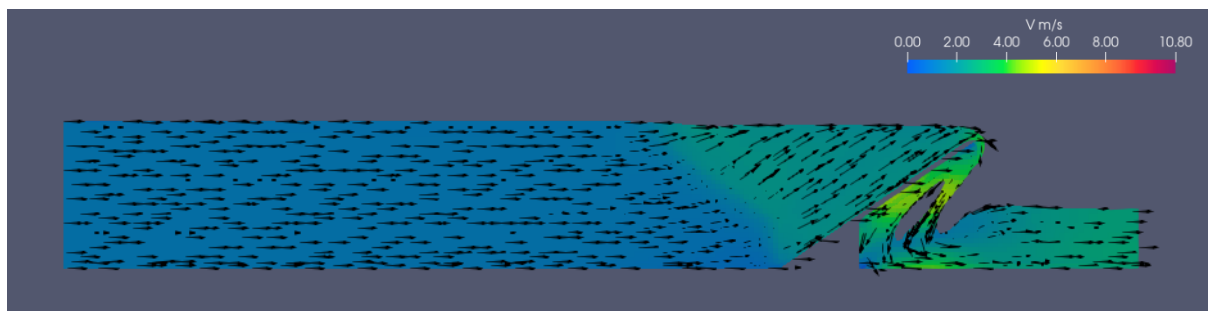


Anexo m - Campo de velocidades (3D, A Exterior, Q= 150 m³/s, H =1,19 m)

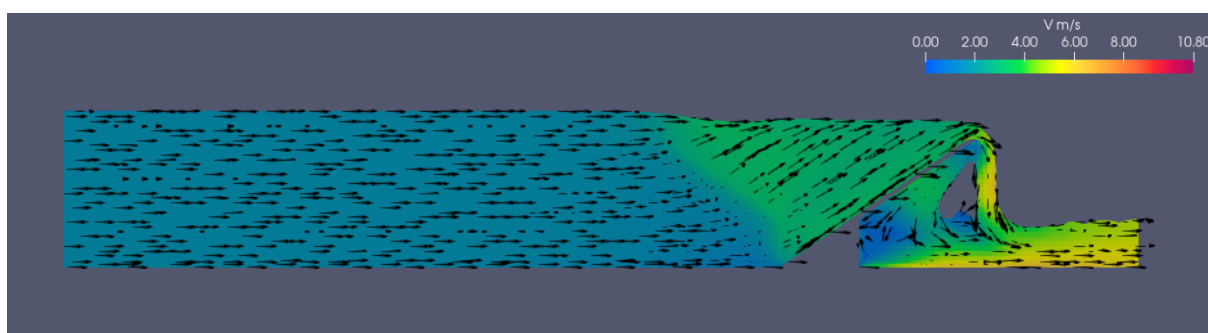


Anexo n - Campo de velocidades (3D, A Exterior, Q= 170 m³/s, H =1,37 m)

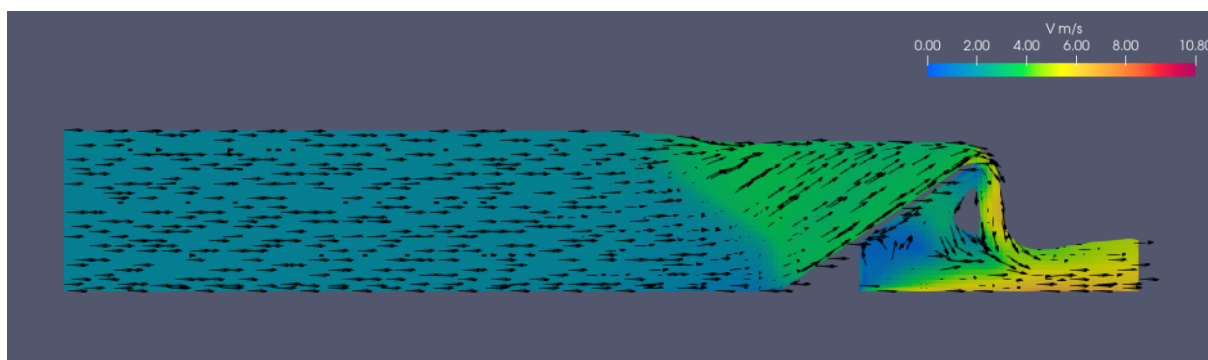
ANEXO A.4 – CAMPO DE VELOCIDADE (A Interior: 100, 150 E 170 m³/s)



Anexo o - Campo de velocidades (3D, A Interior, Q= 100 m³/s, H =0,81 m)

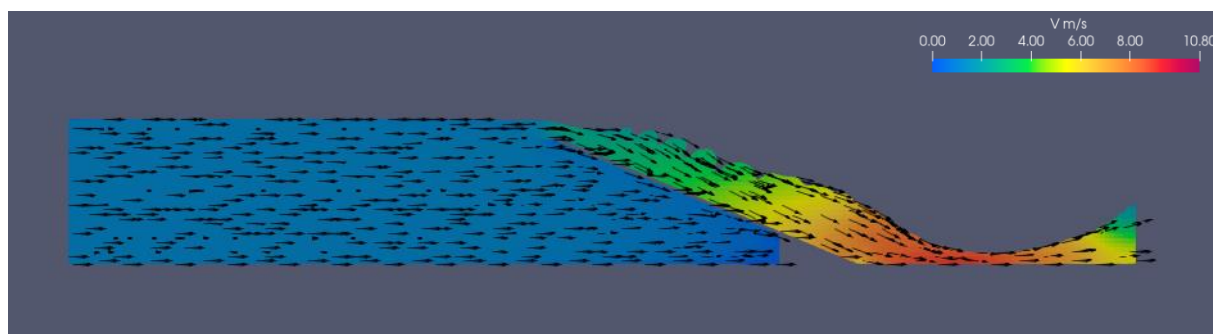


Anexo p - Campo de velocidades (3D, A Interior, Q= 150 m³/s, H =1,19 m)

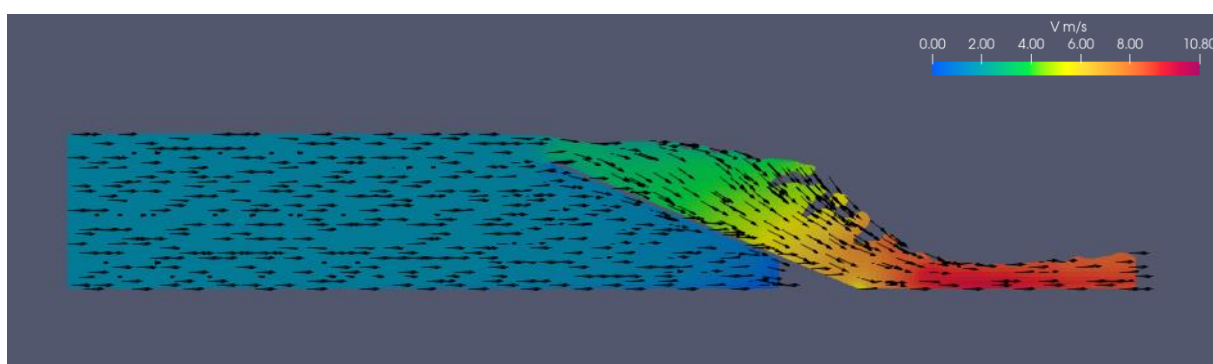


Anexo q - Campo de velocidades (3D, A Interior, Q= 170 m³/s, H =1,37 m)

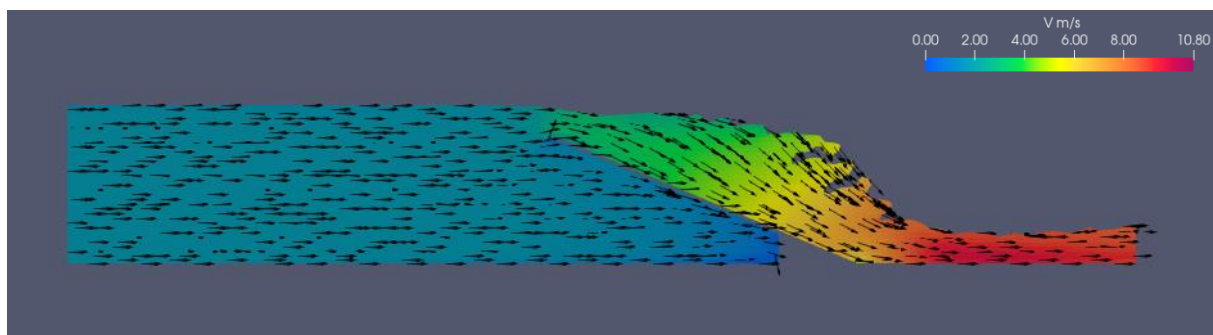
ANEXO A.5 - CAMPO DE VELOCIDADE (B EXTERIOR: 100, 150 E 170 m³/s)



Anexo r - - Campo de velocidades (3D, B Exterior, Q= 100 m³/s, H =0,76 m)

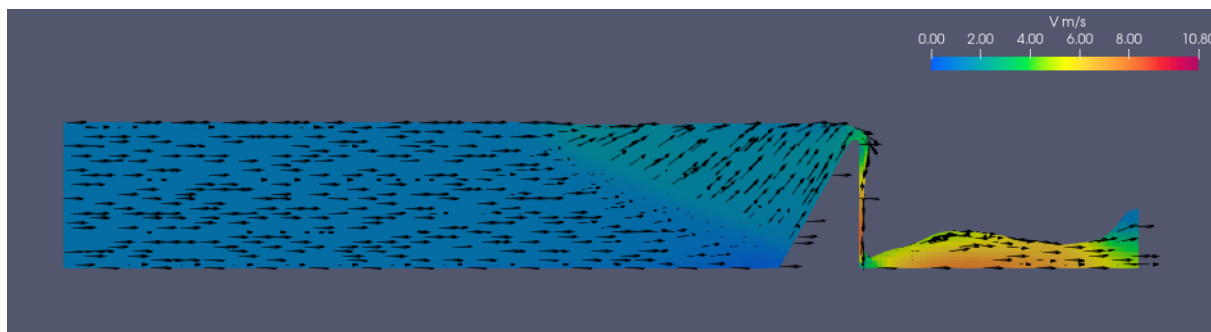


Anexo s - Campo de velocidades (3D, B Exterior, Q= 150 m³/s, H =1,16 m)

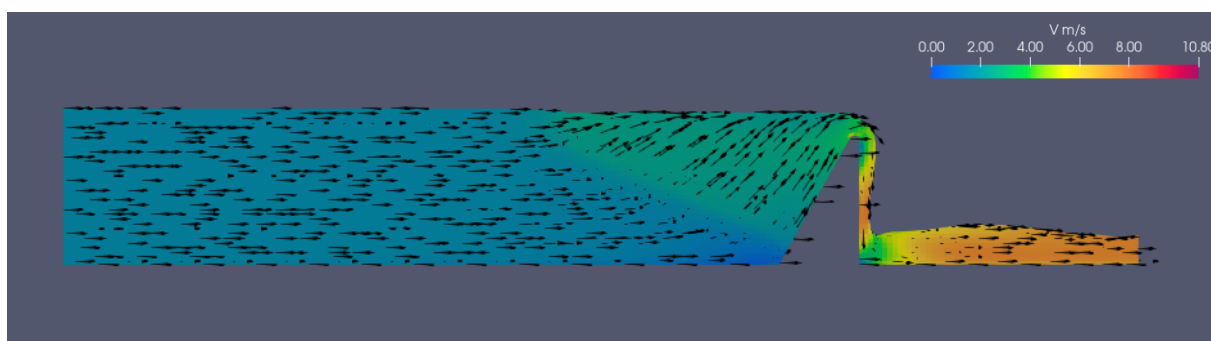


Anexo t- Campo de velocidades (3D, B Exterior, Q= 170 m³/s, H =1,34 m)

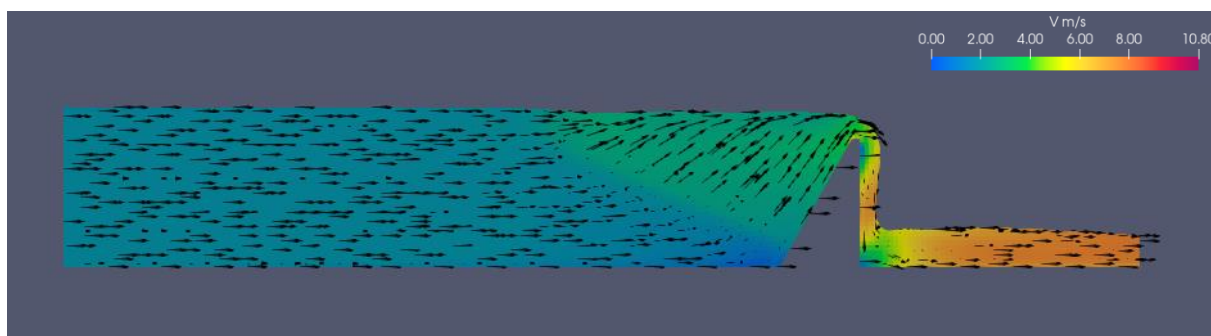
ANEXO A.6 – CAMPO DE VELOCIDADE (B INTERIOR: 100, 150 E 170 m³/s)



Anexo u - Campo de velocidades (3D, B Interior, Q= 100 m³/s, H =0,16 m)



Anexo v - Campo de velocidades (3D, B Interior, Q= 150 m³/s, H =1,16 m)



Anexo w - Campo de velocidades (3D, B Interior, Q= 170 m³/s, H =1,48 m)