

EROSÃO A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR EM DEGRAUS CONVERGENTE EQUIPADO COM UM TRAMPOLIM EM SALTO DE ESQUI. ANÁLISE DO CAMPO DE VELOCIDADES NA SUPERFÍCIE LIVRE.

BAPTISTA MANUEL ZUMBA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

Coorientador: Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo

JULHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

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.

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

À minha mãe

It always seems impossible until it's done.

Nelson Mandela

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

AGRADECIMENTOS

Talvez não existam palavras significativas e suficientes para agradecer o auxílio, a colaboração, a dedicação e o carinho prestados por parte de várias pessoas ao longo de todo o percurso da minha formação. Sem elas, alcançar essa etapa não teria sido possível, por isso, não quero que essa oportunidade passe sem agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu sucesso e a minha chegada até aqui.

À Professora Doutora Elsa Carvalho, dedico os meus agradecimentos, pela incrível orientação, pela disponibilidade, pelo suporte dado e pela possibilidade de trabalhar nesse espetacular tema. E também, não menos importante, por ter sido uma das influenciadoras na escolha da minha especialização.

Ao meu coorientador, Doutor Rui Aleixo, o meu muito obrigado, pelo suporte dado, pelo auxílio no uso dos demais softwares que tive a oportunidade de conhecer ao longo deste trabalho, pela incansável disponibilidade, pela preocupação demonstrada e pela paciência para esclarecer as minhas dúvidas.

Ao Sr. Miguel Guerra, agradeço pela disponibilidade e por todo auxílio dado no laboratório ao longo de todos os ensaios.

À minha mãe, Guilhermina José Nhancale, a qual dedico essa tese, será difícil endereçar os meus profundos agradecimentos visto que me faltam palavras para tal. Agradeço por tudo e mais alguma coisa, pela educação, pelo espírito de sacrifício que tem demonstrado, pelo apoio nas minhas decisões e por sempre me fazer acreditar que sou capaz.

Ao meu pai, Manuel Salomão Zumba (em memória), agradeço pela educação e pelos ensinamentos que carrego até hoje.

Aos meus irmãos (Salomão Zumba, Matilde Zulmira, Dulce Laurinda, Adelaide Maria, Sandra Matimbe, Márcia Matavele e Dulcídio Matimbe) obrigado pelo apoio e pelo amor que me transmitem sempre.

À Gilda Filipe, agradeço pelo incansável apoio, pela paciência, por me fazer sentir especial, por acreditar em mim e acima de tudo pelo amor e carinho demonstrados ao longo dessa caminhada.

Aos meus amigos (Custódio Cossa, Nilza Machango, Ângela Mazau, Nelson Mandlate, Bento Nhanombe, Hélder Muiambo, Eudes Chitsivane, Edson Samuel, Jéssica Mavie, e aos demais amigos), agradeço por fazerem parte da minha história e por partilharem momentos incríveis e péssimos da minha vida.

Ao Instituto Camões, agradeço, por ter tornado possível, este sonho de estudar em Portugal.

A todos, o meu profundo e sincero obrigado.

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

RESUMO

A erosão localizada é um fenómeno colateral da dissipação de energia por jatos, esta última muito frequentemente usada nas estruturas hidráulicas. Este fenómeno pode levar a alterações do leito e, conseqüentemente, colocar em risco não só a própria estrutura como também as margens. Por este motivo, é fundamental o estudo da erosão localizada provocada por jatos, bem como a compreensão dos fenómenos associados, como o transporte de sedimentos e a hidrodinâmica associada.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos, na FEUP, vários estudos experimentais de caracterização geométrica do sistema cavidade-barra originados por um jato em salto de esquí a jusante de um descarregador em degraus. Nesses estudos foi possível obter o modelo 3D da erosão bem como a sua variação temporal.

Este estudo surge na continuação dos trabalhos desenvolvidos anteriormente e tem como principal objetivo a caracterização da hidrodinâmica do escoamento na bacia de dissipação utilizando velocimetria por imagem de partículas (PIV na sigla inglesa). A ênfase é colocada no campo médio de velocidades medido na superfície livre e da sua variação espaço-temporal e na caracterização dos vórtices gerados pelo jato incidente, em termos de dimensão e frequência de oscilação. Estes resultados serão posteriormente relacionados com o modelo 3D do leito, resultante do fenómeno de erosão provocado pelo jato. As grandezas geométricas do sistema cavidade-barra e correspondente modelo 3D foram determinadas, para diferentes condições de ensaio e instantes, através de técnicas fotogramétricas não intrusivas.

Palavras-Chave: Dissipação de energia por Jatos, Erosão localizada, Campo de Velocidade, PIV, Evolução Temporal

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

ABSTRACT

Local scour is a collateral phenomenon of energy dissipation by jets, the latter very often used in hydraulic structures. This phenomenon can lead to alterations of the bed and consequently endanger not only the structure itself but also the river banks. For this reason, the study of local scour and the understanding of associated phenomena induced by jets, such as sediment transport and associated hydrodynamics, are fundamental.

In the last few years several experimental studies of geometric characterization of the cavity-bar system originated by a ski-jump jet downstream of a stepped spillway have been developed at FEUP. In these studies it was possible to obtain the 3D model of the erosion as well as its temporal variation.

This study is a continuation of previous work and has as main objective the characterization of the hydrodynamics of the flow in the dissipation basin using Particle Image Velocimetry (PIV). The emphasis is placed on the mean velocity field measured at the free surface and its spatio-temporal variation and on the characterization of the vortices generated by the incident jet, in terms of size and oscillation frequency. These results will be subsequently related to the 3D model of the bed resulting from the erosion phenomenon caused by the jet. The geometric quantities of the cavity-bar system and the corresponding 3D model were determined, for different test conditions and instants, by means of non-intrusive photogrammetric techniques, already presented in previous studies.

KEYWORDS: Energy dissipation by jets, local scour, velocity field, PIV, time evolution.

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.1. Motivação e Objetivos	1
1.2. Estrutura da dissertação	2
2. INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. Revisão Bibliográfica.....	3
2.2. Definições	5
3. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIAS	9
3.1. Descrição da instalação experimental	9
3.2. Metodologia experimental	12
3.2.1. Calibração do Caudalímetro	14
3.3. Metodologia do processamento de dados	14
3.3.1. Caracterização do jato e caracterização 3D do leito.....	14
3.3.2. Determinação dos campos de velocidades	16
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	21
4.1. Ensaios preliminares	21
4.1.1. Repetibilidade dos ensaios	21
4.1.2. Comparação com estudos anteriores	22
4.2. Medição de Velocidade.....	29
4.2.1. Campo médio de velocidades.....	29
4.2.2. Variáveis Turbulentas (Flutuações da Velocidade e Tensões de Reynolds)	41
4.2.3. Vorticidade	45
4.2.4. Espectros	52
4.3. Relação entre os mapas de velocidade e geometria do leito	55
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	63
5.1. Conclusões	63
5.2. Desenvolvimentos futuros	64
Referências bibliográficas	65

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Interação jato-escoamento.	3
Figura 2 - Esquematização dos parâmetros estudados.	5
Figura 3 - Esquematização da evolução temporal da cavidade de erosão, da barra de depósito e dos ângulos estudados.	5
Figura 4 - (a) vórtice livre. (b) vórtice forçado.	7
Figura 5 - Reservatórios da instalação.	9
Figura 6 - Esquema geral da instalação experimental em planta e em perfil.	10
Figura 7 - Esquema representativo do trampolim de 20° (medidas em cm).	10
Figura 8 – Fotografia da bacia de restituição.	11
Figura 9 - Curva granulométrica do material granular utilizado nos ensaios experimentais (Machado, 2016).	12
Figura 10 - Esquema do tempo para aquisição da velocidade em diferentes instantes	13
Figura 11 - Reta de calibração do caudalímetro.	14
Figura 12 - Esquema do princípio da SfM (Santos, 2020).	15
Figura 13 - Fluxograma da metodologia adotada para determinação do modelo 3D e características geométricas.	16
Figura 14 - (a) Esquema da PIV clássica (Aleixo et al., 2020). (b) ilustração da função de correlação obtida entre duas janelas consecutivas, com o pico a indicar a medida do deslocamento das partículas em cada janela (www.dantecdynamics.com).	17
Figura 15 - Obtenção da resolução subpixel através do ajuste de uma função gaussiana à distribuição do pico da função de correlação.	18
Figura 16 - Exemplificando a regra do ¼ e a garantia de existirem pelo menos 4 partículas por cada janela de interrogação.	18
Figura 17 - Duas imagens consecutivas corrigidas.	19
Figura 18 - Alvo de calibração utilizado para calibrar as imagens	19
Figura 19 - Perfis longitudinais obtidos pelas duas estratégias, para as condições C01 e C02 e para t=10800s.	21
Figura 20 - Comparação dos perfis longitudinais para a condições C01 e para t=120s.	22
Figura 21 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para t=120s.	23
Figura 22 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C01 e para t=240s.	23
Figura 23 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para t=240s.	24
Figura 24 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C01 e para t=360s.	24
Figura 25 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para t=3600s.	25
Figura 26 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C01 e para t=10800s.	25
Figura 27 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para t=10800s.	26
Figura 28 - Distribuições das diferenças obtidas entre o presente estudo e o de Santos (2020) para cada condição e para os instantes 120s e 240s.	27
Figura 29 - Distribuições das diferenças obtidas entre o presente estudo e o de Santos (2020) para cada condição e os restantes instantes (600s, 1800s, 3600s, 7200s e 10800s).	28
Figura 30 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para t=120s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	29
Figura 31 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para t=120s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	30

Figura 32 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=240s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	30
Figura 33 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=240s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	31
Figura 34 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=600s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	31
Figura 35 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=600s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	32
Figura 36 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=1800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	32
Figura 37 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=1800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	33
Figura 38 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=3600s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	33
Figura 39 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=3600s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	34
Figura 40 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=7200s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	34
Figura 41 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=7200s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	35
Figura 42 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=10800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	35
Figura 43 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=10800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.	36
Figura 44 – Identificação das secções transversais consideradas no estudo.....	36
Figura 45 - Perfis transversais adimensionalizados da componente longitudinal da velocidade para diferentes secções ($x=0.1$ m, $x=0.2$ m, $x=0.3$ m e $x=0.4$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).....	37
Figura 46 - Perfis transversais adimensionalizados da componente longitudinal da velocidade para diferentes secções ($x=0.5$ m, $x=0.6$ m, $x=0.7$ m e $x=0.8$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).....	38
Figura 47 - Perfis transversais adimensionalizados da componente transversal da velocidade para diferentes secções ($x=0.1$ m, $x=0.2$ m, $x=0.3$ m e $x=0.4$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).....	39

Figura 48 - Perfis transversais adimensionalizados da componente transversal da velocidade para diferentes secções ($x=0.5$ m, $x=0.6$ m, $x=0.7$ m e $x=0.8$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).....	40
Figura 49 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=120$ s, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.	41
Figura 50 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=240$ s, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.	41
Figura 51 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=3600$ s, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.....	42
Figura 52 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=10800$ s, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.....	42
Figura 53 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=120$ s, na condição C01.....	43
Figura 54 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=120$ s, na condição C02.....	43
Figura 55 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=240$ s, na condição C01.....	43
Figura 56 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=240$ s, na condição C02.....	44
Figura 57 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=3600$ s, na condição C01.....	44
Figura 58 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=3600$ s, na condição C02.....	44
Figura 59 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=10800$ s, na condição C01.....	45
Figura 60 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=10800$ s, na condição C02.....	45
Figura 61 - Mapa da vorticidade medido para $t=120$ s, na condição C01.....	46
Figura 62 - Mapa da vorticidade medido para $t=120$ s, na condição C02.....	46
Figura 63 - Mapa da vorticidade medido para $t=240$ s, na condição C01.....	46
Figura 64 - Mapa da vorticidade medido para $t=240$ s, na condição C02.....	47
Figura 65 - Mapa da vorticidade medido para $t=3600$ s, na condição C01.....	47
Figura 66 - Mapa da vorticidade medido para $t=3600$ s, na condição C02.....	47
Figura 67 - Mapa da vorticidade medido para $t=10800$ s, na condição C01.....	48
Figura 68 - Mapa da vorticidade medido para $t=10800$ s, na condição C02.....	48
Figura 69 - Mapas da vorticidade e perfis de velocidade ao longo dos eixos longitudinal e transversal que passam no centro do vórtice situado em $y<0$, obtidos para a condição C01 e diferentes instantes.	49
Figura 70 - Mapas da vorticidade e perfis de velocidade ao longo dos eixos longitudinal e transversal que passam no centro do vórtice situado em $y<0$, obtidos para a condição C02 e diferentes instantes.	50
Figura 71 – Perfis de velocidade adimensionalizados medidos ao longo do eixo horizontal do vórtice para a condição C01.....	51
Figura 72 – Perfis de velocidade adimensionalizados medidos ao longo do eixo horizontal do vórtice para a condição C02.....	51
Figura 73 – Espectros medidos para $t=120$ s, na condição C01.....	52
Figura 74 – Espectros medidos para $t=120$ s, na condição C02.....	52
Figura 75 – Espectros medidos para $t=240$ s, na condição C01.....	53
Figura 76 – Espectros medidos para $t=240$ s, na condição C02.....	53
Figura 77 – Espectros medidos para $t=3600$ s, na condição C01.....	53
Figura 78 – Espectros medidos para $t=3600$ s, na condição C02.....	54
Figura 79 – Espectros medidos para $t=10800$ s, na condição C01.....	54
Figura 80 – Espectros medidos para $t=10800$ s, na condição C02.....	54

Figura 81 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=120s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	56
Figura 81 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=240s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	57
Figura 83 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=600s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	58
Figura 84 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=1800s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	59
Figura 85 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=3600s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	60
Figura 86 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=7200s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	61
Figura 87 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=10800s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da velocidade na secção de saída do trampolim.	15
Tabela 2 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para as condições C01 (3h e Pára-Arranca).	22
Tabela 3 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para as condições C02 (3h e Pára-Arranca).	22
Tabela 4 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para a condição C01.	26
Tabela 5 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para a condição C02.	27
Tabela 6 – Valores das frequências correspondentes aos dois picos (f_1 e f_2) identificados nos espetros medidos nos pontos P1 e P2, obtidos na condição C01.	55
Tabela 7 – Valores das frequências correspondentes aos dois picos (f_1 e f_2) identificados nos espetros medidos nos pontos P1 e P2, obtidos na condição C02.	55

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

B_s – Largura da cavidade de erosão [m]

$C01$ – Primeira Condição de ensaio;

$C02$ – Segunda Condição de ensaio;

d_{50}, d_{85}, d_{90} – Dimensões características do material granular [mm]

dt – Duração do ensaio [s]

$d\vec{s}$ – Vetor deslocamento das partículas [m]

$\vec{e}_z$ – Vetor unitário normal ao plano Oxy

$F_n(x_i)$ – Transformadas de Fourier das series temporais da velocidade

f – Profundidade máxima da cavidade medida a partir do nível inicial do leito [m]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

h – Espessura do colchão de água na bacia de restituição [m]

h_m – Altura da barra a jusante da cavidade de erosão [m]

k_1, k_2 – Constantes

L_{bar} – Extensão da barra [m]

L_{s0} – Comprimento da cavidade de erosão desde a origem do referencial [m]

L_{s1} – Comprimento da cavidade de erosão [m]

L_w - Dimensão de um objeto em unidades físicas [m]

L_i – Dimensões de um objeto em pixéis [pixel]

N – Número de valores

r, θ – Coordenadas polares

Q – Caudal [L/s]

t – Tempo [s]

U – Tensão [V]

U_0 - Velocidade na secção de saída do trampolim [m/s]

u – Componente longitudinal da velocidade [m/s]

u_i – Valores instantâneos da componente horizontal da velocidade [m/s]

$\bar{u}$ – Valor médio da componente horizontal da velocidade [m/s]

$\overline{u_i'v_j'}$ - Tensões de Reynolds [m²/s²]

V_{scour} – Volume da cavidade de erosão [m³]

V_{bar} – Volume da barra [m³]

v – Componente transversal da velocidade [m/s]

v_r – Componente radial da velocidade

v_θ – Componente angular da velocidade

$\vec{v}$ – Vetor velocidade [m/s]

x, y, z – Localização dos pontos no espaço [m]

x_p – Posição do ponto da frente da barra [m]

∇ – Gradiente

α – Fator de calibração [m/pixel]

Δt – Variação do tempo [s]

ΔV – Variação do volume [m³]

σ_g – Coeficiente de dispersão

σ_u – Desvio padrão da componente horizontal da velocidade [m/s]

ϕ – Variável genérica

$\bar{\phi}$ – Valor médio da variável genérica

ϕ' – Flutuação da variável genérica

$\vec{\omega}$ – Vorticidade [1/s]

ADV – *Acoustic Doppler Velocimetry* (Velocimetria por efeito Doppler Acústico);

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada rápida de Fourier);

PIV – *Particle Image Velocimetry* (Velocimetria por Imagem de Partículas);

SfM – *Structure from Motion*;

1.

ENQUADRAMENTO

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Um dos mecanismos correntemente utilizados para dissipação de energia em estruturas hidráulicas é a dissipação de energia por jatos. Este mecanismo consiste na geração de um jato na estrutura hidráulica, o qual irá incidir no escoamento a jusante. Sendo um mecanismo de dissipação de energia tem, regra geral, como efeito colateral o fato de provocar padrões de erosão localizados. O estudo da erosão localizada provocada por jatos é de fundamental importância para conhecer os seus efeitos nas estruturas hidráulicas e no leito e margens fluviais. As alterações ao leito causadas pela erosão localizada podem ser significativas e colocar em risco a própria estrutura ou as margens. A boa compreensão da erosão localizada está igualmente ligada ao conhecimento da hidrodinâmica do escoamento a qual influencia o transporte de sedimentos.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos, na Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, vários estudos experimentais de caracterização geométrica do sistema cavidade-barra originados por um jato em salto de esquí a jusante de um descarregador em degraus. Nesses estudos foi possível obter a caracterização da configuração geométrica de equilíbrio do sistema cavidade-barra, através da determinação das principais grandezas características, de perfis longitudinais e transversais de erosão e, mais recentemente, do modelo 3D e da sua variação temporal.

O presente estudo surge na continuação do trabalho desenvolvido anteriormente e tem como principal objetivo o estudo do campo médio de velocidades medido na superfície livre, da sua variação temporal e da relação com modelo 3D do leito obtido em cada instante, resultante do fenómeno de erosão provocado pelo jato.

As grandezas geométricas do sistema cavidade-barra e correspondente modelo 3D foram determinadas, para diferentes condições de ensaio e instantes, através de técnicas fotogramétricas não intrusivas. Os campos de velocidades médias, flutuações turbulentas e tensões de Reynolds foram determinados com recurso à Velocimetria por Imagem de Partículas, (PIV, sigla inglesa para *Particle Image Velocimetry*).

Os ensaios foram realizados para duas condições hidráulicas, definidas por um caudal, um leito de sedimentos e duas alturas de colchão de água na bacia de dissipação. Para cada condição foram realizados dois tipos de ensaios. Primeiro, um ensaio contínuo, com paragens nos instantes considerados no estudo, para levantamento do respetivo modelo 3D do leito. Durante os períodos de ensaios foram adquiridos vídeos para posterior determinação do campo de velocidades. Segundo, um ensaio com a duração total de 3h, durante o qual foram adquiridos vídeos nos mesmos instantes do ensaio contínuo e com o levantamento do leito apenas no final do ensaio, na situação de equilíbrio.

Os objetivos desta dissertação são os seguintes: (i) aferir a repetibilidade do fenómeno de erosão localizada entre experiências realizadas por operadores diferentes; (ii) caracterizar a evolução temporal do sistema cavidade-barra através da sua geometria; (iii) caracterizar a evolução temporal dos campos médios das duas componentes da velocidade medidas na superfície livre; (iv) caracterizar as flutuações turbulentas e as tensões de Reynolds, bem como a sua variação temporal; (v) identificar e caracterizar os vórtices formados, através das suas dimensões e frequências; (vi) analisar a relação entre os campos de velocidades e os modelos 3D do leito.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 5 capítulos que seguem uma ordem sequencial de acordo com o estudo feito.

Neste primeiro capítulo, apresentam-se a motivação e os objetivos do trabalho. No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica e as definições que servem de base ao trabalho realizado. O capítulo 3 é dedicado à descrição da instalação experimental e dos equipamentos usados, bem como das metodologias utilizadas nos ensaios experimentais e no processamento dos dados. No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos. Numa primeira fase apresentam-se os resultados dos ensaios preliminares de comparação com estudos anteriores e de análise de repetibilidade e, posteriormente, os dos ensaios realizados para caracterização os campos de velocidades e sua variação temporal. A terminar a tese, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e algumas sugestões de trabalho futuro.

2.

INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um jato incidente no leito de um rio tende a causar erosão do leito. Os sedimentos erodidos serão transportados pelas correntes induzidas pelo próprio jato e dando origem à formação de um sistema cavidade (erosão) e barra (deposição). Esta geometria do leito vai condicionar as correntes de transporte. As dimensões do sistema cavidade-barra e a sua evolução podem causar problemas ambientais e estruturais graves. A obtenção de soluções para esta problemática deverá ser baseada no conhecimento rigoroso das condições geométricas e hidrodinâmicas. A Figura 1 ilustra a interação jato-escoamento.

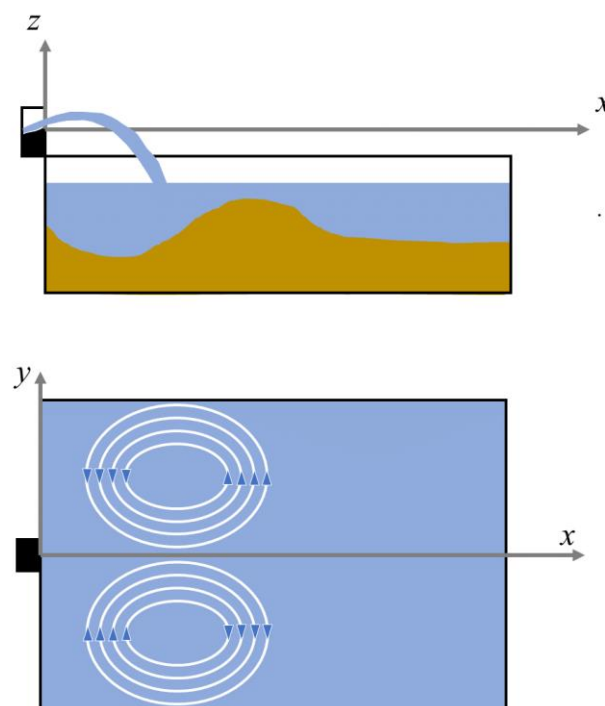


Figura 1 – Interação jato-escoamento.

Relativamente às condições de equilíbrio, têm sido realizados vários estudos dedicados à caracterização geométrica da erosão a jusante de estruturas e influência de diferentes parâmetros (Machado, 2016), nomeadamente a profundidade máxima de erosão. Existem variadas expressões empíricas para a sua determinação, de diferentes autores em função de diferentes variáveis: (i) altura de queda e caudal por unidade de largura da secção (Damle *et al.*, 1966; Martins, 1984; Veronese, 1973; Wu, 1973); (ii) o diâmetro característico do material do leito (Eggenberger e Müller, 1944; Franke, 1960; Hartung, 1959;

Patrashev, 1937; Schoklitsch, 1932); (iii) a altura do colchão de água (Jaeger, 1939; Ghodsian *et al.*, 1999; Heng *et al.*, 2013; Mason e Arumugam, 1985; Rubinstein, 1963); (iv) massas volúmicas do fluido e do material do leito (Bombardelli e Gioia, 2006); (v) o ângulo de impacto do jato (Mikhalev, 1960; Mirskhulava *et al.*, 1967; Yildiz e Üzücek, 1994); (vi) o ângulo de saída do trampolim (Alias *et al.*, 2008; Alireza *et al.*, 2008; Azmathullah *et al.*, 2004; Naini, 2011; Yildiz e Üzücek, 1996); (vii) o raio do trampolim (Ghodsian *et al.*, 2012); (viii) a velocidade de saída do jato (Hoffmans, 1998; Mason, 1989).

Para além da profundidade máxima, Azmathullah *et al.* (2004), Ghodsian *et al.* (1999, 2012), Martins (1984) e Naini (2011) estudaram igualmente as dimensões em planta da cavidade de erosão e Ghodsian *et al.* (2012) dedicou-se também ao estudo da altura máxima da barra.

A generalidade dos estudos nesta temática considera descarregadores de soleira normal. Começam a ser mais frequentes estudos dedicados à erosão provocada por jatos a jusante de descarregadores em degraus (Habib *et al.*, 2016; Tuna, 2012). Esta temática tem sido também estudada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto desde 2014 com o trabalho de Figueiredo *et al.* (2014) e posteriormente desenvolvido nos trabalhos de Machado (2016), Sá Machado *et al.* (2019), Rosa (2019), Santos (2020) e Santos *et al.* (2021), com a caracterização da situação de equilíbrio, desenvolvimento de técnicas fotogramétricas e evolução temporal do sistema cavidade-barra, respetivamente.

A erosão localizada induzida por jatos exhibe uma significativa dependência do tempo. A análise da evolução temporal no caso da erosão provocada por jatos turbulentos, circulares e planos de parede foi estudada por Rajaratnam e Berry (1977). Dargahi (2003) analisou a evolução temporal dos perfis de erosão a jusante de um descarregador. A evolução temporal da erosão localizada em pilares complexos foi estudada por Ramos *et al.* (2016).

A geometria do leito é condicionada pela hidrodinâmica do escoamento. É por isso de fundamental importância caracterizar as solicitações hidrodinâmicas originadas pelo jato e o escoamento por ele induzido. Os campos de velocidade do escoamento têm sido estudados no contexto da erosão localizada, nomeadamente por Das *et al.* (2013), que estudaram experimentalmente um sistema de vórtices em ferradura na cavidade de erosão gerada pelo escoamento em torno de pilares circulares. Através de medições com Velocimetria Acústica por efeito Doppler (*Acoustic Doppler Velocimetry*, na designação inglesa), determinaram os mapas de velocidade e vorticidade em diferentes planos verticais. Beheshti e Ataie-Ashtiani (2016) apresentaram uma caracterização detalhada do escoamento em torno de pilares complexos. Com recurso a ADV são apresentadas as velocidades médias, intensidades turbulentas e tensões Reynolds em diferentes planos verticais e horizontais. Guan *et al.* (2019) caracterizaram o escoamento turbulento na cavidade de erosão de um pilar circular, com recurso a PIV. No plano vertical, determinaram os campos de velocidades, turbulência e tensões de Reynolds e identificaram e caracterizaram um sistema de vórtices. Por seu turno, Li *et al.* (2005) investigaram as ondas da superfície livre e a interação onda-turbulência, num escoamento provocado por um jato de parede plano. A amplitude da superfície livre e os campos de velocidade em perfis verticais foram medidos por meio de PIV.

De acordo a pesquisa bibliográfica realizada não foram encontrados trabalhos relativos à hidrodinâmica da superfície livre numa bacia de dissipação onde incide um jato. Pretende-se com este trabalho ajudar a suprimir esta lacuna.

2.2. DEFINIÇÕES

Nesta secção apresentam-se as definições que servirão de base ao presente estudo. Estas definições abrangem desde as características geométricas do sistema cavidade-barra às variáveis hidrodinâmicas.

As principais variáveis geométricas que caracterizam o sistema cavidade-barra são: a profundidade máxima da cavidade (f), a altura máxima da barra (h_m), a largura máxima da cavidade (B_s), o comprimento máximo da cavidade, medido a partir do descarregador (L_{s0}), o comprimento máximo da cavidade (L_{s1}), a extensão longitudinal da barra (L_{bar}), a posição do pé da barra (X_p), o volume da cavidade de erosão (V_{scour}) e o volume da barra (V_{bar}), os ângulos do perfil central longitudinal e ângulos do perfil transversal no ponto de profundidade máxima, tal como é esquematizado nas Figuras 2 e 3.

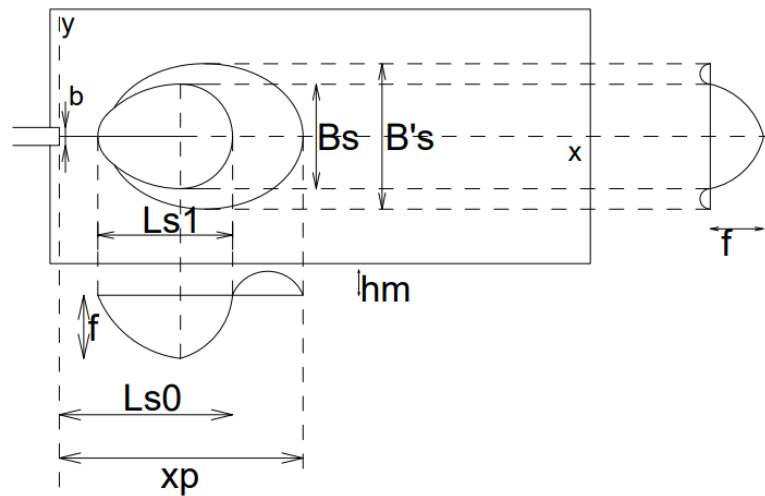


Figura 2 - Esquemática dos parâmetros estudados.

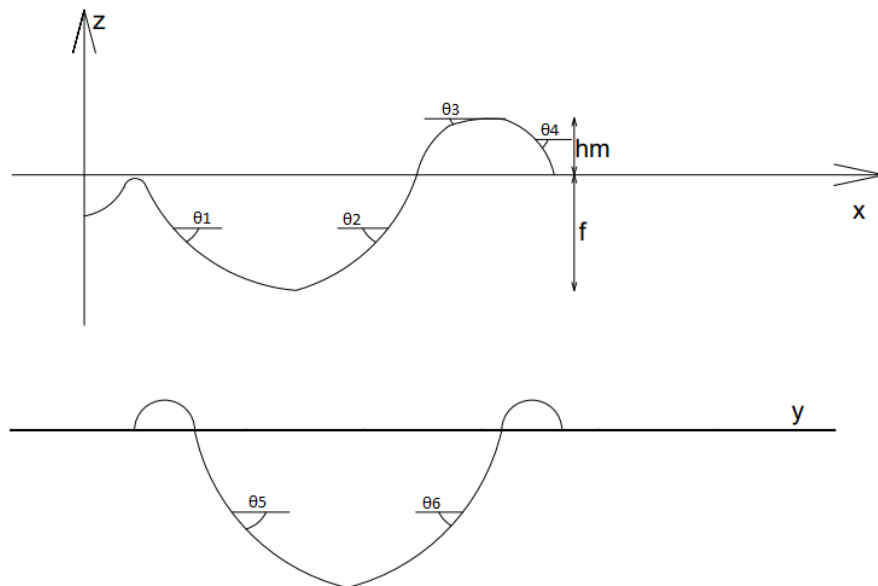


Figura 3 - Esquemática da evolução temporal da cavidade de erosão, da barra de depósito e dos ângulos estudados.

O escoamento será definido por um campo de pressões e de velocidades obedecendo às equações de Navier-Stokes. Dado que o escoamento é turbulento, utiliza-se a decomposição de Reynolds. Para uma variável genérica (ϕ), tem-se

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (1)$$

Onde $\bar{\phi}$ é o valor médio, e ϕ' a flutuação. Para a componente horizontal da velocidade tem-se, na forma discreta a seguinte expressão para o valor médio (Novais-Barbosa, 1985):

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (2)$$

Onde $\bar{u}$ é o valor médio, u_i são os valores instantâneos e N o número de valores. A expressão (2) é facilmente generalizada para as demais componentes. O desvio padrão da componente horizontal velocidade, σ_u , está relacionado com a turbulência e é definido por (Novais-Barbosa, 1985):

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{u} - u_i)^2}, \quad (3)$$

expressão que se generaliza facilmente para as restantes componentes.

Da decomposição de Reynolds das equações de Navier-Stokes, surge o termo das tensões de Reynolds ($\overline{u_i'v_j'}$). Estas são dadas por (Novais-Barbosa, 1985):

$$\overline{u_i'v_j'} = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N u_i'v_j', \quad (4)$$

No presente estudo, observou-se que o jato incidente originava dois vórtices bem definidos na bacia de dissipação, como esquematizado na Figura 1. Dois modelos clássicos de vórtices são os vórtices livres e os vórtices forçados. Um vórtice livre ocorre quando uma massa de fluido é animada de um movimento de rotação sem qualquer força de contacto aplicada. Um exemplo é o escoamento de água num ralo. Um vórtice forçado ocorre quando uma força externa de contacto coloca o fluido em rotação. Um exemplo é o vórtice gerado por um recipiente em rotação. A Figura 4 ilustra estes dois tipos de vórtice. As equações que descrevem a velocidade de um vórtice livre são, em coordenadas polares (r, θ) (Rajaratnam e Berry, 1994):

$$\begin{cases} v_r = 0 \\ v_\theta = \frac{k_1}{r} \end{cases}, \quad (5)$$

Onde k_1 é uma constante. O vórtice forçado é descrito pelas seguintes equações

$$\begin{cases} v_r = 0 \\ v_\theta = k_2 r \end{cases}, \quad (6)$$

Sendo k_2 uma constante.

Pode assim introduzir-se o conceito de vorticidade ($\vec{\omega}$). A vorticidade é uma grandeza vetorial que descreve o movimento local de rotação de um fluido. Matematicamente a vorticidade pode ser traduzida por:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}, \quad (7)$$

Para um escoamento no plano (x, y) (e.g. superfície livre) a expressão anterior pode ser simplificada:

$$\vec{\omega} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \vec{e}_z, \quad (8)$$

Um escoamento diz-se irrotacional se $\vec{\omega} = 0$ e rotacional caso contrário. Assim, um vórtice livre é irrotacional, mas um vórtice forçado é rotacional.

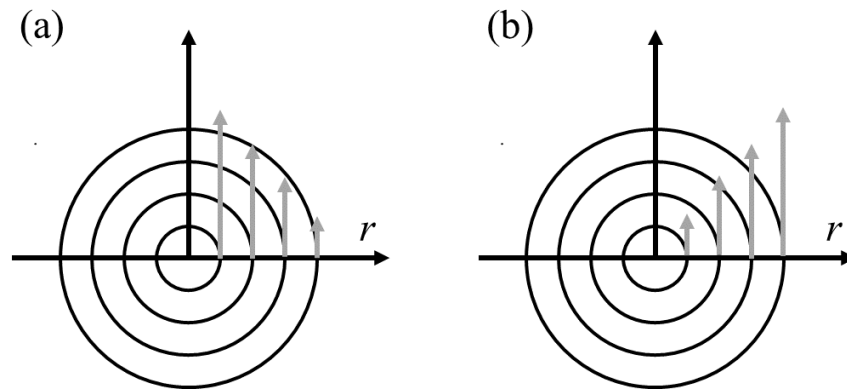


Figura 4 - (a) vórtice livre. (b) vórtice forçado.

A determinação das frequências de rotação pode ser feita através da transformada de Fourier das séries temporais de velocidade. Na sua forma discreta a transformada de Fourier escreve-se na seguinte forma:

$$F_n(x_i) = \sum x_i e^{-2\pi i \frac{j}{n} t}, \quad (9)$$

Esta expressão é implementada pelo algoritmo FFT proposto por Cooley e Tukey (1965).

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

3.

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIAS

3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais do estudo da erosão a jusante de um descarregador em degraus e da análise do campo de velocidades na superfície livre foram realizados num modelo reduzido de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí, que se encontra no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A instalação é composta por quatro reservatórios (Figura 5), dois de alimentação (R1, R2), um de estabilização (R3) e um de recolha (R4). Os dois reservatórios de alimentação permitem manter a estabilidade do nível, garantido o equilíbrio entre caudais efluentes e afluentes, e bombear a água para um circuito alimentando o reservatório de estabilização que se encontra a montante do descarregador. Por sua vez o caudal é escoado pelo descarregador em degraus até a bacia de restituição, que chega sob forma de jato, e posteriormente, escoado ao reservatório de recolha a jusante da bacia, a partir do qual é bombeado para os reservatórios de alimentação, formando assim um circuito fechado (Figura 6).



Figura 5 - Reservatórios da instalação.

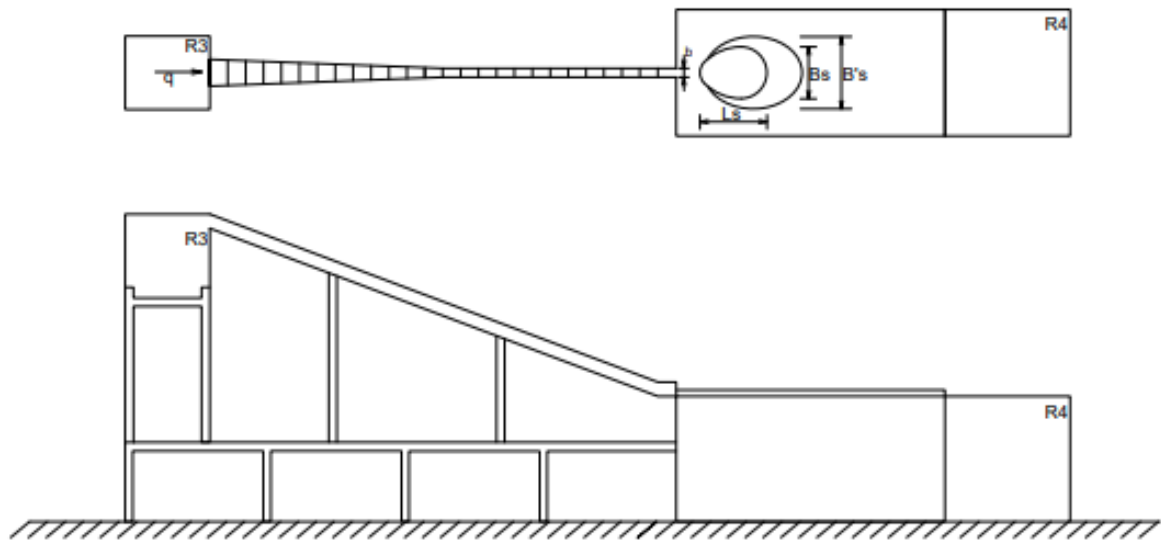


Figura 6 - Esquema geral da instalação experimental em planta e em perfil.

Os ensaios foram realizados num modelo reduzido do descarregador em degraus convergente, construído à escala 1:40, composto por vinte e seis degraus, em que, cada degrau tem 3.75 cm de altura e 10 cm de comprimento, totalizando cerca de 1 m e 2.60 m, de altura e de comprimento, respetivamente. O descarregador é convergente, em que a largura se reduz de 15 cm na secção inicial até 5 cm na secção intermédia, mantendo-se constante até ao trampolim em salto de esqui com ângulo de saída de 20° (Figura 7).

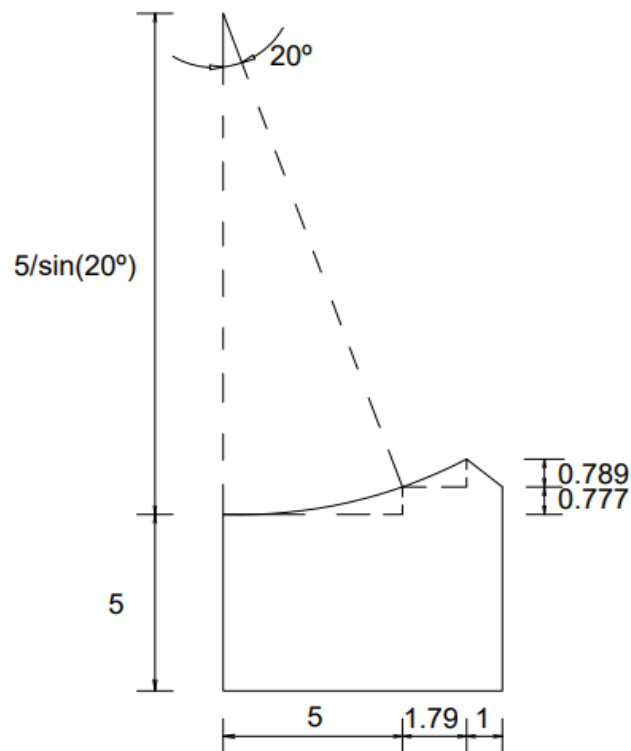


Figura 7 - Esquema representativo do trampolim de 20° (medidas em cm).

No reservatório de recolha, foram colocadas duas redes para filtrar a água e recolher as partículas de esferovite usadas como traçadores na medição da velocidade.

Para minimizar o efeito dos transientes ao ligar-se a bomba, o nível do reservatório de estabilização (R3) era previamente baixado usando o sifão invertido (ligado ao reservatório de recolha). Assim, garantiu-se que, quando aberta a válvula e iniciado o ensaio, houvesse um período de tranquilização do nível de água do reservatório até começar a ser escoada água pelo descarregador.

A bacia de restituição (Figura 8) a jusante do descarregador é composta por placas de Perspex e tem 0.705 m, 1.5 m e 0.70 m, de largura, comprimento e altura, respetivamente. A bacia contém um leito de material granular não coerente, que constitui o fundo móvel, colocado sobre uma dessas placas na zona intermédia da bacia. A jusante da bacia, existe uma comporta, capaz de regular a altura do colchão de água, que por sua vez diminui o impacto do jato no leito, quanto maior for a altura do colchão de água.

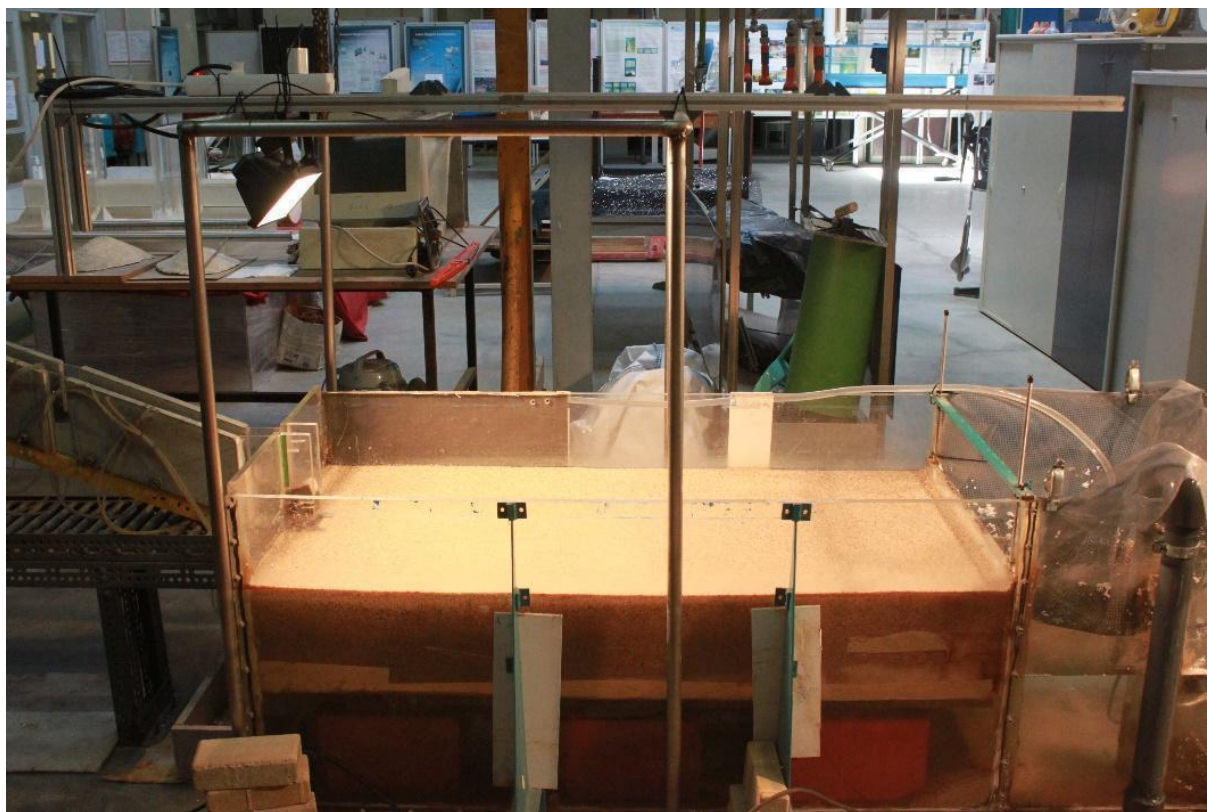


Figura 8 – Fotografia da bacia de restituição.

O fundo móvel de material granular tem uma espessura de 0.20 m, e uma massa volúmica de 2650 kgm^{-3} , em que a sua granulometria está representada na curva da Figura 9. As dimensões características do material granular são: $d_{50} = 0.992 \text{ mm}$, $d_{85} = 1.75 \text{ mm}$ e $d_{90} = 1.855$ e o coeficiente de dispersão é $\sigma_g = 1.68$. Considerou-se um ângulo de repouso igual a 30° (Matos Fernandes, 2006).

Na envolvente da bacia de restituição colocou-se uma estrutura metálica para a instalação do equipamento de filmagem (uma câmara tipo gopro Turnigy ActionCam) e equipamento de iluminação (holofotes). A câmara gopro permite fazer aquisição de vídeos ao longo do ensaio que serão usados para a análise da velocidade. Paralelamente à janela lateral da bacia, colocou-se uma câmara Canon EOS 2000D montada num tripé, para medir a trajetória completa do jato.

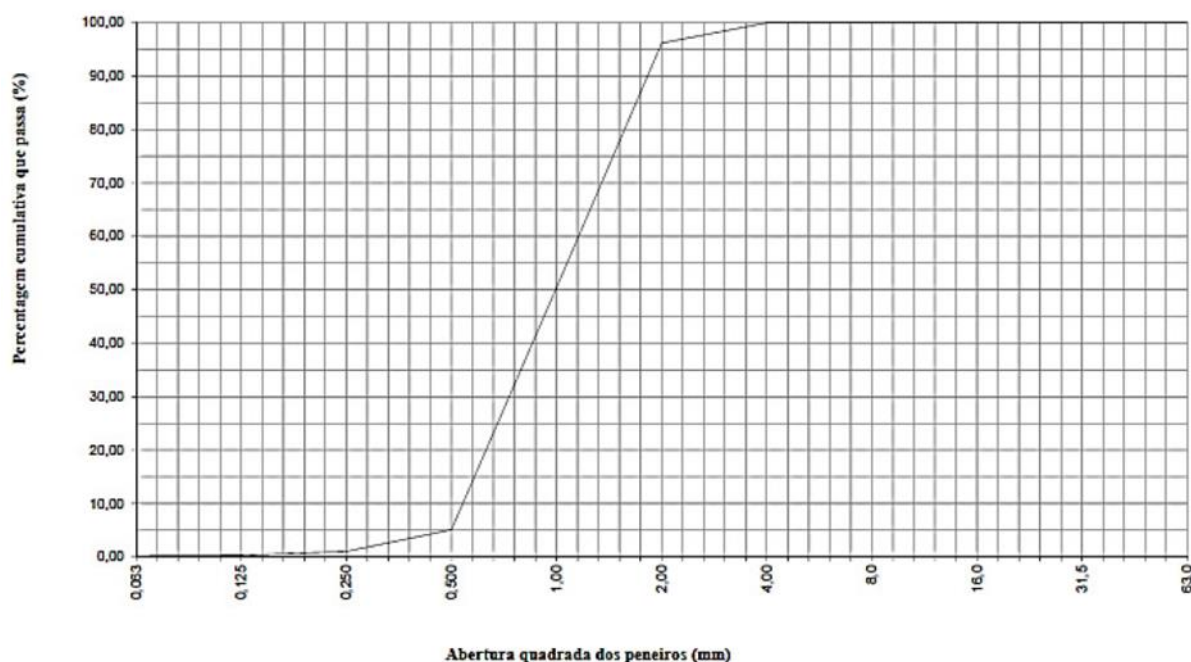


Figura 9 - Curva granulométrica do material granular utilizado nos ensaios experimentais (Machado, 2016).

Além da iluminação colocada na estrutura metálica, também foram instalados dois holofotes ao redor da bacia de restituição, para garantir uma iluminação uniforme, a qual é fundamental para a aquisição de imagens.

Para aplicação de técnicas fotogramétricas visando a determinação da geometria do leito, utilizou-se uma camera Canon EOS 500D.

Na tubagem entre os reservatórios de alimentação do circuito e o reservatório de estabilização a montante do descarregador, existe um caudalímetro eletromagnético da marca Fisher&Porter, modelo MAG-XE, ligado a um computador para aquisição e exportação de dados.

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados considerando duas condições definidas por um caudal, Q , e duas alturas de colchão de água, h , nomeadamente, condição C01: $Q = 0.85 \text{ L/s}$ e $h = 5 \text{ cm}$ e condição C02: $Q = 0.85 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$. Foi mantido durante todas as experiências um ângulo de 20° no trampolim de saída em salto de esqui.

A metodologia adotada nos ensaios foi dividida em 5 etapas principais:

- 1) Preparação do Leito, que inclui a realização de três operações:
 - i) mistura da areia, destruindo as possíveis configurações existentes;
 - ii) compactação do leito e,
 - iii) nivelamento com recurso a duas espátulas (uma retangular e outra triangular). E recorreu-se a um nível de bolha para confirmar a horizontalidade do leito. Para garantir que as experiências se realizavam nas mesmas condições, este procedimento foi mantido durante todos os ensaios.

2) Enchimento da bacia de restituição até a altura pretendida, h ;

Com recurso a uma conduta ligada ao reservatório de alimentação, escoa-se água para o reservatório a jusante da bacia (reservatório de recolha), que por sua vez, por percolação, vai enchendo a bacia de restituição de forma quiescente (para evitar a perturbação da configuração do leito), até atingir a altura do colchão de água pretendida.

3) Ensaio com caudal Q , com duração t ;

No reservatório de estabilização (R3) colocam-se os traçadores de esferovite que serão usados para visualizar o escoamento. As câmaras, para aquisição das imagens do jato e para gravação dos vídeos, são ligadas e começa o ensaio com duração dt , durante o qual se colocam as bolinhas de esferovite no reservatório de estabilização de forma gradual.

Para a análise da evolução temporal do leito e para o estudo do campo de velocidades, realizaram-se dois ensaios contínuos, designados por “para-arranca” e “3 h”. Ambos os ensaios têm a mesma duração (10800s), o para-arranca é interrompido em cada instante definido enquanto o “3 h” apenas é interrompido no fim.

Para a realização do ensaio para-arranca, consideraram-se os seguintes instantes 120s, 240s, 600s, 1800s, 3600s, 7200s e 10800s. Estes instantes foram escolhidos como representantes da evolução temporal, tendo em consideração a impossibilidade de filmagem dos traçadores durante toda a duração do ensaio.

Para a medição da velocidade escolheram-se alguns intervalos de tempo em cada instante definido, como se pode verificar na Figura 10.

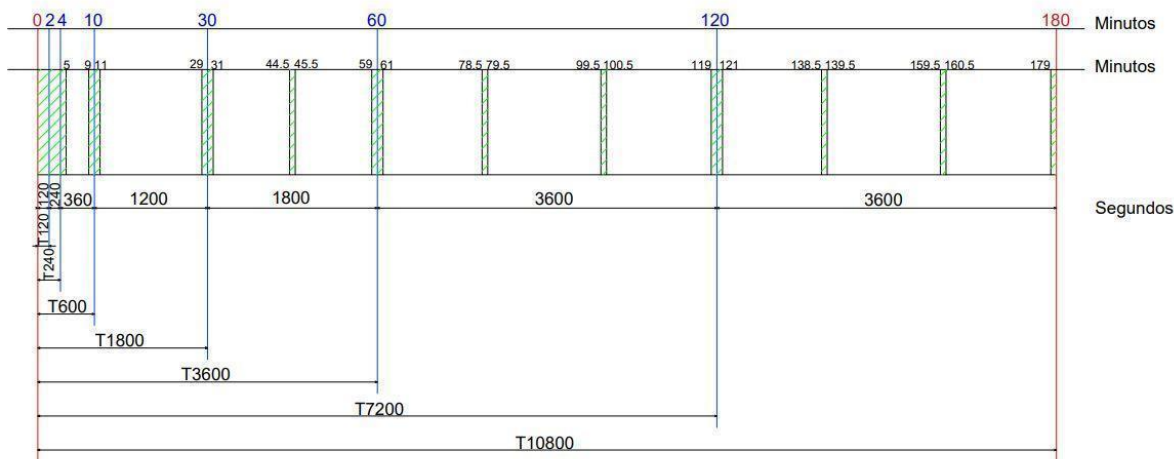


Figura 10 - Esquema do tempo para aquisição da velocidade em diferentes instantes

4) Esvaziamento da bacia de restituição;

Após a realização do ensaio procede-se o esvaziamento começando com os traçadores de esferovite de seguida a água remanescente, mas, sem perturbar a configuração do leito.

5) Levantamento topográfico/fotogramétrico da configuração final do leito.

O levantamento topográfico da configuração final do leito foi feito com recurso à uma câmara Canon EOS 500D, com vista à aplicação de técnicas fotogramétricas para a determinação da geometria do leito.

3.2.1. CALIBRAÇÃO DO CAUDALÍMETRO

A calibração consistiu em encher um reservatório (graduado) com um certo volume, cronometrando o tempo que levava para o tal enchimento. Sendo que, por definição, o caudal (Q) é a variação do volume ΔV , em função do tempo, Δt :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}. \quad (10)$$

Com recurso ao caudalímetro eletromagnético da marca Fisher&Porter, modelo MAG-XE, devidamente calibrado (para garantir o caudal definido para o ensaio), foram feitas leituras através de um sistema de aquisição de dados, constituído por uma placa Nacional Instruments NI USB-6009, conectada a um computador Intel® Pentium® CPU 3.00GHz, e também, no seu próprio visor foi possível fazer leituras diretas de valores instantâneos dos caudais escoados.

Consideraram-se 8 valores de caudal e, para cada medição, fizeram-se duas aquisições de caudal a partir do caudalímetro.

O caudal no caudalímetro é obtido na forma de tensão que é proporcional ao caudal medido. A reta de calibração (Figura 11) foi obtida traçando o gráfico do caudal calculado em função da tensão medida U (em Volts).

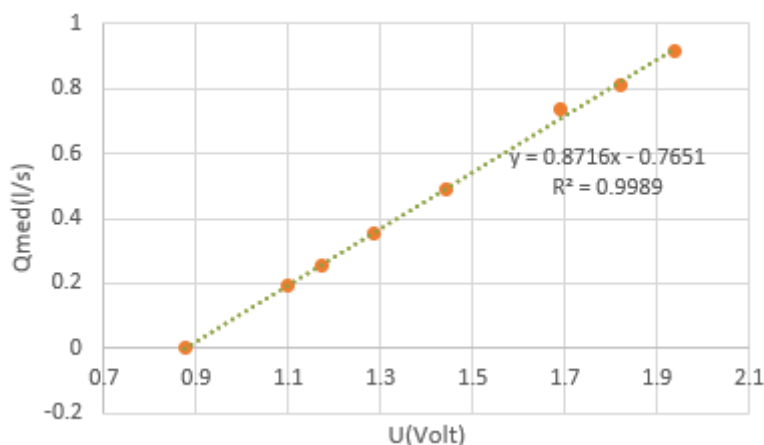


Figura 11 - Reta de calibração do caudalímetro.

3.3. METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO JATO E CARACTERIZAÇÃO 3D DO LEITO

A caracterização do jato e do modelo 3D do leito foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Santos (2020), pelo que neste trabalho se apresenta apenas uma breve descrição da mesma.

Dada a irregularidade do jato, devida à emulsão de ar, foi utilizado um código Matlab (Machado, 2016) para determinação da imagem média do jato a partir da sobreposição de várias imagens do jato, capturadas em diferentes instantes ao longo do ensaio. Esta imagem média é posteriormente utilizada para determinação da trajetória do jato e a altura de água na seção de saída do trampolim (h_0), cuja descrição das respetivas metodologias pode ser encontrada nos trabalhos de Machado (2016) e Rosa (2019). Na Tabela 1 apresentam-se os valores da velocidade do escoamento na secção de saída do trampolim, U_0 , obtidos nas duas condições de ensaio.

Tabela 1 - Valores da velocidade na secção de saída do trampolim.

Condição	Q (L/s)	h (cm)	U_0 (m/s)
C01	0.84	5	0.83
C02	0.84	3	0.83

O levantamento topográfico do leito foi realizado com recurso à fotogrametria, em particular a uma técnica designada por *Structure from Motion* (SfM), já aplicada em estudos anteriores realizados na mesma instalação experimental. Mais informações sobre esta técnica, e referências bibliográficas associadas, podem ser encontradas no trabalho de Santos (2020).

O princípio da SfM baseia-se na aquisição de várias imagens de um mesmo objeto a partir de ângulos diferentes, com sobreposição entre elas, de acordo com o esquema da Figura 12. No presente caso, o objeto é a configuração final do leito sujeito à ação de um jato. Posteriormente, os pontos em comum entre cada par de imagens e as respetivas localizações são detetados. A SfM não necessita do conhecimento prévio da localização dos pontos de referência do objeto, como acontece na estéreo-fotogrametria tradicional, pelo que o modelo do objeto em causa é obtido em coordenadas do modelo, que terão de ser posteriormente convertidas em coordenadas físicas, através de calibração, usando, para isso, dimensões conhecidas no modelo.

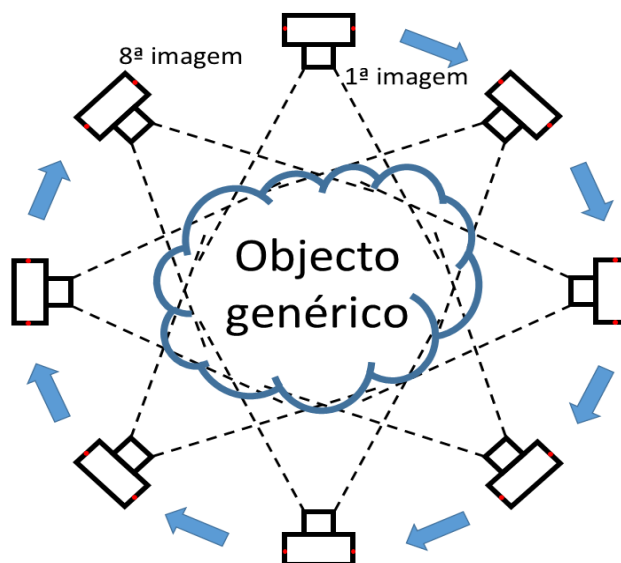


Figura 12 - Esquema do princípio da SfM (Santos, 2020).

A caracterização da geometria do sistema cavidade-barra foi realizada em três fases distintas com recurso a 3 programas: 1) obtenção do modelo 3D a partir das fotografias do levantamento topográfico, utilizando uma versão de avaliação do programa 3DF Zephyr; 2) alinhamento do modelo com um referencial através do alinhamento da malha com um referencial *Oxyz* pretendido, com recurso ao software MeshLab (*open source*); 3) calibração do modelo e obtenção das principais características geométricas do sistema cavidade-barra (dimensões da cavidade e da barra, volumes de escavação e deposição) através de programa de pós-processamento desenvolvido no âmbito do trabalho de Santos (2020). Na Figura 13 apresenta-se um fluxograma que resume a metodologia adotada. Para mais detalhes, recomenda-se a consulta de Santos (2020).

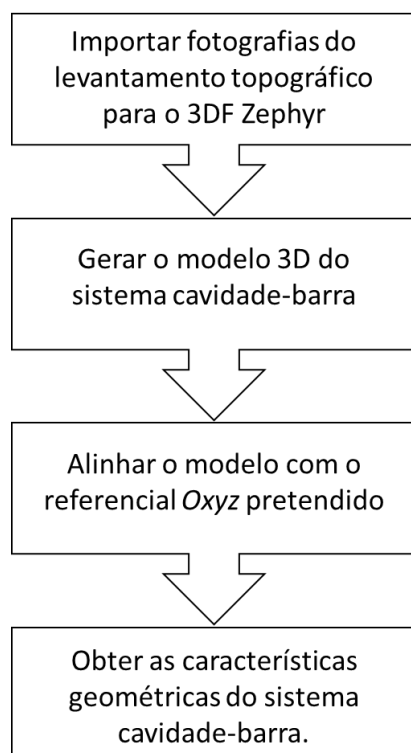


Figura 13 - Fluxograma da metodologia adotada para determinação do modelo 3D e características geométricas.

3.3.2.DETERMINAÇÃO DOS CAMPOS DE VELOCIDADES

A Velocimetria por Imagem de Partículas, PIV (sigla inglesa para *Particle Image Velocimetry*) é uma técnica de medição de velocidades relativamente não intrusiva e que consiste em correlacionar imagens consecutivas de partículas em suspensão no escoamento para determinar o deslocamento dessas mesmas partículas. É uma técnica que começou a ser desenvolvida nos anos 80 do século passado (Meynart, 1982) e que hoje se encontra perfeitamente estabelecida (Adrian, 2005; Raffel *et al.* 2007; Adrian e Westerweel, 2011).

A PIV clássica é realizada utilizando um laser pulsado sincronizado com uma câmara. Cada pulso laser ilumina uma região do fluido por onde passam partículas previamente colocadas em suspensão. Por cada pulso laser é tomada uma imagem do escoamento. Estas imagens são depois divididas em imagens mais pequenas designadas por janelas de interrogação, conforme ilustrado na Figura 14. Estas janelas de interrogação são correlacionadas entre si através da operação de correlação (Muste *et al.*, 2017). O pico da função de correlação é uma medida do vetor deslocamento, $d\vec{s}$ das partículas presentes na respetiva janela de interrogação. Uma vez que o intervalo entre pulsos laser, dt , é conhecido, regra geral determinado pelo utilizador, a velocidade do conjunto de partículas situada em cada janela de interrogação pode ser calculada como:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (11)$$

Onde v é o vetor velocidade, ds o vetor deslocamento e dt o intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas. Este procedimento é aplicado a todas as janelas de interrogação, permitindo assim determinar o campo de velocidades de toda a região captada na imagem. Esta é uma das vantagens da

PIV: a possibilidade de medição do campo de velocidades de forma quase não intrusiva (quase porque é muitas vezes necessário acrescentar partículas ao escoamento).

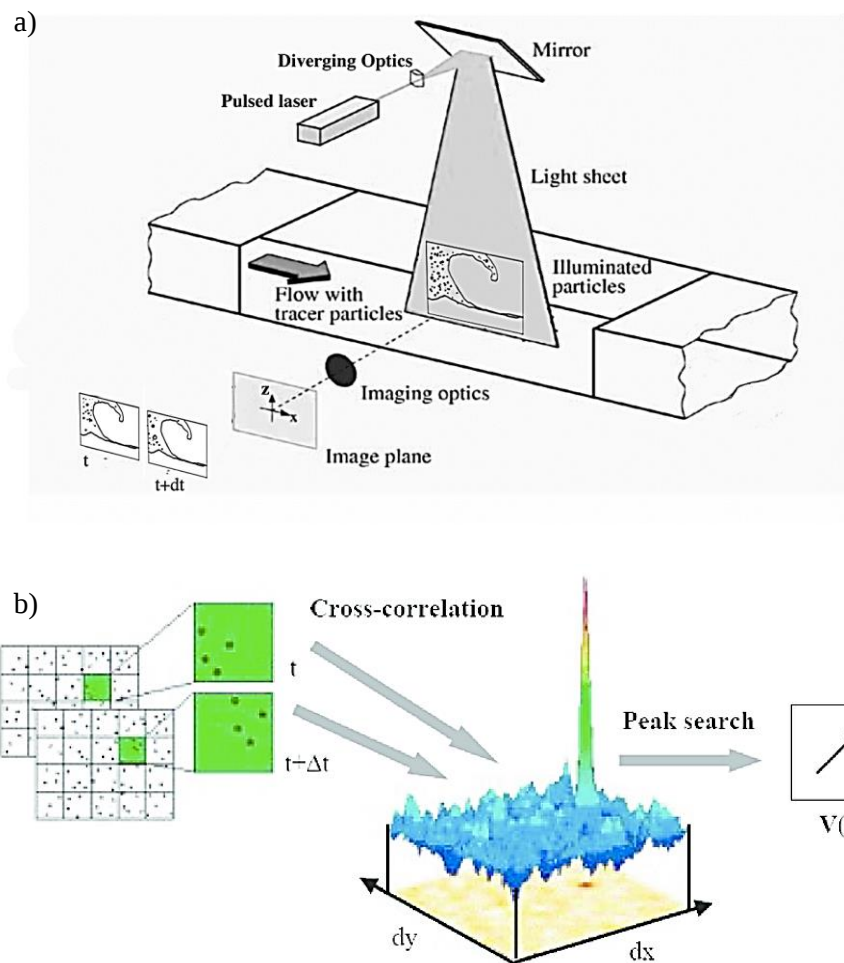


Figura 14 - (a) Esquema da PIV clássica (Aleixo et al., 2020). (b) ilustração da função de correlação obtida entre duas janelas consecutivas, com o pico a indicar a medida do deslocamento das partículas em cada janela (www.dantecdynamics.com).

Os desenvolvimentos da PIV nos anos 80 e 90 e seguintes trouxeram algumas inovações, nomeadamente a deformação iterativa das janelas para permitir adaptar a janela de interrogação aos gradientes de velocidade a determinação do deslocamento com resolução abaixo do pixel (tipicamente entre 0.1 pixéis e 0.05 pixéis), tornando a PIV numa técnica com elevada resolução. A resolução subpixel consegue-se ajustando uma curva gaussiana ao pico de correlação (Figura 15). A função de correlação é definida nos pixéis inteiros (1, 2, 3, etc.), mas com este ajuste é possível determinar o pico com resolução subpixel. Esta operação é aplicada segundo a direção x e y permitindo a determinação precisa da localização do pico da função de correlação.

A resolução espacial do PIV é essencialmente regulada pela dimensão das janelas de interrogação. Um processo iterativo permite começar a análise do campo de velocidades com janelas de interrogação maiores (ex. 64x64 pixéis) e utilizar o campo de velocidades determinado no primeiro passo como preditor do deslocamento das partículas ao considerar-se a janela de interrogação consecutiva (32x32). Para que a correlação tenha um pico em definido há que cumprir algumas regras. A primeira é que entre

dois instantes, ainda se encontrem partículas do primeiro instante na imagem. Assim, o deslocamento das partículas na janela de interrogação deve ser inferior a $\frac{1}{4}$ da dimensão da janela de interrogação. Por outro lado, deverão existir pelo menos 4 partículas em cada janela de interrogação (Raffel *et al.* 2007; Muste *et al.* 2017). Estas duas condições estão exemplificadas na Figura 16.

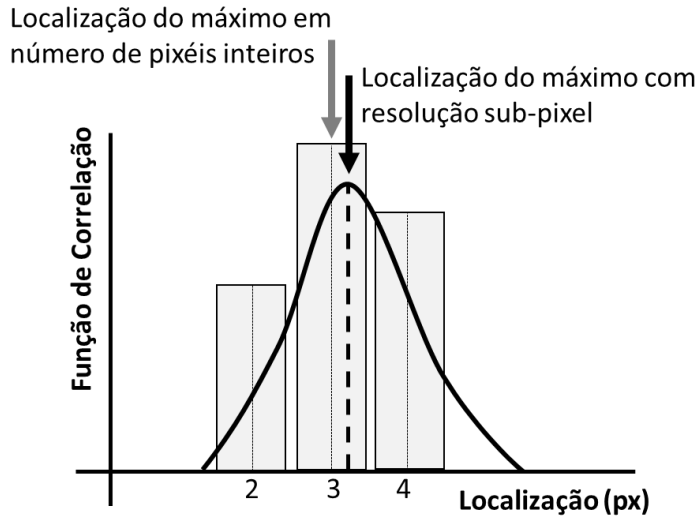


Figura 15 - Obtenção da resolução subpixel através do ajuste de uma função gaussiana à distribuição do pico da função de correlação.

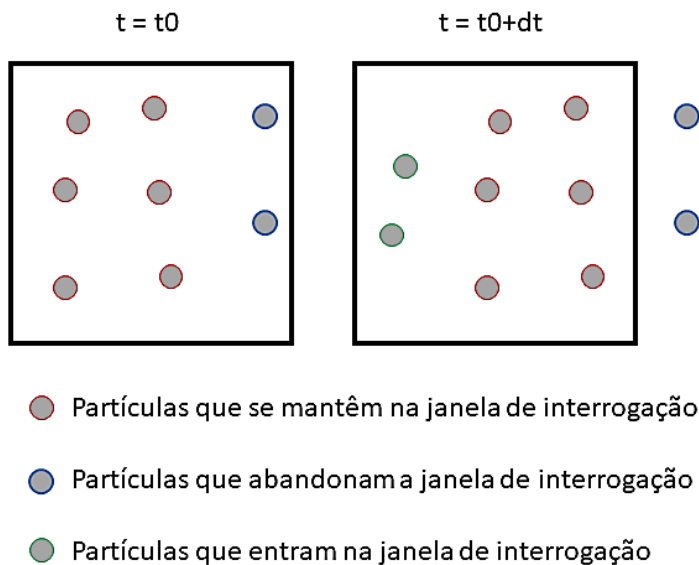


Figura 16 - Exemplificando a regra do $\frac{1}{4}$ e a garantia de existirem pelo menos 4 partículas por cada janela de interrogação.

No presente caso não foi utilizado um laser para iluminar o escoamento, a iluminação foi providenciada por projetores de 300 W colocados em redor da instalação. A aquisição de imagens em intervalos de tempos curtos e regulares foi realizada por intermédio de uma câmara Turnigy ActionCam. Segundo as especificações técnicas esta câmara opera a uma frequência de 60 Hz, ou seja, correspondendo a um intervalo de tempo $dt = 1/60 = 0.0167$ s. As imagens gravadas têm uma resolução de 1280 pix x 720 pix. Verificou-se, porém, que no processo de exportação das imagens, o hardware da câmara

reamostrava as imagens a 30 Hz, ou seja, $dt = 1/30 = 0.033$ s. A câmara Turnigy é dotada de uma lente grande angular com um ângulo de visão de 170° . As imagens exportadas da câmara foram corrigidas para eliminar a deformação angular introduzida pela lente grande angular. Um par de imagens consecutivas corrigidas encontra-se representado na Figura 17.

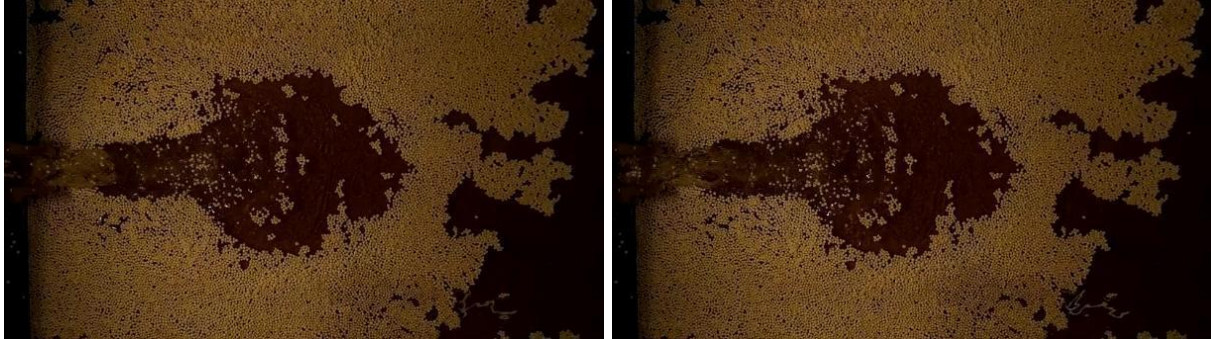


Figura 17 - Duas imagens consecutivas corrigidas.

Um ponto importante é a calibração das imagens. A calibração consiste em determinar uma função que permita a conversão de pixels em unidades físicas. Uma das maneiras de o fazer é utilizando objetos de dimensões conhecidas que estejam presentes na imagem. Assim, uma calibração linear é dada por:

$$\alpha = \frac{L_w}{L_i} \quad (12)$$

onde α é o fator de calibração, L_w é a dimensão de um objeto em unidades físicas (e.g. m) e L_i são as dimensões desse mesmo objeto na imagem em pixels. No presente caso, uma medida típica que pode ser usada é a dimensão (largura ou comprimento) da bacia de dissipação.

Podem ser conseguidas funções de calibração mais sofisticadas colocando um alvo de calibração, que consiste essencialmente numa matriz de pontos (Figura 18), ao qual se ajusta um modelo (e.g. modelo *pin-hole*, Raffel *et al.*, 2007).

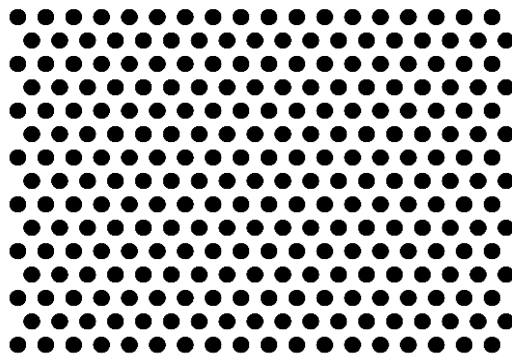


Figura 18 - Alvo de calibração utilizado para calibrar as imagens

O algoritmo de PIV usado nesta dissertação foi o MatPIV (disponível em <https://www.mn.uio.no/math/english/people/aca/jks/matpiv/>). Este algoritmo está implementado em Matlab e permite determinar campos de velocidade a partir das imagens de partículas. A descrição do algoritmo pode ser consultada em Sveen (2004).

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.

4.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais obtidos, divididos em duas secções principais, referentes aos estudos preliminares e ao estudo da hidrodinâmica. Os ensaios preliminares permitiram a comparação dos resultados obtidos com os de estudos anteriores, em particular o estudo de Santos (2020) e aferir a repetibilidade dos ensaios realizados com recurso a duas estratégias distintas, pára-arranca, com paragens em determinados instantes para levantamento topográfico do leito, e o ensaio de 3h, contínuo, com paragem apenas no final do ensaio mas com registo de vídeos nos mesmos instantes para posterior determinação da velocidade. Na segunda secção apresentam-se os resultados de caracterização hidrodinâmica do escoamento, através dos mapas e perfis de velocidade, flutuações turbulentas, tensões de Reynolds, vorticidade e espectros. O capítulo termina com a análise da relação entre o campo de velocidades médias e a configuração geométrica do leito.

4.1. ENSAIOS PRELIMINARES

4.1.1. REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

Para uma gestão eficaz do tempo disponível, optou-se por realizar para cada condição os seguintes ensaios: um ensaio pára-arranca, com as paragens definidas num conjunto de tempos; um ensaio de 3 horas com medição de velocidade nos instantes definidos para as paragens do teste pára-arranca. Para verificar se ambas as estratégias conduziam ao mesmo resultado compararam-se os resultados ao fim de $t = 10800$ s. A comparação de ambas as estratégias, para as duas condições, é apresentada na Figura 19.

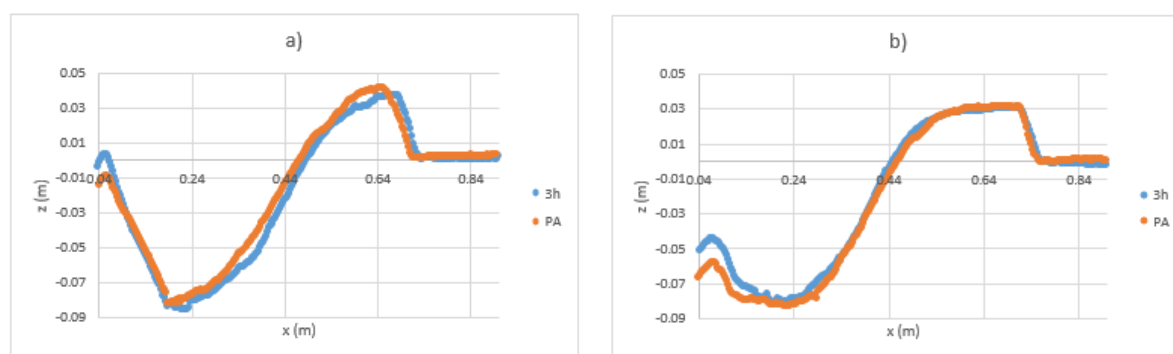


Figura 19 - Perfis longitudinais obtidos pelas duas estratégias, para as condições C01 e C02 e para $t=10800$ s.

As tabelas 2 e 3 sistematizam os resultados para as variáveis geométricas do sistema cavidade-barra. A partir dos valores das tabelas, foram determinadas as diferenças percentuais para as grandezas mais

características, a profundidade máxima de erosão e altura máxima da barra, tendo-se obtido, respetivamente, os valores máximos de 1.38% e 4.31%, ambos para a condição C01.

Tabela 2 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para as condições C01 (3h e Pára-Arranca).

3h												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ_1 (graus)	θ_2 (graus)	θ_3 (graus)	θ_4 (graus)	θ_5 (graus)	θ_6 (graus)
10800	-0.08599	0.037193	0.315461	0.494402	-0.00348	0.003347	-30.9989	25.41766	8.327199	-41.0586	-33.8812	33.57085

PA												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ_1 (graus)	θ_2 (graus)	θ_3 (graus)	θ_4 (graus)	θ_5 (graus)	θ_6 (graus)
10800	-0.0848	0.038797	0.359211	0.470361	-0.00314	0.003646	-26.7431	22.447	14.15378	-36.8703	-35.7954	32.95372

Tabela 3 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para as condições C02 (3h e Pára-Arranca).

3h												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ_1 (graus)	θ_2 (graus)	θ_3 (graus)	θ_4 (graus)	θ_5 (graus)	θ_6 (graus)
10800	-0.08351	0.030626	0.320066	0.45073	-0.00451	0.004637	-33.6031	26.78184	1.417068	-37.1778	-32.4002	31.05276

PA												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ_1 (graus)	θ_2 (graus)	θ_3 (graus)	θ_4 (graus)	θ_5 (graus)	θ_6 (graus)
10800	-0.08346	0.031412	0.363816	0.457918	-0.00557	0.004268	-22.7133	25.47562	2.118957	-42.5141	-29.5184	29.31552

4.1.2. COMPARAÇÃO COM ESTUDOS ANTERIORES

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os obtidos anteriormente (Santos, 2020), verificou-se que o alinhamento dos modelos 3D feitos no Meshlab apresentava algumas diferenças. Esta diferença foi corrigida por meio de translações que permitiram a correta sobreposição dos modelos no mesmo referencial. Nas Figuras 20 a 27 apresentam-se, como exemplo, os gráficos comparativos obtidos para quatro instantes (120s, 240s, 3600s e 10800s) e para as duas condições. Em cada figura, o primeiro gráfico representa os perfis sobrepostos e o segundo o perfil das diferenças percentuais medidas. Este segundo gráfico permite distinguir as regiões onde as diferenças são maiores.

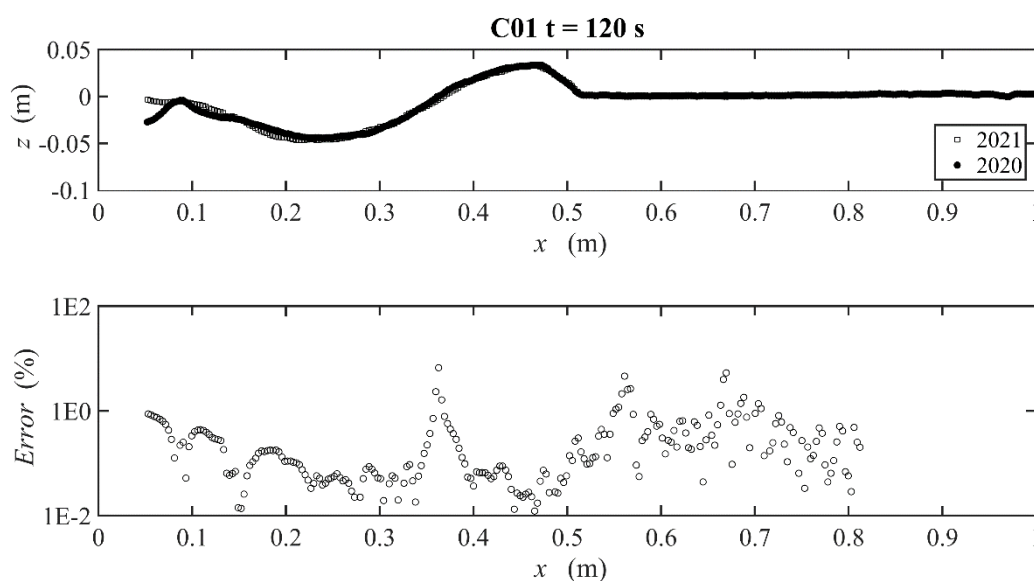


Figura 20 - Comparação dos perfis longitudinais para a condições C01 e para t=120s.

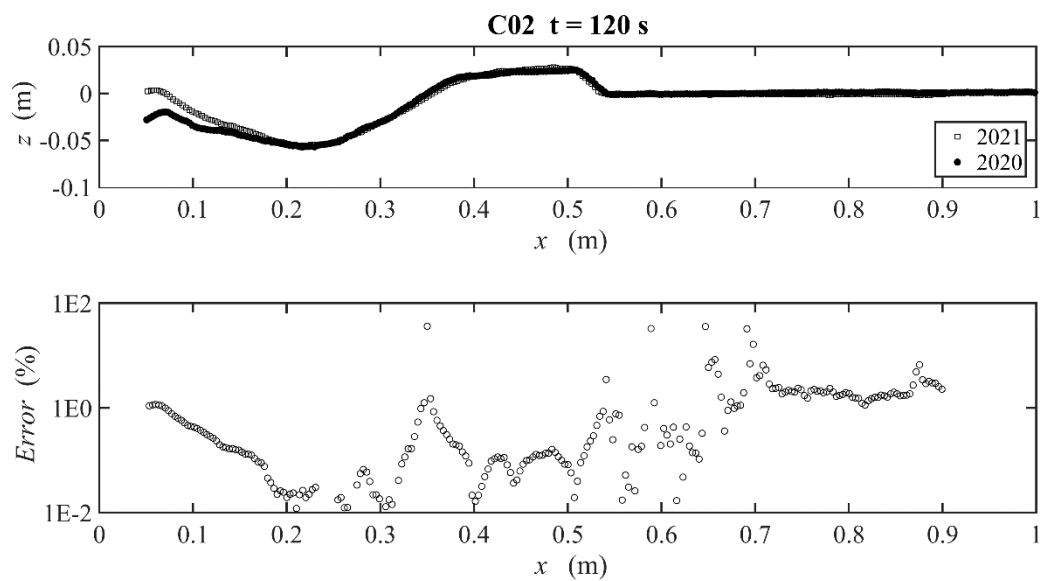


Figura 21 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para t=120s.

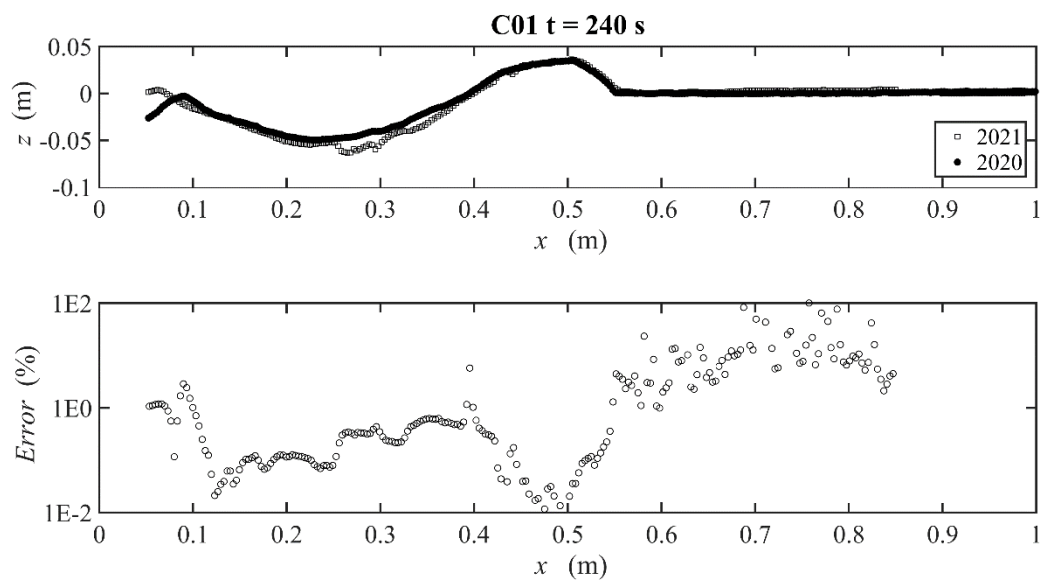


Figura 22 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C01 e para t=240s.

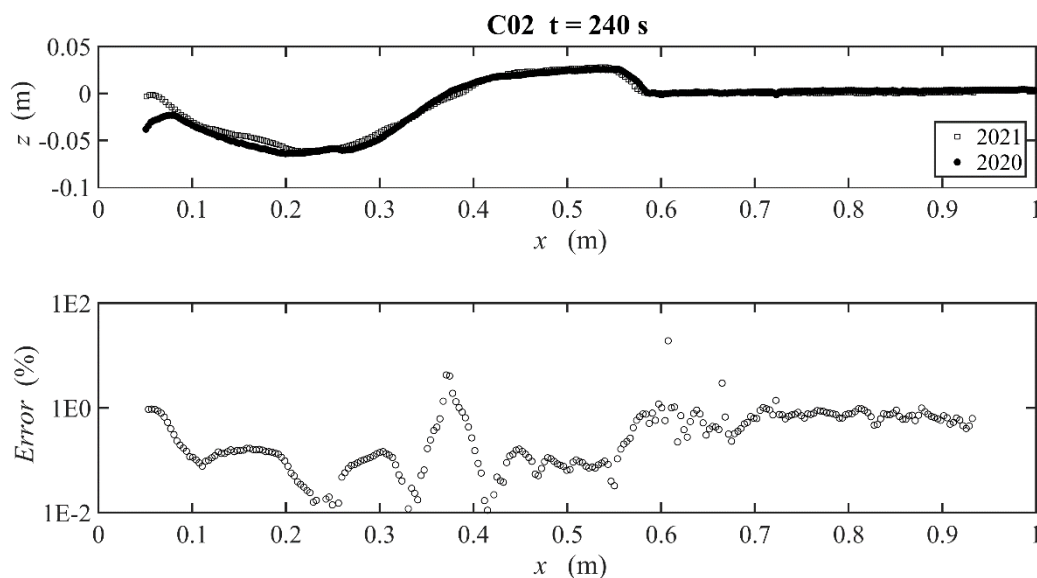


Figura 23 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para t=240s.

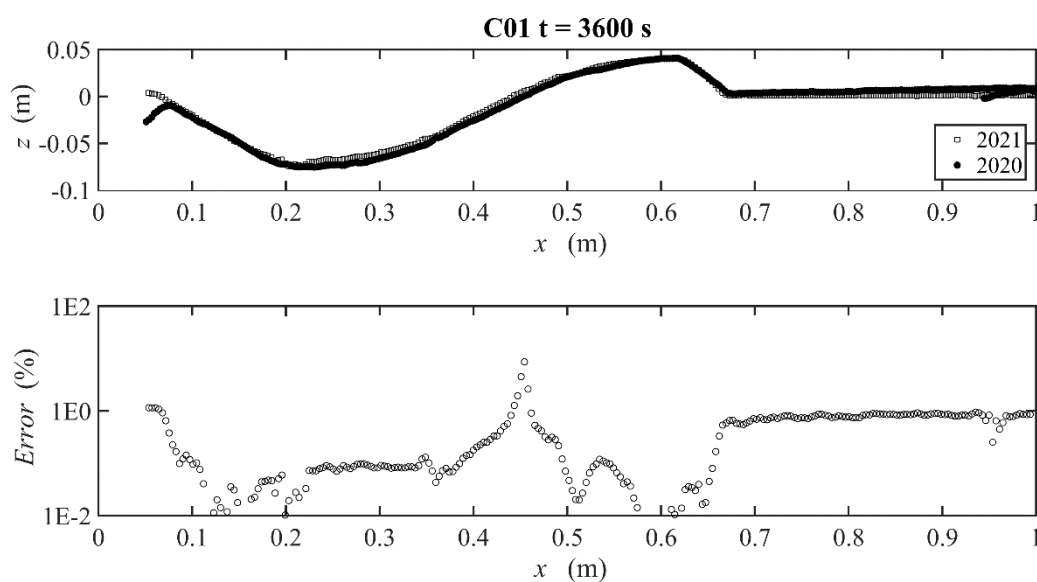


Figura 24 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C01 e para t=360s.

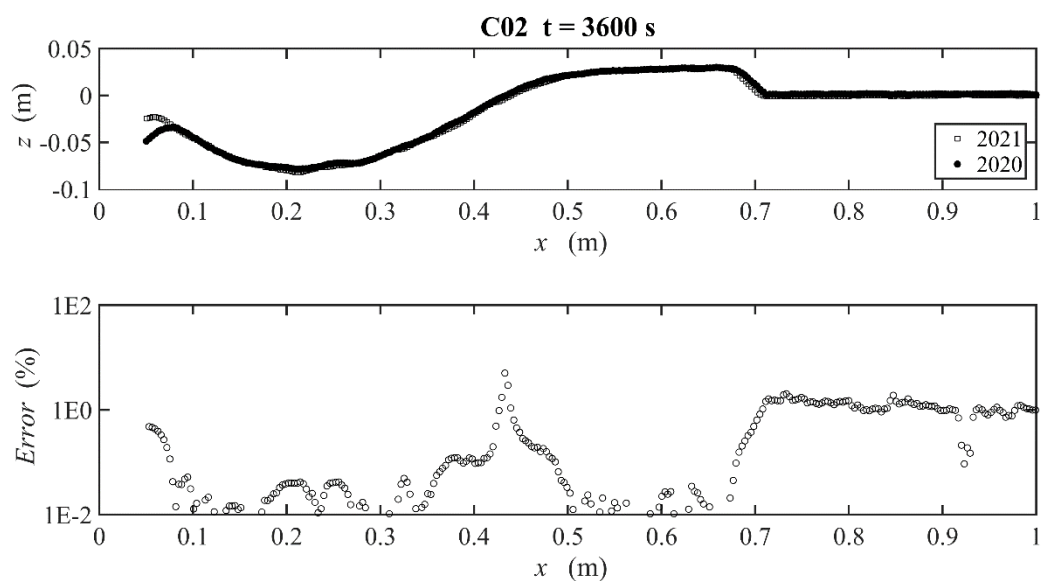


Figura 25 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para $t=3600s$.

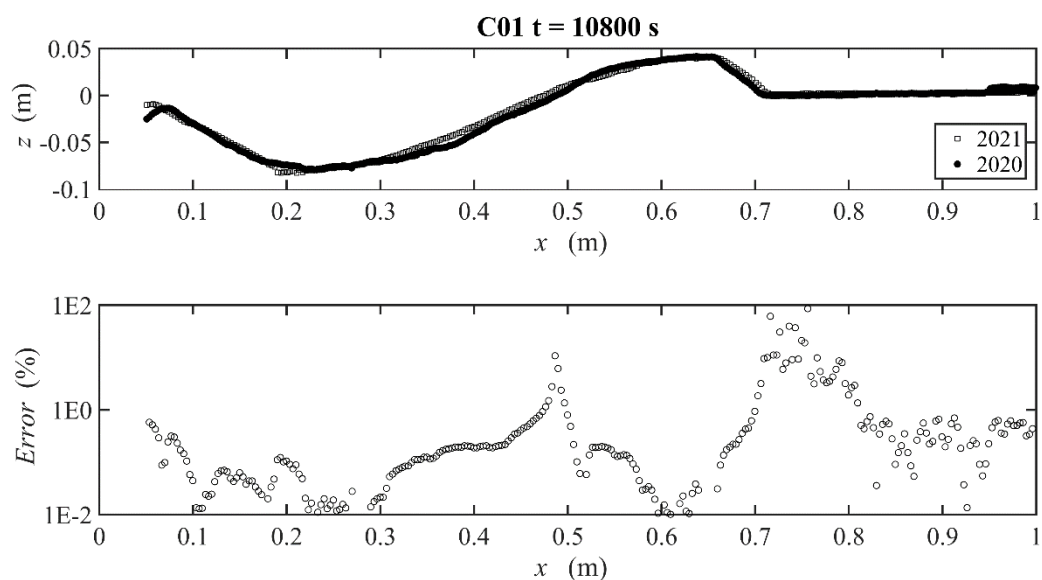


Figura 26 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C01 e para $t=10800s$.

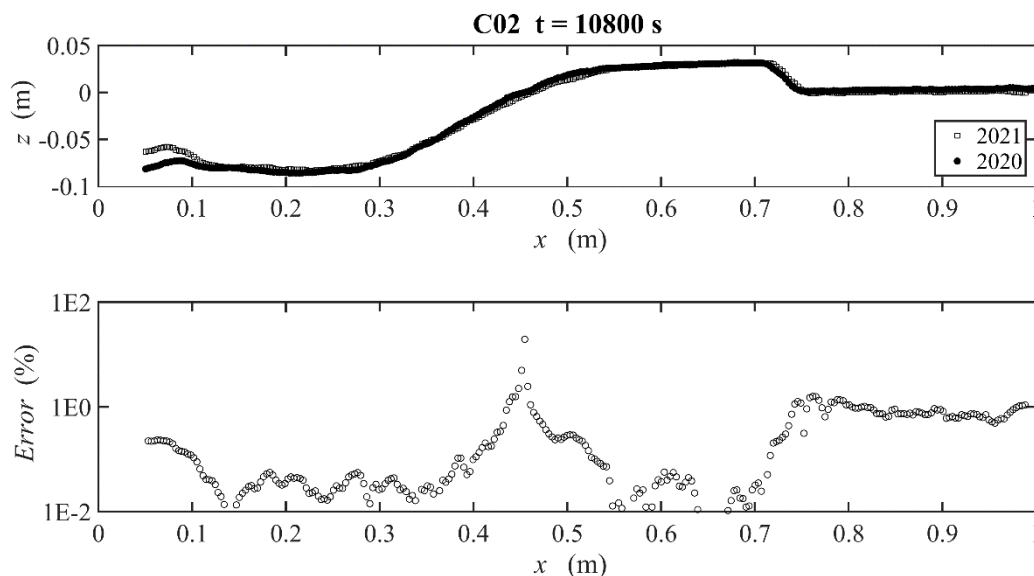


Figura 27 - Comparação dos perfis longitudinais para a condição C02 e para $t=10800s$.

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados correspondentes à comparação dos resultados atuais e dos de Santos (2020), para as duas condições e para todos os instantes considerados (120s, 240s, 600s, 1800s, 3600s, 7200s e 10800s).

Tabela 4 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para a condição C01.

2020												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ_1 (graus)	θ_2 (graus)	θ_3 (graus)	θ_4 (graus)	θ_5 (graus)	θ_6 (graus)
120	-0.03956	0.038513	0.18426	0.312501	-0.00056	0.001156	-14.897	29.71199	6.044486	-38.0578	-30.6225	28.60948
240	-0.04926	0.037373	0.18979	0.355545	-0.00086	0.001335	-17.4375	25.56015	7.229274	-36.5332	-31.199	28.6008
600	-0.05877	0.04264	0.23192	0.365142	-0.00128	0.001907	-19.5768	27.31131	9.862012	-32.2943	-32.7103	32.23607
1800	-0.07073	0.042379	0.24837	0.40436	-0.00205	0.002732	-24.668	24.7626	4.885984	-37.3686	-32.7754	32.16995
3600	-0.06863	0.047657	0.27007	0.404732	-0.00193	0.003768	-29.0561	25.49152	7.481848	-35.336	-34.4171	33.1293
7200	-0.07803	0.04297	0.28658	0.44765	-0.00279	0.003953	-25.6468	23.48008	5.743828	-39.4803	-33.8677	33.11596
10800	-0.07532	0.045302	0.2799	0.461628	-0.00305	0.004417	-29.9015	22.91928	8.130459	-37.1364	-32.1278	34.00683

2021												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ_1 (graus)	θ_2 (graus)	θ_3 (graus)	θ_4 (graus)	θ_5 (graus)	θ_6 (graus)
120	-0.04738	0.032909	0.198026	0.367137	-0.00085	0.000904	-22.0437	28.76727	15.7163	-34.3717	-28.785	28.93164
240	-0.06659	0.046419	0.216447	0.398625	-0.00142	0.001152	-19.1921	31.60682	5.766347	-34.3279	-29.9521	27.86015
600	-0.06063	0.038115	0.221053	0.388836	-0.00132	0.001748	-12.276	26.18726	8.166653	-37.5619	-32.7663	31.31978
1800	-0.07004	0.040308	0.255592	0.43803	-0.00232	0.002025	-26.2384	26.37718	13.67033	-39.2968	-32.3073	30.85872
3600	-0.07421	0.041069	0.267105	0.444021	-0.00223	0.003013	-30.2401	25.90101	11.84417	-41.461	-33.9031	32.63603
7200	-0.07532	0.040641	0.310855	0.467294	-0.00266	0.003486	-29.1942	23.33837	9.282161	-34.6329	-33.4634	35.52527
10800	-0.08238	0.041235	0.359211	0.470361	-0.00314	0.003646	-26.7431	22.447	14.15378	-36.8703	-35.7954	32.95372

2020 Corrigido		
t(s)	f(m)	hm(m)
120	-0.04425	0.033338
240	-0.04982	0.034823
600	-0.06183	0.039575
1800	-0.07255	0.04008
3600	-0.07526	0.040983
7200	-0.07788	0.04297
10800	-0.07922	0.041401

Tabela 5 - Tabelas da comparação dos perfis longitudinais para a condição C02.

2020												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ1(graus)	θ2(graus)	θ3(graus)	θ4(graus)	θ5(graus)	θ6(graus)
120	-0.05154	0.030537	0.21631	0.319172	-0.00105	0.001884	-11.7932	28.64011	3.749876	-39.4275	-26.6141	27.04367
240	-0.0547	0.035655	0.23136	0.332197	-0.00125	0.002881	-18.4441	32.24787	4.028971	-40.558	-28.8918	27.93385
600	-0.06508	0.036197	0.27146	0.358756	-0.00157	0.003898	-20.5328	28.68971	2.610421	-41.0602	-31.1069	29.77506
1800	-0.06756	0.037015	0.28921	0.382224	-0.00225	0.004917	-22.8526	27.08386	1.804956	-46.6069	-29.2844	30.55659
3600	-0.07158	0.036971	0.31291	0.404273	-0.00271	0.005631	-24.8249	26.38481	1.874305	-40.9634	-30.2385	28.33056
7200	-0.06983	0.035174	0.34378	0.401807	-0.00286	0.005843	-1.842	27.6293	1.653997	-41.5524	-30.4829	28.55534
10800	-0.07636	0.042145	0.2934	0.42213	-0.00333	0.007465	-4.50446	27.4326	2.274685	-41.5733	-26.2134	22.92305

2021												
t(s)	f(m)	hm(m)	Bs(m)	Ls0(m)	Vs(m2)	Vb(m2)	θ1(graus)	θ2(graus)	θ3(graus)	θ4(graus)	θ5(graus)	θ6(graus)
120	-0.05574	0.027894	0.239474	0.36291	-0.00121	0.001275	-29.2151	28.86666	6.452996	-38.8537	-28.6365	26.77634
240	-0.06161	0.027983	0.255592	0.384776	-0.00165	0.001683	-33.3283	26.81776	5.05548	-37.5586	-28.5603	29.30488
600	-0.06913	0.029103	0.271711	0.408062	-0.00198	0.002517	-18.9984	24.51117	4.765299	-33.9206	-29.7362	30.13942
1800	-0.08331	0.029626	0.313158	0.441151	-0.00329	0.003201	-22.3446	26.82374	2.892528	-40.8789	-30.2078	31.07775
3600	-0.08158	0.029775	0.317763	0.438698	-0.00364	0.003505	-27.5491	25.27854	3.149183	-37.3888	-30.5804	30.43173
7200	-0.07985	0.030727	0.315461	0.447798	-0.00412	0.004492	-25.2796	26.12972	0.629642	-39.3726	-31.0906	29.38948
10800	-0.08346	0.031412	0.363816	0.457918	-0.00557	0.004268	-22.7133	25.47562	2.118957	-42.5141	-29.5184	29.31552

2020 Corrigido		
t(s)	f(m)	hm(m)
120	-0.05707	0.024829
240	-0.06404	0.02595
600	-0.07293	0.028341
1800	-0.07486	0.029685
3600	-0.07848	0.029994
7200	-0.07468	0.030324
10800	-0.08659	0.031912

Nas Figuras 28 e 29 apresentam-se uma análise mais detalhada das diferenças, para as duas condições e os diferentes instantes. Mesmo para o caso da condição C01 $t=240s$, para o qual se obteve um valor espúrio ($\sim 5000\%$), verifica-se que a maior parte dos valores (90%) correspondem a diferenças inferiores a 5%. Excetuando o valor espúrio acima referido, para a condição C01 obteve-se uma diferença percentual máxima de 26,69% e para a condição C02 uma diferença percentual de 10,99%.

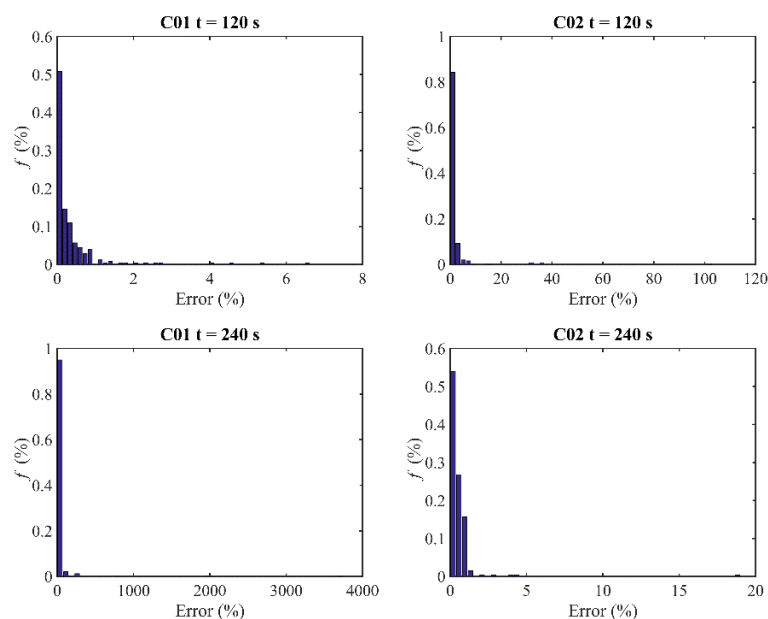


Figura 28 - Distribuições das diferenças obtidas entre o presente estudo e o de Santos (2020) para cada condição e para os instantes 120s e 240s.

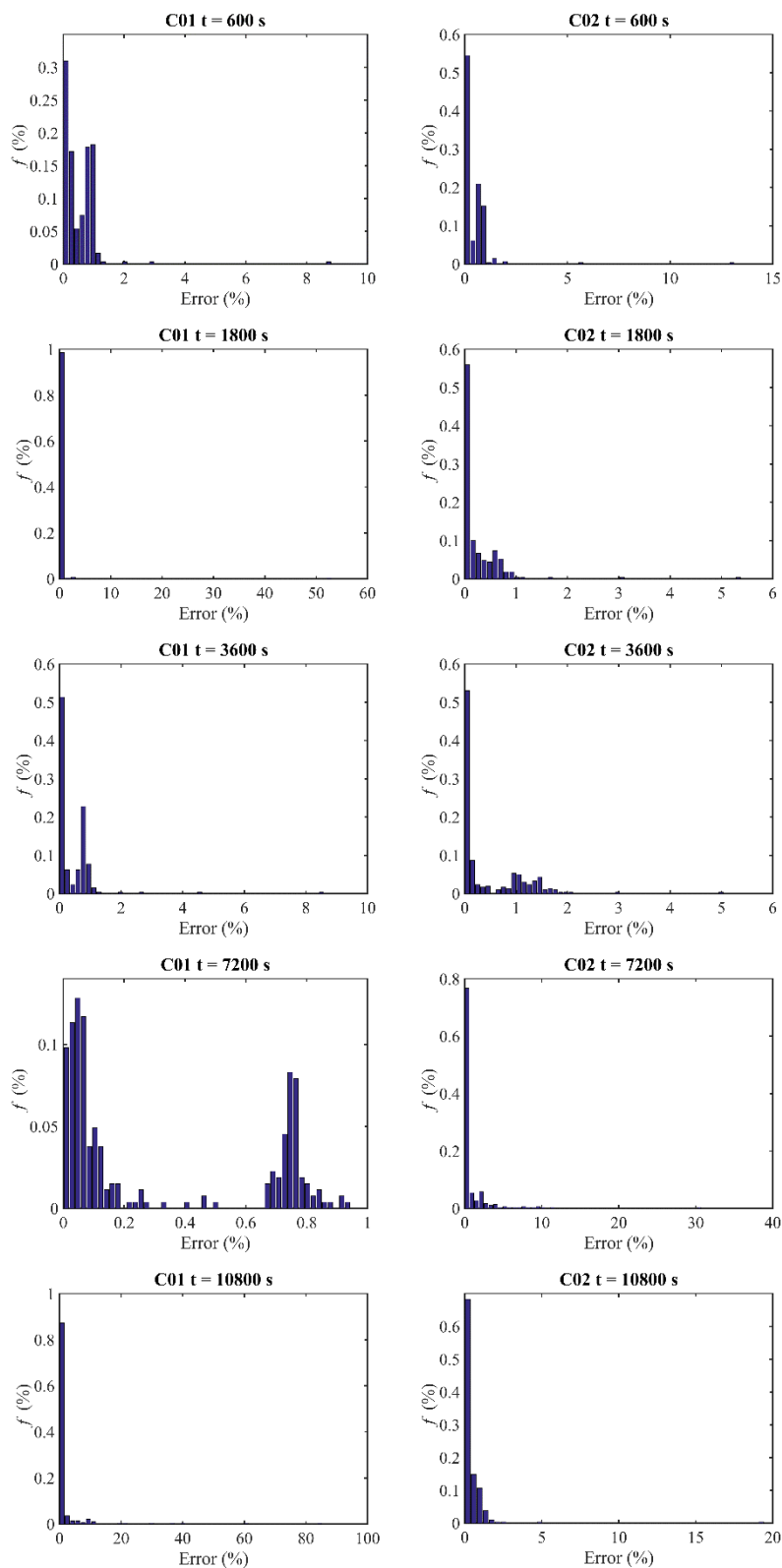


Figura 29 - Distribuições das diferenças obtidas entre o presente estudo e o de Santos (2020) para cada condição e os restantes instantes (600s, 1800s, 3600s, 7200s e 10800s).

4.2. MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

4.2.1. CAMPO MÉDIO DE VELOCIDADES

Nas Figuras 30 a 43 são apresentados os mapas do campo médio da velocidade medida na superfície livre, para as duas condições de ensaio e para os diferentes instantes (120s, 240s, 600s, 1800s, 3600s, 7200s e 10800s).

Três características são facilmente identificáveis nas Figuras 30 a 43 nomeadamente: (i) a formação de dois vórtices simétricos antes da barra, (ii) o escoamento quasi-radial sobre a barra e (iii) a quase inexistência de vetores sobre a barra, em particular para a condição C02. Esta última deve-se ao facto de a profundidade do colchão de água impor um constrangimento à altura da barra, impedindo a deteção da passagem das partículas traçadoras em número significativo.

Observando os mapas de velocidades apresentados é igualmente possível identificar a zona de incidência do jato, caracterizada por velocidades mais elevadas.

Na comparação das duas condições testadas é notória, para todos os instantes considerados no estudo, a influência da altura do colchão de água, em particular a divergência do escoamento induzida pela barra, muito mais visível para a condição C02, correspondente a uma menor altura do colchão ($h = 3$ cm).

Qualitativamente, os vórtices da condição C02 mostram ser menos distorcidos na direção longitudinal que na condição C01. Uma vez que as características do jato são as mesmas em ambas as condições, esta diferença pode ser atribuída à geometria do leito, a qual é condicionada pela altura do colchão de água. Na condição C02 a barra apresenta-se mais espreada na bacia de dissipação, limitando a localização dos vórtices.

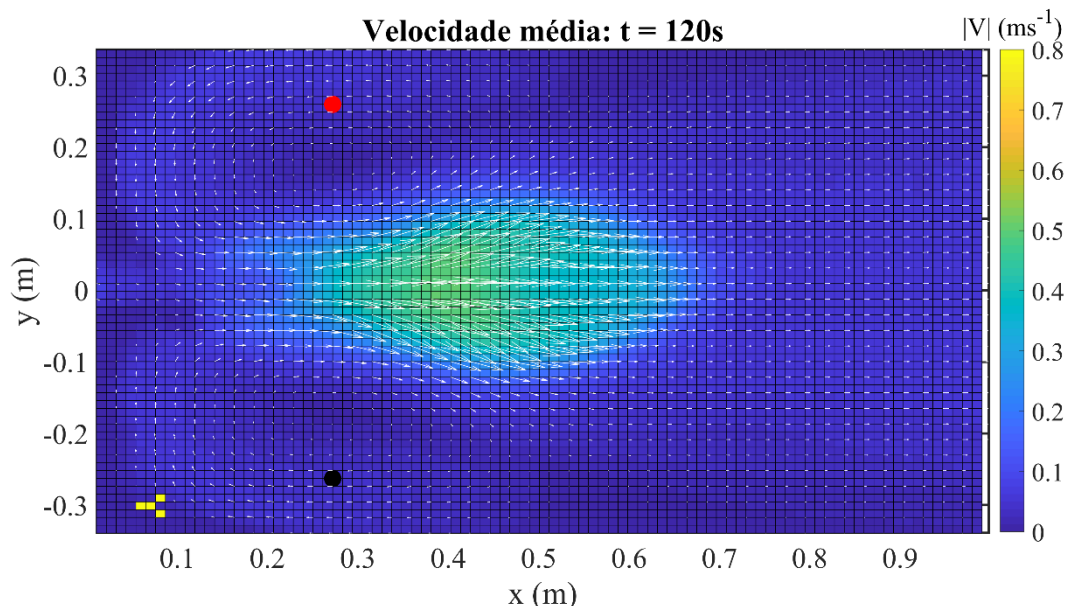


Figura 30 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=120$ s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

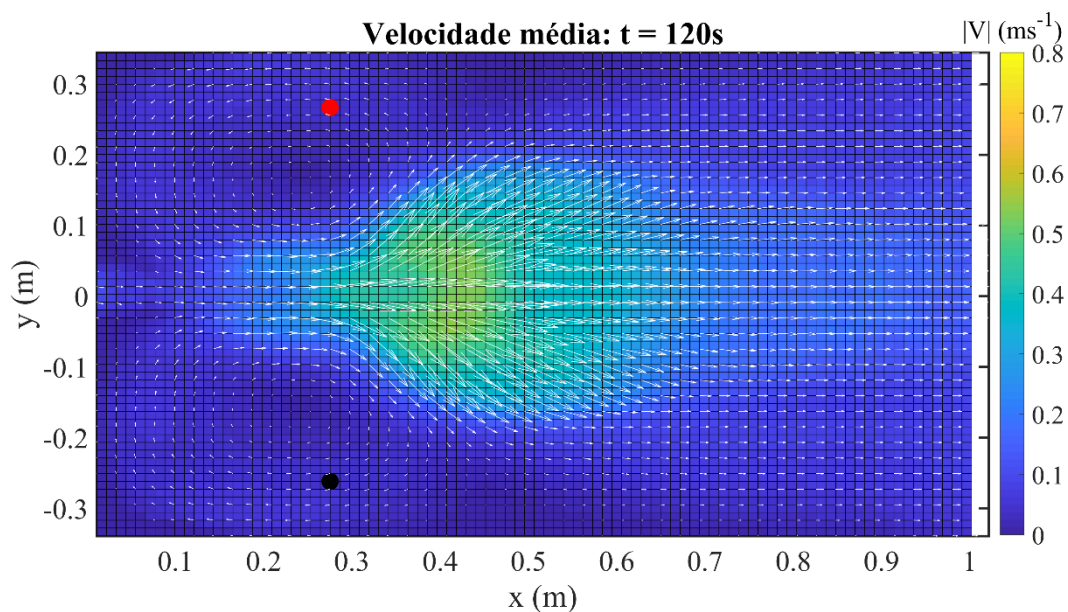


Figura 31 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para t=120s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

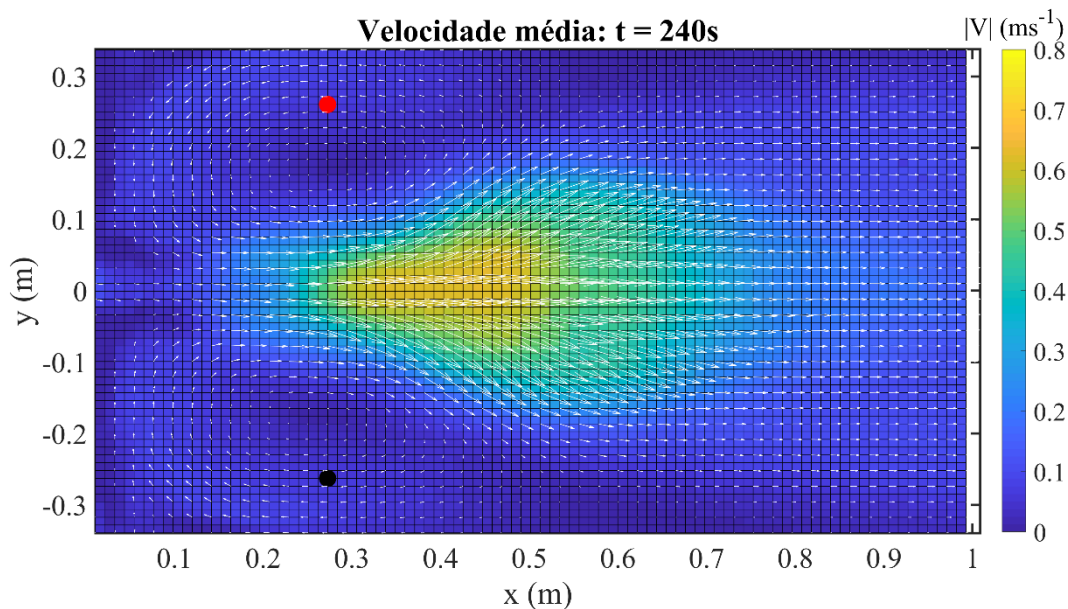


Figura 32 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para t=240s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

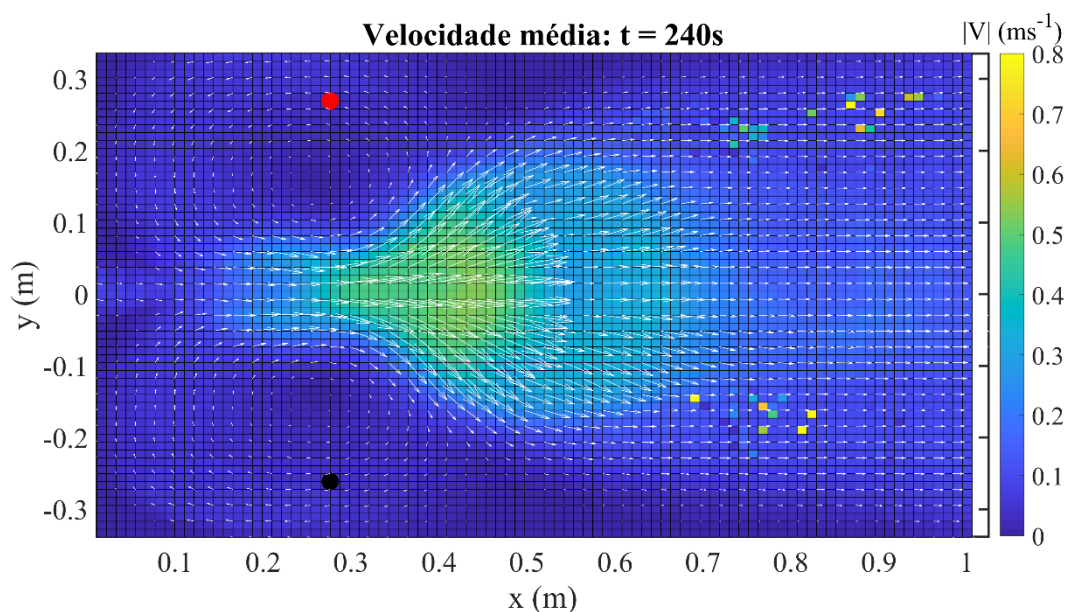


Figura 33 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para t=240s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

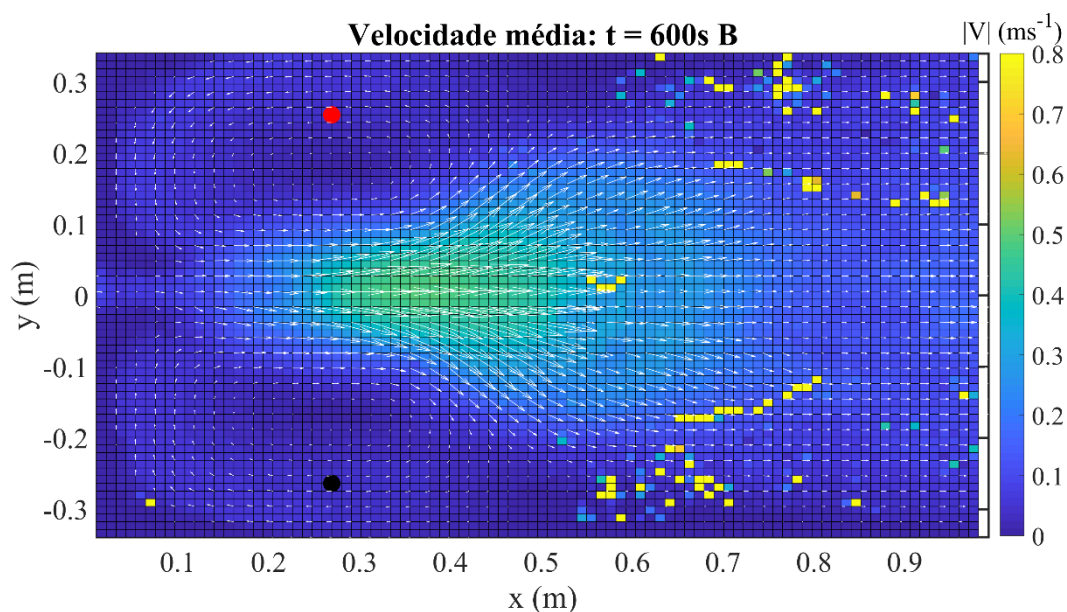


Figura 34 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para t=600s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

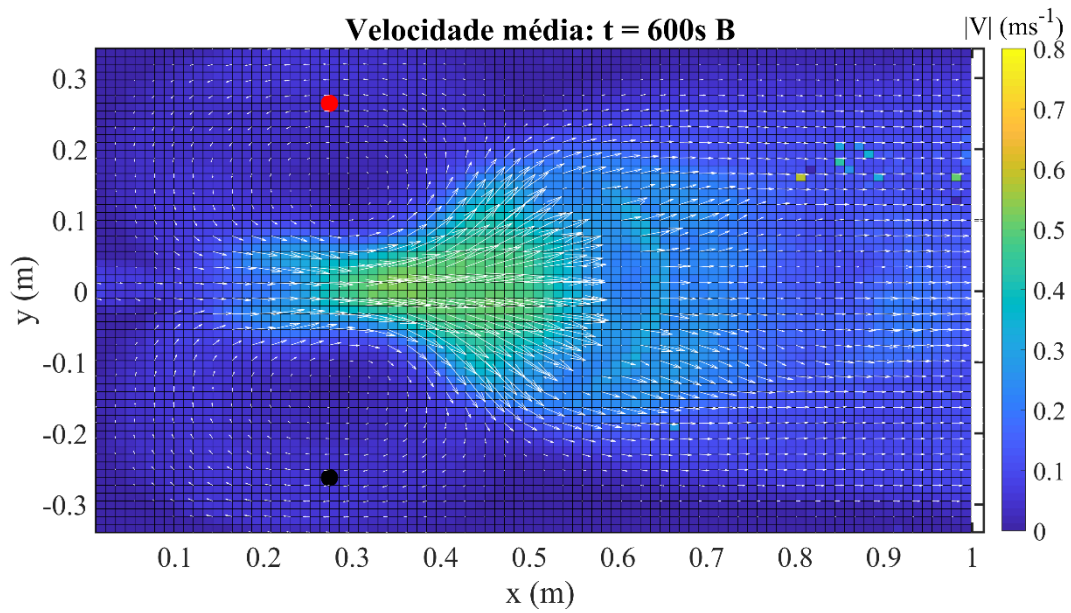


Figura 35 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=600s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

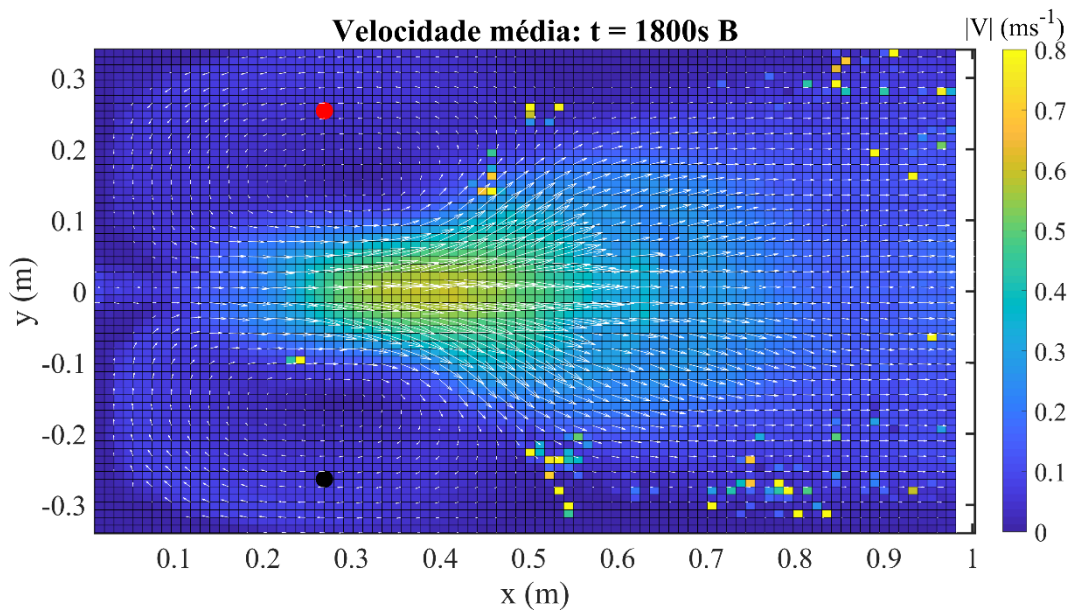


Figura 36 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=1800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

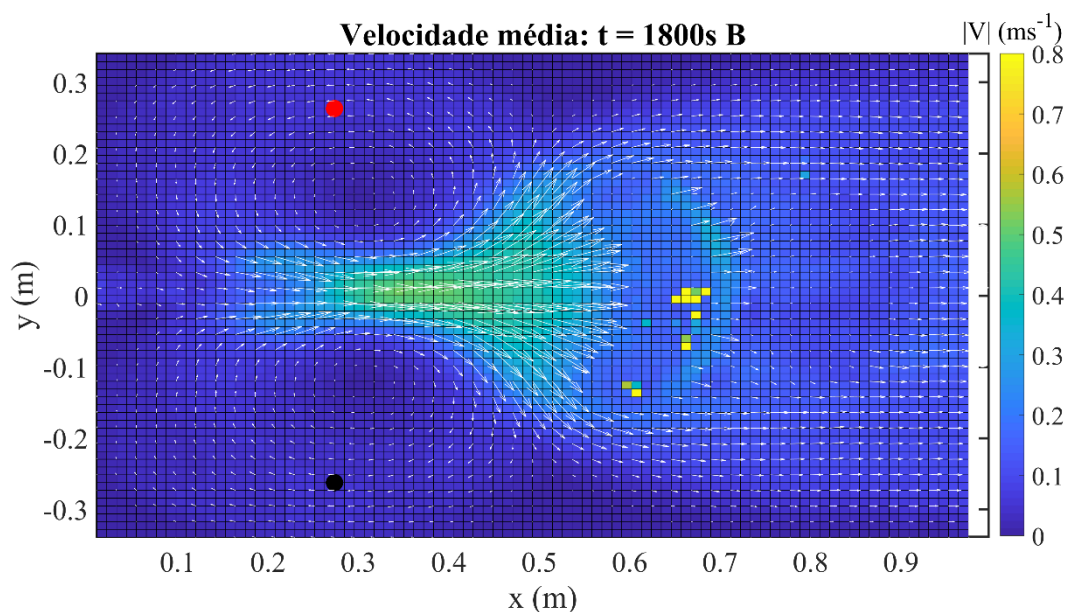


Figura 37 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=1800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

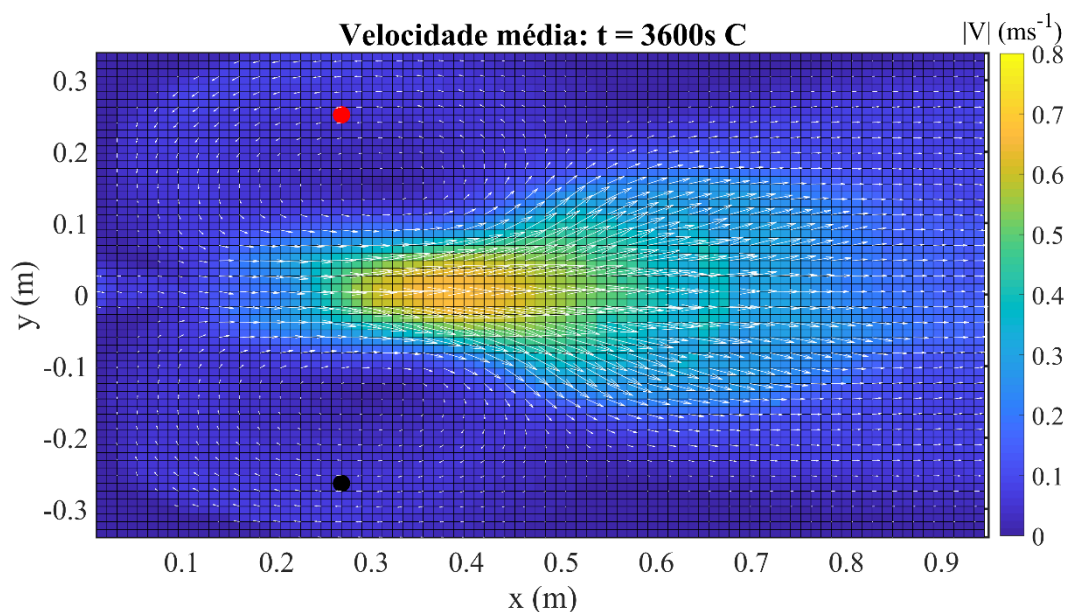


Figura 38 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=3600s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

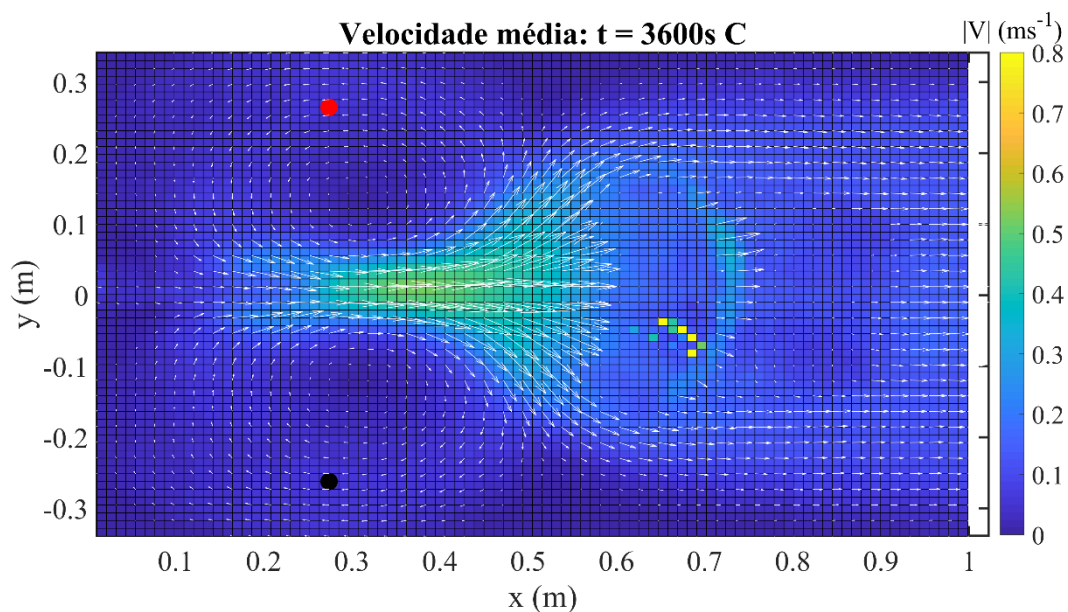


Figura 39 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para t=3600s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

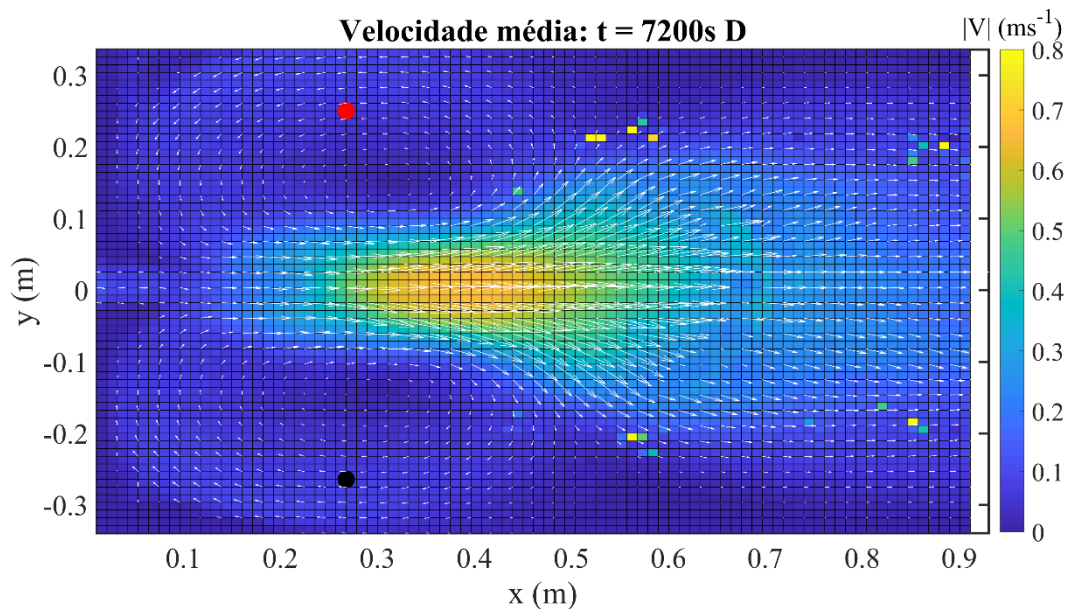


Figura 40 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para t=7200s. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

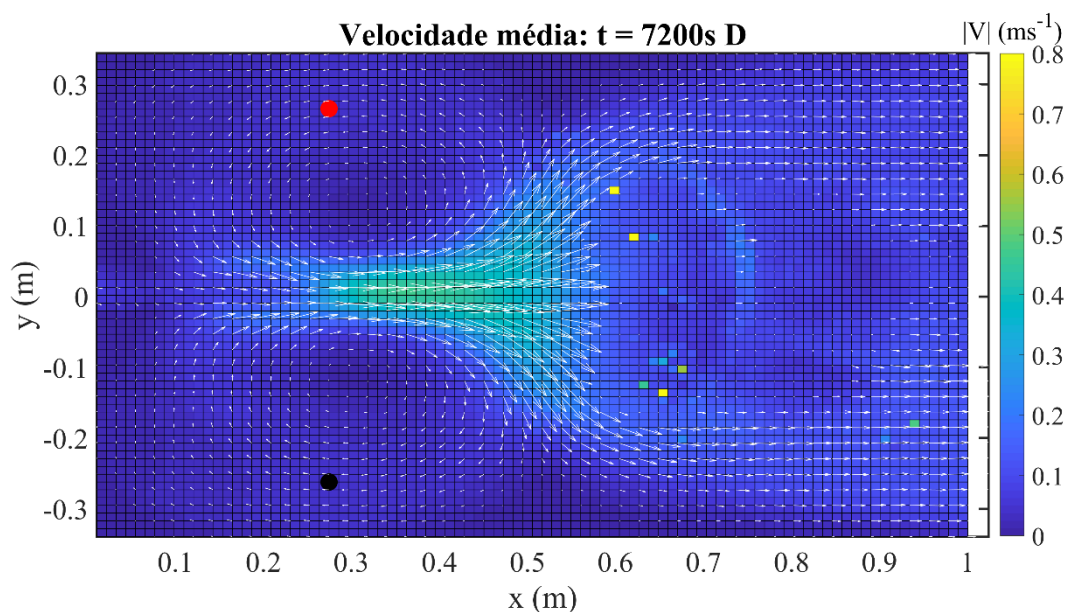


Figura 41 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=7200s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

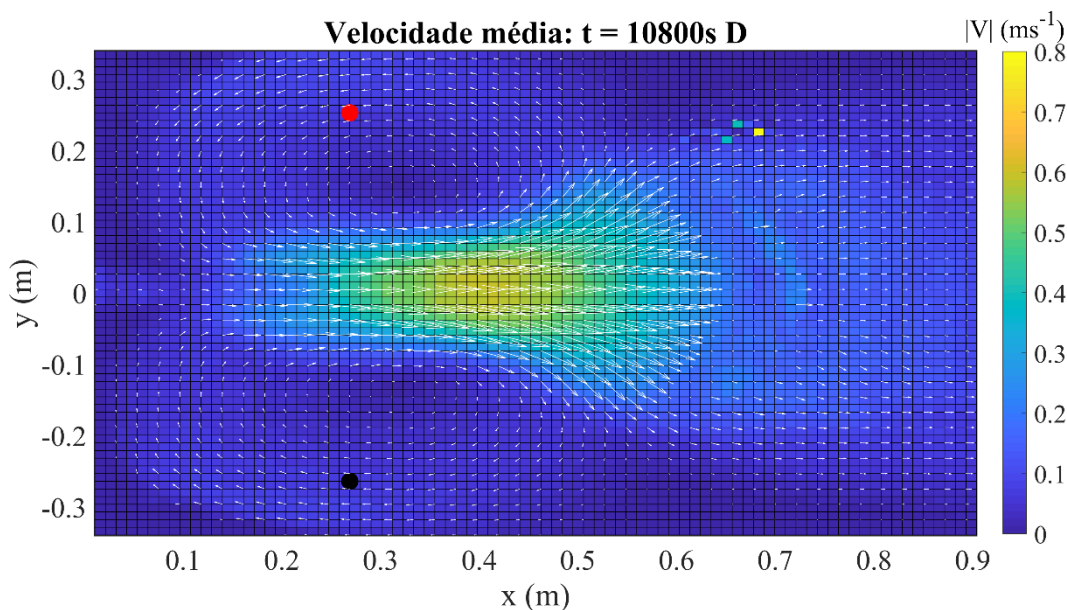


Figura 42 - Campo de velocidades medido para a condição C01 e para $t=10800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

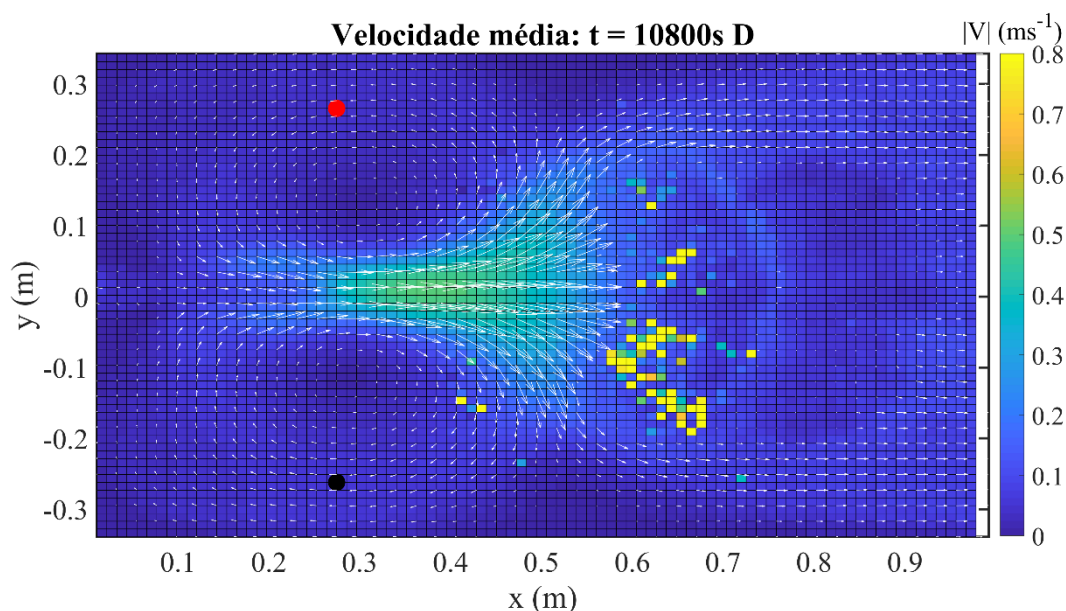


Figura 43 - Campo de velocidades medido para a condição C02 e para $t=10800s$. Os pontos assinalados a vermelho e a preto são os pontos onde a série de velocidades é analisada para determinação da frequência do vórtice.

A partir dos mapas de velocidades apresentados anteriormente, foi possível determinar os perfis transversais das duas componentes da velocidade, para diferentes secções (identificadas na Figura 44) e para diferentes instantes, o que permitiu fazer uma análise da variação espacial e temporal dos mesmos. Os perfis foram adimensionalizados considerando a velocidade máxima de cada componente e a respetiva coordenada máxima. Nas Figuras 45 a 46 e 47 a 48 apresentam-se, respetivamente, os gráficos dos perfis das componentes longitudinal e transversal, para os diferentes instantes de tempo e para as 8 secções transversais. É possível ver que para a condição C01 os perfis da componente horizontal colapsam para $x < 0.5$ m. Já para a condição C02 os perfis da componente horizontal colapsam para $x < 0.4$ m. Para a componente v o colapso dos perfis ocorre para $0.3 \text{ m} < x < 0.6 \text{ m}$, enquanto para a condição C02 os perfis da componente v colapsam praticamente em todas as secções.

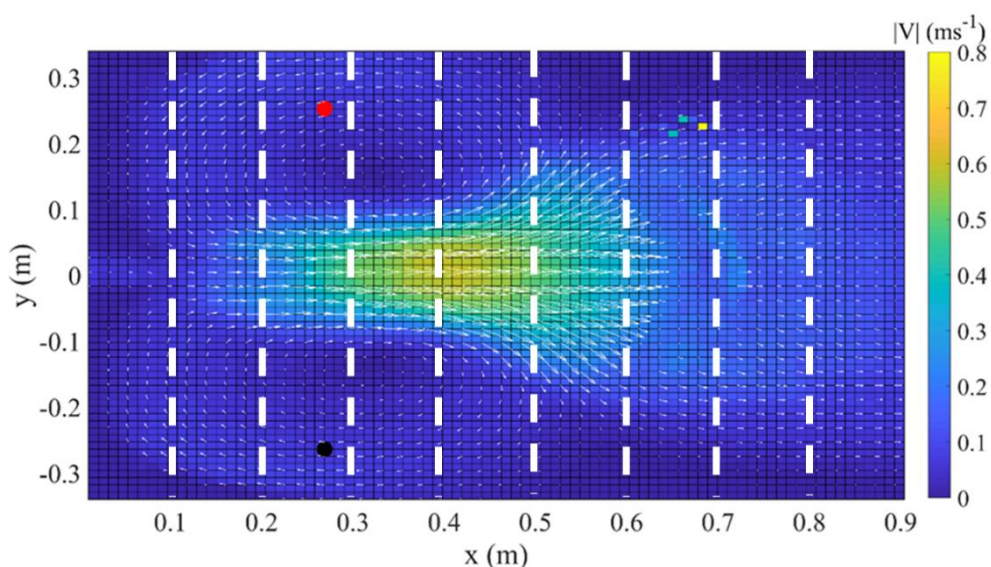


Figura 44 – Identificação das secções transversais consideradas no estudo.

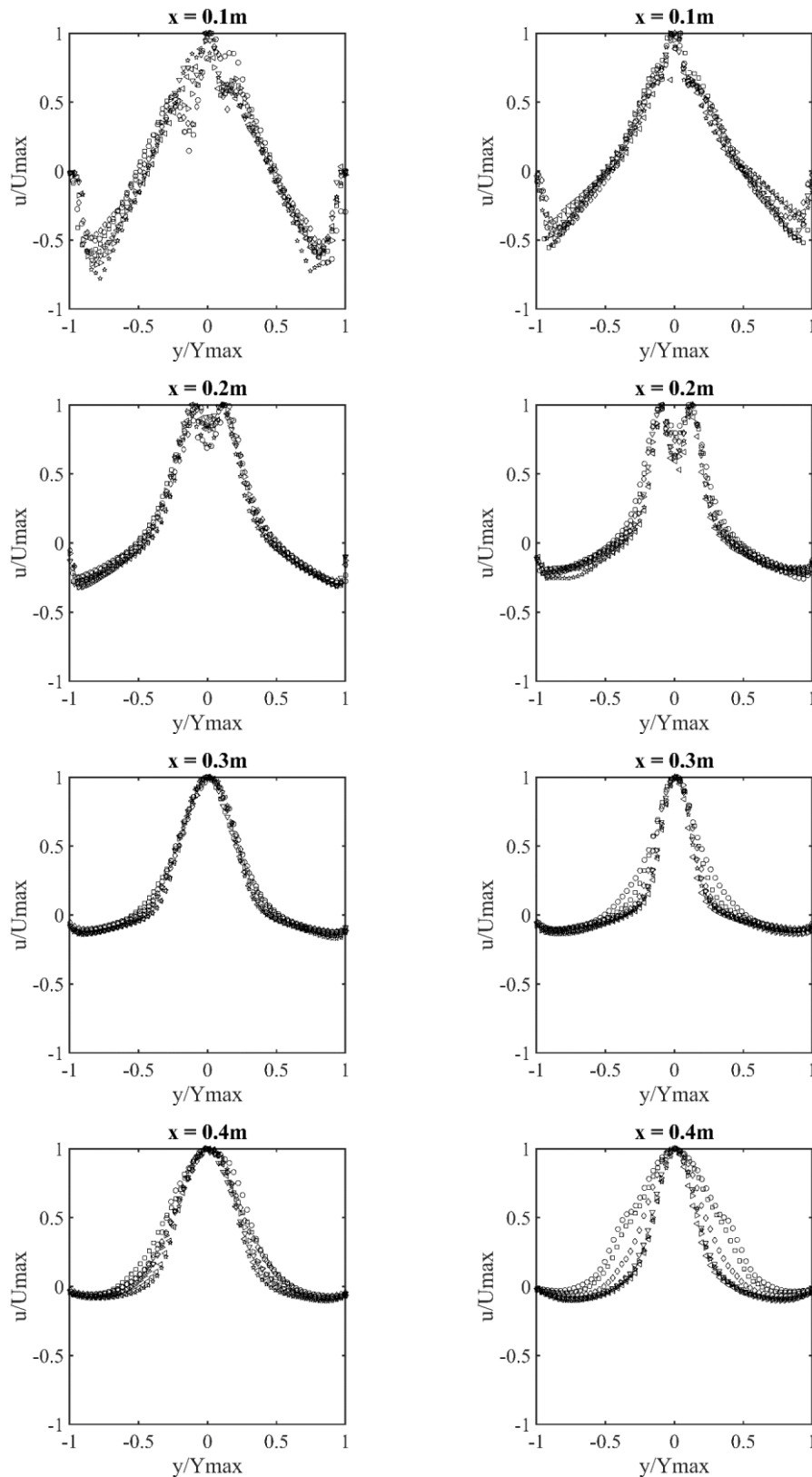


Figura 45 - Perfis transversais adimensionalizados da componente longitudinal da velocidade para diferentes secções ($x=0.1$ m, $x=0.2$ m, $x=0.3$ m e $x=0.4$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).

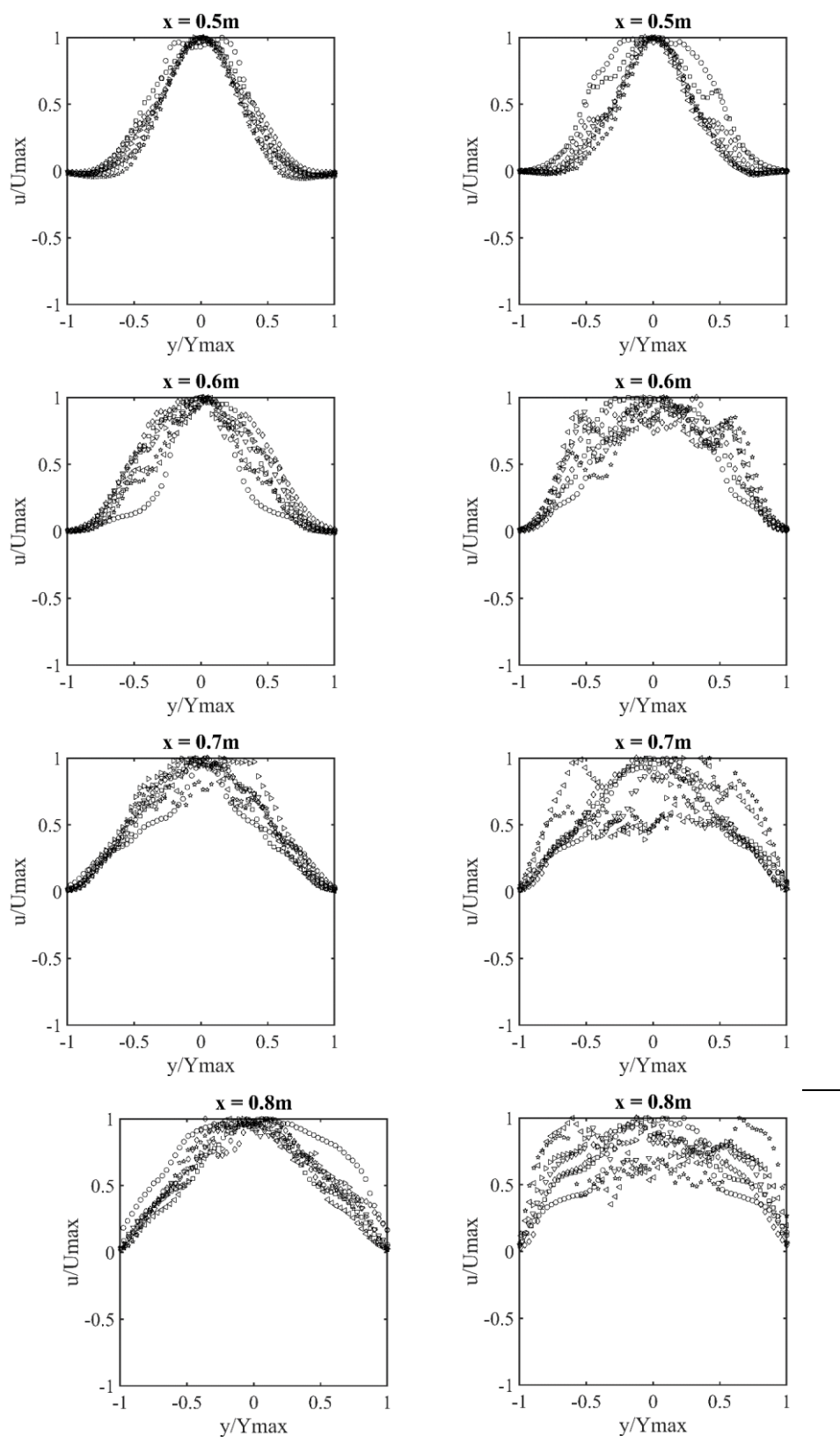


Figura 46 - Perfis transversais adimensionalizados da componente longitudinal da velocidade para diferentes secções ($x=0.5$ m, $x=0.6$ m, $x=0.7$ m e $x=0.8$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).

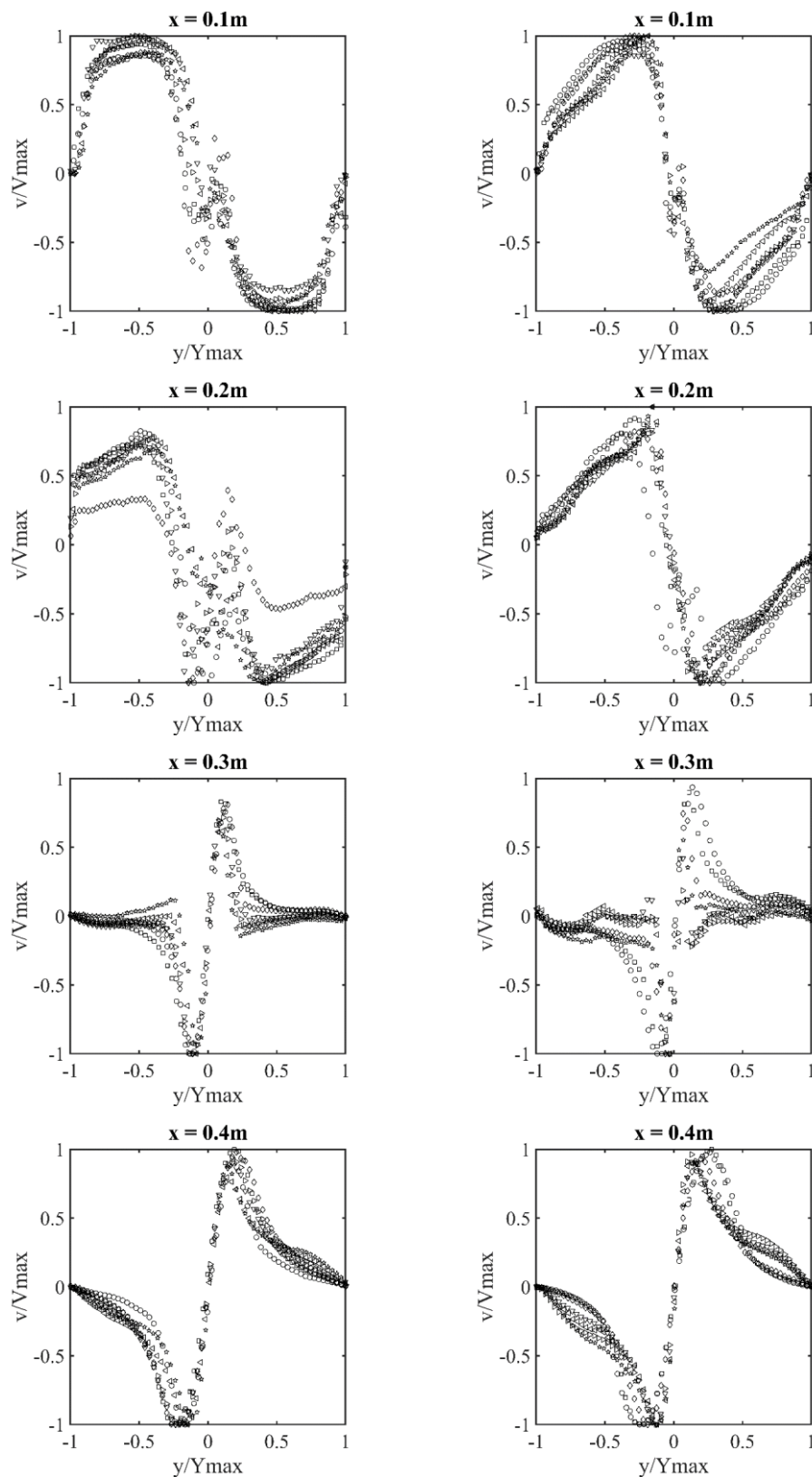


Figura 47 - Perfis transversais adimensionalizados da componente transversal da velocidade para diferentes secções ($x=0.1$ m, $x=0.2$ m, $x=0.3$ m e $x=0.4$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).

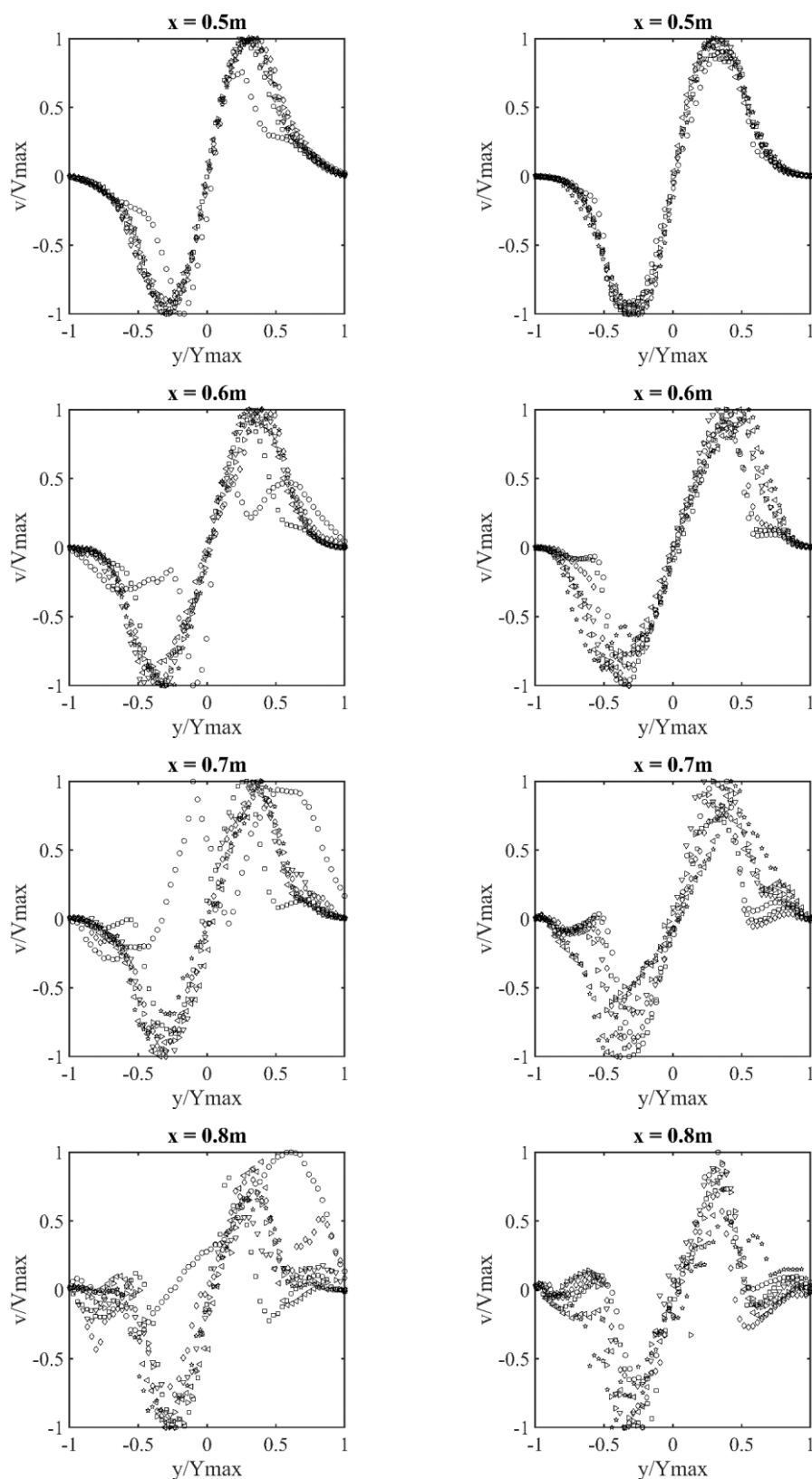


Figura 48 - Perfis transversais adimensionalizados da componente transversal da velocidade para diferentes secções ($x=0.5$ m, $x=0.6$ m, $x=0.7$ m e $x=0.8$ m), para diferentes instantes e para as duas condições C01 (à esquerda) e C02 (à direita).

4.2.2. VARIÁVEIS TURBULENTAS (FLUTUAÇÕES DA VELOCIDADE E TENSÕES DE REYNOLDS)

Nas Figuras 49 a 52 são apresentados os mapas das flutuações turbulentas da velocidade, para as duas condições de ensaio, respetivamente para $t=120s$, $t=240s$, $t=3600s$ e $t=10800s$. Pela análise das figuras, verifica-se que as maiores intensidades de turbulência ocorrem, como esperado, na zona de incidência do jato.

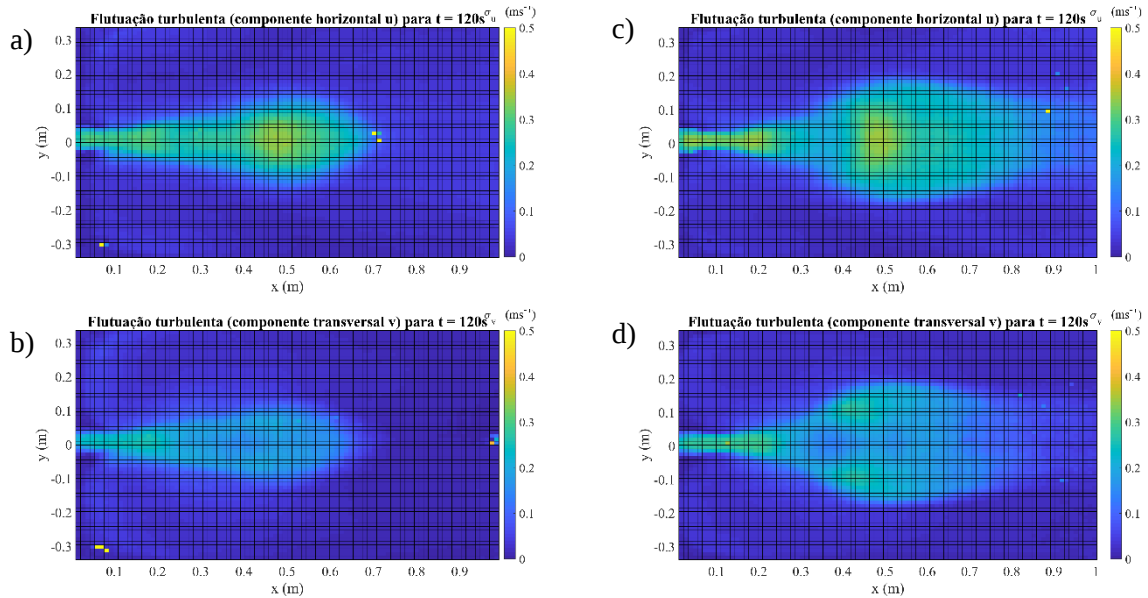


Figura 49 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=120s$, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.

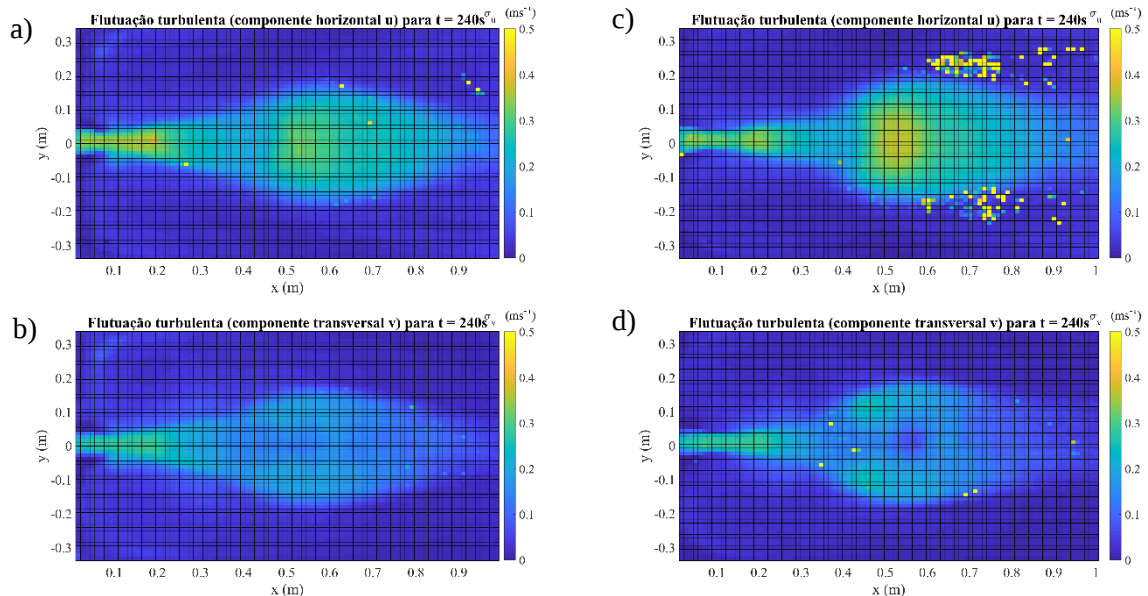


Figura 50 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=240s$, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.

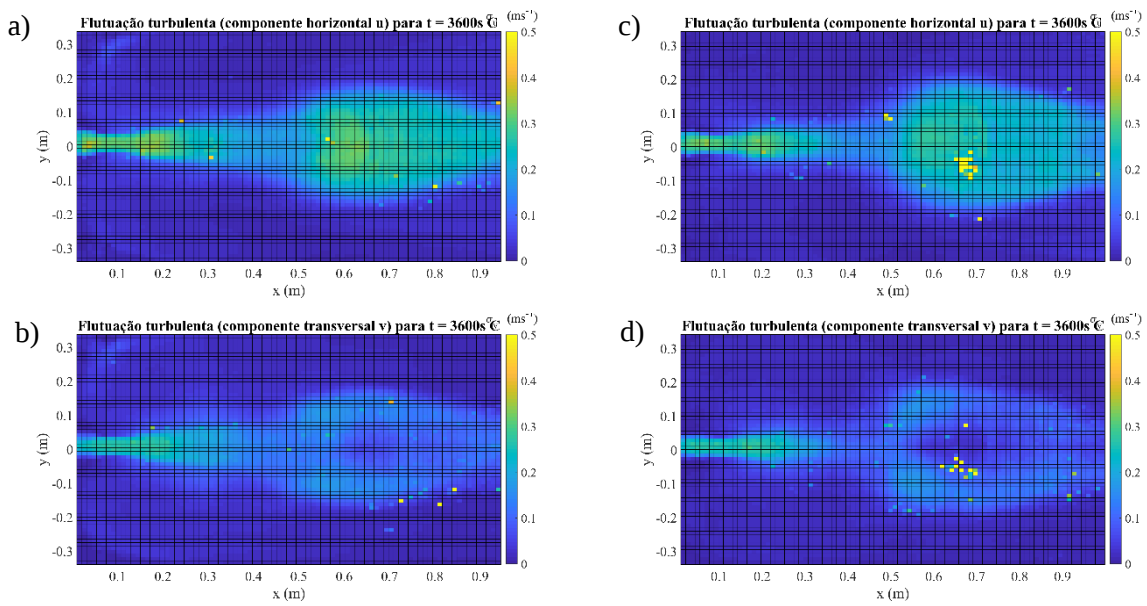


Figura 51 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=3600s$, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.

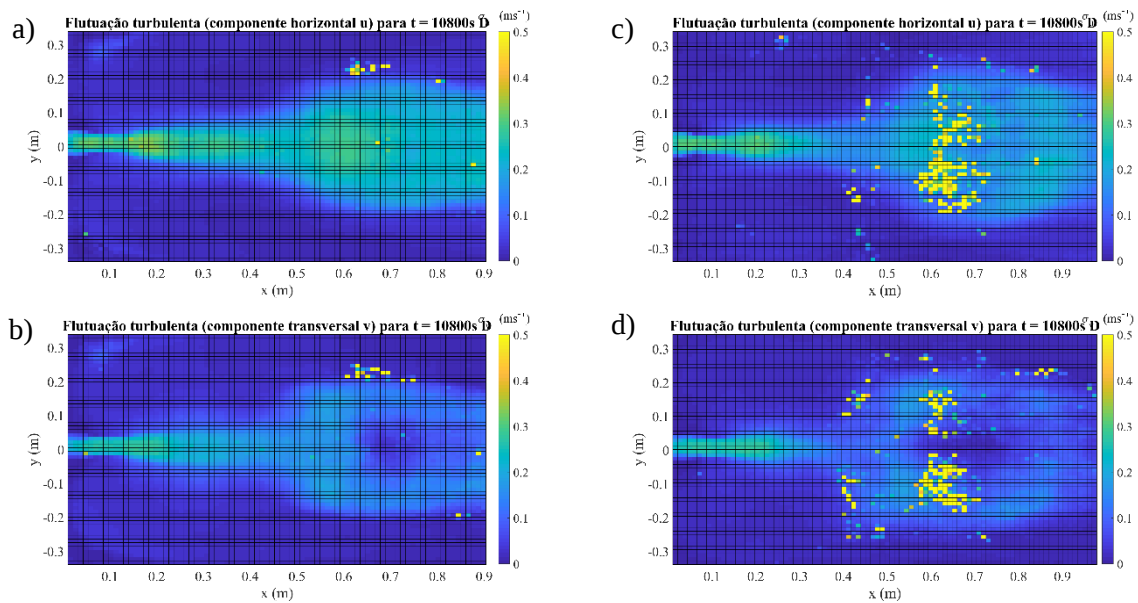


Figura 52 - Mapas das flutuações turbulentas medidos para $t=10800s$, nas duas condições: (a) componente longitudinal - C01; (b) componente transversal – C01; (c) componente longitudinal - C02; (d) componente transversal – C02.

Nas Figuras 53 a 60 são apresentados os mapas das tensões de Reynolds, para as duas condições de ensaio e para os instantes $t=120s$, $t=240s$, $t=3600s$ e $t=10800s$. As tensões de Reynolds ($-u'v'$) são normalmente definidas positivas. Neste caso, pela observação das figuras, verifica-se uma região, definido por $y>0$, onde as tensões de Reynolds ($-u'v'$) são negativas devido à rotação no sentido anti-horário do vórtice, tal como observado por Guan *et al.* (2019) no estudo de erosão localizada em pilares.

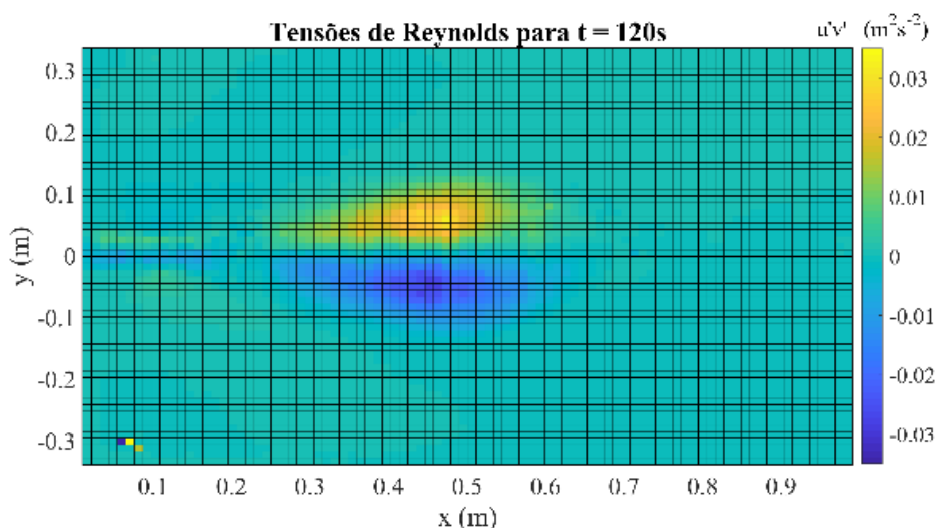


Figura 53 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=120s$, na condição C01.

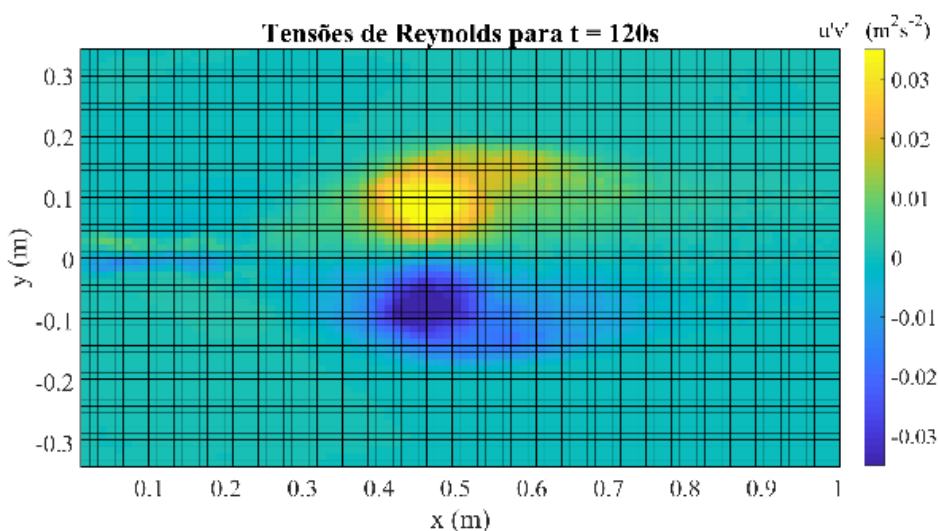


Figura 54 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=120s$, na condição C02.

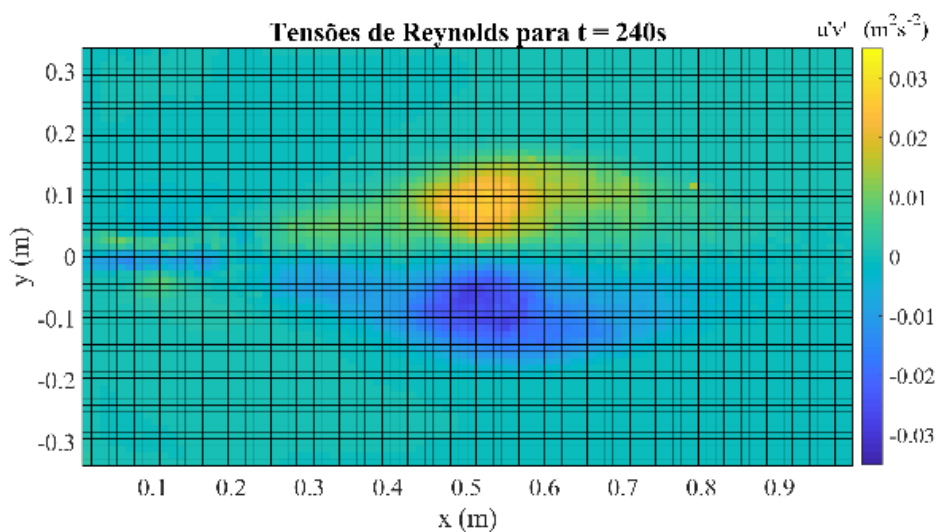


Figura 55 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=240s$, na condição C01.

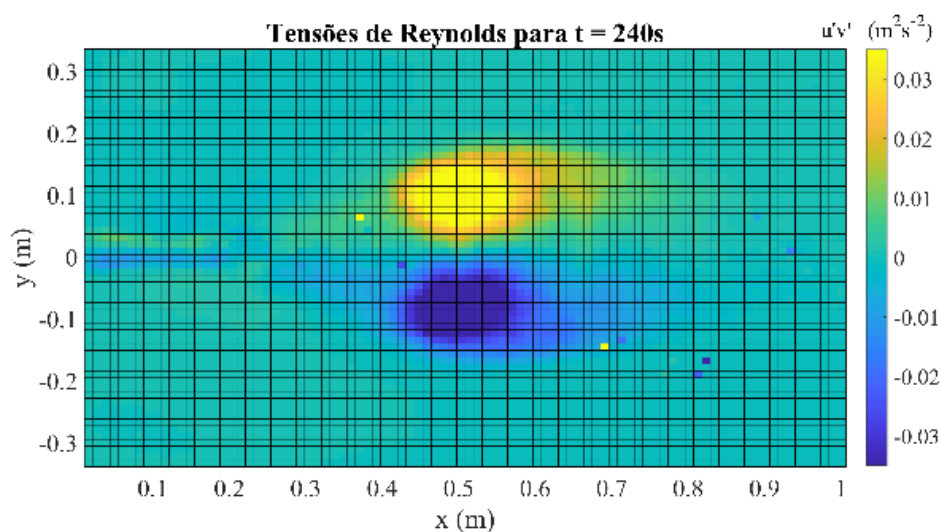


Figura 56 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=240\text{s}$, na condição C02.

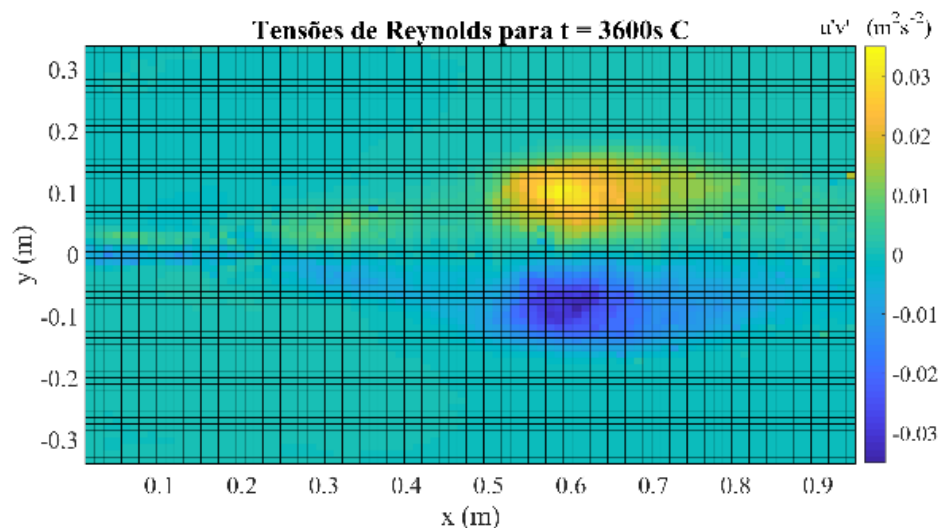


Figura 57 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=3600\text{s}$, na condição C01.

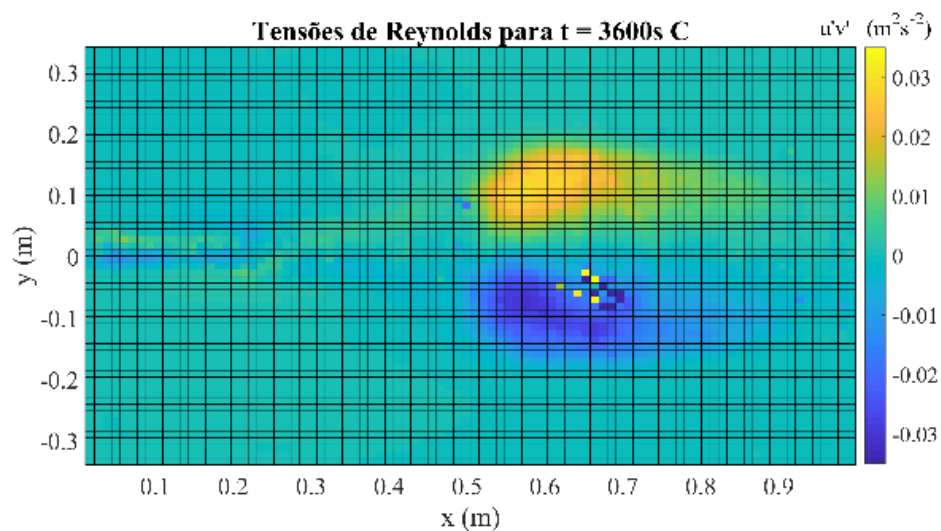


Figura 58 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=3600\text{s}$, na condição C02.

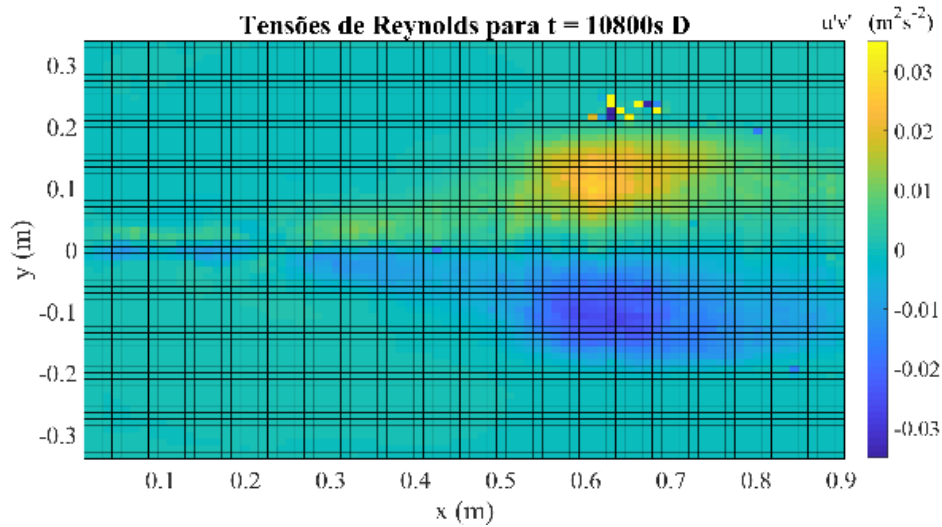


Figura 59 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=10800s$, na condição C01.

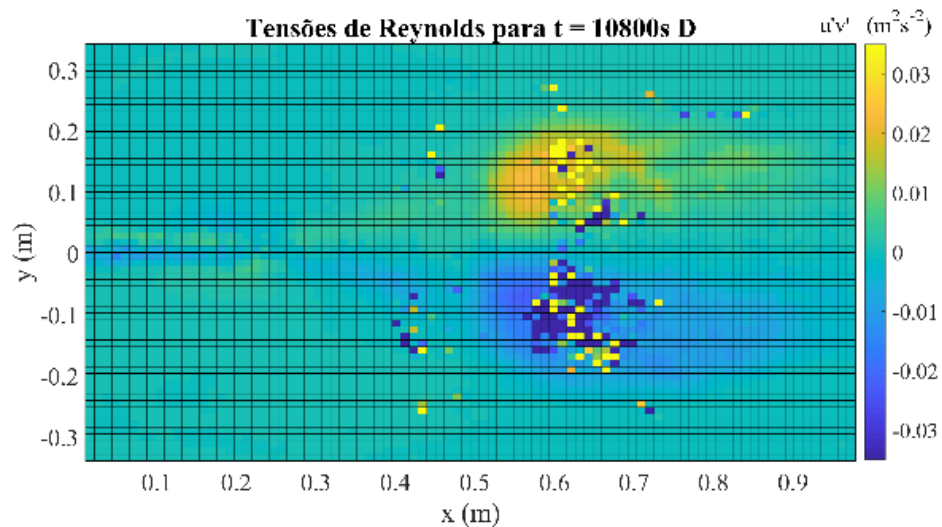


Figura 60 - Mapa das tensões de Reynolds medido para $t=10800s$, na condição C02.

4.2.3.VORTICIDADE

Nas Figuras de 61 a 68 são apresentados os mapas da vorticidade obtidos para as duas condições de ensaio e para os instantes $t=120s$, $t=240s$, $t=3600s$ e $t=10800s$.

A partir dos mapas consegue-se verificar a localização dos vórtices e também das duas camadas de corte geradas pelo jato incidente. Verifica-se que a vorticidade é positiva (rotação anti-horária) no vórtice situado para $y>0$ e negativa (rotação no sentido horário) para o vórtice situado em $y<0$. Saliente-se a diferente configuração das camadas de corte para a condição C01 em $t = 120 s$, onde estas formam uma espécie de anel que se transforma em ferradura ao longo do tempo.

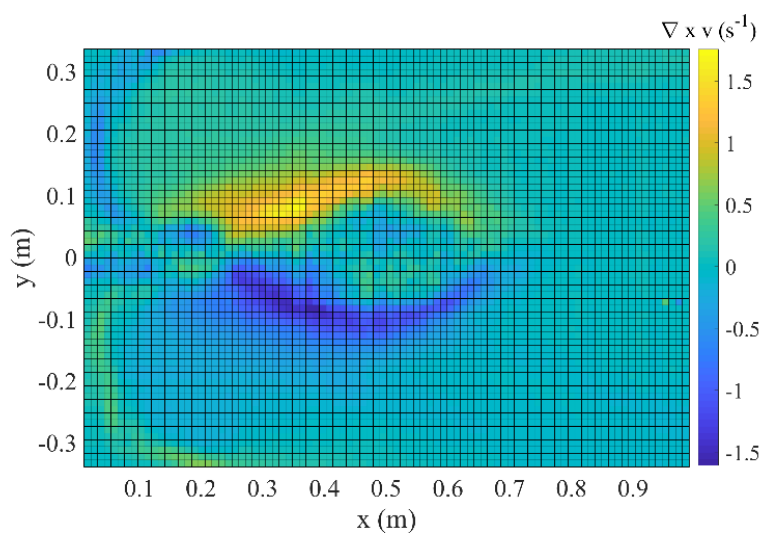


Figura 61 - Mapa da vorticidade medido para $t=120s$, na condição C01.

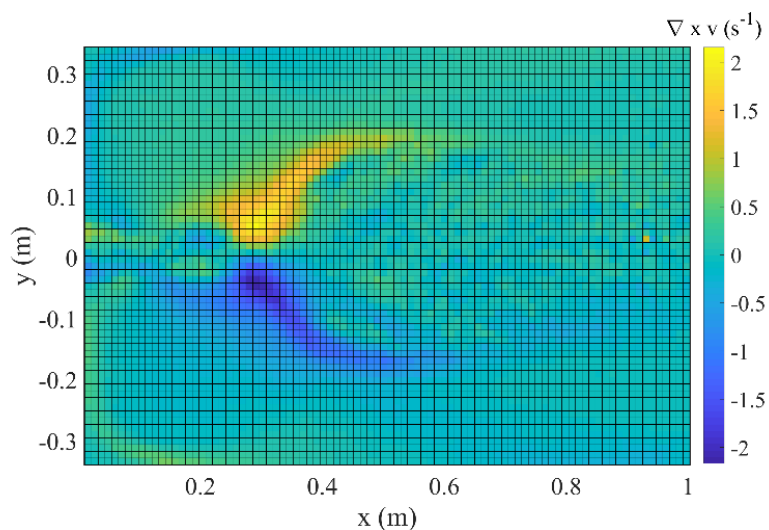


Figura 62 - Mapa da vorticidade medido para $t=120s$, na condição C02.

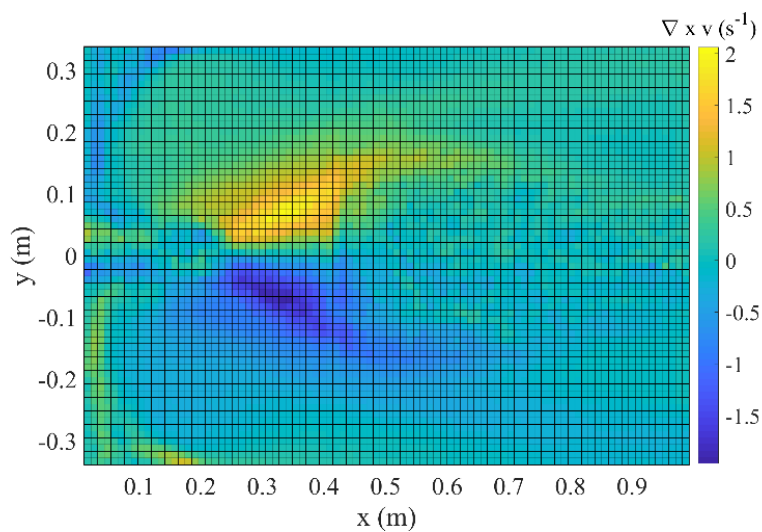


Figura 63 - Mapa da vorticidade medido para $t=240s$, na condição C01.

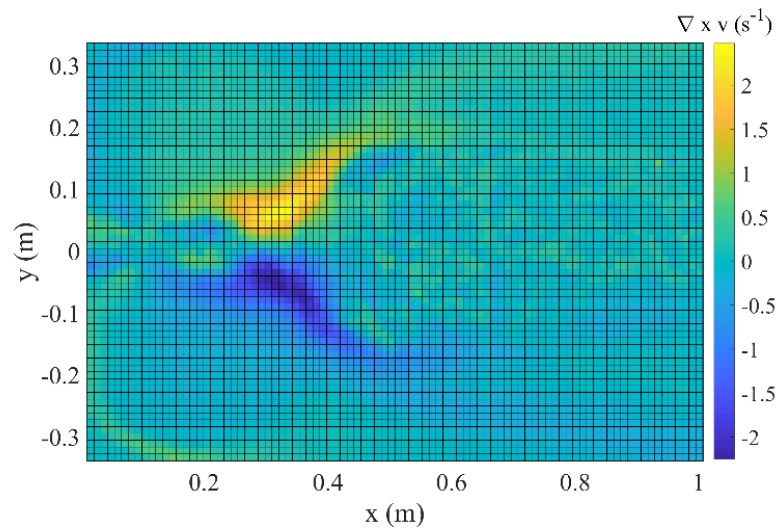


Figura 64 - Mapa da vorticidade medido para $t=240\text{s}$, na condição C02.

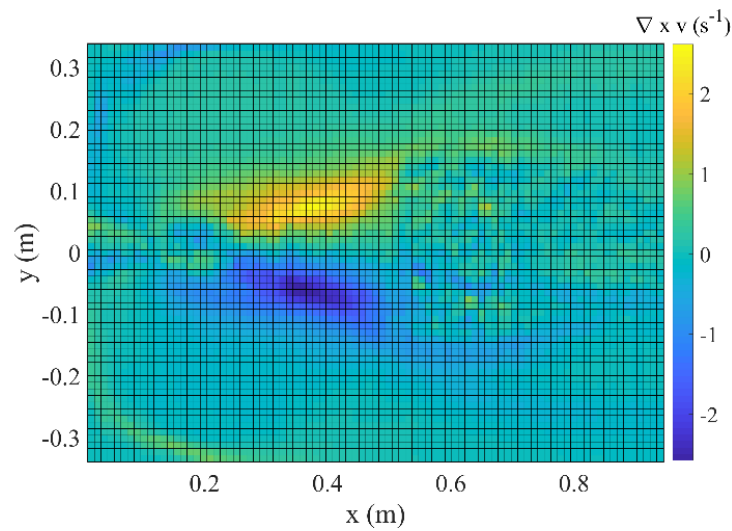


Figura 65 - Mapa da vorticidade medido para $t=3600\text{s}$, na condição C01.

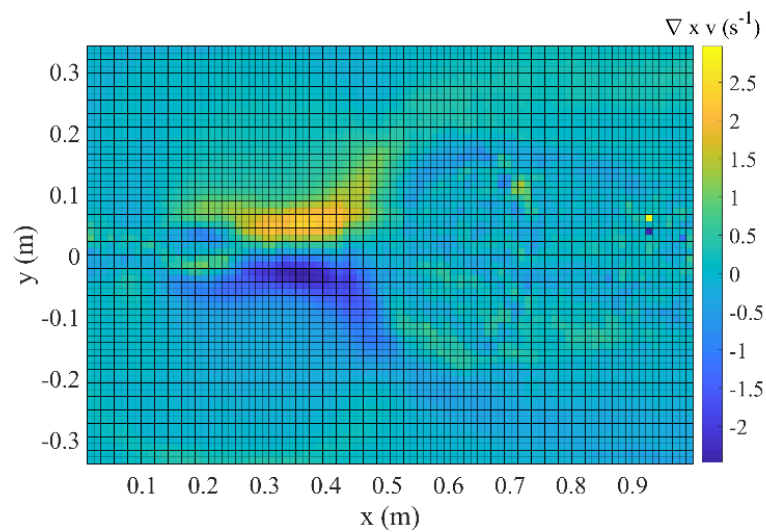


Figura 66 - Mapa da vorticidade medido para $t=3600\text{s}$, na condição C02.

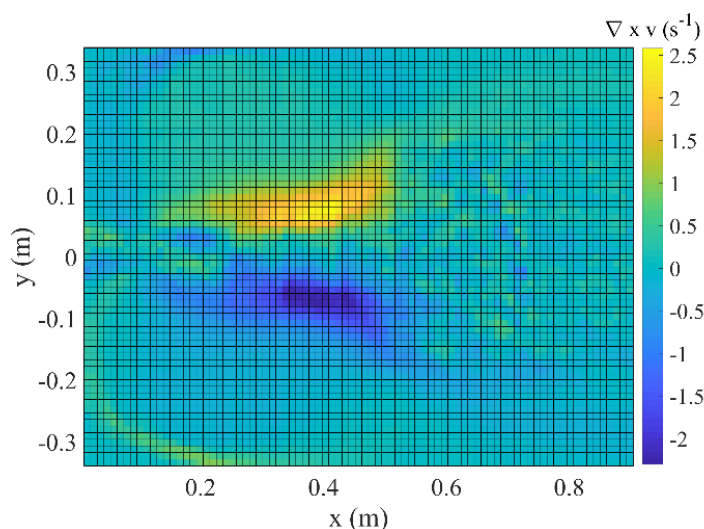


Figura 67 - Mapa da vorticidade medido para $t=10800s$, na condição C01.

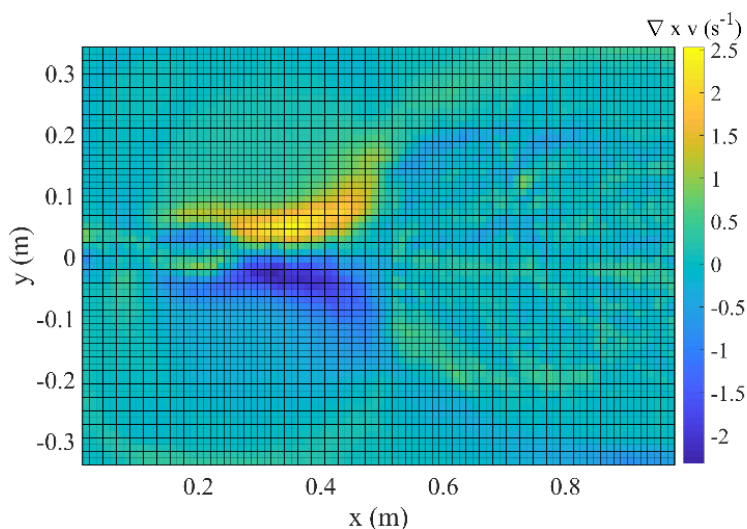


Figura 68 - Mapa da vorticidade medido para $t=10800s$, na condição C02.

Como exemplo, analisa-se de forma mais detalhada o vórtice situado em $y < 0$. Nas Figuras 69 e 70 apresentam-se os mapas de vorticidade e os perfis de velocidade medidos nos eixos longitudinal e transversal que passam no centro do vórtice, para os instantes $t=120s$, $t=240s$, $t=3600s$ e $t=10800s$, respetivamente para as condições C01 e C02. Pela análise dos mapas obtidos para as duas condições, verifica-se que a vorticidade é diferente de zero mas não é constante dentro do vórtice, o que se confirma pelos perfis de velocidade medidos, nos quais é possível verificar que a velocidade não tem simetria radial por influência do jato incidente, da parede da bacia dissipação e da configuração do leito.

A observação das Figuras 69 e 70, nas quais se apresentam com mais detalhe os mapas de vorticidade no vórtice definido por $y < 0$, permite confirmar, de forma mais clara, que os vórtices da condição C02 são menos distorcidos na direção longitudinal que na condição C01, tal como tinha sido referido na secção 4.2.1.

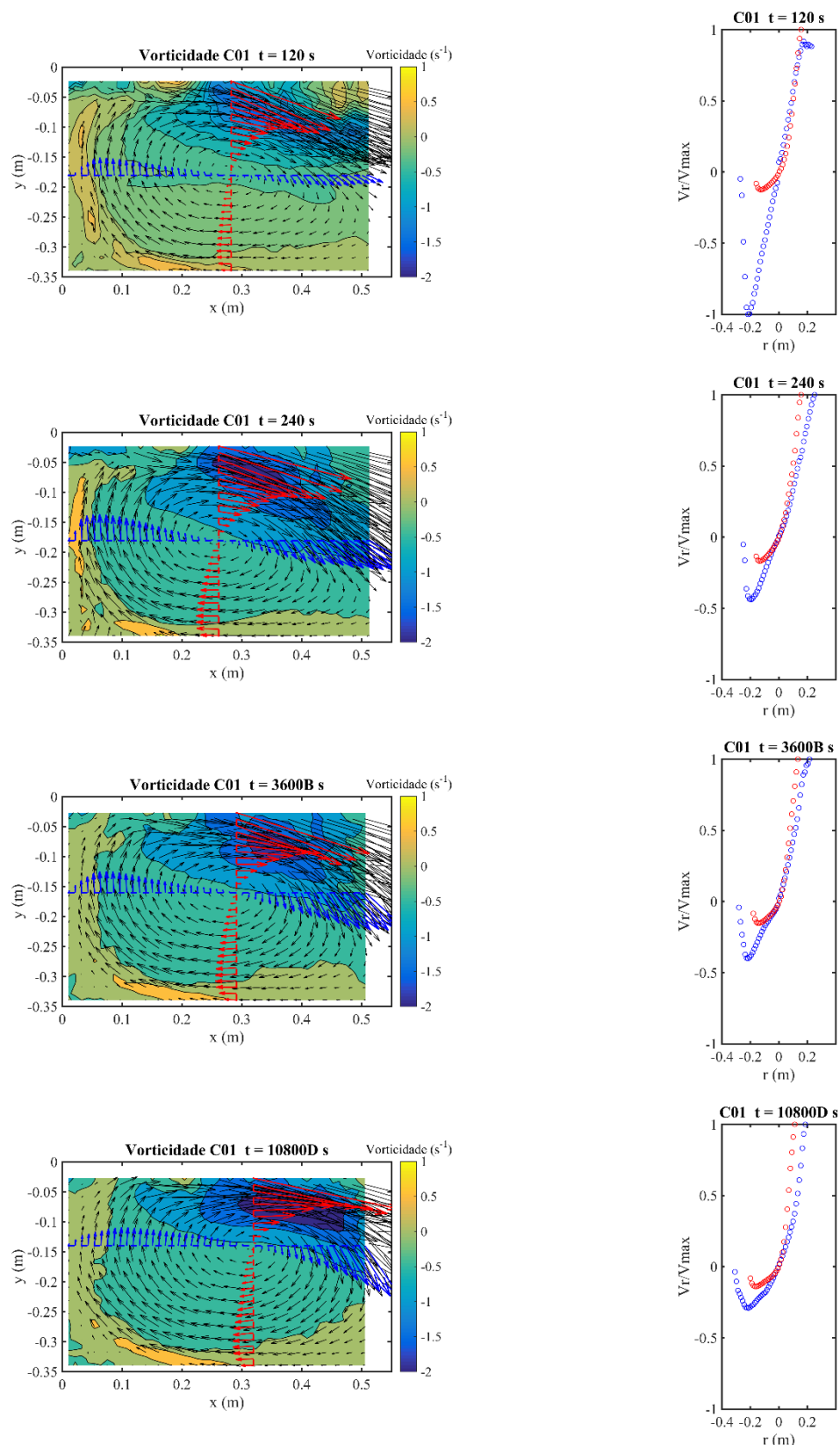


Figura 69 - Mapas da vorticidade e perfis de velocidade ao longo dos eixos longitudinal e transversal que passam no centro do vórtice situado em $y < 0$, obtidos para a condição C01 e diferentes instantes.

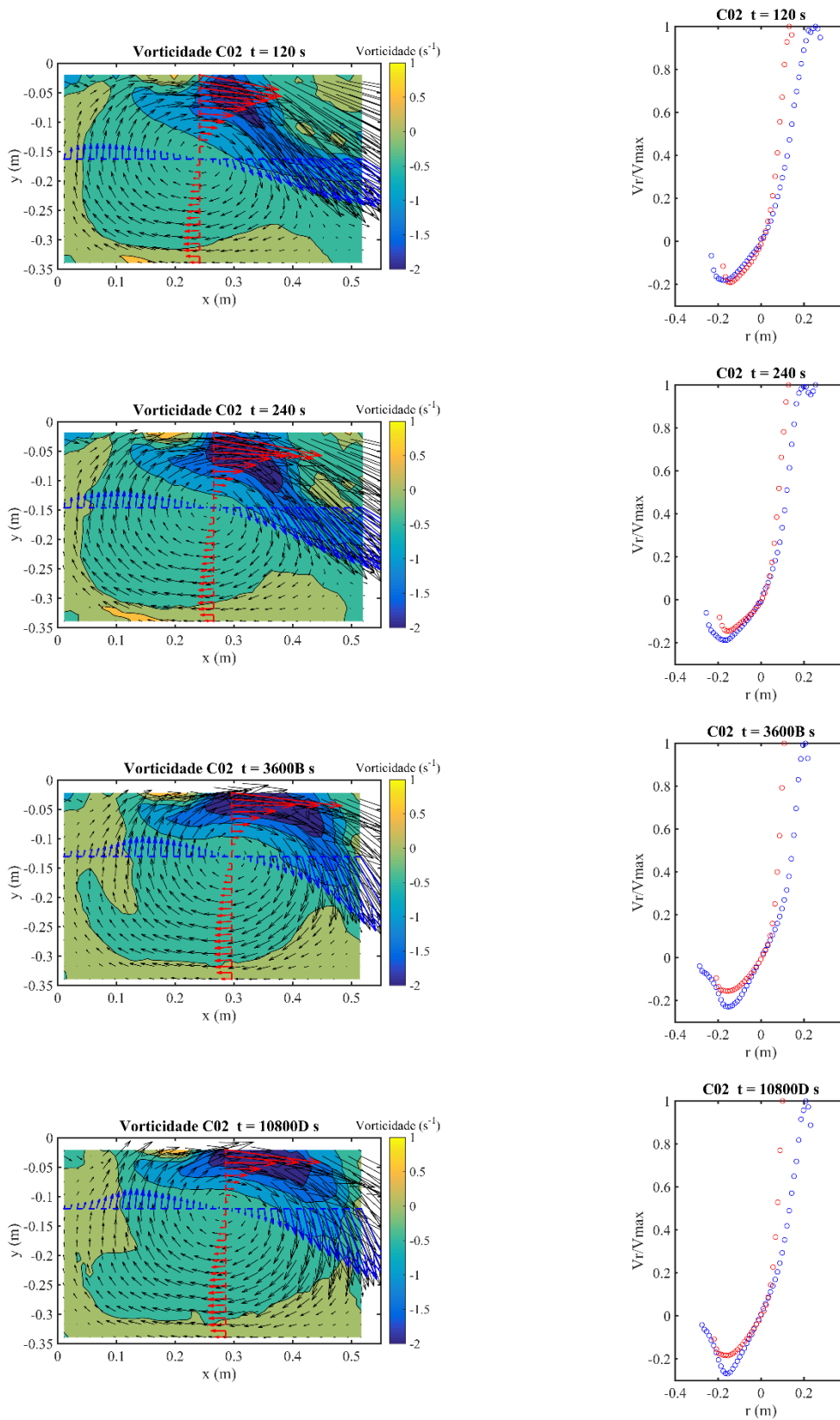


Figura 70 - Mapas da vorticidade e perfis de velocidade ao longo dos eixos longitudinal e transversal que passam no centro do vórtice situado em $y < 0$, obtidos para a condição C02 e diferentes instantes.

Os perfis definidos ao longo do eixo longitudinal estão representados para os diferentes instantes considerados nas Figuras 71 e 72, respetivamente para as condições C01 e C02. Verifica-se que, na condição C01, para $t=120$ s o perfil parece obedecer a uma lei do tipo vórtice forçado (equação 6). Para instantes posteriores o vórtice continua a ser forçado mas a velocidade não é diretamente proporcional à distância. Na condição C02, verifica-se que os perfis do vórtice são muito mais estáveis ao longo do tempo. Porém, o modelo do vórtice forçado da equação (6) não é adequado para o descrever.

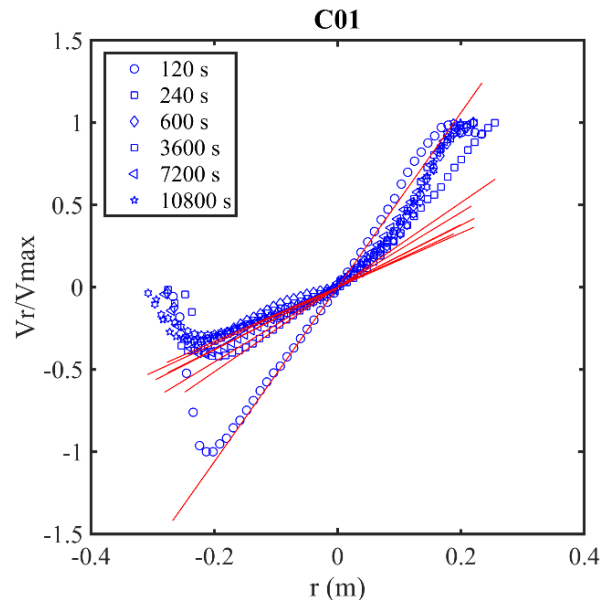


Figura 71 – Perfis de velocidade adimensionalizados medidos ao longo do eixo horizontal do vórtice para a condição C01.

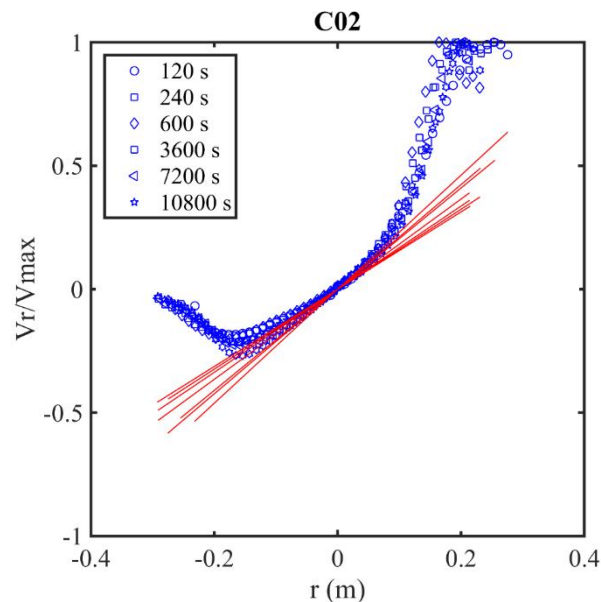


Figura 72 – Perfis de velocidade adimensionalizados medidos ao longo do eixo horizontal do vórtice para a condição C02.

4.2.4. ESPECTROS

Nas Figuras 73 a 80, são apresentados para quatro instantes (120s, 240s, 3600s e 10800s) e para as duas condições de ensaio (C01 e C02), os espectros obtidos para as duas componentes da velocidade (u e v), medidos nos pontos P1 e P2, assinalados nos mapas das velocidades apresentados nas Figuras 30 a 43. Pela análise dos espectros obtidos para as duas condições, é evidente, de uma forma geral, a existência de dois picos de frequência, nas duas componentes de velocidade e nos dois pontos. A existência de dois picos revela que, nos instantes estudados, o vórtice não roda sempre à mesma frequência.

Nas tabelas 6 e 7 apresentam-se, respetivamente para as condições C01 e C02, os valores das frequências (f_1 e f_2) associadas aos dois picos identificados nos espectros, para os instantes $t=120s$, $t=240s$, $t=600s$, $t=1800s$, $t=3600s$, $t=7200s$ e $t=10800s$. Apesar de ser evidente a existência de dois picos de frequência, a análise das tabelas permite verificar que apesar de apresentar a mesma ordem de grandeza, a frequência de oscilação do vórtice varia com o tempo. Por outro lado, verifica-se que as frequências variam também do ponto P1 para o ponto P2, o que indica que apesar de simétricos, os vórtices apresentam picos de frequência diferentes.

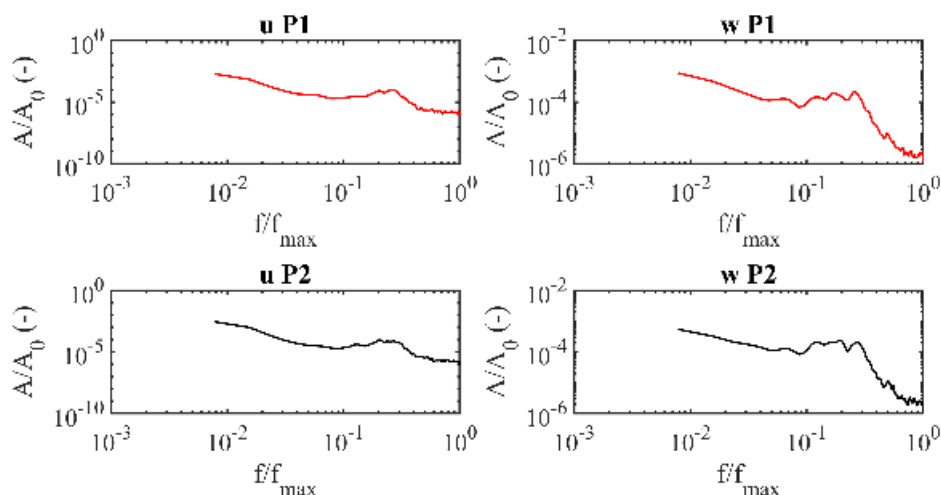


Figura 73 – Espectros medidos para $t=120s$, na condição C01.

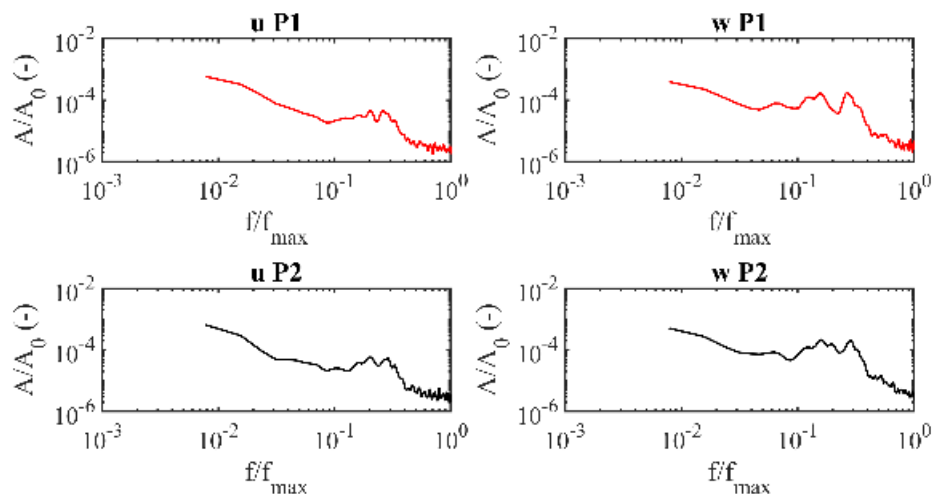


Figura 74 – Espectros medidos para $t=120s$, na condição C02.

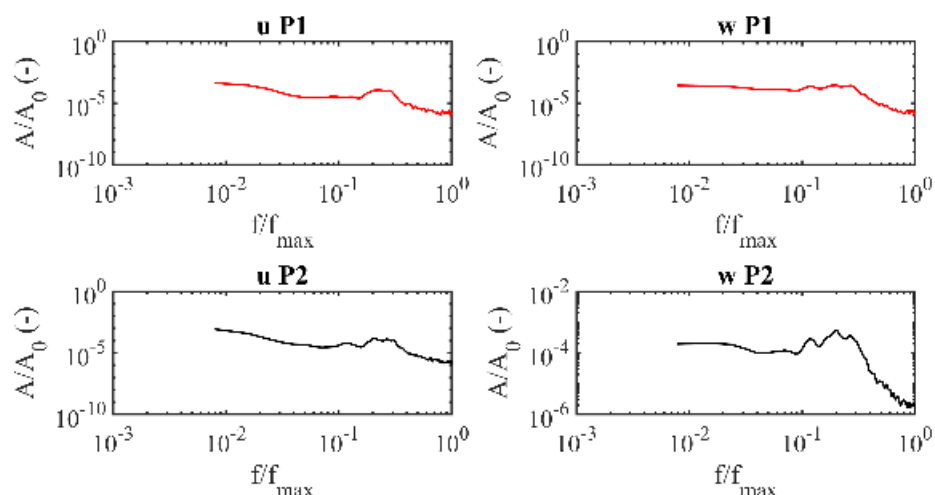


Figura 75 – Espectros medidos para t=240s, na condição C01.

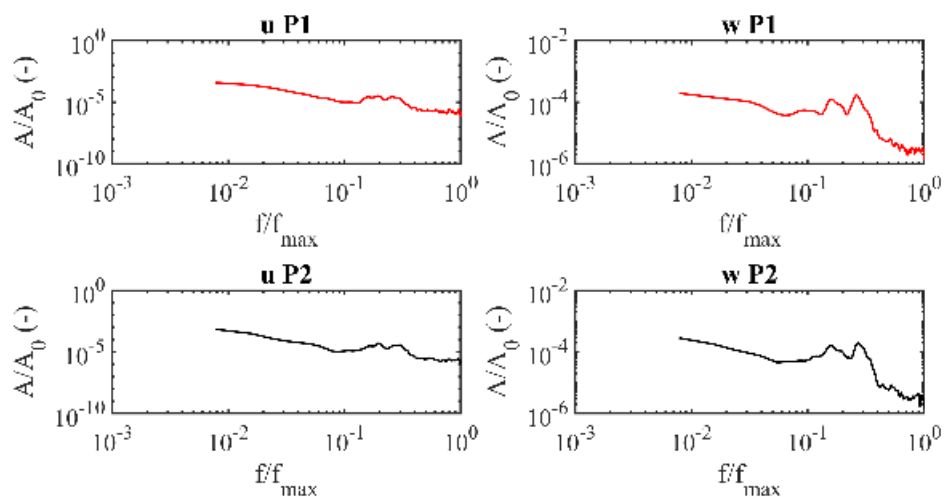


Figura 76 – Espectros medidos para t=240s, na condição C02.

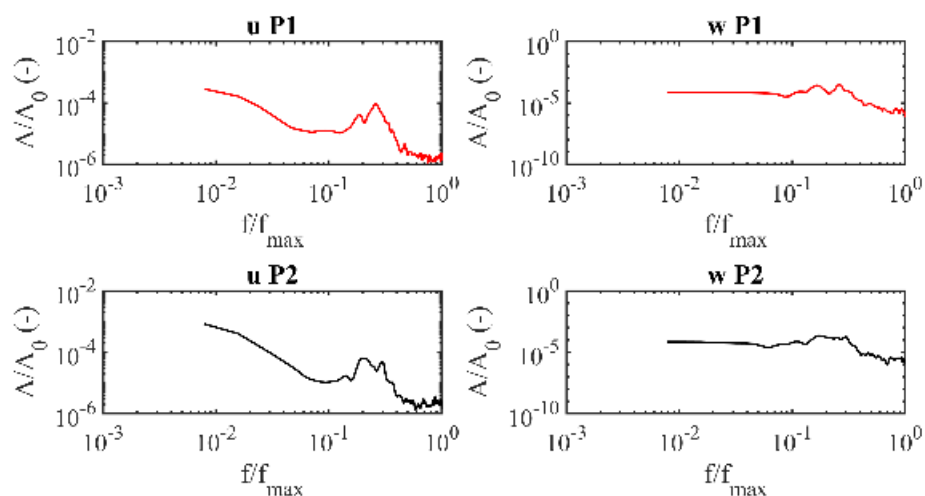


Figura 77 – Espectros medidos para t=3600s, na condição C01.

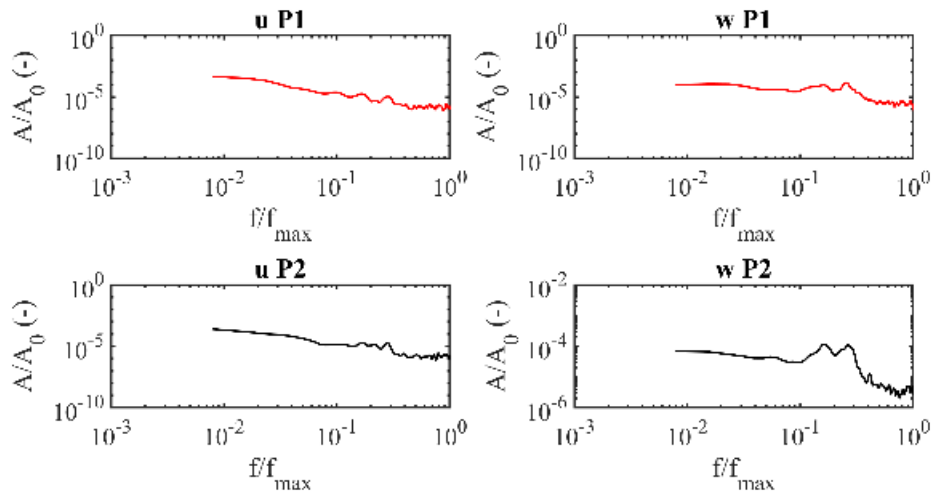


Figura 78 – Espectros medidos para $t=3600s$, na condição C02.

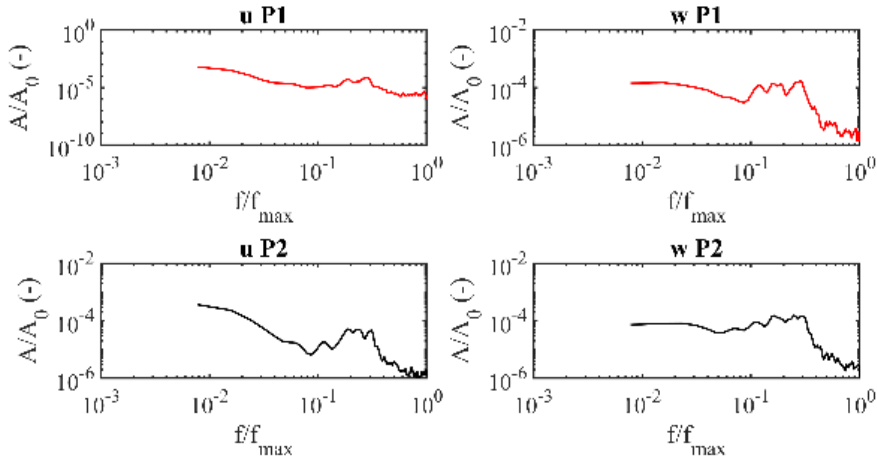


Figura 79 – Espectros medidos para $t=10800s$, na condição C01.

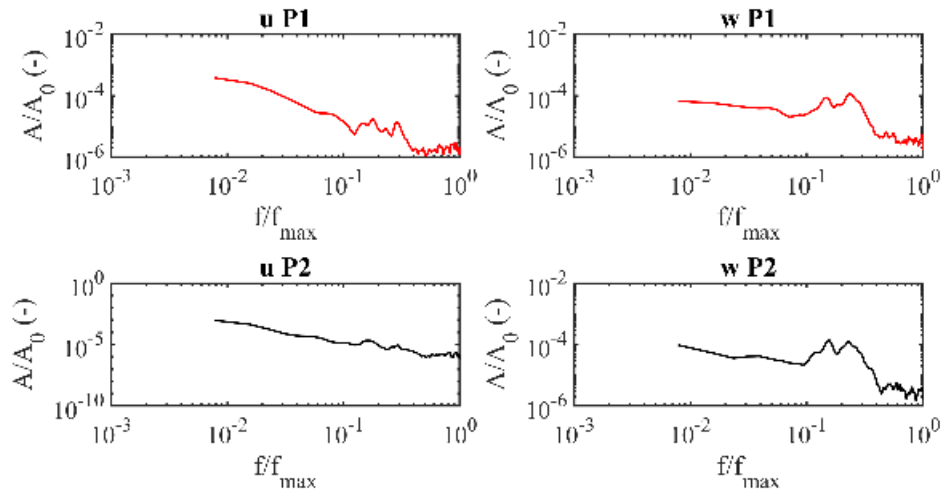


Figura 80 – Espectros medidos para $t=10800s$, na condição C02.

Tabela 6 – Valores das frequências correspondentes aos dois picos (f1 e f2) identificados nos espectros medidos nos pontos P1 e P2, obtidos na condição C01.

fmax (Hz)	Condição 01							
	u				w			
30	P1		P2		P1		p2	
t (s)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)
120	5.86	7.97	7.97	6.09	7.50	4.92	5.86	7.97
240	5.86	7.73	6.56	6.09	5.86	7.73	5.86	7.73
600	6.80	7.97	7.03	8.44	5.63	7.27	5.39	8.20
1800	8.20	5.86	8.20	7.27	7.73	4.92	4.92	7.97
3600	5.63	9.14	7.50	5.39	8.20	4.69	5.63	7.97
7200	7.27	6.33	7.97	7.73	4.69	7.97	5.16	6.56
10800	5.63	7.27	8.20	5.39	8.20	7.50	7.27	4.69

Tabela 7 – Valores das frequências correspondentes aos dois picos (f1 e f2) identificados nos espectros medidos nos pontos P1 e P2, obtidos na condição C02.

fmax (Hz)	Condição 02							
	u				w			
30	P1		P2		P1		p2	
t (s)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)
120	5.86	8.20	5.87	7.50	8.44	4.45	4.92	8.20
240	5.63	8.67	5.63	7.50	7.73	5.16	8.67	5.16
600	6.09	9.38	6.33	4.92	8.20	4.92	7.97	6.09
1800	6.56	8.20	8.44	5.63	7.50	6.80	6.33	4.69
3600	8.20	4.92	2.81	4.92	7.50	4.69	4.69	7.50
7200	4.22	5.39	4.92	5.39	7.03	4.45	5.39	6.33
10800	4.69	8.67	5.63	8.67	6.80	4.22	4.92	6.80

4.3. RELAÇÃO ENTRE OS MAPAS DE VELOCIDADE E GEOMETRIA DO LEITO

Nas Figuras 81 a 87, são apresentados os mapas de velocidade e da geometria do leito, referentes às duas condições, para os instantes $t=120s$, $t=240s$, $t=600s$, $t=1800s$, $t=3600s$, $t=7200s$ e $t=10800s$. Para $t=120s$ (Figura 81) é já evidente a existência de dois vórtices nas duas condições de ensaio. Tal pode indicar que assim que o jato incide no leito e escoamento a jusante, começa a formação do sistema cavidade-barragem e dos dois vórtices, aparentemente simétricos.

A análise dos mapas apresentados nas Figuras 81 a 87 permite analisar a variação da posição longitudinal do centro dos vórtices ao longo do tempo, verificando-se que esta varia até cerca de 0.3m (ordem de grandeza), para $t=3600s$, mantendo-se sensivelmente constante a partir deste instante, para as duas condições, o que parece indicar que a partir deste instante a variação da configuração do leito não afeta a posição do vórtice.

A comparação entre os mapas de velocidade e geometria do leito obtidos para as duas condições, caracterizadas por duas alturas de escoamento a jusante diferentes (C01 – $h = 5$ cm; C02 – $h = 3$ cm), permite concluir que na condição C02, definida por uma altura do escoamento jusante menor, a barra

torna-se mais plana e mais espalhada na bacia dissipação o que pode justificar o facto de os vórtices identificados nesta condição serem menos distorcidos que na condição C01, por ficarem limitados pela própria barra. Por outro lado, é evidente, desde o primeiro instante medido ($t=120s$), uma maior divergência dos vetores da velocidade na condição C02, resultante da menor altura do escoamento nesta condição e da consequente forma da barra.

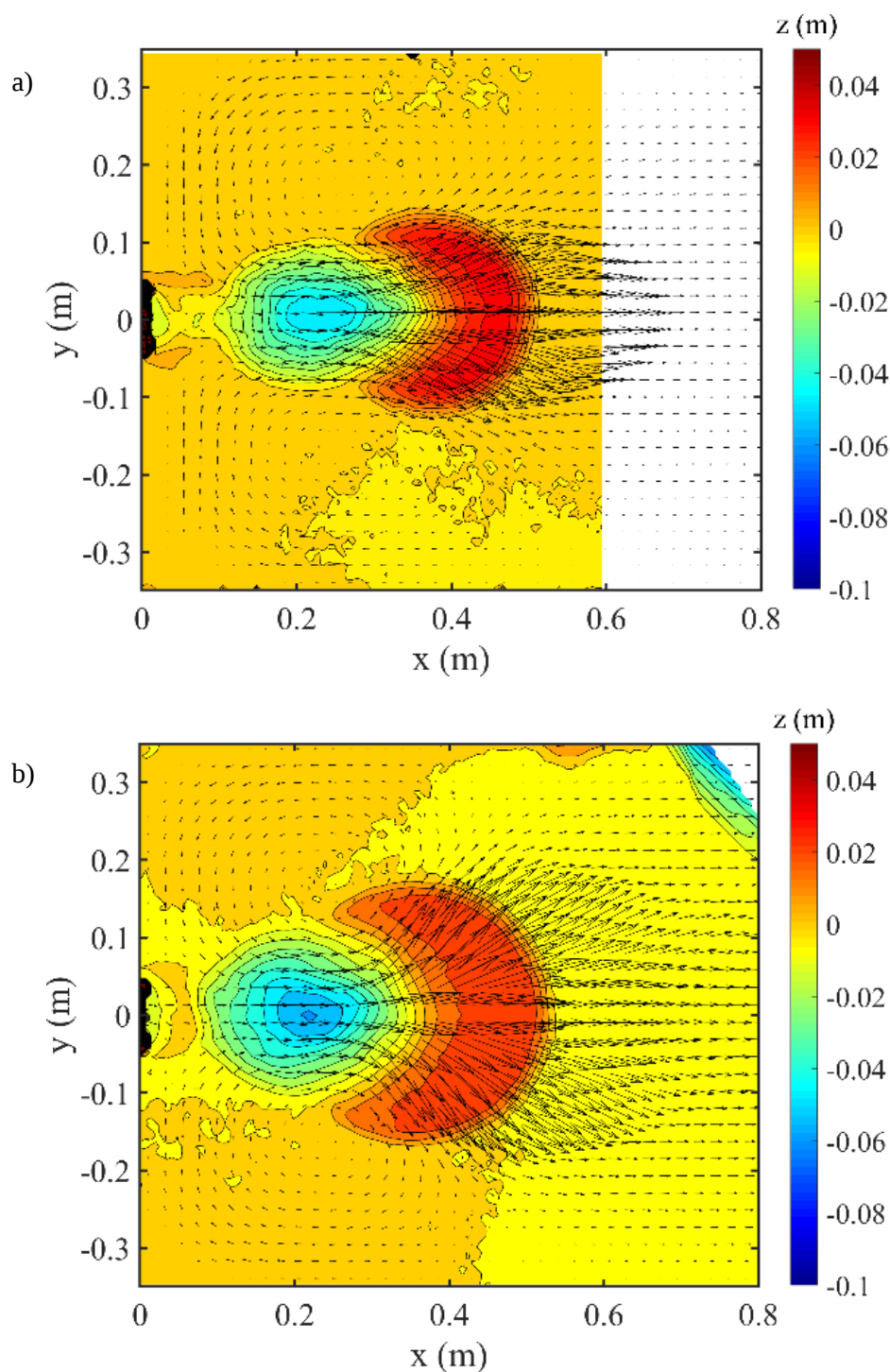


Figura 81 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=120s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

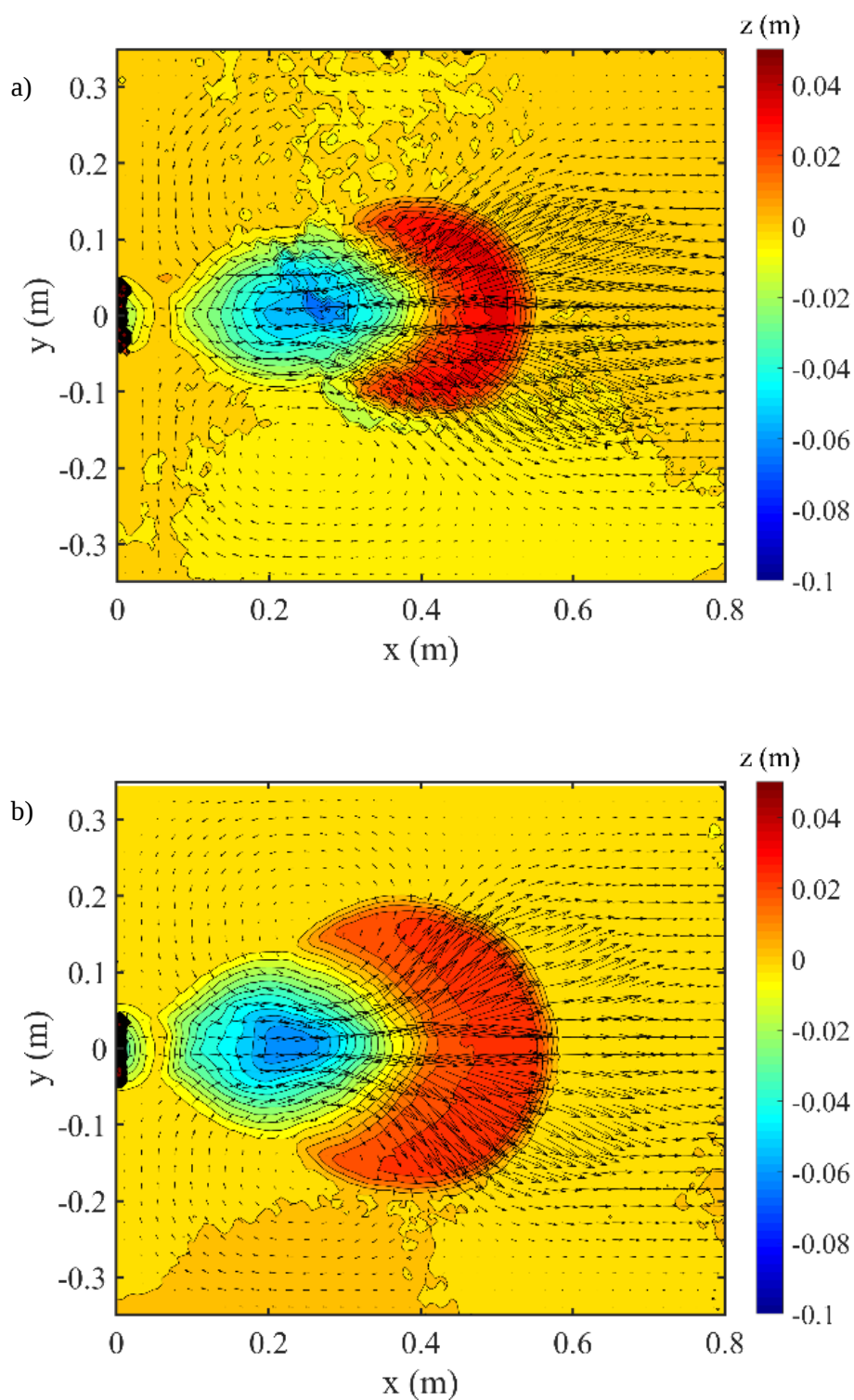


Figura 82 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=240s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

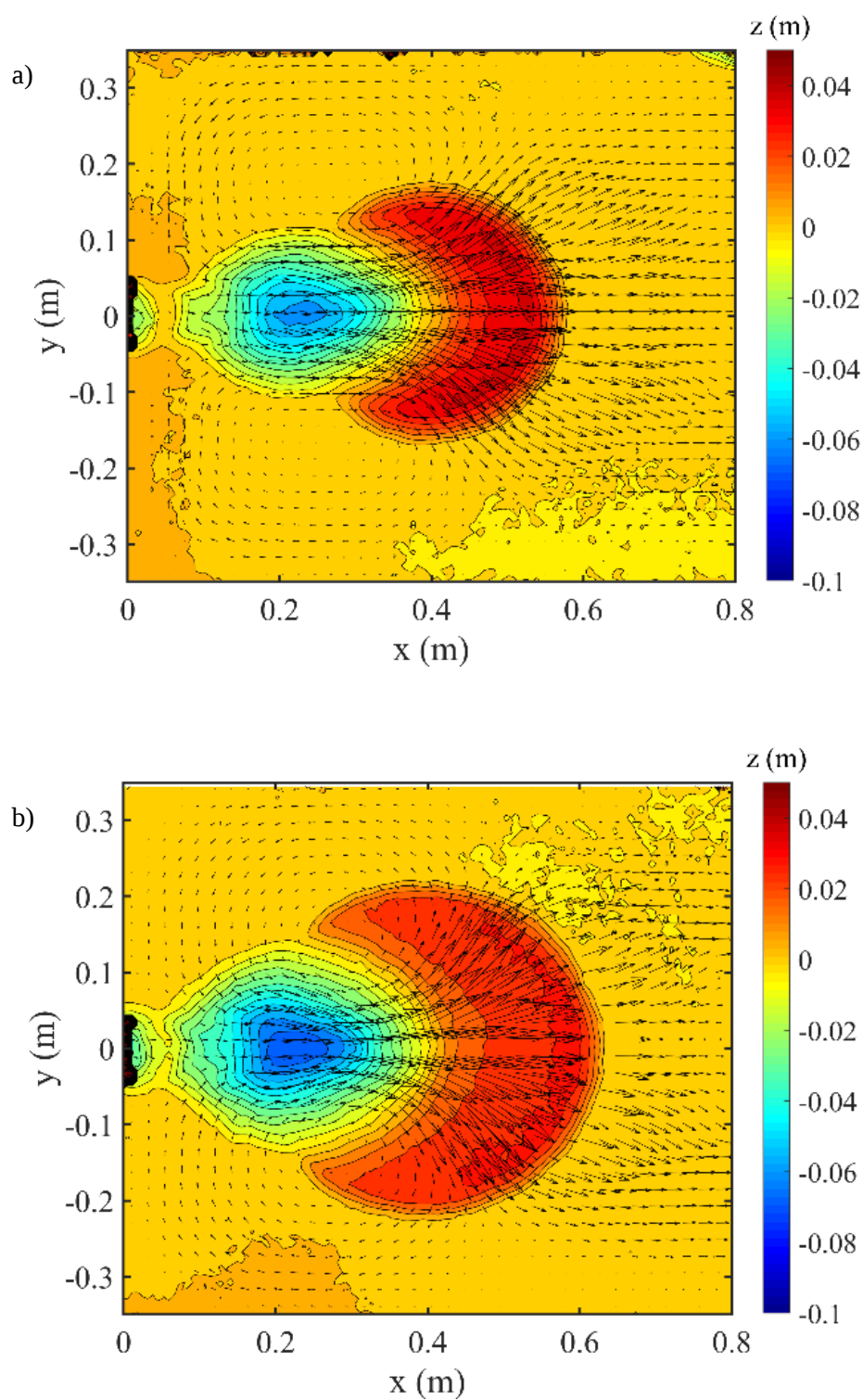


Figura 83 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=600s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

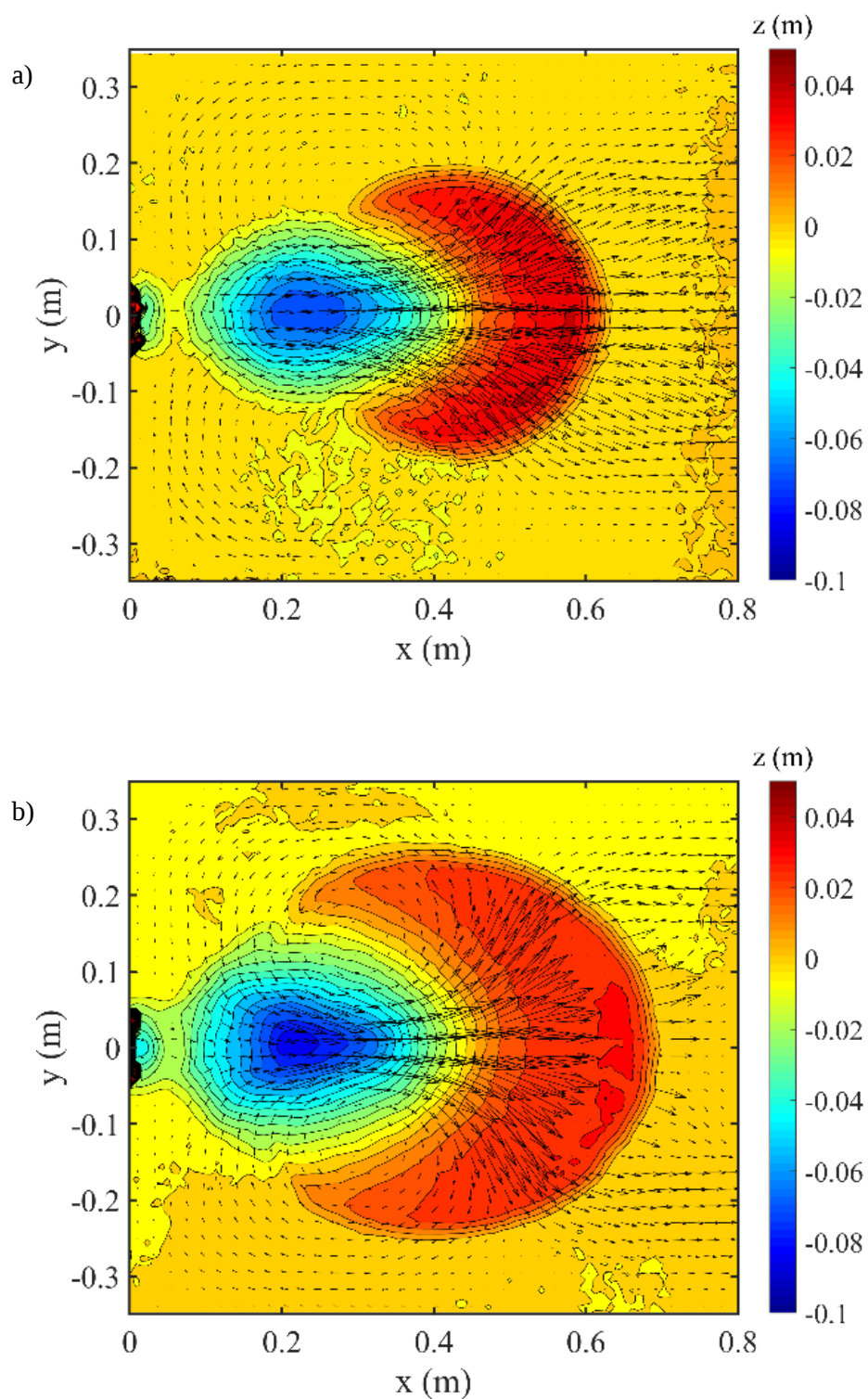


Figura 84 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=1800s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

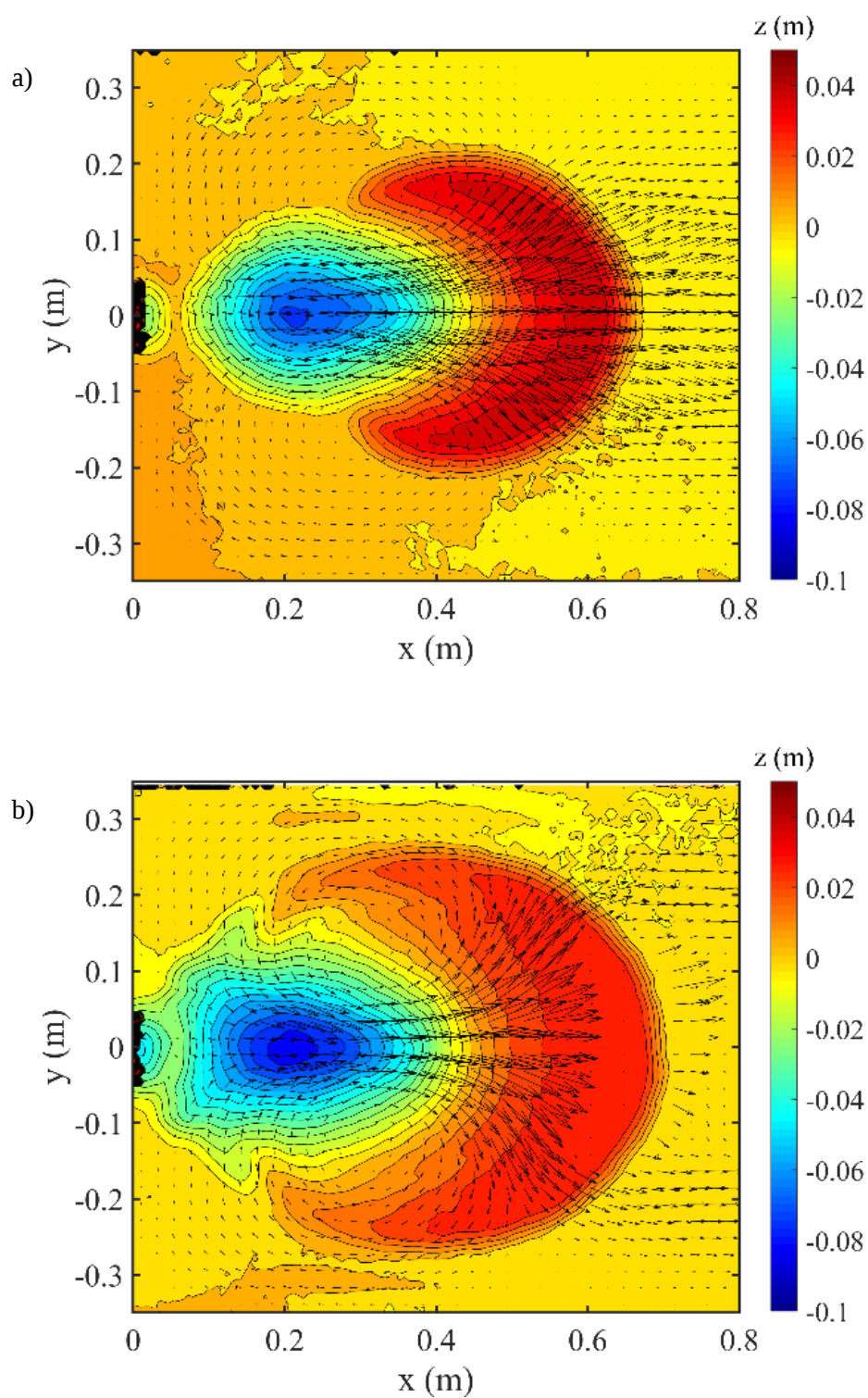


Figura 85 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=3600s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

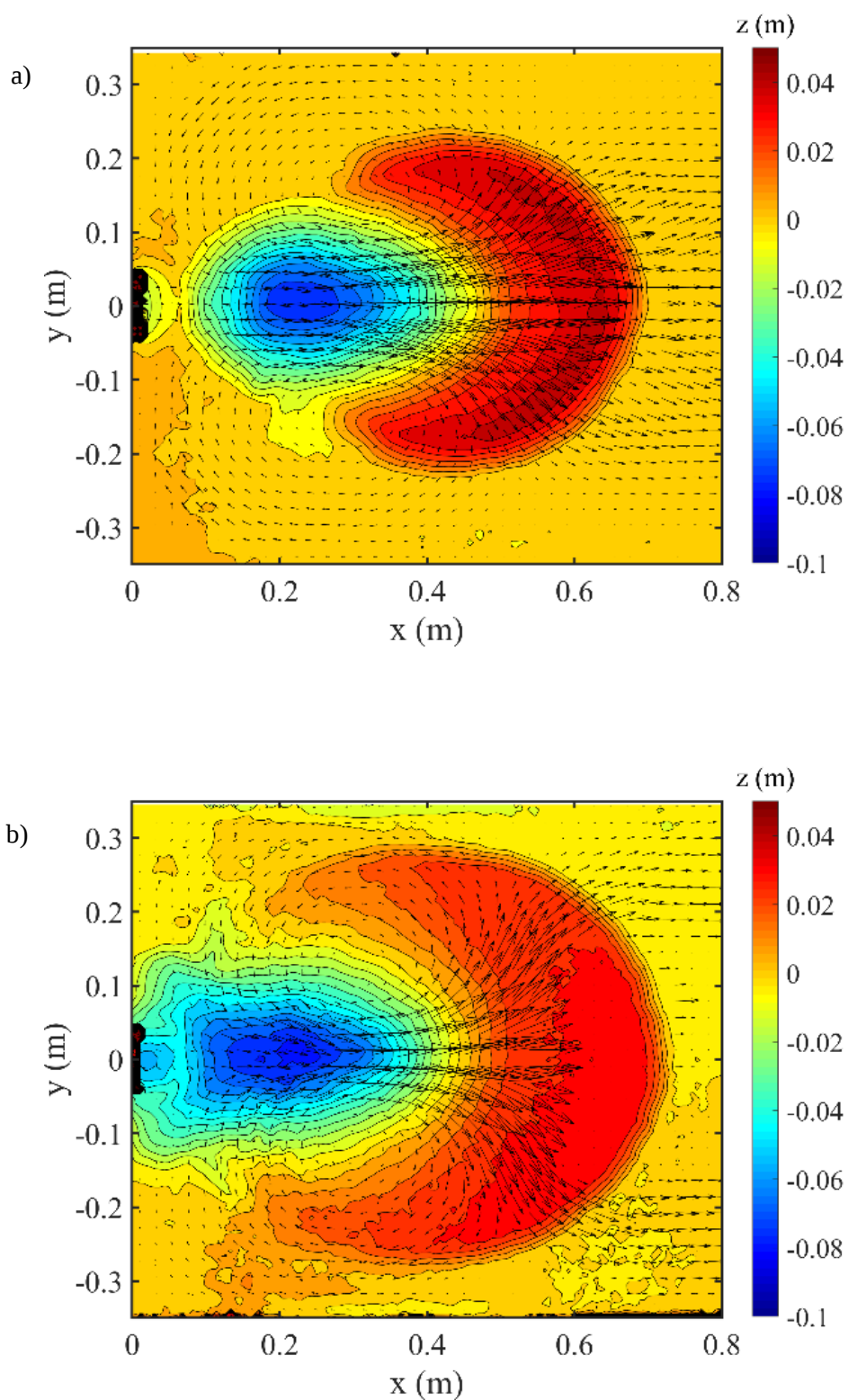


Figura 86 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=7200s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

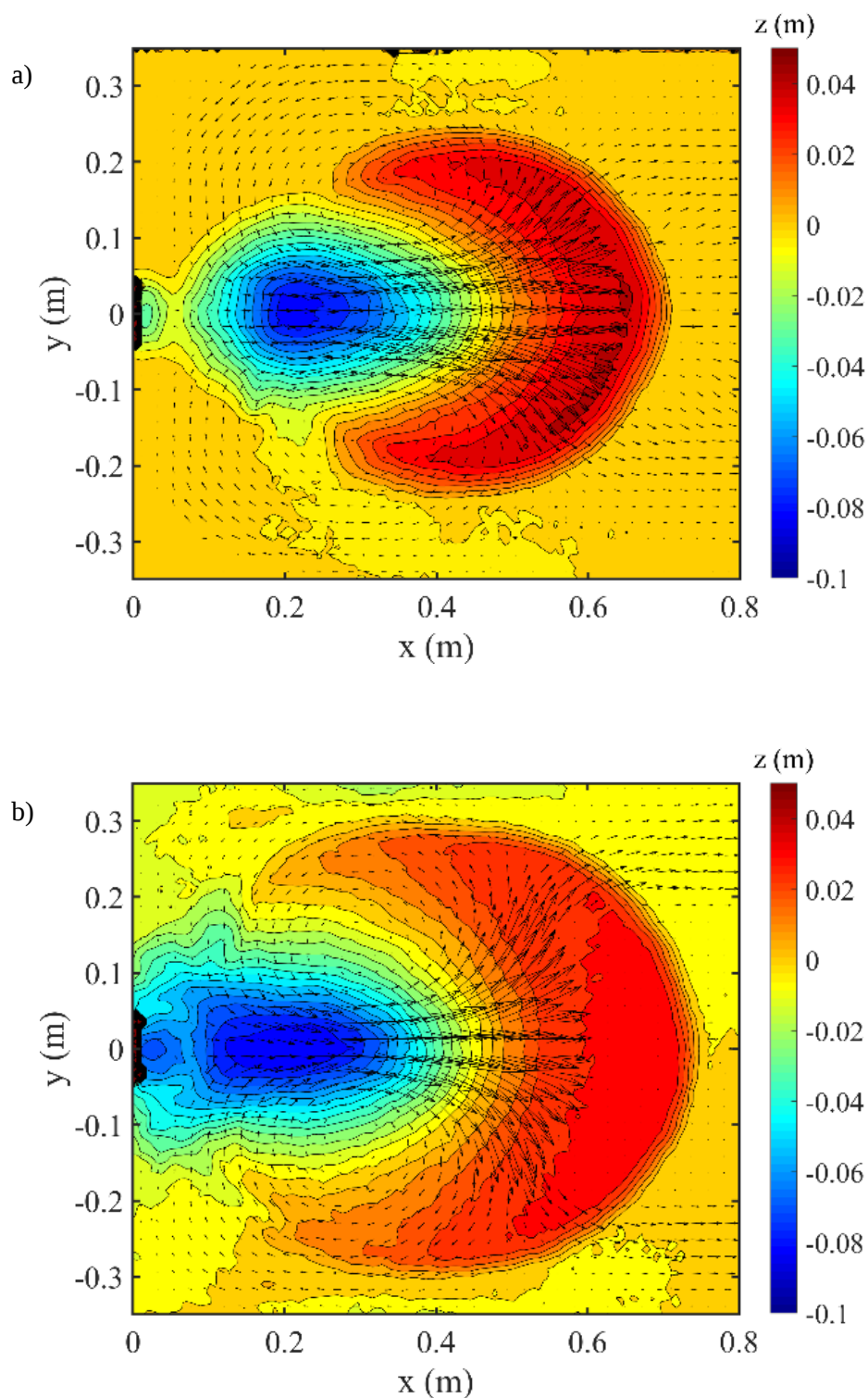


Figura 87 – Relação entre o mapa de velocidade e a geometria do leito para $t=10800s$, nas condições C01 (a) e C02 (b).

5.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo dedicado à hidrodinâmica do escoamento numa bacia de dissipação dotada de um leito móvel, na qual incide um jato em salto de esqui instalado a jusante de um descarregador em degraus. O principal objetivo deste estudo consistiu na caracterização do campo de velocidades na superfície livre.

Dada a complexidade da metodologia experimental, associada à medição de velocidades, e a grande quantidade de dados gerada, limitou-se a análise da variação temporal do campo de velocidade 7 instantes (120, 240, 600, 1800, 3600, 7200 e 10800 segundos).

A repetibilidade do fenómeno foi aferida através da realização de dois tipos de ensaios: pára-arranca e ensaio com duração de 3h, verificando-se que as diferenças não eram significativas. Por outro lado, os perfis longitudinais do sistema cavidade-barra e os valores das variáveis geométricas mais relevantes foram comparados com os de Santos (2020), concluindo-se que a maior parte dos valores (90%) correspondem a diferenças inferiores a 5%.

As velocidades foram medidas com recurso a PIV, conseguindo-se assim obter o campo de velocidade na superfície livre do escoamento da bacia de dissipação. Determinaram-se os campos médios da velocidade, das flutuações turbulentas, das tensões de Reynolds e da vorticidade. Através dos mapas de velocidade média foi possível: (i) identificar a formação de dois vórtices simétricos antes da barra, (ii) observar o escoamento quasi-radial sobre a barra e (iii) a quase inexistência de vetores sobre a barra, em particular para a condição C02, mostrando a influência da altura do colchão de água em todos os instantes. Qualitativamente, concluiu-se que os vórtices da condição C02 são menos distorcidos na direção longitudinal que na condição C01.

Relativamente às variáveis turbulentas, verificou-se que as maiores intensidades de turbulência ocorrem na zona de incidência do jato. Verificou-se, igualmente, que na região definida por $y > 0$, as tensões de Reynolds ($-u'v'$) são negativas devido à rotação no sentido anti-horário do vórtice.

A análise dos mapas da vorticidade permitiu confirmar a localização dos vórtices e das duas camadas de corte geradas pelo jato incidente. Concluiu-se que a vorticidade é positiva (rotação anti-horária) no vórtice situado para $y > 0$ e negativa (rotação no sentido horário) para o vórtice situado em $y < 0$. Verificou-se igualmente que a vorticidade é diferente de zero mas não é constante dentro dos vórtices.

A partir dos perfis de velocidade definidos ao longo do eixo longitudinal verificou-se que os vórtices são do tipo forçado porém, não obedecem a uma relação linear (equação 6), exceto para a condição C01, $t=120s$.

Da análise dos espectros, foi possível identificar dois picos de frequência para cada vórtice. No entanto, verificou-se que estas frequências não são constantes nem no tempo nem no espaço.

A sobreposição dos campos de velocidade com geometria do leito permitiu confirmar as observações relacionadas com a divergência do campo de velocidades sobre a barra bem como a maior distorção dos vórtices da condição C01 em relação à condição C02. Verificou-se que a posição longitudinal do centro dos vórtices varia até $t=3600s$ mantendo-se sensivelmente constante a partir deste instante, nas duas condições.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta o trabalho desenvolvido e a grande quantidade de dados gerada, sugere-se, para trabalhos futuros:

- Completar a análise de dados existente para os ensaios com 3h de duração;
- Aumentar a largura do modelo da bacia de restituição para diminuir a influência das condições fronteira e consequentemente evitar a recirculação;
- Testar outras condições hidrodinâmicas que permitam identificar as condições que originam a formação dos vórtices.
- Testar caudais superiores para analisar a influência das características da bacia na hidrodinâmica do escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 39, pp. 159–169.
- Adrian, R. J. e Westerweel, J. (2011). *Particle Image Velocimetry*. Cambridge University Press.
- Aleixo, R., Carvalho, E., Lima, M. M. e Ferreira, R. (2020). Determinação dos campos de velocidades de escoamentos bifásicos usando PIV-PTV. *Revista Recursos Hídricos* Vol. 47 N°. 1 p. 9-15. DOI: 10.5894/rh41n1-cti1
- Alias, N.A., Mohamed, T.A., Ghazali, A.H. e Noor, M.J.M.M. (2008). *Impact of takeoff angle of bucket type energy dissipater on scour hole*. *American Journal of Applied sciences*, 5(2), 117-121.
- Alireza, P., Mahmood, S.B. e Habib, M.J.S. (2008). *Impact of lip angle of flip bucket energy dissipater on scour hole*. J. Krobe and I. Sakellaris, ed. 3rd IASME/ WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, 23-25 February 2008 Cambridge. WSEAS Press, 126-130
- Azmathullah, H.M., Deo, M.C., Bhajantri, M.R. e Deolalikar, P.B., 2004. Scour at the base of flip-bucket spillways. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 10(2), 121-129.
- Beheshti, A. A. e Ataie-Ashtiani, B. (2016). Scour Hole Influence on Turbulent Flow Field around Complex Bridge Piers. *Flow Turbulence Combust*, 97:451–474. DOI 10.1007/s10494-016-9707-8
- Bombardelli, F.A. e Gioia, G., 2006. Scouring of granular beds by jet-driven axisymmetric turbulent cauldrons. *Physics of Fluids*, 18(8), 088101.
- Cooley, J. W. e Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.* 19 (90): 297–301. doi:10.2307/2003354. JSTOR 2003354.
- Damle, P.M., Venkatraman, C.P. e Desai S.C. (1966). Evaluation of scour below ski-jump buckets of spillways. *CWPRS Golden Jubilee Symposia*, Poona, Vol. 1, 154-163.
- Dargahi B. 2003. Scour development downstream of a spillway. *J Hydraul Res.* 41(4): 417-426.
- Das, S., Das, R. and Mazumdar, A. (2013). Circulation characteristics of horseshoe vortex in scour region around circular piers. *Water Science and Engineering*, 6(1): 59-77. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.01.005
- Eggenberger, W. e Müller, R. (1944). Experimentelle und theoretische untersuchungen über das Kolkproblem, *Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau* 5, Zürich: Leemann
- Figueiredo, N., Carvalho, E. e Taveira Pinto, F. (2014). Scour Analysis Downstream a Converging stepped Spillway Equipped with a Ski Jump Bucket. 3rd IAHR Europe Congress. Porto. Portugal.
- Franke, P.G. (1960). *L'affouillement: mécanisme et formes*. Oesterreichische Wasserwirtschaft (Tradução nº. 681 da Electricité de France).
- Ghodsian, M., Faradonbeh, A.A. e Abbasi, A.A. (1999). Scour downstream of free overfall spillway. 28th IAHR World Congress, 22-27 August, Graz, Austria
- Ghodsian, M., Mehraein, M. e Ranjbar, H.R. (2012). Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment. *Scientia Iranica*, 19(6), 1437-1444.
- Guan, D., Chiew Y-M, Wey M., Hsieh S-C. (2019). Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier. *International Journal of Sediment Research*. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2018.07.001

- Habib, A.A., Fahmy, M.R. e Taha, N.M. (2016). Scour characteristics downstream converging spillways. *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, 19(1), 258-266.
- Hartung, W. (1959). Die Kolkbildung hinter Überstromten Wehren im Hinblick auf eine beweglich Sturzbettgestaltung. *Die Wasser wirtschaft*, 49 (1), 309-313
- Heng, S., Tingsanchali, T. e Suetsugi, T. (2013). Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket. C.A. Brebbia, eds. *River Basin Management VI*. WIT Press, 12, 251-262
- Hoffmans, G.J.C.M. (1998). Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4), 430-437.
- Jaeger, C. (1939). Über die Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellversuchen. *Wasserwirtschaft und Wassertechnik*. 34(23/27) (em Alemão)
- Li, F.-C., Kawaguchi, Y., Segawa, T. e Suga, K. (2005). Wave-turbulence interaction of a low-speed plane liquid wall-jet investigated by particle image velocimetry. *Physics of Fluids* 17. DOI: 10.1063/1.1941363
- Machado, L. (2016). Análise da erosão a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esquí. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Machado, L., Lemos Lima, M. M., Aleixo, R. e Carvalho, E. (2017). Estudo experimental da erosão a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esquí. *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. FEUP. Porto*.
- Martins, R. (1984). Cálculo da profundidade de escavações provocadas por jactos oriundos de descarregadores com trampolim. *Memória nº634. LNEC*
- Mason P.J. e Arumugam K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111(2): 220-235.
- Mason, P.J. (1989). Effects of air entrainment on plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(3), 385-399.
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica*. FEUP Edições.
- Meynart, R. (1982). Digital image processing for speckle flow velocimetry. *Rev. Sci. Instrum.* 53. pp. 110-111
- Mikhalev, M.A. (1960). Determination of the Depth of Scour in Erodible Foundations by a Falling Jet. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 9
- Mirskhulava, T.E., Dolidze, I.V. e Magomedova, A.V. (1967). Mechanism and computation of local and general scour in non-cohesive, cohesive soils and rock beds. 12th IAHR Congress, Fort Collins, 3, 169-176
- Muste, M., Aberle, J., Admiraal, D., Ettema, R., Garcia, M. H., Lyn, D., Nikora, V., Rennie, C. (Editors) (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management, Two Volume Set (IAHR Monographs) 1st Edition*, CRC Press.
- Naini, S. (2011). Evaluation of RBF, GR and FFBP neural networks for prediction of geometrical dimensions of scour hole below ski-jump spillway. *International Conference on Environmental and Computer Science*, Singapore, 19, 89-93

- Novais-Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*, volume 2. Porto Editora, Porto.
- Patrashev, A.N. (1937). Détermination de la profondeur maximale de l'érosion du sol par une nappe tombante. *Izvestiya VNIIG*. 21.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S., Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-72308-0
- Rajaratnam, N. e Berry, B. (1977). Erosion by Circular Turbulent Wall Jets. *J Hydraul Res*. 3: 277-289. DOI: 10.1080/00221687709499648
- Ramos, P. X., Bento, A. M., Maia, R e, Pêgo, J.P. (2016). Characterization of the scour cavity evolution around a complex bridge pier. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2), 128-137
- Rosa, S. (2019). Estudo da influência do ângulo de saída do trampolim em salto de esquí na erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rubinstein, G.L. (1963). Laboratory investigation of local erosion on channel beds below high overflow dams. *Transactions of Coordination Conferences on Hydraulic Engineering*. Vol. VII. Conference on Hydraulics of High Head Water Discharge Structures. Gosenergoizdat M.L.
- Santos, R. (2020). Erosão a jusante de um descarregador convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Evolução temporal e transporte sólido. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Santos, R., Carvalho, E., Lima, M. M. e Aleixo, R. (2021). Time evolution of the scour induced by a ski jump jet. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. DOI: 10.1080/23249676.2021.1919226
- Sá Machado, L., Lima, M.M.C.L., Aleixo, R. e Carvalho, E. (2019). Effect of the ski jump bucket angle on the scour hole downstream of a converging stepped spillway. *International Journal of River Basin Management* (aceite para publicação).
- Schoklitsch, A. (1935). Prevention of scour and energy dissipation. Denver. (Traduzido pelo Bureau of Reclamation, Denver, do texto original em alemão "Kolkbauwehr und Stauraumberlandung", Berlin, Julius Springer, 17-183).
- Sveen, J.K. (2004) An introduction to MatPIV v. 1.6.1, <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-27806>
- Tuna, M.C. (2012). Effect of offtake channel base angle of stepped spillway on scour hole. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil engineering*, 36(2), 239-251.
- Veronese, A. (1937). Erosioni di fondo a valle di uno scarico. *Annali dei Lavori Pubblici*, 75(9), 717-726.
- White, F. M. (1994). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, New Jersey, USA, 3rd edition.
- Wu, C.M. (1973). Scour at downstream end of dams in Taiwan. *International Symposium on River Mechanics*, Bangkok, I (A-13), 1-6
- Yildiz, D. e Üzücek, E. (1994). Prediction of scour depth from free falling flip bucket jets. *International Water Power and Dam Construction*, 46(11), 50-56
- Yildiz, D. e Üzücek, E. (1996). Scour depth prediction from free falling flip bucket jets. *Teknik Dergi*, 7(4), 1255-1273.

Erosão a jusante de um descarregador em degraus convergente equipado com um trampolim em salto de esquí. Análise do campo de velocidades na superfície livre.
