



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.19.15.58-TDI

## **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO INERTE TURBULENTO NUM BANCO DE ESTUDO DE INSTABILIDADE DE COMBUSTÃO USANDO PIV**

Samuel Carvalho de Souza Leal

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelo Dr. Wladimir Mattos da Costa Dourado, aprovada em 07 de novembro de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UE5P7S>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

### **Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.19.15.58-TDI

## **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO INERTE TURBULENTO NUM BANCO DE ESTUDO DE INSTABILIDADE DE COMBUSTÃO USANDO PIV**

Samuel Carvalho de Souza Leal

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelo Dr. Wladimir Mattos da Costa Dourado, aprovada em 07 de novembro de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UE5P7S>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Leal, Samuel Carvalho de Souza.

L473i      Investigação experimental de escoamento inerte turbulento num banco de estudo de instabilidade de combustão usando PIV / Samuel Carvalho de Souza Leal. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xl + 290 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.19.15.58-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientador : Dr. Wladimir Mattos da Costa Dourado.

1. Escoamento turbulento. 2. Instabilidade de combustão.  
3. Velocimetria por imagem de partícula. I.Título.

CDU 662.613

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Samuel Carvalho de Souza Leal**

Título: "INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO INERTE TURBULENTO NUM BANCO DE ESTUDO DE INSTABILIDADE DE COMBUSTÃO USANDO PIV"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

**Engenharia e Tecnologia  
Espaciais/Combustão e Propulsão**

Dr. Wladimir Mattos da Costa Dourado

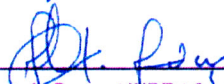


Presidente / Orientador(a) / IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Marcio Teixeira de Mendonça

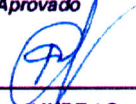


Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Roman Ivanovitch Savonov



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Bruno Peruchi Trevisan



Convidado(a) / IAE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado  Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 07 de novembro de 2019



*A minha família e a Deus*





## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Wladimir Dourado por conduzir-me no desenvolvimento do presente trabalho, por compartilhar seu conhecimento técnico-científico e sua experiência, por sua paciência e disposição em assistir nos desafios e dificuldades, e pela oportunidade na realização deste trabalho.

Gratifico Bruno Trevisan por compartilhar os resultados da pesquisa do seu doutorado e ter me assistido em diversos momentos.

Ao Rafael Verdelli e ao Fábio Rodolfo agradeço por ter me assistido e acompanhado as diversas atividades experimentais.

Agradeço aos funcionários e técnicos da Divisão de Propulsão Espacial do Instituto de Aeronáutica e Espaço por ajudaram na resolução de diversos problemas encontrados no decorrer do presente projeto de pesquisa. Similarmente agradeço aos funcionários, técnicos e pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) e do Laboratório de Combustão e Propulsão (LCP). Agradeço aos integrantes do corpo docente e demais pesquisadores do INPE por ter compartilhado seus conhecimentos em diversas áreas do conhecimento e colaborado na realização deste trabalho. Grato à CAPES pela bolsa de estudos.

Agradeço também ao Sr. Alex pelas orientações que me encaminharam à pós-graduação do INPE. Gratifico pelo apoio e encorajamento da Dona Sônia e seu filho Vinicius durante um dos momentos difíceis que transitei. Gratifico também ao Sr. Tales pela sua ajuda.

Gostaria de agradecer meus amigos Deborah Rezende, Everlyn Martins, Jhenifer Fofano e Lucas Zavarelli pela amizade e pelas suas amistosas contribuições a este trabalho. Agradeço também aos demais amigos que direta ou indiretamente me apoiaram.

Meus agradecimento aos meus pais, José Leal e Márcia Carvalho pelo apoio dado, pelos encorajamentos e pelos conselhos dados em diversos momentos. Agradeço aos meus tios Marcos Carvalho e Célia Carvalho pelo apoio e ajuda dada. Similarmente, agradeço também à tia Ina e sua família, à minha avó Dorcas e aos demais familiares que me assistiram de uma forma ou de outra.



## RESUMO

No intuito de contribuir para o desenvolvimento nacional de sistemas de combustão adaptados a instabilidade termo-acústica, o presente trabalho investigou as características do escoamento inerte turbulento, no caso, o ar, em uma câmara de combustão usando Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV). A utilidade da investigação do escoamento inerte turbulento no estudo da instabilidade termo-acústica, está na comparação das suas características com as do escoamento reativo. A partir desta comparação, torna-se possível identificar os efeitos da combustão no escoamento turbulento e, conseqüentemente, caracterizar a instabilidade de combustão. Atualmente, este fenômeno físico é um dos principais problemas dos sistemas de combustão, tanto que diversas pesquisas são realizadas para analisar e investigar meios de controlá-la. A instabilidade de combustão, que se compõe de oscilações termo-acústicas de alta amplitude, diminui o desempenho dos motores, prejudica o controle das emissões de poluentes e danifica diversos componentes dos motores. Para evitar estes efeitos indesejáveis, diversas técnicas e adaptações foram desenvolvidas nos combustores para minimizar ou eliminar a instabilidade termo-acústica. A presente investigação utilizou um combustor de geometria retangular alimentado com ar em condições atmosféricas. Três injetores planos estão instalados no combustor mas permaneceram desligados durante as medições. Dados de diversos parâmetros caracterizadores do escoamento turbulento foram obtidos nas regiões a montante e a jusante dos injetores. Nas análises do presente trabalho, foi observado que o escoamento turbulento é plenamente desenvolvido na região a montante dos injetores. Na região a jusante dos injetores, foi verificada zonas de recirculação e produção de vórtices nas camadas de cisalhamento localizadas nas bordas destes. Também foi constatado que as estruturas coerentes de larga escala são disseminadas e dissipadas ao longo da direção longitudinal da região principal. Somado a isso, observou-se que, em diversos aspectos, o escoamento turbulento foi afetado pelo cisalhamento provocado pelas paredes em ambas as regiões. Parte dos resultados da investigação, que utilizou Velocimetria Laser de Efeito Doppler (LDV) no mesmo combustor, foi comparada com os resultados desta investigação. Nesta comparação, foi constatado boa convergência entre os resultados dos dois trabalhos na região de entrada e em diversos aspectos na região principal.

Palavras-chave: escoamento turbulento. instabilidade de combustão. velocimetria por imagem de partícula.



# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TURBULENT INERT FLOW IN COMBUSTION INSTABILITY RESEARCH BEACH USING PIV

## ABSTRACT

In order to contribute to the national development of combustion systems adapted to thermo-acoustic instability, the present work investigated the inert turbulent flow characteristics, in the case, air, in a combustion chamber using Particle Image Velocimetry (PIV). The usefulness of inert turbulence flow investigation in the study of thermo-acoustic instability lies in the comparison of its characteristics with reactive flow characteristics. From this comparison, it becomes possible to identify combustion effects in turbulent flows and, consequently, characterize combustion instability. Nowadays, this physical phenomenon is one of the main problems of combustion systems, and a large number of investigations are performed to analyze and investigate the means of controlling it. Combustion instability, which results in high-amplitude thermo-acoustic oscillations, decreases engine performance, impairs control of pollutant emissions and damages various engine components. To avoid these undesirable effects, various techniques and adaptations have been used in combustors to reduce or eliminate thermo-acoustic instability. The present investigation used a air-breathing combustor with rectangular geometry in atmospheric conditions. Three flat injectors are installed in the combustor but have remained switched off during the measurements. Data from several parameters characterized by turbulent flow were obtained in the upstream and downstream regions of the injectors. In the present work, it was observed that the turbulent flow is fully developed in the upstream region of the injectors. In the downstream region of the injectors, zones of recirculation and vortex production in the shear layers located at the edges were detected. It has also been found that coherent large scale structures are disseminated and dissipated along the longitudinal direction of the main region. Moreover, it was observed that, in many ways, the turbulent flow was affected by the shear caused by the walls in both regions. Part of the research results, which used the Doppler Effect Laser Velocimetry (LDV) in the same combustor, was compared with the results of this research. In this comparison, good convergence was found between the results of the two studies in the entrance region and in several aspects in the main region.

Keywords: combustion instability. particle image velocimetry. turbulent flow.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Arranjo da técnica PIV. . . . .	17
2.2 Vórtice com partículas traçadoras e o campo de velocidade do escoamento correspondente. . . . .	17
2.3 Esquema do funcionamento do PIV. . . . .	18
2.4 (a) Avaliação por auto-correlação e (b) avaliação por correlação cruzada. . . . .	19
2.5 Imagem instantânea de uma esteira atrás de um cilindro. . . . .	28
3.1 Banco de estudos experimentais de instabilidade de combustão e esquema do BEIC obtido em Trevisan (2018). . . . .	42
3.2 Dimensões e esquema da câmara de combustão e esquema dos injetores. . . . .	44
3.3 (a) Região de entrada da câmara de combustão; (b) região principal da câmara de combustão; (c) câmara de combustão. . . . .	45
3.4 Layout típico do duplo <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	46
3.5 Câmera CCD utilizada no PIV. . . . .	47
3.6 Erros proporcionais de $\bar{u}$ das amostras na região principal. Incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	53
3.7 Erros proporcionais de $\bar{u}$ das amostras na região principal. Incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	54
3.8 Erros proporcionais de $\bar{u}$ das amostras na região de entrada. Incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	55
4.1 Localizações em $x/(h/2)$ , $y/(h/2)$ , $z/(h/2)$ e $y^+$ das seções horizontais e verticais na região de entrada da câmara de combustão: (a) vista lateral; (b) vista frontal. . . . .	58
4.2 Evolução de $\overline{u'v'} - \nu(d\bar{u}/dy)$ em $y/(h/2) - 1$ na seção vertical central da região de entrada. . . . .	60
4.3 Isocontornos da velocidade longitudinal média e da velocidade normal média. Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,09$ m/s e de $\bar{v} = \pm 0,06$ m/s, incerteza de $x/(h/2) = \pm 0,01$ e de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	62
4.4 Campo vetorial da velocidade instantânea em dado instante de tempo (seção vertical central da região de entrada). Incerteza de $x/(h/2) = \pm 0,01$ e de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	63

4.5	perfis transversais horizontais da velocidade longitudinal média e da velocidade transversal média nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,11 \text{ m/s}$ e de $\bar{v} = \pm 0,07 \text{ m/s}$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	65
4.6	Perfis transversais verticais da velocidade longitudinal média e da velocidade normal média nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,10 \text{ m/s}$ e de $\bar{v} = \pm 0,07 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,60 \text{ m/s}$ e de $\bar{v} = \pm 0,40 \text{ m/s}$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	66
4.7	Evolução da velocidade média $\bar{u}^+$ em $y^+$ nas seções verticais da região de entrada. . . . .	67
4.8	Evolução da velocidade média $\bar{u}^+$ em $z^+$ nas seções horizontais da região de entrada. . . . .	68
4.9	Isocontornos da velocidade longitudinal média no plano $yz$ na região de entrada: (a) seções verticais, (b) seções horizontais. Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,10 \text{ m/s}$ , incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ e de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	69
4.10	Isocontornos da flutuação longitudinal média $\sqrt{u'^2}$ e da flutuação transversal média $\sqrt{v'^2}$ na seção vertical $z/(h/2) = 0$ da região de entrada. Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,06 \text{ m/s}$ e de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ , incerteza de $x/(h/2) = \pm 0,01$ e de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	70
4.11	Isocontornos do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'v'}$ na seção vertical $z/(h/2) = 0$ da região de entrada. Incerteza média de $\overline{u'v'} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ , incerteza de $x/(h/2) = \pm 0,01$ e de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	71
4.12	perfis transversais horizontais das flutuações médias $\sqrt{u'^2}$ e $\sqrt{v'^2}$ e do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'w'}$ nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,08 \text{ m/s}$ , de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,06 \text{ m/s}$ e de $\overline{u'w'} = \pm 0,08 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	73
4.13	Perfis transversais verticais das flutuações médias $\sqrt{u'^2}$ e $\sqrt{v'^2}$ e do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'v'}$ nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,08 \text{ m/s}$ , de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ e de $\overline{u'v'} = \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . LDV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,39 \text{ m/s}$ , de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,27 \text{ m/s}$ e de $\overline{u'v'} = \pm 0,29 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	74



4.14	Bidimensionalidade de $\bar{u}$ e $\bar{v}$ na região de entrada, obtida a partir das medições com PIV e comparada com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,11 \text{ m/s}$ e de $\bar{v} = \pm 0,07 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,65 \text{ m/s}$ e de $\bar{v} = \pm 0,46 \text{ m/s}$ . incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	76
4.15	Bidimensionalidade de $\sqrt{u'^2}$ e $\sqrt{v'^2}$ na região de entrada, obtida a partir das medições com PIV e comparada com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,08 \text{ m/s}$ e de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,41 \text{ m/s}$ e de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,30 \text{ m/s}$ . incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	77
4.16	perfis transversais horizontais da intensidade turbulenta nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $k = \pm 0,13 \text{ J}$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	78
4.17	Perfis transversais verticais da intensidade turbulenta nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $k = \pm 0,11 \text{ J}$ . LDV: Incerteza média de $k = \pm 0,33 \text{ J}$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	79
4.18	perfis transversais horizontais do coeficiente de anisotropia $C_{uw}$ , $A_{uw}$ e $R_{uw}$ nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $C_{uw} = \pm 0,12$ , de $A_{uw} = \pm 0,08$ e de $R_{uw} = \pm 0,66$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	81
4.19	Perfis transversais verticais do coeficiente de anisotropia $C_{uv}$ , $A_{uv}$ e $R_{uv}$ nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $C_{uv} = \pm 0,12$ , de $A_{uv} = \pm 0,08$ e de $R_{uv} = \pm 1,17$ . LDV: Incerteza média de $C_{uv} = \pm 1,20$ , de $A_{uv} = \pm 0,84$ e de $R_{uv} = \pm 2,08$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	82
4.20	perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de $u'$ e de $w'$ nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,17$ e de $r_{ww} = \pm 0,16$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	84
4.21	Perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de $u'$ e de $v'$ nas seções verticais na região de entrada. Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,18$ e de $r_{vv} = \pm 0,17$ , incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	85
4.22	Localizações dos pontos das correlações espaciais em função de $\xi$ na região de entrada da câmara de combustão: (a) vista lateral; (b) vista frontal. 86	

4.23	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ e de $v'$ em função de $\xi_1$ e de $\xi_2$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,14$ e de $r_{vv} = \pm 0,12$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	87
4.24	Perfis da correlação cruzada espacial de $u'$ e $v'$ em função de $\xi_1$ e de $\xi_2$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,14$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	88
4.25	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ e de $w'$ em função de $\xi_1$ e $\xi_3$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,14$ e de $r_{ww} = \pm 0,12$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	89
4.26	Perfis da correlação cruzada espacial de $u'$ e $w'$ em função de $\xi_1$ e $\xi_3$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,14$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	90
4.27	Isocontornos da auto-correlação espacial (a) $r_{uu}$ e (b) $r_{vv}$ na região de entrada (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,03$ e de $r_{vv} = \pm 0,03$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	92
4.28	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,03$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	93
4.29	Isocontornos da auto-correlação espacial (a) $r_{uu}$ e (b) $r_{ww}$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,05$ e de $r_{ww} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	94
4.30	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uw}$ na região de entrada em $x/(h/2) = 0,5$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$ e de $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	95
4.31	perfis transversais horizontais das escalas de comprimento integral de $u$ e $w$ na região de entrada (seções horizontais). Incerteza média de: $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,70 \text{ mm}$ , $l_{I,w,\xi_1} = \pm 0,80 \text{ mm}$ . Incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	98
4.32	Perfis transversais verticais das escalas de comprimento integral de $u$ e $v$ nas seções verticais da região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de: $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,69 \text{ mm}$ , $l_{I,v,\xi_1} = \pm 0,76 \text{ mm}$ . LDV: Incerteza média de $l_{I,u,\xi_1} = \pm 4,44 \text{ mm}$ e de $l_{I,v,\xi_1} = \pm 0,91 \text{ mm}$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	99
4.33	perfis transversais horizontais da escala de tempo integral de $u$ e $w$ na região de entrada (seções horizontais). Incerteza média de: $l_{I,ut} = \pm 0,08 \text{ ms}$ , $l_{I,wt} = \pm 0,09 \text{ ms}$ . Incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	100

4.34	Perfis transversais verticais das escalas de tempo integral de $u$ e $v$ nas seções verticais da região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de: $l_{I,ut} = \pm 0,08 \text{ ms}$ , $l_{I,vt} = \pm 0,08 \text{ ms}$ . LDV: Incerteza média de $l_{I,ut} = \pm 0,53 \text{ ms}$ e de $l_{I,vt} = \pm 0,11 \text{ ms}$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	101
4.35	perfis transversais horizontais da curtose das componentes longitudinal e transversal de velocidade $u$ e $w$ nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $K_u = \pm 1,84$ e de $K_w = \pm 2,97$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	103
4.36	Perfis transversais verticais da curtose das componentes longitudinal e transversal de velocidade $u$ e $v$ nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $K_u = \pm 3,65$ e de $K_v = \pm 2,46$ . LDV: Incerteza média de $K_u = \pm 0,03$ e de $K_v = \pm 0,05$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	104
4.37	perfis transversais horizontais da assimetria das componentes longitudinal e transversal de velocidade $u$ e $w$ nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de $S_u = \pm 0,35$ e de $S_w = \pm 0,46$ , incerteza de $z/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	105
4.38	Perfis transversais verticais da assimetria das componentes longitudinal e transversal de velocidade $u$ e $v$ nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $S_u = \pm 0,51$ e de $S_v = \pm 0,40$ . LDV: Incerteza média de $S_u = \pm 0,01$ e de $S_v = \pm 0,01$ . Incerteza de $y/(h/2) = \pm 0,01$ . . . . .	106
4.39	Exemplos de histogramas de $u$ e de $v$ em determinados pontos da seção vertical $z/(h/2) = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{u}$ , $\bar{v}$ , $\sigma_u$ e $\sigma_v$ , com os valores de $K_u$ , $K_v$ , $S_u$ e $S_v$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). Resolução máxima de $u = 0,87 \text{ m/s}$ . Incerteza de $f_u = \pm 3 \%$ e de $f_v = \pm 3 \%$ . . . .	107
4.40	Exemplos de histogramas de $u$ e de $w$ em determinados pontos da seção vertical $z/(h/2) = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{u}$ , $\bar{w}$ , $\sigma_u$ e $\sigma_w$ , com os valores de $K_u$ , $K_w$ , $S_u$ e $S_w$ , calculados a partir das medições com PIV. Resolução máxima de $u = 0,13 \text{ m/s}$ , resolução máxima de $w = 0,14 \text{ m/s}$ . Incerteza de $f_u = \pm 3 \%$ e de $f_w = \pm 3 \%$ . . . .	108

5.1	(a) Localizações das seções horizontais, das seções verticais e das posições dos perfis longitudinais de $\bar{u}$ na região principal (vista frontal). (b) Localizações das estações de $x/h_{inj}$ dos perfis transversais verticais e horizontais e da área de visualização das seções verticais na região principal (vista lateral). . . . .	112
5.2	Linhas de corrente do escoamento com os isocontornos da velocidade instantânea na região principal em (a) $t = 0$ s e $\phi = 2\pi$ rad, e em (b) $t = 0,2$ s e $\phi = 8\pi/5$ rad (seção vertical $z/h_{inj} = 0$ ). Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	116
5.3	Linhas de corrente do escoamento com os isocontornos da velocidade instantânea na região principal em (a) $t = 0,4$ s e $\phi = 6\pi/5$ rad, e em (b) $t = 0,6$ s e $\phi = 4\pi/5$ rad (seção vertical $z/h_{inj} = 0$ ). Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	117
5.4	Linhas de corrente do escoamento com os isocontornos da velocidade instantânea na região principal em (a) $t = 0,8$ s e $\phi = 2\pi/5$ rad, e em (b) $t = 1$ s e $\phi = 0$ rad (seção vertical $z/h_{inj} = 0$ ). Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	118
5.5	Localizações de $x_r$ , $x_{r,máx}$ e $\bar{u}_{r,máx}$ na zona de recirculação e no perfil longitudinal de $\bar{u}$ . . . . .	119
5.6	Perfis da evolução longitudinal de $\bar{u}$ na região principal, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,19$ m/s. LDV: Incerteza máxima de $\bar{u} = \pm 0,05$ m/s. Incerteza de $x/h_{inj} = 0,04$ . . . . .	121
5.7	Perfis longitudinais da velocidade média de $u$ da seção vertical central na região principal. Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,23$ m/s, incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	124
5.8	Isocontornos da velocidade longitudinal média $\bar{u}$ na seção vertical $z/h_{inj} = 0$ da região principal. Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,17$ m/s. Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	125
5.9	Isocontornos da velocidade normal média $\bar{v}$ na seção vertical $z/h_{inj} = 0$ da região principal. Incerteza média de $\bar{v} = \pm 0,16$ m/s. Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	126
5.10	Perfis transversais verticais de $\bar{u}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $\bar{u} = 0,19$ m/s. LDV: Incerteza média de $\bar{u} = 0,02$ m/s. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	128

5.11	Perfis transversais verticais da velocidade média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $\bar{u} = 0,19$ m/s, incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	129
5.12	Perfis transversais verticais de $\bar{v}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $\bar{v} = 0,16$ m/s. LDV: Incerteza média de $\bar{v} = 0,02$ m/s. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	130
5.13	Perfis transversais verticais da velocidade média de $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $\bar{v} = 0,16$ m/s, incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	131
5.14	perfis transversais horizontais da velocidade média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,21$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	134
5.15	perfis transversais horizontais da velocidade média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,17$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	135
5.16	perfis transversais horizontais da velocidade média de $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\bar{w} = \pm 0,16$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	136
5.17	perfis transversais horizontais da velocidade média de $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\bar{w} = \pm 0,11$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	137
5.18	Isocontornos da flutuação longitudinal média $\sqrt{u'^2}$ e da flutuação normal média $\sqrt{v'^2}$ na seção vertical $z/h_{inj} = 0$ da região principal. Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,13$ m/s e de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,12$ m/s. Incerteza de $x/h_{inj} = 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	139
5.19	Isocontornos do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'v'}$ na seção vertical $z/h_{inj} = 0$ da região principal. Incerteza média de $\overline{u'v'} = \pm 0,39$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> . Incerteza de $x/h_{inj} = 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	140
5.20	Perfis transversais verticais da flutuação média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,17$ m/s. LDV: Incerteza média de $\bar{v} = 0,02$ m/s. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	143
5.21	Perfis transversais verticais da flutuação média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,18$ m/s, incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	144

5.22	Perfis transversais verticais da flutuação média de $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,14$ m/s. LDV: Incerteza média de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,01$ m/s. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	145
5.23	Perfis transversais verticais da flutuação média de $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $\sqrt{v'^2} = \pm 0,14$ m/s, incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	146
5.24	perfis transversais horizontais da flutuação média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,17$ m/s, incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	147
5.25	perfis transversais horizontais da flutuação média de $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,18$ m/s, incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	148
5.26	perfis transversais horizontais da flutuação média de $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\sqrt{w'^2} = \pm 0,15$ m/s, incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	149
5.27	perfis transversais horizontais da flutuação média de $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\sqrt{w'^2} = \pm 0,11$ m/s, incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	150
5.28	Perfis transversais verticais do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'v'}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $\overline{u'v'} = \pm 0,51$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> . LDV: Incerteza média de $\overline{u'v'} = \pm 0,06$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	151
5.29	Perfis transversais verticais do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'v'}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $\overline{u'v'} = \pm 0,56$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	152
5.30	perfis transversais horizontais do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'w'}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\overline{u'w'} = \pm 0,52$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	153
5.31	perfis transversais horizontais do tensor turbulento de cisalhamento $\overline{u'w'}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $\overline{u'w'} = \pm 0,34$ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	154
5.32	Bidimensionalidade de $\bar{u}$ na região principal, calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,24$ m/s. LDV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,01$ m/s. Incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	156

5.33	Bidimensionalidade de $\sqrt{u'^2}$ na região principal, calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,21$ m/s. LDV: Incerteza média de $\sqrt{u'^2} = \pm 0,01$ m/s. Incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	157
5.34	Perfis transversais verticais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $k = \pm 0,80$ J. LDV: Incerteza média de $k = \pm 0,08$ J. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	160
5.35	Perfis transversais verticais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $k = \pm 0,94$ J, incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	161
5.36	perfis transversais horizontais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $k = \pm 0,52$ J, incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	162
5.37	perfis transversais horizontais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $k = \pm 0,43$ J, incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	163
5.38	Perfis transversais verticais dos coeficientes $C_{uv}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $C_{uv} = \pm 0,12$ . LDV: Incerteza média de $C_{uv} = \pm 0,02$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	166
5.39	Perfis transversais verticais dos coeficientes $C_{uv}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $C_{uv} = \pm 0,11$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	167
5.40	Perfis transversais verticais dos coeficientes $A_{uv}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $A_{uv} = \pm 0,04$ . LDV: Incerteza média de $A_{uv} = \pm 0,02$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	168
5.41	Perfis transversais verticais dos coeficientes $A_{uv}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $A_{uv} = \pm 0,04$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	169

5.42	Perfis transversais verticais do coeficiente $R_{uv}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $R_{uv} = \pm 0,31$ . LDV: Incerteza média de $R_{uv} = \pm 0,01$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	170
5.43	Perfis transversais verticais do coeficiente $R_{uv}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $R_{uv} = \pm 0,42$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	171
5.44	perfis transversais horizontais do coeficiente $C_{uw}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $C_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	172
5.45	perfis transversais horizontais do coeficiente $C_{uw}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $C_{uw} = \pm 0,12$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	173
5.46	perfis transversais horizontais do coeficiente $A_{uw}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $A_{uw} = \pm 0,11$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	174
5.47	perfis transversais horizontais do coeficiente $A_{uw}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $A_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	175
5.48	perfis transversais horizontais do coeficiente $R_{uw}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $R_{uw} = \pm 0,38$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	176
5.49	perfis transversais horizontais do coeficiente $R_{uw}$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $R_{uw} = \pm 0,69$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	177
5.50	Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de $u$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,15$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	180
5.51	Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de $u$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,14$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	181
5.52	Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de $v$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,14$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	182
5.53	Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de $v$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,13$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	183



5.54	Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de $u$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,13$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .	184
5.55	Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de $u$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,17$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .	185
5.56	Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de $w$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,13$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .	186
5.57	Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de $w$ para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,14$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .	187
5.58	Localização dos pontos das auto-correlações espaciais e das correlações cruzadas espaciais das flutuações em função de $\xi_i$ na região principal da câmara de combustão (vista lateral).	188
5.59	Localização dos pontos das auto-correlações espaciais e das correlações cruzadas espaciais das flutuações em função de $\xi_i$ na região principal da câmara de combustão (vista horizontal).	189
5.60	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,11$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .	192
5.61	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_2$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,15$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .	193
5.62	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .	194
5.63	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_2$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,15$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .	195
5.64	Perfis da auto-correlação espacial de $v'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .	196
5.65	Perfis da auto-correlação espacial de $v'$ em função de $\xi_2$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,14$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .	197

5.66	Perfis da auto-correlação espacial de $v'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	198
5.67	Perfis da auto-correlação espacial de $v'$ em função de $\xi_2$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,14$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	199
5.68	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,11$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	201
5.69	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_3$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,16$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	202
5.70	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	203
5.71	Perfis da auto-correlação espacial de $u'$ em função de $\xi_3$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,16$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	204
5.72	Perfis da auto-correlação espacial de $w'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	205
5.73	Perfis da auto-correlação espacial de $w'$ em função de $\xi_3$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,14$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	206
5.74	Perfis da auto-correlação espacial de $w'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	207
5.75	Perfis da auto-correlação espacial de $w'$ em função de $\xi_3$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,15$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	208
5.76	Perfis da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,11$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	211
5.77	Perfis da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ em função de $\xi_2$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,16$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	212

5.78	Perfis da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	213
5.79	Perfis da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ em função de $\xi_2$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções verticais). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,16$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	214
5.80	Perfis da correlação cruzada espacial de $u'$ e $w'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,11$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	215
5.81	Perfis da correlação cruzada espacial de $u'$ e $w'$ em função de $\xi_3$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,16$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	216
5.82	Perfis da correlação cruzada espacial de $u'$ e $w'$ em função de $\xi_1$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	217
5.83	Perfis da correlação cruzada espacial de $u'$ e $w'$ em função de $\xi_3$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ e $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,16$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	218
5.84	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{uu}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,05$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	220
5.85	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{uu}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,05$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	221
5.86	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{uu}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	222
5.87	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{uu}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	223
5.88	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{vv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,05$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	224
5.89	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{vv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,05$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	225

5.90	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{vv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	226
5.91	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{vv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{vv} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	227
5.92	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,05$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	228
5.93	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,05$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	229
5.94	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	230
5.95	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uv}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seção vertical central). Incerteza média de $r_{uv} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	231
5.96	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{uu}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	232
5.97	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{uu}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uu} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	233
5.98	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{ww}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	234
5.99	Isocontornos da auto-correlação espacial $r_{ww}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	235
5.100	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uw}$ na região principal em $x/h_{inj} = 0,67$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	236
5.101	Isocontornos da correlação cruzada espacial $r_{uw}$ na região principal em $x/h_{inj} = 3,33$ (seções horizontais). Incerteza média de $r_{uw} = \pm 0,09$ , incerteza de $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	237

5.102	Perfis transversais verticais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções verticais da região principal (esteira próxima, $x/h_{inj} = 0,67$ ). Incerteza média de $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,79$ mm e de $l_{I,v,\xi_1} = \pm 2,24$ mm. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	240
5.103	Perfis transversais verticais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções verticais da região principal (esteira distante, $x/h_{inj} = 3,33$ ). Incerteza média de $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,71$ mm e de $l_{I,v,\xi_1} = \pm 3,48$ mm. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	241
5.104	perfis transversais horizontais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções horizontais da região principal (esteira próxima, $x/h_{inj} = 0,67$ ). Incerteza média de $l_{I,u,\xi_1} = \pm 6,78$ mm e de $l_{I,w,\xi_1} = \pm 1,11$ mm. Incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	242
5.105	perfis transversais horizontais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções horizontais da região principal (esteira distante, $x/h_{inj} = 3,33$ ). Incerteza média de $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,71$ mm e de $l_{I,w,\xi_1} = \pm 0,93$ mm. Incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	243
5.106	Isocontornos da assimetria das componentes longitudinal e normal de velocidade $u$ e $v$ na seção vertical central $z/h_{inj} = 0$ da região principal. Incerteza média de $S_u = \pm 0,38$ e de $S_v = \pm 0,33$ . Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	245
5.107	Perfis transversais verticais da assimetria da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $S_u = \pm 0,50$ . LDV: Incerteza média de $S_u = \pm 0,01$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	248
5.108	Perfis transversais verticais da assimetria da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $S_u = \pm 0,56$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	249
5.109	Perfis transversais verticais da assimetria da componente normal de velocidade $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $S_v = \pm 0,45$ . LDV: Incerteza média de $S_v = \pm 0,01$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	250
5.110	Perfis transversais verticais da assimetria da componente normal de velocidade $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $S_v = \pm 0,48$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	251

5.111	perfis transversais horizontais da assimetria da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $S_u = \pm 0,34$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	252
5.112	perfis transversais horizontais da assimetria da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $S_u = \pm 0,99$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	253
5.113	perfis transversais horizontais da assimetria da componente transversal de velocidade $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $S_w = \pm 0,46$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	254
5.114	perfis transversais horizontais da assimetria da componente transversal de velocidade $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $S_w = \pm 0,66$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	255
5.115	Isocontornos da curtose das componentes longitudinal e normal de velocidade $u$ e $v$ na seção vertical central $z/h_{inj} = 0$ da região principal. Incerteza média de $K_u = \pm 2,19$ e de $K_v = \pm 1,76$ . Incerteza de $x/h_{inj} = \pm 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	257
5.116	Perfis transversais verticais da curtose da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $K_u = \pm 3,19$ . LDV: Incerteza média de $K_u = \pm 0,18$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	259
5.117	Perfis transversais verticais da curtose da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $K_u = \pm 3,90$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	260
5.118	Perfis transversais verticais da curtose da componente normal de velocidade $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de $K_v = \pm 2,94$ . LDV: Incerteza média de $K_v = \pm 0,17$ . Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	261
5.119	Perfis transversais verticais da curtose da componente normal de velocidade $v$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções verticais). Incerteza média de $K_v = \pm 3,22$ , incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	262

5.120	perfis transversais horizontais da curtose da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $K_u = \pm 1,95$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	263
5.121	perfis transversais horizontais da curtose da componente longitudinal de velocidade $u$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $K_u = \pm 8,57$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	264
5.122	perfis transversais horizontais da curtose da componente transversal de velocidade $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $K_w = \pm 3,02$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	265
5.123	perfis transversais horizontais da curtose da componente transversal de velocidade $w$ na região principal para determinadas estações de $x/h_{inj}$ (seções horizontais). Incerteza média de $K_w = \pm 5,27$ , incerteza de $z/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	266
5.124	Exemplos de histogramas de $u$ em determinados pontos da seção vertical $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{u}$ e $\sigma_u$ , com os valores de $K_u$ e de $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira próxima $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de $u = 0,87$ m/s. Incerteza de $f_u = \pm 5$ %. . . . .	269
5.125	Exemplos de histogramas de $u$ em determinados pontos da seção vertical $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{u}$ e $\sigma_u$ , com os valores de $K_u$ e de $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira distante $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de $u = 0,48$ m/s. Incerteza de $f_u = \pm 5$ %. . . . .	270
5.126	Exemplos de histogramas de $v$ em determinados pontos da seção vertical $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{v}$ e $\sigma_v$ , com os valores de $K_v$ e de $S_v$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira próxima $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de $v = 0,75$ m/s. Incerteza de $f_v = \pm 5$ %. . . . .	271
5.127	Exemplos de histogramas de $v$ em determinados pontos da seção vertical $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{v}$ e $\sigma_v$ , com os valores de $K_v$ e de $S_v$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira distante $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de $v = 0,44$ m/s. Incerteza de $f_v = \pm 5$ %. . . . .	272

5.128	Exemplos de histogramas de $u$ em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{u}$ e $\sigma_u$ , com os valores de $K_u$ e de $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira próxima $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de $u = 0,68$ m/s. Incerteza de $f_u = \pm 5$ %.	273
5.129	Exemplos de histogramas de $u$ em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{u}$ e $\sigma_u$ , com os valores de $K_u$ e de $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira distante $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de $u = 0,41$ m/s. Incerteza de $f_u = \pm 5$ %.	274
5.130	Exemplos de histogramas de $w$ em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{w}$ e $\sigma_w$ , com os valores de $K_w$ e de $S_w$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira próxima $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de $w = 0,57$ m/s. Incerteza de $f_w = \pm 5$ %.	275
5.131	Exemplos de histogramas de $w$ em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em $\bar{w}$ e $\sigma_w$ , com os valores de $K_w$ e de $S_w$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira distante $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de $w = 0,38$ m/s. Incerteza de $f_w = \pm 5$ %.	276



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Alguns estudos de instabilidade de combustão em combustores. . . . .	11
2.2 Alguns estudos de instabilidade de combustão em combustores. . . . .	12
2.3 Equações dos parâmetros caracterizadores. . . . .	26
2.4 Particularidades da Equação 2.18 dos coeficientes de correlação. . . . .	30
2.5 Diferentes escalas do escoamento turbulento. . . . .	34
2.6 Limites e características das sub-regiões no escoamento próximo à parede.	37
2.7 Equações das sub-regiões no escoamento próximo à parede. . . . .	37
3.1 Variâncias multiplicadas por N. . . . .	51
4.1 Características do escoamento inerte turbulento na região de entrada da câmara de combustão. . . . .	59
4.2 Comparação dos valores da velocidade de fricção das seções verticais estimados pelos dois métodos: PIV e LDV (TREVISAN, 2018). . . . .	61
4.3 Valores da velocidade de fricção das seções horizontais estimados pelos dois métodos. . . . .	61
4.4 Valores da média da velocidade longitudinal média no plano $yz$ , da vazão mássica $Q_A$ e do erro de $Q_A$ das seções verticais e horizontais. . . . .	69
5.1 Características do escoamento inerte turbulento na região principal da câmara de combustão. . . . .	113
5.2 Comprimento da zona de recirculação média e a localização da velocidade média máxima de retorno na região principal. Incerteza de $x_r/h_{inj} =$ $\pm 0,04$ , de $x_{r,máx}/h_{inj} = \pm 0,04$ e de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	122
5.3 Valores da velocidade média de retorno máxima das zonas de recircula- ção médias, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de $\bar{u} = \pm 0,24$ m/s. LDV: Incerteza máxima de $\bar{u} = \pm 0,05$ m/s. Incerteza de $y/h_{inj} = \pm 0,04$ . . . . .	123



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APR-E/LPL	–	Laboratório de Propulsão Líquida
BEIC	–	Banco de Estudos Experimentais de Instabilidade de Combustão
CCD	–	Charge-Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)
DCTA	–	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DFC	–	Dinâmica de Fluidos Computacional (em inglês, CFD - Computational Fluid Dynamics)
IAE	–	Instituto de Aeronáutica e Espaço
LDV	–	Laser Doppler Velocimetry (Velocimetria Laser de Efeito Doppler)
LSV	–	Laser Speckle Velocimetry
PDF	–	Probability Density Function (Função Densidade de Probabilidade)
PIV	–	Particle Image Velocimetry (Velocimetria por Imagem de Partícula)
RT-PIV	–	Time-Resolved Particle Image Velocimetry
TRF	–	Transformada Rápida de Fourier Bidimensional



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{u_i u_j}$	–	coeficiente de anisotropia do tensor de Reynolds
$B$	–	constante da rugosidade da parede
$B'$	–	constante do escoamento
$C$	–	função da correlação cruzada
$C_{u_i u_j}$	–	coeficiente de anisotropia do tensor de Reynolds
$\delta_\nu$	–	escala de comprimento viscoso
$\delta_{\bar{q}}$	–	incerteza da média de uma variável qualquer $q$
$E$	–	espectro de energia
$E_q$	–	bidimensionalidade de uma variável $q$
$\varepsilon$	–	dissipação da energia cinética turbulenta
$\varepsilon_u$	–	incerteza de $u$
$\eta$	–	intervalo de tempo
$f$	–	função densidade de probabilidade
$f_{u_i u_j}$	–	função densidade de probabilidade de $u_i$ e $u_j$
$\hat{f}$	–	função densidade de probabilidade normalizada
$F$	–	função de distribuição
$F_{u_i u_j}$	–	função de distribuição de $u_i$ e $u_j$
$\mathcal{F}$	–	transformada de Fourier
$G_{\bar{u}, \sigma}$	–	função Gaussiana
$h$	–	altura da região principal e da região de entrada
$h_{inj}$	–	altura do injetor inferior
$I$	–	padrão de intensidade da luz
$k$	–	energia cinética turbulenta
$K_i$	–	momento de quarta ordem normalizado (curtose)
$\kappa$	–	constante de von Kármán
$l_{I, u_i}$	–	escala de comprimento integral da componente $i$ da velocidade
$l_{K, u_i}$	–	escala de comprimento de Kolmogorov da componente $i$ da velocidade
$l_{T, u_i}$	–	escala de comprimento de Taylor da componente $i$ da velocidade
$\mu_{i, n}$	–	momento central de ordem $n$ da flutuação da componente $i$ da velocidade
$\hat{\mu}_{i, n}$	–	momento central de ordem $n$ normalizado da flutuação da componente $i$ da velocidade
$N$	–	número de quadros
$\nu$	–	viscosidade cinemática
$\bar{P}$	–	pressão média
$P_w$	–	pressão média na parede inferior em função de $x$
$q$	–	variável qualquer
$q_{eixo}$	–	variável qualquer no eixo central
$Q$	–	vazão mássica
$Q_A$	–	vazão mássica na região de entrada
$\vec{r}$	–	vetor posição

$r_{ij}$	–	coeficiente de correlação
$R$	–	função da auto-correlação
$R_e$	–	número de Reynolds
$R_{e_c}$	–	número de Reynolds crítico
$R_{e_I}$	–	número de Reynolds da escala integral
$R_{u_i u_j}$	–	coeficiente de anisotropia do tensor de Reynolds
$\rho$	–	densidade
$S_i$	–	momento de terceira ordem normalizado (assimetria)
$\sigma_i$	–	desvio padrão
$t$	–	tempo
$t_{I,u_i}$	–	escala de tempo integral da componente $i$ da velocidade
$t_{K,u_i}$	–	escala de tempo de Kolmogorov da componente $i$ da velocidade
$t_{T,u_i}$	–	escala de tempo de Taylor da componente $i$ da velocidade
$\tau$	–	tensão cisalhante total
$\tau_w$	–	tensão de cisalhamento na parede
$u$	–	velocidade longitudinal
$U_0$	–	velocidade instantânea do escoamento principal
$U_{eixo}$	–	velocidade média do eixo central
$U_m$	–	velocidade máxima
$u_i$	–	componente $i$ da velocidade
$u_{i,n}$	–	componente $i$ da velocidade da amostra $n$
$u_k$	–	velocidade de Kolmogorov
$u_\tau$	–	velocidade de fricção
$u'_i$	–	flutuação da componente $i$ da velocidade
$u'_{i,n}$	–	flutuação da componente $i$ da velocidade da amostra $n$
$\bar{u}^+$	–	velocidade média longitudinal medida em velocidade de fricção
$\bar{u}_i$	–	média da componente $i$ da velocidade
$\overline{u_i(\vec{r},t)_T}$	–	média temporal da componente $i$ da velocidade
$\overline{u_i(\vec{r},t)_L}$	–	média espacial da componente $i$ da velocidade
$\bar{u}_{r,máx}$	–	velocidade média de retorno máxima
$\overline{u_i'^2}$	–	variância da componente $i$ da velocidade
$\overline{u'_i u'_j}$	–	correlação cruzada de $u'_i$ e $u'_j$
$\overline{u'_i u'_j}$	–	elemento do tensor de Reynolds
$\langle u_i \rangle_N$	–	média de amostragem da componente $i$ da velocidade
$\langle \bar{u} \rangle_A$	–	média de $\bar{u}$ em uma área no plano $yz$
$\hat{u}_i$	–	flutuação normalizada da componente $i$ da velocidade
$v$	–	velocidade normal
$var(\bar{q})$	–	variância de $\bar{q}$
$w$	–	velocidade transversal
$x_i$	–	componente $i$ do vetor posição
$x_r$	–	comprimento da zona de recirculação média
$x_{r,máx}$	–	posição longitudinal da velocidade média de retorno máxima

- $\xi$  – distância entre dois pontos em  $x_i$
- $\xi_i$  – distância entre dois pontos em  $x_i$
- $\vec{\xi}$  – vetor distância entre dois pontos no espaço  $xyz$
- $y^+$  – distância da parede medida em comprimentos viscosos





## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Delineamento do trabalho . . . . .	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1 Instabilidade de combustão em combustores . . . . .	7
2.2 Velocimetria por Imagem de Partículas . . . . .	16
2.2.1 Partículas traçadoras e fluido . . . . .	18
2.2.2 Funcionamento . . . . .	18
2.2.3 Auto-correlação e correlação cruzada . . . . .	19
2.2.4 Tipos de PIV . . . . .	21
2.3 Escoamento turbulento . . . . .	22
2.3.1 Parâmetros caracterizadores . . . . .	23
2.3.2 Simetrias estatísticas . . . . .	30
2.3.3 Escalas do escoamento turbulento . . . . .	31
2.4 Escoamento turbulento plenamente desenvolvido em um canal . . . . .	35
2.4.1 Definições . . . . .	35
<b>3 DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS E METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>41</b>
3.1 Banco de Estudos de Instabilidade de Combustão (BEIC) e alimentação de ar . . . . .	41
3.2 Câmara de combustão . . . . .	43
3.3 Partículas traçadoras . . . . .	45
3.4 Laser . . . . .	46
3.5 Aquisição e processamento de imagem . . . . .	47
3.6 Análise interrogatória . . . . .	48
3.7 Incertezas experimentais . . . . .	48
3.7.1 Tipos de erros do PIV . . . . .	51
3.8 Análise da convergência estatística . . . . .	52
<b>4 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO NA REGIÃO DE ENTRADA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO . . . . .</b>	<b>57</b>

4.1	Velocidade de fricção . . . . .	59
4.2	Componentes de velocidade média . . . . .	61
4.3	Flutuação média das velocidades e tensor turbulento de cisalhamento . . . . .	69
4.4	Bidimensionalidade do escoamento médio . . . . .	75
4.5	Intensidade turbulenta . . . . .	77
4.6	Coefficientes de anisotropia . . . . .	79
4.7	Correlações espaciais . . . . .	83
4.8	Escalas espaciais e temporais turbulentas . . . . .	96
4.9	Assimetria, curtose e funções densidade de probabilidade . . . . .	101
4.10	Conclusão das análises das características do escoamento inerte na região de entrada . . . . .	109
<b>5</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO NA REGIÃO PRINCIPAL . . . . .</b>	<b>111</b>
5.1	Velocidade instantânea . . . . .	114
5.2	Zona de recirculação média . . . . .	119
5.3	Componentes de velocidade média . . . . .	124
5.4	Flutuação média das velocidades e tensor turbulento de cisalhamento . . . . .	138
5.5	Bidimensionalidade do escoamento médio . . . . .	155
5.6	Intensidade turbulenta . . . . .	158
5.7	Coefficientes de anisotropia . . . . .	164
5.8	Correlações espaciais . . . . .	178
5.9	Escalas espaciais turbulentas . . . . .	238
5.10	Momento de terceira ordem normalizado (assimetria) . . . . .	244
5.11	Momento de quarta ordem normalizado (curtose) . . . . .	256
5.12	Funções densidade de probabilidade . . . . .	267
5.13	Conclusão das análises das características do escoamento inerte na região principal . . . . .	277
<b>6</b>	<b>COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>279</b>
6.1	Comentários conclusivos . . . . .	279
6.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	281
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>283</b>

# 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

## 1.1 Introdução

Vários dos atuais sistemas de combustão e propulsão foram desenvolvidos para reduzir as emissões de poluentes e aumentar o desempenho e eficiência. No entanto, estes sistemas de combustão são mais suscetíveis a terem um dos problemas encontrados em motor foguete, que é a instabilidade de combustão (BESSON, 2001). Este fenômeno se manifesta na forma de oscilações termo-acústicas de alta amplitude geradas pelo acoplamento entre a turbulência, o processo de combustão e o campo acústico.

Há diferentes motivos para que o fenômeno indesejável de instabilidade de combustão seja reduzido, pois ele diminui o desempenho dos motores, prejudica o controle das emissões de poluentes, danifica e reduz a vida útil de diversos componentes dos motores etc. Considerando tais efeitos indesejáveis, diversos projetos de motores foram adaptados para evitar ou minimizar a instabilidade de combustão, tais como: abafadores, ressonadores de Helmholtz, alterações da injeção de combustível, entre outros recursos que foram implementados em diversos motores de foguete para conter a indesejada instabilidade (MEADOWS; AGRAWAL, 2015).

Para que estas adaptações e métodos de contenção da instabilidade sejam mais eficientes, faz-se necessário o aprofundamento da compreensão deste fenômeno. Com esta finalidade, diversas pesquisas foram e estão sendo realizadas para investigar os mecanismos e as componentes da instabilidade de combustão. Vários tipos de combustores, técnicas de medição e tipos de escoamento foram e estão sendo usados por estas pesquisas. Por causa disso e da complexidade do fenômeno, o leque de investigações sobre este tema é amplo e diverso (O'CONNOR et al., 2015; SCHADOW; GUTMARK, 1992).

Muitas destas pesquisas experimentais não investigam a instabilidade termo-acústica em combustores de grande porte. Parte dos combustores de laboratório são projetados para serem modelos simplificados dos sistemas de combustão mais sofisticados. Entre os combustores neste perfil estão aqueles que simulam os motores foguete e aqueles que simulam motores de avião, que pertencem à categoria dos combustores alimentados com ar (O'CONNOR et al., 2015; RICHECOEUR et al., 2008).

Nestes combustores foram e são usadas diversas técnicas de medição que medem a pressão, a temperatura e a velocidade do escoamento na câmara de combustão.

Uma das técnicas de velocimetria mais populares é a velocimetria por imagem de partícula (PIV). O PIV, tem a capacidade de medir a velocidade em diversos pontos do escoamento simultaneamente. Embora essa vantagem, muitos tipo de PIV não contêm a alta resolução temporal encontrada na velocimetria laser de efeito Doppler (LDV).

Há uma gama de tipos de escoamentos utilizados pelas pesquisas de instabilidade termo-acústica, que são divididos essencialmente entre os escoamentos reativos e os não-reativos (inerte). Embora não tenha instabilidade termo-acústica, o escoamento inerte é essencial na investigação deste fenômeno através da comparação entre as características dele com as do reativo. A partir desta comparação, torna-se possível identificar os efeitos da combustão e da instabilidade termo-acústica no escoamento turbulento. Por conseguinte, uma vez analisado estes efeitos e outros fenômenos separadamente, torna-se possível compreender a dinâmica dos fenômenos com a instabilidade de combustão. É para esta finalidade que atua o estudo do escoamento inerte turbulento no contexto da instabilidade de combustão, conforme pode-se verificar a partir das investigações realizadas por Besson, (2001), Sanquer (1998) e Mcmanus (1990) do escoamento inerte e do escoamento reativo.

Entre as características e estruturas investigadas em um escoamento inerte turbulento em uma câmara de combustão, estão as zonas de recirculação e os vórtices gerados pelas camadas de cisalhamento. As zonas de recirculação são caracterizadas por regiões nas quais o escoamento tem velocidades de baixa intensidade e de sentido contrário ao fluxo principal. Os vórtices, que também são chamados de estruturas coerentes de larga escala, contribuem na mistura dos reagentes no processo de combustão. No escoamento inerte, depois de serem gerados nas camadas de cisalhamento das zonas de recirculação, os vórtices são difundidos e dissipados ao longo da câmara de combustão. A emissão dos vórtices tem uma frequência característica que esta em função de certas características da turbulência, tal como as correlações temporais das flutuações de velocidade, e da geometria do combustor.

Outros parâmetros do escoamento inerte turbulento em um combustor também são analisados, tais como as flutuações de velocidade, energia cinética turbulenta, correlações espaciais e temporais, escalas de comprimento e de tempo, tensor turbulento de cisalhamento, entre outros. Todos estes e outros parâmetros caracterizam a turbulência em uma abordagem estatística. Com estes parâmetros, é possível localizar e dimensionar as regiões nas quais a turbulência é mais intensa, como se comportam as estruturas coerentes, como os obstáculos e as paredes afetam o escoamento

turbulento, entre outros aspectos.

Estas análises e investigações dos escoamentos inerte e reativo nos combustores são essenciais, pois são elas que dão base ao desenvolvimento tecnológico de métodos de controle da instabilidade de combustão nos combustores. Entretanto, no contexto nacional, este desenvolvimento tecnológico ainda não atingiu um patamar satisfatório, pois há poucos estudos abordando o assunto no Brasil (CORÁ, 2010). Assim, face a esta realidade, o presente trabalho possui a sua relevância, por contribuir na redução desta lacuna de conhecimento sobre a instabilidade de combustão em nosso país.

Assim, no intuito de servir como base para investigações futuras de instabilidade de combustão e validar modelos numéricos, o presente trabalho investigou as características de um escoamento inerte turbulento, no caso, o ar, em uma câmara de combustão de geometria retangular alimentada com ar com injetores, usando PIV. O combustor está em condição atmosférica, os injetores utilizados são do tipo plano e o PIV é do tipo padrão. Os injetores foram utilizados como obstáculos e permaneceram desligados durante as medições com PIV. O uso primário dos injetores é injetar reagentes na combustão na câmara de combustão. As medições foram realizadas na região de entrada, a montante dos injetores, e na região principal, a jusante dos injetores. As medições na região de entrada são importantes devido ao fato da combustão turbulenta ser influenciada pelo escoamento a montante dela. As análises da presente investigação poderão ser comparadas com futuros trabalhos que usarão o mesmo combustor, mas com escoamento reativo, para compreender os efeitos da combustão no escoamento turbulento. Além disso, a presente investigação contribuiu no desenvolvimento do pós-processamento das medições realizadas no BEIC com PIV.

Com base nos resultados dos trabalhos de Besson (2001) e Sanquer (1998), é esperado que o escoamento na região de entrada tenha características do escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Na região principal, com base naquilo que foi observado em diversos trabalhos, é esperado zonas de recirculação a jusante dos injetores. Na interseção das zonas de recirculação e o fluxo principal, vórtices altamente anisotrópicos são formados e difundidos ao longo do eixo longitudinal da região principal. Somado a isso, foi esperado, também, que as paredes da câmara de combustão contribuem na formação de camadas limites.

Os resultados dos parâmetros caracterizadores do escoamento inerte turbulento obtidos a partir das medições da técnica do LDV no trabalho de Trevisan (2018), que

usou a mesma câmara de combustão, foram comparados com os resultados da presente investigação. Estas comparações, além de darem mais compreensibilidade na análise do escoamento em questão, clarificaram as qualidades e as limitações das duas técnicas. Somado a isso, a junção dos resultados de ambas as técnicas contribuirão na validação de modelos numéricos relacionados à turbulência e à combustão.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo central a investigação experimental do escoamento turbulento inerte, usando ar na câmara de combustão do Banco de Estudos de Instabilidade de Combustão (BEIC). A investigação experimental do escoamento turbulento é composta pelo estudo das características da turbulência do escoamento inerte através do método de velocimetria por imagem de partícula (PIV).

O objetivo central foi dividido em cinco objetivos específicos:

- Investigação do número de medições do PIV necessárias para se obter resultados experimentais convergidos estatisticamente.
- Obtenção e análise dos parâmetros que caracterizam o escoamento turbulento na região de entrada e na região principal da câmara de combustão do BEIC usando PIV e rotinas de pós-processamento no *Matlab*. Os parâmetros caracterizadores de interesse são:

- Componentes da velocidade média;
- Flutuação média das velocidades;
- Tensor turbulento de cisalhamento;
- Velocidade de fricção;
- Bidimensionalidade do escoamento médio;
- Intensidade turbulenta;
- Correlações espaciais;
- Escalas espaciais e temporais turbulentas;
- Curtose e assimetria.

- Análise das zonas de recirculação formadas pelo escoamento turbulento na região principal;
- Análise dos elementos do tensor de Reynolds através dos coeficientes de anisotropia;
- Comparação dos resultados obtidos pelo PIV com aqueles do estudo realizado previamente com Velocimetria Laser de Efeito Doppler (LDV).

### 1.3 Delineamento do trabalho

Os demais capítulos estão organizados do seguinte modo:

- Capítulo 2: A Seção 2.1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre instabilidade de combustão em combustores. Nesta seção, além de explicar resumidamente a instabilidade termo-acústica e seus efeitos nos combustores, também são citados diversos trabalhos sobre ela. A Seção 2.2 aborda a velocimetria por imagem de partícula e seu funcionamento. Na Seção 2.3 é tratado as características gerais da turbulência e apresenta os parâmetros caracterizadores do escoamento turbulento. Além disso, nesta mesma seção, também são abordados simetrias estatísticas e escalas de movimento turbulento. A Seção 2.4 aborda as características do escoamento turbulento plenamente desenvolvido.
- Capítulo 3: Este capítulo aborda os dispositivos experimentais usados no presente trabalho, tal como a câmara de combustão, dispositivos responsáveis pela alimentação de ar e o PIV. Somado a isso, neste capítulo, é tratado também a análise interrogatória do PIV, as incertezas experimentais e os tipos de erros encontrados no PIV. A última seção deste capítulo apresenta uma análise sobre a convergência estatística das medições da presente investigação.
- Capítulo 4 e 5: Estes capítulos apresentam e analisam os parâmetros caracterizadores do escoamento inerte turbulento obtidos a partir das medições do PIV na região de entrada e na região principal. Além disso, os resultados da investigação do Trevisan (2018) com LDV foram comparados com os do presente trabalho. As últimas seções destes capítulos apresentam as conclusões das análises feitas dos parâmetros caracterizadores pelas seções anteriores.

- Capítulo 6: Na Seção 6.1 é apresentada as conclusões da investigação experimental das características do escoamento inerte turbulento na câmara de combustão usando PIV. A Seção 6.2 apresenta algumas sugestões de trabalhos futuros que complementarão as análises feitas pela presente investigação.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Instabilidade de combustão em combustores

O número de estudos sobre instabilidade de combustão, a partir da primeira metade do século XX, vem crescendo devido aos problemas causados por ela em diversos sistemas de combustão (BAILLOT; LESPINASSE, 2014; CULICK; YANG, 1995; HABILBALLAH et al., 1998). Motores foguete a propelente líquido e gasoso, motores de avião, queimadores industriais, turbina a gás, entre outros vêm sendo adaptados para minimizar ou conter a instabilidade termo-acústica. Nos últimos anos o problema da instabilidade de combustão adquiriu mais relevância entre as pesquisas devido às regulamentações cada vez mais restritivas das emissões de poluentes e ao anseio de aumentar a eficiência dos combustores. Diversos combustores de diversas geometrias em diversas circunstâncias com flutuação termo-acústica foram e estão sendo investigados. A consolidação da compreensão dos mecanismos responsáveis pela instabilidade termo-acústica é essencial para melhorar a eficiência dos meios de contê-la. Estes meios, que também são estudados, são as técnicas do controle ativo e do controle passivo.

Embora os combustores convencionais tenham processo de combustão estável e em condições quase estequiométrica, produzem grande quantidade de  $NO_x$  e fuligem. No caso dos combustores de pré-mistura pobre, tal como os do tipo LPM (*Lean-Premixed Combustion*) ou do tipo LPP (*Lean Premixed Prevapourized*), a emissão de  $NO_x$  e de fuligem é menor, mas a instabilidade de combustão é mais provável de ocorrer. Diante disso, projetos de combustores de turbina a gás de pré-mistura pobre levam em consideração a oscilação termo-acústica, assim como o ruído da combustão e entre outros problemas. O ruído da combustão é gerado pela propagação de ondas acústicas geradas pela flutuação da liberação de calor do escoamento reativo turbulento (SEQUERA; AGRAWAL, 2012).

A instabilidade de combustão é caracterizada por oscilações de pressão e de liberação de calor de grande amplitude que ocorrem no interior dos combustores. Este fenômeno se origina a partir da interação complexa e não-linear entre os fenômenos da combustão com o campo acústico e com a turbulência do escoamento. Desta interação complexa entre estes três fenômenos, foi possível averiguar um mecanismo que permitiu interpretar a instabilidade de combustão de forma mais simples. No escoamento turbulento, quando a flutuação da liberação de calor está em fase com a flutuação de pressão, é gerada uma energia acústica que é adicionada no sistema. Se a energia acústica produzida for maior que a energia absorvida pelo amortecimento,

a amplitude da oscilação termo-acústica crescerá exponencialmente até ser saturada por algum ciclo limite (MEADOWS; AGRAWAL, 2014). Caso a oscilação de calor e de pressão não estejam em fase, o primeiro amortece o segundo. Este mecanismo foi descoberto por Lord Rayleigh em 1878, e ficou conhecido como sendo o Critério de Rayleigh. Outras variáveis também são incluídas neste critério, tal como a oscilação da temperatura, a densidade, a razão ar/combustível e o comprimento da câmara de combustão (FRITSCHÉ, 2005).

Em muitos casos, os modos acústicos naturais do combustor são excitados pela oscilação termo-acústica, pois estão associados à frequência dela (HABIBALLAH et al., 1998). Quando isso ocorre, aumenta a possibilidade do combustor ser danificado, bem como ter seu desempenho minimizado, devido às vibrações estimuladas pelas oscilações termo-acústicas. Somado a isso, a troca térmica nas paredes do combustor é intensificada pelas flutuações termo-acústicas. Em geral, a instabilidade de combustão sempre irá diminuir o desempenho e a vida útil dos sistemas de combustão. Das diversas categorias de oscilações termo-acústicas, uma delas é das oscilações termo-acústicas de altas frequências associadas a um ou mais modos acústicos nos motores *ramjet* e nos motores *turbojet*, que são chamadas de *screech* (ELIAS, 1958).

Existem dois meios nos quais a instabilidade é desenvolvida: o espontâneo e o externo. No meio espontâneo, o próprio sistema produz a instabilidade através das flutuações de pressão inerentes ao escoamento turbulento. Através do meio externo, a instabilidade é gerada no sistema a partir das perturbações externas (HUANG; YANG, 2009). Richecoeur et al. (2008) utilizou uma roda dentada, que bloqueia periodicamente o bocal do combustor para gerar instabilidade no seu combustor, o qual opera com parâmetros de injeção e com pressão similares aos encontrados em motores foguete.

Basicamente existem dois meios para conter ou eliminar a instabilidade de combustão nas câmaras de combustão, que são o controle ativo e o controle passivo. As técnicas do controle ativo compõem-se do controle do fluxo dos reagentes e da atenuação ativa do campo acústico com base nos dados das medições dos sensores instalados no interior do combustor. Estes sensores fornecem informações sobre o acoplamento entre a liberação de calor e o campo acústico (FRITSCHÉ, 2005; ZINN; NEUMEIER, 1997). O controle passivo recorre a modificações na geometria do combustor e dos injetores, através de amortecedores acústicos, abafadores e ressonadores, para suprimir a instabilidade de combustão (HEITOR et al., 1984). Os benefícios e as limitações destas técnicas foram analisados em várias pesquisas. Meadow (2015, 2014), nos seus

trabalhos, utilizou um meio poroso inerte como controle passivo e observou que, para o escoamento inerte, a energia cinética turbulenta é mais distribuída. Para o escoamento reativo pré-misturado, observou que a energia cinética turbulenta na região central do combustor cresce se for usado o meio poroso inerte. Meadow também testou um meio não-poroso com a mesma geometria do meio poroso. E verificou que a estabilidade da chama é menor em comparação àquela observada no combustor com meio poroso. Em um dos estudos sobre controle ativo, foi observado que a perturbação direta e periódica da camada de cisalhamento melhorou o desempenho da combustão em diversos aspectos, tal como a diminuição da flutuação de pressão e das emissões de  $NO_x$  (MCMANUS et al., 1990).

Comparando os dois métodos de conter a instabilidade, pode-se afirmar que os métodos do controle passivo são só eficazes em condições específicas de funcionamento, isto é, para uma faixa de frequências específicas. Em contrapartida, no controle ativo, pode suprimir as instabilidades em uma faixa maior de frequência e de diferentes condições de operação (LUBARSKY et al., 2004).

A diversidade de estudos existentes sobre a instabilidade de combustão se deve a sua complexidade e as diversas circunstâncias que o fenômeno ocorre. A complexidade da instabilidade de combustão se deve à presença de diversos fenômenos físicos distintos no seu mecanismo, tal como a propagação de chama, propagação de ondas acústicas, dinâmica de vórtices, entre outros (O'CONNOR; LIEUWEN, 2011; MEADOWS; AGRAWAL, 2015). Parâmetros como número de Reynolds, liberação de calor, localização da chama, dimensão do combustor, razão de equivalência, número de *swirl*, tipo e composição dos reagentes, entre outros, também influenciam a instabilidade termo-acústica. Investigações das relações destes parâmetros e dos fenômenos físicos com as oscilações termo-acústicas então presentes em vários trabalhos (BANHAWY et al., 1983; AHMED; NEJAD, 1992; KIM et al., 2013). Na pesquisa realizada por Allison et al. (2015), foi constatada que a frequência da instabilidade de combustão é diretamente proporcional à velocidade do escoamento e da chama. Na investigação de Berbee e Eilzey (1989), na comparação entre dois combustores com diferentes razões largura-altura, foi constatada que, no combustor com maior razão largura-altura, o pico de intensidade turbulenta é maior do que no combustor com menor razão largura-altura.

Entre as pesquisas em questão, há aquelas que fizeram investigações das características do escoamento inerte turbulento. Embora este escoamento não tenha o fenômeno da instabilidade de combustão, a sua investigação contribui na compreensão deste

fenômeno. Através da comparação das características do escoamento inerte turbulento com as do escoamento turbulento reativo, torna-se possível a identificação dos efeitos da combustão no escoamento turbulento. Uma vez realizada a análise comparativa entre o escoamento e a análise destes efeitos, torna-se possível compreender a dinâmica de diversos elementos que compõem a instabilidade de combustão. Outra razão pela qual se estuda o escoamento inerte turbulento reside ao fato da combustão turbulenta depender do escoamento turbulento a montante a ela.

Besson (2001), na sua pesquisa, verificou que a combustão aumentava as flutuações longitudinais do escoamento na região de entrada da câmara de combustão. Somado a isso, na região principal, foi observado que as zonas de recirculação no escoamento reativo são menores que aquelas observadas no escoamento inerte. Outros trabalhos também fizeram comparações entre o escoamento inerte e reativo (MCMANUS et al., 1990; SANQUER, 1998).

Estas e outras pesquisas sobre instabilidade de combustão em combustores são apresentados pelas Tabelas 2.1 e 2.2, que também mostram os tipos de combustores, de escoamentos e de técnicas de medição utilizadas nestes trabalhos. A partir destes trabalhos e entre outros não mencionados, pode-se conceber a abrangência da instabilidade de combustão e a sua complexidade, a qual diversos estudos a abordaram de diversas formas.

Tabela 2.1 - Alguns estudos de instabilidade de combustão em combustores.

Características da geometria do combustor	Característica do escoamento	Autor	Medição
Retangular Alargamento repentino simétrico	escoamento inerte chama pré-misturada	Besson (2001)	LDV; transdutor de pressão; termopar.
Cilíndrica Alargamento repentino simétrico com swirlers	escoamento inerte chama pré-misturada	Meadows e Agrawal (2015, 2014)	TR-PIV
Cilíndrica Alargamento repentino simétrico com swirlers	chama pré-misturada	Kim (2013)	PIV; quimioluminescência de $OH^*$
Cilíndrica Alargamento repentino simétrico	chama pré-misturada	Ahmed e Nejad (1992)	LDV; transdutor de pressão; termopar.
Cilíndrica Alargamento repentino simétrico com swirlers	chama pré-misturada	Allison et al. (2015)	PLIF
Retangular	chama difusiva	Richecoeur et al. (2008)	Câmera de alta velocidade; termopar; transdutor de pressão; quimioluminescência de $OH^*$ e de $CH^*$ .
Retangular com obstáculo	escoamento inerte chama pré-misturada	Sanquer (1998)	LDV; transdutor de pressão; termopar.
Combustor Anular	chama pré-misturada	Worth e Dawson (2013)	Transdutor de Pressão; quimioluminescência de $OH^*$ .

Fonte: Produção do autor.

Tabela 2.2 - Alguns estudos de instabilidade de combustão em combustores.

Características da geometria do combustor	Características do escoamento	Autor	Medição
Retangular Alargamento repentino assimétrico	escoamento inerte chama pré-misturada	Mcmanus (1990)	PLIF; microfone; transdutor de pressão; amostragem dos gases.
Retangular Alargamento repentino assimétrico	chama pré-misturada	El Banhawy (1983)	LDV; termopar; amostragem dos gases.
Retangular Alargamento repentino assimétrico	escoamento inerte	Berbee e Eilzey (1989)	LDV
Retangular Alargamento repentino assimétrico	chama pré-misturada	Sampath (2016)	TR-PIV; transdutor de pressão Quimioluminescência de $CH^*$ .
Retangular com obstáculo	chama pré-misturada	Elias (1958)	Fotografias; transdutor de pressão.
Retangular com swirler	escoamento inerte chama pré-misturada	O'Connor e Lieuwen (2011)	TR-PIV.
Retangular com obstáculo	chama pré-misturada	Emerson et al. (2012)	TR-PIV; LDV; quimioluminescência.
Retangular	chama pré-misturada	Baillet e Lespinasse (2014)	TR-PIV; LDV; microfone; quimioluminescência.
Retangular Alargamento repentino assimétrico	escoamento inerte chama pré-misturada	Nagarajan et al. (2019)	Anemômetro de fio-quente; transdutor de pressão; quimioluminescência de $OH^*$ .
Cilíndrica Alargamento repentino simétrico com obstáculo	chama difusiva	Baraiya e Chakravarthy (2019)	TR-PIV; transdutor de pressão; quimioluminescência de $OH^*$ e de $CO_2^*$ .

Fonte: Produção do autor.

Dos tipos de combustores apresentados pelas tabelas acima, verifica-se que estes podem ter geometria retangular ou cilíndrica, com ou sem expansão simétrica/assimétrica do canal, com ou sem obstáculo, com ou sem misturador (*swirler*), entre outras configurações possíveis. Alguns trabalhos utilizaram combustores com configurações específicas, tal como fizeram Baraiya e Chakravarthy (2019) e Nagarajan et al. (2019). Nagarajan investigou a influência da intensidade turbulenta do escoamento de entrada sobre a instabilidade de combustão do combustor com alargamento repentino assimétrico. No combustor de Nagarajan, foi posto um gerador de turbulência, isto é, um obstáculo, na entrada da câmara de combustão. Os injetores do combustor utilizado por Baraiya e Chakravarthy, são posicionados perpendicularmente ao eixo principal da câmara de combustão. Além destes combustores específicos, combustores do tipo anular foram utilizados em outros trabalhos, tais como o do Worth e Dawson (2013).

Utilizando combustores com geometrias próprias, os estudos da instabilidade de combustão são divididos em diversas partes, dentre elas a investigação das flutuações termo-acústicas longitudinais ou transversais, que diferem entre si. Uma das diferenças está o fato de que apenas as flutuações termo-acústicas longitudinais são simétricas ao longo do escoamento reativo (O'CONNOR et al., 2015).

Além da multiplicidade de combustores na literatura, existe também uma pluralidade nas técnicas de medições dos parâmetros caracterizadores do escoamento e da combustão. Muitos trabalhos, em conformidade com os objetivos, utilizam termopares e transdutores de pressão junto com técnicas de velocimetria para obter uma análise mais abrangente. As técnicas de velocimetria mais usadas são a velocimetria por laser doppler (LDV – *Laser Doppler Velocimetry*) e a velocimetria por imagem de partícula (PIV – *Particle Image Velocimetry*). Além disso, usa-se, também, fluorescência induzida por plano laser (PLIF – *Planar Laser-Induced Fluorescence*) e a quimioluminescência nas pesquisas sobre instabilidade de combustão. Também pode-se observar que, entre os diversos tipos de PIV que foram desenvolvidos, geralmente os trabalhos optam pelo PIV de alta velocidade, ou *Time-Resolved* PIV (TR-PIV) (SAMPATH; CHAKRAVARTHY, 2016; EMERSON et al., 2012). O TR-PIV dispõe-se da alta resolução temporal, que é uma característica vantajosa nas medições de escoamentos turbulentos e na análise espectral das estruturas coerentes.

Voltando a comentar sobre os combustores, pode-se verificar que existem certas características em comum entre eles. Alargamento repentino simétrico ou assimétrico e obstáculos são dois elementos que estão frequentemente presentes nos sistemas

de combustão. Os combustores que têm alargamento repentino, ou melhor dizendo, degraus, são chamados de Combustores com Alargamento Repentino (*Dump Combustors*). Aqueles que têm obstáculos são chamados de Combustores com Obstáculos (*Bluff-Body Combustors*). Tais obstáculos servem como estabilizadores da chama (*flameholder*). Tanto os degraus, ou os alargamentos repentinos, e os obstáculos são meios para a produção de vórtices, que são criados a partir das camadas de cisalhamento nas fronteiras das zonas de recirculação. Os vórtices, assim como as camadas de cisalhamento, e as zonas de recirculações são uma das principais características do escoamento turbulento nestes combustores.

Um outro aspecto geral sobre os combustores é a ausência do uso de combustível líquido. Isso se deve ao fato que a redistribuição do combustível líquido não é um fator predominante na instabilidade de combustão se for comparado com a dinâmica dos vórtices. Somado a isso, embora o processo de combustão ocorra apenas em meios gasosos, o uso de combustíveis líquidos deixa a análise da instabilidade de combustão ainda mais complexa. Uma outra razão de usar apenas combustíveis gasosos reside ao fato de que, em um motor *ramjet*, antes de chegar às camadas de cisalhamento, o spray do combustível evapora completamente (SCHADOW; GUTMARK, 1992).

Sobre as zonas de recirculação, estas, além de conterem produtos quentes da combustão que são usados na ignição dos reagentes e gerarem vórtices, também são responsáveis pela geração de instabilidade de combustão através destes vórtices. As zonas de recirculação são caracterizadas por serem regiões com velocidades de pouca intensidade com sentido contrário das velocidades do fluxo principal. As características das zonas de recirculação estão em função da geometria do combustor e do escoamento (SANQUER, 1998). Um outro detalhe sobre as zonas de recirculação foi observado por Kim (2013). No seu trabalho, foi observado que a flutuação da zona de recirculação, que é gerada pela instabilidade de combustão, está na mesma frequência das oscilações termo-acústicas. Além disso, a instabilidade de combustão é reforçada pelas flutuações das zonas de recirculação. Por causa destas flutuações, oscilações da vazão mássica e da liberação de calor ocorrem dentro das zonas de recirculação. Em vista disso, pode-se afirmar que há participação das zonas de recirculação na instabilidade de combustão.

Os vórtices são componentes indispensáveis no mecanismo da instabilidade de combustão. Além disso, outros processos físicos relevantes tal como mistura de gases, liberação de calor, entre outros também estão influenciados pelos vórtices (MCMA-NUS et al., 1990). Embora não tenham uma influência significativa nas suas primeiras



fases, os vórtices exercem um papel relevante após serem difundidos na câmara de combustão. A interação entre os vórtices e as componentes da combustão tem aspecto cíclico que ocorre simultaneamente com o ciclo da oscilação de pressão que é resultante da oscilação periódica da liberação de calor. Essa interação leva a instabilidade de combustão. Vórtices, na literatura, são referenciados como sendo estruturas coerentes de larga escala, cuja dinâmica está conectada com a dinâmica das camadas de cisalhamento (BROWN; ROSHKO, 1974).

Conforme as investigações de Sanquer (1998) e de Besson (2001), a produção periódica dos vórtices, que ocorrem nas regiões de intenso cisalhamento das zonas de recirculação, é tipificada por certas características do escoamento turbulento. Verificou-se que a periodicidade da auto-correlação temporal e a bidimensionalidade da distribuição de velocidade favorecem a geração de vórtices. A periodicidade da geração de vórtices também está associada aos picos de energia observados no espectro de energia das flutuações de velocidade. Além disso, verificou-se que, nas regiões onde os vórtices são criados, há forte anisotropia das tensões normais turbulentas. Nestas regiões, a flutuação longitudinal é maior que a flutuação transversal.

O parâmetro que caracteriza a geração de vórtices pelas camadas de cisalhamento é a frequência característica da emissão de vórtices  $f_e$ , a qual é geralmente denominada como sendo frequência amplificada. Um outro parâmetro que caracteriza os vórtices e a instabilidade é o número adimensional de Strouhal  $St$ , que é definido como sendo:

$$St = \frac{f_e d}{U} \quad (2.1)$$

onde  $U$  é a velocidade do fluxo principal e  $d$  é o diâmetro característico. Após serem produzidos, os vórtices crescem e se misturam ao longo da câmara de combustão por meio do processo do Estiramento dos Vórtices (*Vortex Stretching*). Durante este processo, a esteira é difundida e a frequência associada aos vórtices diminui. Assim, a camada de cisalhamento resultante deste processo está correlacionada com as instabilidades associadas aos vórtices de diferentes tamanhos. No intuito de caracterizar esta camada de cisalhamento resultante, é definido uma outra frequência, chamada de frequência de modo preferencial  $f_p$ . Tal frequência, a qual é a frequência da flutuação da velocidade no fim do núcleo potencial do jato do escoamento, está na segunda ou terceira faixa sub-harmônica da frequência da instabilidade da camada de cisalhamento inicial (SCHADOW; GUTMARK, 1992).

Através dessas frequências de instabilidade da camada de cisalhamento é possível

compreender a interação entre os vórtices e as ondas acústicas. Se a frequência acústica for a mesma da frequência da emissão de vórtices, os tamanhos dos vórtices serão menores; se a frequência acústica for a mesma da frequência do modo de preferência, o tamanho dos vórtices será maior. Esta manipulação do tamanho dos vórtices tem suas vantagens e desvantagens práticas. Vórtices de grande escala são úteis em misturas de larga escala, no entanto, eles prejudicam misturas de pequenas escalas que são necessárias para a ignição da combustão (SCHADOW; GUTMARK, 1992).

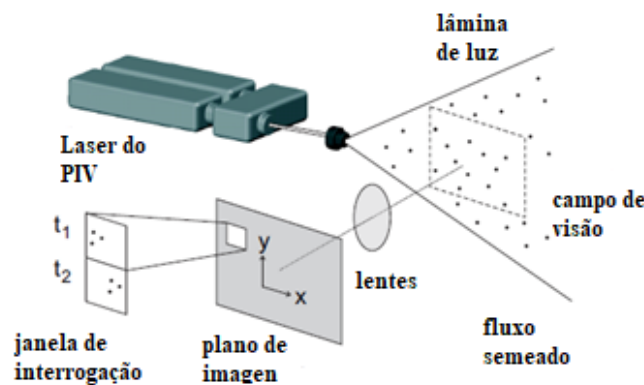
## 2.2 Velocimetria por Imagem de Partículas

Antes que houvessem câmeras, *lasers*, *softwares* e *hardwares* dedicados às medições de velocidade em escoamento, os pesquisadores recorriam a tubos de Pitot e anemômetro de fio quente, a fim de investigar a velocidade do escoamento. Estes dispositivos ou técnicas oferecem meios de se obter informações acerca da velocidade do escoamento em determinados pontos. Por outro lado, eles têm a desvantagem de serem intrusivos. Isto se deve à inserção de uma sonda física no escoamento, fazendo com que haja uma interação entre o escoamento e a sonda. Por causa da inserção da sonda, os resultados experimentais são alterados (PRASAD, 2000). Ao passar dos anos, novas tecnologias apareceram, e, em seguida, surgiram novas técnicas de medição, dentre as quais superavam a limitação característica daquelas que exigiam uma sonda física. Superavam, pois, além de se tornarem mais confiáveis, precisas e com maior resolução espacial, se tornaram não intrusivas, isto é, sem interferência no escoamento. Tais técnicas não alcançariam o atual prestígio sem a invenção da fotografia e do *laser*, a partir das quais, aquelas começariam a se chamar técnicas ópticas de velocimetria *laser*.

Existem diversas técnicas ópticas não-intrusivas que oferecem uma enorme vantagem aos estudos experimentais de campos de velocidades de escoamentos turbulentos. Uma destas técnicas é a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, em inglês – *Particle Image Velocimetry*) a qual faz a medição das velocidades em diversos pontos do escoamento. Estas medições são realizadas por meio da gravação dos deslocamentos de partículas traçadoras que são inseridas no escoamento, conforme mostrada nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3. Os dados experimentais oferecidos pelo PIV, ou por outra técnica óptica, são usados na avaliação e validação de novos e melhores modelos de escoamento turbulento e em instabilidade de combustão (HASSEL; LINOW, 2000). Somando a essas características, o PIV tem a vantagem de ter alta taxa de repetição e alta resolução espacial. Além disso, com as medições feitas do PIV no escoamento

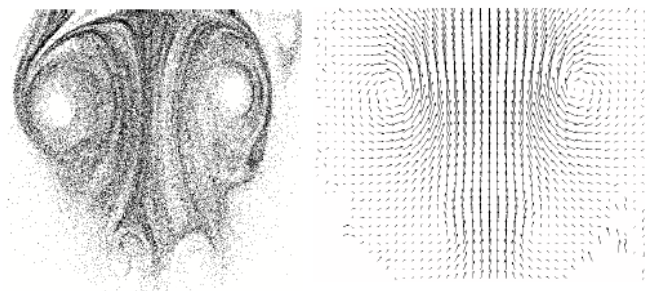
turbulento da velocidade e do gradiente da velocidade, pode-se também calcular outros parâmetros a fim de analisar as estruturas espaciais e temporais do escoamento turbulento. Embora a técnica tenha essas características e ofereça meios para a investigação de escoamentos, ela necessita de janelas ópticas para a visualização do escoamento. As janelas, conforme a construção, podem interferir no escoamento, fazendo delas uma grande desvantagem do PIV ([BUCHHAVE, 1992](#)).

Figura 2.1 - Arranjo da técnica PIV.



Fonte: LaVision (2007b).

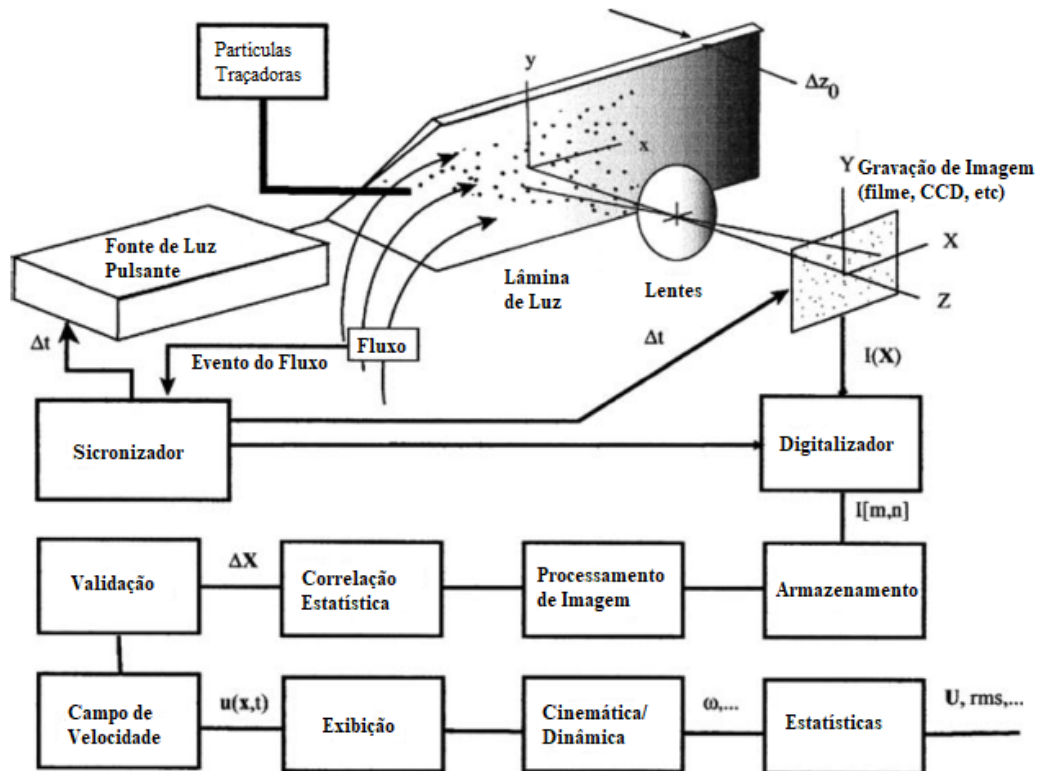
Figura 2.2 - Vórtice com partículas traçadoras e o campo de velocidade do escoamento correspondente.



Fonte: LaVision (2007b).

O termo Velocimetria por Imagem de Partícula apareceu na literatura há mais de 30 anos a fim de se distinguir de uma outra técnica vigente na época, o *Laser Speckle Velocimetry* (LSV). Alguns dos primeiros artigos que reconheciam a importância do PIV foram publicados em meados dos anos 80 ([ADRIAN, 2005](#)).

Figura 2.3 - Esquema do funcionamento do PIV.



Fonte: Adaptada de Adrian (2005).

### 2.2.1 Partículas traçadoras e fluido

As partículas traçadoras devem ter certas características necessárias para que o PIV possa extrair apropriadamente informações do escoamento. No que diz respeito das suas dimensões, essas devem ser pequenas o suficiente para acompanhar o escoamento para que o PIV possa capturar flutuações de alta frequência. Por outro lado, devem ser grandes o suficiente para serem visualizadas pela(s) câmara(s).

### 2.2.2 Funcionamento

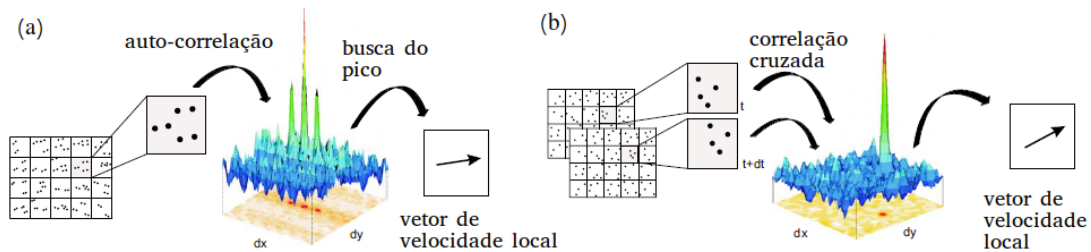
De forma geral, o PIV funciona do seguinte modo: algumas partículas traçadoras introduzidas no escoamento são iluminadas por dois pulsos laser planos de alta intensidade, em um plano bidimensional do escoamento e em tempos determinados. A luz espalhada pelas partículas é capturada por uma ou mais câmaras para ser gravada em um ou mais quadros. A partir destes quadros, são determinadas duas ou três componentes de cada vetor velocidade local. A curta duração da exposição das partículas por cada pulso laser e o curto intervalo de tempo entre as exposi-

ções influenciam na determinação do vetor velocidade instantânea. As partículas não interferem consideravelmente nas características do escoamento em condições propícias; nestas circunstâncias, pode-se dizer que as velocidades determinadas pelo PIV estão diretamente associadas ao escoamento (ADRIAN, 2005; WESTERWEEEL et al., 2013). Desta forma, torna-se possível a identificação e a caracterização das estruturas turbulentas do escoamento. Deve-se observar também que o escoamento precisa ter uma quantidade significativa de partículas traçadoras, com tamanhos apropriados, para que as medições do PIV sejam adequadas.

### 2.2.3 Auto-correlação e correlação cruzada

No processo de determinação do campo de velocidade do escoamento, as imagens capturadas pela(s) câmara(s) são gravadas de duas formas: A primeira forma é a *single frame/double exposure* (ou *single frame/double pulse*), na qual duas imagens são gravadas em apenas um quadro. A segunda forma é a *double frame/double exposure* (ou *double frame/single pulse*), na qual cada imagem é gravada em um quadro separadamente. As imagens gravadas são divididas em pequenas áreas, chamadas de janelas de interrogação, geralmente com dimensão de  $32 \times 32$  *pixels*. Os deslocamentos das partículas em cada uma destas janelas são estimados por correlações estatísticas. O modo *single frame* é avaliado por auto-correlação e o modo *double frame* é avaliado por correlação cruzada. Com a avaliação, torna-se possível o cálculo do deslocamento médio em cada janela de interrogação a partir da correlação máxima. Com os deslocamentos médios, os vetores locais de velocidades são calculados e cada um é posicionado no centro de cada janela de interrogação no campo de velocidade do escoamento.

Figura 2.4 - (a) Avaliação por auto-correlação e (b) avaliação por correlação cruzada.



Fonte: LaVision (2007b).

A autocorrelação é caracterizada por dois picos de correlação idênticos e rotacional-

mente simétricos em torno de pico central maior, o qual indica deslocamento nulo, conforme mostrado na Figura 2.4a. A função da auto-correlação  $R(r_d)$  do padrão de intensidade da luz  $I(r)$  é dado por:

$$R(r_d) = \int I(r)I(r + r_d)dr, \quad (2.2)$$

onde o domínio da integral de interrogação do produto  $I(r)I(r + r_d)$  em relação a  $r$  é a área da janela de interrogação. As variáveis  $r$  e  $r_d$  são o vetor posição e vetor deslocamento. Devido a dificuldade existente no cálculo computacional da Equação (2.2), é escolhido o cálculo da auto-correlação através da Transformada Rápida de Fourier Bidimensional (TRF) do padrão de intensidade digitalizado, a qual é apresentada pela equação abaixo:

$$R(r_d) = I(r) \star I(r) = I(r) * I(-r), \quad (2.3)$$

onde  $\star$  é o operador de correlação, e  $*$  é o operador de convolução. Empregando o teorema da convolução na auto-correlação, temos:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{R(r_d)\} &= \mathcal{F}\{I(r)\} \cdot \mathcal{F}^*\{I(r)\} \\ &= |\mathcal{F}\{I(r)\}|^2, \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde  $\mathcal{F}$  é a Transformada de Fourier. Temos então:

$$R(r_d) = \mathcal{F}^{-1}\{|\mathcal{F}\{I(r)\}|^2\}. \quad (2.5)$$

O deslocamento médio da janela de interrogação é obtido pela medida da distância entre os centros do pico central e os picos da função de auto-correlação. Uma das desvantagens da auto-correlação está na ambiguidade direcional dos picos, porque não é possível detectar o sinal do deslocamento, dado ao fato que não se sabe quais partículas são iluminadas pelo primeiro ou pelo segundo pulso laser. O segundo problema

da auto-correlação são as localidades dos picos. Se estes ficarem muito próximos ao pico central, há degradação do valor do deslocamento calculado (LAVISION, 2007b). O deslocamento das partículas também é um problema. Se estas ultrapassarem mais de 1/4 da dimensão da janela de interrogação, os sinais das auto-correlação, isto é, os picos, são denegridos graças a um fenômeno chamado *in-plane loss-of-pairs*. Tal fenômeno ocorre quando há uma queda na probabilidade das imagens de pares de partículas que ficarem na mesma janela de interrogação, caso os deslocamentos das partículas sejam muito grandes. Este último problema diminui a razão sinal-ruído (RSR), que é a razão da potência do sinal desejado com a potência do ruído de fundo (PRASAD, 2000).

A função da correlação cruzada  $C(r_d)$  dos padrões de intensidades  $I_1(r)$  e  $I_2(r)$  de determinada janela de interrogação é:

$$C(r_d) = \int I_1(r)I_2(r + r_d)dr, \quad (2.6)$$

Aplicando o teorema da convolução e a TRF, temos:

$$C(r_d) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{I_1(r)\} \cdot \mathcal{F}\{I_2^*(r)\}\}. \quad (2.7)$$

Com a Equação (2.7), obtém-se um único pico como resultado, tal como é mostrado pela Figura 2.4b. A correlação cruzada não tem a desvantagem de ter ambiguidade direcional, pois em vez de ter dois picos e um pico central, tem apenas um pico. As outras duas vantagens da correlação cruzada é que ela consegue obter deslocamento zero e melhorar o RSR com relação a auto-correlação. Devido a estas vantagens que foi escolhida a correlação cruzada na presente investigação. A câmera CCD é apropriada para gravações de imagens do tipo *double frame/double exposure*, porque ela consegue capturar uma sequência de dois pulsos laser de intervalo de tempo muito curto (LAVISION, 2007b).

#### 2.2.4 Tipos de PIV

Há diversos tipos de PIV e cada um deles tem suas vantagens com relação a obtenção de dados (ATKINSON et al., 2011; BASLEY et al., 2011; NAJJARI et al., 1990; WESTERWEEL et al., 2013). Alguns deles são:

- *Time-Resolved* PIV (TR-PIV): usado para obter a evolução temporal do campo de velocidade do escoamento. TR-PIV é composto por dois lasers pulsados de Nd:YLF capazes de gerar 10 mil pulsos por segundo de 10 a 20 mJ cada. O TR-PIV também utiliza câmaras CMOS que pode gravar imagens de 1024x1024 pixels e que podem ter até 5 mil quadros por segundo.
- *Microscopic* PIV: destinado às medições de campo de velocidade em escalas microscópicas.
- *Statistical* PIV: adaptado para não apenas medir o campo de velocidade instantâneo, mas para calcular valores estatísticos tal como a média das velocidades ou a média das componentes do tensor de Reynolds.
- *Tomographic* PIV: um método recente de medição de campo de velocidade instantânea tridimensional. Neste método, partículas traçadoras são iluminadas dentro de um volume, e as luzes espalhadas por estas partículas são captadas por quatro ou seis câmeras digitais posicionadas em diversas posições em torno do volume. As imagens que mostram a distribuição das partículas são submetidas a um algoritmo de tomografia na intenção de obter dados das velocidades.

Dos diversos estudos experimentais que utilizam o PIV, aqueles que envolvem escoamentos turbulentos foram um dos mais beneficiados com a técnica. A razão disto reside ao fato que o PIV tem a capacidade de fornecer diversos dados que caracterizam a turbulência em planos ou volumes de interesse.

O gradiente de velocidade tem um importante papel no escoamento turbulento, pois ele caracteriza os movimentos dissipativos e rotativos deste escoamento. Desta forma, se torna conveniente a obtenção das componentes do gradiente de velocidade, além do campo tridimensional de velocidade. Infelizmente, os tipos de PIV que apenas dão dados de uma seção bidimensional do escoamento não podem oferecer uma descrição completa do escoamento turbulento, mas apenas uma fração dele (WESTERWEEL et al., 2013).

### 2.3 Escoamento turbulento

Segundo Tennekes (1972), é muito difícil elaborar uma definição precisa da turbulência. No entanto, na intenção de atingir uma maior compreensão do fenômeno, segue uma lista de algumas características comuns de todos os escoamentos turbulentos:



- A aleatoriedade ou a irregularidade temporal e espacial das grandezas que caracterizam o escoamento turbulento. Tal propriedade faz com que se evite a abordagem determinista e siga a abordagem estatística na descrição dos escoamentos turbulentos;
- A imprevisibilidade das grandezas do escoamento turbulento demonstrada pelas sutis mudanças nas condições iniciais, as quais resultam em grandes mudanças nas grandezas. Esta característica se deve ao elevado grau de não linearidade da turbulência.
- A difusividade da turbulência, a qual é a causa da mistura rápida no escoamento e alta variação do momento linear, do calor, e da transferência mássica;
- A turbulência sempre ocorre no escoamento com número de Reynolds alto;
- A turbulência é caracterizada por ser rotacional, pelo seu aspecto tridimensional e por grandes flutuações da vorticidade;
- A dissipação é uma característica da turbulência;
- A turbulência é um fenômeno que ocorre em meio contínuo;
- A turbulência não é uma característica do fluido e sim do escoamento.

A turbulência pode ser gerada ou pelo atrito da parede exercido no escoamento ou a partir de camadas do escoamento de diferentes velocidades que passam uma sobre a outra (HINZE, 1975). O declínio e a extinção do movimento turbulento do escoamento são causados pela viscosidade do fluido. A viscosidade também é responsável por gerar a turbulência, que é caracterizada pelos gradientes de velocidade.

### 2.3.1 Parâmetros caracterizadores

Dada a impossibilidade de caracterizar o escoamento turbulento na abordagem determinística, só resta a abordagem estatística para estimar os parâmetros caracterizadores deste tipo de escoamento (DAVIDSON, 2004). A possibilidade da abordagem estatística se apoia em dois pontos:

- Em um dado ponto no domínio turbulento, um padrão do escoamento é aproximadamente repetido no tempo;

- Em um dado instante, um padrão do escoamento é aproximadamente repetido no espaço; de modo que a turbulência, de forma geral, tem a mesma estrutura no domínio considerado.

Na abordagem estatística, a velocidade  $u_i(\vec{r}, t)$ , por ser uma variável aleatória, possui uma função densidade de probabilidade (PDF, em inglês – *Probability Density Function*)  $f(u_i; \vec{r}, t)$  que a caracteriza em cada ponto temporal e espacial. Com esta função, é possível obter o valor esperado, isto é, esperança matemática, da velocidade, o qual é expresso na seguinte equação:

$$\overline{u_i(\vec{r}, t)} = \int_{-\infty}^{\infty} u_i f(u_i; \vec{r}, t) du_i, \quad (2.8)$$

onde

$$f(u_i; \vec{r}, t) \equiv \frac{\partial F(u_i; \vec{r}, t)}{\partial u_i} \quad (2.9)$$

tal que

$$f(u_i; \vec{r}, t) \geq 0, \quad f(\infty) = f(-\infty) = 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(u_i; \vec{r}, t) du_i = 1. \quad (2.10)$$

onde  $F(u_i; \vec{r}, t)$  é a função de distribuição. Faz-se necessário enfatizar que  $u_1$  é a velocidade longitudinal  $u_x$  ou simplesmente  $u$ , enquanto que  $u_2$  e  $u_3$  são as velocidades transversais do escoamento  $u_y$  e  $u_z$  respectivamente, ou simplesmente  $v$  ou  $w$ . Além do valor esperado, isto é, a média, também existe a média de amostragem, a qual é definida por:

$$\langle u_i \rangle_N = \overline{u_{i,N}(\vec{r}, t)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{i,n}(\vec{r}, t). \quad (2.11)$$

A média temporal e a média espacial são definidas como sendo, respectivamente:

$$\overline{u_i(\vec{r}, t)}_T = \int_t^{t+T} u_i f(u_i; \vec{r}, t') dt', \quad (2.12)$$

$$\overline{u_i(\vec{r},t)}_L = \int_{x_i}^{x_i+T} u_i f(u_i; \vec{r}, t) dx'_i, \quad (2.13)$$

onde  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$  e  $x_3 = z$ .

Com a média, obtém-se a flutuação da variável aleatória  $u_{i,n}(\vec{r},t)$  em torno da média, que é definida por:

$$u'_{i,n}(\vec{r},t) = u_{i,n}(\vec{r},t) - \overline{u_i(\vec{r},t)}. \quad (2.14)$$

A partir da Equação (2.14), é possível obter as equações da variância e da correlação cruzada, mostradas nas equações abaixo respectivamente:

$$\overline{u'_i(\vec{r},t)^2} = \int_{-\infty}^{\infty} [u'_i(\vec{r},t)]^2 f(u_i; \vec{r}, t) du_i \quad (2.15)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [u_i - \overline{u_i}][u_j - \overline{u_j}] f_{u_i u_j}(u_i, u_j; \vec{r}, t) du_i du_j \quad (2.16)$$

onde  $f_{u_i u_j}(u_i, u_j; \vec{r}, t)$  é definido como sendo:

$$f_{u_i u_j}(u_i, u_j; \vec{r}, t) = \frac{\partial^2}{\partial u_i \partial u_j} F_{u_i u_j}(u_i, u_j; \vec{r}, t) \quad (2.17)$$

Outros parâmetros caracterizadores são apresentados pela Tabela 2.3 abaixo:

Tabela 2.3 - Equações dos parâmetros caracterizadores.

Parâmetros caracterizadores	equação
desvio padrão	$\sigma_i = \sqrt{\overline{u_i'^2}(\vec{r}, t)}$
flutuação normalizada	$\hat{u}_i = u_i' / \sigma_i$
PDF normalizada	$\hat{f}(\hat{u}_i) = \sigma_i f(\bar{u}_i + \sigma_i \hat{u}_i)$
energia cinética turbulenta	$k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / 2$
elemento do tensor de Reynolds	$\overline{u_i' u_j'}$
razão de anisotropia	$R_{u_i u_j} = \overline{u_i'^2} / \overline{u_j'^2}, \quad i \neq j$
coeficiente de anisotropia	$A_{u_i u_j} = \overline{u_i' u_j'} / k, \quad i \neq j$
coeficiente de correlação	$C_{u_i u_j} = \overline{u_i' u_j'} / \sqrt{\overline{u_i'^2} \overline{u_j'^2}}, \quad i \neq j$
momento central de ordem n	$\mu_{i,n} = \overline{u_i'^n} = \int_{-\infty}^{\infty} u_i'^n f(u_i) du_i$
momento central de ordem n normalizado	$\hat{\mu}_{i,n} = \overline{u_i'^n} / \sigma_i^n = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u}_i^n \hat{f}(\hat{u}_i) d\hat{u}_i$
momento de terceira ordem normalizado (assimetria)	$\hat{\mu}_{i,3} = S_i = \overline{u_i'^3} / \overline{u_i'^2}^{3/2}$
momento de quarta ordem normalizado (curtose)	$\hat{\mu}_{i,4} = K_i = \overline{u_i'^4} / \overline{u_i'^2}^2$

Fonte: Hinze (1975) e Pope (2000).

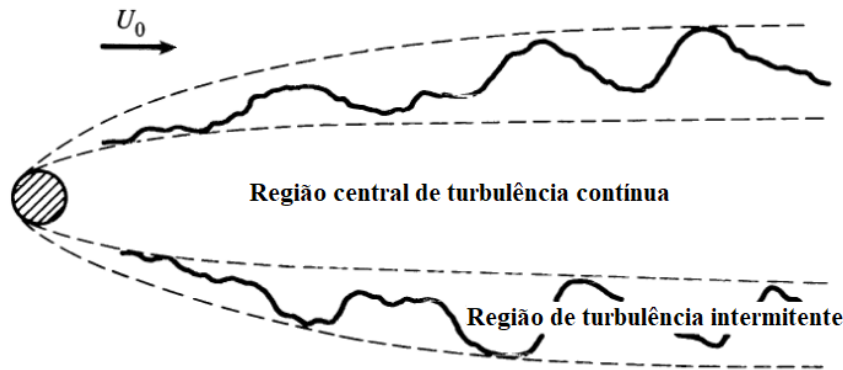
A Tabela 2.3 apresenta a equação da flutuação normalizada  $\hat{u}_i$ , cujo propósito é facilitar a análise das características da turbulência. A média,  $\hat{\mu}_{i,1}$ , e a variância,  $\hat{\mu}_{i,2}$ , de  $\hat{u}_i$  são 0 e 1, respectivamente. A curtose  $K_i$  e a assimetria  $S_i$  de  $\hat{u}_i$ , cujas equações também são apresentadas pela Tabela 2.3, são parâmetros que caracterizam a morfologia da função densidade de probabilidade normalizada das flutuações médias de velocidade  $\hat{f}(\hat{u}_i)$ . Em paralelo com essa caracterização, a curtose e a assimetria são úteis também na caracterização da anisotropia e da heterogeneidade do escoamento turbulento. A assimetria é o grau de desvio, ou afastamento da simetria, de uma distribuição. Se uma das "caudas" da curva de frequência de uma distribuição for mais alongada à direita da ordenada máxima com relação a outra "cauda", a distribuição tem assimetria positiva. Se o caso for o inverso, então a distribuição tem assimetria negativa (SPIEGEL; STEPHENS, 2018). Na turbulência, a assimetria está em função do gradiente da intensidade turbulenta. Em outras palavras,  $S_i$  está vinculado com a convecção da energia cinética turbulenta pelo movimento turbulento, que transfere a energia das regiões mais intensas para as regiões menos intensas (TOWNSEND, 1976). A energia cinética turbulenta  $k$ , cuja equação é apresentada pela Tabela 2.3, é a energia cinética das estruturas turbulentas do escoamento.

A curtose é o grau de achatamento de uma distribuição, em relação a uma distribuição normal. As distribuições com diferentes achatamentos são separadas em três categorias: as leptocúrticas, cujos picos são relativamente altos; as platicúrticas, que têm topos achatados; e as mesocúrticas, que não são muito pontiagudas nem muito achatadas. As distribuições normais pertencem a categoria das mesocúrticas (SPIEGEL; STEPHENS, 2018). No contexto dos estudos sobre turbulência, a curtose, além de caracterizar a morfologia da função densidade de probabilidade de determinada variável aleatória, também mostra alguns aspectos da estrutura espacial do escoamento turbulento. Quando os valores  $K_i$  são muito elevados, isto é, superiores a 3, as oscilações de  $u_i$  são altamente intermitentes. Em outras palavras, os valores de  $u_i$  são bem próximos da sua média em boa parte do tempo, mas ocasionalmente, com certo grau de regularidade, ocorrem intensas flutuações. Portanto, a distribuição espacial das estruturas coerentes é bastante irregular (DAVIDSON, 2004).

A intermitência da turbulência é encontrada nas bordas dos escoamentos turbulentos livres, no escoamento turbulento de grelha, nas camadas limites, na baixa atmosfera, entre outros. A Figura 2.5 apresenta a região de turbulência intermitente em uma esteira atrás de um cilindro. Um outro local onde ocorre a intermitência é nos vórtices de menores escalas da turbulência, e o efeito se intensifica quanto maior for a diferença entre os tamanhos dos maiores e menores vórtices do escoamento turbu-

lento. Isso se deve à cascata de energia, fazendo com que a curtose seja proporcional a  $Re$  (DAVIDSON, 2004; TOWNSEND, 1976).

Figura 2.5 - Imagem instantânea de uma esteira atrás de um cilindro.



Fonte: Adaptado de Hinze (1975).

Nos escoamentos turbulentos livres, principalmente esteiras e jatos, há uma relação entre a produção dos vórtices pelas camadas de cisalhamento e a intermitência da turbulência. A interseção do escoamento turbulento das esteiras, ou das camadas limite, com o escoamento não-turbulento no entorno destas, tem um processo chamado arrastamento (*entrainment*), que constitui na mistura destes dois escoamentos. Este processo ocorre devido a ausência de determinados tamanhos de vórtices que resulta na interrupção da cascata de energia. Em outras palavras, os maiores vórtices não conseguem transferir suas energias para os vórtices de menor escala. Essa ausência de determinados tamanhos de vórtices ocorre nas regiões onde há geração de vórtices de outros tamanhos. Para contornar essa barreira, os vórtices de escalas superiores daqueles que estão ausentes distorcem, mas não "difundem", a superfície delimitadora das esteiras. Como resultado, o escoamento não-turbulento fica rodeado pelo escoamento turbulento das esteiras, fazendo com que o escoamento nesta região seja intermitente. Os vórtices responsáveis pela intermitência das esteiras e dos jatos são chamados de vórtices de arrastamento, e as distorções da superfície delimitadora são chamados de movimentos turbulentos de larga escala (POPE, 2000; TOWNSEND, 1976).

Os movimentos turbulentos de larga escala das esteiras, ou simplesmente "rolos", se afastam uns dos outros e aumentam de tamanho a jusante do escoamento principal, diminuindo a quantidade deles. Somado a isso, um rolo pode se misturar ou

ser desfeito pelos rolos vizinhos. Estes movimentos de larga escala são fortemente influenciados pela geometria do escoamento e pelas condições de contorno (POPE, 2000).

Quanto a caracterização da anisotropia e da heterogeneidade do escoamento turbulento, são usados, assim como  $S_i$  e  $K_i$  os parâmetros  $R_{u_i u_j}$ ,  $A_{u_i u_j}$  e  $C_{u_i u_j}$ , cujas equações estão na Tabela 2.3. Tais parâmetros são chamados de coeficientes de anisotropia. Para que a turbulência seja isotrópica e homogênea, as variáveis aleatórias precisam ser estatisticamente independentes e idênticas em todas as direções, portanto  $R_{u_i u_j} = 1$  e  $A_{u_i u_j} = C_{u_i u_j} = 0$ . Além disso, as distribuições das variáveis aleatórias precisam ser normais, isto é,  $S_i = 0$  e  $K_i = 3$ , para que a turbulência seja isotrópica e homogênea. O coeficiente de anisotropia  $A_{u_i u_j}$  e o coeficiente de correlação  $C_{u_i u_j}$  são iguais a zero pois  $\overline{u'_i u'_j} = \overline{u'_i} \overline{u'_j}$  se  $u'_i$  e  $u'_j$  são variáveis aleatórias independentes (DAVIDSON, 2004). Escoamentos turbulentos com geração de vórtices são altamente anisotrópicos, logo  $A_{u_i u_j} \neq 0$ ,  $C_{u_i u_j} \neq 0$  e  $R_{u_i u_j} \neq 1$  (BESSON, 2001; DURÃO et al., 1988; SANQUER, 1998).

Outros parâmetros caracterizadores que são usados na análise da turbulência são os coeficientes de correlação, cuja equação geral é apresentada pela Equação (2.18). A Tabela 2.4 apresenta as particularidades de cada coeficiente na equação geral. Os coeficientes de correlação mostram o grau de correlação entre as variáveis aleatórias e avaliam as estruturas espaciais e temporais da turbulência no escoamento (TOWNSEND, 1976).

$$r_{ij}(\vec{r}, \vec{\xi}, t, \eta) = \frac{\overline{u'_i(x, y, z, t) u'_j(x + \xi_1, y + \xi_2, z + \xi_3, t + \eta)}}{\sqrt{\overline{u'^2_i(x, y, z, t)} \overline{u'^2_j(x + \xi_1, y + \xi_2, z + \xi_3, t + \eta)}}}; \quad (2.18)$$

Tabela 2.4 - Particularidades da Equação 2.18 dos coeficientes de correlação.

Coeficiente	
correlação cruzada espacial	$i \neq j; \vec{\xi} \neq 0; \eta = 0$
auto-correlação espacial	$i = j; \vec{\xi} \neq 0; \eta = 0$
correlação cruzada temporal	$i \neq j; \vec{\xi} = 0; \eta \neq 0$
auto-correlação temporal	$i = j; \vec{\xi} = 0; \eta \neq 0$
correlação cruzada espaço-temporal	$i \neq j; \vec{\xi} \neq 0; \eta \neq 0$
auto-correlação espaço-temporal	$i = j; \vec{\xi} \neq 0; \eta \neq 0$

Fonte: Hinze (1975).

Com os coeficientes de correlação, torna-se possível a análise da distribuição de energia dos vórtices de diferentes tamanhos com a transformada de Fourier. A transformada de Fourier das correlações é chamada de espectro de energia, que é dado como sendo:

$$E(w) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(s) e^{-iws} ds = \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(s) \cos(ws) ds, \quad (2.19)$$

onde  $R(s) = \overline{u'(t)u'(t+s)}$ .

### 2.3.2 Simetrias estatísticas

Há simetria estatística em uma variável média quando esta é invariante sobre qualquer transformação aplicada a ela (POPE, 2000). Seguem algumas simetrias estatísticas aplicadas a turbulência.

- **Estacionaridade:** A turbulência é estatisticamente estacionária de todas



as suas variáveis médias se estas forem invariantes sobre uma translação no tempo. Tal afirmação se baseia no teorema da ergodicidade, o qual afirma que, em condições propícias, as médias temporais são equivalentes à média de amostragem. Isto é, a função aleatório estacionária  $v(t, \omega)$  é ergótica para todos os  $\omega$  se:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t, \omega) dt = \langle v \rangle. \quad (2.20)$$

Em outras palavras, o número de medições, assim como a proporção do tempo de medição com relação às escalas de tempos, deve ser grande o suficiente para que as médias temporais obtidas experimentalmente sejam iguais às médias do conjunto.

- **Homogeneidade:** A turbulência é estatisticamente homogênea se todas as suas variáveis médias forem invariantes sobre uma translação espacial. Aplicando uma hipótese de ergodicidade, tal condição só é possível se a média do conjunto equivaler à média espacial, isto é:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^L v(\vec{r}', \omega) dx'_i = \langle v \rangle. \quad (2.21)$$

- **Isotropia:** A turbulência é isotrópica se todas as suas variáveis médias forem invariantes em qualquer rotação de coordenadas.
- **Axiométrica:** A turbulência é axiométrica se todas as variáveis médias forem invariantes em um rotação entorno de um eixo.

Sobre as médias, sabe-se também que  $\overline{u_{i,N}(\vec{r}, t)} = \overline{u_i(\vec{r}, t)}$ , se  $N$  for um número suficientemente grande. Quanto a média temporal de  $u_i$ , ela é igual a  $\overline{u_i(\vec{r}, t)}$ , se  $T$  tender ao infinito ou quando  $T$  é muito maior que as escalas de tempo (HINZE, 1975).

### 2.3.3 Escalas do escoamento turbulento

Pode-se notar que, no escoamento turbulento, o movimento turbulento tem diversas escalas, das maiores, as quais representam as dimensões do escoamento, às menores, nas quais a difusão se torna significativa devida a viscosidade molecular. De forma geral, todas elas representam fenômenos específicos da turbulência. E, para cada uma delas, há vórtices de dimensão proporcional. Somada aos vórtices, a energia também é distribuída entre as escalas de movimento. Tal distribuição é chamada de cascata

de energia. Esta é chamada assim devido a uma série de fenômenos relacionados a energia que ocorre na turbulência. A cascata funciona na seguinte forma: nas grandes escalas, a energia cinética do escoamento médio é drenada para a turbulência devido aos mecanismos que produzem turbulência. Em seguida, esta energia é transferida para escalas menores através dos processos invíscidos. Esta transferência é repetida, por estes mesmos processos, fazendo com que a transmissão da energia passe para escalas cada vez menores até as menores das escalas. Nestas, a energia é dissipada em forma de calor pela viscosidade. A seguir, serão tratados os três principais conjuntos de escalas do movimento turbulento, as escalas integral, as micro-escalas de Taylor e as escalas de Kolmogorov.

### Escalas Integrais

As maiores estruturas do escoamento turbulento são responsáveis pelo transporte de momento linear. Estas estruturas são caracterizadas pelas escalas integrais, cuja definição é a integral do coeficiente de auto-correção (DAVIDSON, 2004; POPE, 2000). A escala integral de tempo da componente  $i$  da velocidade é definida como sendo:

$$t_{I,u_i} = \int_0^{\infty} r_{ii}(x_i, \xi_j, t, \eta) d\eta. \quad (2.22)$$

As escalas integrais de comprimento da turbulência são definidas como sendo:

$$l_{I,u_i,\xi_j} = \int_0^{\infty} r_{ii}(x_i, \xi_j, t, \eta) d\xi_j, \quad (2.23)$$

onde  $u_i$  ( $i = 1,2,3$ ) é uma das componentes e  $\xi_j$  ( $j = 1,2,3$ ) é uma das componentes de  $\vec{\xi}$ . É possível vincular as escalas temporais e espaciais através da Hipótese de Taylor da turbulência congelada. Tal hipótese estabelece que, caso a intensidade turbulenta seja pequena com relação à velocidade de convecção do escoamento, as flutuações turbulentas em um ponto fixo serão causadas pelo escoamento turbulento que passa neste ponto como se este escoamento fosse um campo "congelado" (HINZE, 1975). Em outras palavras, as flutuações turbulentas de um dado ponto fixo está em função da velocidade de convecção. Considerando a velocidade de convecção  $U_c$  igual a velocidade local média, desde que o escoamento se desloque em uma direção, podemos estabelecer a seguinte relação entre as escalas:

$$l_{I,u_i x_j} = U_{cx_j} t_{I,u_i}, \quad (2.24)$$

onde  $U_{cx_j}$  é a velocidade de convecção do escoamento na direção  $x_j$ .

### Micro-Escalas de Taylor

As micro-escalas de Taylor são definidas pela derivadas dos coeficiente de auto-correlação. Estas escalas são as intermediárias entre as integrais, a qual sofre pouca influência da viscosidade, e as escalas de Kolmogorov, a qual sofre intensa influência da viscosidade (TENNEKES; LUMLEY, 1972). A micro-escala temporal de Taylor da componente  $i$  da velocidade é definida como sendo:

$$\frac{1}{t_{T,u_i}^2} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 r_{ii}(\eta)}{\partial \eta'^2} \right]_{\eta=0}. \quad (2.25)$$

As micro-escalas espacial de Taylor de um escoamento bidimensional são definidas como sendo:

$$\frac{1}{l_{T,u_i x_j}^2} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 r_{ii}(x_j)}{\partial x_j^2} \right]_{x_j=0}. \quad (2.26)$$

Fundamentado na Hipótese de Taylor, as relações entre as escalas temporais e espaciais são:

$$l_{T,u_i x_j} = U_{cx_j} t_{T,u_i}. \quad (2.27)$$

### As Escalas de Kolmogorov

As escalas de Kolmogorov são aquelas que representam as menores escalas do escoamento turbulento, na qual predomina a ação dissipativa da viscosidade molecular. As escalas de Kolmogorov são definidas como sendo:

$$l_k = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}; \quad t_k = \left( \frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2}; \quad u_k = (\nu \varepsilon)^{1/4}. \quad (2.28)$$

onde  $l_k$ ,  $t_k$  e  $u_k$  são respectivamente a escala de comprimento, de tempo e de veloci-

dade de Kolmogorov; enquanto que  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\varepsilon$  é a dissipação de energia cinética da turbulência.

Nestas escalas, como as forças inerciais estão na mesma ordem das forças viscosas, o número de Reynolds é unitário ( $l_k u_k / \nu = 1$ ). Tal característica se apoia no argumento de, que para a dissipação ser efetiva, o número de Reynolds precisa ser suficientemente pequeno (POPE, 2000). Uma outra observação que deve ser constatada é o fato dos movimentos turbulentos nas menores escalas serem estatisticamente independentes aos movimentos turbulentos das maiores escalas. Isso se deve às escalas de tempo das menores escalas serem muito pequenas. Como resultado disto, a turbulência das menores escalas apenas depende da energia fornecida pela turbulência das maiores escalas e da viscosidade cinemática. Aliás, é coerente afirmar que os valores destes dois elementos são iguais, pois a taxa de mudança total da energia das menores escalas é proporcional à escala de tempo do escoamento como um todo (TENNEKES; LUMLEY, 1972).

### Relações entre Escalas

Diferentes relações das escalas espaciais e temporais são apresentadas pela Tabela 2.5. Tais relações levam em consideração que a escala de comprimento integral  $l_I$  seja igual a  $l_I = k^{3/2} / \varepsilon$ .

Tabela 2.5 - Diferentes escalas do escoamento turbulento.

Escala	Espacial	Temporal	Velocidade	Grandezas Diversas
Integral	$l_I$	$t_I = l_I /  U $	$\sqrt{k}$	$R_{e_I} = \frac{\sqrt{k} l_I}{\nu}$
Taylor	$l_T = l_I (15 / R_{e_I})^{1/2}$	$t_T = l_T /  U $	—	—
Kolmogorov	$l_k = l_I / R_{e_I}^{3/4}$	$t_k = l_k / u_k$	$u_k = \nu / l_k$	—

Fonte: Besson (2001) e Hinze (1975).

Se a turbulência é homogênea e isotrópica, a dissipação de energia cinética da turbulência pode ser expressa com a micro-escala temporal de Taylor na seguinte equação:

$$\varepsilon = 15 \nu u'^2 / l_T^2. \quad (2.29)$$

## 2.4 Escoamento turbulento plenamente desenvolvido em um canal

É esperado que as características do escoamento na região de entrada da câmara de combustão sejam as mesmas do escoamento turbulento plenamente desenvolvido. A presente seção expõe as definições de um escoamento turbulento plenamente desenvolvido, assim como a geometria e a notação utilizada, os quais o caracterizam.

### 2.4.1 Definições

Para o escoamento ser turbulento e plenamente desenvolvido em um canal, ele necessita ter três características. Para ser turbulento, o escoamento precisa ter um número de Reynolds maior que um valor crítico, que depende da rugosidade da parede ( $2000 < R_{ec} < 3000$ ) (BESSON, 2001). Para ser plenamente desenvolvido, as quantidades médias do escoamento, com exceção da pressão, não variam longitudinalmente e são estatisticamente estacionárias (POPE, 2000). Por fim, a razão entre o comprimento do canal e a sua altura deve ser superior a 59 (SANQUER, 1998). Satisfazendo estes três pontos, pode-se considerar o escoamento como sendo turbulento plenamente desenvolvido.

Antes de abordarmos sobre as equações do escoamento turbulento em questão, apresentaremos duas variáveis fundamentais para a descrição teórica deste. Estas duas variáveis são a tensão de cisalhamento na parede e a velocidade de fricção. A tensão de cisalhamento na parede  $\tau_w$  é definida como sendo:

$$\tau_w \equiv \rho\nu \left( \frac{d\bar{u}}{dy} \right)_{parede} . \quad (2.30)$$

Tal definição parte da equação da tensão de cisalhamento total, a qual é a soma das tensões viscosas e as tensões de Reynolds, e da condição de contorno de não deslizamento na parede, isto é, as tensões de Reynolds são nulas. Deve-se ressaltar que a viscosidade  $\nu$  também é um parâmetro relevante na descrição do escoamento próximo a parede, pois, assim como  $\tau_w$ , definem as escalas viscosas.

A velocidade de fricção  $u_\tau$  é definida como sendo:

$$u_\tau \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (2.31)$$

combinando com a definição de  $\tau_w$  temos:

$$u_\tau^2 = \nu \left( \frac{d\bar{u}}{dy} \right)_{parede}. \quad (2.32)$$

Com  $u_\tau$ , é possível definir uma escala de comprimento viscoso, a qual é apresentada abaixo:

$$\delta_\nu \equiv \frac{\nu}{u_\tau}. \quad (2.33)$$

E com  $\delta_\nu$ , junto com  $u_\tau$ , obtêm-se duas variáveis adimensionais,  $y^+$  e  $\bar{u}^+$ , onde a primeira é a distância da parede medida em comprimentos viscosos ou unidades de parede (POPE, 2000). Ambas são expressas nas seguintes equações:

$$y^+ \equiv \frac{y}{\delta_\nu} = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad \text{e} \quad \bar{u}^+ \equiv \frac{\bar{u}}{u_\tau}, \quad (2.34)$$

Usando  $y^+$  como base, definem-se duas diferentes regiões próximas à parede: a camada viscosa da parede ( $y^+ < 50$ ) e a camada externa ( $y^+ > 50$ ). Na camada viscosa da parede, diferente da camada externa, as contribuições viscosas são significativas. Nestas duas regiões, ou camadas, há quatro sub-regiões ou sub-camadas cujos limites, características e equações são apresentadas nas tabelas abaixo:

Tabela 2.6 - Limites e características das sub-regiões no escoamento próximo à parede.

sub-região	limites	características
Viscosa	$y^+ < 5$	Tensor de Reynolds é desprezível com relação às tensões viscosas.
Tampão ( <i>buffer layer</i> )	$5 < y^+ < 30$	Região de transição entre a dominação da viscosidade e a dominação da turbulência.
Logarítmica	$30 < y^+ < 300$	A viscosidade tem pouca influência no escoamento.
de Velocidade Deficitária	$y^+ > 300$	A viscosidade afeta muito pouco o escoamento.

Fonte: Pope (2000), Tennekes e Lumley (1972).

Tabela 2.7 - Equações das sub-regiões no escoamento próximo à parede.

Sub-camada	equação
Viscosa	$\bar{u}^+ = y^+$
Tampão ( <i>buffer layer</i> )	-
Logarítmica	$\bar{u}^+ = \kappa^{-1} \ln y^+ + B$
de Velocidade deficitária	$\frac{U_{eixo} - \bar{u}}{u_\tau} = -\kappa^{-1} \ln y/h + B'$

Fonte: Pope (2000).

Na equação da sub-camada logarítmica,  $\kappa$  é a constante de von Kármán e  $B$  é uma constante que é função da rugosidade da parede. O primeiro é igual a 0,41, enquanto que o segundo, segundo Pope (2000), está em uma faixa que se estende 5 % em torno

de 5,2. A constante  $B'$  da equação da sub-camada de velocidade deficitária é uma constante que é função que depende do escoamento.

Considerando que o escoamento turbulento plenamente desenvolvido é estatisticamente estacionário e estatisticamente unidimensional, cuja velocidade depende somente de  $y$ , temos as seguintes equações:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0, \quad (2.35)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} - \frac{d}{dy} \overline{v'^2} = 0, \quad (2.36)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \frac{d^2}{dy^2} \bar{u} - \frac{d}{dy} \overline{u'v'} = 0. \quad (2.37)$$

Levando em consideração a condição de contorno  $\bar{v}|_{y=0} = 0$ , pode-se deduzir, a partir da Equação (2.35), que  $\bar{v}$  é zero para todo  $y$ . Integrando as Equações (2.36) e (2.37) em  $y$  de 0 a  $h/2$ , e considerando que  $\overline{v'^2}|_{y=0} = 0$ , tem-se:

$$-\frac{1}{\rho} (\bar{P} - P_w) - \overline{v'^2} = 0, \quad (2.38)$$

$$-\frac{h}{2\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \frac{d}{dy} \bar{u} - \overline{u'v'} = 0. \quad (2.39)$$

Derivando a Equação (2.38) em  $x$ , levando em consideração que  $\overline{v'^2}$  é independente de  $x$ , temos:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \frac{dP_w}{dx}, \quad (2.40)$$

onde  $P_w = \overline{P(x,0,0)}$  é a pressão média da parede inferior. Com a Equação (2.40), a Equação (2.37) fica:

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{dP_w}{dx}, \quad (2.41)$$



onde a tensão cisalhante total  $\tau$  é definida como sendo:

$$\tau = \rho\nu \frac{d\bar{u}}{dy} - \rho\overline{u'v'}. \quad (2.42)$$

Como as tensões de Reynolds são nulas na parede, a Equação (2.39) fica:

$$u_\tau^2 = -\frac{h}{2\rho} \frac{dP_w}{dx}. \quad (2.43)$$

Agora, se integrar a Equação (2.37) de  $h/2$  até  $y$ , temos:

$$\overline{u'v'} = u_\tau^2 \left( \frac{y}{h/2} - 1 \right) + \nu \frac{d\bar{u}}{dy}. \quad (2.44)$$

A velocidade de fricção  $u_\tau$  será usada no Capítulo 4 e a Equação (2.44) será usada na seção 4.1 para calculá-la.



### 3 DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS E METODOLOGIA

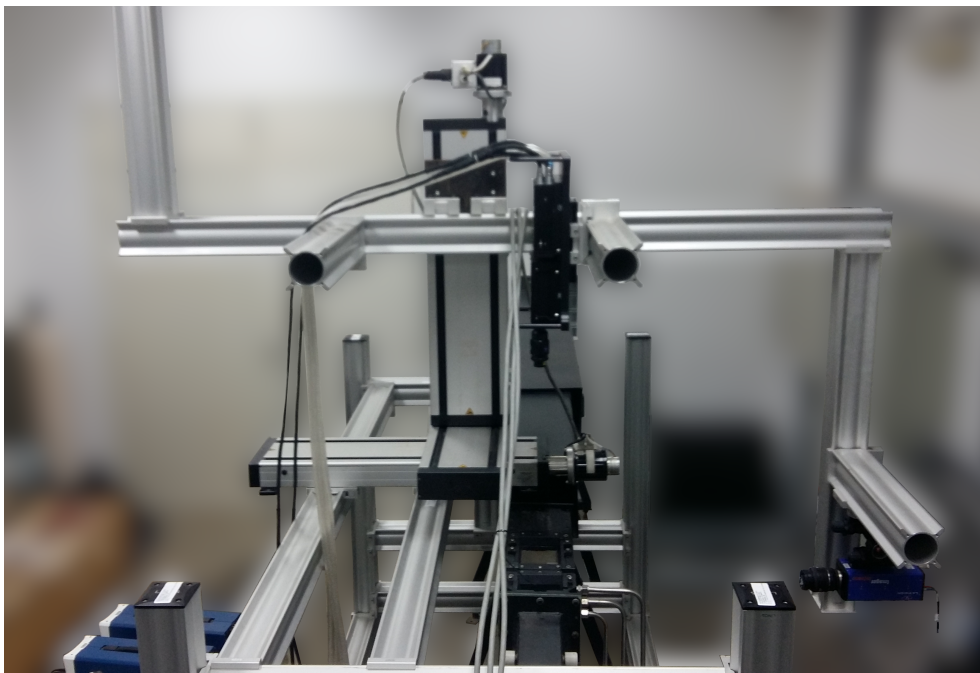
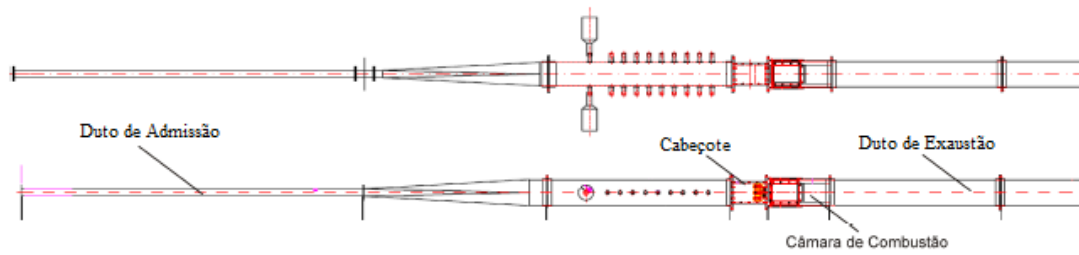
O presente capítulo apresenta as principais características dos dispositivos experimentais e da metodologia da investigação em questão. O entendimento destes aspectos são fundamentais para a análise experimental do escoamento inerte turbulento no BEIC. O BEIC está instalado no Laboratório de Propulsão Líquida (APR-E/LPL) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA). Para esta investigação foi utilizado o PIV com os equipamentos e o software *DaVis* da *LaVision*. Para o pós-processamento, foram utilizados rotinas do *Matlab* nos dados obtidos pelo *DaVis*.

#### 3.1 Banco de Estudos de Instabilidade de Combustão (BEIC) e alimentação de ar

O BEIC é dividido em quatro partes, sendo elas: o duto de admissão de ar, o cabeçote contendo os injetores de combustível, câmara de combustão e duto de exaustão. Um soprador da *Aerzen* (modelo *Delta Blower*) fornece a alimentação de ar. A rotação do motor e duas válvulas controlam o fluxo de ar. Uma válvula libera a passagem do ar para a câmara e a outra para o ambiente. As válvulas além de controlarem o fluxo, evitam o aumento de pressão e da temperatura do ar no tanque de tranquilização. A vazão mássica do ar é medida, no tubo cilíndrico, por um medidor de vazão de 2" do tipo *Coriolis* da *Emerson*, modelo *Micro Motion ELITE* (CMF200M).

Na saída do soprador, existe um duto cilíndrico de 40 mm de diâmetro e 1,9 m de comprimento. Uma seção divergente de 1,02 m de comprimento permite passar da seção cilíndrica para uma seção quadrada de  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . No início do duto de seção quadrada, foi instalado um retificador do tipo colmeia. O ar chega na câmara de combustão depois de ter passado pela seção quadrada. O duto de admissão possui comprimento total de 3,94 m. O canal tem forma quadrada para que sejam utilizados injetores circulares no BEIC no futuro. Um esquema e duas fotos do BEIC com PIV podem ser visualizados nas Figuras 3.1.

Figura 3.1 - Banco de estudos experimentais de instabilidade de combustão e esquema do BEIC obtido em Trevisan (2018).



Fonte: Produção do autor.

### 3.2 Câmara de combustão

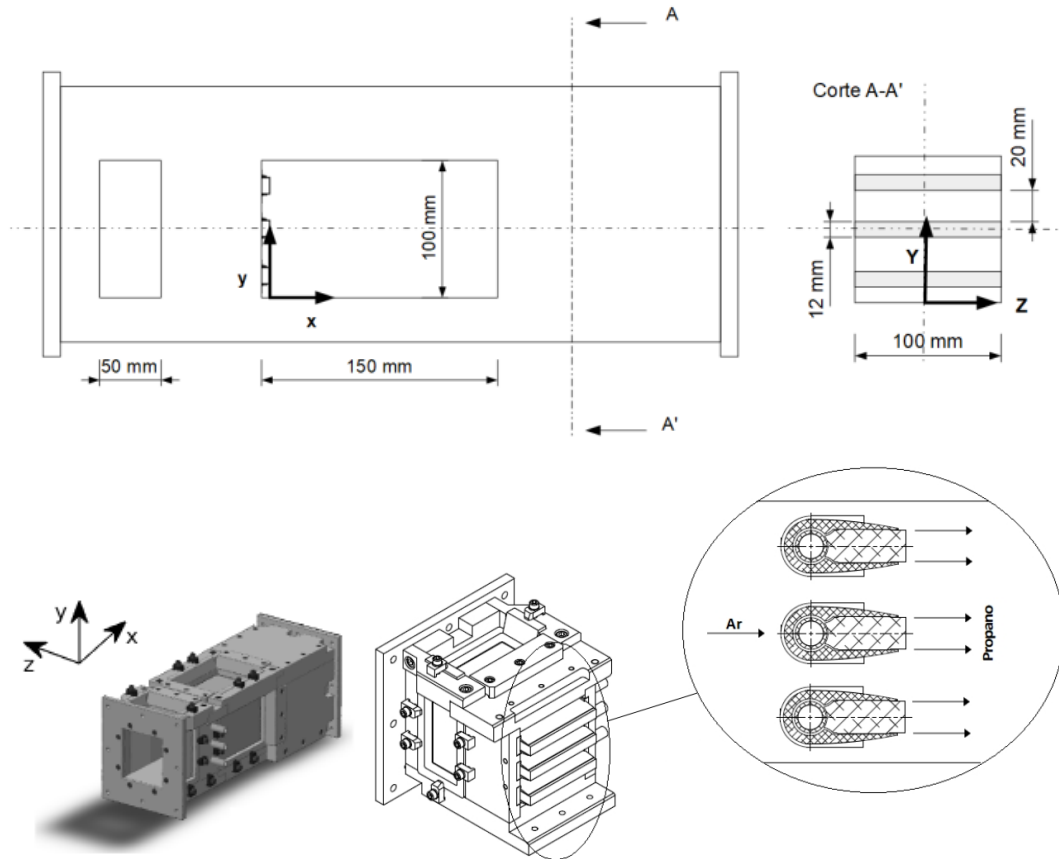
A câmara de combustão retangular do BEIC possui dimensões de  $500\text{ mm}$  de comprimento,  $100\text{ mm}$  de altura e  $100\text{ mm}$  de largura. A cerâmica refratária reveste internamente a câmara para proteger a parte quente desta. As janelas de quartzo são instaladas para possibilitar o acesso ótico necessário para o PIV e outras técnicas de diagnóstico não-intrusivas. O escoamento é descarregado por meio do duto de exaustão. A região de entrada e região principal são as partes que compõem a câmara de combustão. A região de entrada se localiza antes dos injetores e possui janelas de quartzo nas laterais e na parte superior de  $50 \times 100\text{ mm}^2$ . A região principal se localiza após os injetores e possui janelas de quartzo nas laterais e na parte superior de  $150 \times 100\text{ mm}^2$  cada. As dimensões da câmara de combustão podem ser visualizadas na Figura 3.2.

Na região principal, a cerâmica refratária foi pintada de preto, com o objetivo de diminuir a intensidade da luz refletida do plano *laser* do PIV nesta superfície. No entanto, foi constatado que não era suficiente pintar a cerâmica refratária para as medições das seções horizontais, pois os seus orifícios prejudicaram a obtenção de dados. Devido a isso, foi posto papel *Canson* preto sobre a cerâmica refratária.

Nas medições dos planos verticais, alinhados com o eixo principal do escoamento, foi posto papel *Canson* preto na face interna da janela de quartzo do lado oposto da câmera CCD. A finalidade do papel *Canson* era de diminuir o reflexo do *laser* na superfície do quartzo, pois estava prejudicando a obtenção de dados na área de visualização. Nas medições dos planos horizontais da região principal, o papel *Canson* foi removido pois este estava prejudicando as medições. O papel *Canson* dentro da região principal pode ser visualizado na Figura 3.3.

Os três injetores da câmara de combustão têm  $12\text{ mm}$  de altura e são montados na direção longitudinal do duto de admissão em um bloco de  $100 \times 100\text{ mm}^2$ . A distância do injetor central dos demais é de  $20\text{ mm}$ , e a distância dos demais injetores das paredes do bloco é de  $12\text{ mm}$ . O bloqueio dos injetores na entrada da região principal é de 36 %. O bloqueio é a razão entre a área ocupada pelos injetores e a área do canal. Os injetores foram usados como obstáculos e permaneceram desligados durante as medições. O esquema dos injetores podem ser vistos na Figura 3.2.

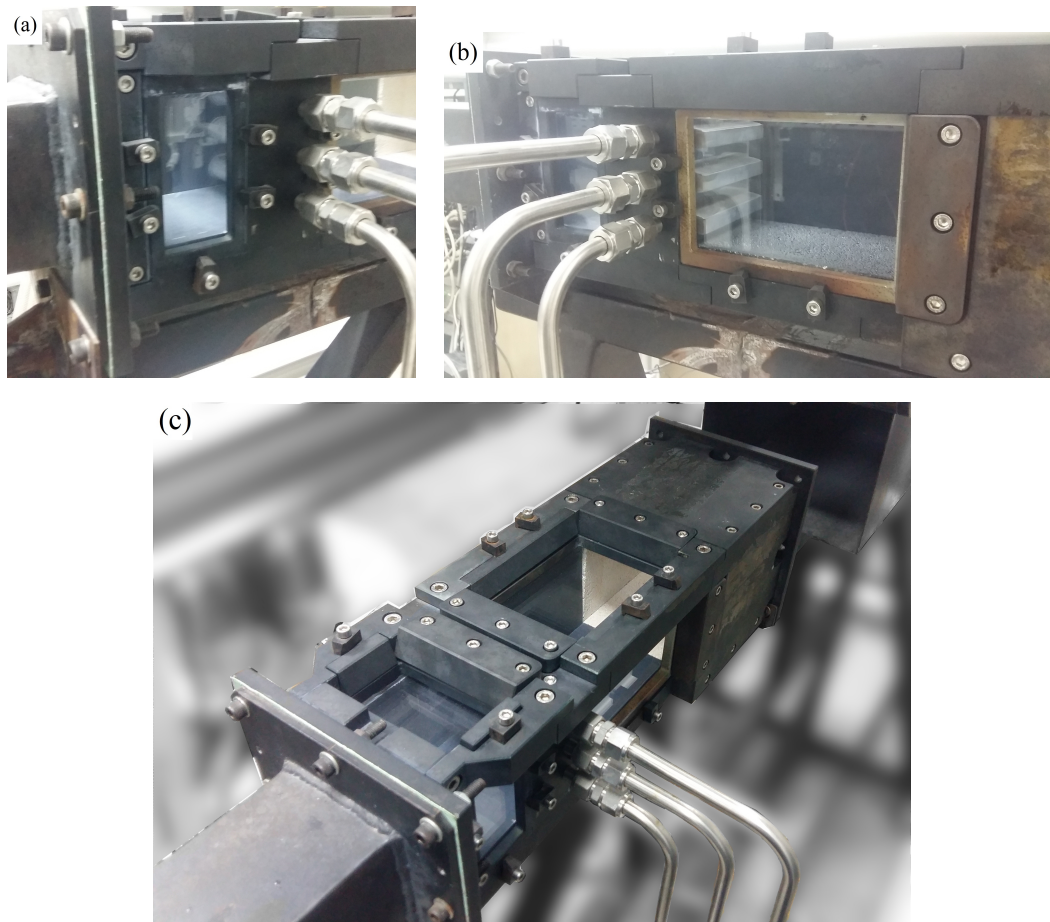
Figura 3.2 - Dimensões e esquema da câmara de combustão e esquema dos injetores.



Fonte: Trevisan (2018) .

O esquema da câmara de combustão, que também está presente na Figura 3.2, mostra as direções dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A componente longitudinal de velocidade,  $u$ , a componente normal vertical de velocidade,  $v$ , e a componente transversal horizontal de velocidade,  $w$ , têm as mesmas direções dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Foi estabelecido por convenção do trabalho que os nomes das componentes de velocidade  $u$ ,  $v$  e  $w$  serão velocidade longitudinal, velocidade normal e velocidade transversal, respectivamente.

Figura 3.3 - (a) Região de entrada da câmara de combustão; (b) região principal da câmara de combustão; (c) câmara de combustão.



Fonte: Produção do autor.

### 3.3 Partículas traçadoras

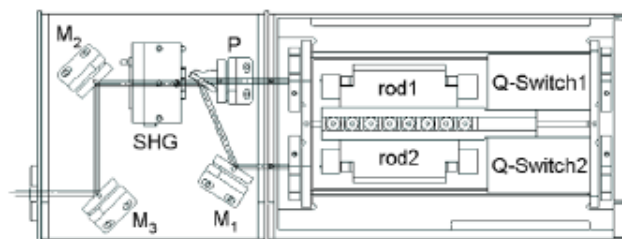
Dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) foi utilizado como partículas traçadoras nesta investigação, cujo diâmetro é da ordem de  $1 \mu\text{m}$  e cuja densidade varia de  $3,9$  a  $4,2 \text{ g/cm}^3$ . A razão da escolha destas partículas reside no fato delas conterem dimensões apropriadas para acompanhar o escoamento de forma confiável, permitirem gravações de imagens de alta resolução e precisão, e sobreviverem à combustão. Uma outra razão do uso das partículas em questão reside na sua disponibilidade no BEIC, pois essas foram utilizadas no trabalho do Trevisan (2018). Uma alternativa a ser utilizada como partículas traçadores seria o óleo. No entanto, o óleo contamina a câmara e não sobrevive à combustão, diferente das partículas de  $\text{TiO}_2$ . Foi utilizado um gerador de partículas do tipo ciclone da *La Vision*, que insere as partículas na seção cilíndrica

do duto de admissão. O uso de tal gerador tem como objetivo obter uma inseminação mais homogênea e mais eficaz principalmente em escoamento com combustão.

### 3.4 Laser

O PIV utilizado neste trabalho é composto por dois *lasers* pulsados de Nd:YAG (*Quantel*) no comprimento de onda de  $1064\text{ nm}$ , que são bombeados por lâmpadas de Flash e operam no modo *Q-Switch*, conforme mostra a Figura 3.4. O intervalo de tempo entre os dois pulsos é controlado nesta configuração. Um polarizador é utilizado para combinar os dois pulsos. Em seguida, o feixe do *laser* é dobrado por um cristal dobrador de frequência. Por fim, o feixe do *laser* passa por um conjunto de lentes afim de produzir um plano *laser* na saída. O comprimento de onda dos pulsos *laser*, após o cristal dobrador, é de  $532\text{ nm}$  e  $100\text{ mJ}$  de energia por pulso de duração de  $6\text{ ns}$ . A separação dos pulsos utilizada, a qual pode ser alterada no software DaVis, é de  $35\text{ }\mu\text{s}$  e a espessura dos pulsos é de  $1\text{ mm}$ . O *laser* foi posicionado em duas configurações: para as seções verticais (planos  $xy$ ), ele foi posicionado em cima das regiões da câmara de combustão; e para as seções horizontais, foi posicionado em posição frontal de uma janela de quartzo. Como a velocidade média medida no eixo central da região de entrada é  $9,0\text{ m/s}$ , então o deslocamento médio das partículas no intervalo de tempo entre dois pulsos *laser* é de  $0,3\text{ mm}$ . Este deslocamento está dentro do intervalo permitido para obter imagens de resolução apropriada. O deslocamento mínimo permitido é na ordem de  $0,01\text{ mm}$ , isto é, um *pixel*, e o deslocamento máximo permitido é aproximadamente um quarto do comprimento da janela de interrogação, isto é,  $0,71\text{ mm}$  (com base na calibração do PIV na área de visualização das seções verticais).

Figura 3.4 - Layout típico do duplo *laser* de Nd:YAG.



Fonte: LaVision (2007b).



### 3.5 Aquisição e processamento de imagem

A gravação de imagem digital foi feita através de uma câmera CCD (*Charge-Coupled Device*), que envia as imagens ao sistema de aquisição e processamento de imagem do PIV. Este sistema é constituído pelo software da *La Vision DaVis* e pelo hardware *Programmable Timing Unit* (PTU) da mesma empresa, os quais estão instalados em um computador pessoal. *DaVis* além de controlar o sistema de câmera, também controla outros dispositivos tal como *lasers*, espectrógrafo etc. O PIV, o LIF (*Laser Induced Fluorescence*), entre outras técnicas de diagnóstico que fazem medições de imagem e de espectroscopia podem ser controladas e estimadas pelo *DaVis* (LAVISION, 2007a). O *Programmable Timing Unit* (PTU) é usado para a sincronização do sistema de aquisição de imagem. A duração do pulso *laser*, intervalo entre os pulsos e o tempo de exposição da câmera são programados pelo software *DaVis* de acordo com a aplicação. Para esta investigação, foi usado o módulo *FlowMaster* do *DaVis* para a obtenção de dados do PIV.

A câmera CCD foi usada para capturar a luz espalhada pelas partículas traçadoras que são iluminadas pelos pulsos *lasers*. As lentes utilizadas pela câmera são do tipo *F-mount* da marca *Nikkor* com distância focal de  $50\text{ mm}$  junto com adaptadores. A câmera foi posicionada perpendicularmente ao plano dos pulsos *laser*. O número de pixels da câmera é  $1376 \times 1040\text{ pixels}$ . Cada qual tem a dimensão de  $6,5 \times 6,5\ \mu\text{m}$ . Além disso a faixa dinâmica e a frequência de leitura da CCD é de  $12\text{ bits}$  e  $10\text{ fps}$ , respectivamente. O tempo de aquisição de imagem e a frequência de amostragem equivalem a  $197\text{ ms}$  e  $5\text{ Hz}$ , respectivamente. A frequência de amostragem do sistema está em função da frequência do *laser* e da frequência da câmara. Uma foto da câmera CCD pode ser visualizada pela Figura 3.5.

Figura 3.5 - Câmera CCD utilizada no PIV.



Fonte: Produção do autor.

### 3.6 Análise interrogatória

No cálculo do campo de velocidade do escoamento a partir das imagens gravadas, foi utilizado janelas de interrogação com passo múltiplo com diminuição do tamanho das janelas. Em outras palavras, o campo de velocidade é calculado por um número arbitrário de interações com a dimensão das janelas de interrogação decrescente. O tamanho das janelas de interrogação iniciais é de  $32 \times 32$  *pixels* com sobreposição de 25 %, e o tamanho das janelas de interrogação finais é de  $16 \times 16$  *pixels* sem sobreposição. No primeiro passo, com as janelas de interrogação iniciais, é calculado o campo de velocidade de referência. No passo seguinte, utiliza-se as janelas de interrogação finais para estimar os vetores usando o campo de velocidade de referência como parâmetro. A finalidade do passo múltiplo é aumentar a precisão e a confiabilidade do cálculo do campo de velocidade. Além disso, foi utilizado correção de imagem e filtro médio para aumentar ainda mais a qualidade do campo de velocidade.

Correlações estatísticas foram usadas no cálculo do campo de velocidade. Em cada janela de interrogação, as funções de correção operam nas intensidades das partículas traçadoras, a fim de estimar o deslocamento médio e a velocidade média do conjunto de partículas. As imagens foram gravadas no modo *double frame* (quadro duplo), no qual utiliza correlação cruzada para obter o campo de velocidade do escoamento.

### 3.7 Incertezas experimentais

Todas os componentes do aparato experimental são fontes de incertezas experimentais. Dentre estes componentes, aqueles que pertencem ao PIV fazem com que as medições desta técnica contenham um vasto e complexo arranjo de erros que envolve diversos fatores, os quais se estendem desde a captura de imagens até o pós-processamento (BENABED, 2017). Estes erros e o grande número de processos bastante complicados do PIV, impossibilitam a realização do cálculo e da análise quantitativa do erro experimental geral a partir das fontes deste (WESTERGAARD, 1994). Não obstante esta limitação, é possível obter indiretamente o erro experimental geral a partir da análise estatística dos resultados adquiridos pelo PIV. Faz necessário, antes de abordarmos sobre alguns erros mais comuns da técnica e sobre os meios para calcular o erro experimental, explicar resumidamente os dois tipos de erro experimental, a fim de classificarmos as incertezas, na intenção de obter uma análise mais clara e sistemática do complexo arranjo de erros desta técnica.

Devido a impossibilidade de eliminar a incerteza experimental de qualquer medição de qualquer grandeza física, a minimização dos erros se torna a única opção viável.

Há dois tipos de erro experimental: o erro sistemático e o erro aleatório. E cada um deles é minimizado de uma forma diferente. O erro aleatório envolve a flutuação, ou a variação aleatória da medição, cuja precisão só é aumentada, ou o erro aleatório minimizado, através da estatística de medições repetidas e através do melhoramento da técnica de medição. Erro sistemático afeta todas as medições da mesma forma e não pode ser eliminado pela estatística de medições repetidas, mas apenas através do refinamento da técnica de medição. Resumidamente, o erro aleatório afeta a precisão, enquanto que o erro sistemático afeta a exatidão (MCKENDRICK, 2015; TAYLOR, 1997).

No PIV algumas das fontes de erro sistemático residem na calibração espacial, a qual permite ao software da técnica converter pixels em deslocamento, nos processos computacionais, no foco da câmera e entre outras. Uma outra fonte de erro sistemático, a qual exigiu diversos ajustes para minimizar a sua influência nos resultados, é a captura de luz refletida e refratada nos quartzos, nos injetores e na cerâmica refratária pela câmera CCD, cujo alcance dinâmico é limitado. O resultado desta fonte de erro são imagens da câmera com regiões denegridas pela iluminação intensa. Além desta fonte, a quantidade de partículas traçadoras que ficam e se acumulam nas paredes, a longo prazo, também interfere na qualidade dos resultados, exigindo limpezas frequentes delas. Os erros aleatórios do PIV são provenientes do ruído da câmera CCD, partículas que se movem para fora do plano *laser*, flutuação da qualidade da iluminação das partículas etc.

Devido ao número de fontes de erro sistemático e de erro aleatório presente no PIV, a determinação do valor exato da incerteza experimental é irrealizável. No entanto, embora este empecilho, é possível obter indiretamente o erro experimental geral de diversas formas através de estatísticas. Uma delas é considerar que a distribuição de frequências das medidas repetidas da velocidade instantânea é similar a distribuição normal, ou distribuição Gaussiana, isto é, a função densidade de probabilidade  $f(u; \vec{r}, t)$  equivale a:

$$f(u; \vec{r}, t) = G_{\bar{u}, \sigma}(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(u-\bar{u})^2/2\sigma^2}, \quad (3.1)$$

onde  $\bar{u}$  e  $\sigma$  é o centro e a largura da distribuição, conforme demonstrado em Taylor (1997). A partir desta equação é possível obter a equação da incerteza da velocidade instantânea  $u$  a partir da sua distribuição normal. Como  $u$  é função do deslocamento e do intervalo de tempo que separa dois pulsos *laser*, temos a seguinte equação para

a incerteza de  $u$ :

$$\varepsilon_u = \frac{u_{real} - u_{medido}}{u_{medido}} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2}, \quad (3.2)$$

onde  $\varepsilon_{\Delta t}$  e  $\varepsilon_{\Delta x}$  são os erros do intervalo de tempo  $\Delta t$  e do deslocamento  $\Delta x$ , respectivamente (RAFFEL et al., 2007). Destes erros, apenas o  $\varepsilon_{\Delta t}$  está suscetível unicamente ao erro sistemático proveniente da configuração e das limitações do equipamento da *La Vision*, enquanto que o  $\varepsilon_{\Delta x}$  está propenso tanto a fontes de erro sistemático, tal como a calibração, e a fontes de erro aleatório, tal como ruído da câmera. Sabe-se que, para o presente trabalho,  $\Delta t$  vale  $35 \mu s$  e  $\varepsilon_{\Delta t}$  é menor que  $10 ns$ . Logo o erro relativo do intervalo de tempo é menor que  $0,01 \%$ . No que diz respeito ao erro relativo do deslocamento, desconsiderando a incerteza vinda da calibração e de outras fontes, o deslocamento máximo da partícula é de  $10 pixels$  com incerteza de  $0,1 pixels$ , fazendo com que o erro relativo do deslocamento equivaler a  $1 \%$ . Considerando também a incerteza vinda da calibração, a incerteza do deslocamento ficaria em torno de  $10 \%$ . Se for considerar outras fontes de erro, a incerteza do deslocamento seria maior que  $10 \%$ . Pode-se concluir que o erro relativo do deslocamento é mais significativo do que o erro relativo do intervalo de tempo. Como resultado disso, obtemos a seguinte simplificação para Equação (3.2):

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon_{\Delta x}}{\Delta x}. \quad (3.3)$$

Embora os erros estimados acima são indicativos da incerteza esperada, eles não são suficientes em uma abordagem mais rigorosa. Há outras formas de estimar formalmente a incerteza do PIV, tal como técnicas que levam em consideração as imagens da câmera CCD, picos de correlação, vetores de velocidade, entre outros. Em um caso particular, foi utilizado o método estatístico de correlação das intensidades da luz, no qual considera a disparidade das partículas, ruído da câmera etc. (MICHELIS, 2017). Neste método, que usa correlação cruzada, a incerteza é estimada através do mapeamento das diferenças residuais das intensidades luminosas em cada janela de interrogação.

Para a presente investigação, foi utilizado um método de calcular as incertezas relacionado a uma média que é apresentado por Benedict e Gould (1996). A Tabela 3.1 mostra as variâncias de estatísticas e suas respectivas incertezas, que servem para

qualquer distribuição, utilizadas neste estudo. Além destas incertezas, também estão presentes na tabela aqueles destinadas apenas para as distribuições normais. Em um grau de confiança de 95 %, a incerteza de uma média de uma variável qualquer  $q$  é dada pela seguinte função:

$$\delta\bar{q} = \pm 1,96\sqrt{\frac{\text{var}(\bar{q})}{N}}, \quad (3.4)$$

onde  $\text{var}(\bar{q})$  é a variância de  $\bar{q}$  e  $N$  é o número de quadros.

Tabela 3.1 - Variâncias multiplicadas por  $N$ .

Grandeza	Distribuição qualquer	Distribuição normal
$\overline{u_i}$	$\overline{u_i'^2}$	$\overline{u_i'^2}$
$\sqrt{\overline{u_i'^2}}$	$[\overline{u_i'^4} - (\overline{u_i'^2})^2]/4\overline{u_i'^2}$	$\overline{u_i'^2}/2$
$\overline{u_i' u_j'} \ (i \neq j)$	$\overline{u_i'^2 u_j'^2} - (\overline{u_i' u_j'})^2$	$\overline{u_i'^2} \overline{u_j'^2} + (\overline{u_i' u_j'})\sqrt{\overline{u_i'^2} \overline{u_j'^2}}$
$\overline{u_i'^2}$	$\overline{u_i'^4} - (\overline{u_i'^2})^2$	$2(\overline{u_i'^2})^2$
$\overline{u_i'^3}$	$\overline{u_i'^6} - (\overline{u_i'^3})^2 - 6\overline{u_i'^4} \overline{u_i'^2} + 9(\overline{u_i'^2})^2$	$6(\overline{u_i'^2})^3$
$\overline{u_i'^4}$	$\overline{u_i'^8} - (\overline{u_i'^4})^2 - 8\overline{u_i'^5} \overline{u_i'^3} + 16(\overline{u_i'^3})^2 \overline{u_i'^2}$	$96(\overline{u_i'^2})^4$

Fonte: Benedict e Gould (1996).

### 3.7.1 Tipos de erros do PIV

Os tipos de erros existentes no PIV são numerosos, há aqueles que se originam nas condições experimentais (tais como o nível de ruído digital, o número de partículas, instrumentos de medida, calibração, intensidade do *laser*, configuração da câmera etc.) e há aqueles que se originam nos processos computacionais na determinação do campo de velocidade (janelas de interrogação, intenso gradiente de velocidade dentro da janela). Raffel et al. (2007) expõem os tipos de erros mais comuns na técnica do PIV padrão, em seu livro dedicado a essa técnica. Apesar dos tipos de erros do PIV serem bem conhecidos, estudos presentes na literatura mostram que as análises de cada um deles são longe de serem triviais (GALATI, 2017; BOILLOT; PRASAD, 1996; HART, 2000; HUAND et al., 1997). Alguns dos erros do PIV são:

- erro aleatório: causado pelo ruído na gravação das imagens;
- erro de tendência: causado pelo fenômeno chamado de *pixel-locking*, o qual o pico de sinal tende a se posicionar no pixel mais próximo;
- erro de gradiente: resultado pela rotação e deformação do escoamento dentro de uma janela de interrogação;
- erro de rastreamento: causado pela incapacidade de algumas partículas de acompanharem o escoamento;
- erro de aceleração: surge devido a aproximação da velocidade Euleriana local ao movimento Lagrangiano das partículas;
- erro de raiz quadrada média: o desvio dos deslocamentos das partículas do valor médio;
- erro *outlier*: causado pela incompatibilidade do pico de correlação na janela de interrogação, pois o pico não tem tamanho apropriado. Por causa desta incompatibilidade, o vetor de velocidade tem um valor e direção arbitrária. A origem do pico de sinal fraco reside ao número insuficiente de partículas na janela de interrogação, ao gradiente de velocidade alto (erro de gradiente) e ao intenso movimento tridimensional do escoamento.

Alguns erros podem ser minimizados por adaptações das condições experimentais. No entanto, certos métodos de minimização de erro podem provocar o aumento de outros erros. Há erros que não podem ser eliminados ou reduzidos. Um exemplo, mesmo se a gravação de imagem não tiver nenhum ruído, a localização do pico de correlação pode ser influenciada pelas correlações aleatórias entre partículas que não pertencem ao mesmo par. Além destes erros, há aqueles que não podem ser eliminados devido à natureza do escoamento. Em um escoamento turbulento sempre haverá erros de gradiente (PRASAD, 2000).

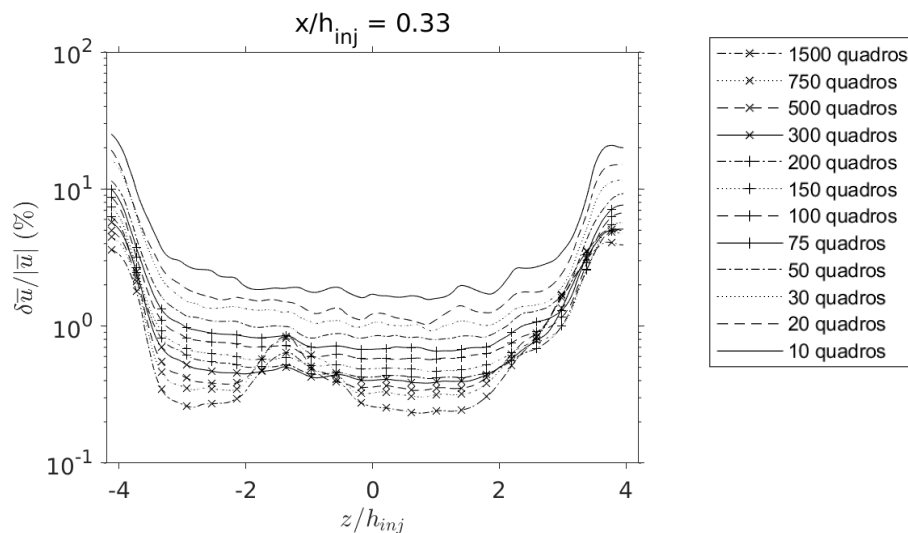
### 3.8 Análise da convergência estatística

Devido ao aspecto estatístico na descrição dos escoamentos turbulentos, torna-se indispensável saber quais são as condições necessárias para que a análise experimental convirja na análise teórica do objeto de estudo em questão. É necessário tomar conhecimento disso, pois a média na descrição teórica é distinta na descrição experimental. Na teoria, o valor médio é definido segundo a Equação (2.8), ou seja, o valor da média de todos os possíveis valores de determinada grandeza. Isso significa

que, para obter empiricamente esta média, é necessário uma vasta série de medições repetidas da mesma grandeza em experimentos similares. No entanto, é irrealizável a obtenção desta série. Em vez disso, a média é obtida através de uma série limitada de um único experimento. Em razão disso, surge a necessidade de saber o quão próximo da média empírica está da média teórica, pois, conhecendo isso, saberemos o quão acurados estão os resultados experimentais.

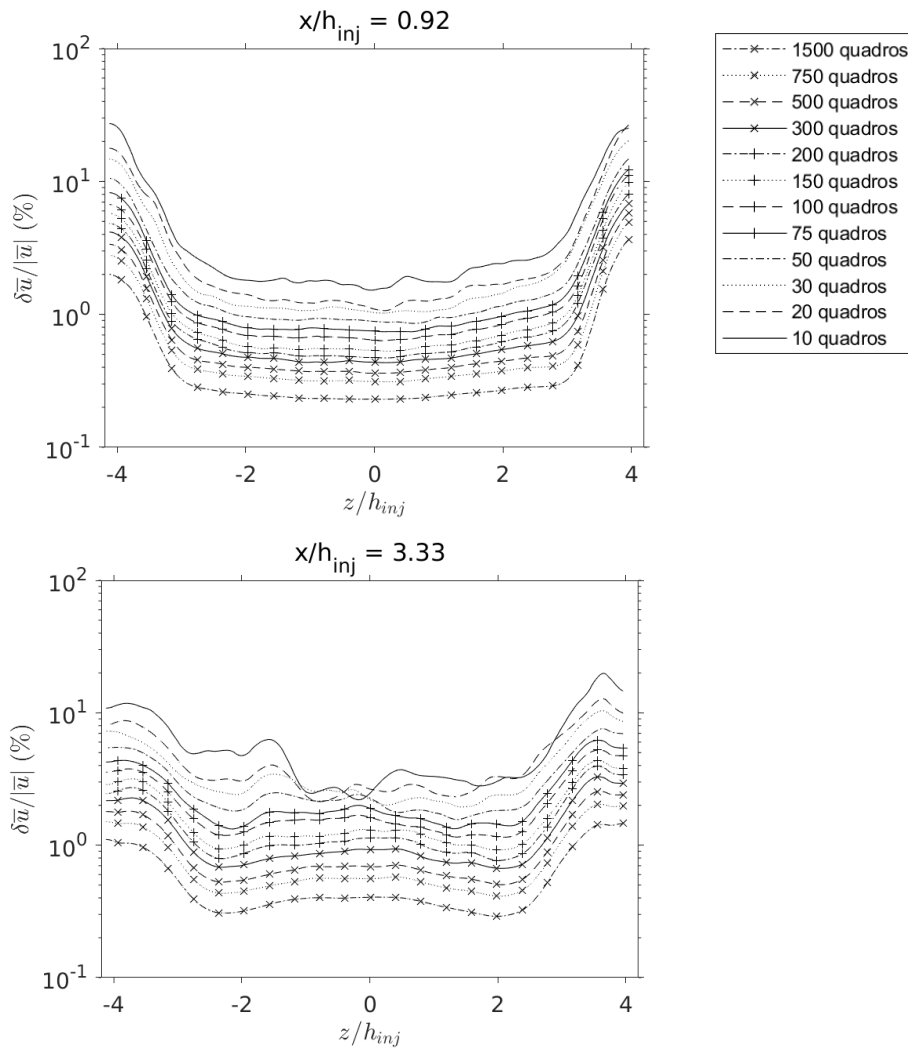
Foram obtidas experimentalmente diversas amostras de tamanhos distintos da velocidade longitudinal para se verificar qual delas tem a média que mais se aproxima da média teórica temporal, isto é, aquela que pode ser considerada como ergótica, conforme explicado na Subseção 2.3.2. As amostras foram obtidas tanto na região principal quanto na região de entrada em uma seção horizontal. Na região principal, a seção horizontal escolhida foi a da altura  $y/h_{inj} = 1,33$ , conforme apresentada na Figura 5.1. Na região de entrada, a seção horizontal escolhida foi a da altura  $y/(h/2) = 0$ , conforme apresentada na Figura 4.1. Nestas seções horizontais foram extraídos perfis dos erros proporcionais das médias de  $u$  das amostras, com base nos valores de  $\bar{u}$  e de  $\sqrt{u'^2}$  dados pelo *DaVis*. Os perfis em questão são apresentados pelas Figuras 3.6 e 3.7:

Figura 3.6 - Erros proporcionais de  $\bar{u}$  das amostras na região principal. Incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.7 - Erros proporcionais de  $\bar{u}$  das amostras na região principal. Incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



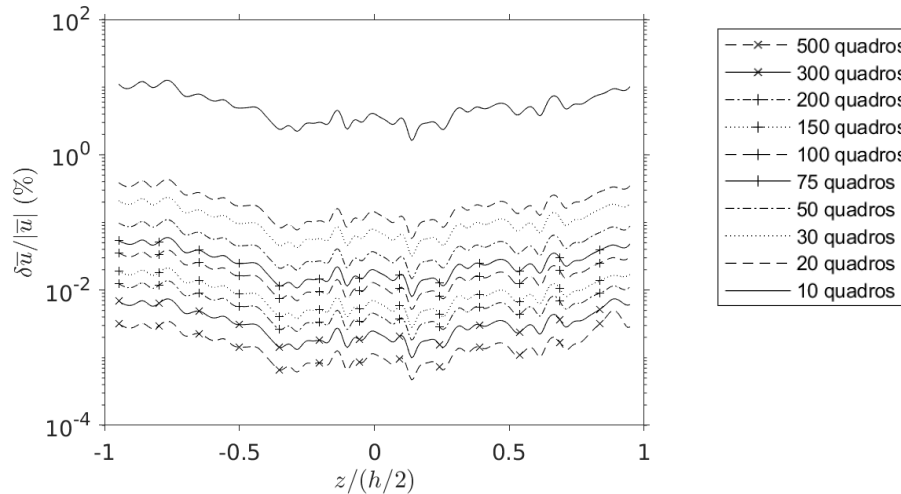
Fonte: Produção do autor.

Os perfis dos erros proporcionais de  $\bar{u}$  das três distâncias em  $x$  na região principal, conforme apresentados pelas Figuras 3.6 e 3.7, apesar das suas distinções, é possível observar características comuns em todos eles. Pode-se constatar que os erros proporcionais de  $\bar{u}$  são maiores próximos às paredes devido as camadas limites presentes nestas regiões. Em  $x/h_{inj} = 0,33$  e  $x/h_{inj} = 0,92$ , as amostras com número de quadros igual ou superior a 100 têm erros proporcionais que então na faixa de 0,1 % a 1 %. Dos erros relativos da distância  $x/h_{inj} = 3,33$  só estão nesta faixa aqueles que pertencem a amostras com número de quadros igual ou superior a 300. Considerando que, em valores de erro relativo inferiores a 1 %, a média de amostragem



de  $u$  atinge um nível de convergência estatística satisfatória. Portanto, foi escolhido para a presente investigação o número de quadros igual a 500 para as medições do PIV na região principal da câmara de combustão.

Figura 3.8 - Erros proporcionais de  $\bar{u}$  das amostras na região de entrada. Incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

A mesma análise que foi efetuada nas amostras da região principal é prestada nas amostras da região de entrada. Os perfis dos erros proporcionais de  $\bar{u}$  na região de entrada foram obtidos a partir das rotinas no *Matlab*. Pode-se constatar na Figura 3.8 que a redução do erro relativo na região de entrada é mais acentuada do que na região principal. Além dessa diferença entre as amostras das duas regiões, verifica-se que os erros proporcionais próximos às paredes laterais na região de entrada são menores. As amostras com número de quadros igual ou maior do que 50 estão na faixa de 0,001 % a 0,1 %. Levando em consideração estes aspectos, foi escolhido o número de quadros para as medições na região de entrada igual a 300. Não foi escolhido 500 quadros tal como na região principal, pois a variação do erro proporcional de  $\bar{u}$  é muito pequena entre 300 para 500 quadros.

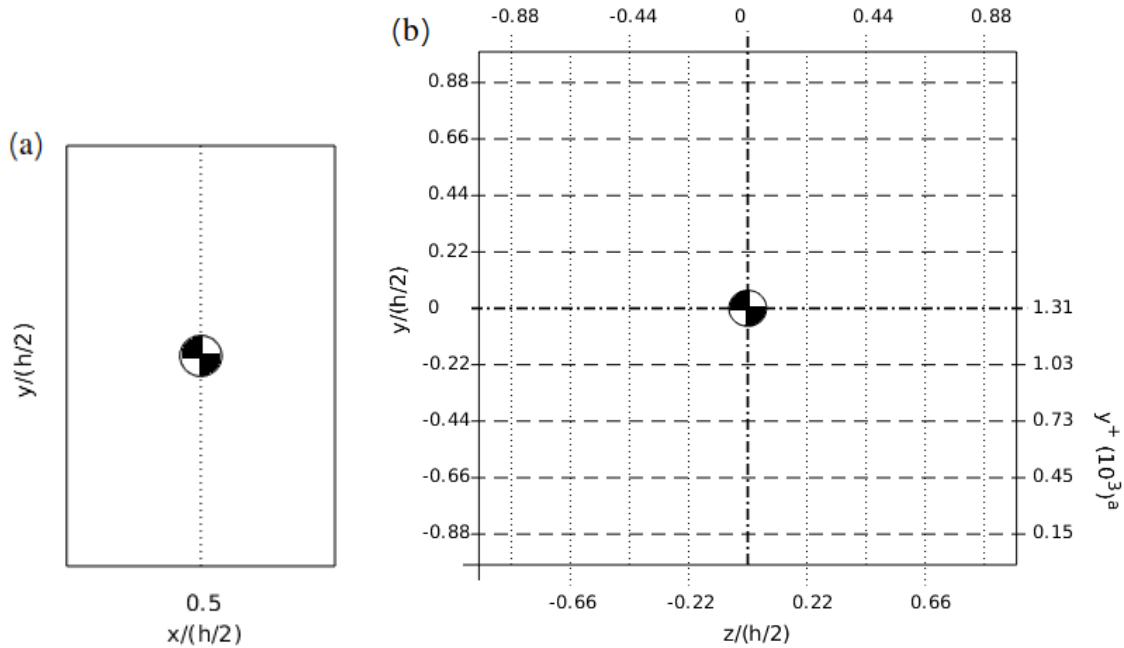


## 4 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO NA REGIÃO DE ENTRADA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

A análise das características do escoamento na região de entrada, isto é, a montante dos injetores, é essencial na validação de modelos computacionais, pois dão base experimental às condições de contorno destes modelos. Diante disto e afim de compreender as características do escoamento a montante dos injetores que o presente capítulo apresenta e analisa os resultados experimentais dos parâmetros caracterizadores deste escoamento. Também foi realizada, neste capítulo, a comparação dos dados da presente investigação com os dados obtidos por Trevisan (2018), cujas medições foram feitas através do LDV. A frequência de amostragem do LDV equivale a 200 – 5000  $Hz$ .

Os perfis transversais verticais e horizontais de diversos parâmetros caracterizadores do escoamento inerte turbulento na região de entrada de diversas seções horizontais e verticais são exibidos no presente capítulo. Foram feitas medidas de 9 seções horizontais (plano  $xz$ ) e 9 verticais (plano  $xy$ ). E em cada um delas foi selecionado um perfil localizado no centro da região de entrada, isto é, em  $x/(h/2) = 0,5$ . As localidades das seções horizontais e verticais são apresentadas pela Figura 4.1. Foi estabelecido por convenção do trabalho que os perfis das seções verticais e horizontais serão chamados de perfis transversais verticais e perfis transversais horizontais, respectivamente. As dimensões do campo de visualização e o fator de escala das seções horizontais são  $130,43 \times 97,06 \text{ mm}^2$  e  $94,8 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , e das seções verticais são  $121,74 \times 90,60 \text{ mm}^2$  e  $88,5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , respectivamente. Como a região de entrada é mais estreita do que os campos de visualização, foi considerada só a região onde foram obtidas as velocidades instantâneas.

Figura 4.1 - Localizações em  $x/(h/2)$ ,  $y/(h/2)$ ,  $z/(h/2)$  e  $y^+$  das seções horizontais e verticais na região de entrada da câmara de combustão: (a) vista lateral; (b) vista frontal.



a) Calculados a partir dos valores de  $u_\tau$  da Seção 4.1.  
Fonte: Produção do autor.

Foram feitas representações adimensionais dos parâmetros caracterizadores para facilitar comparações entre diferentes pontos do canal e com outros trabalhos feitos por outros autores. A velocidade longitudinal média  $\bar{u}$ , a velocidade normal média  $\bar{v}$  e a velocidade transversal média  $\bar{w}$  foram adimensionalizadas pela velocidade média do eixo central  $U_{eixo}$ . Também foram adimensionalizadas as flutuações médias de velocidade e os tensores turbulentos de cisalhamento pela velocidade de fricção,  $u_\tau$ , da seção vertical central, cujo cálculo é exposto na próxima seção. A altura  $y$  e a largura  $z$ , nos quais se estendem os perfis, foram adimensionalizadas pela metade da altura da região de entrada ( $h/2$ ), pois esta representa a escala de comprimento integral (SANQUER, 1998). Os valores de  $U_{eixo}$ , da vazão mássica  $Q$ , do número de Reynolds  $Re$  e de outros parâmetros são apresentados na Tabela 4.1. A vazão mássica utilizada foi escolhida para que o número de Reynolds seja o mesmo daquele do trabalho de Trevisan (2018), que foi de  $80 \text{ g/s}$ . Ainda referente a este trabalho, os parâmetros caracterizadores da turbulência obtidos com LDV foram adimensionalizados pelos valores de  $U_{eixo}$  e de  $u_\tau$ , que valem  $8,6 \text{ m/s}$  e  $0,381 \text{ m/s}$ , respectivamente.

Tabela 4.1 - Características do escoamento inerte turbulento na região de entrada da câmara de combustão.

$Q$ (g/s)	$U_{eixo}$ (m/s)	$h/2$ (mm)	$T$ (°C)	$\rho_{ar}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu_{ar}$ (mm <sup>2</sup> /s)	$Re$
78	9,07	50	31,94	1,16	16,1*	56335

Incerteza de  $Q = \pm 0,2$  g/s, Incerteza média de  $U_{eixo} = \pm 0,07$  m/s.  
 Incerteza média de  $T = \pm 0,02$  °C, incerteza de  $\rho_{ar} = \pm 0,07$  g/m<sup>3</sup>.  
 Incerteza de  $\nu = \pm 0,05$  mm<sup>2</sup>/s.

\*Baseado nos dados de Kundu e Cohen (2008).

Fonte: Produção do autor.

O número de Reynolds  $Re$ , que também está presente na Tabela 4.1, equivale a  $U_{eixo}h/\nu$ . Verifica-se que o número de Reynolds do escoamento na região de entrada é superior ao valor crítico necessário para considerá-lo como sendo turbulento. O valor crítico está em função da rugosidade das paredes. Outro ponto a ser acrescentado reside no fato que a razão entre o comprimento e a altura do canal é de 39,4. Embora esta razão não seja superior ao valor necessário para considerar o escoamento como sendo plenamente desenvolvido, conforme a Subseção 2.4.1, é um valor aceitável pelas características da velocidade longitudinal média analisadas.

#### 4.1 Velocidade de fricção

Dada a possibilidade do cálculo da velocidade de fricção  $u_\tau$  a partir do pressuposto que o escoamento dentro da região de entrada é um escoamento turbulento plenamente desenvolvido, este parâmetro será determinado pelos seguintes métodos: 1) o método de conexão da zona logarítmica e da zona deficitária; e 2) o método da correlação cruzada.

Pelo primeiro método, soma-se a equação da sub-camada logarítmica com a da zona deficitária, que estão presentes na Tabela 2.6. Simplificando o resultado, obtemos a seguinte relação entre as sub-camadas:

$$u_\tau \left[ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{u_\tau h}{\nu} \right) + B + B' \right] - U_{eixo} = 0, \quad (4.1)$$

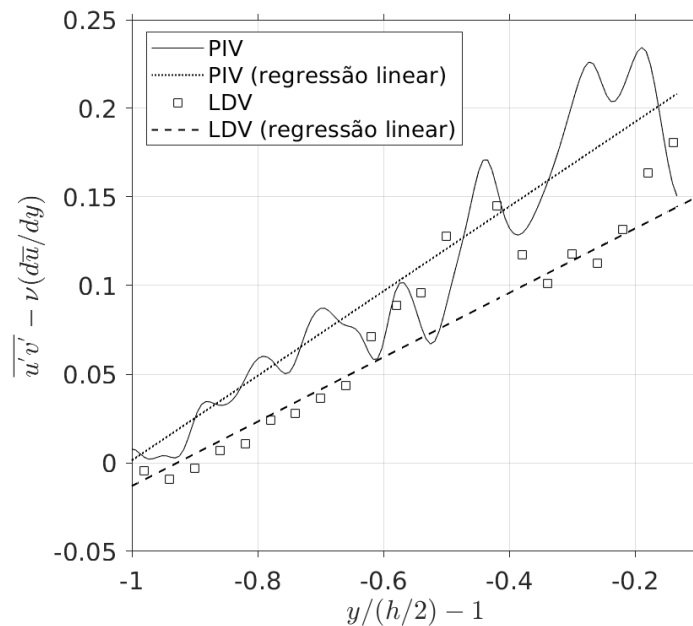
onde a soma das constantes  $B$  e  $B'$  é considerada como sendo igual a 5 ou igual a 6. A velocidade de fricção é estimada usando o método de *Newton-Raphson* na relação acima.

O segundo método utiliza a relação entre a correlação cruzada  $\overline{u'v'}$  e a velocidade de fricção  $u_\tau$ , definida pela Equação (2.44). Tal equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\overline{u'v'} - \nu \frac{d\bar{u}}{dy} = u_\tau^2 \left( \frac{y}{h/2} - 1 \right). \quad (4.2)$$

Fazendo um gráfico de  $\overline{u'v'} - \nu(d\bar{u}/dy)$  em função de  $y/(h/2) - 1$  e obtendo o coeficiente angular  $u_\tau^2$  através da regressão linear, obtemos o valor de  $u_\tau$ . A Figura 4.2 apresentam o perfil de  $\overline{u'v'} - \nu(d\bar{u}/dy)$  da seção vertical central, enquanto que as Tabelas 4.2 e 4.3 mostram os resultados das duas técnicas respectivamente de todas as seções. Os resultados obtidos a partir das medições com LDV do trabalho do Trevisan (2018) também estão presentes na Figura 4.2 e na Tabela 4.2 abaixo. Verifica-se que não existe muita diferença entre os resultados com PIV e com LDV.

Figura 4.2 - Evolução de  $\overline{u'v'} - \nu(d\bar{u}/dy)$  em  $y/(h/2) - 1$  na seção vertical central da região de entrada.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.2 - Comparação dos valores da velocidade de fricção das seções verticais estimados pelos dois métodos: PIV e LDV (TREVISAN, 2018).

técnica	$y/(h/2)$	$u_\tau$ (m/s)			
		$B + B' = 5$	$B + B' = 6$	$\bar{u}\bar{v}$	média
LDV	0	0,365	0,351	0,4270	0,3810
PIV	0	0,375	0,361	0,4887	0,4083
	0.88			0,2307	0,3223
	0.66			0,2509	0,3291
	0.44			0,4181	0,3848
	0.22			0,4497	0,3953
	-0.22			0,4913	0,4092
	-0.44			0,4473	0,3945
	-0.66			0,3265	0,3543
	-0.88			0,1740	0,3035

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 - Valores da velocidade de fricção das seções horizontais estimados pelos dois métodos.

técnica	$z/(h/2)$	$u_\tau$ (m/s)			
		$B + B' = 5$	$B + B' = 6$	$\bar{u}\bar{v}$	média
PIV	0.66	0,375	0,361	0,3481	0,3615
	0.44			0,4329	0,3897
	0.22			0,487	0,4078
	0			0,4977	0,4113
	-0.22			0,5274	0,4212
	-0.44			0,4624	0,3996
	-0.66			0,3522	0,3628
	-0.88			0,1667	0,3010

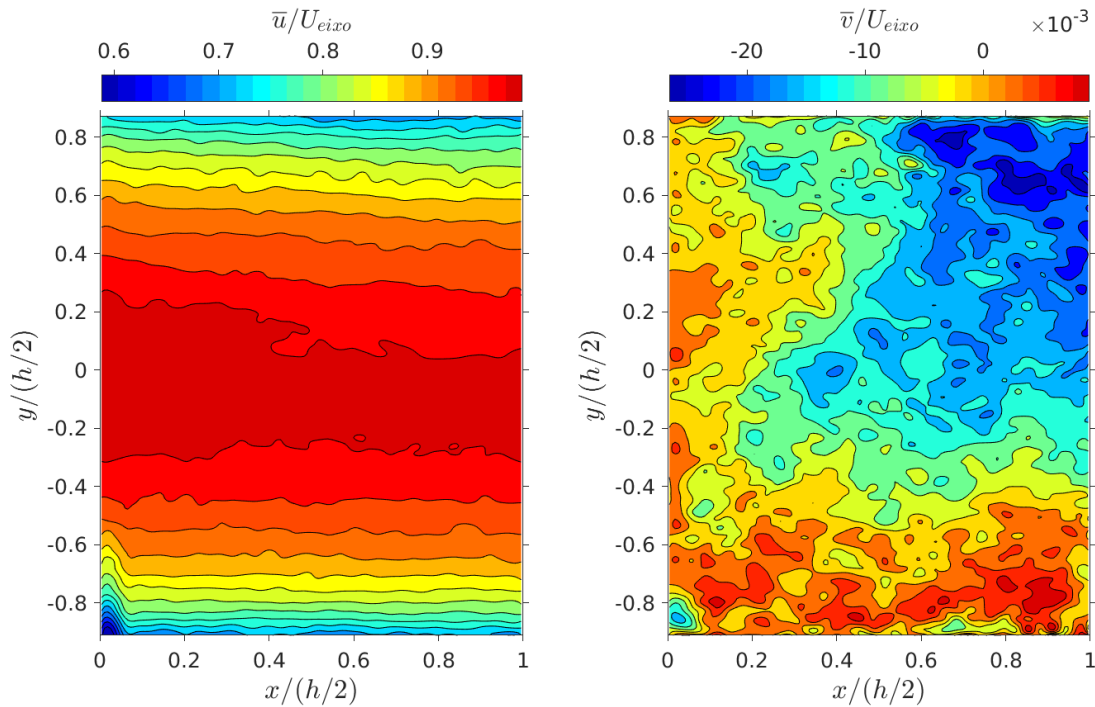
Fonte: Produção do autor.

## 4.2 Componentes de velocidade média

As análises dos resultados das velocidades médias, do campo vetorial da velocidade instantânea e dos parâmetros associados à tensão de cisalhamento na parede são abordadas na presente seção. Somado a isso, foi calculada a vazão mássica do ar a

partir dos perfis da velocidade longitudinal média, para que seja comparada com o valor encontrado no medidor de vazão. A Figura 4.3 apresenta os contornos da velocidade longitudinal média e da velocidade normal média na seção vertical central. A Figura 4.4 apresenta o campo vetorial da velocidade instantânea em um dado instante de tempo. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os perfis das velocidades longitudinal, normal e transversal, das seções horizontais e verticais da região de entrada. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a evolução de  $\overline{u^+}$  em relação a  $y^+$ , em todas as seções verticais e horizontais. Os resultados obtidos a partir dos dados com LDV também estão presentes na Figura 4.7, com o propósito de comparar com os da seção vertical central. E, por fim, a Figura 4.9 exibe os contornos e os perfis da velocidade longitudinal média no plano  $yz$  em  $x/(h/2) = 0,5$ .

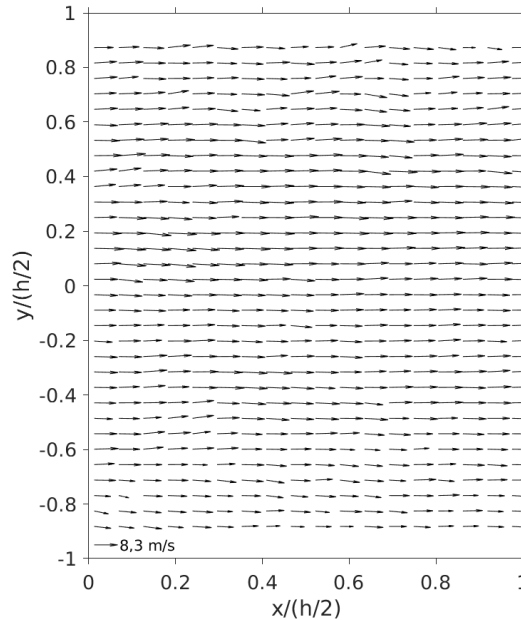
Figura 4.3 - Isocontornos da velocidade longitudinal média e da velocidade normal média. Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,09 \text{ m/s}$  e de  $\bar{v} = \pm 0,06 \text{ m/s}$ , incerteza de  $x/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.



Figura 4.4 - Campo vetorial da velocidade instantânea em dado instante de tempo (seção vertical central da região de entrada). Incerteza de  $x/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

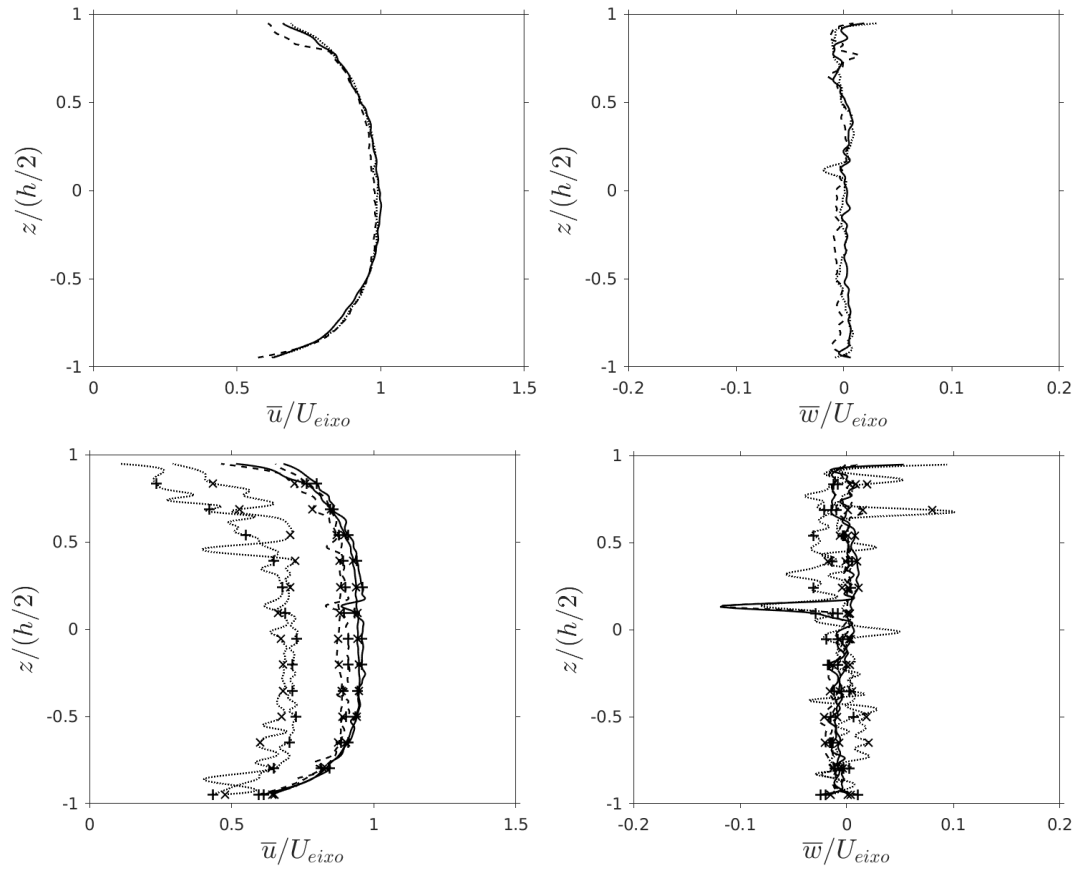
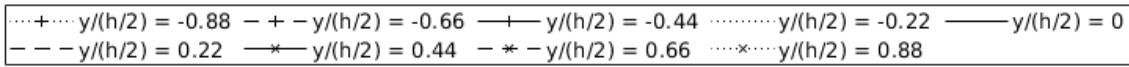
Na Figura 4.4, verifica-se no campo vetorial da velocidade instantânea que a velocidade predominante é a velocidade longitudinal. Verifica-se também que as flutuações da velocidade instantânea são muito pequenas. Verifica-se nos contornos apresentados pela Figura 4.3 que a velocidade longitudinal média é mais significativa do que a velocidade normal média. Sobre a velocidade longitudinal média, pode-se constatar que o valor máximo de  $\bar{u}$  está no centro do canal e os menores valores próximos às paredes. A intensidade de  $\bar{u}$  diminui gradualmente do centro até as paredes superiores e inferiores da região de entrada. Além disso, a velocidade longitudinal média não varia significativamente no sentido longitudinal. Esta característica também é observada na velocidade normal média, que também não varia consideravelmente no sentido do eixo  $y$ .

Nas Figuras 4.5 e 4.6, verifica-se que existem muitas semelhanças entre os perfis das seções horizontais e verticais. Na região em torno do centro da região de entrada, a velocidade longitudinal é mais homogênea nos eixos  $y$  e  $z$ , mas nas regiões próximas às paredes a velocidade longitudinal média atinge seus menores valores. Isso se deve às camadas limites turbulentas existentes próximas às paredes. Ambas as velocidade-

des normal e transversal são pequenas, em comparação à velocidade longitudinal. Somado a isso, observa-se que  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$  são semelhantes. Verifica-se também que, de modo geral, os perfis de  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$  são simétricos em relação ao eixo central. Com exceção dos perfis das seções mais afastadas das seções centrais, pode-se observar que não existem muitas diferenças entre as seções. É possível observar uma diminuição dos valores da velocidade longitudinal média nas seções mais afastadas da seção central. Parte dos perfis das seções horizontais  $y/(h/2) = \pm 0,88$  e das seções verticais  $z/(h/2) = \pm 0,88$  foram prejudicados pela baixa qualidade das medições com PIV.

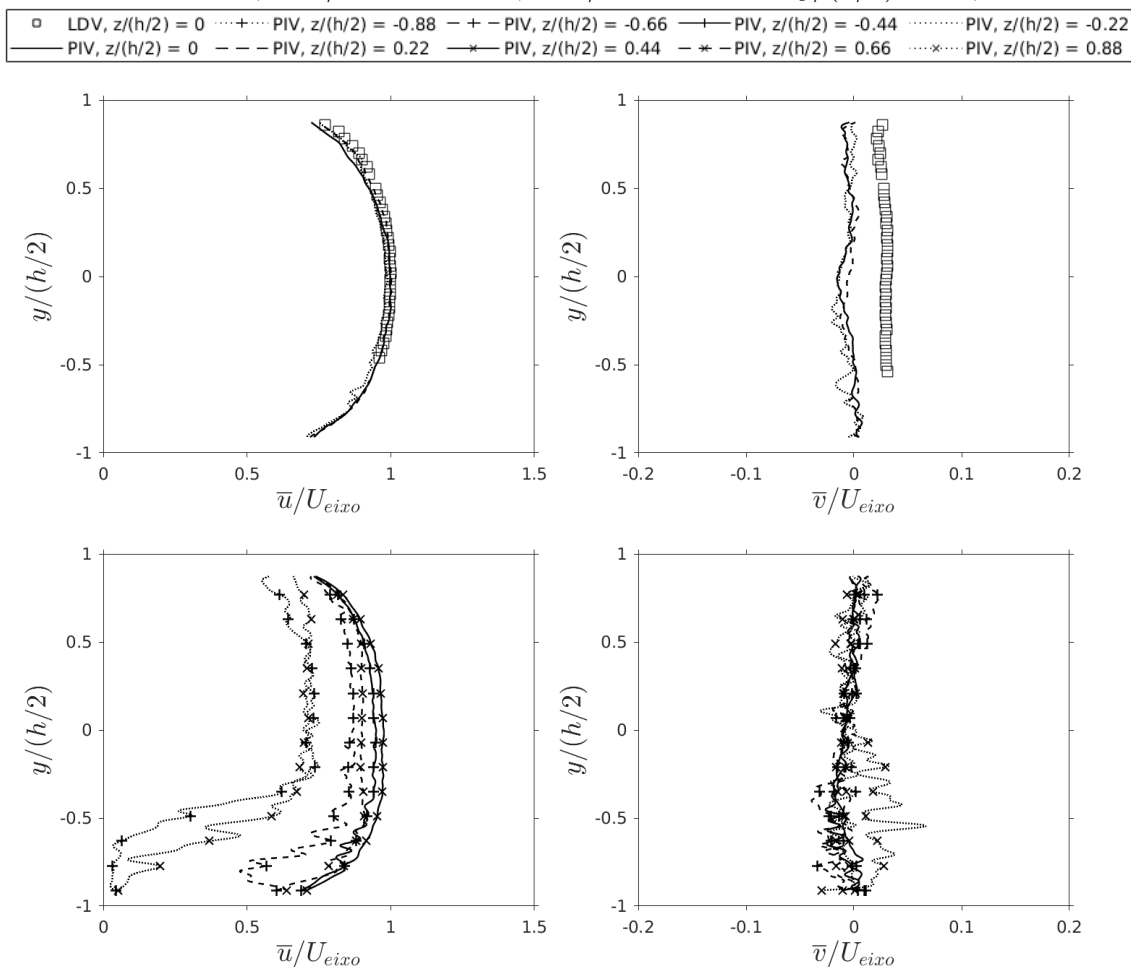
Comparando os resultados do LDV com os com PIV pode-se verificar que praticamente não existe diferença entre eles. É importante destacar que a velocidade média do eixo central com LDV é  $8,6 \text{ m/s}$  e a com PIV é  $9,0 \text{ m/s}$ .

Figura 4.5 - perfis transversais horizontais da velocidade longitudinal média e da velocidade transversal média nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,11 \text{ m/s}$  e de  $\bar{w} = \pm 0,07 \text{ m/s}$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

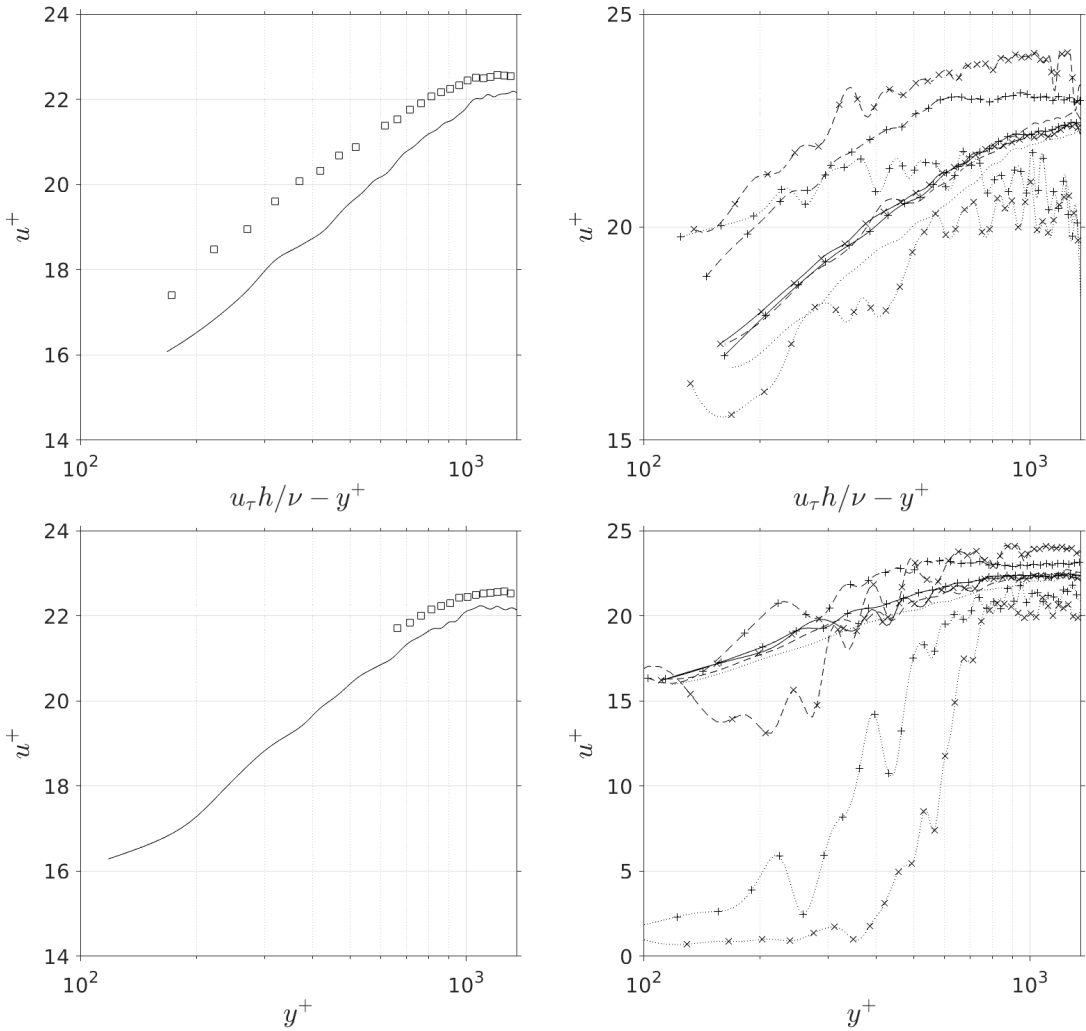
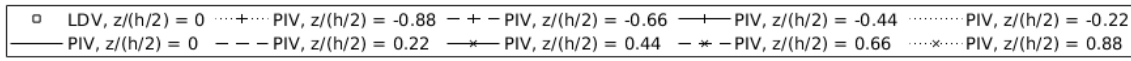
Figura 4.6 - Perfis transversais verticais da velocidade longitudinal média e da velocidade normal média nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,10$  m/s e de  $\bar{v} = \pm 0,07$  m/s. LDV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,60$  m/s e de  $\bar{v} = \pm 0,40$  m/s. Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Produção do autor.

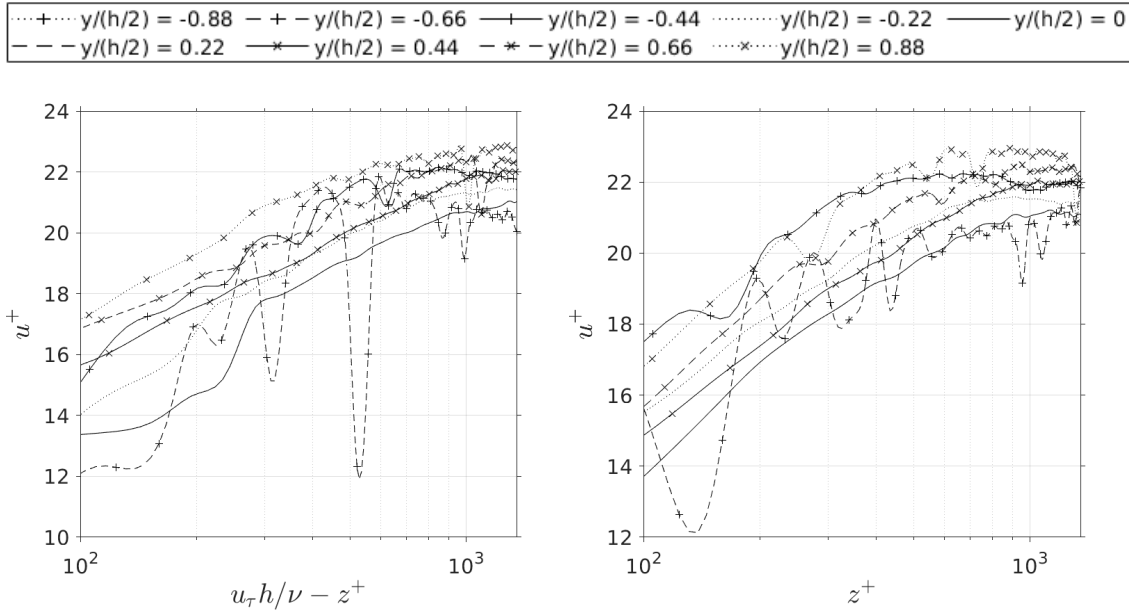
Pode-se verificar que, nas evoluções de  $\bar{u}^+$  em relação a  $y^+$ , conforme as Figuras 4.7 e 4.8, não existem diferenças significativas entre os resultados das duas técnicas. Observa-se que os perfis de  $\bar{u}^+$  estão dentro do intervalo de  $10^2$  a  $1,31 \times 10^3$  em  $y^+$ , isto é, estão dentro da sub-região logarítmica e da sub-região de velocidade deficitária, cujos limites são apresentados pela Tabela 2.6. Somado a isso, pode-se observar que os perfis partilham do mesmo padrão definido pela lei logarítmica, cuja equação está presente na Tabela 2.7.

Figura 4.7 - Evolução da velocidade média  $\overline{u^+}$  em  $y^+$  nas seções verticais da região de entrada.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.8 - Evolução da velocidade média  $\bar{u}^+$  em  $z^+$  nas seções horizontais da região de entrada.



Fonte: Produção do autor.

Foi calculada a vazão mássica do ar a partir dos perfis da velocidade longitudinal média, no intuito de certificar que o seu valor na câmara de combustão é aproximadamente o mesmo daquele mostrado pelo medidor de vazão. Para obter o valor deste parâmetro, foi calculado o valor médio de  $\bar{u}$  dos perfis  $\bar{u}$  e dos valores interpolados a partir dos valores destes perfis, em uma área no plano  $yz$ . Os perfis de  $\bar{u}$  utilizados são das seções verticais e horizontais. E os valores interpolados, são valores de  $\bar{u}$  localizados entre os perfis de  $\bar{u}$ . Pode-se observar os valores de  $\bar{u}$  em questão nos isocontornos apresentados pela Figura 4.9. Com o valor médio  $\bar{u}$  na área do plano  $yz$   $\langle \bar{u} \rangle_A$ , é, então, calculada a vazão mássica do ar na região de entrada da câmara de combustão através da equação  $Q_A = \rho A \langle \bar{u} \rangle_A$ . Os valores de  $\langle \bar{u} \rangle_A$ ,  $Q_A$  e o erro de  $Q_A$  com relação a  $Q$  das seções verticais e horizontais são apresentados na Tabela 4.4. O erro de  $Q_A$  em ambas as seções tem estes valores por causa da incerteza das seções mais distantes do centro do canal, das interpolações e da ausência de valores de  $\bar{u}$  mais próximas das paredes. Além disso, o erro sistemático das medições com PIV também influenciaram no erro de  $Q_A$ .

Tabela 4.4 - Valores da média da velocidade longitudinal média no plano  $yz$ , da vazão mássica  $Q_A$  e do erro de  $Q_A$  das seções verticais e horizontais.

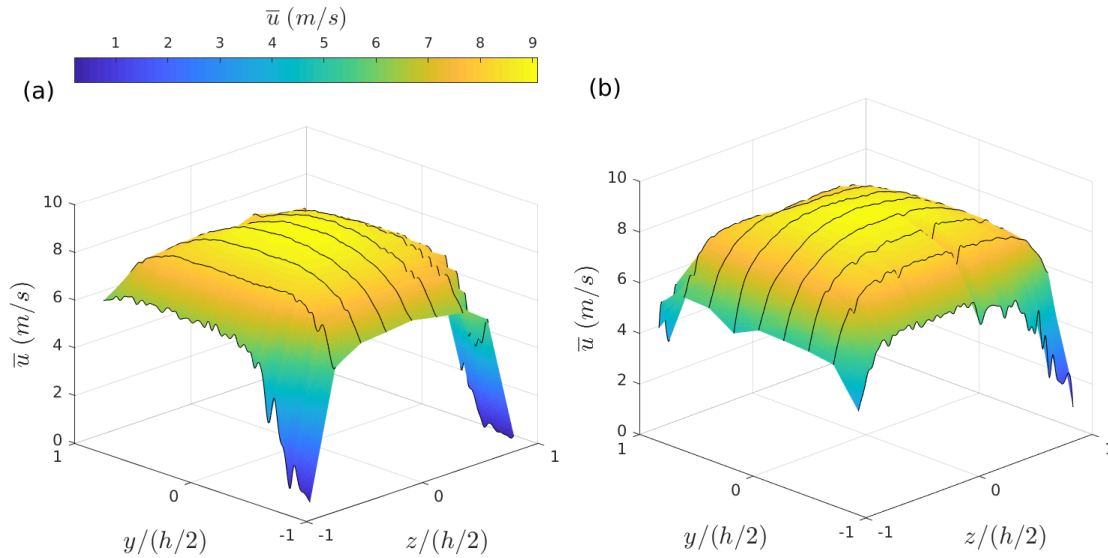
seções	$\langle \bar{u} \rangle_A$ (m/s)	$Q_A$ (g/s)	erro de $Q_A$ (%)
verticais	7,74	89,51	14,75
horizontais	7,76	89,76	15,08

Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,10$  m/s, incerteza de  $Q_A = \pm 1,16$  g/s.

Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ . Incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 - Isocontornos da velocidade longitudinal média no plano  $yz$  na região de entrada: (a) seções verticais, (b) seções horizontais. Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,10$  m/s, incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



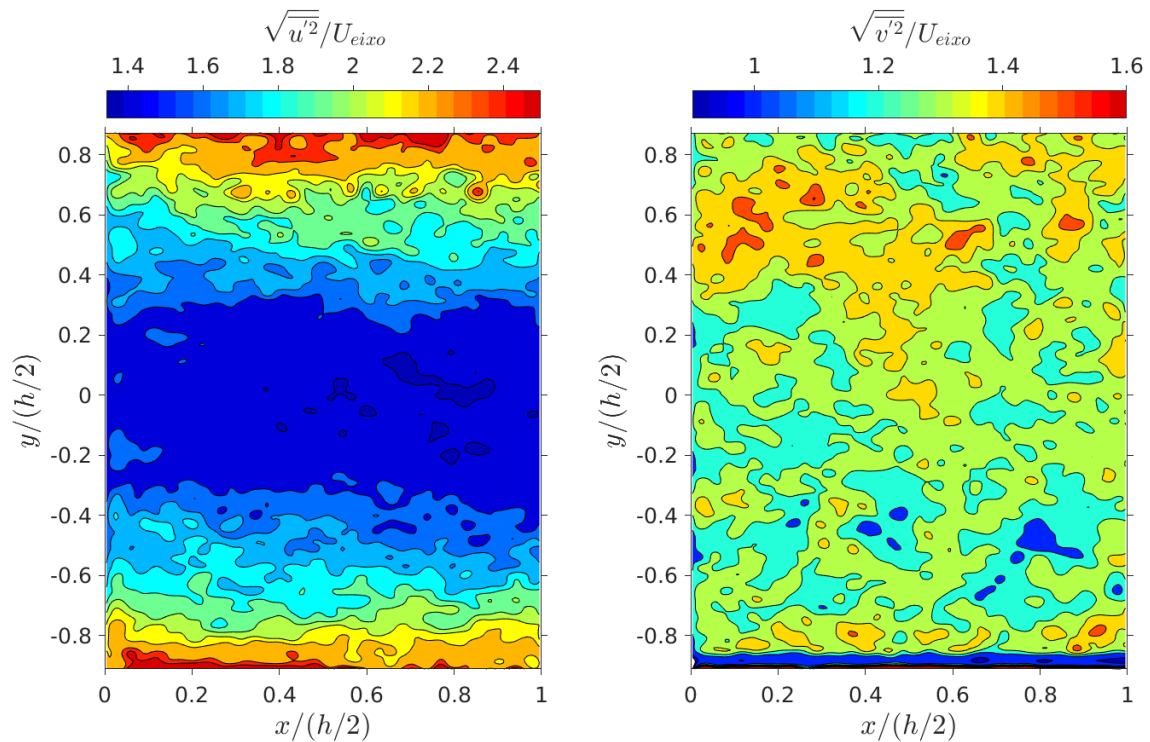
Fonte: Produção do autor.

### 4.3 Flutuação média das velocidades e tensor turbulento de cisalhamento

Nesta Seção são apresentados os perfis transversais verticais e transversais das flutuações médias das velocidades e os tensores turbulentos de cisalhamento na região de entrada. Nas Figuras 4.10 e 4.11 são apresentados os isocontornos da flutuação longitudinal média  $\sqrt{u'^2}$ , da flutuação transversal média  $\sqrt{v'^2}$  e do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  na seção vertical  $z/(h/2) = 0$ . Nos isocontornos de  $\sqrt{u'^2}$ ,

verifica-se que as flutuações longitudinais médias são mais elevadas nas proximidades das paredes e não variam no sentido longitudinal. Os isocontornos de  $\sqrt{v'^2}$  mostram que os valores de  $\sqrt{v'^2}$  são bastante homogêneos na seção vertical  $z/(h/2) = 0$  da região de entrada. Verifica-se nos isocontornos de  $\overline{u'v'}$  que o tensor em questão é mais intenso nas proximidades das paredes, onde o cisalhamento é mais intenso.

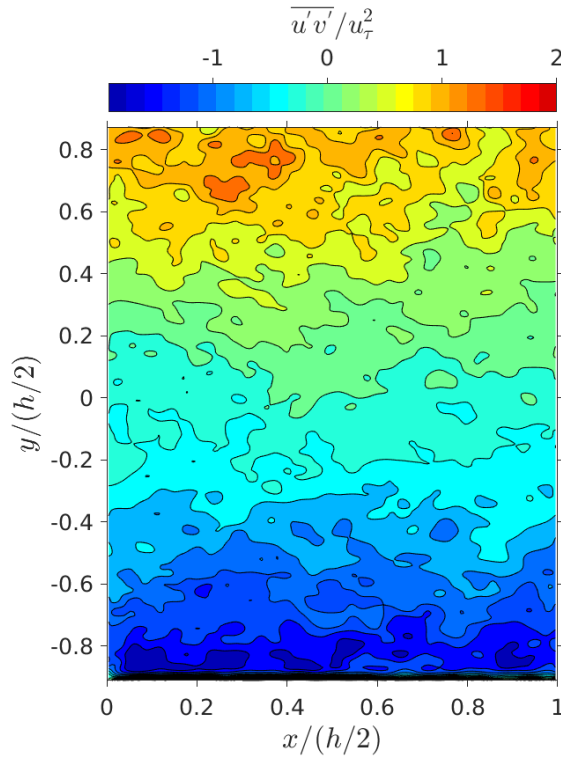
Figura 4.10 - Isocontornos da flutuação longitudinal média  $\sqrt{u'^2}$  e da flutuação transversal média  $\sqrt{v'^2}$  na seção vertical  $z/(h/2) = 0$  da região de entrada. Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,06 \text{ m/s}$  e de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ , incerteza de  $x/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.



Figura 4.11 - Isocontornos do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  na seção vertical  $z/(h/2) = 0$  da região de entrada. Incerteza média de  $\overline{u'v'} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ , incerteza de  $x/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

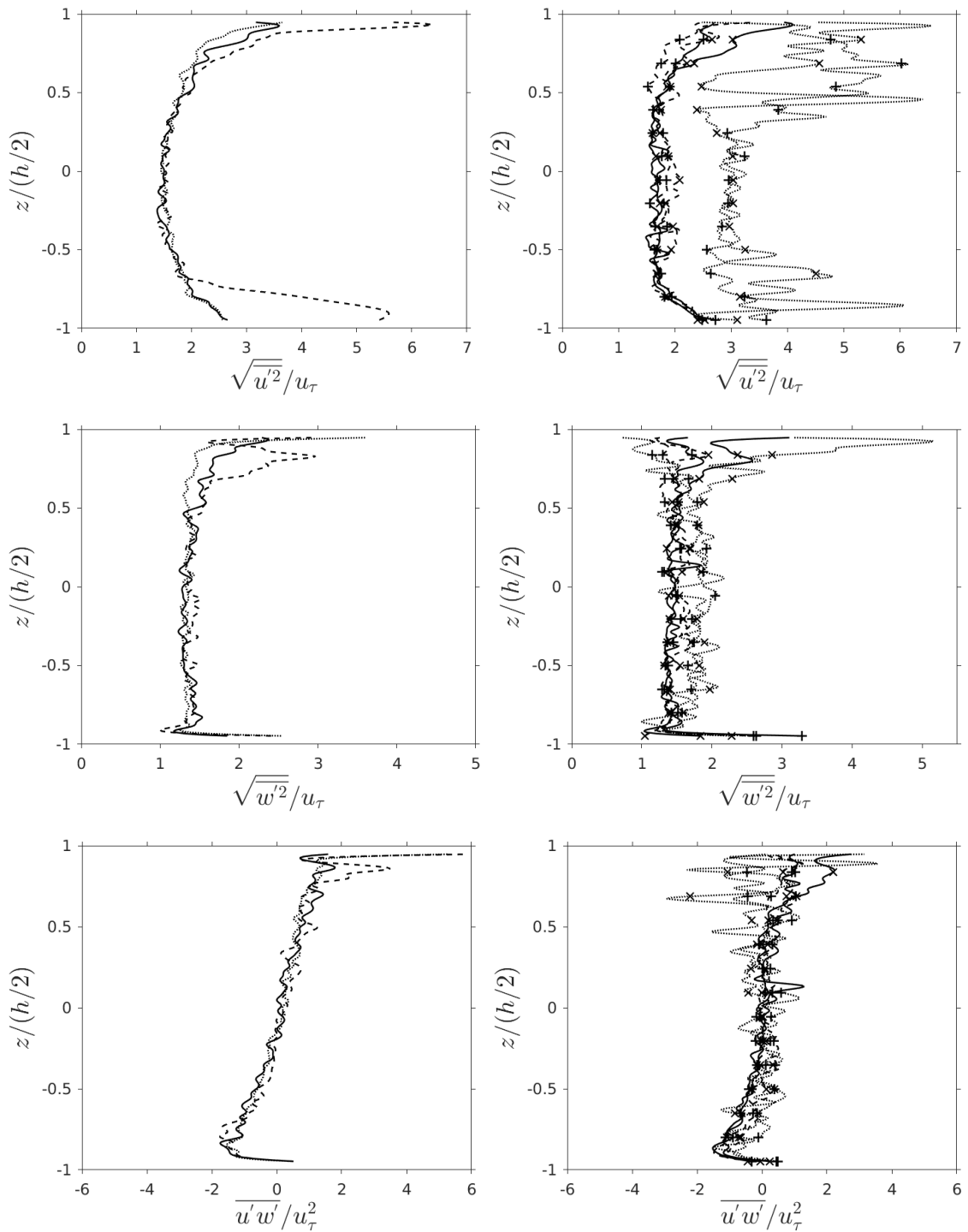
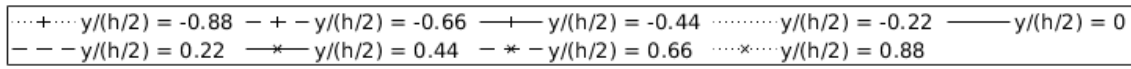
Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os perfis transversais verticais e transversais de  $\sqrt{u'^2}$ ,  $\sqrt{v'^2}$ ,  $\sqrt{w'^2}$ ,  $\overline{u'v'}$  e  $\overline{u'w'}$  das seções horizontais e verticais. Pode-se constatar que as flutuações médias das velocidades estão na mesma ordem de grandeza e atingem seus maiores valores nas regiões próximas às paredes. Verifica-se também que os perfis das flutuações médias não têm simetria em uma completa relação ao plano central. Pode-se observar que, em geral, com exceção das seções mais próximas das paredes cujos erros sistemáticos e assimetria são elevados, não há diferenças significativas entre os perfis das seções. Entre as seções horizontais e as verticais também não foi constatada nenhuma diferença significativa.

Entre a flutuação da velocidade longitudinal e as flutuações das velocidades normal e transversal, verifica-se que a primeira tem seus maiores valores próximos às paredes enquanto que as últimas são praticamente homogêneas. Isso mostra que as camadas limites das paredes exercem mais influência nas flutuações da velocidade longitudinais que nas flutuações das velocidades normal e transversal. Este aumento

da flutuação longitudinal média próximo às paredes também foi observada nos trabalhos de Besson (2001) e Sanquer (1998). Na comparação da flutuação normal com a flutuação transversal, verifica-se que a primeira é aproximadamente similar à segunda em  $-0,7 < y/(h/2) < 0,7$  e em  $-0,7 < z/(h/2) < 0,7$ . Os tensores turbulentos de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  e  $\overline{u'w'}$ , que também estão nas Figuras 4.12 e 4.13, são nulos no centro do canal mas atingem seus maiores e menores valores nas proximidades das paredes. Somado a isso, pode-se observar que nas seções horizontais  $y/(h/2) = \pm 0,88$  e as seções verticais  $z/(h/2) = \pm 0,88$  há grandes dispersões nos perfis dos tensores turbulentos de cisalhamento e das flutuações médias. Isso se deve à baixa qualidade das medições com PIV nas regiões próximas às paredes, devido aos fortes gradientes de velocidade. Nas outras seções horizontais e verticais, as oscilações se concentram nas regiões próximas às paredes, devido aos gradientes de velocidade nestas localidades.

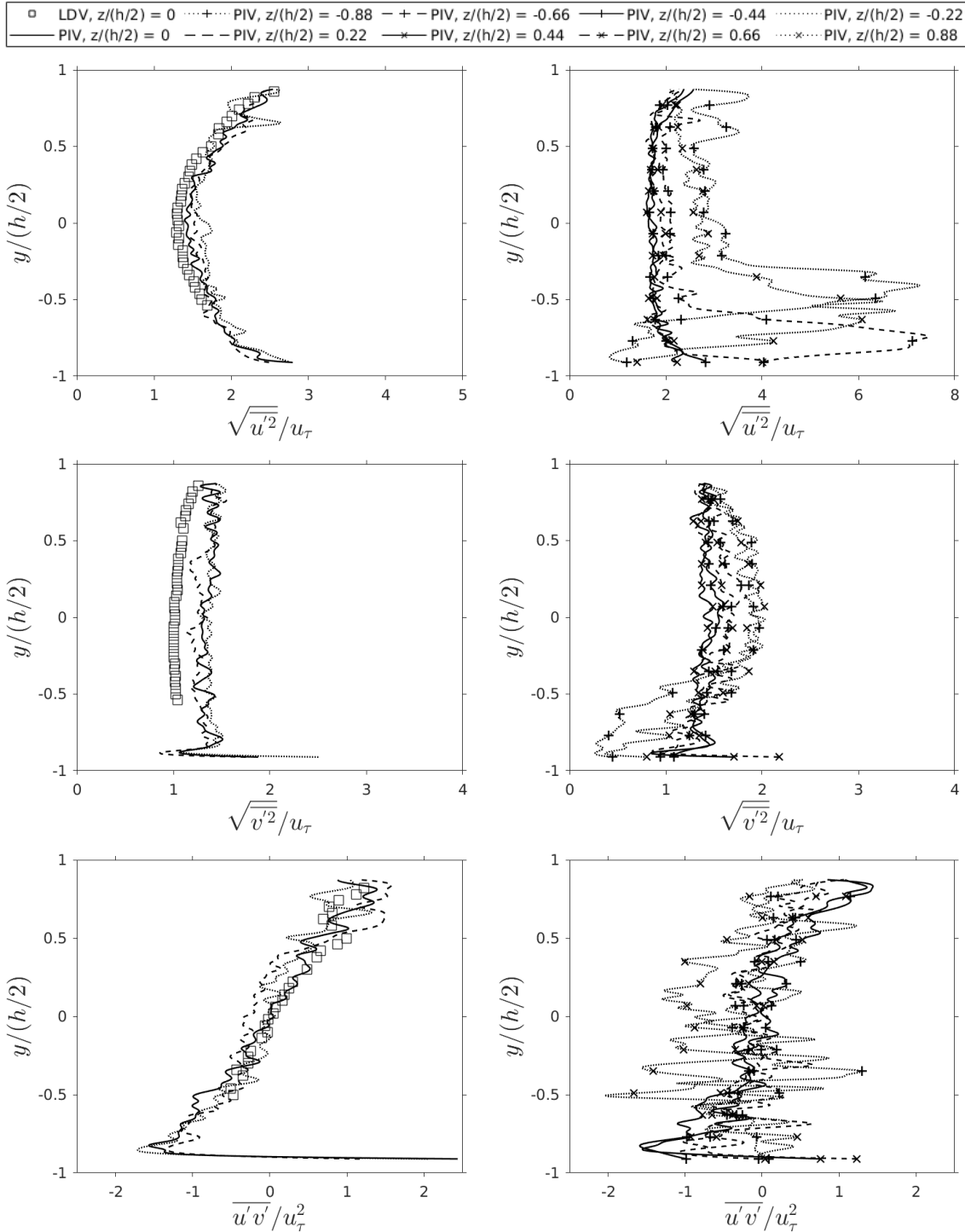
Comparando os resultados do PIV com os do LDV, verificou-se que as flutuações média das velocidades e os tensores turbulentos de cisalhamento com PIV não apresentam, na maior parte dos casos, nenhuma diferença significativa com as flutuações com LDV. Observa-se no perfil de  $\sqrt{v'^2}$  com LDV que os valores de  $\sqrt{v'^2}$  aumentam um pouco na região próxima da parede superior. Tal característica não é observada no perfil de  $\sqrt{v'^2}$  com PIV, mas foi observada em outros trabalhos que usaram LDV (BESSON, 2001; SANQUER, 1998). Essa pequena diferença entre o PIV e o LDV se deve a diferença de resolução temporal entre as técnicas.

Figura 4.12 - perfis transversais horizontais das flutuações médias  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{w'^2}$  e do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'w'}$  nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,08 \text{ m/s}$ , de  $\sqrt{w'^2} = \pm 0,06 \text{ m/s}$  e de  $\overline{u'w'} = \pm 0,08 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.13 - Perfis transversais verticais das flutuações médias  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$  e do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,08$  m/s, de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,05$  m/s e de  $\overline{u'v'} = \pm 0,06$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. LDV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,39$  m/s, de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,27$  m/s e de  $\overline{u'v'} = \pm 0,29$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



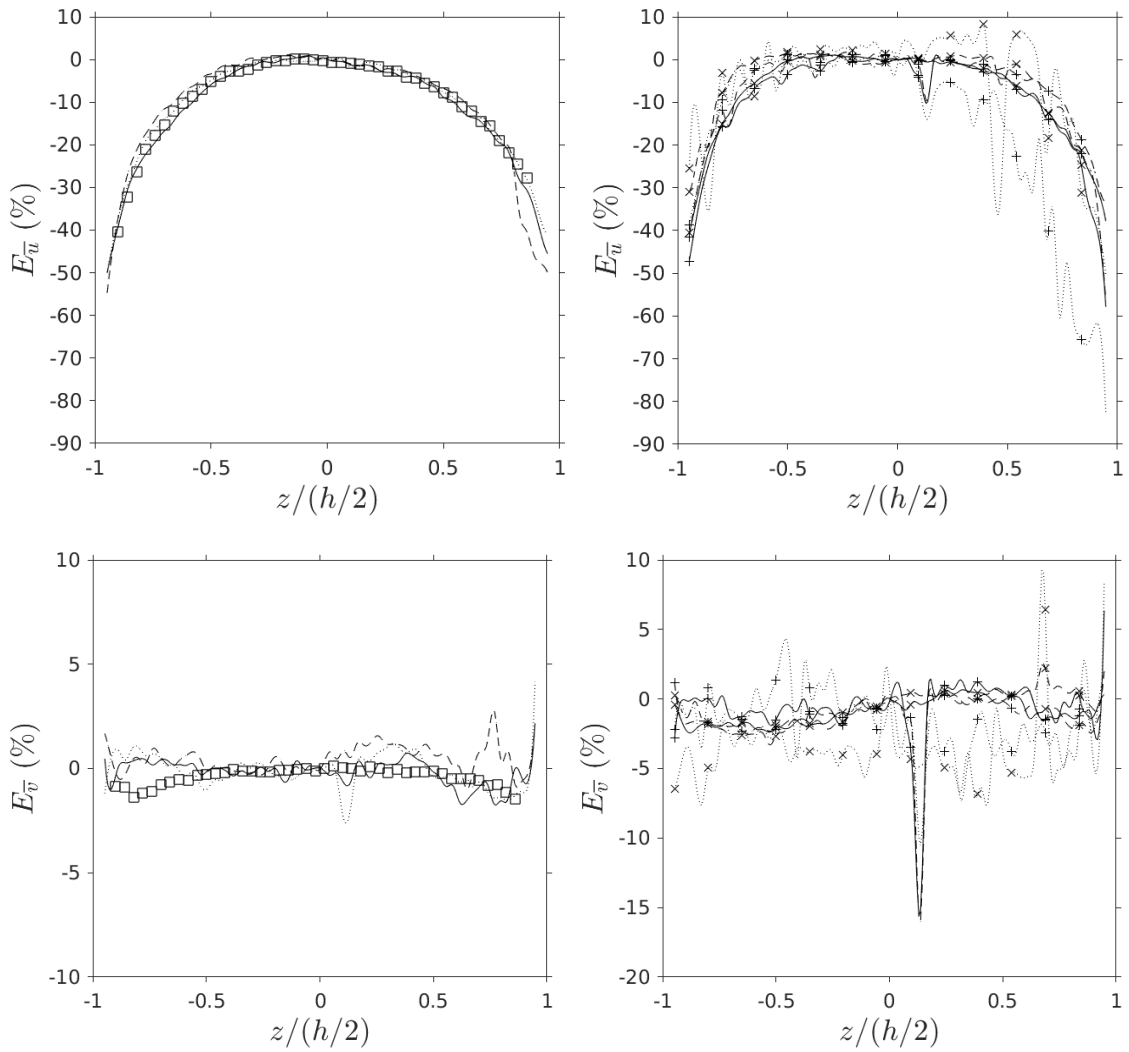
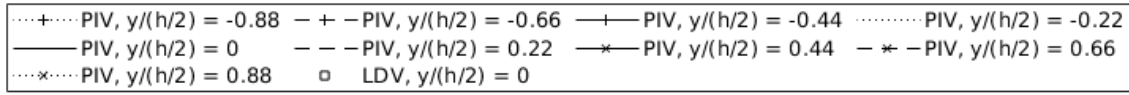
Fonte: Produção do autor.

#### 4.4 Bidimensionalidade do escoamento médio

A fim de estimar a variação de uma variável  $q$  com relação a  $q_{eixo}$  medido em  $z/(h/2) = 0$  ao longo do eixo  $z$ , apresentamos uma grandeza  $E_q$  que é definida como sendo  $E_q = 100(q_{eixo} - q)/q_{eixo}$ . A variável  $q$  pode ser  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$ . Tal estimativa tem como propósito avaliar a característica bidimensional do escoamento investigado. A bidimensionalidade do canal é associada à razão da largura do canal pela sua altura, e esta razão, para a presente investigação, equivale a 1. As Figuras 4.14 e 4.15 abaixo mostram os perfis de  $E_q$  das seções horizontais na região principal em  $x/(h/2) = 0,5$  com PIV. Apesar da medição da velocidade normal não tenha sido feita com PIV nas seções horizontais, verificou-se nas Seções 4.2 e 4.3 que  $\bar{v} \simeq \bar{w}$  e  $\overline{v'^2} \approx \overline{w'^2}$ . Portanto, através destas relações torna-se possível determinar a bidimensionalidade de  $\bar{v}$  e  $\sqrt{v'^2}$ . Além disso, os perfis de  $E_q$  da seção horizontal  $z/(h/2) = 0$  com LDV também são apresentados pelas Figuras 4.14 e 4.15.

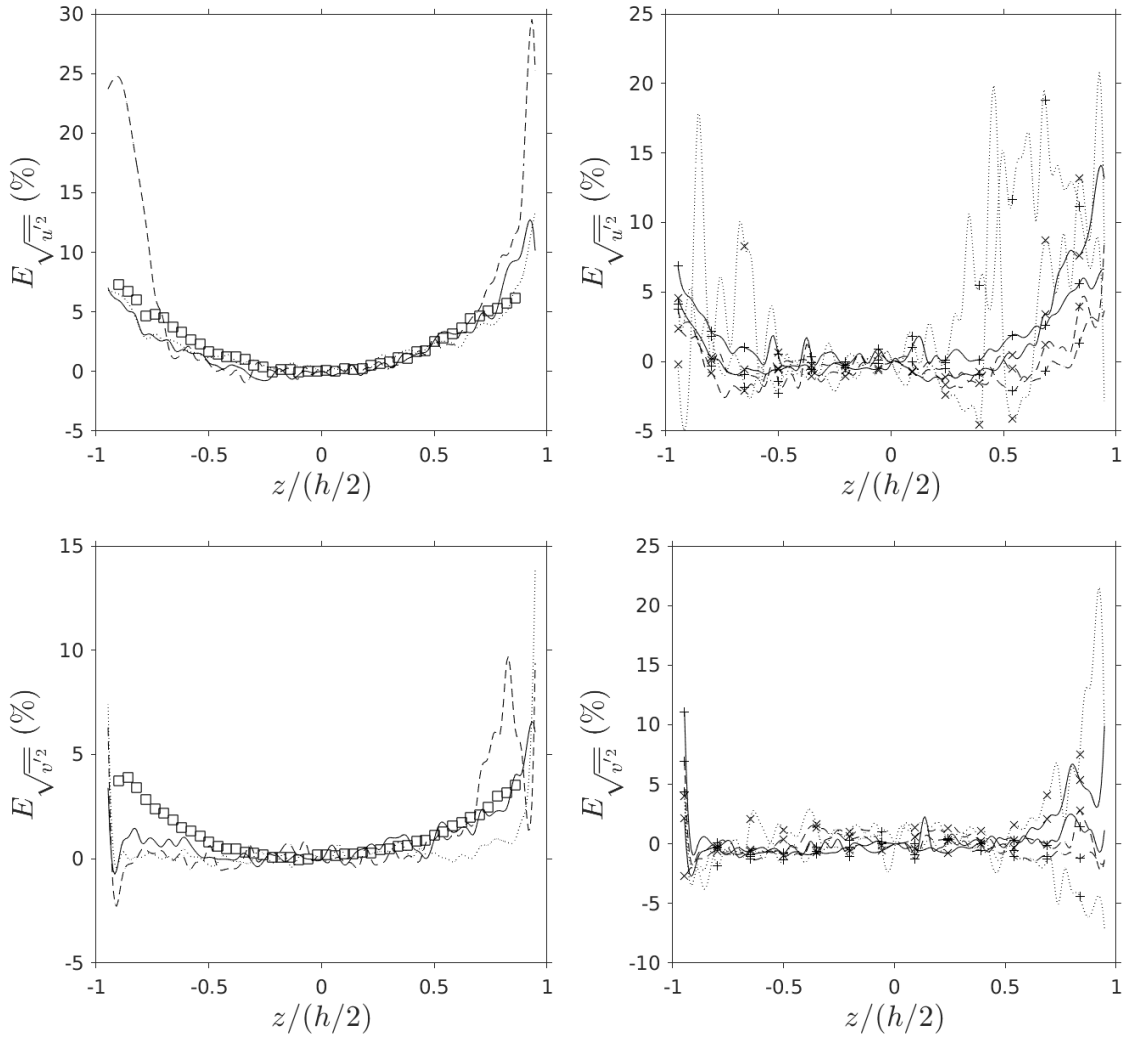
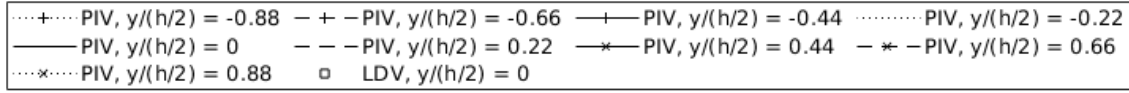
Pode-se observar que, em geral, a bidimensionalidade das variáveis  $\bar{u}$  e  $\sqrt{u'^2}$  está no intervalo de  $-10\%$  a  $10\%$  no intervalo de  $15\text{ mm}$  a  $20\text{ mm}$  de distância do centro do canal. Quanto à bidimensionalidade das variáveis  $\bar{v}$  e  $\sqrt{v'^2}$ , verifica-se que esta está no intervalo de  $-5\%$  a  $5\%$  no intervalo de  $25\text{ mm}$  de distância do centro do canal. Portanto, o escoamento tem alta bidimensionalidade em  $1/3$  da região de entrada. Comparando os valores de  $E_q$  do PIV com os do LDV, verifica-se que há uma boa convergência de  $E_{\bar{u}}$  entre as duas técnicas. Comparando os valores de  $E_{\bar{v}}$ , verifica-se pequena diferença entre as duas técnicas nas proximidades das paredes. Quanto aos valores de  $E_{\sqrt{u'^2}}$  e  $E_{\sqrt{v'^2}}$ , observa-se pequenas diferenças entre os valores com as técnicas em  $-0,5 \geq z/(h/2) \geq 0,7$ . Portanto, em geral, há concordância entre as técnicas com relação a bidimensionalidade das variáveis  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$  na região de entrada.

Figura 4.14 - Bidimensionalidade de  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  na região de entrada, obtida a partir das medições com PIV e comparada com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,11$  m/s e de  $\bar{v} = \pm 0,07$  m/s. LDV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,65$  m/s e de  $\bar{v} = \pm 0,46$  m/s. incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.15 - Bidimensionalidade de  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$  na região de entrada, obtida a partir das medições com PIV e comparada com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,08$  m/s e de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,05$  m/s. LDV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,41$  m/s e de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,30$  m/s. incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

#### 4.5 Intensidade turbulenta

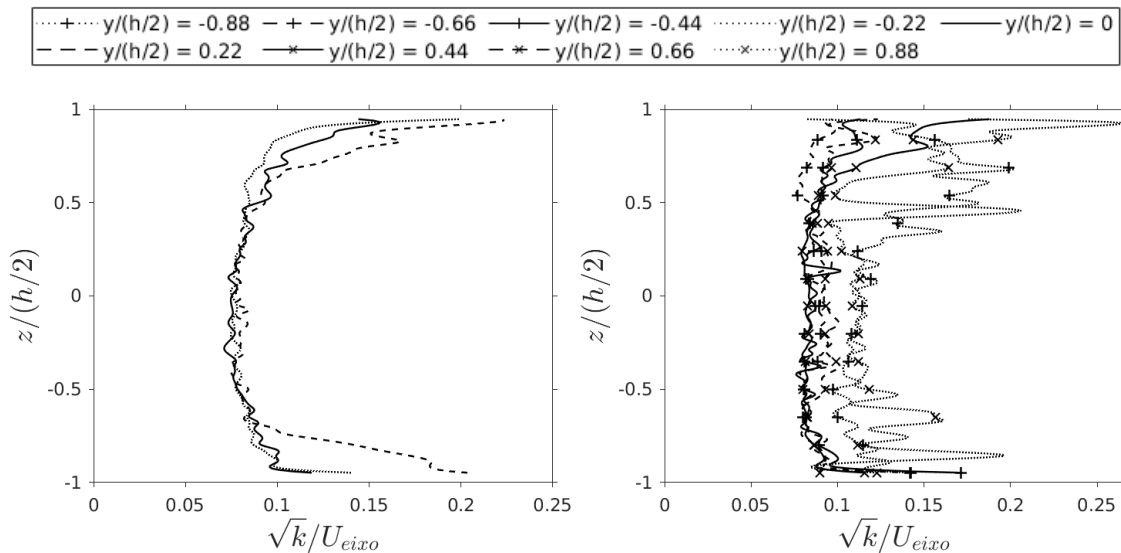
As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os perfis da intensidade turbulenta na região de entrada nas seções horizontais e verticais. Para a região de entrada, a intensidade turbulenta é definida como sendo a razão da energia cinética turbulenta pela velo-

cidade média do eixo central. Nas seções horizontais, foi levado em consideração que  $\overline{w'^2} \approx \overline{v'^2}$  em  $-0,7 < y/(h/2) < 0,7$  e em  $-0,7 < z/(h/2) < 0,7$ , conforme analisado na Seção 4.3.

Conforme observado pelas Figuras 4.16 e 4.17, a intensidade turbulenta na região de entrada, em geral, está dentro da faixa de 0,05 a 0,15. Próximo às paredes, a intensidade turbulenta atinge seus maiores valores e no centro do canal, os menores. Pode-se observar também que não existe diferença significativa entre os perfis das seções verticais com os perfis das seções horizontais. Verifica-se também que os perfis da intensidade turbulenta não são completamente simétricos com relação ao eixo central. Pode-se concluir que a intensidade turbulenta na região de entrada é relativamente baixa sem muita discrepância entre os planos horizontais e verticais. Portanto, isto implica que o escoamento chega na região principal sem turbulência significativa.

A intensidade turbulenta com PIV apresenta pequena diferença com a intensidade turbulenta com LDV. Embora seja pequena a diferença, ambas são maiores nas regiões próximas às paredes devido ao cisalhamento causado por elas.

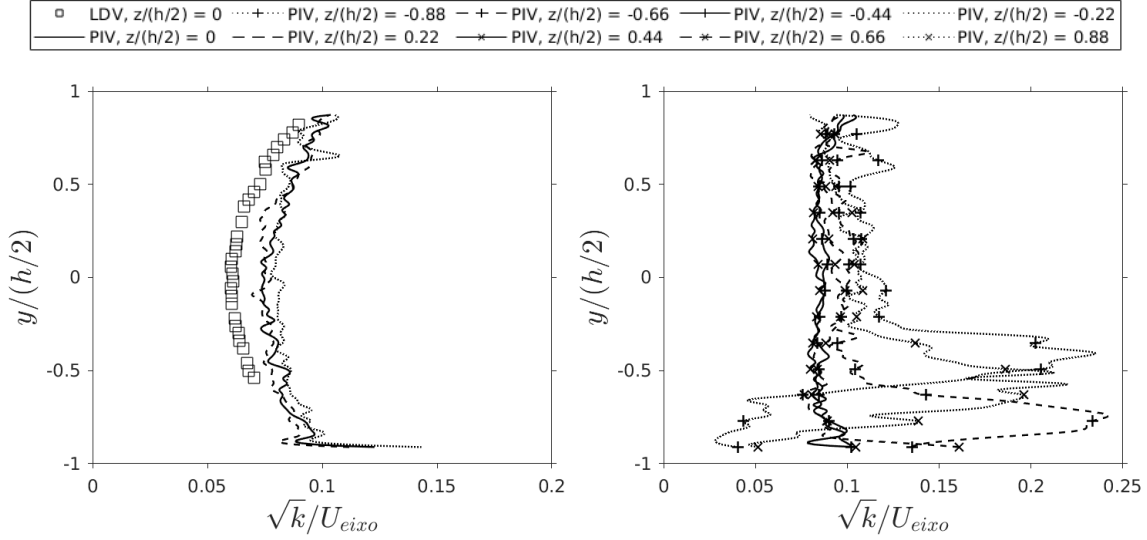
Figura 4.16 - perfis transversais horizontais da intensidade turbulenta nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $k = \pm 0,13 J$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.



Figura 4.17 - Perfis transversais verticais da intensidade turbulenta nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $k = \pm 0,11 J$ . LDV: Incerteza média de  $k = \pm 0,33 J$ . Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

#### 4.6 Coeficientes de anisotropia

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os perfis transversais verticais e transversais dos coeficientes de anisotropia das seções horizontais e verticais, respectivamente. Levando em consideração que  $\overline{v'^2} \approx \overline{w'^2}$  no intervalo para  $-0,7 < y/(h/2) < 0,7$ , para as seções verticais, e  $-0,7 < z/(h/2) < 0,7$ , para as seções horizontais, conforme analisado na Seção 4.3. As equações do coeficiente de correlação  $C_{u_i u_j}$ , do coeficiente de anisotropia  $A_{u_i u_j}$  e da razão de anisotropia  $R_{u_i u_j}$  são definidas como sendo:

$$C_{u_i u_j} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{\sqrt{\overline{u_i'^2} \overline{u_j'^2}}}, \quad A_{u_i u_j} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{k}, \quad R_{u_i u_j} = \frac{\overline{u_i'^2}}{\overline{u_j'^2}}, \quad i \neq j.$$

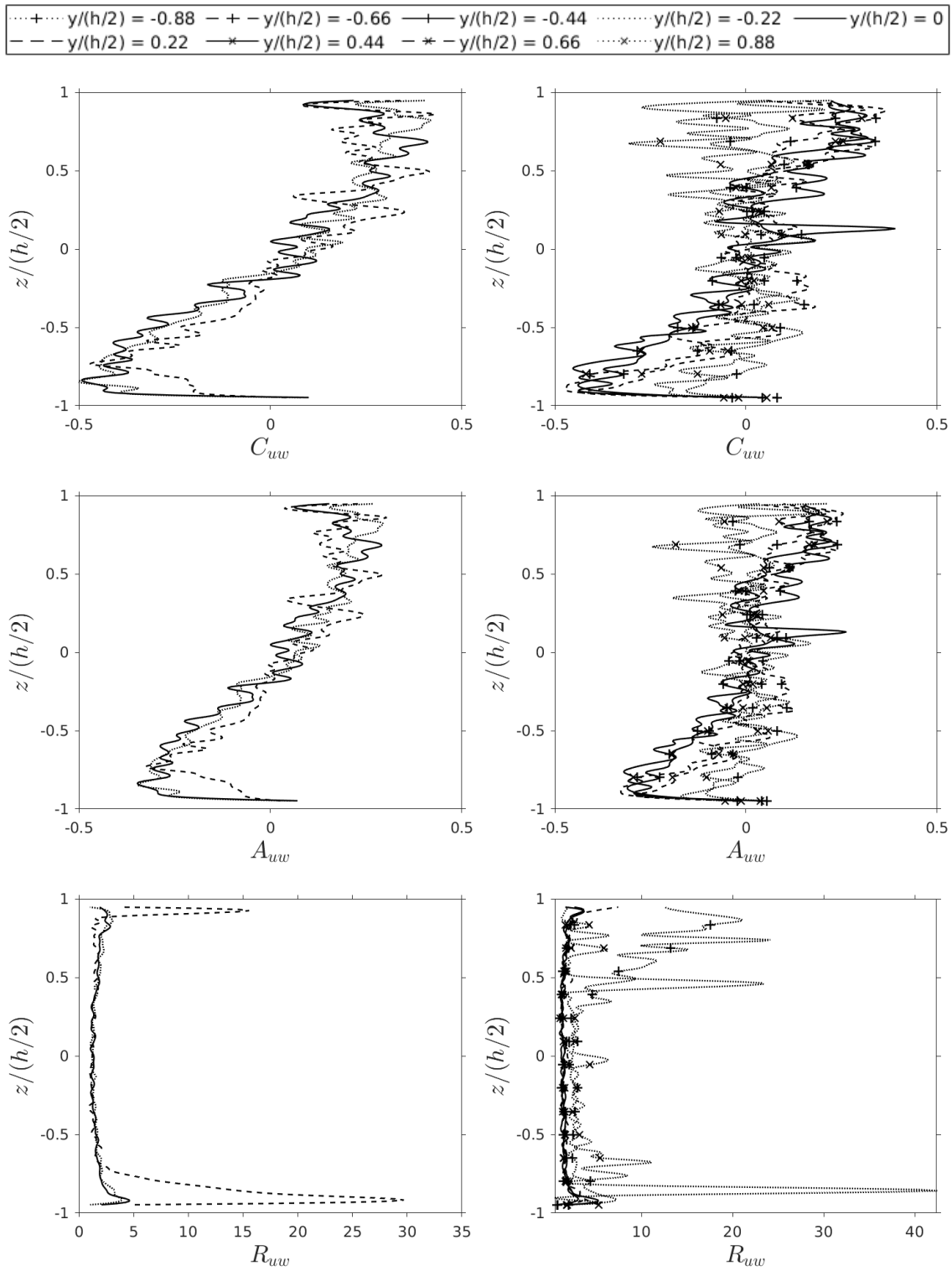
Dos perfis dos coeficientes  $C_{uw}$ ,  $C_{uw}$ ,  $A_{uw}$  e  $A_{uw}$ , apresentadas pelas Figuras 4.18 e 4.19, pode-se observar que a anisotropia é maior nas proximidades das paredes devido ao cisalhamento do escoamento turbulento nestas regiões. Verifica-se que os coeficientes em questão são próximos de zero em  $y/(h/2) = 0$  e  $z/(h/2) = 0$ , pois  $\overline{u'v'}$  e  $\overline{u'w'}$  são próximos de zero nestas regiões. Observa-se também oscilações ao longo dos perfis dos coeficientes de anisotropia e de correlação. Essas oscilações se devem

às características locais da turbulência e na variação da qualidade das medições com PIV. Nas regiões próximas de  $y/(h/2) = \pm 0,88$  e de  $z/(h/2) = \pm 0,88$ , há fortes oscilações nos perfis de  $C_{uw}$ ,  $C_{uv}$ ,  $A_{uw}$  e  $A_{uv}$ , devido aos gradientes de velocidade nestas regiões.

Com relação aos coeficientes  $R_{uv}$ , cujos perfis também estão presentes na Figura 4.19, verifica-se que a razão de anisotropia  $\overline{u'^2}/\overline{v'^2}$  é maior do que 2 nas regiões próximas às paredes. Isso se deve ao cisalhamento do escoamento nas paredes. Essa característica de  $R_{uv}$  também é observada nos perfis de  $R_{uw}$ , que estão na Figura 4.18. Além disso, observa-se grandes oscilações nos perfis de  $R_{uv}$  e de  $R_{uw}$  nas regiões próximas às paredes, nas seções horizontais  $z/(h/2) = \pm 0,88$  e nas seções verticais  $y/(h/2) = \pm 0,88$ . Tais oscilações, que também estão presentes nos perfis dos coeficientes de anisotropia e de correlação, são causadas pelos gradientes de velocidade próximos às paredes, que diminuem a qualidade das medições com PIV.

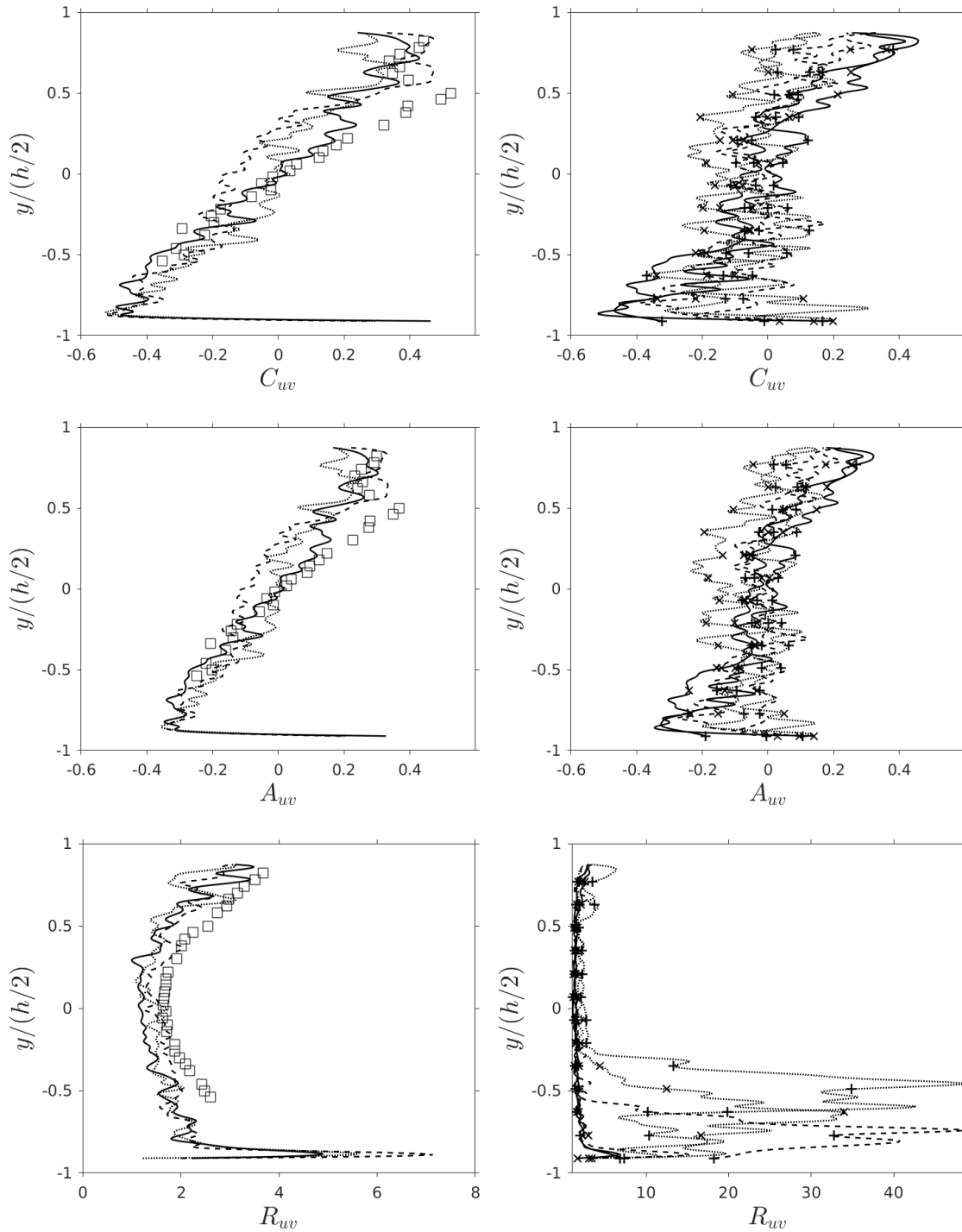
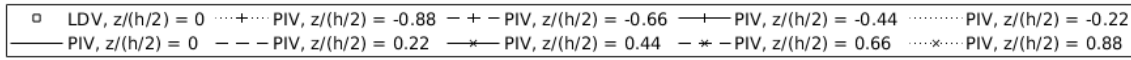
Comparando os valores dos coeficientes de anisotropia obtidos a partir das medições com LDV com as do PIV, pode-se constatar que há uma boa concordância entre os valores. Apenas na região em torno de  $y/(h/2) = 0,5$  há pequena diferença entre os coeficientes  $C_{uv}$  e  $A_{uv}$  das duas técnicas. Verifica-se também que os valores de  $R_{uv}$  com PIV são menores em relação aos valores de  $R_{uv}$  com LDV, devido ao fato de  $\sqrt{\overline{v'^2}}$  ser maior no PIV que no LDV.

Figura 4.18 - perfis transversais horizontais do coeficiente de anisotropia  $C_{uw}$ ,  $A_{uw}$  e  $R_{uw}$  nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $C_{uw} = \pm 0,12$ , de  $A_{uw} = \pm 0,08$  e de  $R_{uw} = \pm 0,66$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.19 - Perfis transversais verticais do coeficiente de anisotropia  $C_{uv}$ ,  $A_{uv}$  e  $R_{uv}$  nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $C_{uv} = \pm 0,12$ , de  $A_{uv} = \pm 0,08$  e de  $R_{uv} = \pm 1,17$ . LDV: Incerteza média de  $C_{uv} = \pm 1,20$ , de  $A_{uv} = \pm 0,84$  e de  $R_{uv} = \pm 2,08$ . Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

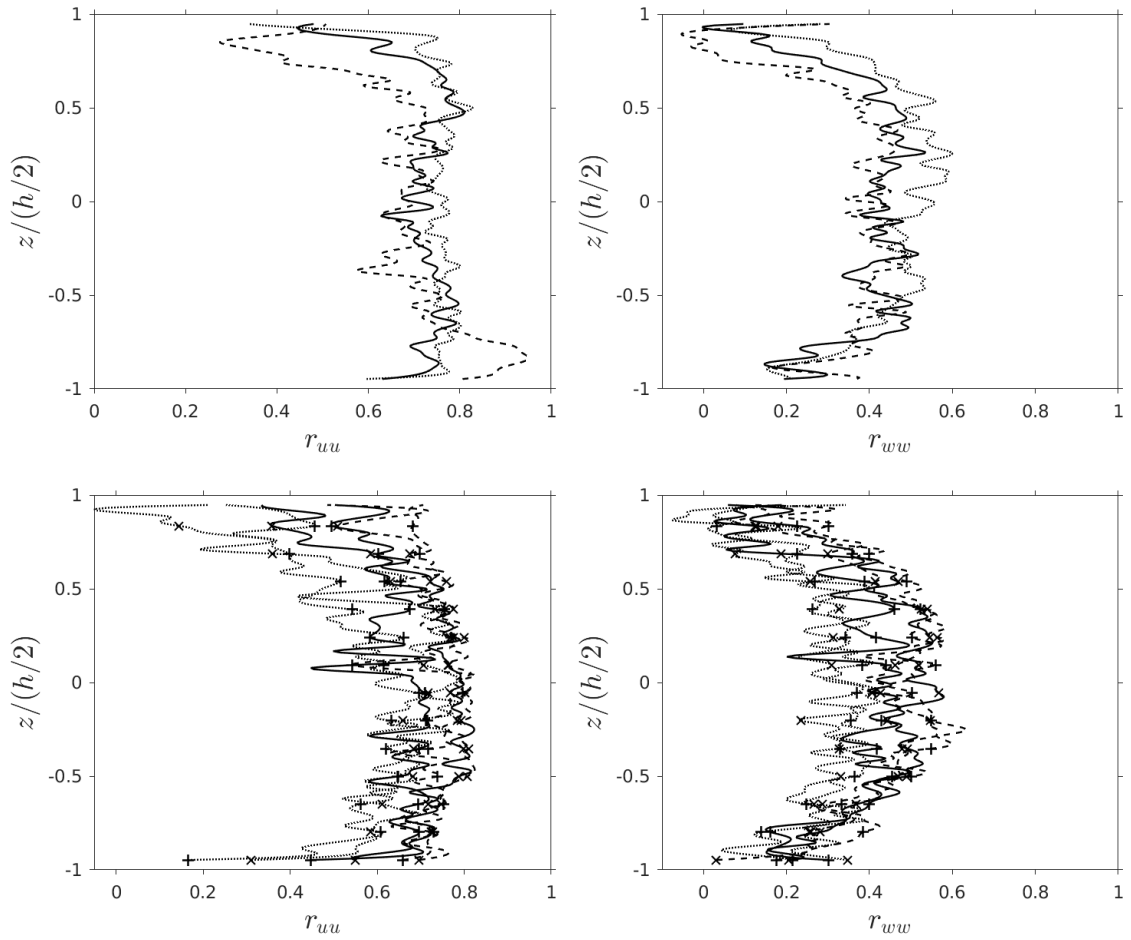
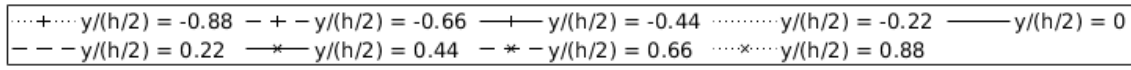
## 4.7 Correlações espaciais

Perfis e isocontornos das correlações espaciais das flutuações longitudinal, normal e transversal do escoamento turbulento na região de entrada são apresentados nesta seção. Os gráficos das correlações espaciais são divididos em três grupos distintos. O primeiro deles é composto pelos perfis das auto-correlações espaciais longitudinais em função de  $y/(h/2)$ , nas seções verticais, ou de  $z/(h/2)$ , nas seções horizontais, com  $\vec{\xi}/(h/2)$  constante. Os perfis em questão estão localizados em  $x/(h/2) = 0,5$ . Além disso,  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (c, 0, 0)$ , onde  $c$  é uma constante, nas auto-correlações espaciais longitudinais em questão. No segundo grupo há os perfis das correlações espaciais longitudinais, normais e transversais, nos quais um dado  $\xi_i$  é variável e os demais  $\xi_j$  são nulos, em determinados pontos dos planos  $xy$  e  $xz$ . O terceiro e último grupo são os isocontornos das correlações espaciais em função de dois componentes de  $\vec{\xi}$  em determinados pontos da região de entrada.

Os perfis transversais verticais e transversais das auto-correlações espaciais do primeiro grupo também são divididos em dois outros conjuntos, aqueles que pertencem as seções horizontais (plano  $xz$ ) e aqueles que pertencem as seções verticais (plano  $xy$ ). O valor  $\xi_1/(h/2)$ , que é uma constante, equivale a 0,028 e 0,03 para as seções verticais e horizontais, respectivamente. Estes valores de  $\xi_1/(h/2)$  foram escolhidos de forma a viabilizar a análise das auto-correlações espaciais com  $\xi_1/(h/2)$  fixo.

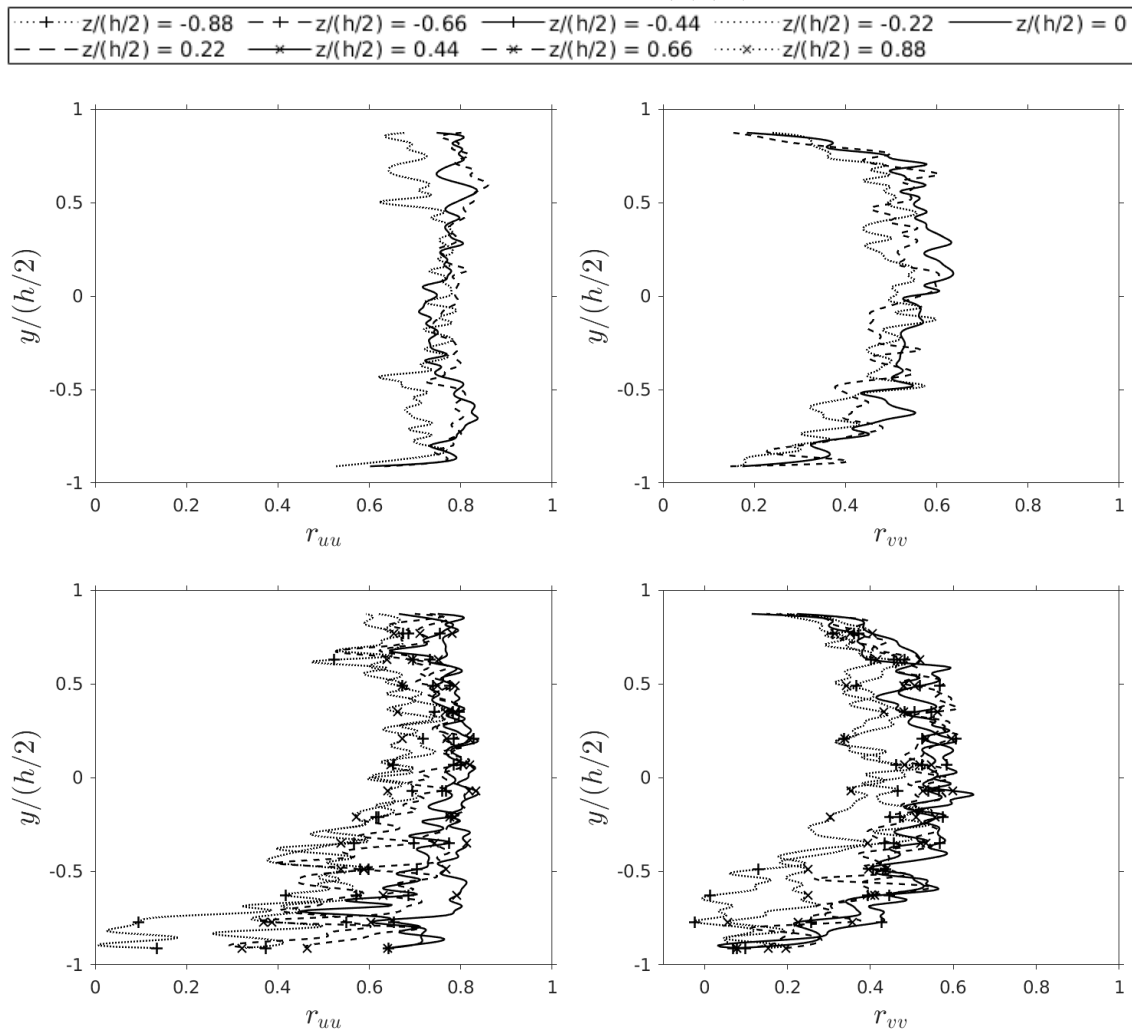
Nos perfis das Figuras 4.20 e 4.21, pode-se observar que, em diversas regiões, há fortes auto-correlações espaciais longitudinais da componente da velocidade longitudinal, com valores iguais ou superiores a 0,7. Verifica-se também que  $r_{uu}$  varia bem pouco ao longo dos eixos  $y$  e  $z$ . Sobre as auto-correlações espaciais longitudinais das flutuações normal e transversal, estas, em geral, estão na faixa de 0,2 a 0,6. Além disso,  $r_{vv}$  e  $r_{ww}$  atingem seus menores valores nas regiões próximas das paredes, embora não haja aumento da flutuação média das velocidades transversais nestas regiões.

Figura 4.20 - perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de  $u'$  e de  $w'$  nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,17$  e de  $r_{ww} = \pm 0,16$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Produção do autor.

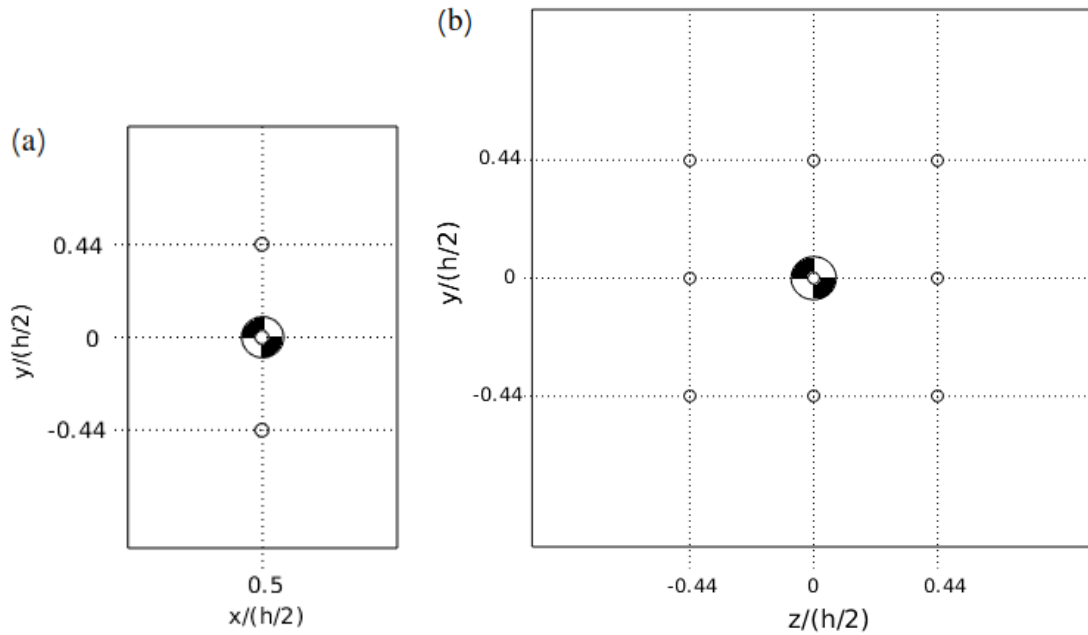
Figura 4.21 - Perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de  $u'$  e de  $v'$  nas seções verticais na região de entrada. Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,18$  e de  $r_{vv} = \pm 0,17$ , incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.22 exibe as localidades dos pontos nos quais foram estimados as correlações espaciais em foco. Os perfis das Figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam as correlações espaciais longitudinais, normais e transversais em dados pontos da região de entrada em função de  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  e  $\xi_3$ . Verifica-se que todas essas auto-correlações espaciais citadas têm aspecto simétrico em torno do ponto central. Entre as diversas localidades das auto-correlações, não há diferenças significativas entre elas.

Figura 4.22 - Localizações dos pontos das correlações espaciais em função de  $\xi$  na região de entrada da câmara de combustão: (a) vista lateral; (b) vista frontal.



Fonte: Produção do autor.

Além disso, as auto-correlações espaciais, apresentadas pelas Figuras 4.23 e 4.25, com exceção da auto-correlação espacial longitudinal de  $u'$ , atingem valores próximos a 0,1 quando  $\xi_i$  é igual a 0,3 ou  $-0,3$ . Nestas distâncias, os valores da auto-correlação espacial longitudinal estão no intervalo entre 0,4 a 0,7. Essa diferença entre as auto-correlações se deve ao fato de que a turbulência é mais anisotrópica nos sentidos dos eixos  $y$  e  $z$  em comparação ao sentido longitudinal. Essa anisotropia é causada pelo cisalhamento do escoamento turbulento nas paredes, que resultam no aumento da faixa de tamanhos dos vórtices. Além disso os vórtices são mais alongados no sentido longitudinal.

Sobre as correlações cruzadas espaciais, apresentadas pelas Figuras 4.24 e 4.26, não há nenhum pico ou vale característico ao longo de qualquer  $\xi_i$  nos seus perfis. Embora tenham este aspecto, as correlações cruzadas dos perfis, cujas localizações são mais próximas das paredes, são aqueles que têm os maiores e menores valores. Isso mostra o efeito do cisalhamento das paredes nas correlações cruzadas  $r_{uv}$  e  $r_{uw}$ .



Figura 4.23 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  e de  $v'$  em função de  $\xi_1$  e de  $\xi_2$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,14$  e de  $r_{vv} = \pm 0,12$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ .

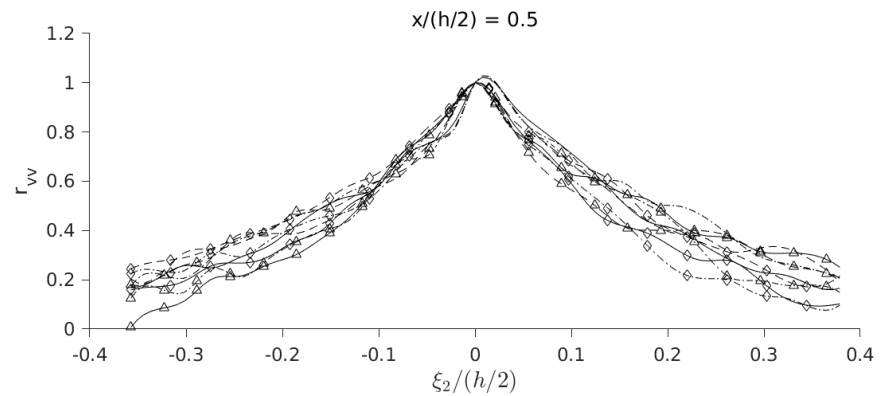
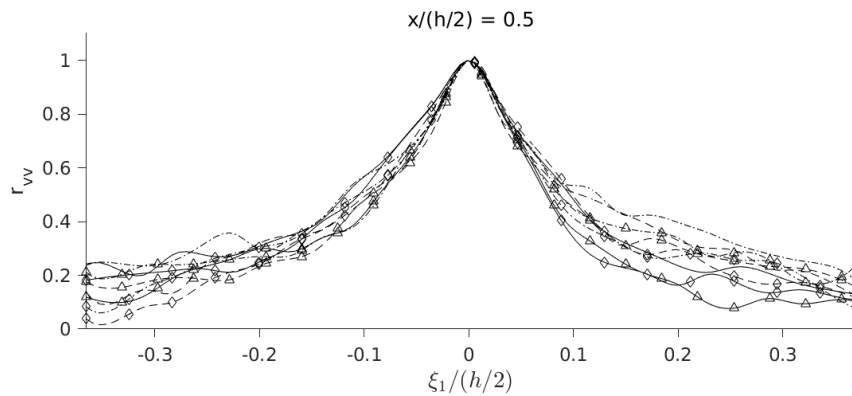
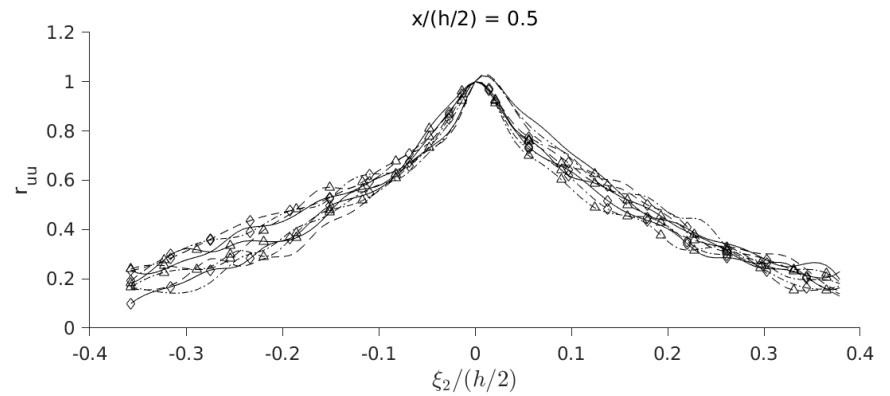
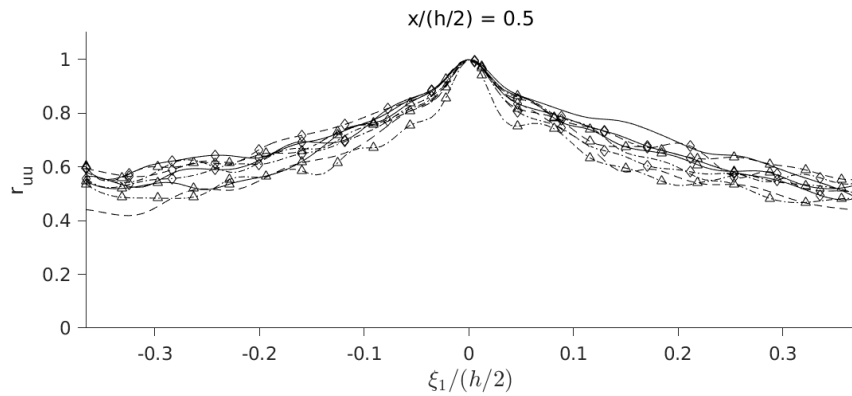
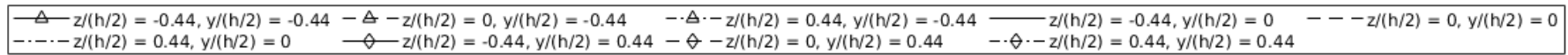
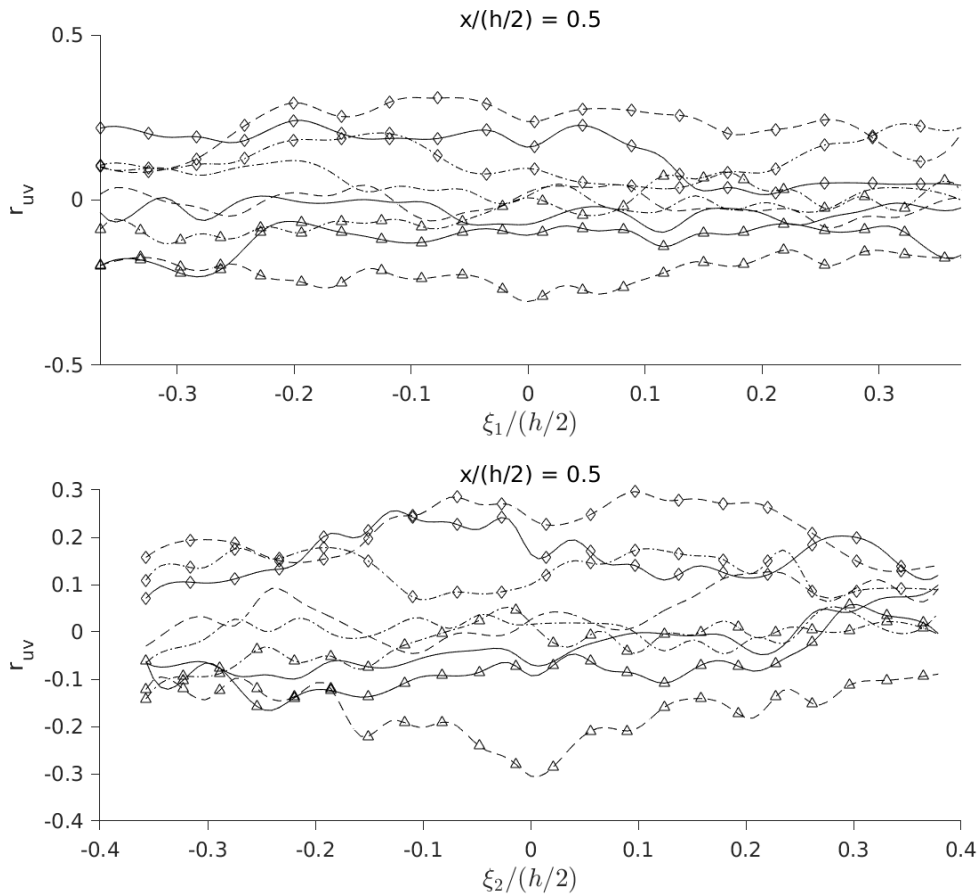


Figura 4.24 - Perfis da correlação cruzada espacial de  $u'$  e  $v'$  em função de  $\xi_1$  e de  $\xi_2$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seções verticais). Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,14$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ .

—◇—	$z/(h/2) = -0.44, y/(h/2) = 0.44$	—◇—	$z/(h/2) = 0, y/(h/2) = 0.44$	—◇—	$z/(h/2) = 0.44, y/(h/2) = 0.44$
—	$z/(h/2) = -0.44, y/(h/2) = 0$	---	$z/(h/2) = 0, y/(h/2) = 0$	---	$z/(h/2) = 0.44, y/(h/2) = 0$
—△—	$z/(h/2) = -0.44, y/(h/2) = -0.44$	—△—	$z/(h/2) = 0, y/(h/2) = -0.44$	—△—	$z/(h/2) = 0.44, y/(h/2) = -0.44$



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.25 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  e de  $w'$  em função de  $\xi_1$  e  $\xi_3$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,14$  e de  $r_{ww} = \pm 0,12$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ .

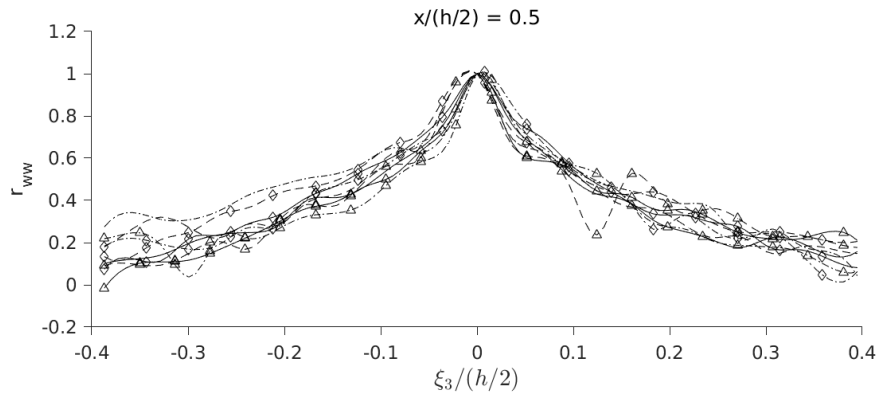
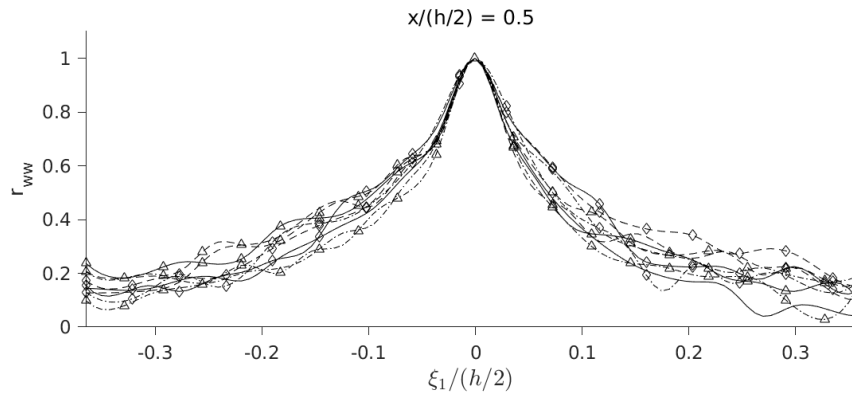
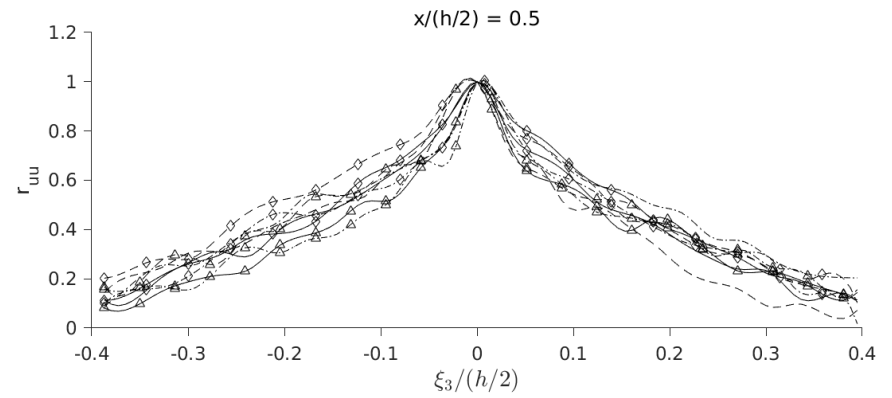
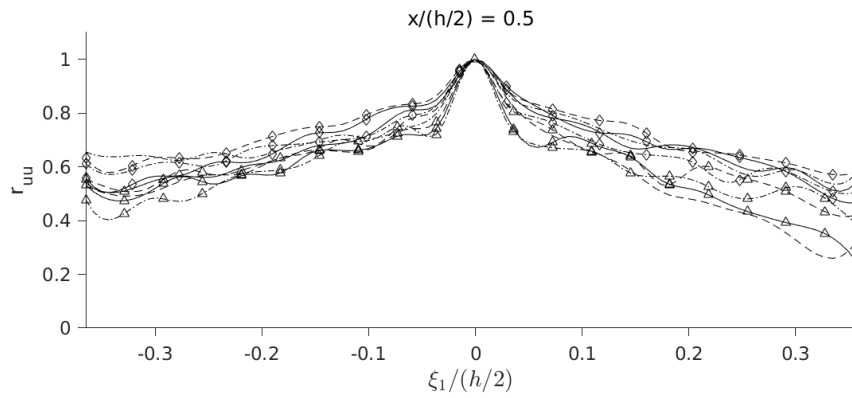
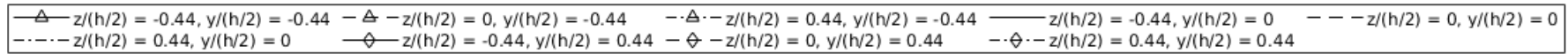
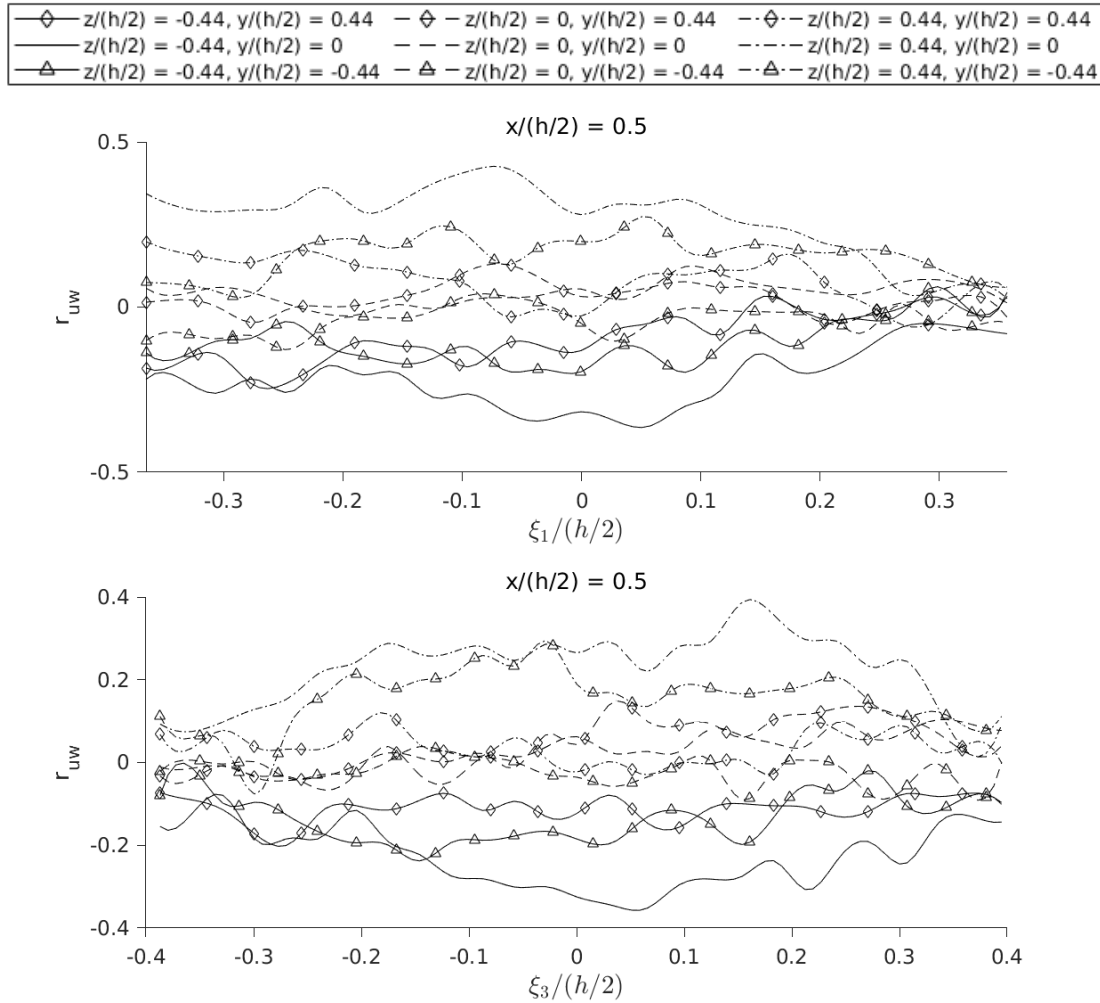


Figura 4.26 - Perfis da correlação cruzada espacial de  $u'$  e  $w'$  em função de  $\xi_1$  e  $\xi_3$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,14$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ .

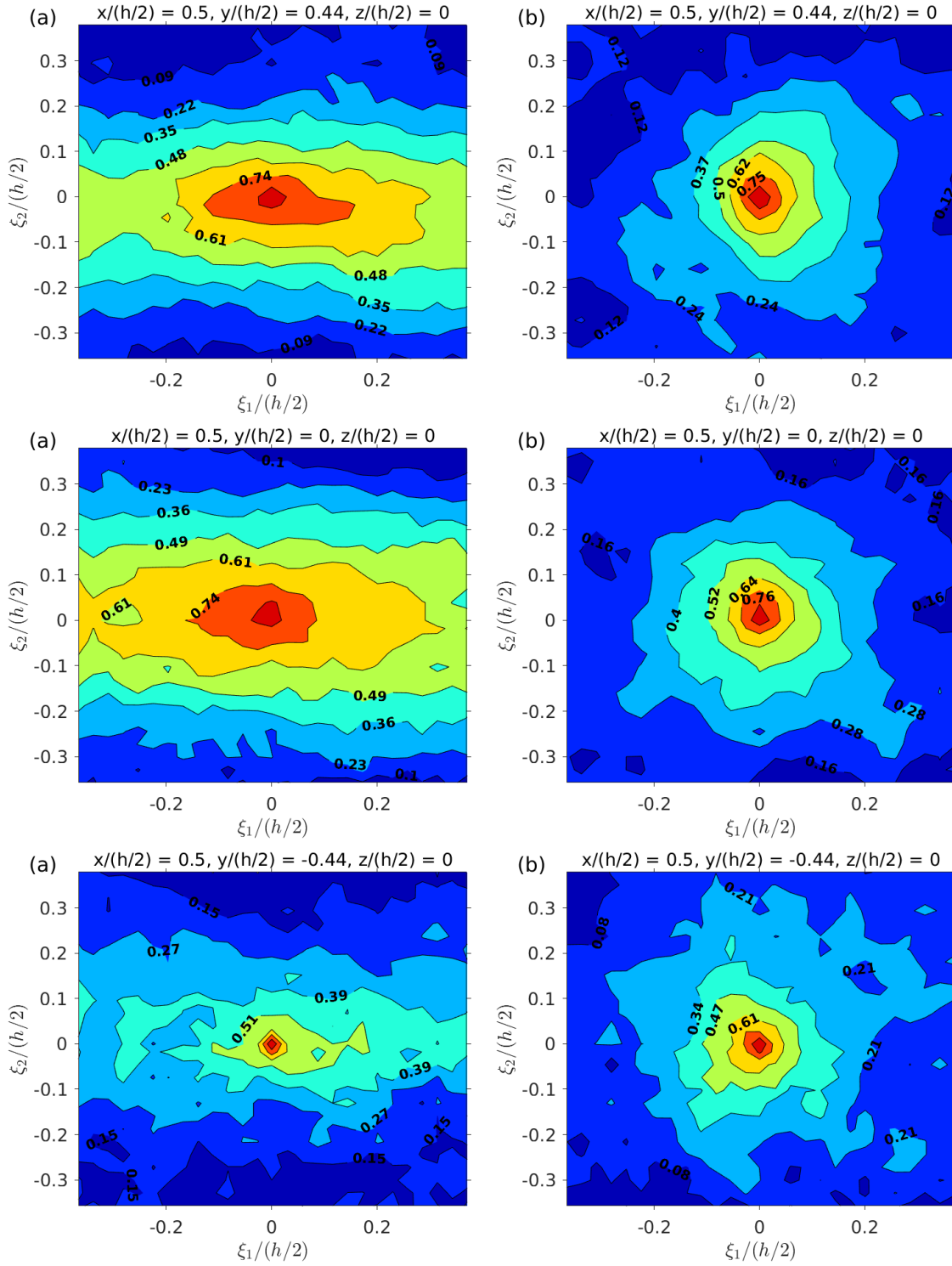


Fonte: Produção do autor.

Os isocontornos das correlações espaciais em alguns pontos da região de entrada são apresentados pelas Figuras 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30. As coordenadas das posições dos isocontornos em questão estão acima dos gráficos destes. Verifica-se que as auto-correlações de  $u'$  são mais alongadas na direção longitudinal, isto é, o decréscimo de  $r_{uu}$  é menos acentuado em  $\xi_1$ . Tal aspecto não é observado nos isocontornos da auto-correlação de  $v'$  e de  $w'$ . Isso se deve ao cisalhamento provocado pelas paredes na velocidade longitudinal, que aumentam a flutuação turbulenta de  $u$ , e pelo próprio movimento do escoamento na direção longitudinal, que alonga os vórtices. Por fim, os isocontornos das correlações cruzadas são caracterizados pelo seus aspectos mais homogêneos e pelas suas baixas intensidades. Isso se deve ao fato que as posições dos

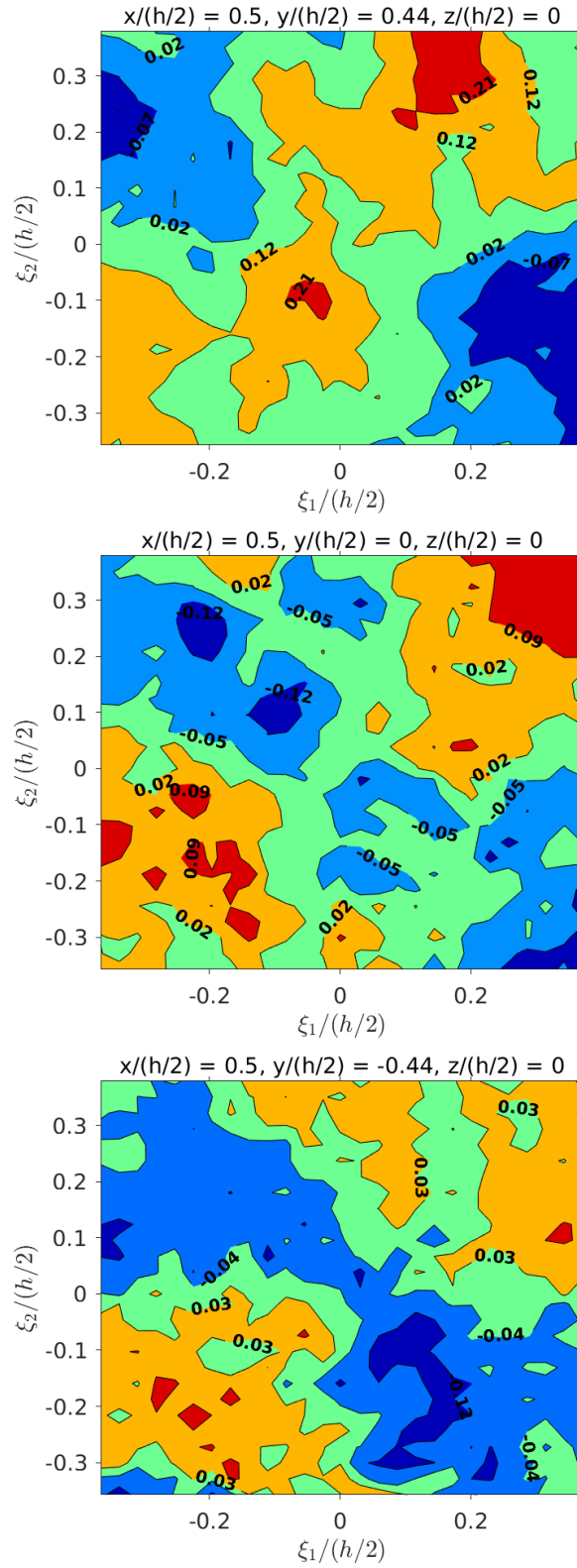
isocontornos não estão nas regiões próximas das paredes, onde há forte cisalhamento.

Figura 4.27 - Isocontornos da auto-correlação espacial (a)  $r_{uu}$  e (b)  $r_{vv}$  na região de entrada (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,03$  e de  $r_{vv} = \pm 0,03$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ .



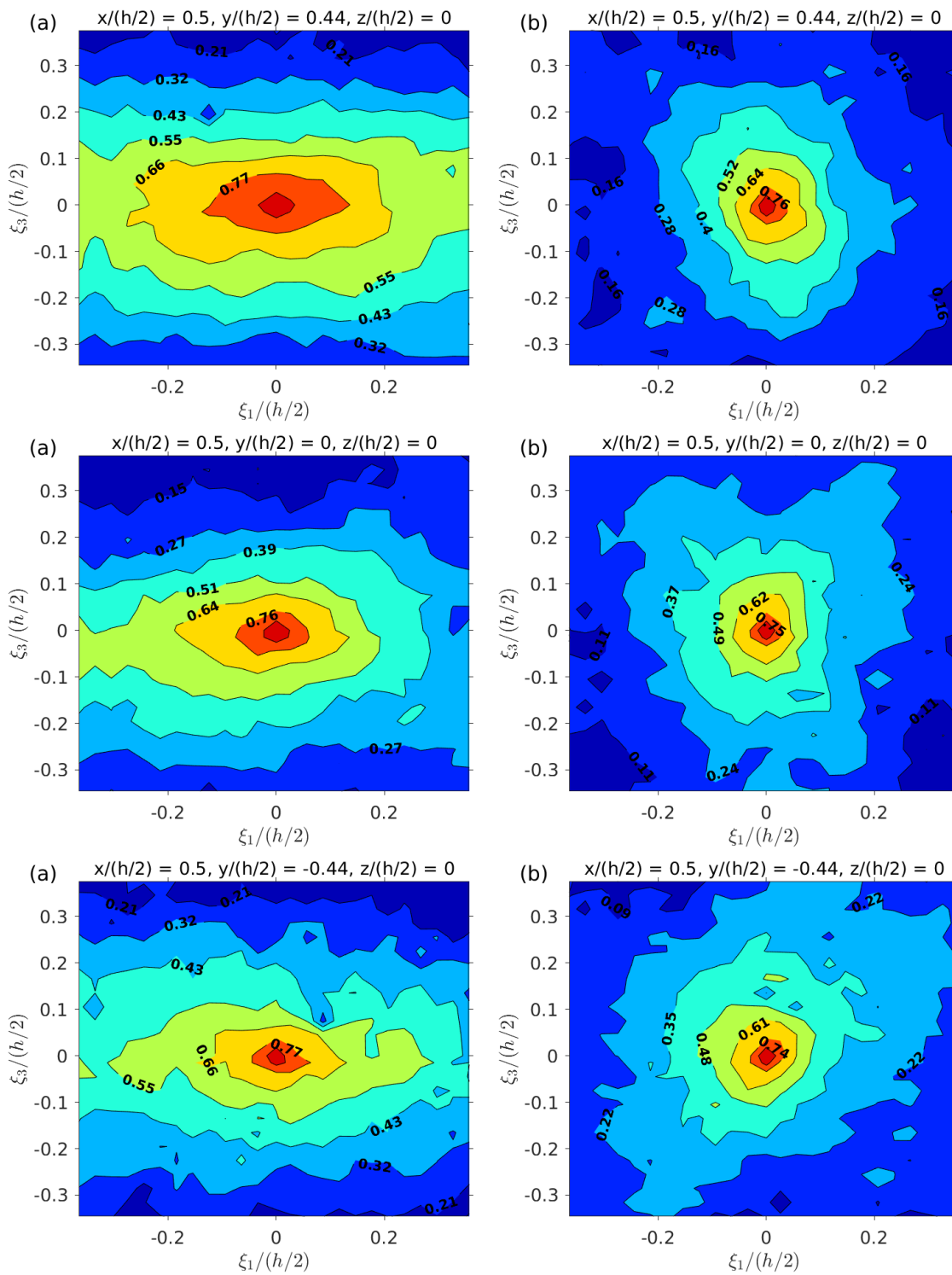
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.28 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,03$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_2/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

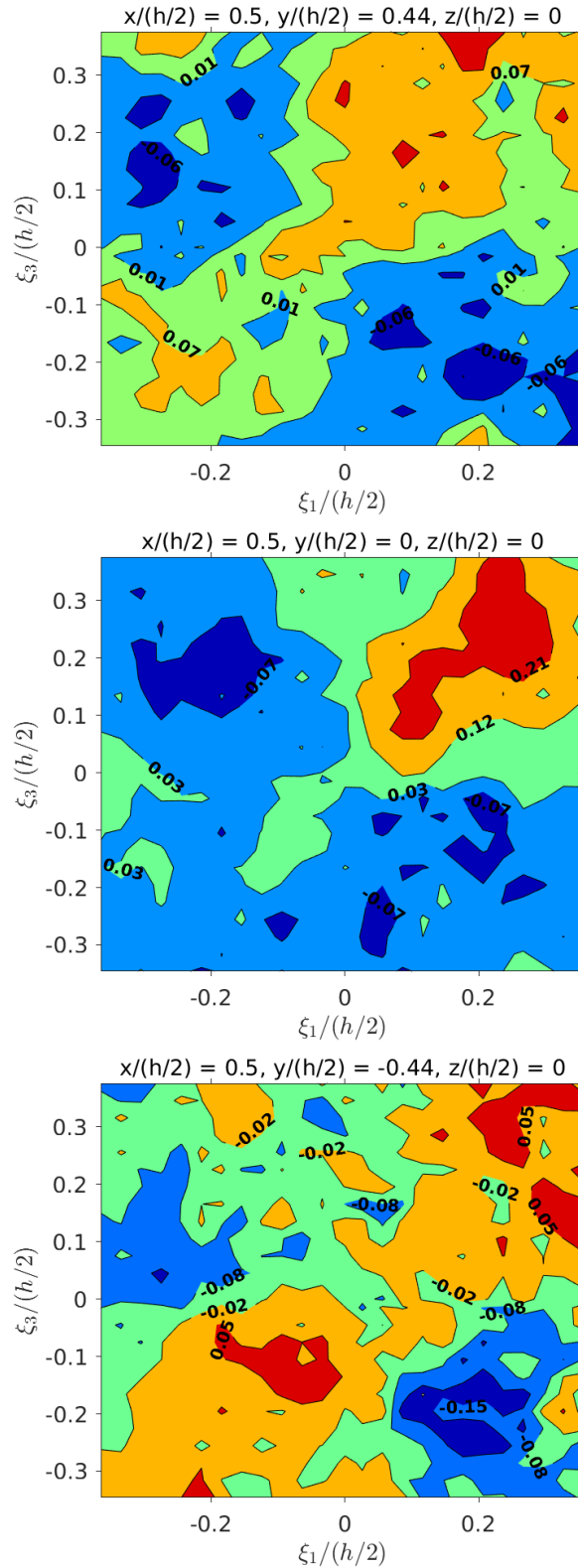
Figura 4.29 - Isocontornos da auto-correlação espacial (a)  $r_{uu}$  e (b)  $r_{ww}$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,05$  e de  $r_{ww} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.



Figura 4.30 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uw}$  na região de entrada em  $x/(h/2) = 0,5$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_1/(h/2) = \pm 0,01$  e de  $\xi_3/(h/2) = \pm 0,01$ .



Fonte: Produção do autor.

## 4.8 Escalas espaciais e temporais turbulentas

Esta seção é destinada a avaliar as escalas espaciais e temporais turbulentas do escoamento na região de entrada na câmara de combustão. Levando em consideração que as medições das escalas só são possíveis se as dimensões das escalas forem maiores que a resolução do equipamento de medição, podemos determinar quais escalas podem ser medidas pelo PIV. Para isso, faz-se necessário a obtenção dos valores das escalas na região de entrada para que estes sejam comparados com a resolução espacial e temporal do PIV. A resolução espacial do PIV é o comprimento das janelas de interrogação das seções verticais e horizontais que equivale aproximadamente  $0,03(h/2)$  mm. A resolução temporal do PIV é a frequência de amostragem que equivale a  $5$  Hz, isto é,  $0,2$  s. As escalas integrais de comprimento foram calculadas a partir da integral das auto-correlações espaciais em relação a  $\xi_1$  em  $\xi_1/(h/2) \in [0; 0,37]$ . A equação dessa integral está presente na Subseção 2.3.3. As demais escalas foram estimadas através das relações entre as escalas, que foram apresentadas na Tabela 2.5. A partir da cálculo dos valores das escalas, foi verificado que  $l_{I,u_i}/(h/2)$ ,  $l_{T,u_i}/(h/2)$  e  $l_{K,u_i}/(h/2)$  estão na ordem de  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$ , respectivamente; e  $t_{I,u_i}$ ,  $t_{T,u_i}$  e  $t_{K,u_i}$  estão nas ordens de  $1$  ms,  $10^{-1}$  ms e  $10^{-1}$  ms, respectivamente. Portanto, verifica-se que apenas a escala integral pode ser medida pelo PIV.

Os perfis da escala de comprimento integral são apresentados pelas Figuras 4.31 e 4.32 e os perfis da escala de tempo integral são apresentados pelas Figuras 4.33 e 4.34. Os perfis das escalas estão localizados em  $x/(h/2) = 0,5$ , assim como os perfis dos demais parâmetros caracterizadores. Trevisan (2018) apenas tratou dos perfis das escalas integrais.

Verifica-se que as proporções das escalas de comprimento integral com a meia altura do canal estão na faixa de 0,05 a 0,3. Somado a isso, as escalas de comprimento das velocidades normal e transversal são menores nas proximidades das paredes com relação ao centro do canal. Essa característica também é observada nas escalas de comprimento da velocidade longitudinal nas seções mais distantes do centro do canal. Essa diferença entre as escalas se deve ao fato do deslocamento do escoamento principal estar no sentido longitudinal. Essa característica do escoamento contribui para o alongamento dos vórtices no sentido longitudinal. Devido a isso, as escalas de comprimento das velocidade longitudinal são pouco afetadas pelo cisalhamento das paredes. Comparando os perfis das escalas de comprimento das seções horizontais e verticais, pode-se observar que os valores das escalas de comprimento só diminuem

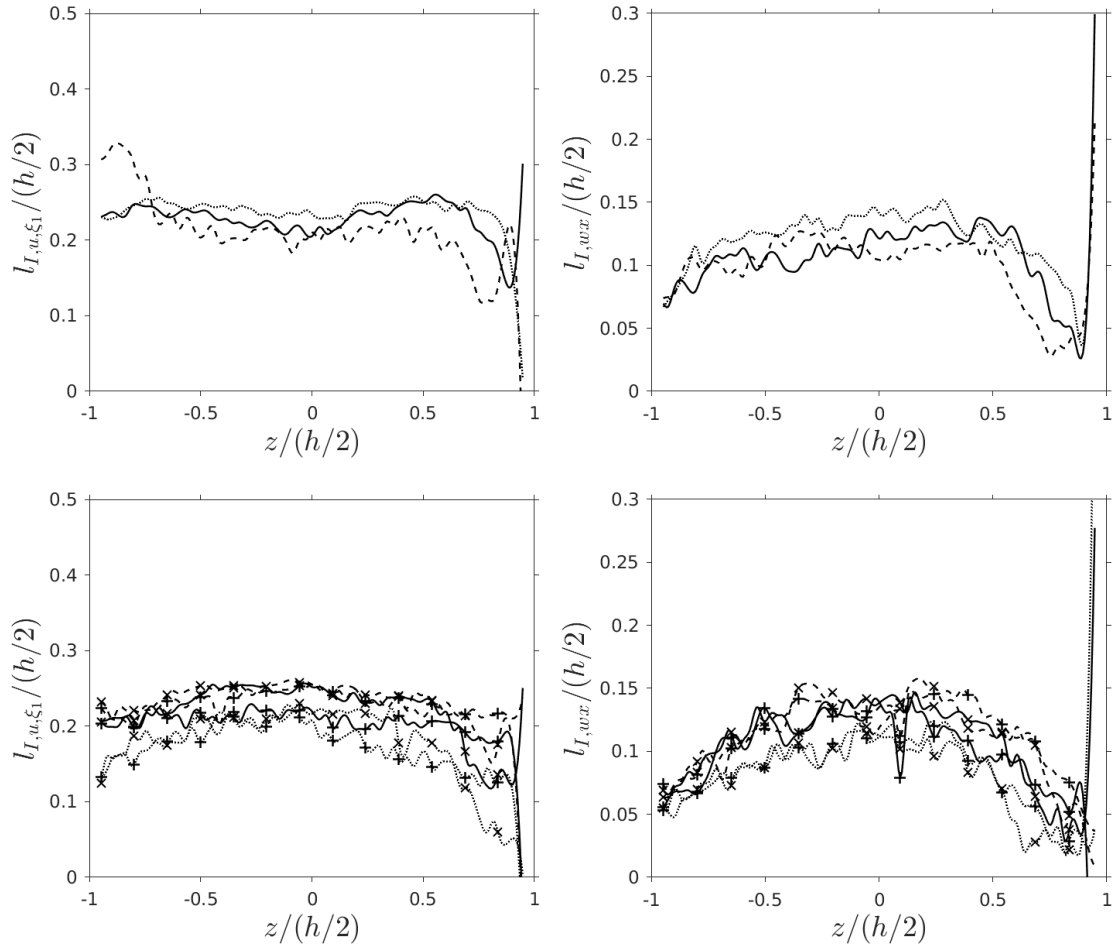
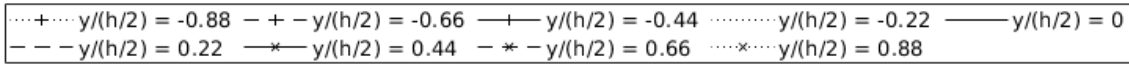
significativamente nos perfis das seções mais próximas das paredes. Tal aspecto também é observado nas escalas de tempo.

Sobre as escalas de tempo, verifica-se que elas têm características similares as escalas de comprimento. Nas regiões próximas às paredes, as escalas de tempo das velocidades normal e transversal são menores com relação aos valores das demais regiões do canal. Isso se deve ao cisalhamento das paredes que alteram as escalas de tempo das velocidades transversais. As escalas de tempo da velocidade longitudinal não têm seus valores reduzidos nas regiões próximas às paredes, por causa do alongamento dos vórtices provocados pelo escoamento principal. As escalas integral de tempo estão na faixa de  $0,25 \text{ ms}$  a  $2 \text{ ms}$ .

Verificou-se também que os perfis das escalas das seções horizontais mais distantes são mais simétricas em  $z/(h/2) = 0$  em relação aos perfis  $y/(h/2) \in \{0; \pm 0,22\}$ . A razão disso está na baixa qualidade das medições com PIV nas bordas das seções horizontais centrais. Além disso, observa-se que os perfis das seções horizontais e verticais contêm oscilações nas regiões próximas às paredes, devido a baixa qualidade das medições com PIV nestas regiões.

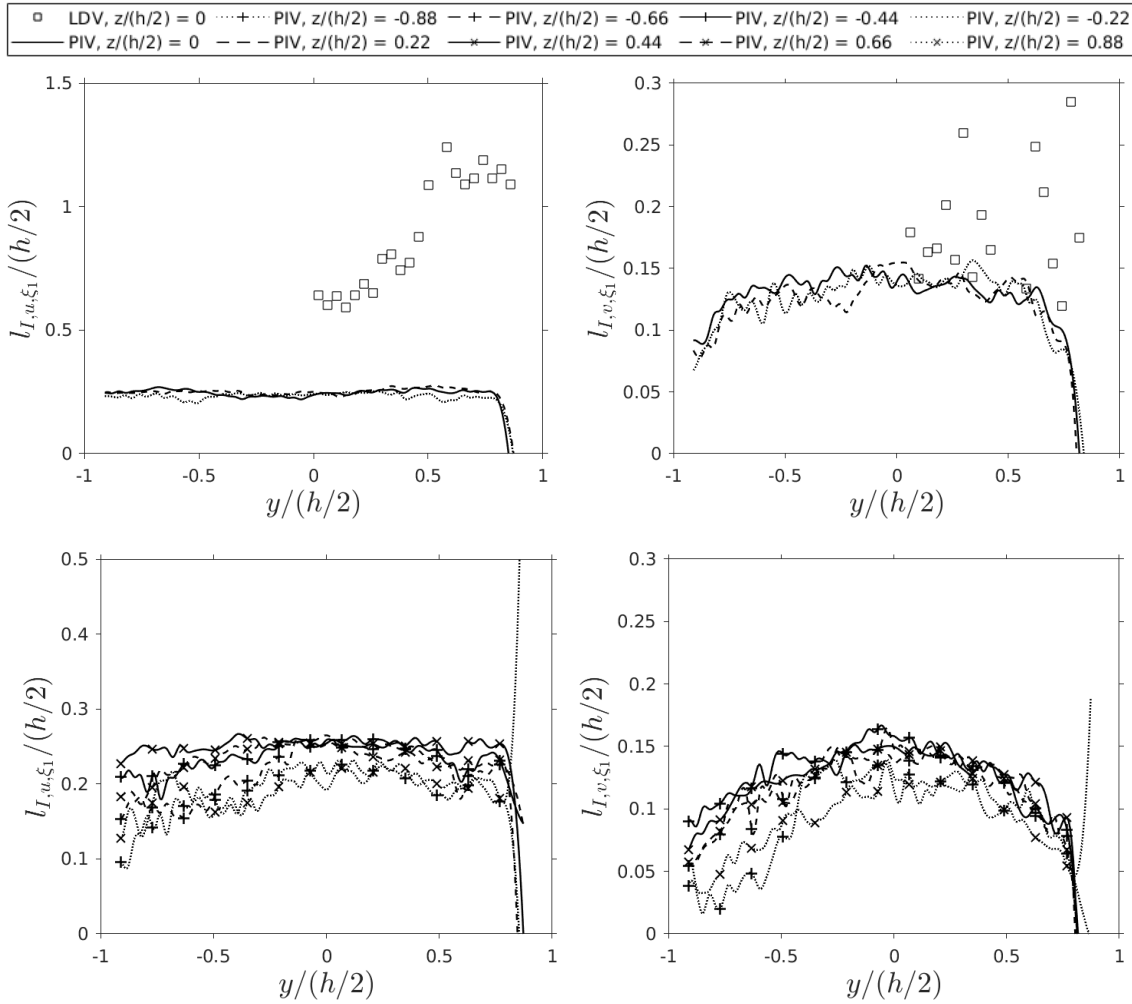
Da comparação entre os resultados com LDV e os com PIV, fica patente que não há uma boa concordância entre os valores das escalas integrais espaciais e temporais. Essa falta de concordância se deve ao fato do LDV ter resolução temporal muito maior que o PIV.

Figura 4.31 - perfis transversais horizontais das escalas de comprimento integral de  $u$  e  $w$  na região de entrada (seções horizontais). Incerteza média de:  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,70 \text{ mm}$ ,  $l_{I,w,\xi_1} = \pm 0,80 \text{ mm}$ . Incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



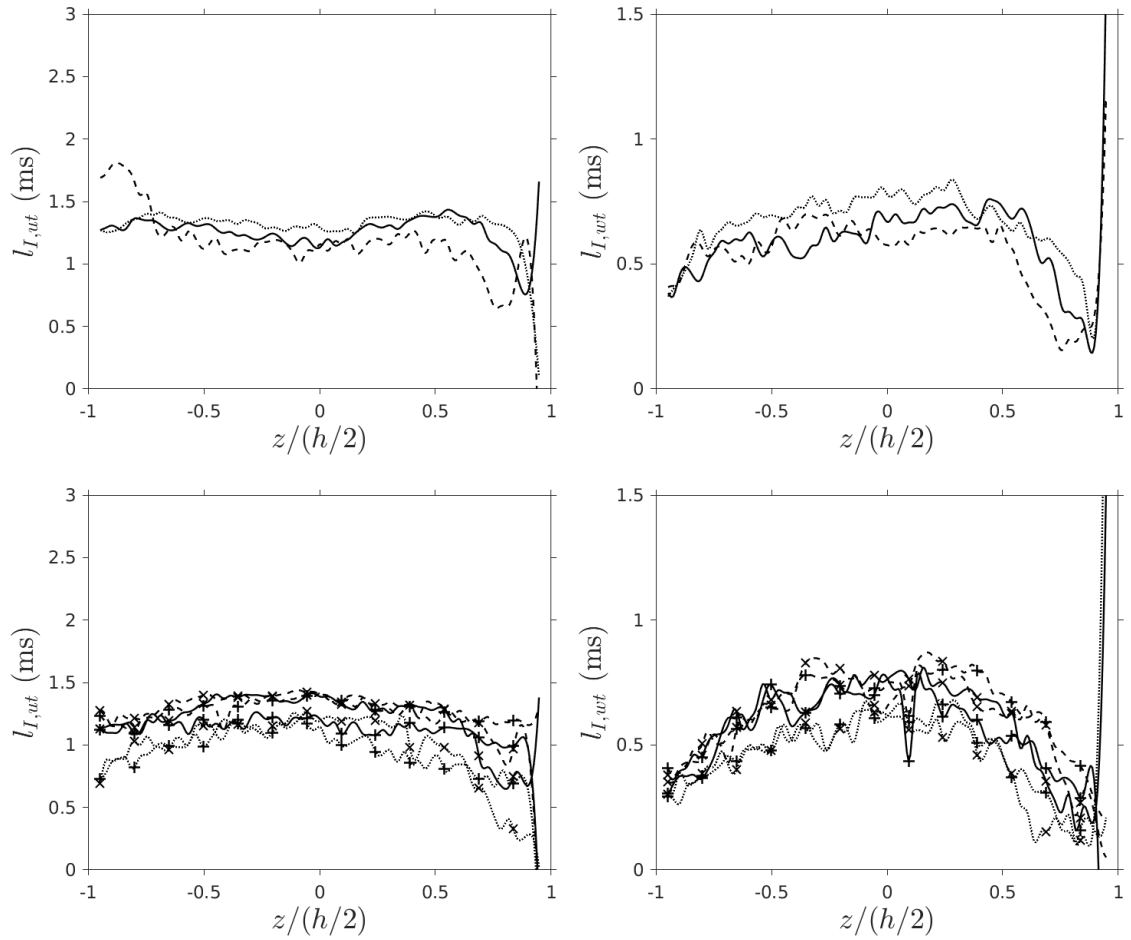
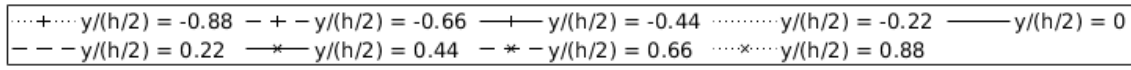
Produção do autor.

Figura 4.32 - Perfis transversais verticais das escalas de comprimento integral de  $u$  e  $v$  nas seções verticais da região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de:  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,69 \text{ mm}$ ,  $l_{I,v,\xi_1} = \pm 0,76 \text{ mm}$ . LDV: Incerteza média de  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 4,44 \text{ mm}$  e de  $l_{I,v,\xi_1} = \pm 0,91 \text{ mm}$ . Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



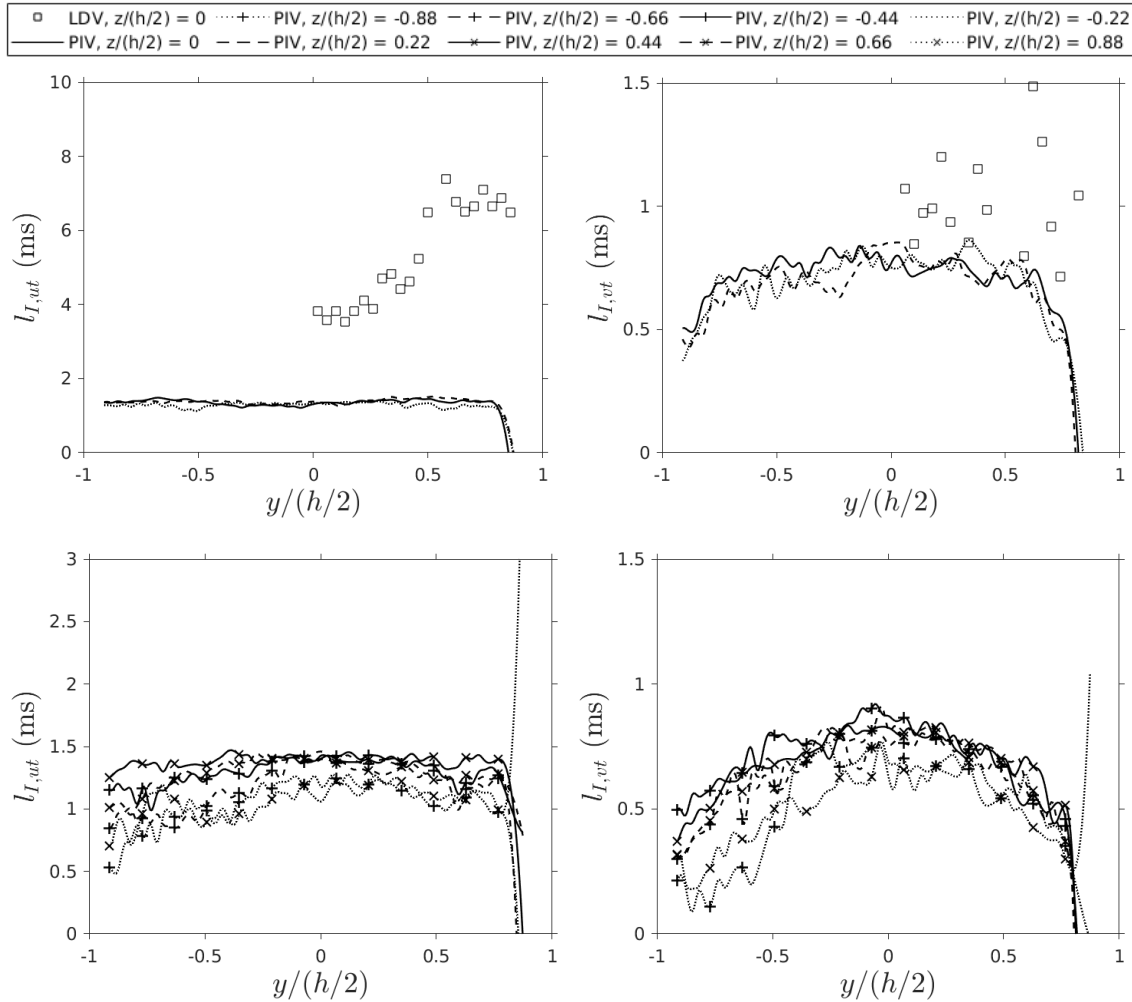
Produção do autor.

Figura 4.33 - perfis transversais horizontais da escala de tempo integral de  $u$  e  $w$  na região de entrada (seções horizontais). Incerteza média de:  $l_{I,ut} = \pm 0,08 \text{ ms}$ ,  $l_{I,wt} = \pm 0,09 \text{ ms}$ . Incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



Produção do autor.

Figura 4.34 - Perfis transversais verticais das escalas de tempo integral de  $u$  e  $v$  nas seções verticais da região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de:  $l_{I,ut} = \pm 0,08 \text{ ms}$ ,  $l_{I,vt} = \pm 0,08 \text{ ms}$ . LDV: Incerteza média de  $l_{I,ut} = \pm 0,53 \text{ ms}$  e de  $l_{I,vt} = \pm 0,11 \text{ ms}$ . Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



Produção do autor.

#### 4.9 Assimetria, curtose e funções densidade de probabilidade

São apresentados os perfis da assimetria e curtose das seções horizontais e verticais da região de entrada nas Figuras 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38. Além disso, no final desta seção, funções de densidade de probabilidade de  $u$ ,  $v$  e  $w$  de alguns pontos da região de entrada são apresentadas pelas Figuras 4.39 e 4.40. Somado a isso, foram colocados no canto superior esquerdo de cada gráfico das PDFs a sua respectiva curtose e assimetria. Para cada gráfico das PDFs das seções verticais, foi posto no canto superior direito o valor da curtose e da assimetria com LDV da mesma localidade

do PDF do gráfico. Em todas as PDFs, são apresentadas também as distribuições normais associadas aos valores médios das velocidades e com os desvios padrões delas.

Verificam-se grandes oscilações nos perfis da curtose nas seções horizontais e verticais, conforme observado nas Figuras 4.35 e 4.36. Parte destas oscilações estão localizadas próximas das paredes. Além destas, algumas oscilações menores se distribuem ao longo dos perfis. As seções horizontais e verticais com as maiores oscilações são aquelas que estão mais próximas das paredes. As maiores oscilações das seções horizontais estão localizadas em  $z/(h/2) \geq 0,5$ . Embora estes valores sejam muito altos, em geral, a curtose está na faixa de 1 a 4. Essas oscilações se devem à baixa resolução temporal do PIV. Além disso, os gradientes de velocidade próximos das paredes interferem na qualidade das medições com PIV.

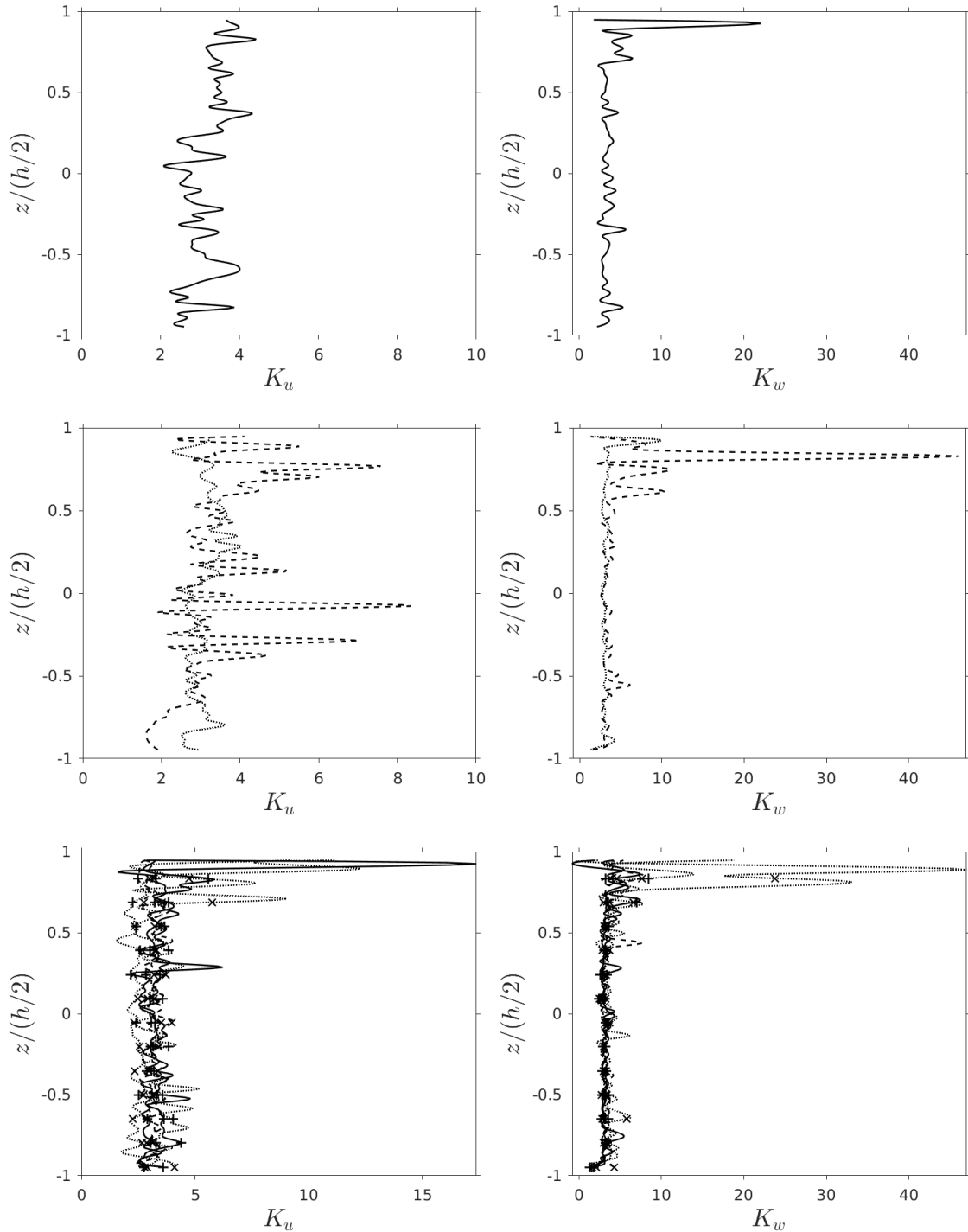
Oscilações podem ser observadas nos perfis da assimetria das flutuações das velocidades normal, transversal e longitudinal, os quais são apresentados pelas Figuras 4.37 e 4.38. Os valores do momento de terceira ordem normalizado giram em torno de zero, mostrando que as funções densidade de probabilidade das flutuações das velocidades tendem a ser simétricas. Somando ao fato da curtose das flutuações da velocidade girar em torno de 3, pode-se afirmar que as funções de densidade de probabilidade, na maior parte dos casos, tendem a ser uma distribuição normal. Sobre os valores da curtose e da assimetria obtidas pelo LDV, pode-se observar que não existem altas oscilações entre eles tal como foi observado nos valores de  $K$  e de  $S$  com PIV. Tal aspecto se deve à alta resolução temporal do LDV.

Analisando as PDFs, pode-se verificar que a maioria das medições das velocidades estão dentro da distribuição normal e os valores de  $K$  e de  $S$  não divergem muito dos valores encontrados na distribuição normal. Comparando os valores da assimetria e da curtose das PDFs com LDV e com PIV, não foram observadas diferenças significativas entre eles.



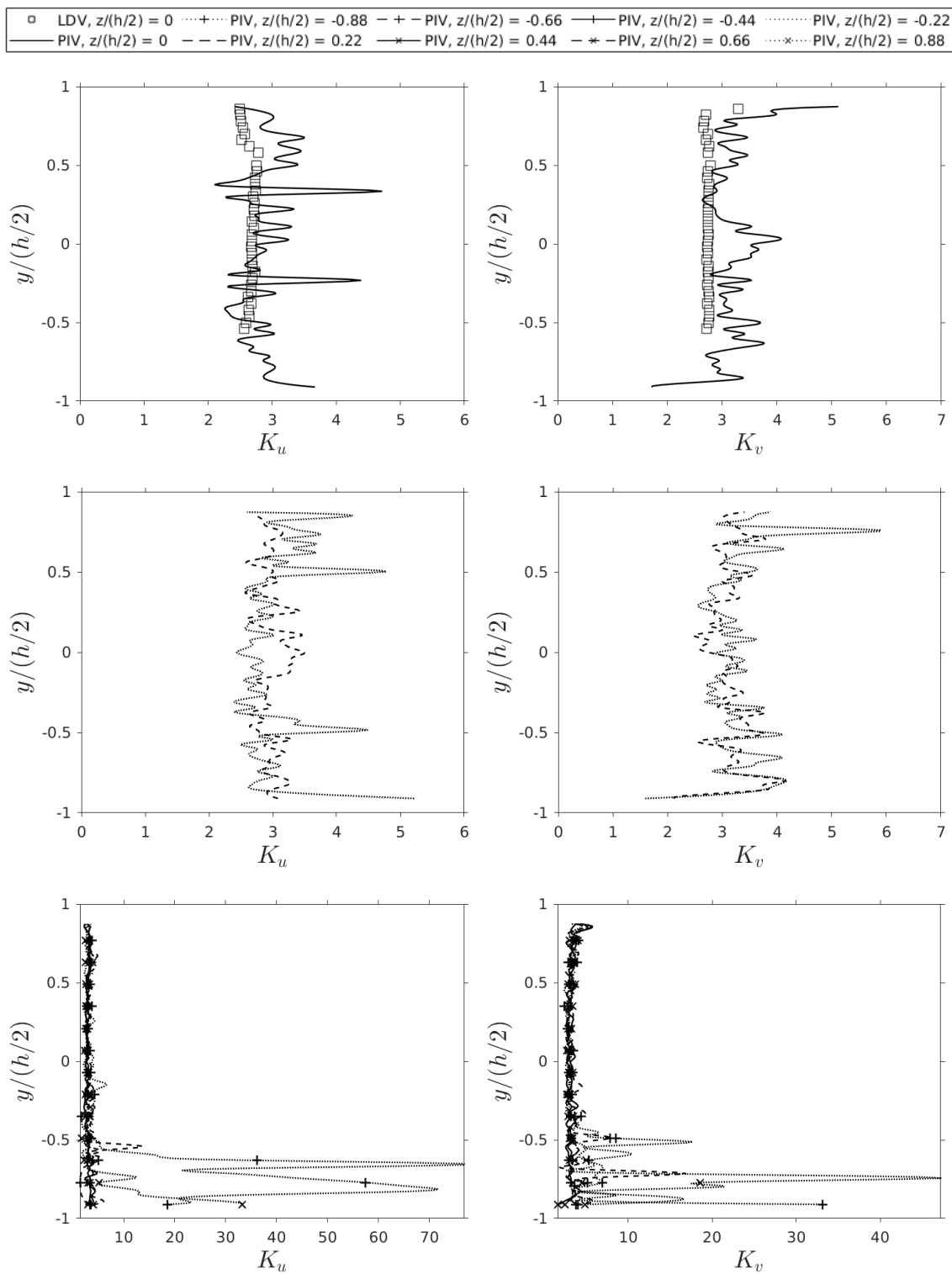
Figura 4.35 - perfis transversais horizontais da curtose das componentes longitudinal e transversal de velocidade  $u$  e  $w$  nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $K_u = \pm 1,84$  e de  $K_w = \pm 2,97$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .

.....+.....  $y/(h/2) = -0.88$     - + -  $y/(h/2) = -0.66$     — + —  $y/(h/2) = -0.44$     .....  $y/(h/2) = -0.22$     —  $y/(h/2) = 0$   
 - - -  $y/(h/2) = 0.22$     - \* -  $y/(h/2) = 0.44$     - \* -  $y/(h/2) = 0.66$     ..... \* .....  $y/(h/2) = 0.88$



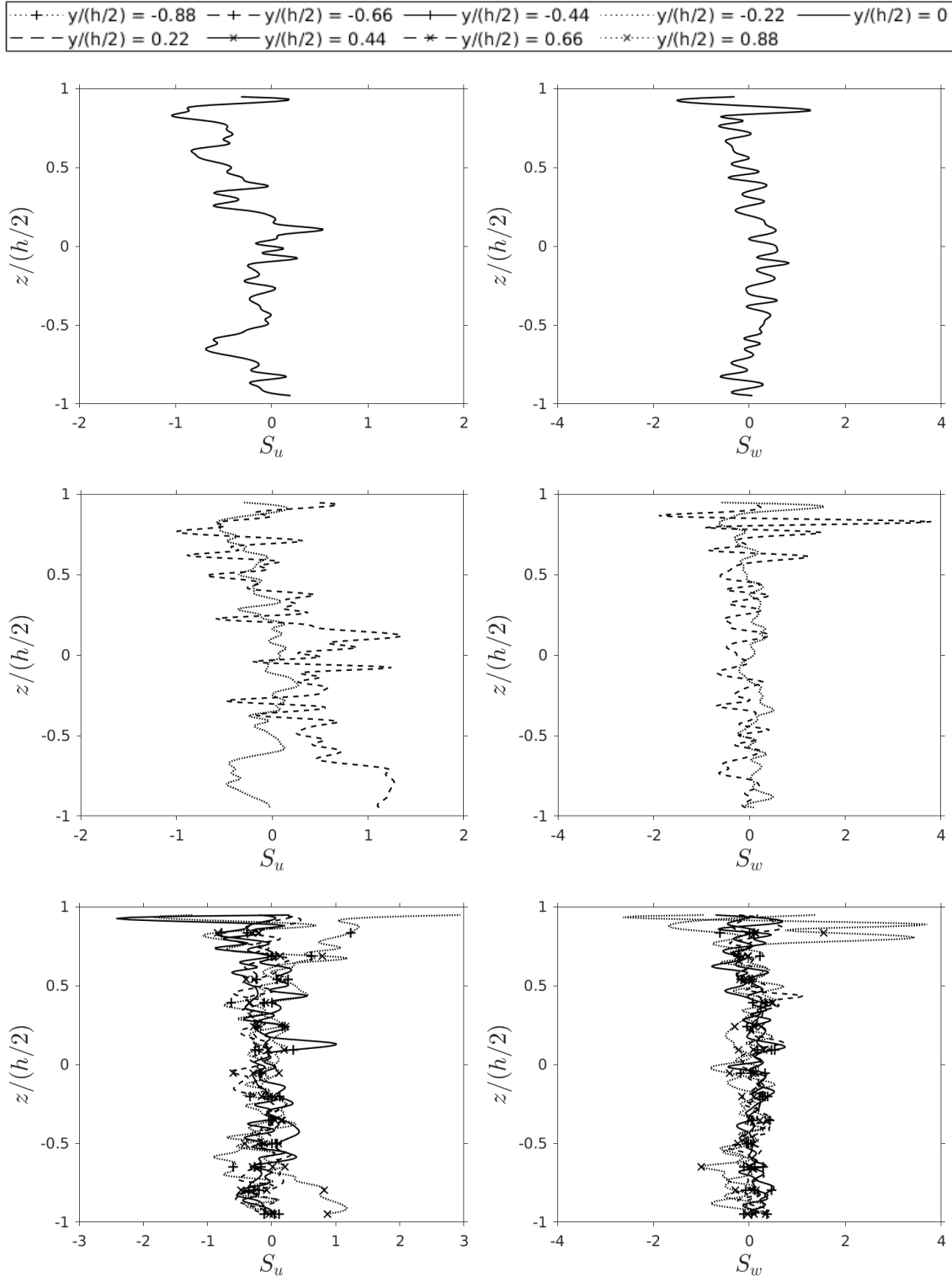
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.36 - Perfis transversais verticais da curtose das componentes longitudinal e transversal de velocidade  $u$  e  $v$  nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $K_u = \pm 3,65$  e de  $K_v = \pm 2,46$ . LDV: Incerteza média de  $K_u = \pm 0,03$  e de  $K_v = \pm 0,05$ . Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



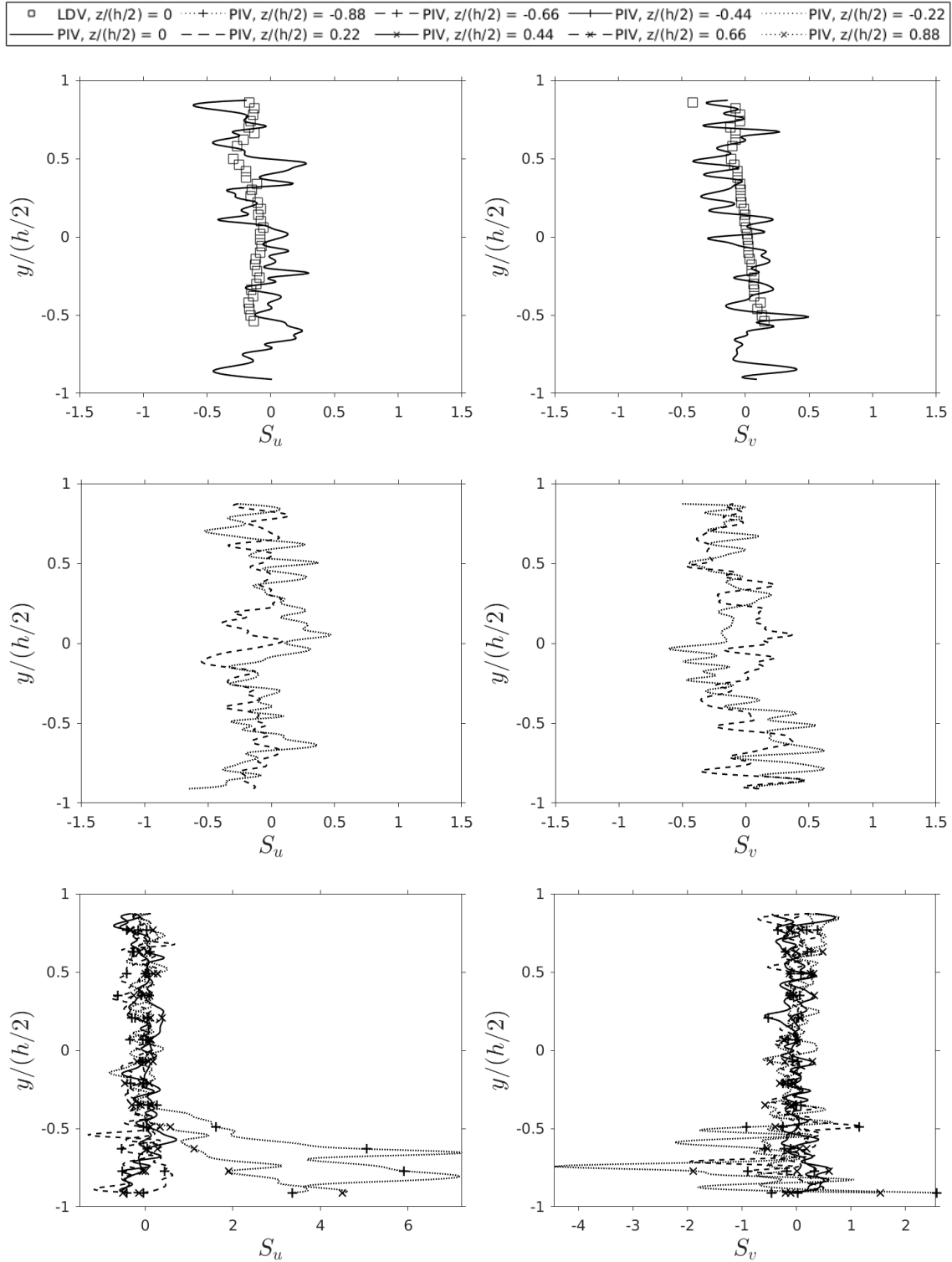
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.37 - perfis transversais horizontais da assimetria das componentes longitudinal e transversal de velocidade  $u$  e  $w$  nas seções horizontais na região de entrada. Incerteza média de  $S_u = \pm 0,35$  e de  $S_w = \pm 0,46$ , incerteza de  $z/(h/2) = \pm 0,01$ .



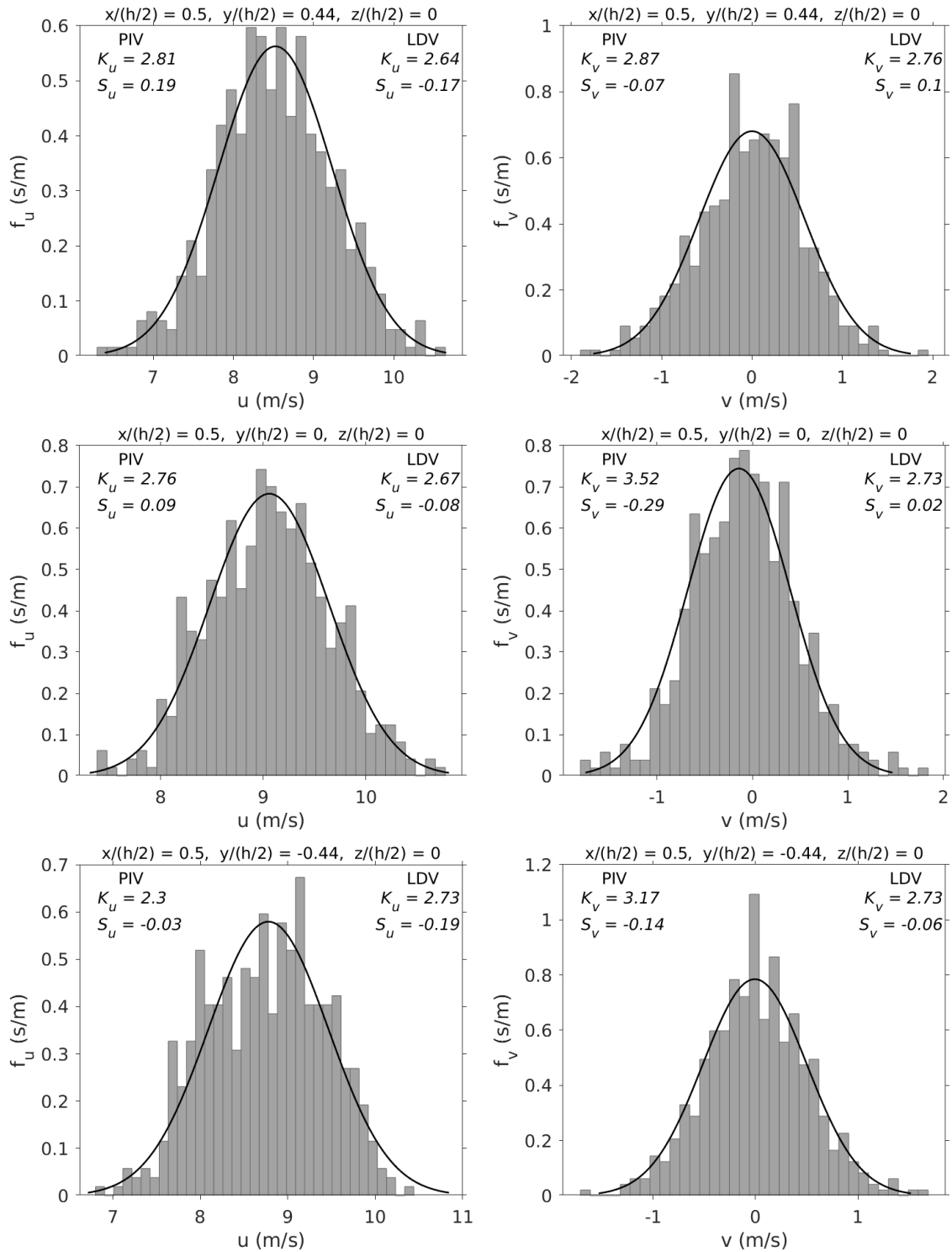
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.38 - Perfis transversais verticais da assimetria das componentes longitudinal e transversal de velocidade  $u$  e  $v$  nas seções verticais na região de entrada, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $S_u = \pm 0,51$  e de  $S_v = \pm 0,40$ . LDV: Incerteza média de  $S_u = \pm 0,01$  e de  $S_v = \pm 0,01$ . Incerteza de  $y/(h/2) = \pm 0,01$ .



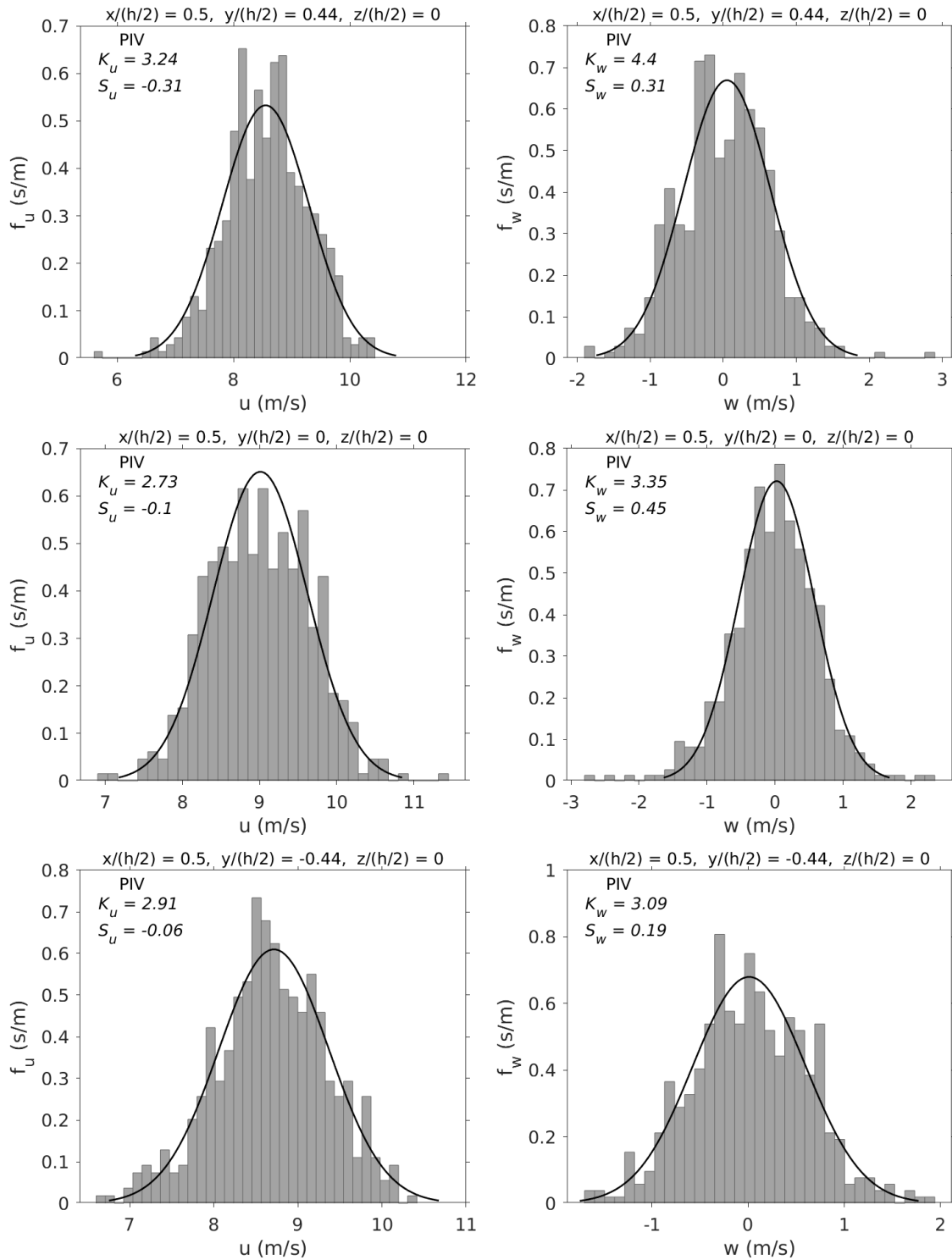
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.39 - Exemplos de histogramas de  $u$  e de  $v$  em determinados pontos da seção vertical  $z/(h/2) = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\sigma_u$  e  $\sigma_v$ , com os valores de  $K_u$ ,  $K_v$ ,  $S_u$  e  $S_v$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). Resolução máxima de  $u = 0,87 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $f_u = \pm 3 \%$  e de  $f_v = \pm 3 \%$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.40 - Exemplos de histogramas de  $u$  e de  $w$  em determinados pontos da seção vertical  $z/(h/2) = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$ ,  $\sigma_u$  e  $\sigma_w$ , com os valores de  $K_u$ ,  $K_w$ ,  $S_u$  e  $S_w$ , calculados a partir das medições com PIV. Resolução máxima de  $u = 0,13 \text{ m/s}$ , resolução máxima de  $w = 0,14 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $f_u = \pm 3 \%$  e de  $f_w = \pm 3 \%$ .



Fonte: Produção do autor.

#### 4.10 Conclusão das análises das características do escoamento inerte na região de entrada

Este capítulo tratou de investigar o comportamento do escoamento inerte turbulento na região de entrada a partir das medições com PIV no escopo do presente trabalho. As medições foram realizadas em diversas seções verticais e horizontais da região de entrada. As análises feitas dos diversos parâmetros caracterizadores concluíram que as características do escoamento são muito próximas de um escoamento turbulento plenamente desenvolvido, pois:

–A velocidade longitudinal média não varia na direção longitudinal. Além disso, nas proximidades das paredes, a velocidade longitudinal está dentro da sub-região logarítmica e da sub-região de velocidade deficitária.

–As velocidades normal e transversal médias são menores que a velocidade longitudinal média.

–Observou-se que a auto-correlação espacial longitudinal da flutuação longitudinal é maior que as flutuações normal e transversal.

–As escalas de comprimento associadas à velocidade longitudinal são maiores do que as escalas de comprimento associadas às velocidades normal e transversal.

–As flutuações médias da velocidade longitudinal são mais intensas do que as flutuações médias das velocidades normal e transversal.

Sobre os demais parâmetros caracterizadores, observou-se que as flutuações médias das velocidades, os tensores turbulentos de cisalhamento e a intensidade turbulenta mostram que a turbulência no escoamento tem baixa intensidade. Verificou-se também que o escoamento é aproximadamente bidimensional em 1/3 da região de entrada.

Além disso, verificou-se que os perfis transversais horizontais das seções mais afastadas das seções centrais têm os maiores erros e o maior número de valores anormais. Somado a isso, na maior parte dos casos há também alta incerteza e valores incomuns próximos às paredes. Estas particularidades dos perfis das seções em questão e da incerteza encontrada próxima às paredes se deve à forte presença de gradientes de velocidade. A deterioração da distribuição e do escoamento das partículas traçadoras, que são necessárias para a medição da técnica do PIV, é causada por estes gradientes de velocidade. Além disso, a qualidade das imagens do escoamento nas

fotografias do PIV próximas às paredes diminuem devido à alta intensidade do laser que é refletido pelas paredes.

Na comparação entre os resultados com LDV e com PIV verifica-se, com exceção das escalas de comprimentos, uma boa concordância entre os resultados com PIV com os do LDV. A diferença entre os dados das duas técnicas é muito pequena. Deve-se lembrar que as medidas do LDV são mais precisas, pois usa uma quantidade de amostragem por segundo bem maior do que o PIV. A discordância entre as escalas integrais obtidas por estas duas técnicas se deve ao fato da resolução temporal do PIV ser inferior ao do LDV.

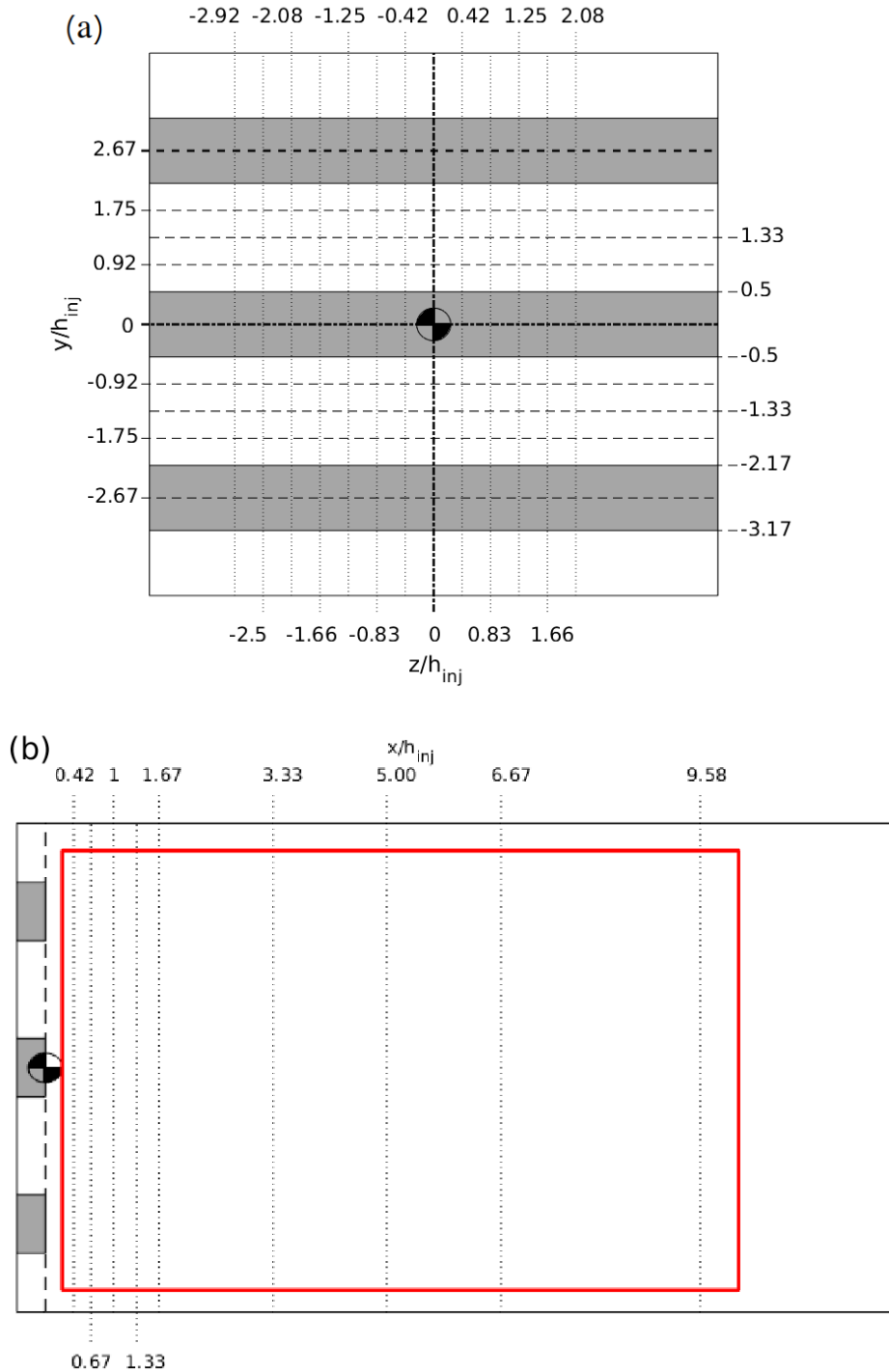


## 5 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO NA REGIÃO PRINCIPAL

Os resultados da investigação das características do escoamento inerte na região principal da câmara de combustão, isto é, na região a justante dos injetores planos, são apresentados e analisados neste capítulo. Parte dos resultados da presente investigação foi comparada com os resultados do trabalho de Trevisan (2018), que foram obtidos a partir das medições com LDV. Um detalhe a respeito do trabalho de Trevisan (2018), é que as medições com LDV não dispõem de resultados em torno do injetor inferior, mas apresentam mais resultados em torno do injetor superior. Antes de abordarmos os parâmetros caracterizadores a partir dos gráficos, faz necessário tratarmos de alguns detalhes sobre: as seções horizontais e verticais escolhidas e as limitações do PIV na região principal.

Foram escolhidos 12 seções horizontais (planos  $xz$ ), 13 seções verticais (planos  $xy$ ) para extrair informações quantitativas e qualitativas das propriedades do escoamento na região principal. As dimensões do campo de visualização e o fator de escala das seções horizontais são  $130,43 \times 97,06 \text{ mm}^2$  e  $94,8 \text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$ , e das seções verticais são  $121,74 \times 90,60 \text{ mm}^2$  e  $88,5 \text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$ . Estas são as mesmas das medições da região de entrada. Para a maioria dos parâmetros caracterizadores, foram extraídos 9 perfis transversais verticais, de cada seção vertical, e 9 perfis transversais horizontais de cada seção horizontal. As localizações dos perfis transversais verticais e horizontais e da área de visualização das seções verticais são apresentadas pela Figura 5.1. A área de visualização das seções verticais estão  $3 \text{ mm}$  de distância dos injetores e  $4,47 \text{ mm}$  de distância da parede inferior. Enquanto que a área de visualização das seções horizontais estão  $3 \text{ mm}$  de distância dos injetores e  $2,64 \text{ mm}$  de distância da parede lateral mais próxima do laser. As posições das seções e as posições dos perfis longitudinais de  $\bar{u}$  são também apresentados pela Figura 5.1. Os perfis longitudinais em questão são tratados na Seção 5.2 e estão localizados nas cotas  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = \pm 2,67$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ . As seções verticais e horizontais estão posicionadas em  $z/h_{inj} \in \{0; \pm 0,42; \pm 0,83; \pm 1,25; \pm 1,66; \pm 2,08; -2,5; -2,92\}$  e  $y/h_{inj} \in \{0; \pm 0,5; \pm 0,92; \pm 1,33; \pm 1,75; -2,17; -2,67; -3,17\}$ , respectivamente. As estações de  $x/h_{inj}$  dos perfis transversais verticais e horizontais estão localizados em  $x/h_{inj} \in \{0,42; 0,67; 1; 1,33; 1,67; 3,33; 5; 6,67; 9,58\}$ .

Figura 5.1 - (a) Localizações das seções horizontais, das seções verticais e das posições dos perfis longitudinais de  $\bar{u}$  na região principal (vista frontal). (b) Localizações das estações de  $x/h_{inj}$  dos perfis transversais verticais e horizontais e da área de visualização das seções verticais na região principal (vista lateral).



Fonte: Produção do autor.

Os parâmetros caracterizadores associados as velocidades foram adimensionalizados com relação à velocidade máxima,  $U_m$ . A velocidade máxima  $U_m$  é o maior valor de  $\bar{u}$  da estação mais próxima da região principal a comparar os resultados do PIV com LDV, isto é, a estação  $x/h_{inj} = 0,67$ . O valor de  $U_m$  equivale a  $16,61 \text{ m/s}$  no PIV, e  $14,05 \text{ m/s}$  no LDV. Foi escolhido  $U_m$  na adimensionalização para deixar a análise dos resultados com PIV e LDV mais conveniente. Na literatura encontra-se trabalhos que usaram  $U_m$  na adimensionalização nos parâmetros calculados a partir das medições com PIV e com LDV (CENEDESE et al., 1994; NEZU; NAKAYAMA, 1997; HYUN et al., 2003). A diferença entre as velocidades máximas com PIV e LDV é discutida na Seção 5.3. Os parâmetros caracterizadores na região principal no trabalho de Besson (2001) foram adimensionalizados pela velocidade de vazão. A velocidade de vazão é estimada a partir da vazão mássica total. Sanquer (1998) adimensionalizou com a velocidade média do escoamento a montante do obstáculo no eixo principal.

As coordenadas espaciais e as escalas de comprimento foram adimensionalizadas com relação a altura da base dos injetores  $h_{inj}$ . Como os vórtices de von Kármán são gerados por causa dos injetores, as estruturas turbulentas são proporcionais as dimensões deles, que são representadas por  $h_{inj}$ . A Tabela 5.1 abaixo mostra a velocidade de vazão assim como outras características do escoamento turbulento. O número de Reynolds  $Re$ , que também está presente na Tabela 5.1, equivale a  $U_m h / \nu$ .

Tabela 5.1 - Características do escoamento inerte turbulento na região principal da câmara de combustão.

$Q \text{ (g/s)}$	$U_m \text{ (m/s)}$	$h_{inj} \text{ (mm)}$	$T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\rho_{ar} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\nu_{ar} \text{ (mm}^2\text{/s)}$	$Re$
78	16,61	12	31,94	1,16	16,1*	103168

Incerteza média de  $Q = \pm 0,2 \text{ g/s}$ , incerteza de  $U_m = \pm 0,08 \text{ m/s}$ .

Incerteza média de  $T = \pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ , incerteza de  $\rho_{ar} = \pm 0,07 \text{ g/m}^3$ .

Incerteza de  $\nu = \pm 0,05 \text{ mm}^2\text{/s}$ , incerteza de  $Re = \pm 0,3 \%$ .

\*Baseado nos dados de Kundu e Cohen (2008).

Fonte: Produção do autor.

Com exceção do perfil na posição  $x/h_{inj} = 0,42$ , as distâncias em  $x/h_{inj}$  das localizações dos perfis transversais verticais e horizontais são as mesmas usadas pela pesquisa do Trevisan (2018). Não foi possível comparar o perfil na posição  $x/h_{inj} = 0,33$  do trabalho do Trevisan (2018), pois essa posição é muito próxima a borda do campo de visualização do PIV, e nesta região, a qualidade das medições com PIV é baixa. Uma

observação a ser acrescentada é a inexistência do perfil na posição  $x/h_{inj} = 11,25$ , tal como avaliada em Trevisan (2018), pois a dimensão e a posição do campo de visualização do PIV não permite a obtenção de dados nessa localidade da região principal.

Quanto às posições das seções, elas foram escolhidas segundo o critério da qualidade dos dados obtidos no PIV, os quais devem ser próximos do esperado, em boa parte da área de visualização. As seções nas quais os campos de velocidade instantânea evidenciam, quase na sua totalidade, resultados bem distintos do comportamento esperado, não foram incluídas. As que foram consideradas estão dentro de uma faixa de aceitação que é delimitada por dois fatores: os altos gradientes de velocidade próximos as paredes e a luz do laser refletida por estas e pelos injetores. Os altos gradientes de velocidade próximos as paredes existem devido ao cisalhamento do escoamento provocados por estas. Nestas regiões, as partículas traçadoras não acompanham o escoamento turbulento e nem se distribuem de modo a permitir que o PIV obtenha qualidade nas medições. Em relação aos reflexos do laser nas paredes, eles denigrem a qualidade das imagens do PIV. A parede inferior, onde foi posto um papel *Canson* preto, não refletiu laser a tal ponto de interferir na qualidade das medições, somente nas seções horizontais das cotas inferiores a  $y/h_{inj} = 1$ . O reflexo do laser nos injetores prejudicaram as medições com PIV. Por causa disso, a área de visualização foi afastada 3 *mm* dos injetores. Um outro problema gerado pelo reflexo do laser nas paredes está na baixa qualidade dos dados nas bordas do campo de visualização próximas às paredes. A área de visualização foi posicionada de forma a minimizar este problema.

Nas medições das seções horizontais, encontra-se um outro componente que compromete as medidas do PIV, que são as trincas do quartzo de umas das paredes laterais. Durante as medições das seções horizontais, foi removido o papel *Canson* preto sobre o quartzo trincado, pois este prejudicava a qualidade das imagens obtidas pela câmera CCD. No entanto, as trincas refletiam o luz do laser para determinadas áreas da região principal, obstruindo a qualidade dos dados. A incerteza de medição nestas áreas está mais inclinada ao erro sistemático do que o erro aleatório da medida. As medidas das seções horizontais próximas do injetor inferior e da seção horizontal da cota  $y/h_{inj} = 2,42$  foram fortemente prejudicadas por estes reflexos.

## 5.1 Velocidade instantânea

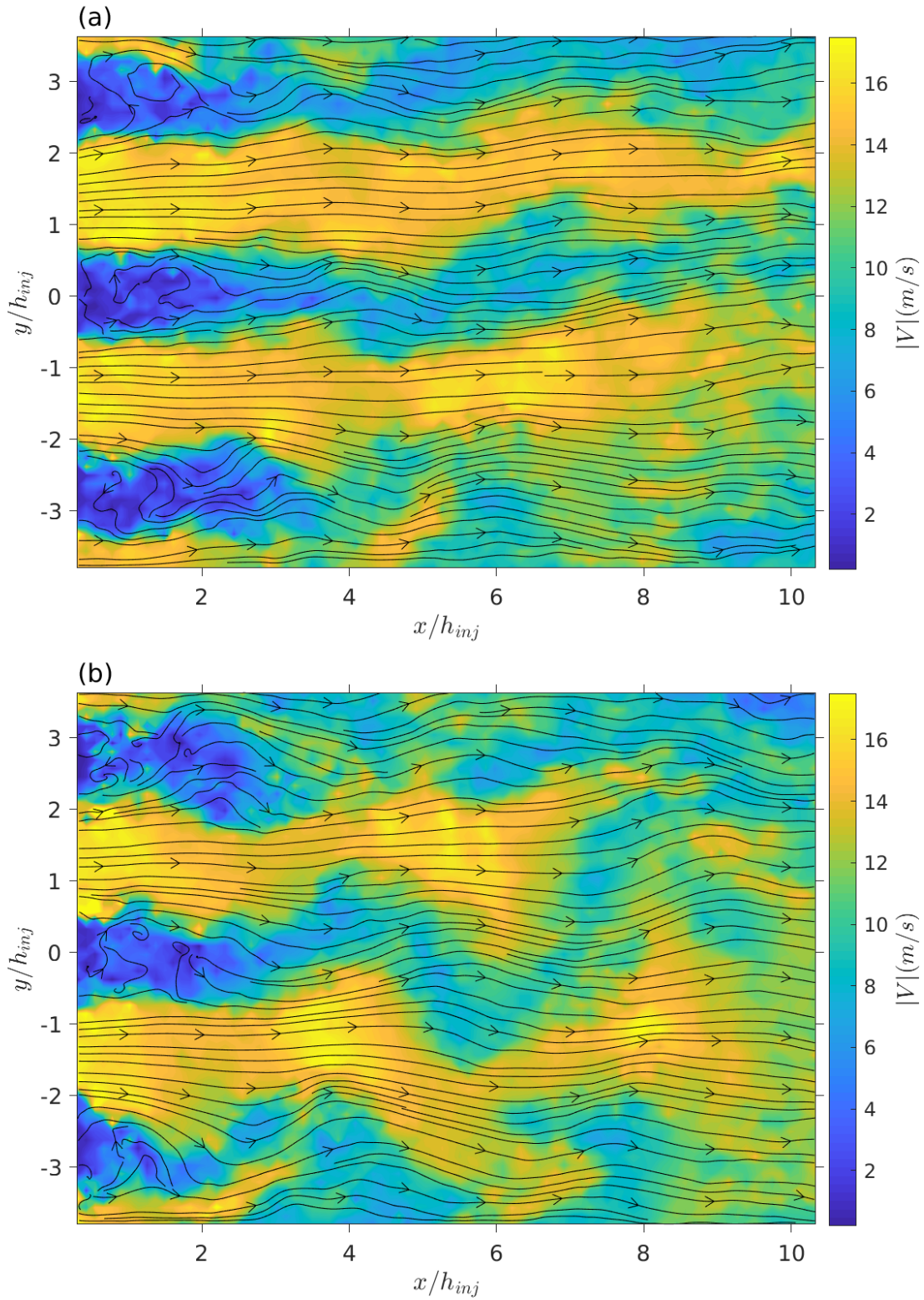
A presente seção trata da análise das características das velocidades normal e longitudinal instantâneas em dados instantâneos de tempo na região principal, ou, região a

jusante dos injetores. As linhas de corrente e os contornos da velocidade instantânea em dados instantes de tempo são apresentados nesta seção.

As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam as linhas de corrente e contornos da velocidade instantânea em dados instantes de tempo. Os gráficos em questão foram organizados em uma sequência com base no período de tempo do ciclo da formação de vórtices. Na investigação de Trevisan (2018), foi constatado que a frequência característica da emissão de vórtices para o escoamento inerte estudado é de  $669 \pm 4 \text{ Hz}$ . Dividindo este valor pela frequência de amostragem das medições com PIV, que é de  $5 \text{ Hz}$ , pode-se constatar que, no intervalo entre duas medidas, são realizadas 133,8 ciclos de produção de vórtices (133 ciclos completos e 1 ciclo incompleto). Se for somando o número total ciclos a cada medição, pode-se verificar que a parte decimal do número total de ciclos diminui a cada medição. Além disso, o número total de ciclos só se torna um número inteiro a cada 6 medições. Levando estes aspectos em consideração, foi selecionada uma série de 6 medições seguidas, que são apresentadas pelas figuras abaixo. Em cada figura são apresentados o instante de tempo,  $t$ , e a fase do ciclo de emissão de vórtices,  $\phi$ , nos quais o escoamento se encontra.

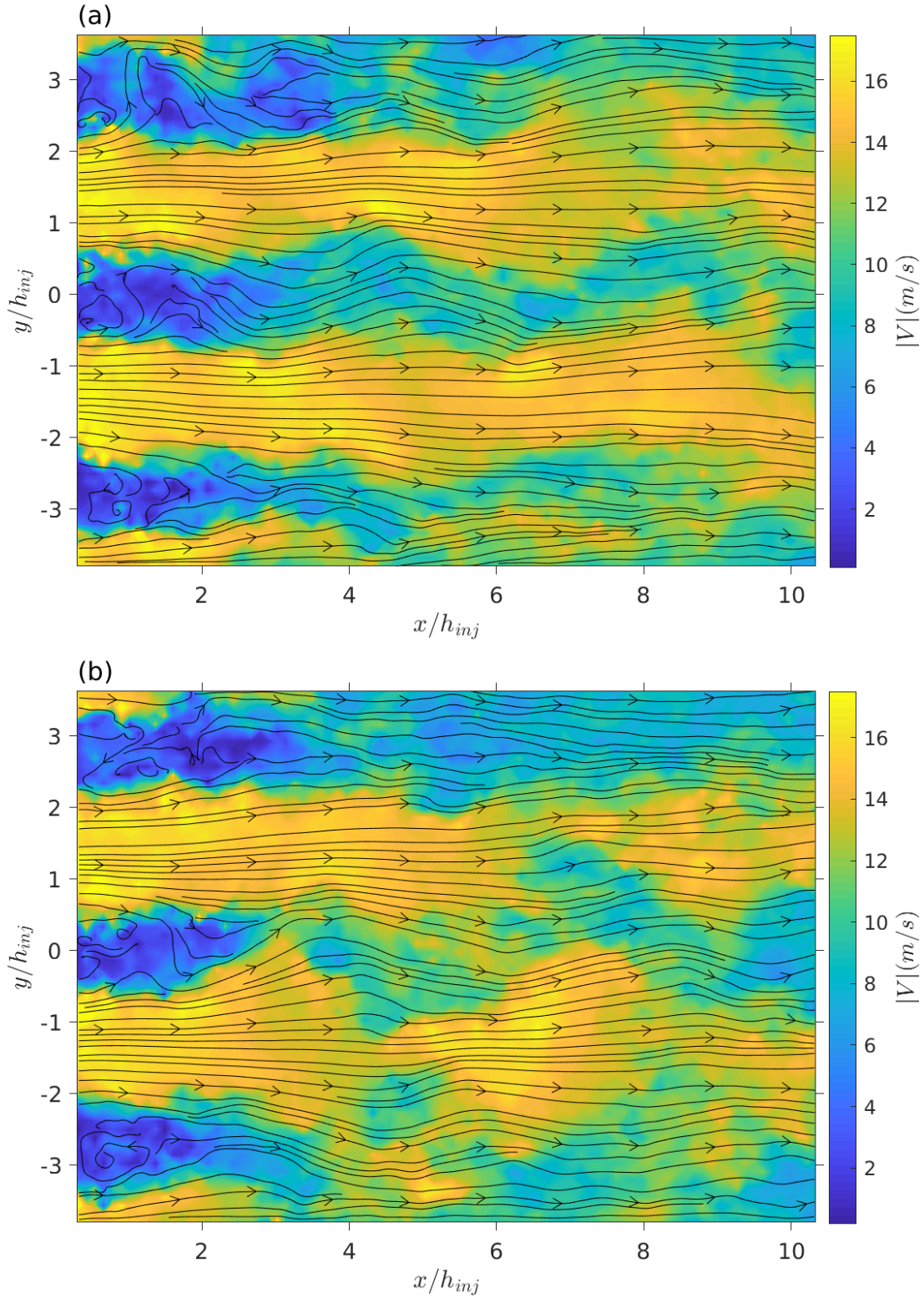
Nos contornos da velocidade instantânea em dados instantes de tempo apresentados pelas figuras abaixo, pode-se constatar três zonas de recirculação próximas as faces posteriores dos injetores planos. Verifica-se também três longas esteiras de velocidades de baixa intensidade com relação ao escoamento principal nas mesmas alturas dos injetores, que começam nas zonas de recirculação. Também pode-se observar que estas esteiras, que são estruturas das esteiras de von Kármán, se dissipam a jusante da região principal. Quanto as linhas de corrente, que estão sobrepostas aos contornos de velocidade instantânea, observa-se que elas formam vórtices nas zonas de recirculação. Esta característica das linhas de corrente mostram a formação de vórtices pelas camadas de cisalhamento presentes nas zonas de recirculação.

Figura 5.2 - Linhas de corrente do escoamento com os isocontornos da velocidade instantânea na região principal em (a)  $t = 0$  s e  $\phi = 2\pi$  rad, e em (b)  $t = 0,2$  s e  $\phi = 8\pi/5$  rad (seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ ). Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



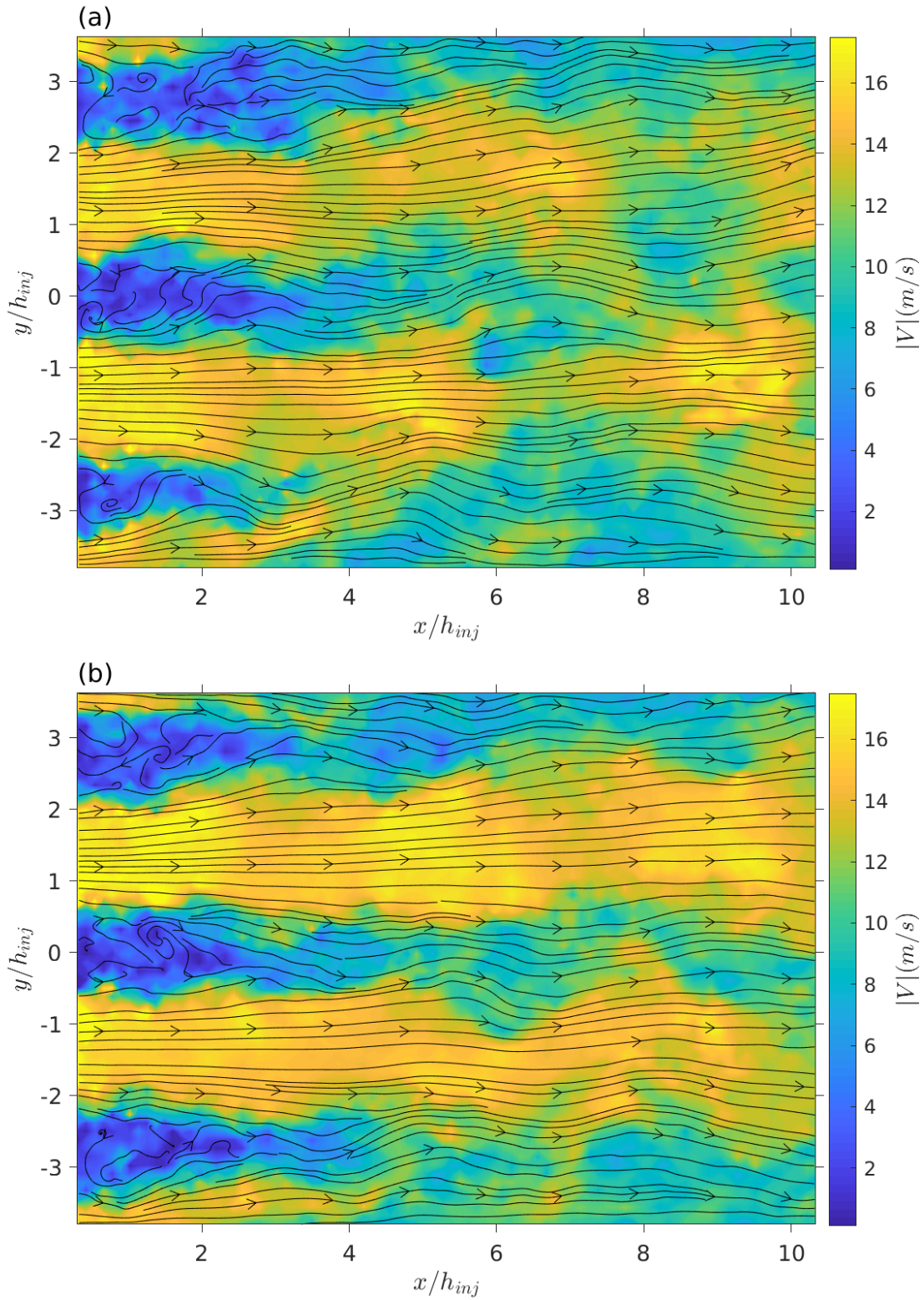
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.3 - Linhas de corrente do escoamento com os isocontornos da velocidade instantânea na região principal em (a)  $t = 0,4 s$  e  $\phi = 6\pi/5 rad$ , e em (b)  $t = 0,6 s$  e  $\phi = 4\pi/5 rad$  (seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ ). Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.4 - Linhas de corrente do escoamento com os isocontornos da velocidade instantânea na região principal em (a)  $t = 0,8 \text{ s}$  e  $\phi = 2\pi/5 \text{ rad}$ , e em (b)  $t = 1 \text{ s}$  e  $\phi = 0 \text{ rad}$  (seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ ). Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



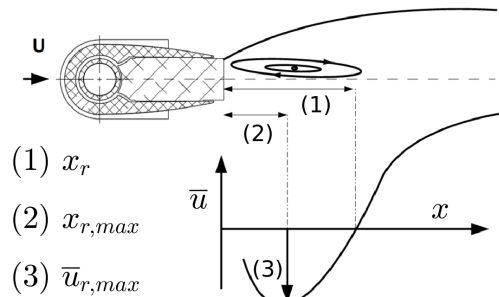
Fonte: Produção do autor.



## 5.2 Zona de recirculação média

Há três zonas de recirculação médias localizadas a jusante dos injetores, como pode ser observado nas linhas de corrente do escoamento na região principal em dados instantâneos de tempo. Zonas de recirculação são caracterizadas como regiões nas quais a velocidade longitudinal tem sentido contrário ao escoamento principal e baixa intensidade. Assim sendo, o comprimento da zona de recirculação média  $x_r$  equivale a distância entre a face posterior do injetor e o ponto na qual a velocidade longitudinal média é zero. Um outro parâmetro, também associado a zona de recirculação média, é a velocidade média de retorno máxima  $\bar{u}_{r,máx}$ , cujo valor é a velocidade longitudinal média mínima, localizada em  $x_{r,máx}$ . Os valores dos parâmetros em questão são calculados no centro das zonas de recirculação, isto é, nas cotas  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = \pm 2,67$ . As localizações de  $x_r$ ,  $x_{r,máx}$  e  $\bar{u}_{r,máx}$  na zona de recirculação e no perfil longitudinal de  $\bar{u}$  são apresentadas na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Localizações de  $x_r$ ,  $x_{r,máx}$  e  $\bar{u}_{r,máx}$  na zona de recirculação e no perfil longitudinal de  $\bar{u}$ .



Fonte: Adaptado de Trevisan (2018).

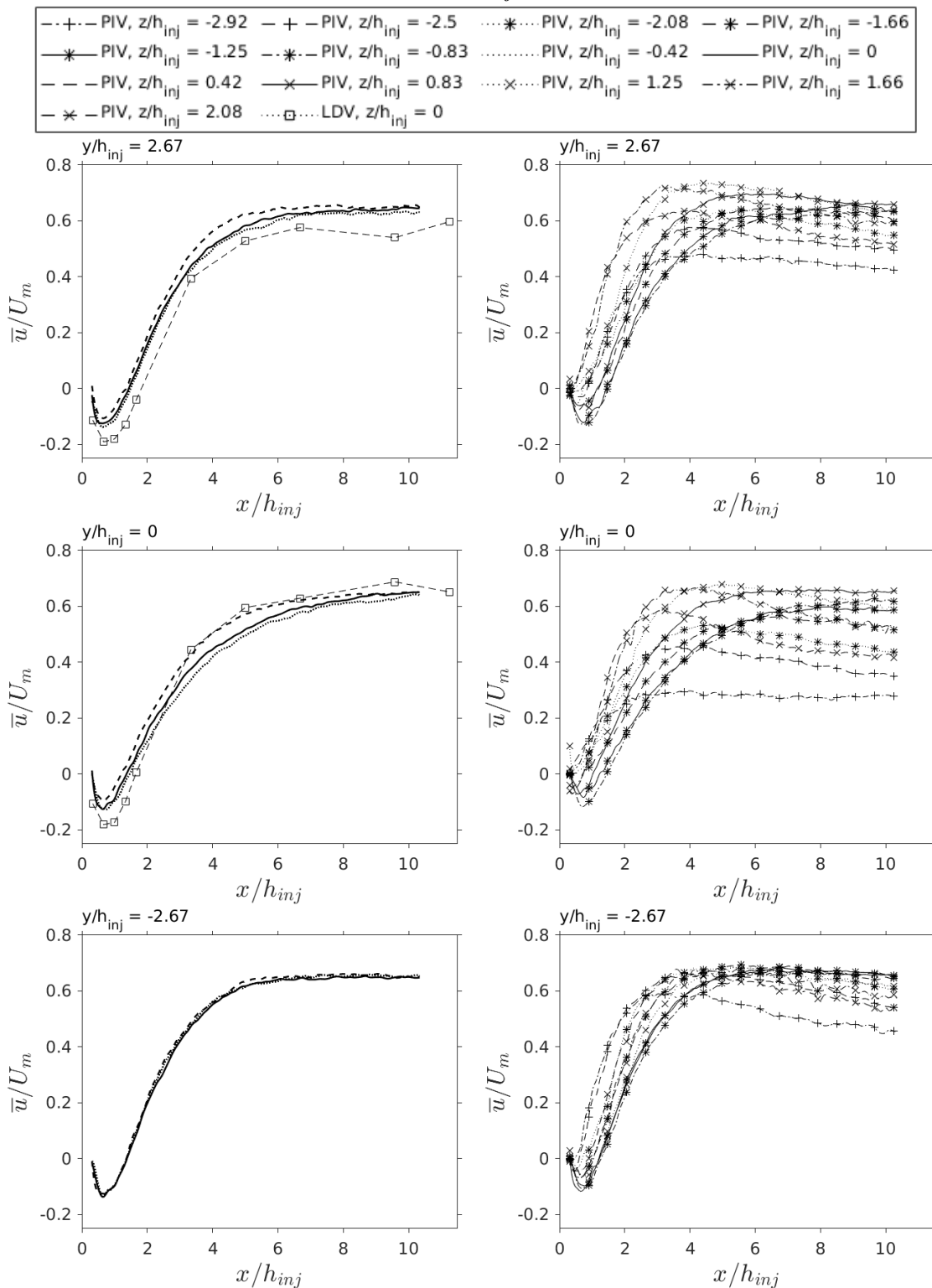
Todos estes parâmetros são estimados a partir dos perfis da evolução longitudinal de  $\bar{u}$  das seções verticais, que são apresentados pela Figura 5.6. Observa-se nestes perfis que a velocidade longitudinal média, em geral, torna-se mais homogênea no sentido longitudinal em  $x/h_{inj} \geq 4$ . Nesta faixa,  $\bar{u}$  atinge os maiores valores. Somado a isso, verifica-se que as zonas de recirculação estão em  $x/h_{inj} \in [0; 2]$ . Pode-se observar também que as zonas de recirculação são menores nas seções verticais mais distantes do centro da região principal.

Na comparação entre os perfis longitudinais de  $\bar{u}$ , pode-se observar que estes, de modo geral, são assimétricos nas cotas  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = \pm 2,67$ ,

e em  $z/h_{inj}$ . A assimetria é maior nos perfis longitudinais das profundidades  $z/h_{inj} \in \{\pm 0,83; \pm 1,25; \pm 1,66; \pm 2,08; -2,5; -2,92\}$  em relação aos perfis de  $z/h_{inj} \in \{0; \pm 0,42\}$ , principalmente nas cotas  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = 2,67$ . Verifica-se que a diferença entre os perfis longitudinais de  $\bar{u}$  é menor na cota  $y/h_{inj} = -2,67$  em relação aos perfis das demais cotas.

As evoluções longitudinais de  $\bar{u}$  obtido no trabalho de Trevisan (2018) com LDV também estão presentes na Figura 5.6 para serem comparadas com os resultados obtidos com PIV. Nota-se que os comprimentos das zonas de recirculação médias obtidos com PIV são menores do que aqueles que foram obtidos com LDV. Além disso, as zonas de recirculação médias com PIV são menos intensas com relação aquelas com LDV. Fora das zonas de recirculação, na cota  $y/h_{inj} = 2,67$ , os valores de  $\bar{u}$  são maiores no PIV que no LDV. O inverso é observado na cota  $y/h_{inj} = 0$ . Essas diferenças entre as duas técnicas se deve à alta resolução temporal do LDV e a capacidade deste de captar sinais de flutuações de velocidade de altas frequências que não são detectadas pelo PIV.

Figura 5.6 - Perfis da evolução longitudinal de  $\bar{u}$  na região principal, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,19 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza máxima de  $\bar{u} = \pm 0,05 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $x/h_{inj} = 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

As Tabelas 5.2 e 5.3 mostram os valores de  $x_r/h_{inj}$ ,  $x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj}$  e  $u_r/U_m$  das zonas de recirculação médias de cada seo vertical. Pode-se observar nestas tabelas que os comprimentos  $x_r$  e  $x_{r,m\acute{a}x}$  não têm, de modo geral, os mesmos valores nas cotas  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = \pm 2,67$ , e em  $z/h_{inj}$ . Somado a isso, os maiores valores de  $x_r$  estão localizados por volta de  $z/h_{inj} = -0,42$ , e não em  $z/h_{inj} = 0$ . Os maiores valores de  $x_{r,m\acute{a}x}$  estão localizados em: na cota  $y/h_{inj} = -2,67$ , em  $z/h_{inj} = \pm 1,25$ ; na cota  $y/h_{inj} = 0$ , em  $z/h_{inj} \in \{-1,25; -0,42\}$ ; na cota  $y/h_{inj} = 2,67$ , em  $z/h_{inj} \in \{-1,25; -0,83\}$ . Verifica-se que  $x_r/h_{inj}$ ,  $x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj}$  diminuem a medida que se afastam do centro da região principal, devido aos forte gradientes de velocidades próximas às paredes laterais da câmara de combustão. Quanto aos valores de  $x_r$  e de  $x_{r,m\acute{a}x}$  com LDV, sabe-se que  $x_r/h_{inj} \simeq 1,65$  e  $x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj} = 0,67$  em  $y/h_{inj} = 0$ , e em  $y/h_{inj} = 2,67$   $x_r/h_{inj} \simeq 1,82$  e  $x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj} = 0,67$ . Essas diferenas dos comprimentos mostram que o número de Reynolds local  diferente em cada injetor.

Tabela 5.2 - Comprimento da zona de recirculação média e a localização da velocidade média máxima de retorno na região principal. Incerteza de  $x_r/h_{inj} = \pm 0,04$ , de  $x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj} = \pm 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .

	$y/h_{inj} = -2,67$		$y/h_{inj} = 0$		$y/h_{inj} = 2,67$	
$z/h_{inj}$	$x_r/h_{inj}$	$x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj}$	$x_r/h_{inj}$	$x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj}$	$x_r/h_{inj}$	$x_{r,m\acute{a}x}/h_{inj}$
-2,92	0,45	0,37	0,31	0,31	0,66	0,43
-2,5	0,57	0,45	-	0,31	0,83	0,45
-2,08	0,69	0,48	0,31	0,31	0,72	0,54
-1,66	0,98	0,69	0,69	0,66	1,19	0,57
-1,25	1,19	0,78	1,21	0,75	1,42	0,75
-0,83	1,24	0,69	1,42	0,69	1,48	0,75
-0,42	1,36	0,66	1,45	0,75	1,48	0,63
0	1,36	0,66	1,36	0,63	1,42	0,63
0,42	1,33	0,69	1,19	0,66	1,33	0,66
0,83	1,21	0,66	1,01	0,57	1,13	0,89
1,25	1,19	0,75	0,48	0,45	0,00	0,45
1,66	1,01	0,60	0,72	0,40	0,40	0,37
2,08	0,86	0,54	0,72	0,40	0,43	0,31

Fonte: Produção do autor.

Sobre os valores  $u_{r,m\acute{a}x}$ , apresentados pela Tabela 5.3, verifica-se que os mesmos

aspectos de  $x_r$  e  $x_{r,máx}$  são observados em  $u_r$ . Os valores de  $\bar{u}_{r,máx}$  são assimétricos em  $y/h_{inj}$  e em  $z/h_{inj}$ . Verifica-se também que os valores de  $\bar{u}_{r,máx}$  com PIV são inferiores aos valores de  $\bar{u}_{r,máx}$  com LDV. Além disso a diferença entre os  $\bar{u}_{r,máx}$  das cotas  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = 2,67$  em  $z/h_{inj} = 0$  é de  $-0,02$  no PIV, enquanto que no LDV essa diferença é de  $0,1$ . Portanto o LDV consegue observar melhor a assimetria entre as zonas de recirculação em  $z/h_{inj} = 0$ .

Tabela 5.3 - Valores da velocidade média de retorno máxima das zonas de recirculação médias, obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018). PIV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,24$  m/s. LDV: Incerteza máxima de  $\bar{u} = \pm 0,05$  m/s. Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .

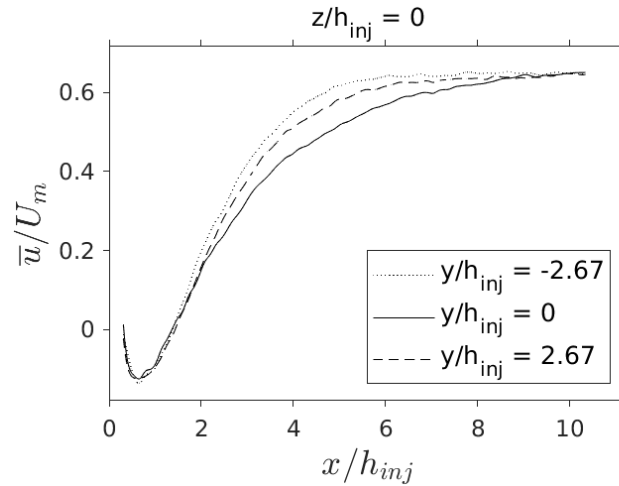
técnica	$z/h_{inj}$	$\bar{u}_{r,máx}/U_m \times 10^{-1}$		
		$y/h_{inj} = -2,67$	$y/h_{inj} = 0$	$y/h_{inj} = 2,67$
LDV	0	-	-1,81	-1,91
PIV	-2,92	-0,07	-0,03	-0,11
	-2,5	-0,46	0,04	-0,35
	-2,08	-0,35	-0,01	-0,54
	-1,66	-0,66	-0,06	-0,75
	-1,25	-0,96	-0,83	-1,22
	-0,83	-1,06	-1,17	-1,27
	-0,42	-1,35	-1,26	-1,38
	0	-1,37	-1,26	-1,24
	0,42	-1,26	-0,97	-1,06
	0,83	-1,17	-0,71	-0,68
	1,25	-0,63	-0,05	0,00
	1,66	-0,68	-0,46	-0,03
2,08	-0,44	-0,71	-0,20	

Fonte: Produção do autor,

A Figura 5.7 compara os perfis da evolução longitudinal de  $\bar{u}$  da seção vertical central em três cotas em  $z/h_{inj} = 0$ . Observa-se nos perfis longitudinais que  $\bar{u}$  têm pouca diferença entre eles nas zonas de recirculação e em  $x/h_{inj} \geq 8$ . Pode-se constatar também que em  $x/h_{inj} \in [2; 8]$  os valores de  $\bar{u}$  são superiores em  $y/h_{inj} = \pm 2,67$  em relação aos valores de  $\bar{u}$  em  $y/h_{inj} = 0$ . Isso se deve ao fato que as esteiras dos injetores superior e inferior são curvas, pois o escoamento próximo das paredes tem velocidade menor com relação ao escoamento principal no centro da região principal. Além disso, há o efeito de amortecimento de  $v$  pelas paredes, isto é,  $v = 0$

nas superfícies destas. No interior das esteiras, a velocidade longitudinal média é menor em relação ao escoamento principal.

Figura 5.7 - Perfis longitudinais da velocidade média de  $u$  da seção vertical central na região principal. Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,23 \text{ m/s}$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

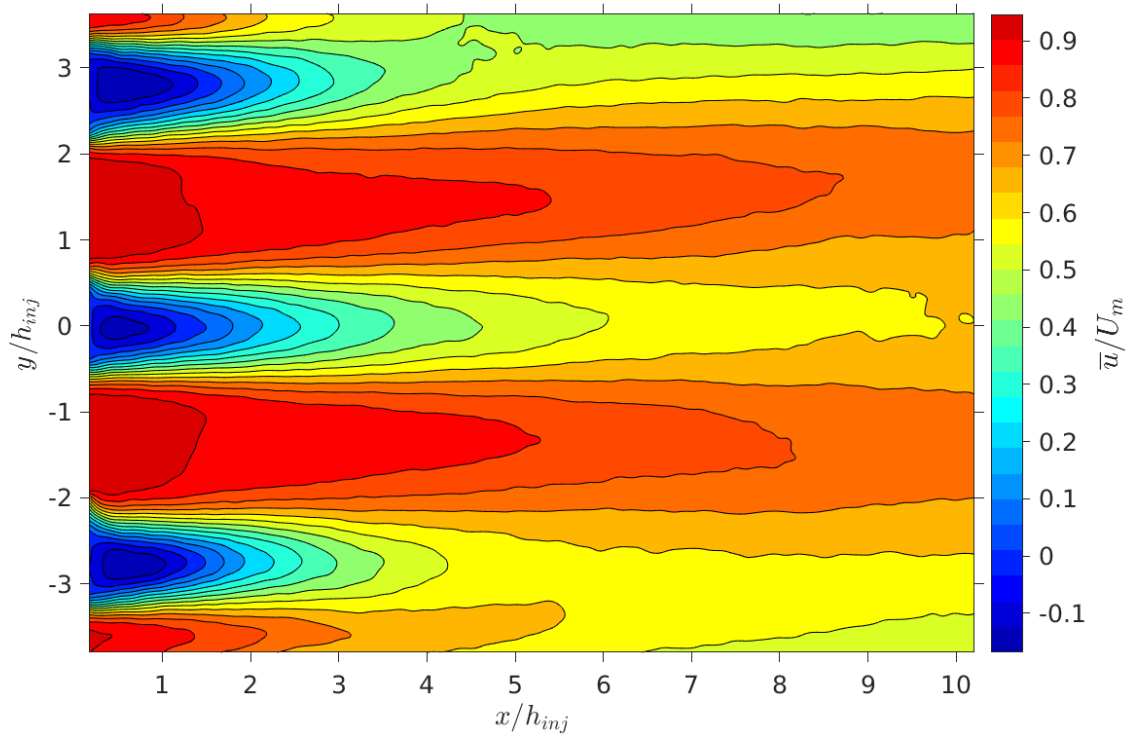
### 5.3 Componentes de velocidade média

Nesta seção serão analisadas as velocidades longitudinal, normal e transversal médias na região principal da câmara de combustão. Os isocontornos das velocidades longitudinal média  $\bar{u}$  e da velocidade normal média  $\bar{v}$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  são apresentados pelas Figuras 5.8 e 5.9. Além disso, os perfis transversais verticais e horizontais de  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$ , das seções horizontais e verticais para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  são apresentados da Figura 5.10 até a Figura 5.17.

Nos isocontornos de  $\bar{u}$ , apresentados pela Figura 5.8, verifica-se que a velocidade longitudinal média atinge seus valores maiores no plano médio entre injetores. Verifica-se três zonas de recirculação próximas das faces posteriores dos injetores. Pode-se constatar também que  $\bar{u}$  se torna mais homogêneo e menos intenso ao longo de  $x/h_{inj}$ . Além disso, verifica-se que as esteiras, que são caracterizadas por regiões de baixa velocidade com relação ao escoamento principal, não são idênticas. Observa-se que as esteiras que estão mais próximas das paredes têm curvatura divergente ao centro da região principal.

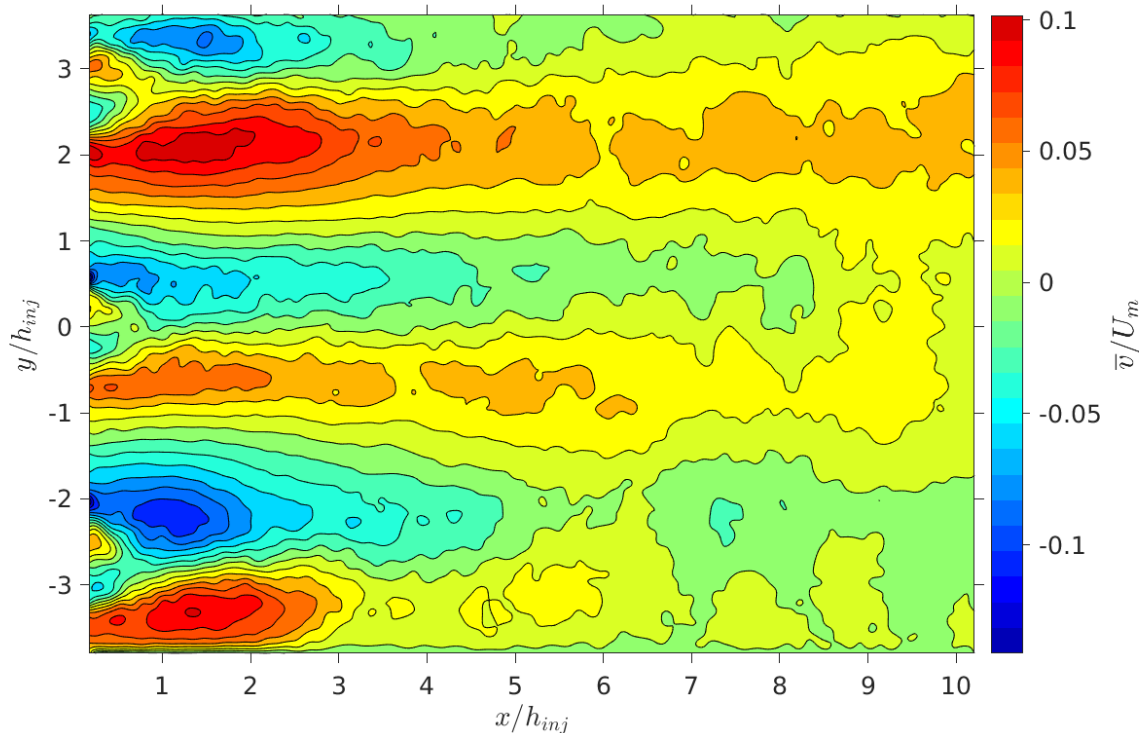
Nos isocontornos de  $\bar{v}$ , presentes na Figura 5.9, verifica-se que o escoamento turbulento tende a ter simetria nos planos horizontais localizados nos centros dos injetores nas zonas de recirculação, porém com sinais contrários. Observa-se também em  $x/h_{inj} \leq 2$  e em  $-2 \leq y/h_{inj} \leq 2$ ,  $\bar{v}$  é bastante intensa e mais assimétrica em relação aos planos horizontais dos centros dos injetores. Isso se deve ao fato de que, na entrada da região principal, o escoamento próximo das paredes possui velocidades menores com relação as velocidades encontradas nas regiões centrais. Isso ocorre devido à distribuição das velocidades do escoamento na região de entrada, que é a mesma do escoamento turbulento plenamente desenvolvido, conforme analisado na Seção 4.2. Essa diferença entre as velocidades altera as geometrias das zonas de recirculação próximas das paredes, e, em consequência disso, o movimento normal do escoamento é mais intenso em um dos lados das zonas de recirculação. Somado a isso, as geometrias das esteiras também são afetadas, conforme a análise dos isocontornos de  $\bar{u}$ .

Figura 5.8 - Isocontornos da velocidade longitudinal média  $\bar{u}$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,17$  m/s. Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.9 - Isocontornos da velocidade normal média  $\bar{v}$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Incerteza média de  $\bar{v} = \pm 0,16$  m/s. Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Sobre a velocidade longitudinal, que são apresentadas pelos perfis transversais verticais e horizontais das Figuras 5.10, 5.11, 5.14 e 5.15, verifica-se que os maiores valores de  $\bar{u}$  estão na mesma altura do escoamento principal. Verifica-se também que nos perfis das seções horizontais e verticais aparecem três zonas de recirculação a jusante dos injetores. No sentido longitudinal, o escoamento tende a adquirir características próximas as do escoamento turbulento plenamente desenvolvido.

Verifica-se que os perfis das seções verticais  $z/h_{inj} = \pm 0,42$ , apresentados nas Figuras 5.10 e 5.12, na maior parte dos casos, são bastante similares. Somente há pequenas diferenças entre eles onde  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  atingem seus menores ou maiores valores. Nas Figuras 5.11 e 5.13 verifica-se que os perfis de  $\bar{u}$  e de  $\bar{v}$  das seções verticais das posições  $z/h_{inj} \in \{-2,92; -2,5; 1,66; 2,08\}$ , isto é, os perfis das seções verticais mais distantes do centro do canal, são os que mais divergem dos demais perfis das outras seções verticais. Essa diferença é mais acentuada onde  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  atingem seus menores e maiores valores em  $x/h_{inj} \leq 1,67$ . A partir da estação  $x/h_{inj} = 3,33$ , as



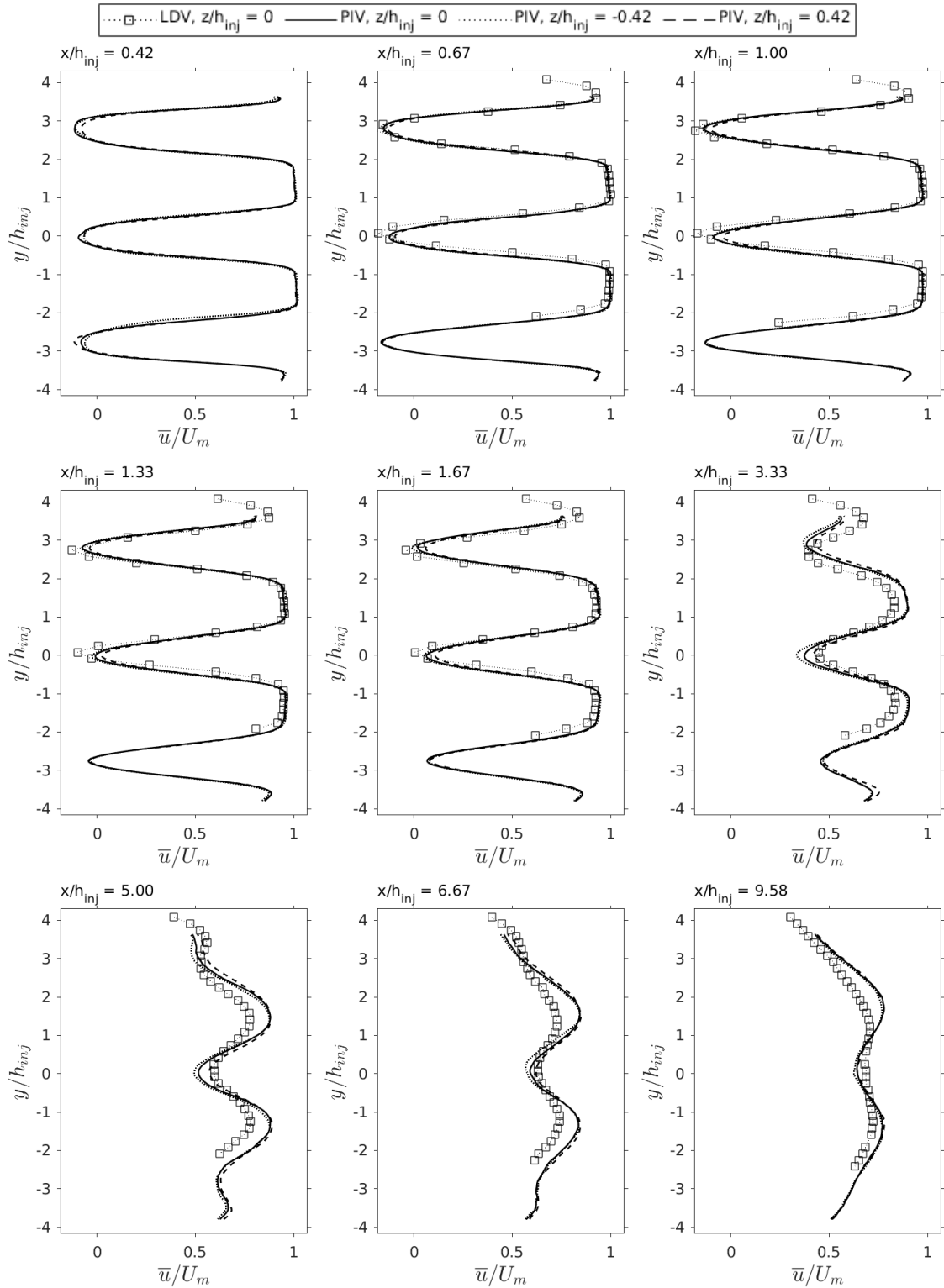
discrepâncias dos perfis de  $\bar{u}$  das seções verticais mais distantes com as demais seções verticais ficam mais acentuadas em boa parte de  $y/h_{inj}$ . No entanto, tal aspecto não é observado nos perfis de  $\bar{v}$  das seções verticais mais distantes. A partir da estação  $x/h_{inj} = 3,33$ , a diferença entre os perfis de  $\bar{v}$  das seções verticais mais distantes com os perfis das demais seções verticais tende a diminuir. Essas diferenças entre as seções se devem aos intensos gradientes de velocidade nas zonas de recirculação e nas regiões próximas das paredes. Esses gradientes de velocidade são gerados pelas camadas de cisalhamento intenso nas bordas das zonas de recirculação e pelo cisalhamento do escoamento em atrito com as paredes.

Os perfis de  $\bar{v}$ , apresentados pelas nas Figuras 5.12 e 5.13, mostram que  $\bar{v}$  é simétrico com relação aos planos horizontais dos centros dos injetores mas com sinais contrários. Tal característica é mantida ao longo do eixo  $x$  mas a intensidade de  $\bar{v}$  diminui gradativamente.

Comparando os resultados das velocidades médias do PIV com os do LDV, que são apresentados pelas Figuras 5.10 e 5.12, pode-se observar que há diferenças de  $\bar{u}$  nas zonas de recirculação das duas técnicas. A partir de  $x/h_{inj} = 3,33$  a diferença em  $\bar{u}$  nos valores máximos e mínimos entre as duas técnicas aumenta. Nos perfis transversais verticais de  $\bar{v}$ , verifica-se discordâncias entre as técnicas nos valores máximos e mínimos, principalmente em  $y/h_{inj} \in [-2,5; 1]$ . As diferenças aumentam no sentido longitudinal a partir de  $x/h_{inj} = 0,67$  e atingem o pico em  $x/h_{inj} = 1,67$ . Em  $x/h_{inj} \geq 1,67$  as diferenças entre os resultados das duas técnicas diminuem. Observa-se também que a diferença relativa em  $\bar{v}$  entre as técnicas é muito maior que em  $\bar{u}$ .

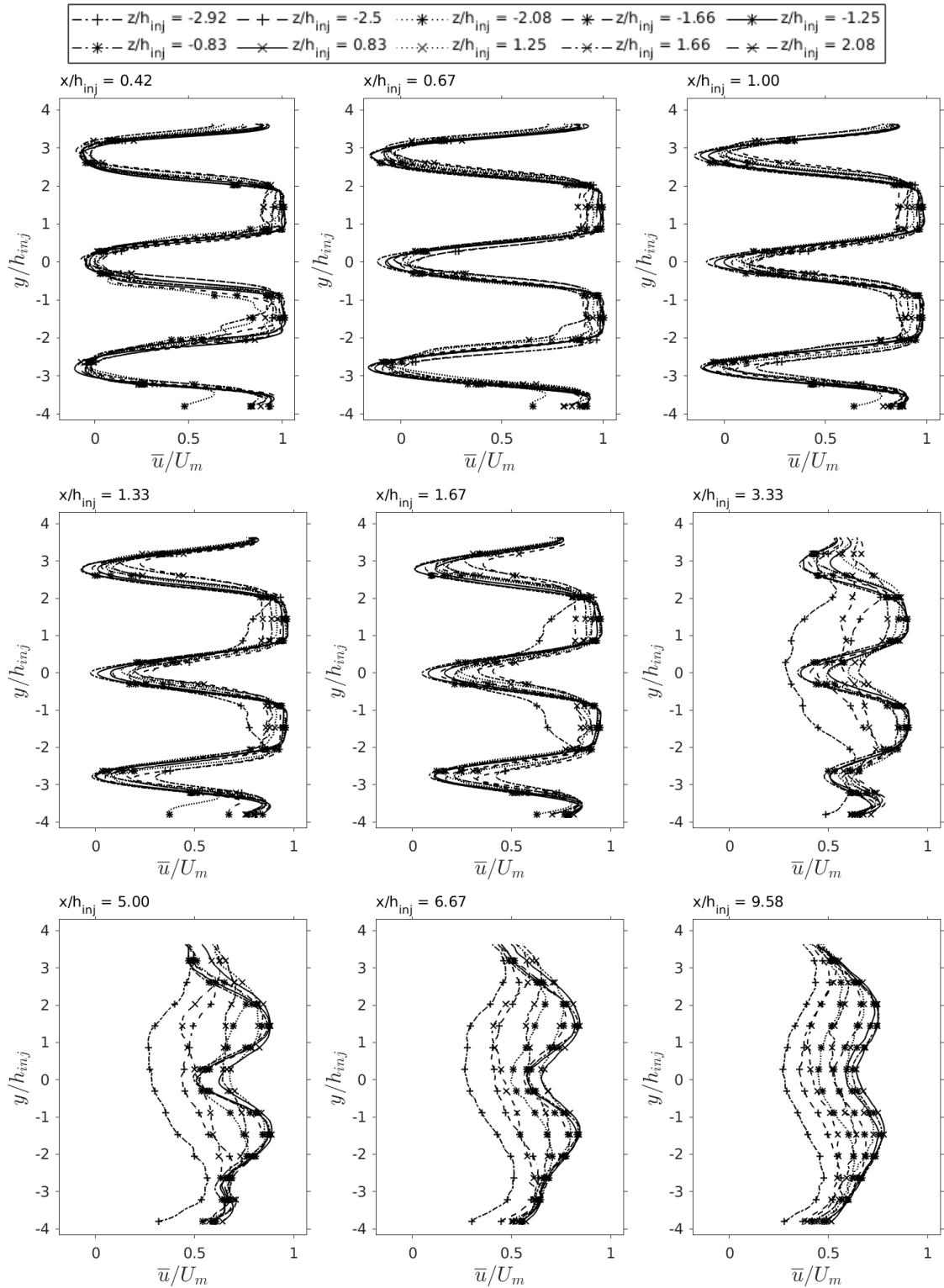
Essas diferenças entre as técnicas se deve a alta resolução temporal e a capacidade do LDV de medir flutuações de altas frequências, conforme observado na Seção 5.2. Devido a isso, os dados nas zonas de recirculação e os valores de  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  são mais precisos e detalhados no LDV. O PIV, diferente do LDV, não tem alta resolução temporal e a capacidade de detectar flutuações de velocidade pequenas. Por causa disso, o PIV acaba perdendo informações nas medições das velocidades instantâneas. Esse contraste das características das duas técnicas afetam também os valores máximos de  $\bar{u}$ , que acabam sendo maiores no PIV que no LDV.

Figura 5.10 - Perfis transversais verticais de  $\bar{u}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $\bar{u} = 0,19 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de  $\bar{u} = 0,02 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



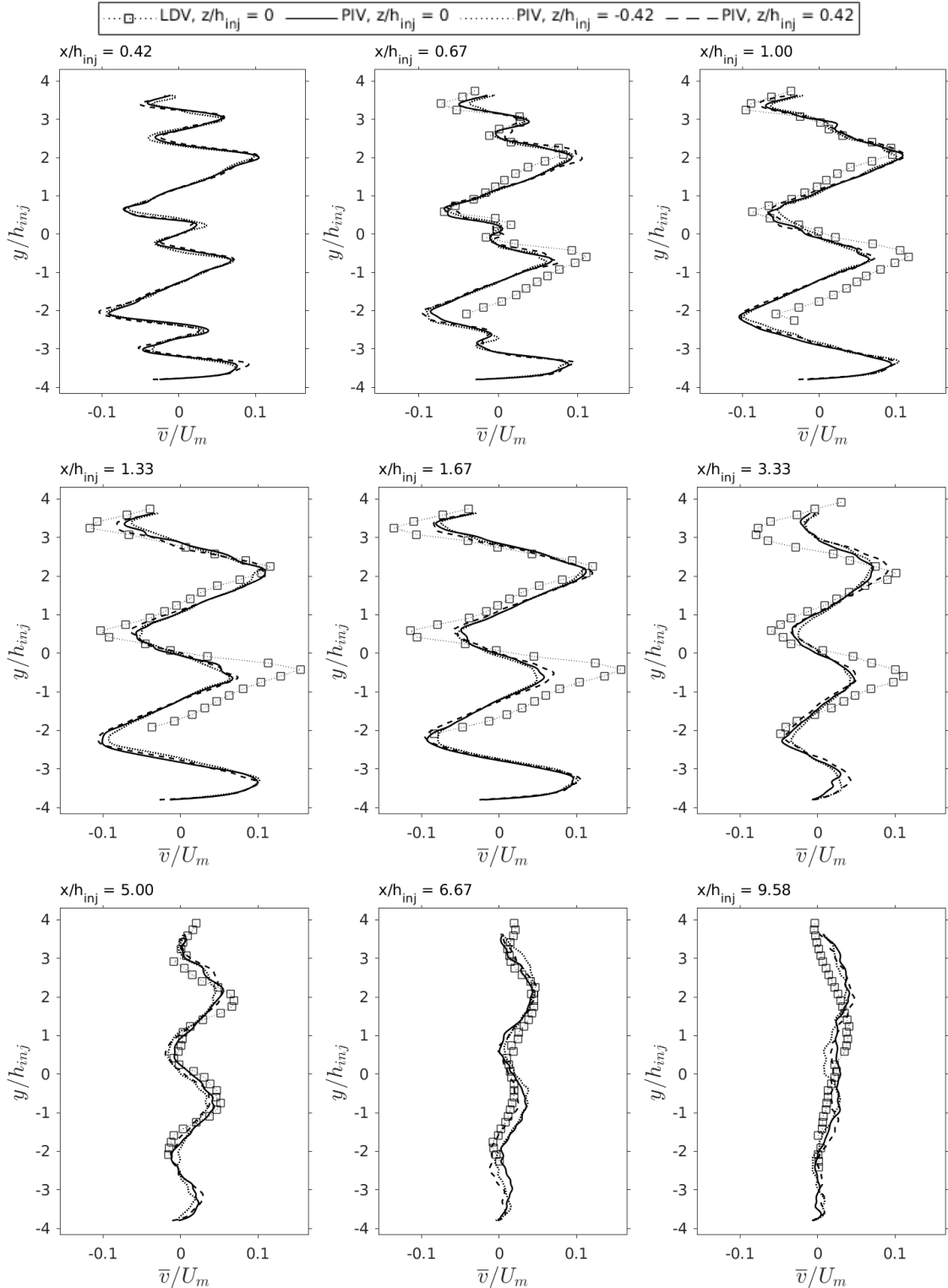
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.11 - Perfis transversais verticais da velocidade média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $\bar{u} = 0,19 \text{ m/s}$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



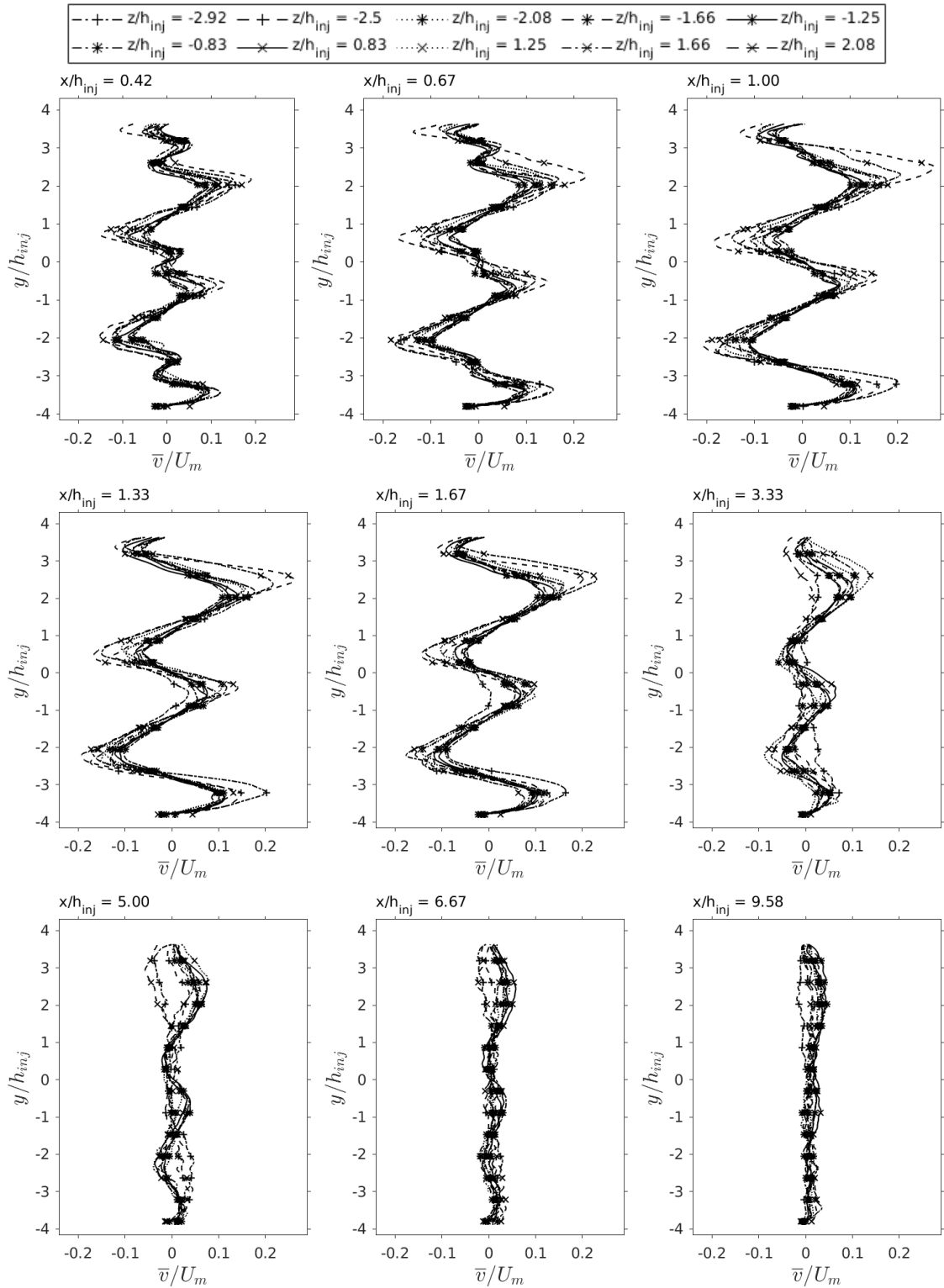
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.12 - Perfis transversais verticais de  $\bar{v}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $\bar{v} = 0,16 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de  $\bar{v} = 0,02 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.13 - Perfis transversais verticais da velocidade média de  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $\bar{v} = 0,16 \text{ m/s}$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Os perfis transversais horizontais de  $\bar{u}$  das seções horizontais, que são apresentados pelas Figuras 5.14 e 5.15, têm diversas características que complementam a análise dos perfis de  $\bar{u}$  das seções verticais. Entre essas características, verifica-se, assim como foi observado nas seções verticais, que  $\bar{u}$  tende a ter características de um escoamento turbulento plenamente desenvolvido ao longo de  $x/h_{inj}$ . Observa-se, também, que os perfis das seções horizontais  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = -2,67$  caracterizam duas zonas de recirculação entre  $x/h_{inj} = 0,42$  e  $x/h_{inj} = 1,67$ . Somado a isso, os perfis das seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{\pm 0,5; -3,17; -2,17\}$  apresentam as regiões de interseção entre as zonas de recirculação e o escoamento principal.

Além disso, verifica-se que os perfis de  $\bar{u}$  das seções horizontais  $y/h_{inj} = \pm 0,5$  diminuem a diferença entre os seus valores ao longo de  $x/h_{inj}$ . Tal aspecto também é observado nos perfis de  $\bar{w}$  destas seções horizontais, que são apresentados pela Figura 5.16. Essa característica dos perfis transversais horizontais de  $\bar{u}$  e de  $\bar{w}$  se deve a alta anisotropia e ao movimento tridimensional do escoamento nas zonas de recirculação. Os perfis de  $\bar{u}$  das seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{0; \pm 0,5; -3,17; -2,67; -2,17\}$  são assimétricos, com exceção dos perfis da estação  $x/h_{inj} = 9,58$ . Eles possuem essa característica pois há uma diminuição dos seus valores em  $z/h_{inj} \in [-4; -2]$ . Isso se deve a camada limite turbulenta existente próxima da parede lateral. Verifica-se também que os valores de  $\bar{u}$  aumentam no sentido longitudinal em  $z/h_{inj} \in [-4; -2]$ .

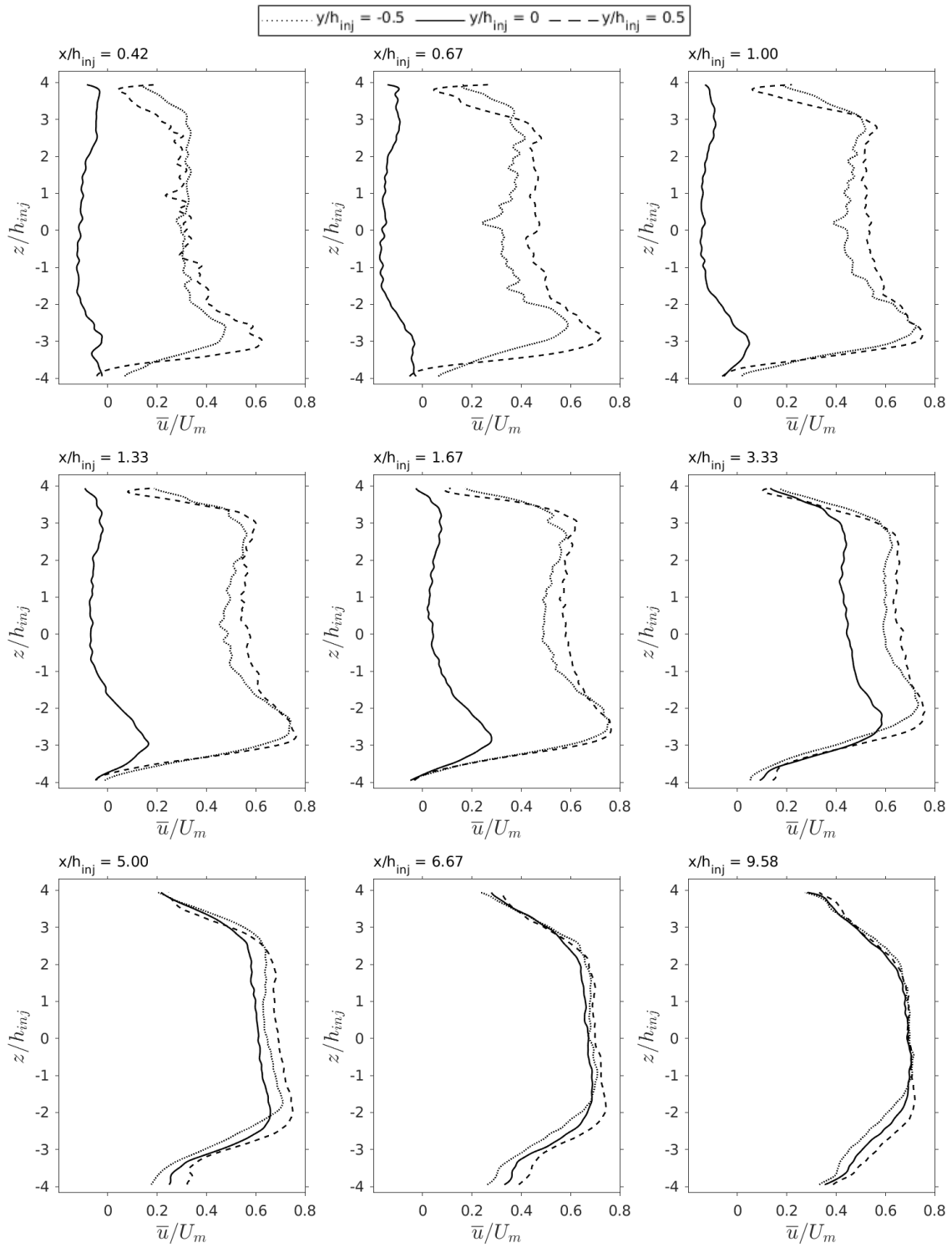
Quanto aos perfis de  $\bar{u}$  das seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{\pm 0,92; \pm 1,33; \pm 1,75\}$ , isto é, as seções horizontais que estão entre os injetores, perdem suas simetrias com relação a  $z/h_{inj} = 0$  ao longo de  $x/h_{inj}$ . É possível constatar também que os valores de  $\bar{u}$  são maiores nas seções horizontais que estão entre os injetores entre  $x/h_{inj} = 0,42$  e  $x/h_{inj} = 5,00$  em  $z/h_{inj} \in [-4; -2]$ .

Sobre a velocidade média transversal, pode-se constatar que os perfis de  $\bar{w}$ , que são apresentados pelas Figuras 5.16 e 5.17, adquirem os maiores valores na região próxima aos injetores. Somado a isso, alguns dos perfis da velocidade transversal  $\bar{w}$  evidenciam um deslocamento do escoamento no sentido para o centro da região principal. No entanto, os perfis de  $\bar{w}$  da seção horizontal central, apresentados pela Figura 5.16, mostram que o deslocamento do escoamento fica no sentido de se distanciar do centro da região principal em  $x/h_{inj} \geq 3,33$ . Somado a isso, verifica-se que os perfis de  $\bar{w}$  das seções horizontais, que são apresentados pela Figura 5.17, têm pouca diferença entre eles em  $x/h_{inj} \geq 5$ . Há pouca diferença entre os perfis de  $\bar{w}$  nas seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{\pm 0,92; \pm 1,33; \pm 1,75\}$  e em  $z/h_{inj} \geq 1$ . Além disso, verifica-se que os perfis das seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{\pm 0,92; \pm 1,33; \pm 1,75\}$  contêm os maio-

res valores de  $\bar{w}$  com relação às demais seções horizontais em  $z/h_{inj} \in [-4; -2]$  e em  $z/h_{inj} \in [2; 4]$ . Esses aspectos se devem a elevada intensidade turbulenta próxima dos injetores e das paredes laterais.

Os perfis das seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{-3,17; -2,67; -2,17\}$ , isto é, aqueles que estão na frente do injetor inferior, não convergem com os perfis das outras seções horizontais em boa parte de  $z/h_{inj}$  em  $x/h_{inj} \leq 3,33$ . Isso se deve a zona de recirculação a jusante do injetor inferior e a baixa qualidade das medições com PIV nestas seções horizontais. Observa-se também que os valores de  $\bar{w}$  tendem a zero a jusante a partir de  $x/h_{inj} = 5$ , tal como encontrado no escoamento turbulento plenamente desenvolvido.

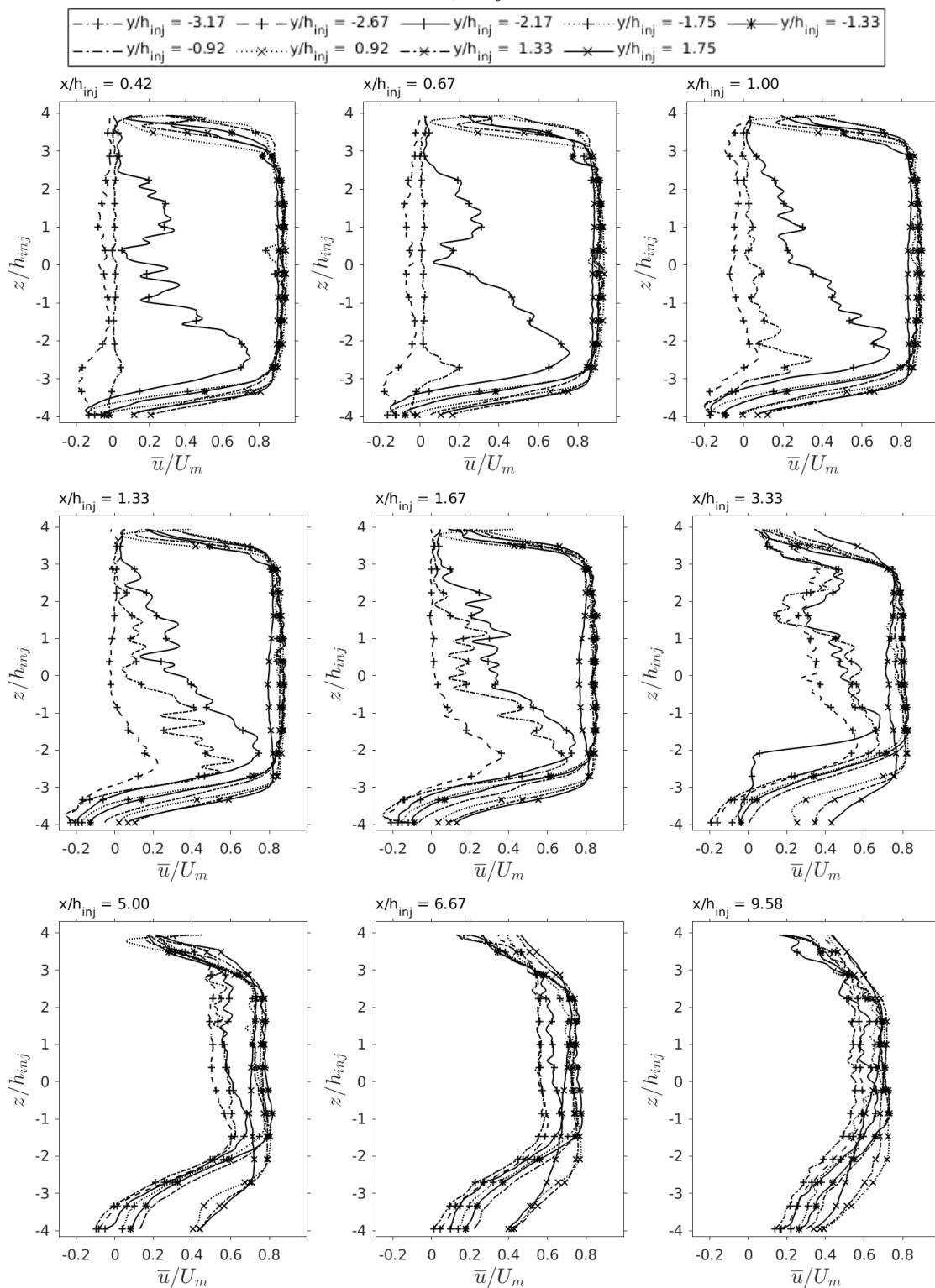
Figura 5.14 - perfis transversais horizontais da velocidade média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,21$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

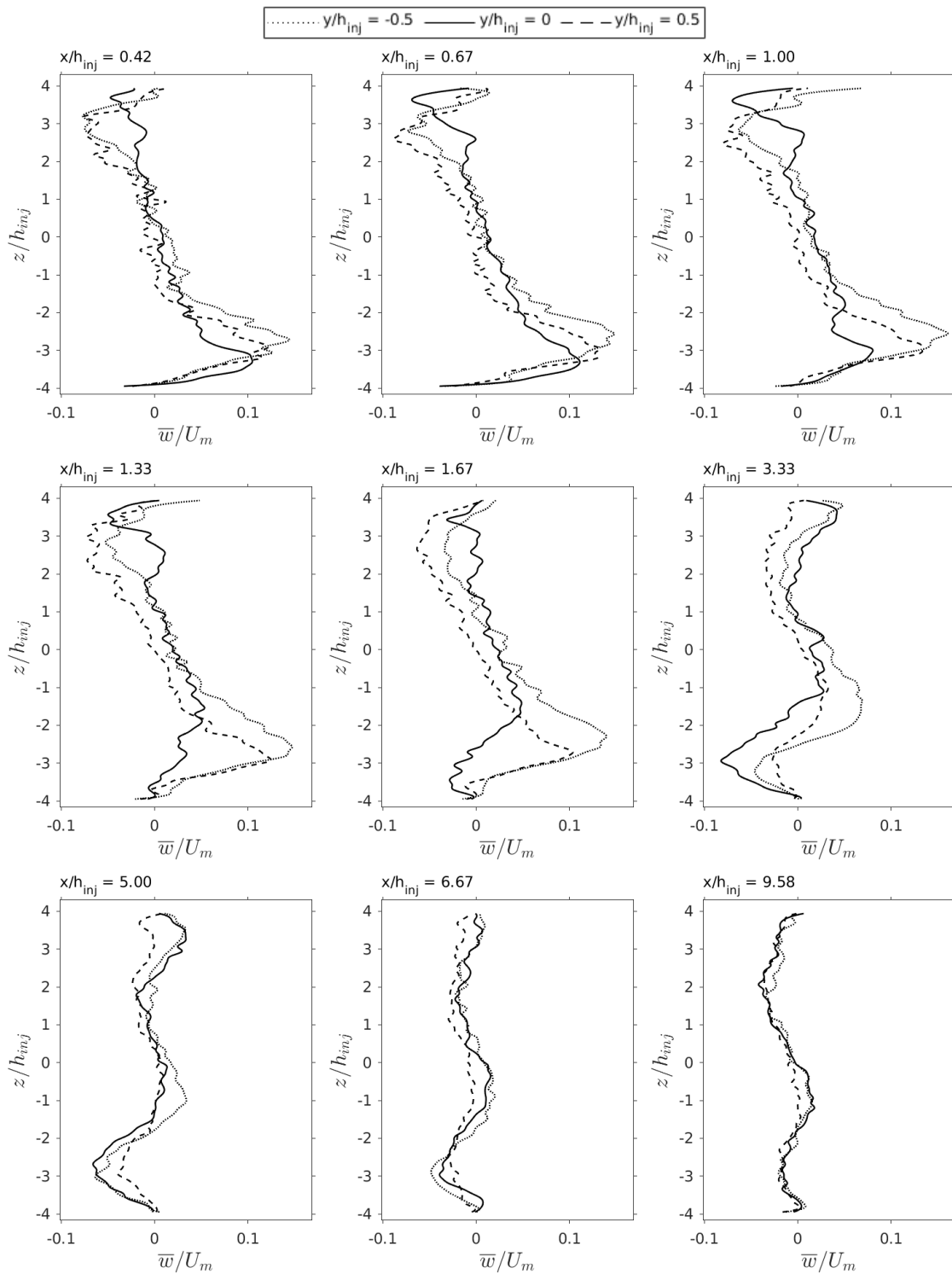


Figura 5.15 - perfis transversais horizontais da velocidade média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,17$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



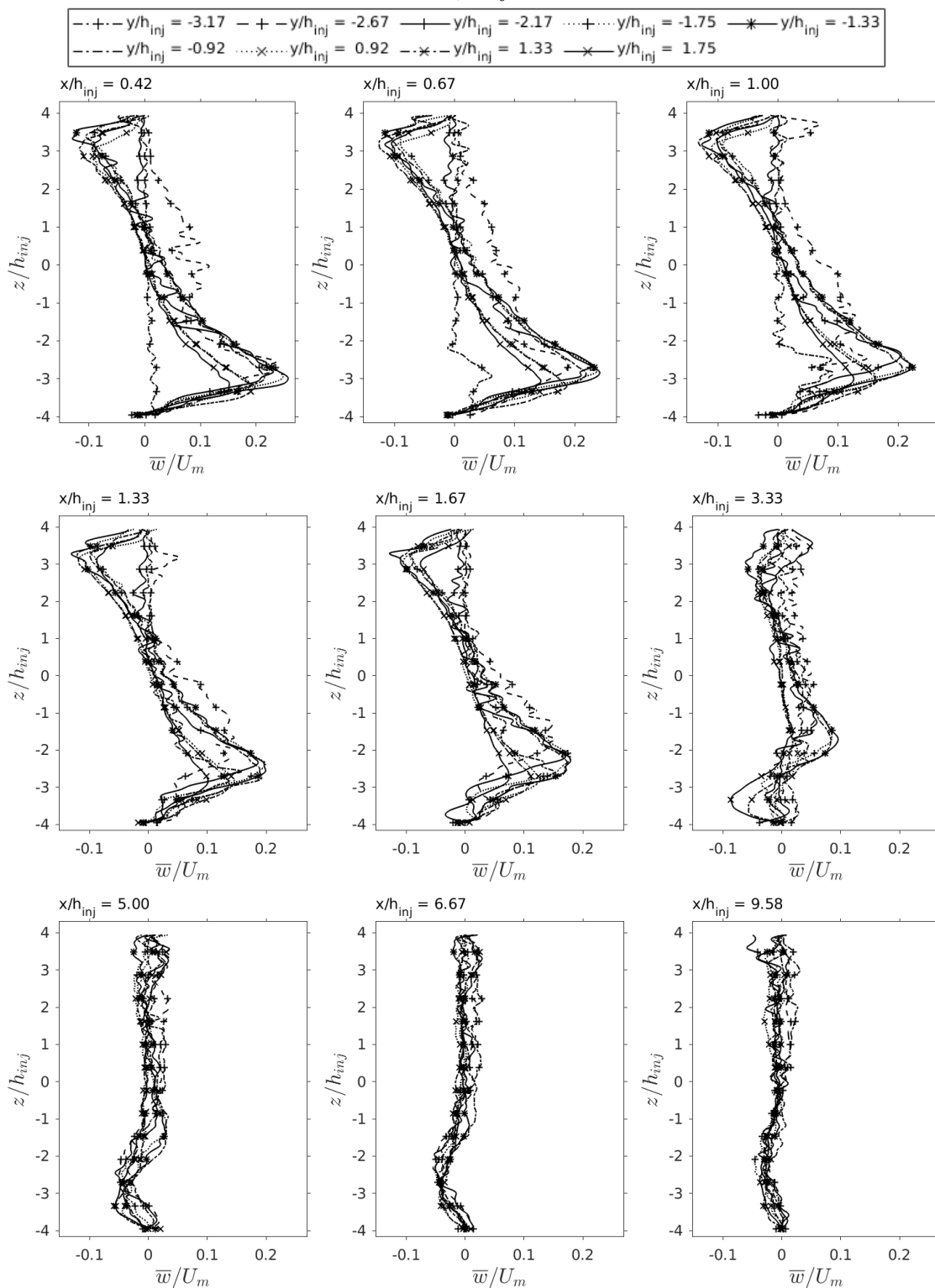
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.16 - perfis transversais horizontais da velocidade média de  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\bar{w} = \pm 0,16$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.17 - perfis transversais horizontais da velocidade média de  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\bar{w} = \pm 0,11$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

## 5.4 Flutuação média das velocidades e tensor turbulento de cisalhamento

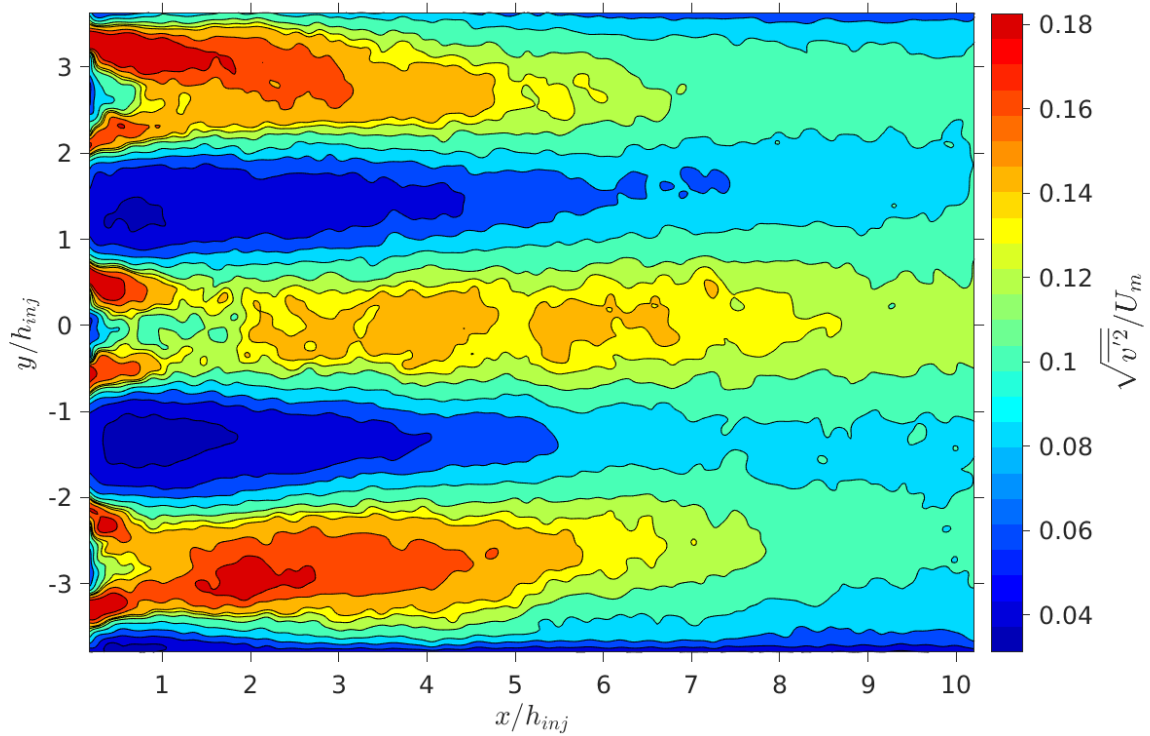
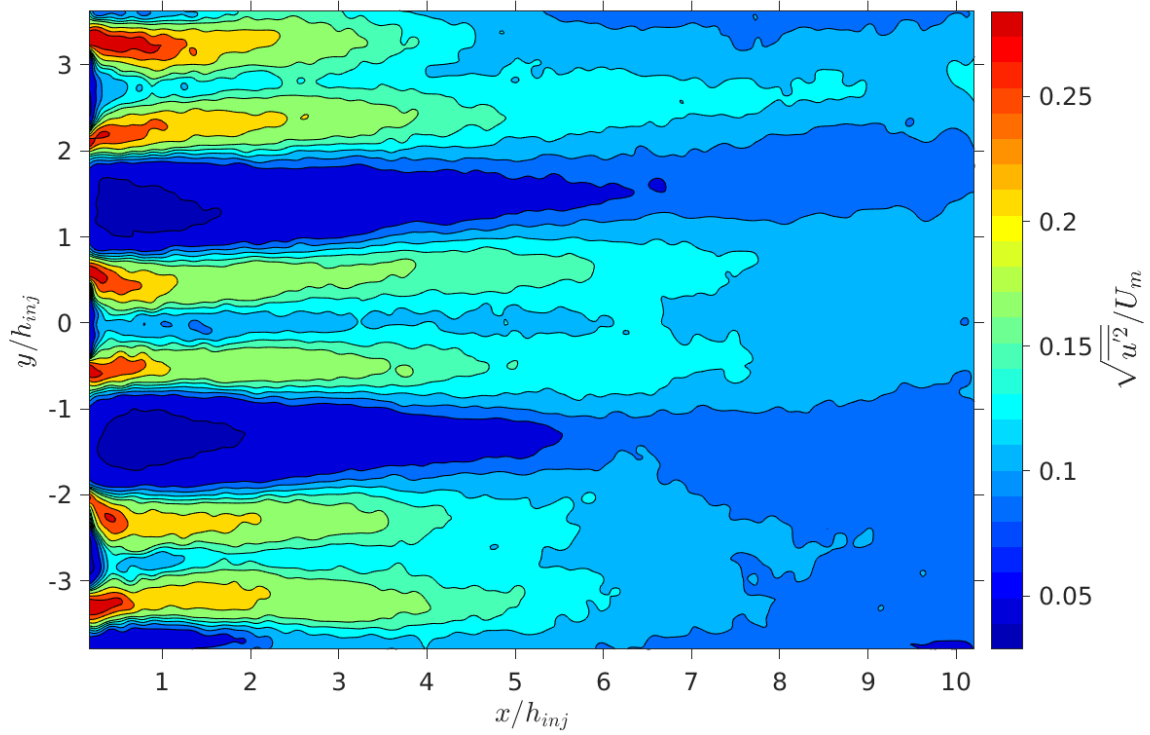
Os perfis transversais verticais e horizontais das flutuações médias das componentes de velocidade  $\sqrt{u'^2}$ ,  $\sqrt{v'^2}$  e  $\sqrt{w'^2}$  e dos tensores turbulentos de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  e  $\overline{u'w'}$  para determinadas estações em  $x/h_{inj}$  são apresentados na presente seção. As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam os isocontornos de  $\sqrt{u'^2}$ ,  $\sqrt{v'^2}$  e  $\overline{u'v'}$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Da Figura 5.24 a Figura 5.27 são apresentados os perfis transversais horizontais das flutuações médias das seções horizontais, e da Figura 5.20 a Figura 5.23 os perfis transversais verticais das seções verticais. Os perfis transversais verticais e horizontais de  $\overline{u'v'}$  e  $\overline{u'w'}$  são apresentados pelas Figuras 5.28 a 5.31.

Os isocontornos de  $\sqrt{u'^2}$ , que são apresentados pela Figura 5.18, mostram que a flutuação longitudinal média é mais intensa nas bordas das zonas de recirculação e nas bordas das esteiras. Verifica-se que os maiores valores de  $\sqrt{u'^2}$  estão nas bordas das esteiras em  $x/h_{inj} \leq 1$ , pois nestas regiões o cisalhamento é mais intenso. Verifica-se também que a área na qual  $\sqrt{u'^2}/U_m$  está na faixa de 0,25 a 0,3 é maior na vizinhança da borda superior da face posterior do injetor superior. Isso se deve às camadas limites turbulentas da parede superior. Observa-se também que a flutuação longitudinal média diminui drasticamente no sentido longitudinal.

Esses aspectos da flutuação longitudinal média também são observados nos isocontornos de  $\sqrt{v'^2}$ , que também estão na Figura 5.18. Verifica-se que  $\sqrt{v'^2}$  nas bordas das faces posteriores dos injetores inferior e superior que estão mais próximas das paredes é mais intenso, por causa das camadas limites turbulentas das paredes. Observa-se também que  $\sqrt{v'^2}$  é menos intenso com relação a  $\sqrt{u'^2}$ .

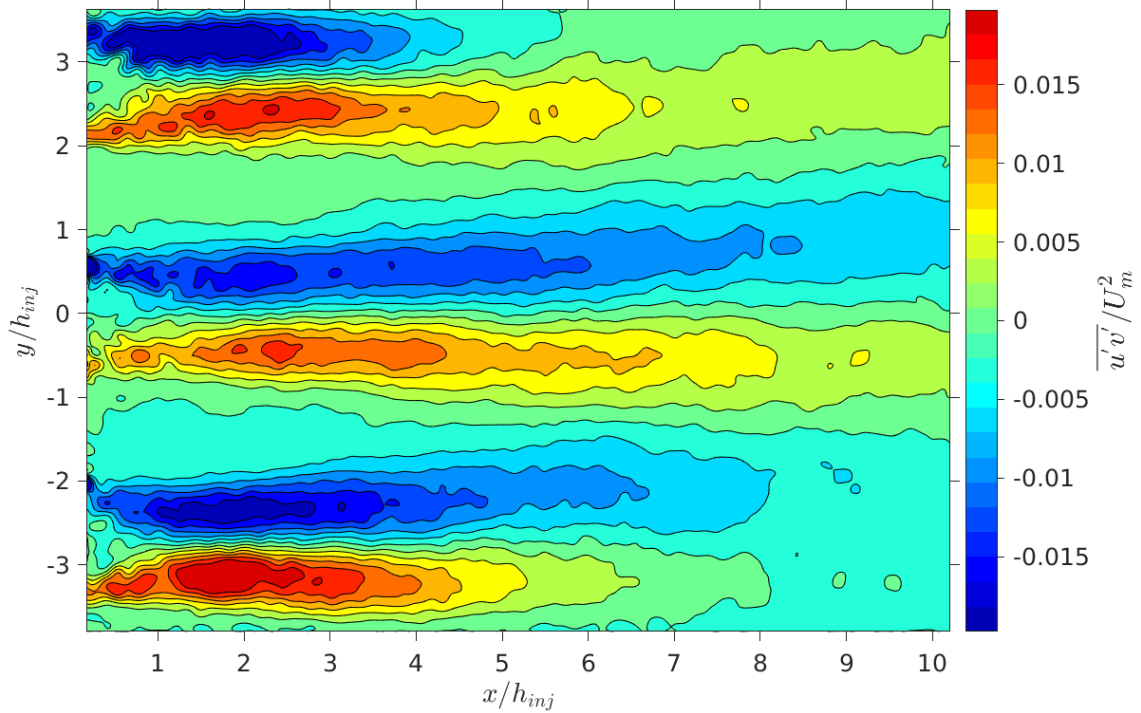
Quanto aos isocontornos de  $\overline{u'v'}$ , apresentados pela Figura 5.19, verifica-se que os maiores e menores valores de  $\overline{u'v'}$  estão localizados nas bordas das esteiras. Observa-se também, que  $\overline{u'v'}$  diminui gradativamente ao longo de  $x/h_{inj}$ , diferente das flutuações médias. Isso se deve a interação das esteiras com o escoamento principal, que aumenta o cisalhamento na turbulência.

Figura 5.18 - Isocontornos da flutuação longitudinal média  $\sqrt{u'^2}$  e da flutuação normal média  $\sqrt{v'^2}$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,13 \text{ m/s}$  e de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,12 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $x/h_{inj} = 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.19 - Isocontornos do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  na seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Incerteza média de  $\overline{u'v'} = \pm 0,39 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Incerteza de  $x/h_{inj} = 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Examinando os perfis das seções horizontais e verticais das Figuras 5.20, 5.22, 5.24 e 5.26, verifica-se que as flutuações médias de velocidade são mais intensas nas regiões a jusante das bordas da superfícies dos injetores, isto é, nas interfaces entre as zonas de recirculação e o escoamento principal entorno dos injetores. Isso se deve ao cisalhamento intenso existente nessas regiões provocadas pela diferença de velocidade entre o escoamento principal e as zonas de recirculação. Tal aspecto do escoamento turbulento pode ser também observado nas Figuras 5.21 e 5.23. Somado a isso, observa-se que as flutuações também são altas não apenas nestas regiões de cisalhamento mas também nas regiões internas das zonas de recirculação.

Pode-se verificar que os perfis de  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$  das seções verticais  $z/h_{inj} = \pm 0,42$ , que são apresentados pelas Figuras 5.20 e 5.22, não são completamente simétricos com relação a seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ . Em algumas regiões os valores  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$  dos perfis dessas seções verticais divergem. Isso se deve à diferença de qualidade das medições com PIV somado com o comportamento turbulento do escoamento em

cada uma dessas seções. Com relação aos perfis das seções verticais  $z/h_{inj} = \pm 2,5$  e  $z/h_{inj} = \pm 2,92$ , que são apresentados pelas Figuras 5.21 e 5.23, verifica-se que estes, em geral, não convergem aos perfis das demais seções verticais, pois eles são fortemente influenciados pelos gradientes de velocidade próximos às paredes.

Um outro detalhe que deve ser mencionado está nos valores das flutuações média das regiões de cisalhamento intenso próximos a parede superior e a parede inferior, conforme observado nas Figuras 5.20 a 5.23. Observa-se que as flutuações nestas regiões com relação os valores das flutuações das outras regiões com cisalhamento intenso são um pouco maiores. Essa diferença se deve as camadas limites turbulentas presentes nas paredes.

Sobre os perfis transversais horizontais de  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{w'^2}$  das seções horizontais, apresentados pelas Figuras 5.24 a 5.27, verifica-se que os valores de  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{w'^2}$  são elevados nas proximidades das paredes laterais. Isso se deve a intensos gradientes de velocidade das camadas limites turbulentas existentes próximas as paredes. Nas seções horizontais  $y/h_{inj} = \pm 0,5$ , que são apresentadas pelas Figuras 5.24 e 5.26, verifica-se que os perfis delas não são simétricos com relação a  $z/h_{inj} = 0$  em  $x/h_{inj} \leq 1,67$ . Isso se deve à forte anisotropia da turbulência e ao movimento tridimensional do escoamento turbulento nas zonas de recirculação e suas vizinhanças. Nas seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{-3,17; -2,67; -2,17\}$ , que são apresentadas pelas Figuras 5.25 e 5.27, pode-se observar esses aspectos em  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{w'^2}$ . É importante destacar o fato da qualidade das medições com PIV nestas seções seja menor devido às razões já mencionadas neste capítulo.

Para finalizar, a partir da distância  $x/h_{inj} = 5$ , tanto os perfis das seções verticais quanto os perfis das seções horizontais adquirem um caráter mais homogêneo. Isso se deve a dissipação das estruturas coerentes e periódicas da turbulência através do processo de estiramento de vórtices e da dissipação da energia cinética turbulenta pela viscosidade. Nesta região, o escoamento tende a ter o caráter observado na região de entrada, isto é, tende a ser um escoamento turbulento plenamente desenvolvido.

Os perfis de  $\overline{u'v'}$ , que são apresentados pelas Figuras 5.28 e 5.29, mostram que, de  $x/h_{inj} = 0,42$  até  $x/h_{inj} = 1,67$ , os maiores e menores valores do elemento de cisalhamento têm valores superiores a 0,01 e inferiores a  $-0,01$ . O tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'w'}$  contém seus maiores e menores valores próximos as paredes laterais a partir de  $x/h_{inj} = 3,33$ , conforme mostra os seus perfis nas seções horizontais, apresentados pelas Figuras 5.30 e 5.31. Verifica-se também nas seções horizontais  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = \pm 0,5$  que os perfis  $\overline{u'w'}$  não são simétricos em  $x/h_{inj} \leq 3,33$ ,

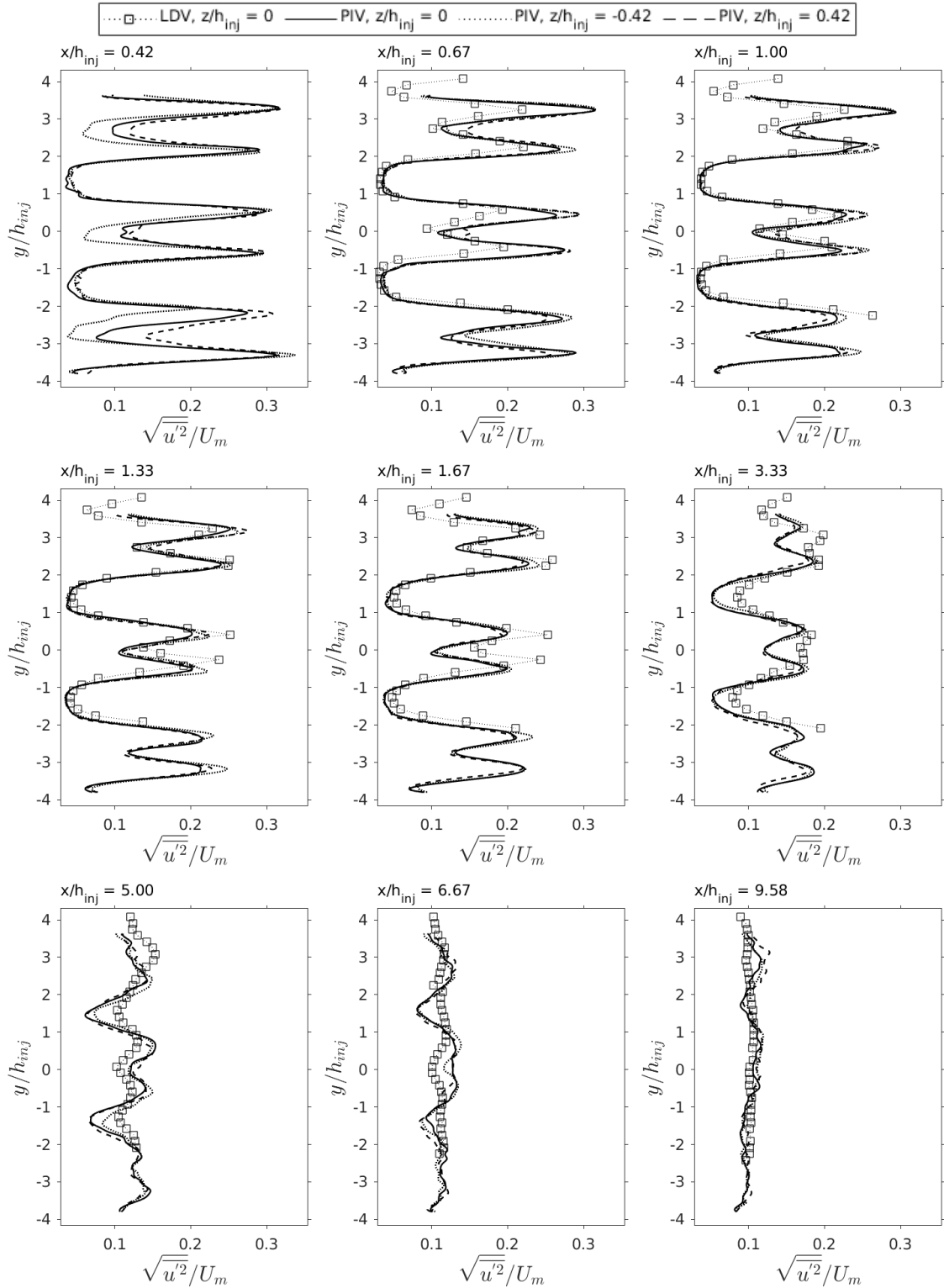
por causa da forte anisotropia do escoamento nas zonas de recirculação. Além disso, os perfis de  $\overline{u'w'}$  são assimétricos com relação a  $z/h_{inj} = 0$  em todas as seções horizontais. Para finalizar, verifica-se que os tensores turbulentos de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  e  $\overline{u'w'}$  são menores do que  $\sqrt{\overline{u'^2}}$ ,  $\sqrt{\overline{v'^2}}$  e  $\sqrt{\overline{w'^2}}$ .

Comparando os resultados das flutuações médias e do tensor turbulento de cisalhamento com PIV e com LDV, observa-se que não há uma semelhança plena entre os resultados. Na comparação dos valores de  $\sqrt{\overline{u'^2}}$ , verifica-se mais diferenças entre as técnicas nos valores máximos de  $\sqrt{\overline{u'^2}}$  e nos valores localizados nas alturas dos centros das faces posteriores dos injetores. Comparando os valores mínimo de  $\sqrt{\overline{u'^2}}$ , observa-se que os valores com PIV se assemelham aos com LDV apenas em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 1$ . Foi observado também diferença entre os valores das duas técnicas em  $\sqrt{\overline{v'^2}}$ . Os valores máximos de  $\sqrt{\overline{v'^2}}$  com PIV são inferiores aos do LDV de forma geral. Verifica-se que as diferenças entre os valores máximos de  $\sqrt{\overline{v'^2}}$  com PIV e com LDV aumentam no sentido longitudinal até atingir o pico em  $x/h_{inj} = 3,33$ . A partir de  $x/h_{inj} = 3,33$ , as diferenças dos valores máximos diminuem no sentido longitudinal. Quanto às diferenças entre os valores mínimos de  $\sqrt{\overline{v'^2}}$ , observa-se que elas aumentam no sentido longitudinal até atingir o pico em  $x/h_{inj} = 6,67$ . Além disso, verifica-se que as diferenças relativas de  $\sqrt{\overline{v'^2}}$  são maiores que as de  $\sqrt{\overline{u'^2}}$ .

Essas diferenças das duas técnicas também são observadas nos valores do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$ . As discrepâncias dos valores de  $\overline{u'v'}$  atingem seu auge em  $x/h_{inj} = 1,67$ . Embora exista essas diferenças entre as técnicas, ambas mostram que os maiores valores de  $\overline{u'^2}$ ,  $\overline{v'^2}$  e  $\overline{u'v'}$  estão localizados nas zonas de recirculação e as suas vizinhanças. As diferenças das duas técnicas nas regiões de intenso cisalhamento também são observadas em outros trabalhos (CENEDESE et al., 1994; NAKAGAWA; HANRATTY, 2001; NEZU; NAKAYAMA, 1997). Essas diferenças entre as técnicas se deve, conforme observado nas Seções 5.2 e 5.3, a alta resolução temporal do LDV e a capacidade deste de detectar flutuações de velocidade de altas frequências. O efeito desta característica do LDV nas medições fica mais patente nas flutuações médias e no tensor turbulento de cisalhamento.

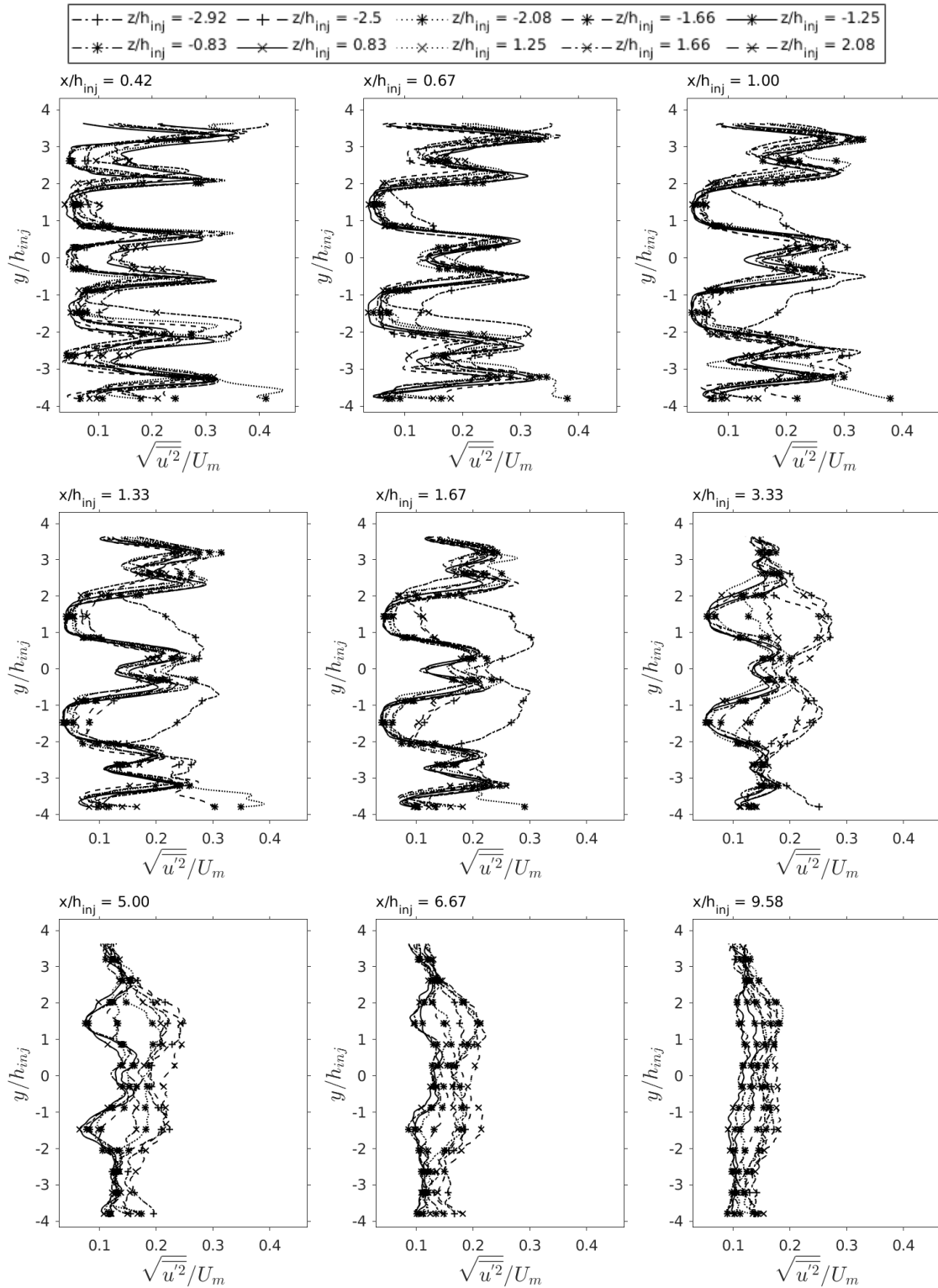


Figura 5.20 - Perfis transversais verticais da flutuação média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,17$  m/s. LDV: Incerteza média de  $\bar{v} = 0,02$  m/s. Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



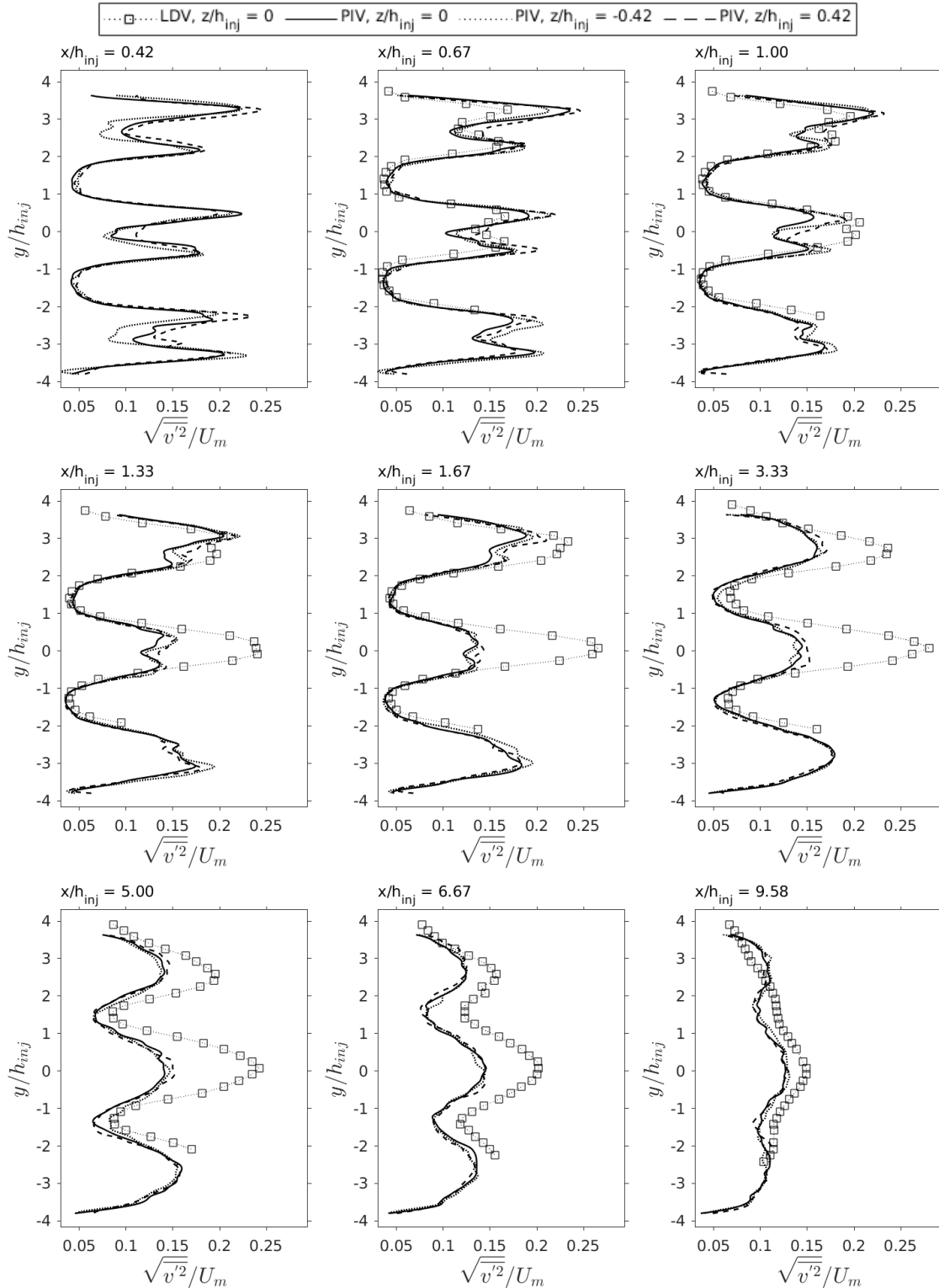
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.21 - Perfis transversais verticais da flutuação média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,18$  m/s, incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



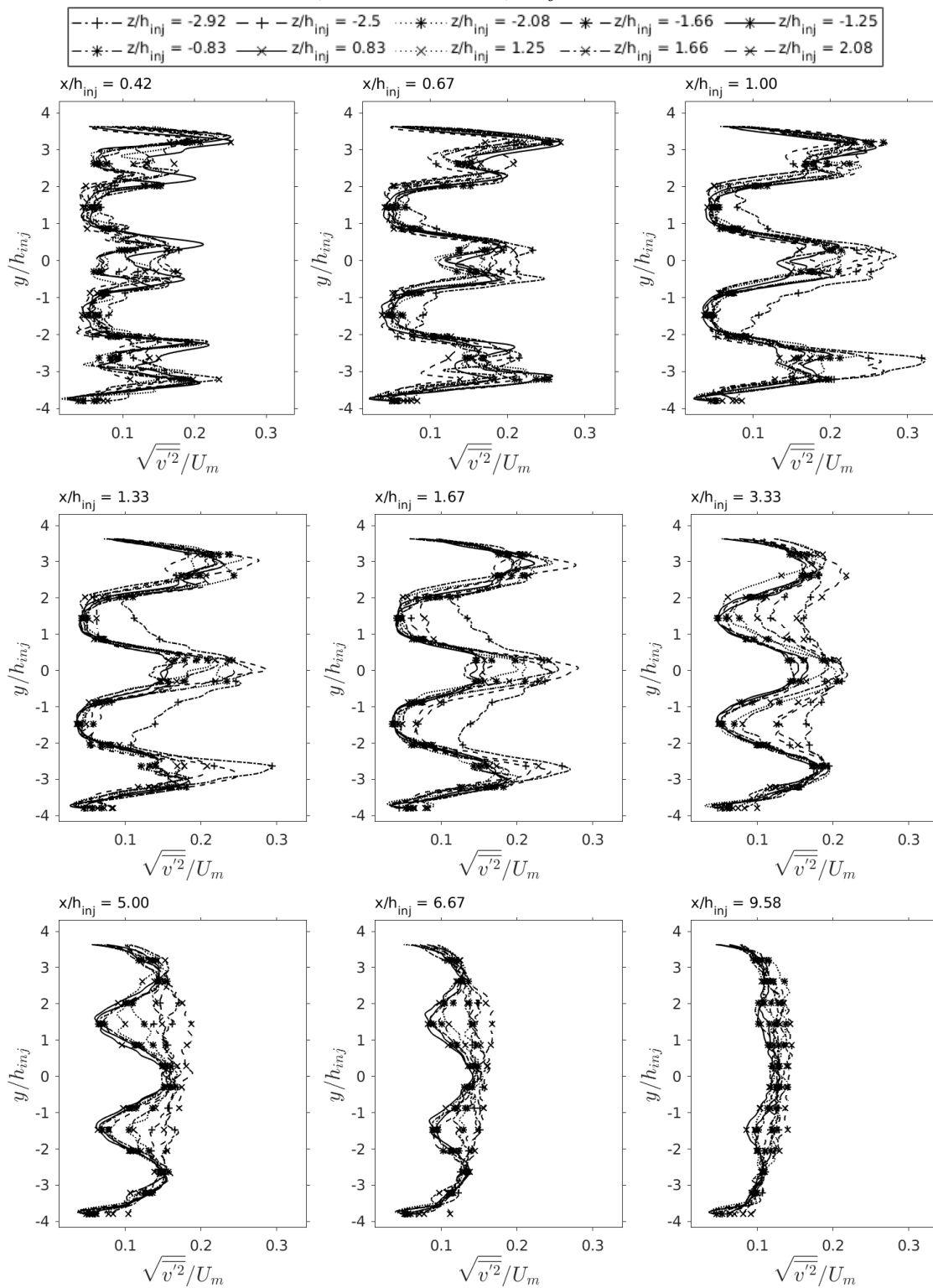
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.22 - Perfis transversais verticais da flutuação média de  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,14$  m/s. LDV: Incerteza média de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,01$  m/s. Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



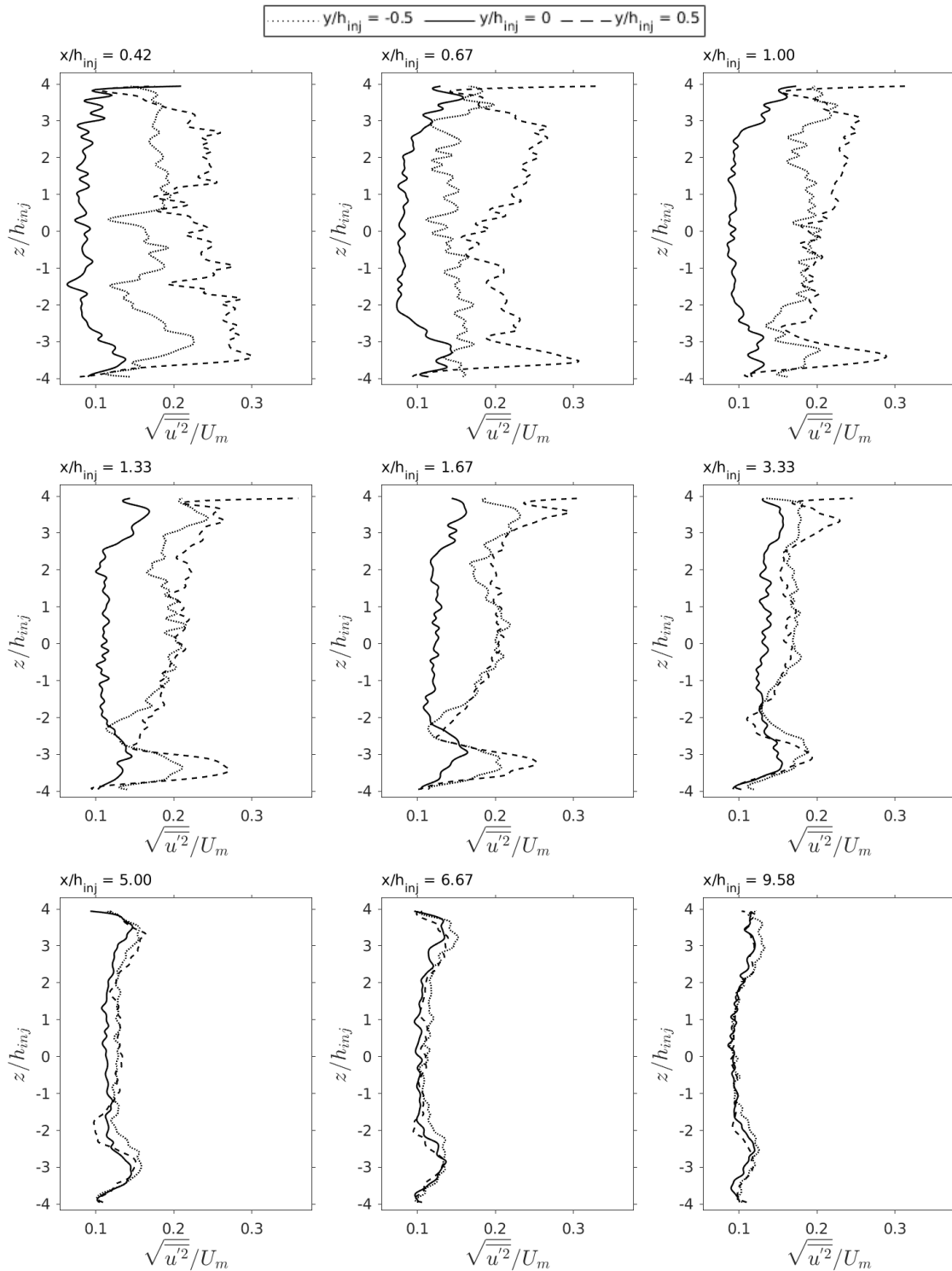
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.23 - Perfis transversais verticais da flutuação média de  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $\sqrt{v'^2} = \pm 0,14$  m/s, incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



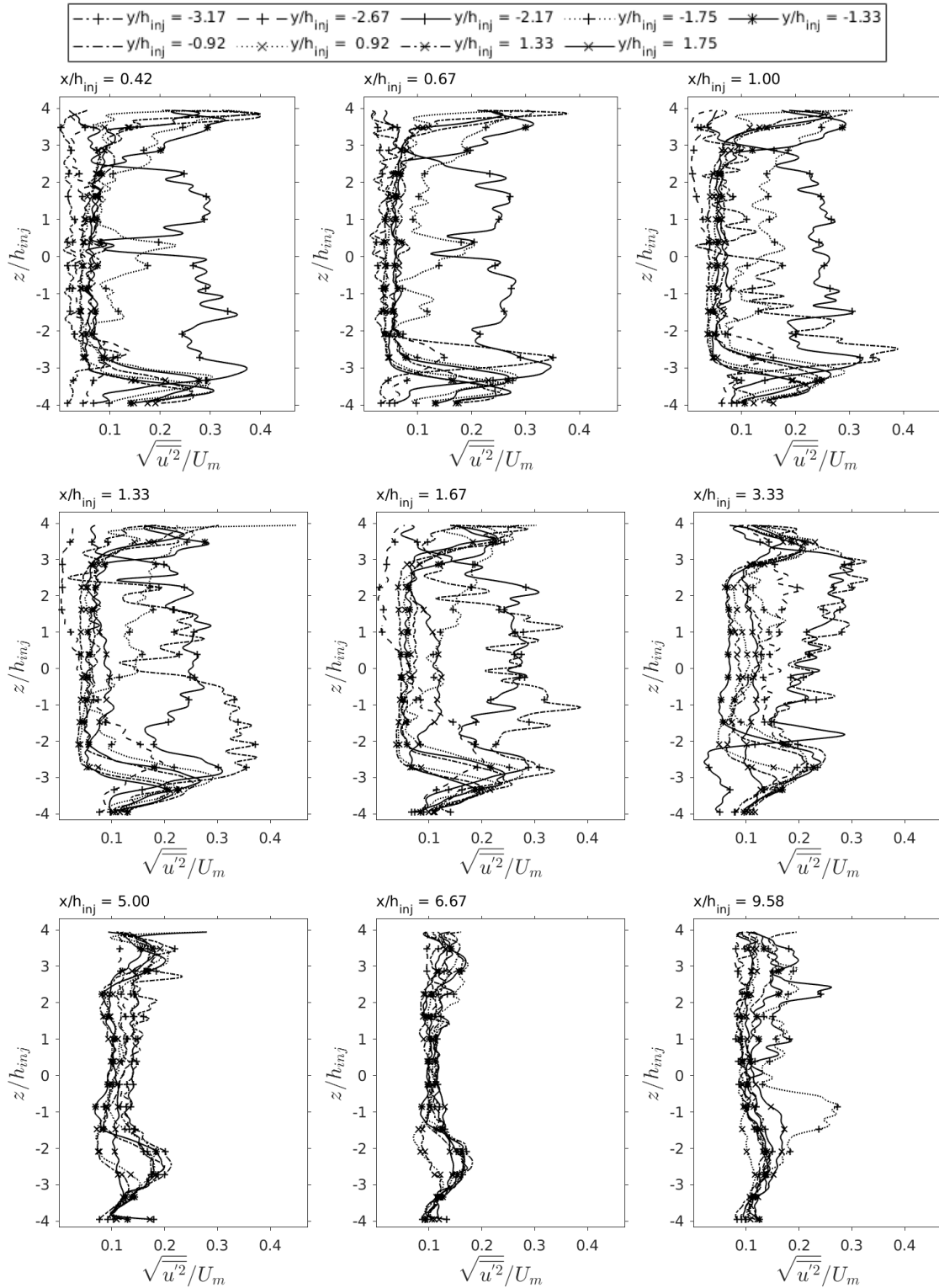
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.24 - perfis transversais horizontais da flutuação média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,17$  m/s, incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



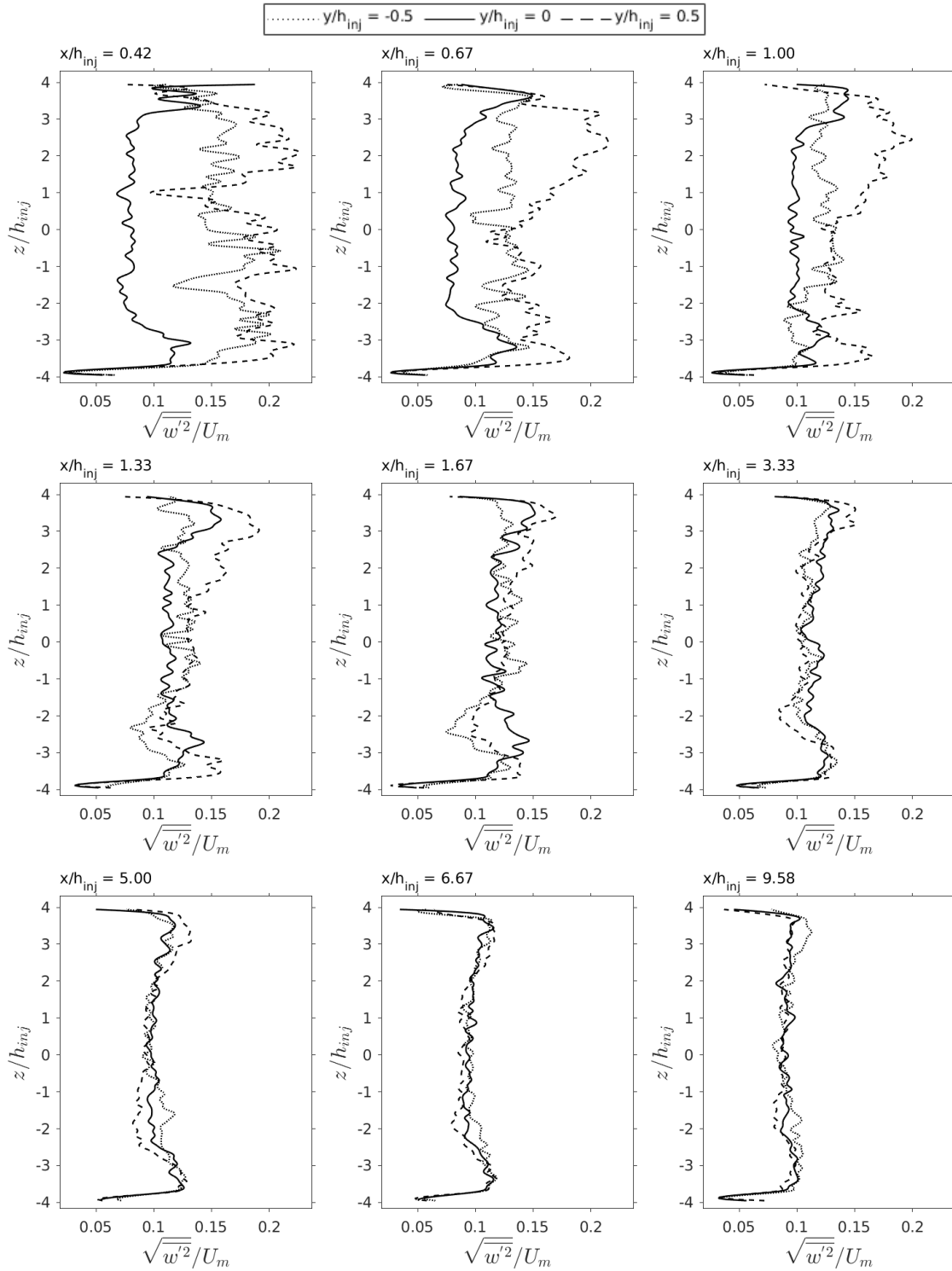
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.25 - perfis transversais horizontais da flutuação média de  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,18$  m/s, incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



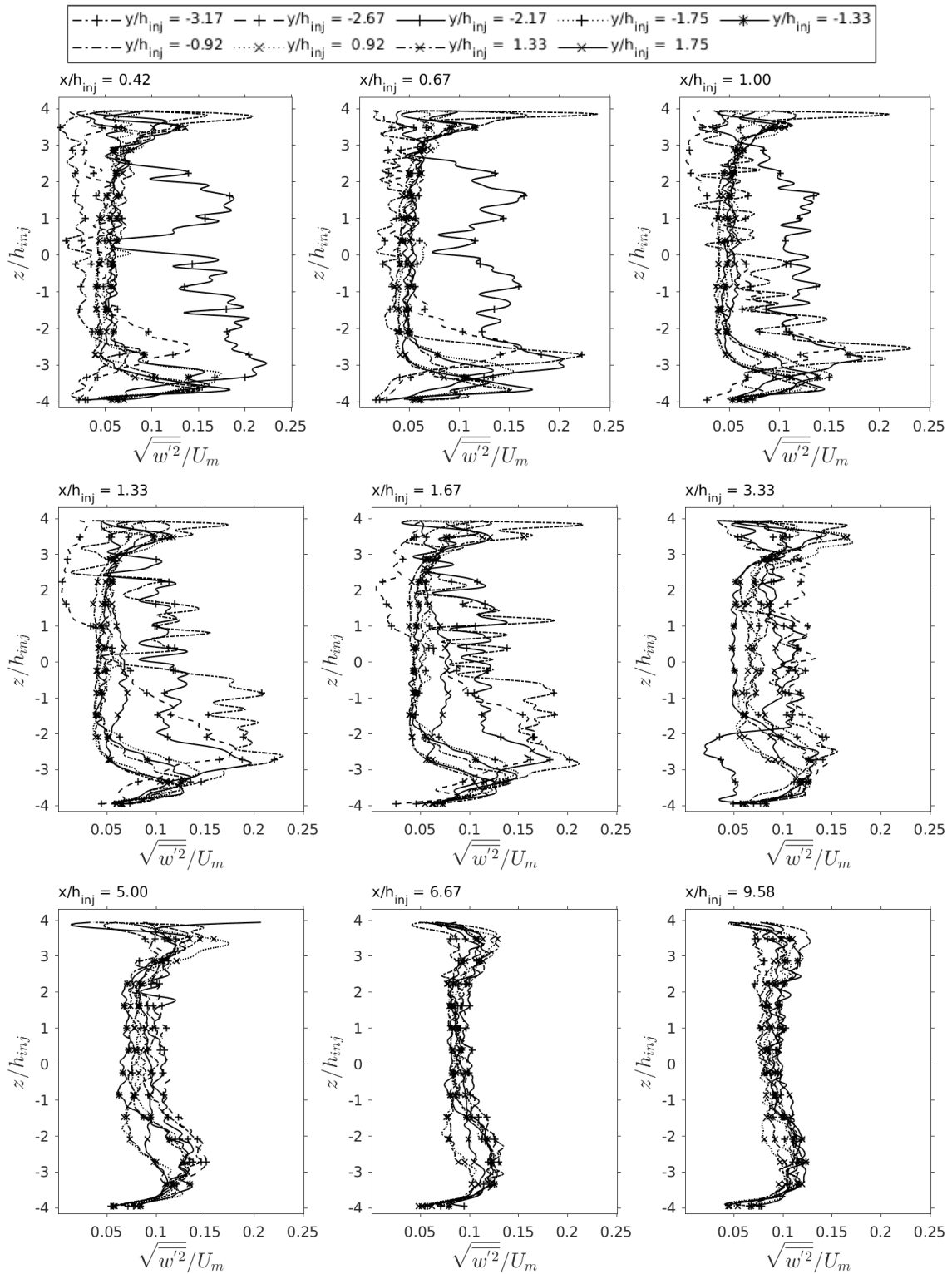
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.26 - perfis transversais horizontais da flutuação média de  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\sqrt{w'^2} = \pm 0,15$  m/s, incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

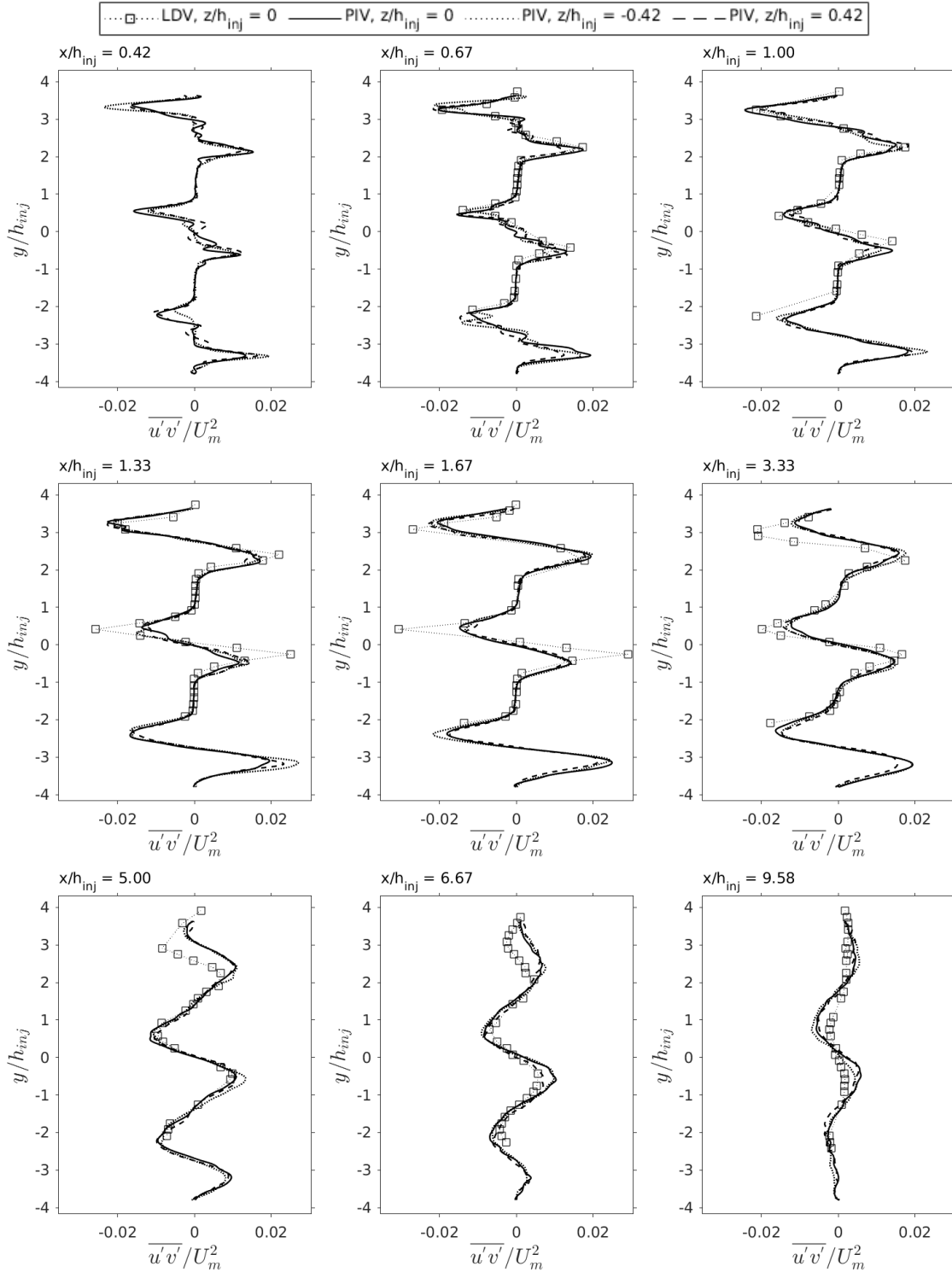
Figura 5.27 - perfis transversais horizontais da flutuação média de  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\sqrt{w'^2} = \pm 0,11$  m/s, incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

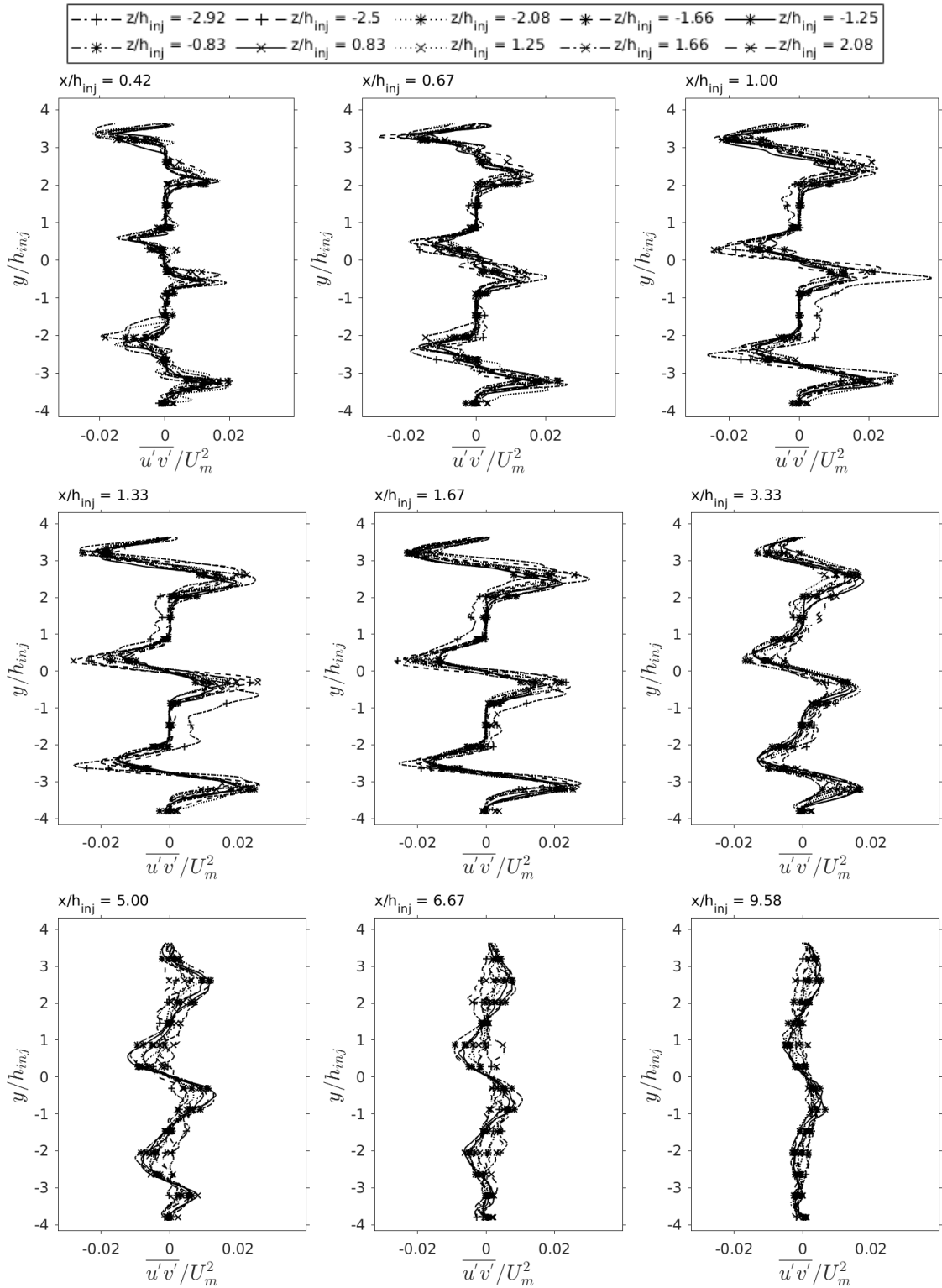


Figura 5.28 - Perfis transversais verticais do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , obtidos a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $\overline{u'v'} = \pm 0,51 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . LDV: Incerteza média de  $\overline{u'v'} = \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



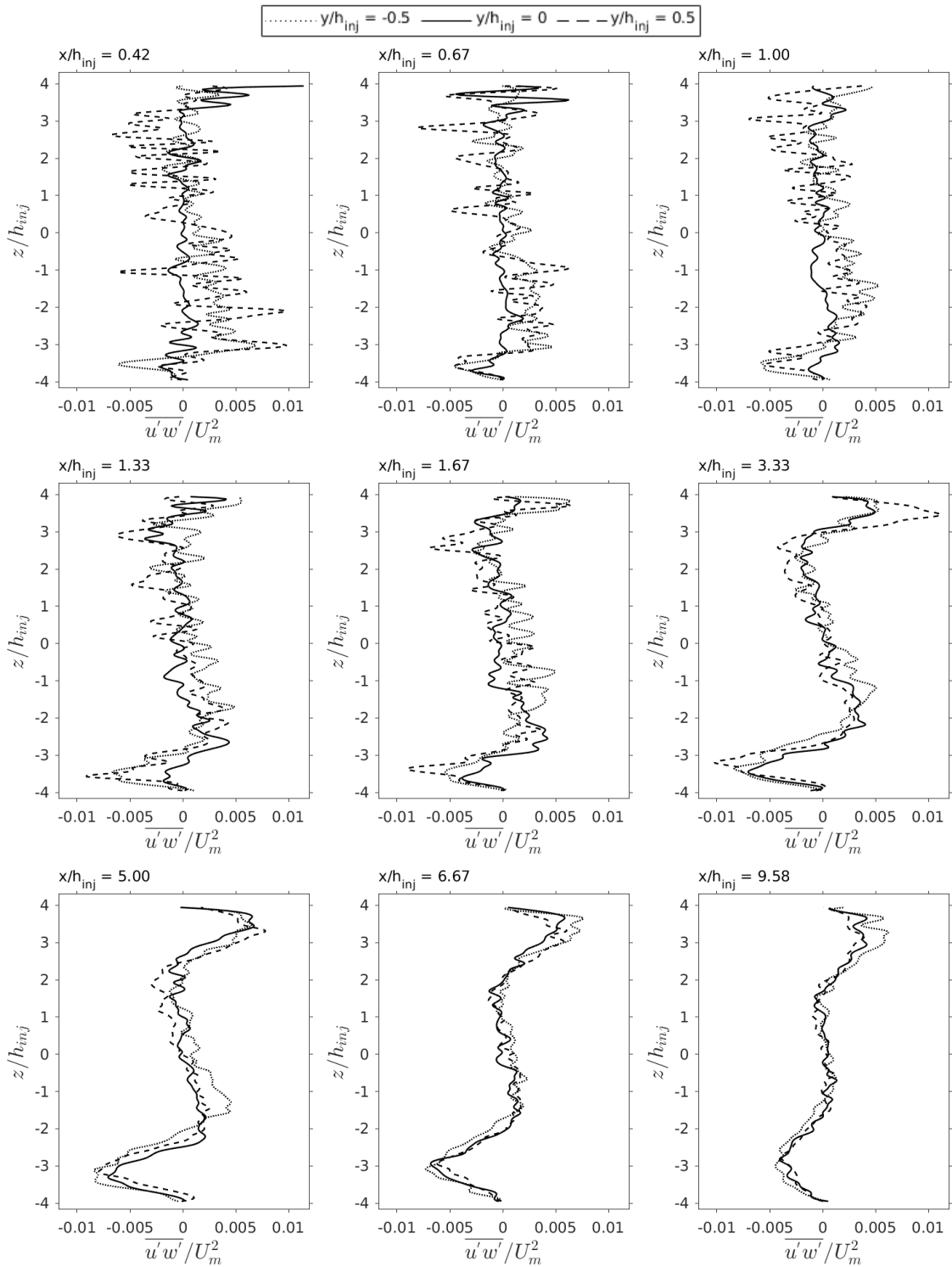
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.29 - Perfis transversais verticais do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'v'}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $\overline{u'v'} = \pm 0,56 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



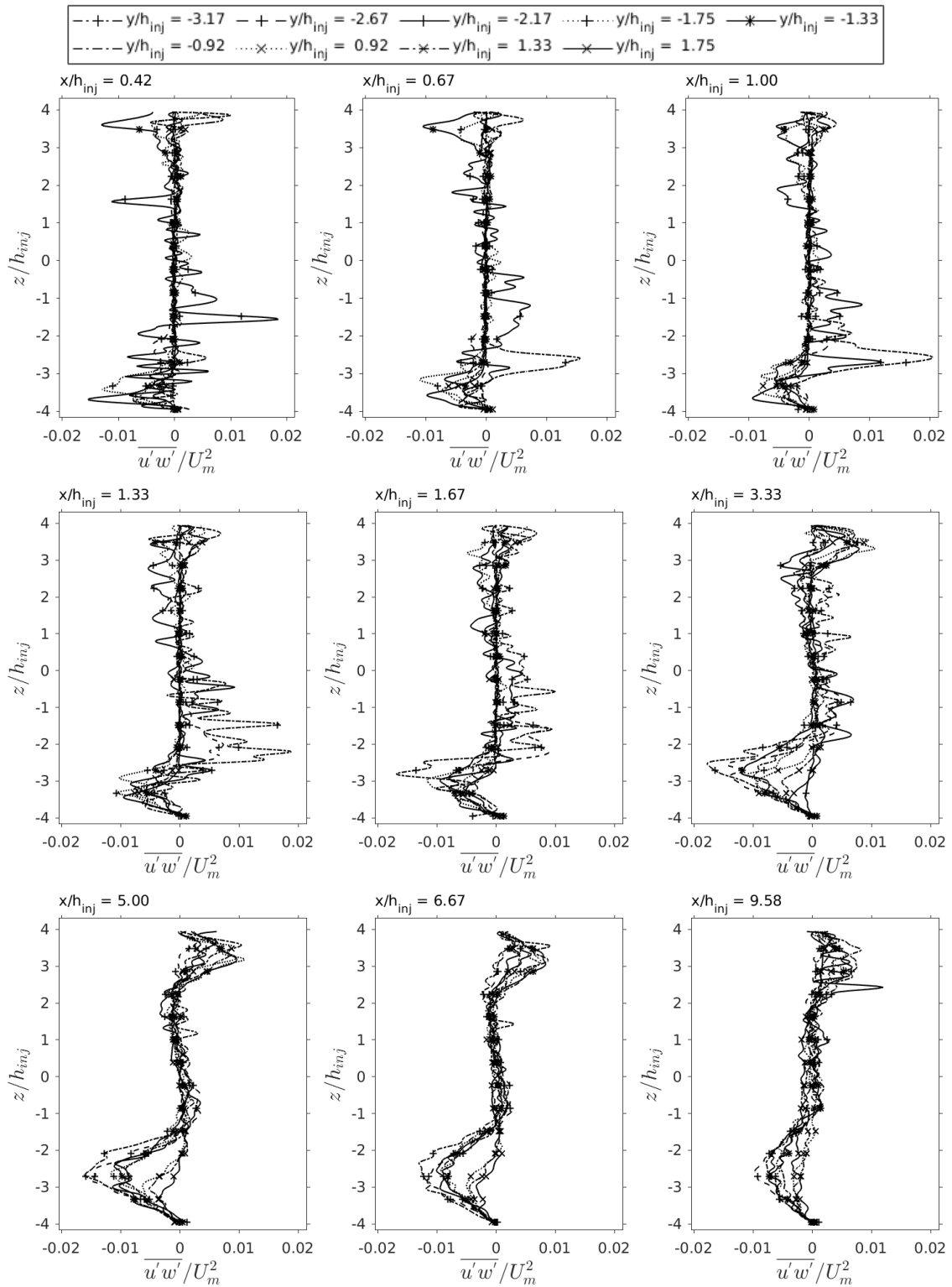
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.30 - perfis transversais horizontais do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'w'}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\overline{u'w'} = \pm 0,52 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.31 - perfis transversais horizontais do tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'w'}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $\overline{u'w'} = \pm 0,34 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



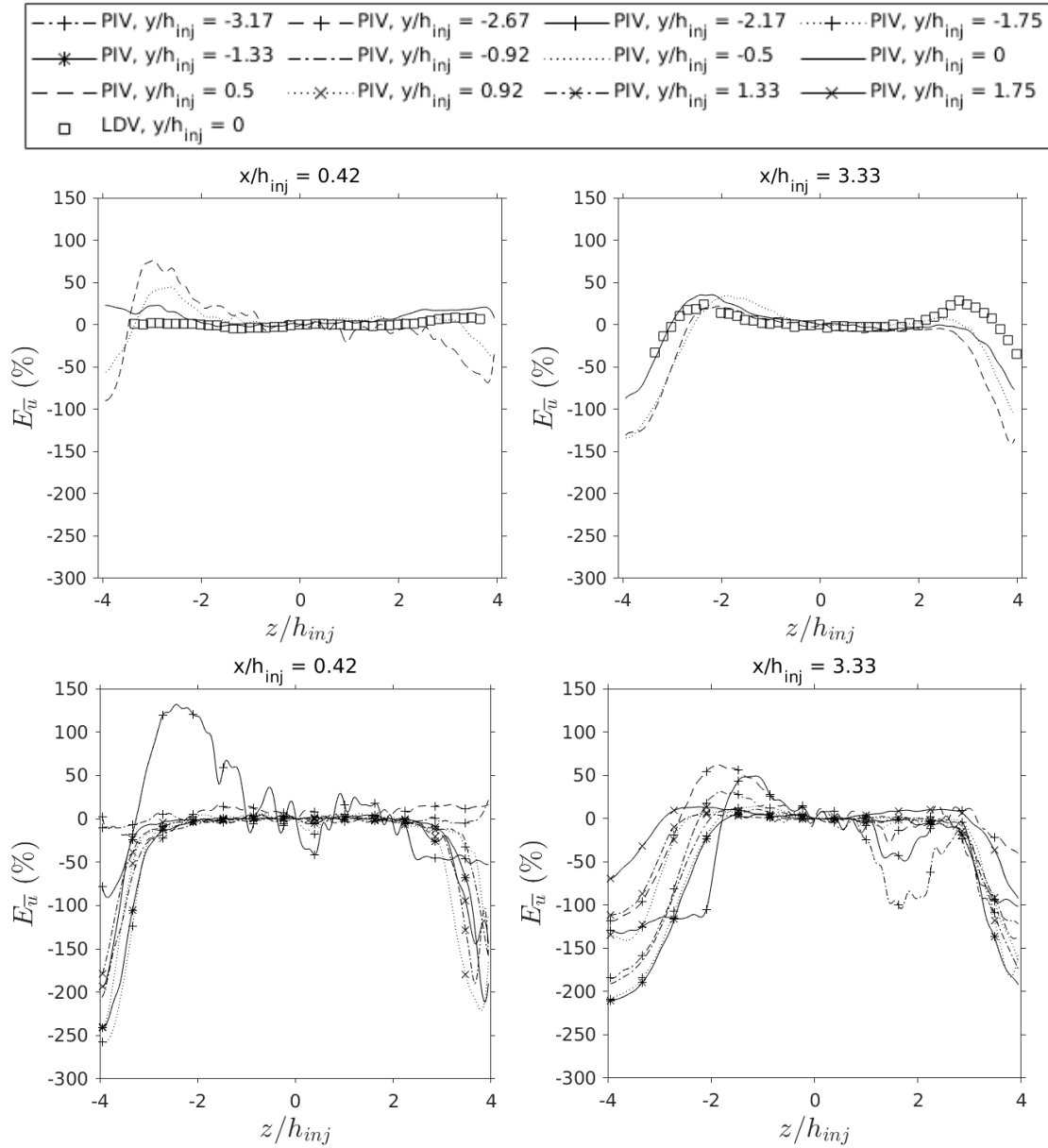
Fonte: Produção do autor.

## 5.5 Bidimensionalidade do escoamento médio

A bidimensionalidade do escoamento turbulento na região principal é apresentada pelas Figuras 5.32 e 5.33. Os gráficos abaixo mostram os perfis de  $E_q$  das seções horizontais na região principal de duas posições em  $x$ . Os valores de  $E_q$  com LDV também estão presentes nas Figuras 5.32 e 5.33.

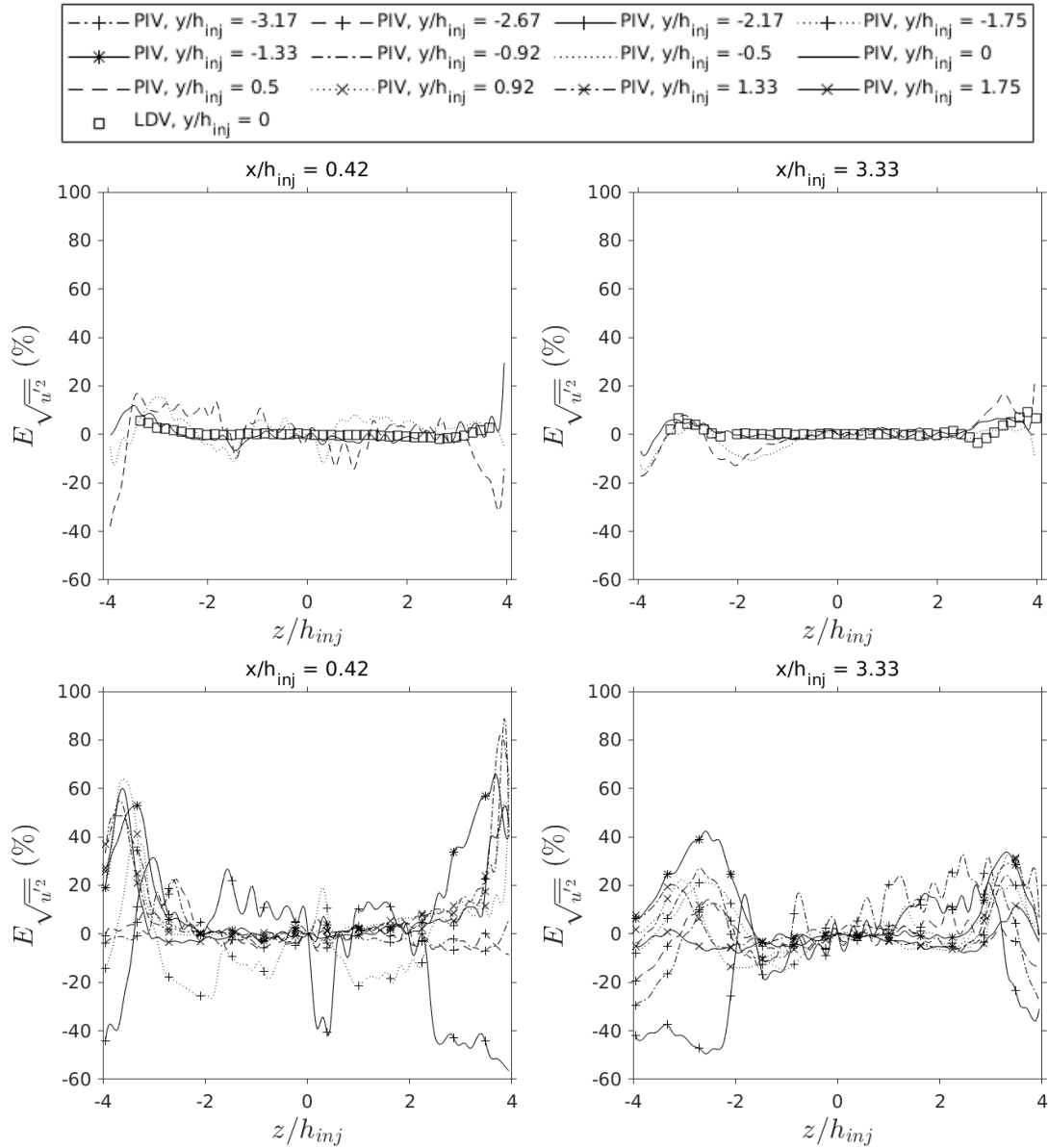
Não foi possível calcular a bidimensionalidade de  $\bar{v}$ , pois este parâmetro não foi medido nas seções horizontais. Também não foi possível estimar a bidimensionalidade de  $\sqrt{v'^2}$  a partir de  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{w'^2}$  pois a anisotropia é elevada nas seções horizontais.

Figura 5.32 - Bidimensionalidade de  $\bar{u}$  na região principal, calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,24 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de  $\bar{u} = \pm 0,01 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.33 - Bidimensionalidade de  $\sqrt{u'^2}$  na região principal, calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções horizontais). PIV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,21 \text{ m/s}$ . LDV: Incerteza média de  $\sqrt{u'^2} = \pm 0,01 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Pode-se observar que, em geral, a bidimensionalidade das variáveis  $\bar{u}$  e  $\sqrt{u'^2}$  está no intervalo de  $-15\%$  a  $15\%$  no intervalo de  $15 \text{ mm}$  a  $15 \text{ mm}$  de distância do centro do canal, isto é  $1/3$  do canal. Na seção horizontal  $y/h_{inj} = 0$ , verifica-se que a bidimensionalidade de  $\bar{u}$  com PIV na estação  $x/h_{inj} = 0,42$  é menor em  $z/h_{inj} \geq 2$  e em  $z/h_{inj} \leq -2$  em relação bidimensionalidade de  $\bar{u}$  com LDV nestas mesmas

regiões. Pode-se constatar também que na estação  $x/h_{inj} = 3,33$  e em  $y/h_{inj} = 0$ ,  $E_{\bar{u}}$  com PIV diverge pouco com  $E_{\bar{u}}$  com LDV em  $z/h_{inj} \leq -2$ , mas diverge bastante em  $z/h_{inj} \geq 2$ . Com relação aos valores de  $E_{\sqrt{u'^2}}$  com PIV e LDV em  $x/h_{inj} = 0,42$ , observou-se pouca diferença entre as duas técnicas. Mas em  $x/h_{inj} = 3,33$ , em  $z/h_{inj} \in [2,5; 3,5]$ , a diferença entre os valores da bidimensionalidade de  $\sqrt{u'^2}$  das duas técnicas é maior.

## 5.6 Intensidade turbulenta

As Figuras 5.34 a 5.37 mostram os perfis da intensidade turbulenta das seções horizontais e verticais. O parâmetro caracterizador em questão é definido como sendo  $\sqrt{k}/U_m$ , onde  $k$  é a energia cinética turbulenta, conforme mostra a Tabela 2.3. Também foi assumido para o cálculo de  $k$  que  $\overline{w'^2} = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$  nas seções verticais (SANQUER, 1998). Nas seções horizontais, a tensão normal turbulenta  $\overline{v'^2}$  não foi considerada.

Similarmente daquilo que foi observado nas flutuações médias, a intensidade turbulenta atinge seus maiores valores nas proximidades das paredes laterais e nas zonas de recirculação, conforme observado nos perfis das Figuras 5.34 e 5.36. Estas características da intensidade turbulenta também podem ser observadas nas Figuras 5.35 e 5.37. Observa-se que no perfil da seção horizontal  $y/h_{inj} = 0$  e da estação  $x/h_{inj} = 0,42$ , que é apresentado pela Figura 5.34, o valor de  $\sqrt{k}/U_m$  em  $z/h_{inj} = 4$  atinge um valor superior a 0,2. Esta flutuação de  $\sqrt{k}/U_m$  é resultado da baixa qualidade das medições com PIV na borda da área de visualização da câmera CCD. Tal flutuação pode ser observada em alguns perfis das seções horizontais apresentadas pela Figura 5.37. Nas seções verticais, apresentadas pelas Figuras 5.34 e 5.35, verifica-se que  $\sqrt{k}/U_m > 0,2$  na interface entre as zonas de recirculação, mas  $\sqrt{k}/U_m < 0,2$  em  $x/h_{inj} \leq 1,33$  entre os injetores. Verifica-se também que  $\sqrt{k}/U_m \in [0,1; 0,2]$  em  $y/h_{inj} = 0$  e  $y/h_{inj} = \pm 2,7$ . Isso se deve à presença das camadas limite turbulentas próximas das paredes laterais e ao cisalhamento existente na interface entre as zonas de recirculação e o escoamento principal.

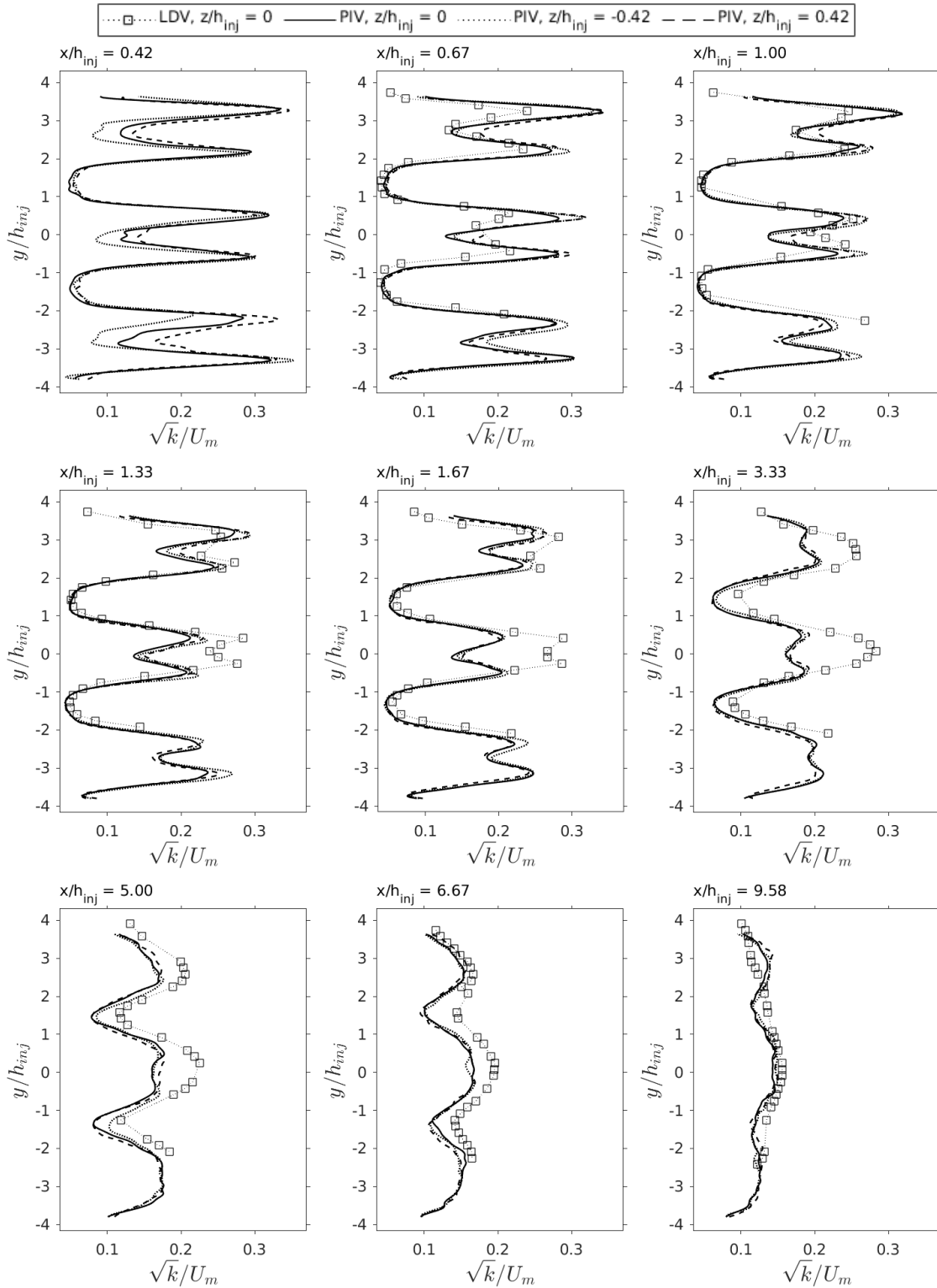
Pode-se verificar que os perfis de  $\sqrt{k}$  das seções verticais  $z/h_{inj} = \pm 0,42$  e das seções horizontais  $y/h_{inj} = \pm 0,5$ , que são apresentados pelas Figuras 5.34 e 5.36, não são completamente simétricas com relação a seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  e a seção horizontal  $y/h_{inj} = 0$ , respectivamente. Verifica-se nas seções verticais  $z/h_{inj} = \pm 2,92$  e  $z/h_{inj} = \pm 2,5$ , que são apresentadas pela Figura 5.35, que os perfis de  $\sqrt{k}$ , em geral, não convergem com os perfis das demais seções verticais, assim como foi constatado nos perfis de  $\sqrt{u'^2}$  e de  $\sqrt{v'^2}$ . Sobre as seções horizontais  $y/h_{inj} \in$



$\{-3,17; -2,67; -2,17\}$ , que são apresentadas pela Figura 5.37, verifica-se que os perfis de  $\sqrt{k}$  são distintos com relação aos demais, pois estes estão na mesma altura do injetor inferior e a qualidade das medições com PIV é baixa. Por fim, pode-se inferir a partir da análise dos perfis das seções horizontais e verticais, que a energia cinética turbulenta é gerada nas zonas de recirculação, nas regiões de cisalhamento intenso e nas regiões próximas as paredes e dissipadas ao longo de  $x/h_{inj}$ .

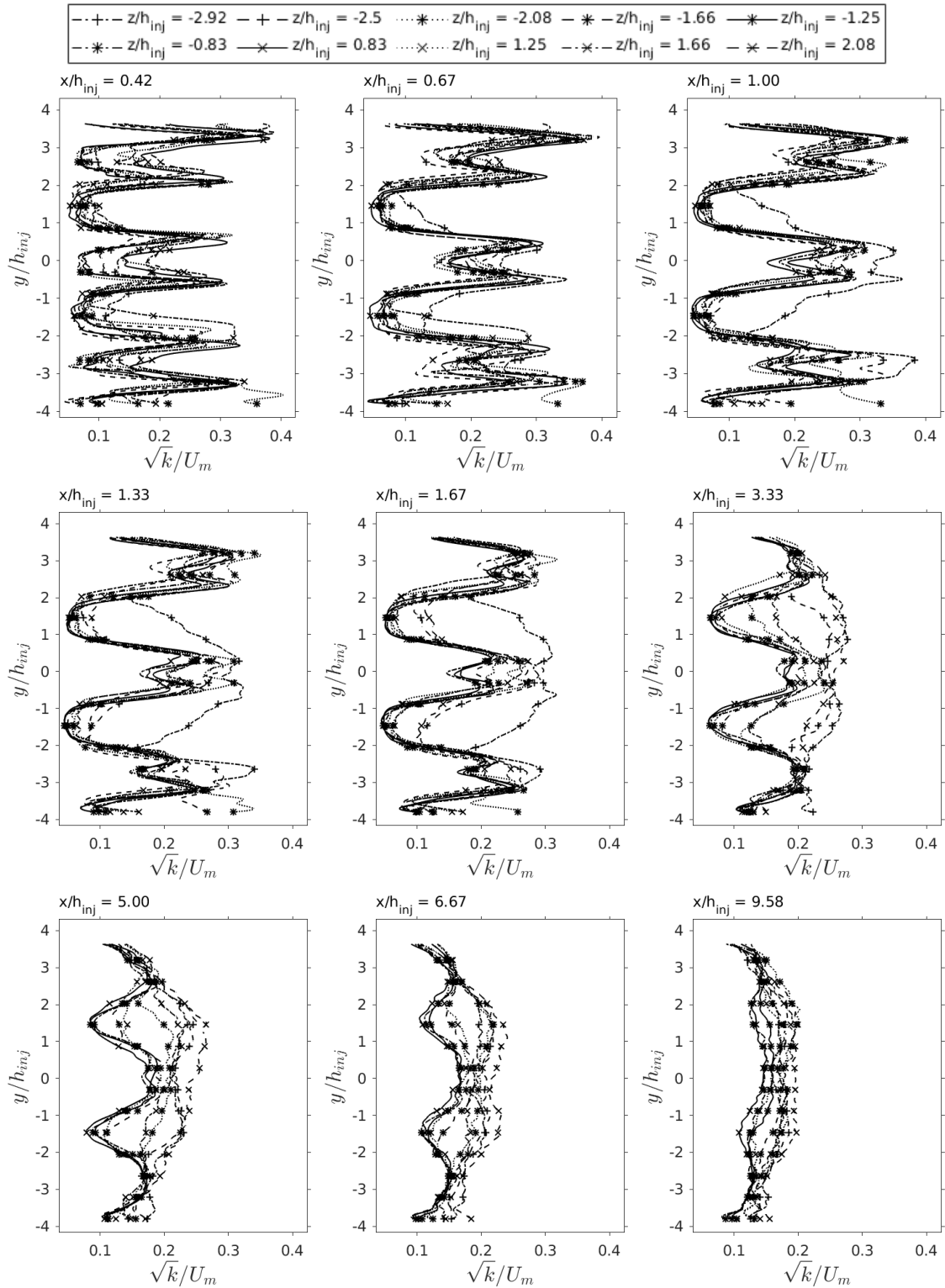
Comparando os resultados da intensidade turbulenta obtidos com PIV com os do LDV, que são apresentados pela Figura 5.34, pode-se verificar que não há uma concordância total entre os resultados. As diferenças das duas técnicas são maiores nos valores máximos de  $\sqrt{k}$ , principalmente em  $y/h_{inj} \in [-1; 1]$ , conforme observado nos perfis de  $\sqrt{u'^2}$  e  $\sqrt{v'^2}$  na Seção 5.4. Embora exista diferença entre as duas técnicas, a intensidade turbulenta de ambas mostram as regiões de cisalhamento intenso existentes em torno das zonas de recirculação.

Figura 5.34 - Perfis transversais verticais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $k = \pm 0,80 J$ . LDV: Incerteza média de  $k = \pm 0,08 J$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



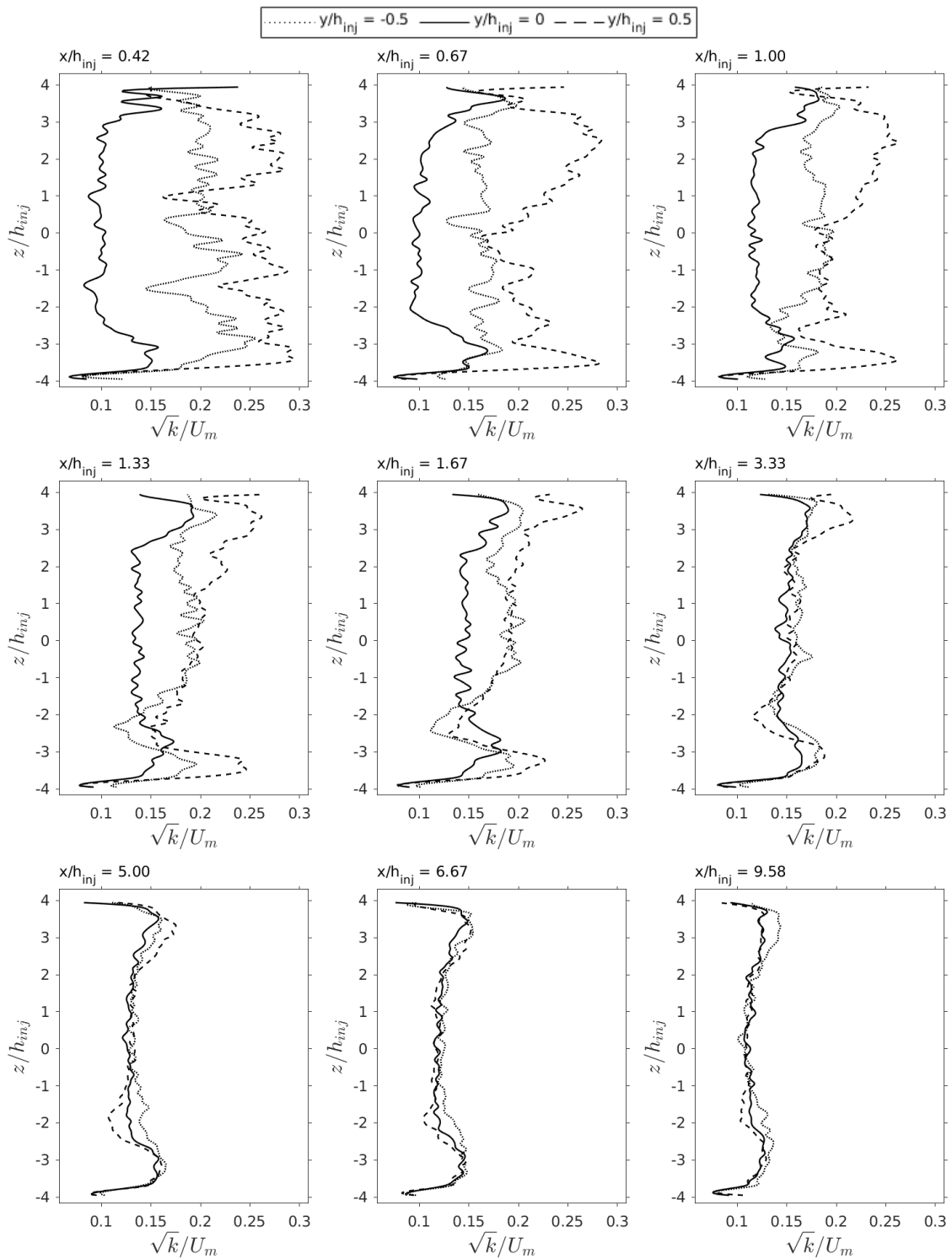
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.35 - Perfis transversais verticais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $k = \pm 0,94 J$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



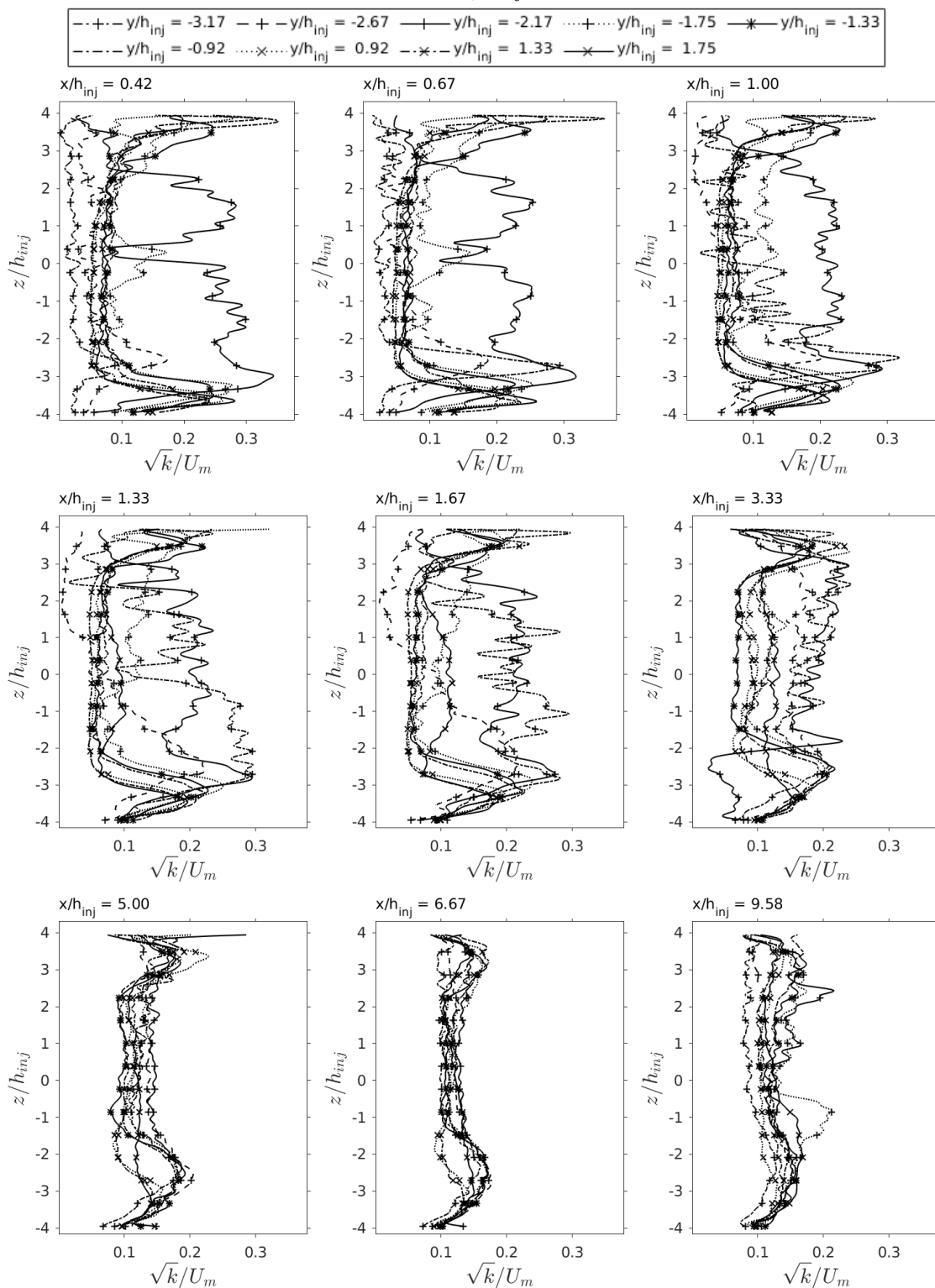
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.36 - perfis transversais horizontais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $k = \pm 0,52 J$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.37 - perfis transversais horizontais da intensidade turbulenta na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $k = \pm 0,43 J$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

## 5.7 Coeficientes de anisotropia

Nesta seção serão apresentados e analisados os coeficientes de anisotropia do tensor de Reynolds do escoamento inerte turbulento da região principal da câmara de combustão. O coeficiente de correlação  $C_{u_i u_j}$ , o coeficiente de anisotropia  $A_{u_i u_j}$  e a razão de anisotropia  $R_{u_i u_j}$  são definidos como sendo:

$$C_{u_i u_j} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{\sqrt{\overline{u'^2_i} \overline{u'^2_j}}}, \quad A_{u_i u_j} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{k}, \quad R_{u_i u_j} = \frac{\overline{u'^2_i}}{\overline{u'^2_j}}, \quad i \neq j.$$

Foi assumido que  $\overline{w'^2} = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$  para os coeficientes das seções verticais (TREVISAN, 2018; SANQUER, 1998). Para os coeficientes das seções horizontais, foi considerado apenas as tensões normais turbulentas associadas a velocidade longitudinal e transversal medidas nestas seções, em outras palavras, apenas  $\overline{u'^2}$  e  $\overline{w'^2}$  foram considerados.

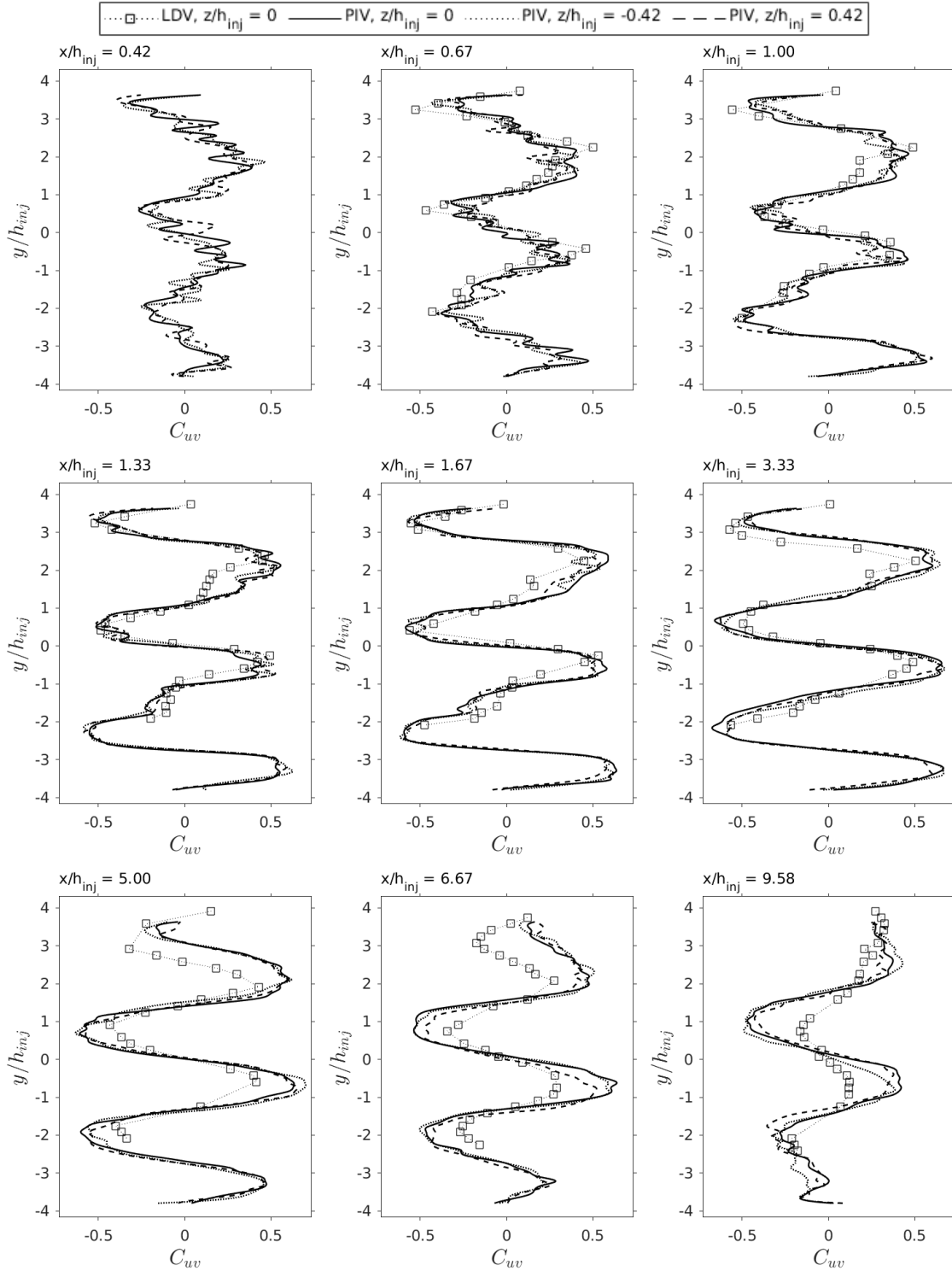
Nos perfis dos coeficientes  $C_{uv}$  e  $A_{uv}$  das seções verticais, os quais são apresentados pelas Figuras 5.38, 5.39, 5.40 e 5.41, observa-se que  $C_{uv}$  e  $A_{uv}$  atingem valores próximos de zero nas mesmas alturas dos centros das faces posteriores dos injetores. Verifica-se também que os menores e maiores valores destes coeficientes estão nas mesmas alturas das bordas das esteiras. Além disso, verifica-se que no intervalo de  $x/h_{inj} = 0,67$  a  $x/h_{inj} = 6,67$ , os maiores e menores valores de  $C_{uv}$  e  $A_{uv}$  não diminuem progressivamente. Somente na estação  $x/h_{inj} = 9,58$  que os máximos e os mínimos dos coeficientes diminuem, principalmente em  $y/h_{inj} \in [-3; -4]$ . Além disso os valores de  $C_{uv}$  e  $A_{uv}$  são significativos nas bordas das faces posteriores dos injetores, onde são gerados os vórtices. Essas características mostram que o cisalhamento das esteiras no escoamento principal e a geração de vórtices aumentam a anisotropia da turbulência. Os valores de  $C_{uv}$  e  $A_{uv}$  na estação  $x/h_{inj} = 9,58$  mostram que a intensidade do cisalhamento das esteiras é reduzida no sentido longitudinal.

Os perfis de  $R_{uv}$ , que são apresentados pelas Figuras 5.42 e 5.43, mostram que  $R_{uv} \simeq 1$ , isto é,  $\overline{u'^2} \simeq \overline{v'^2}$ , nas alturas dos centros das faces posteriores dos injetores e entre os injetores. No entanto,  $R_{uv}$  fica na faixa de 2 a 3 nas alturas das bordas das faces posteriores dos injetores no intervalo de  $x/h_{inj} = 0,42$  a  $x/h_{inj} = 3,33$ . Essa anisotropia apresentada por  $R_{uv}$  é causada pelos movimentos normais alternados e pela produção de vórtices. A partir de  $x/h_{inj} = 5$  não há grande diferença entre os tensores normais turbulentos.

Quanto aos coeficientes  $C_{uw}$  e  $A_{uw}$ , apresentados pelas Figuras 5.44, 5.45, 5.46 e 5.47, verifica-se que os valores de  $C_{uw}$  e  $A_{uw}$ , no intervalo de  $x/h_{inj} = 0,42$  a  $x/h_{inj} = 1,67$  em geral, variam apenas na faixa de  $-0,2$  a  $0,2$ . Pode-se constatar que neste intervalo, os tensores normais turbulentos têm muito mais predomínio do que o tensor turbulento de cisalhamento  $\overline{u'w'}$ . Fora deste intervalo, isto é, a partir de  $x/h_{inj} = 3,33$ , há picos e vales próximos das paredes laterais de valores superiores a  $0,2$  e  $-0,2$  respectivamente, mas inferiores a  $1$ . Tais valores máximos e mínimos destes coeficientes se devem às camadas limites turbulentas próximas às paredes. Tal característica de  $C_{uw}$  e  $A_{uw}$  próximo as paredes mostram que a anisotropia é mais significativa nestas regiões. Sobre o coeficiente  $R_{uw}$ , verifica-se que os seus perfis, os quais são agrupados nas Figuras 5.48 e 5.49, excluindo os picos localizados próximos as paredes, em geral, tem valores em torno da faixa de  $1$  a  $2,5$ . Tal aspecto mostra que, na maior parte dos casos, a anisotropia do escoamento turbulento é menos intensa nas seções horizontais com relação aquela observada nas seções verticais.

Existe uma concordância satisfatória entre os valores dos coeficientes  $C_{uw}$  e  $A_{uw}$  do LDV e do PIV, exceto nos perfis das distâncias igual ou superiores a  $5$  em  $x/h_{inj}$ . No coeficiente  $R_{uw}$ , só em alguns pontos que os valores das duas técnicas são próximos. Observa-se que os valores máximos de  $R_{uw}$  com PIV são maiores que aqueles com LDV. Isso se deve ao fato do  $\overline{v'^2}$  ser melhor medido com LDV. Embora tenham diferenças, os valores de  $R_{uw}$  de ambas as técnicas mostram que  $\overline{u'^2}$  é superior a  $\overline{v'^2}$  nas regiões de cisalhamento intenso.

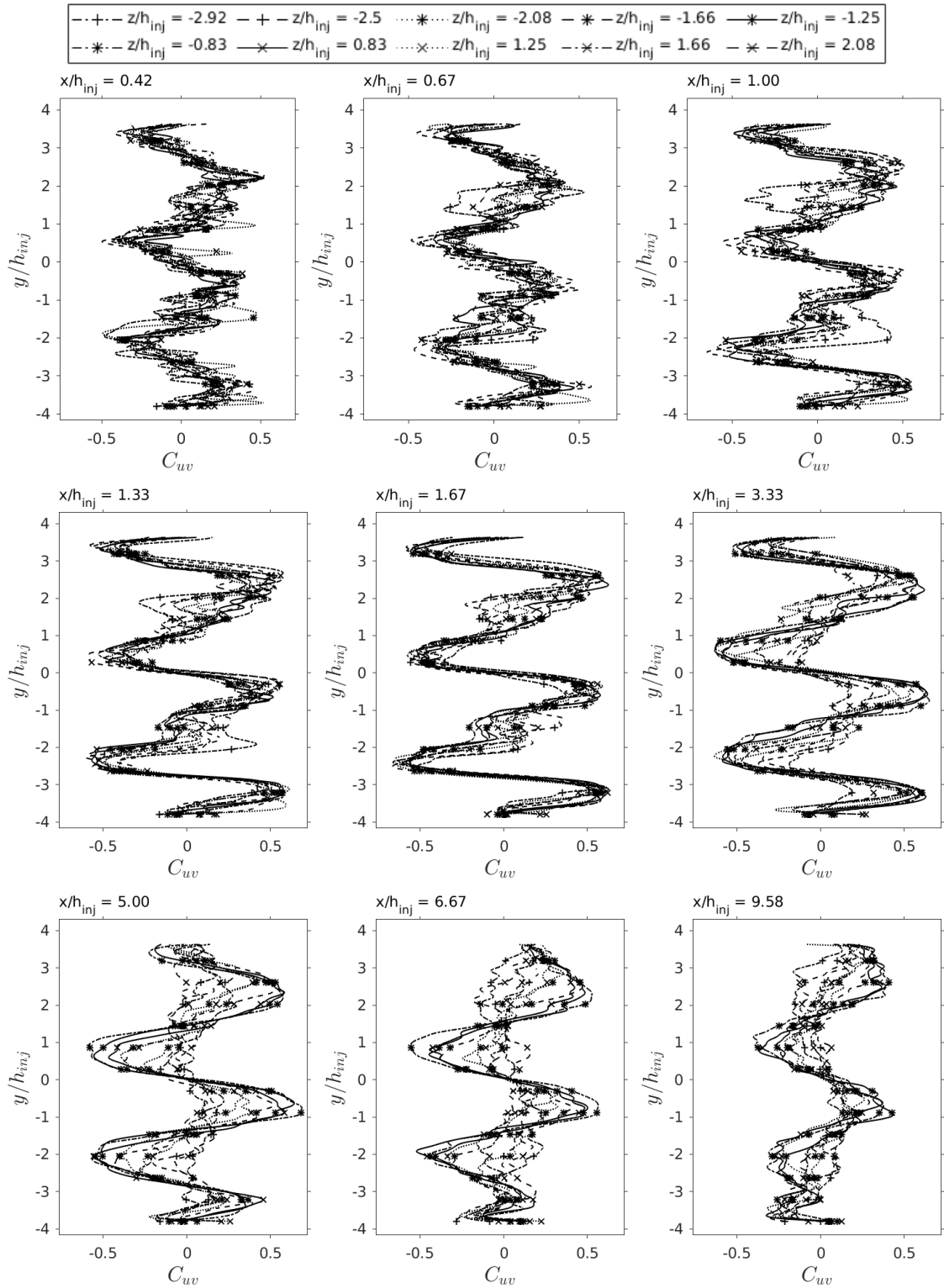
Figura 5.38 - Perfis transversais verticais dos coeficientes  $C_{uv}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $C_{uv} = \pm 0,12$ . LDV: Incerteza média de  $C_{uv} = \pm 0,02$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

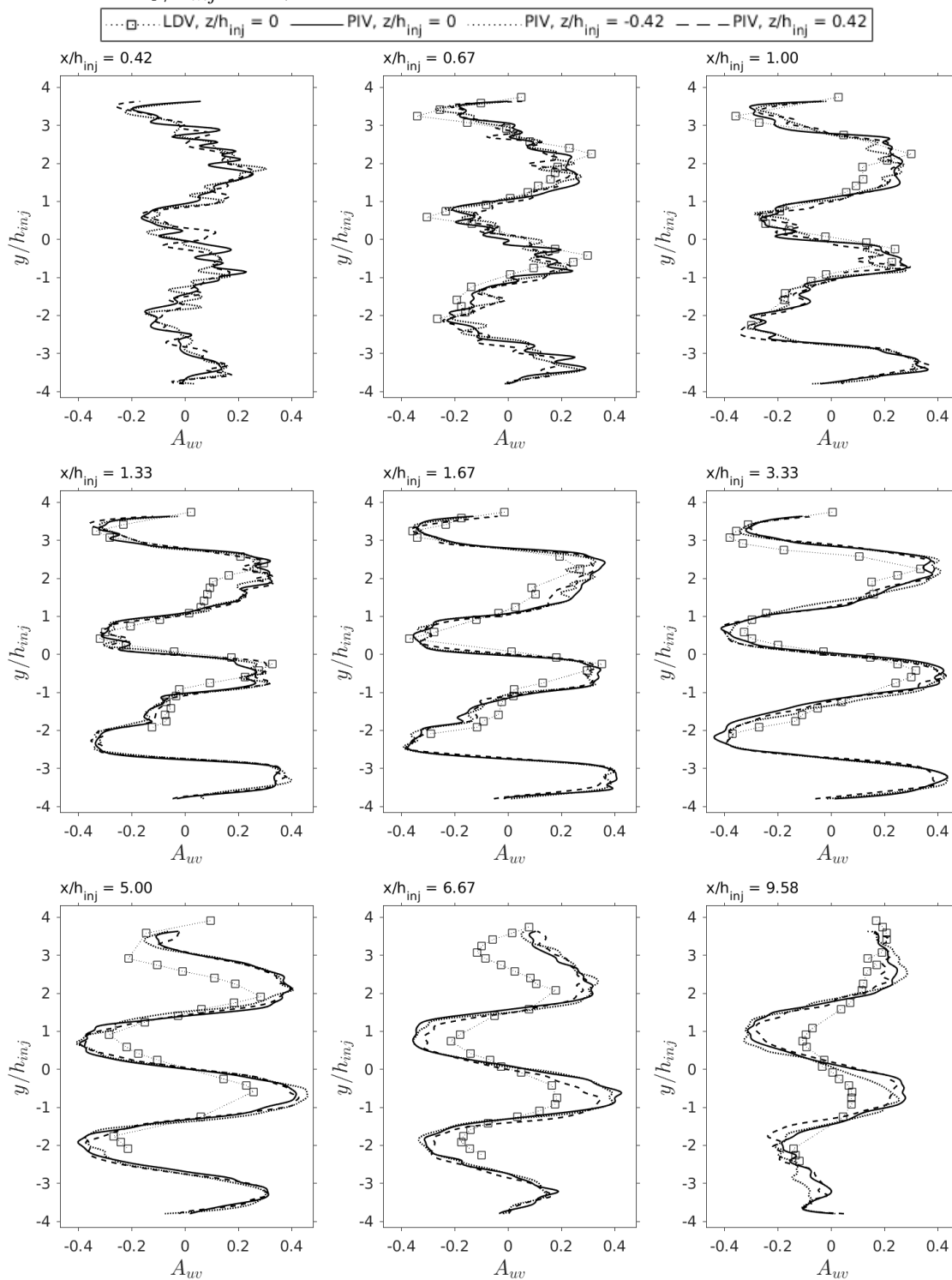


Figura 5.39 - Perfis transversais verticais dos coeficientes  $C_{uv}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $C_{uv} = \pm 0,11$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



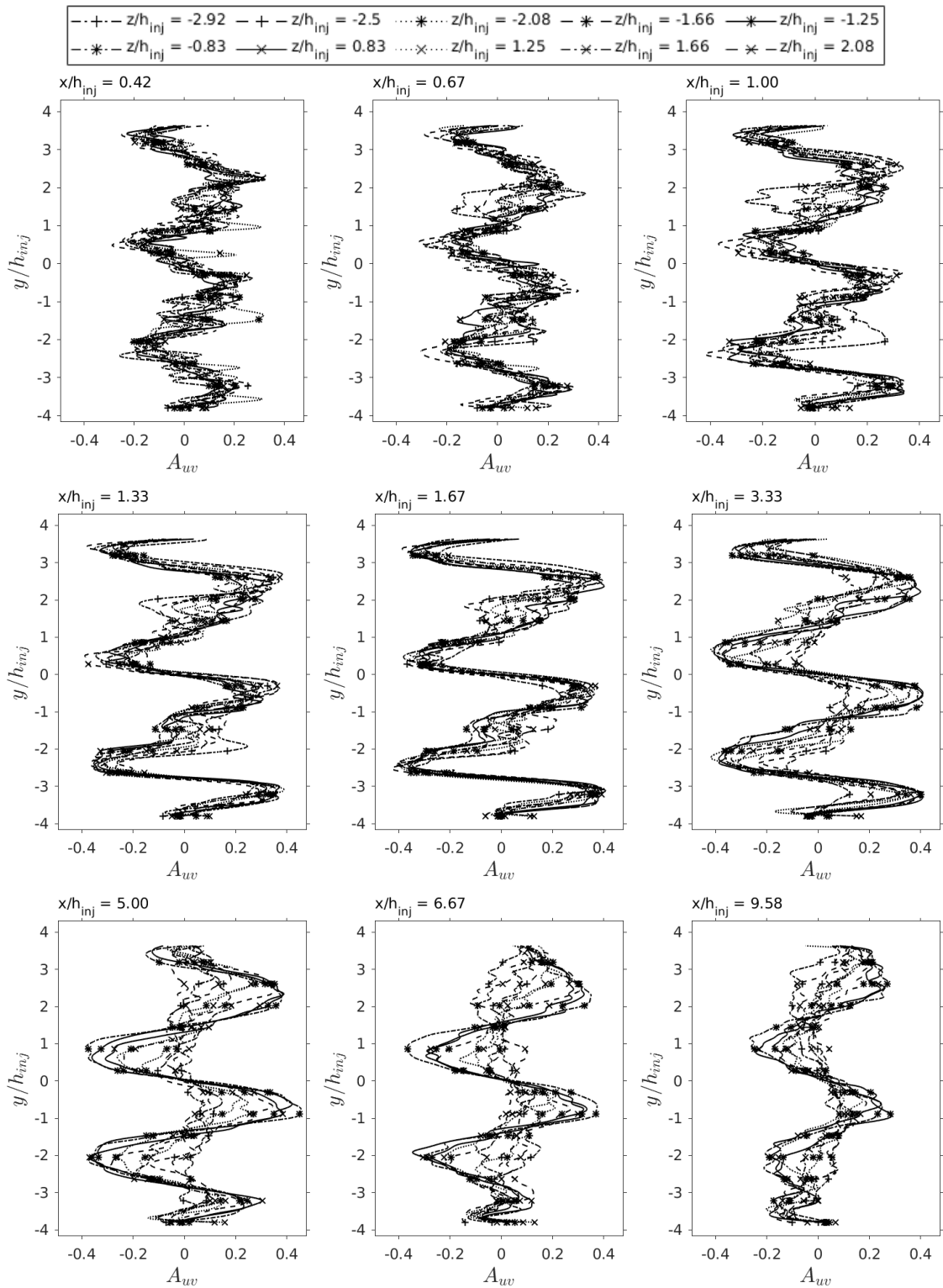
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.40 - Perfis transversais verticais dos coeficientes  $A_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $A_{uw} = \pm 0,04$ . LDV: Incerteza média de  $A_{uw} = \pm 0,02$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



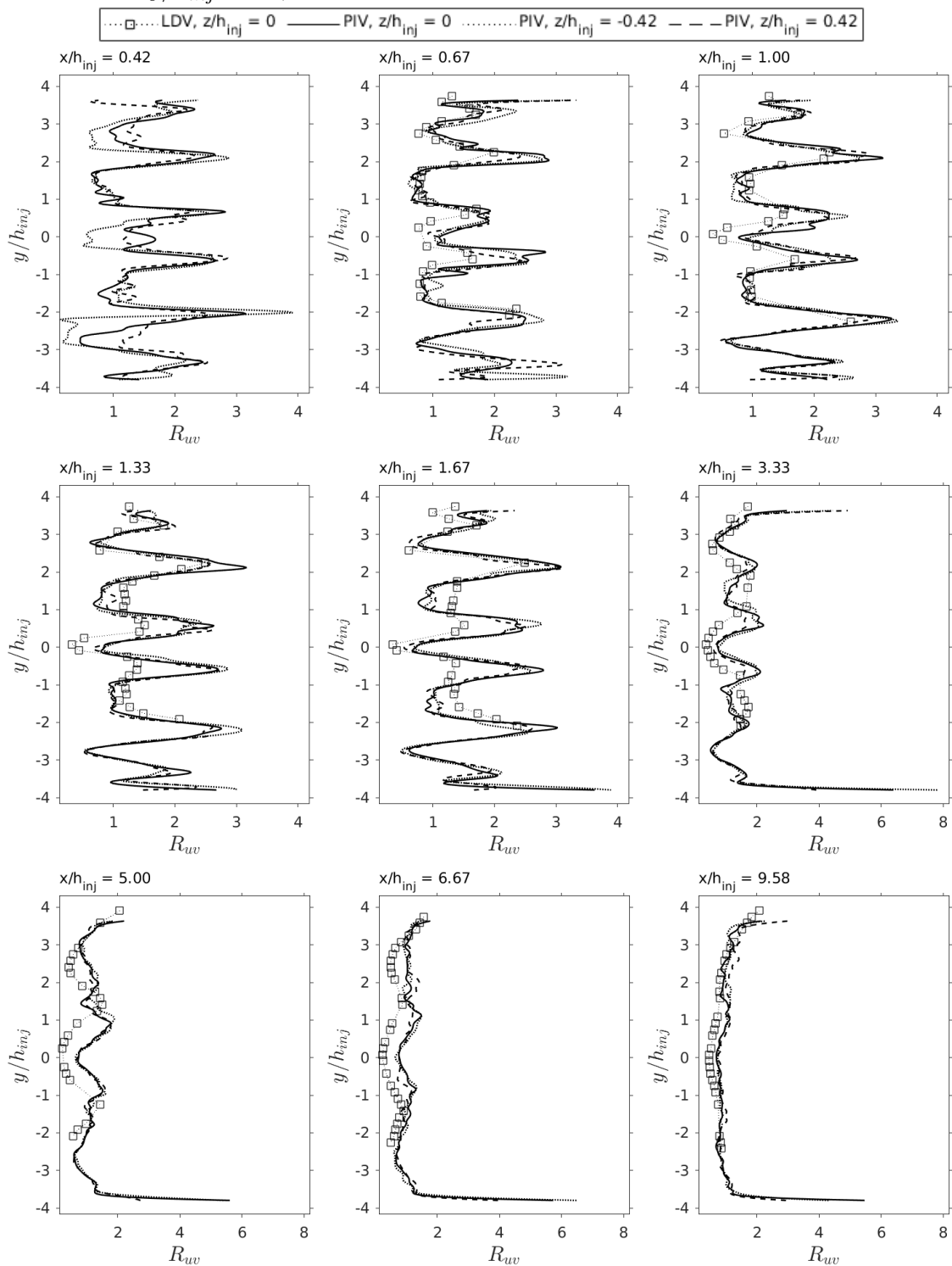
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.41 - Perfis transversais verticais dos coeficientes  $A_{uv}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $A_{uv} = \pm 0,04$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



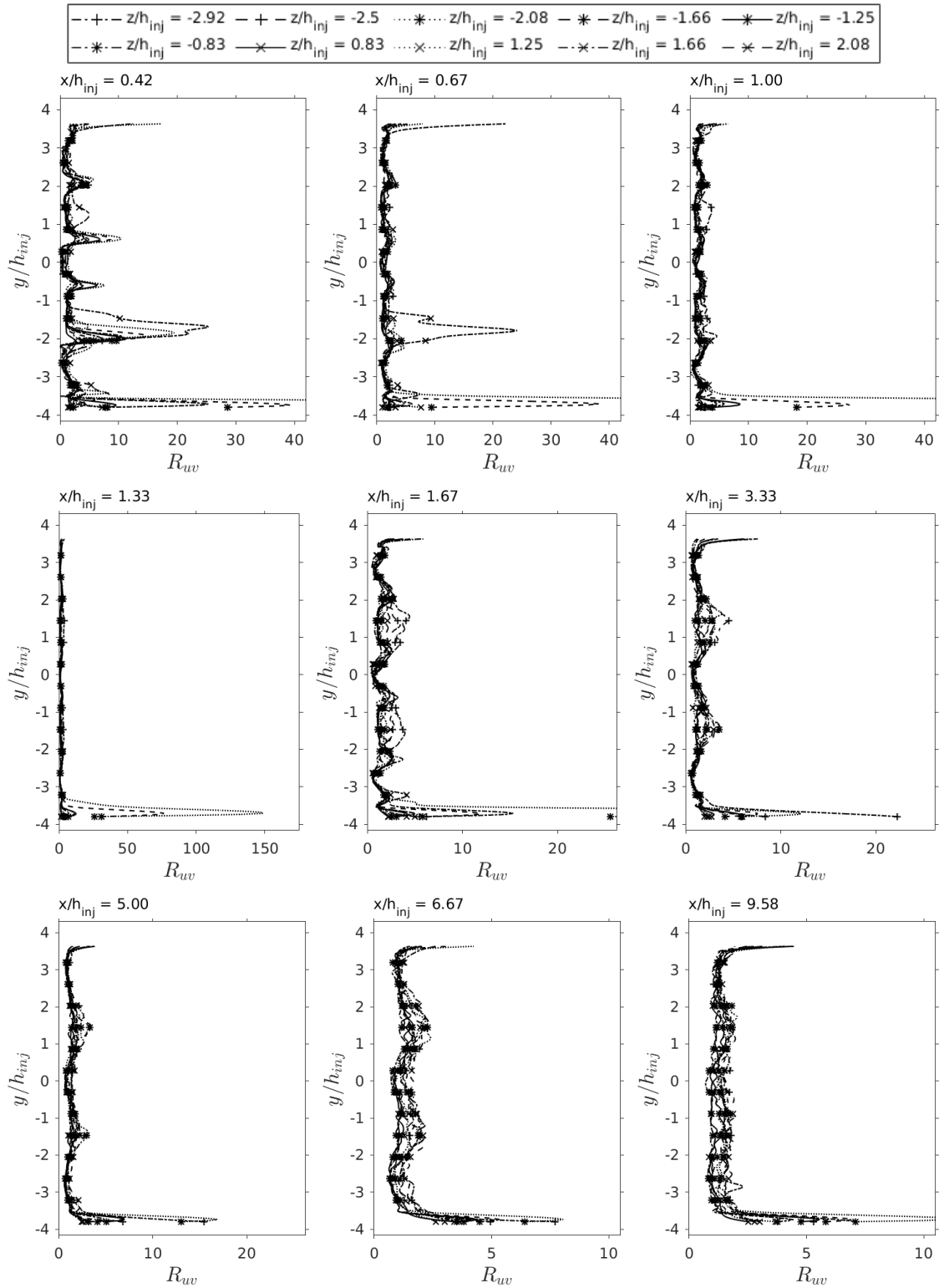
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.42 - Perfis transversais verticais do coeficiente  $R_{uv}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $R_{uv} = \pm 0,31$ . LDV: Incerteza média de  $R_{uv} = \pm 0,01$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



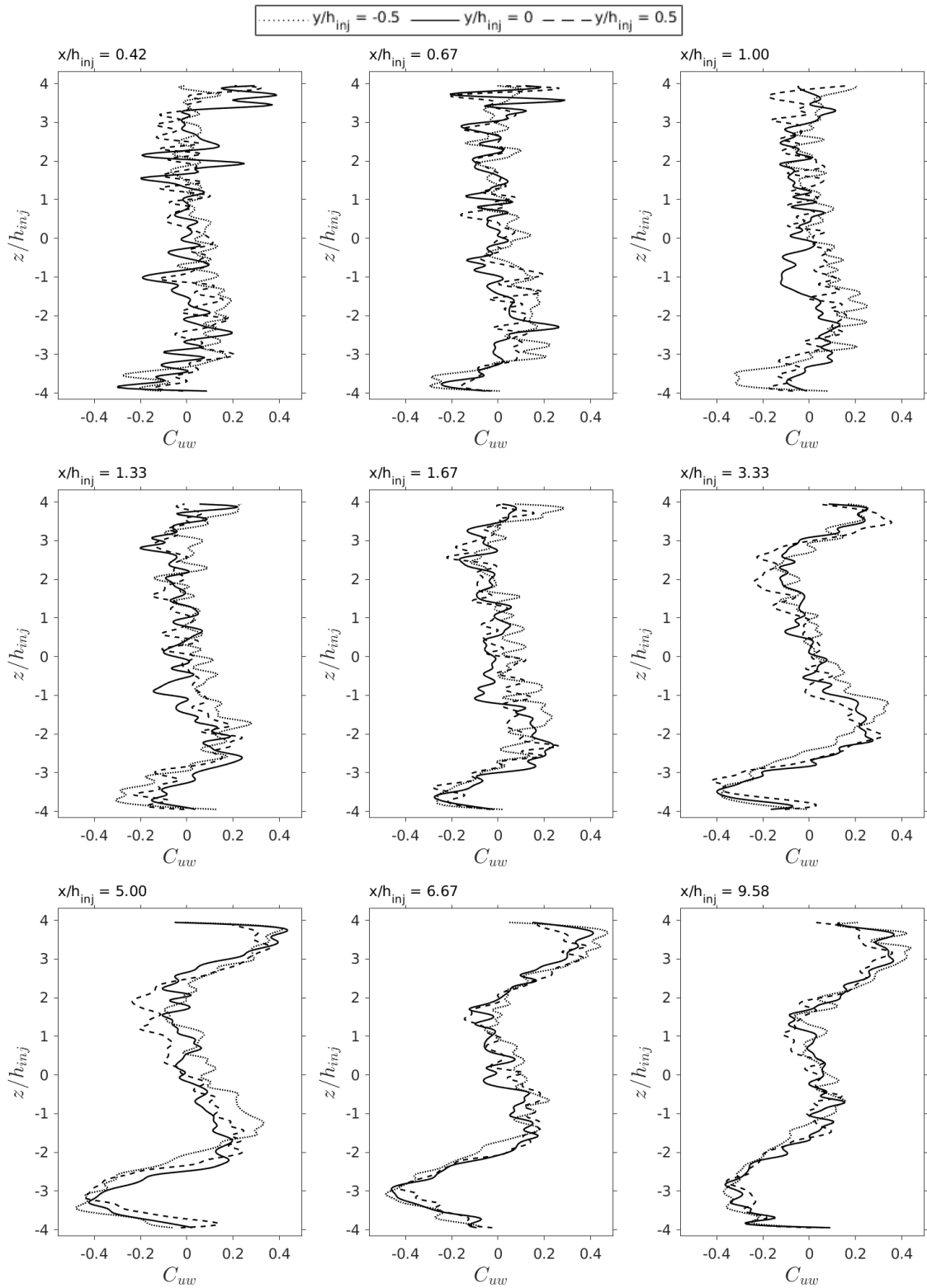
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.43 - Perfis transversais verticais do coeficiente  $R_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $R_{uw} = \pm 0,42$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



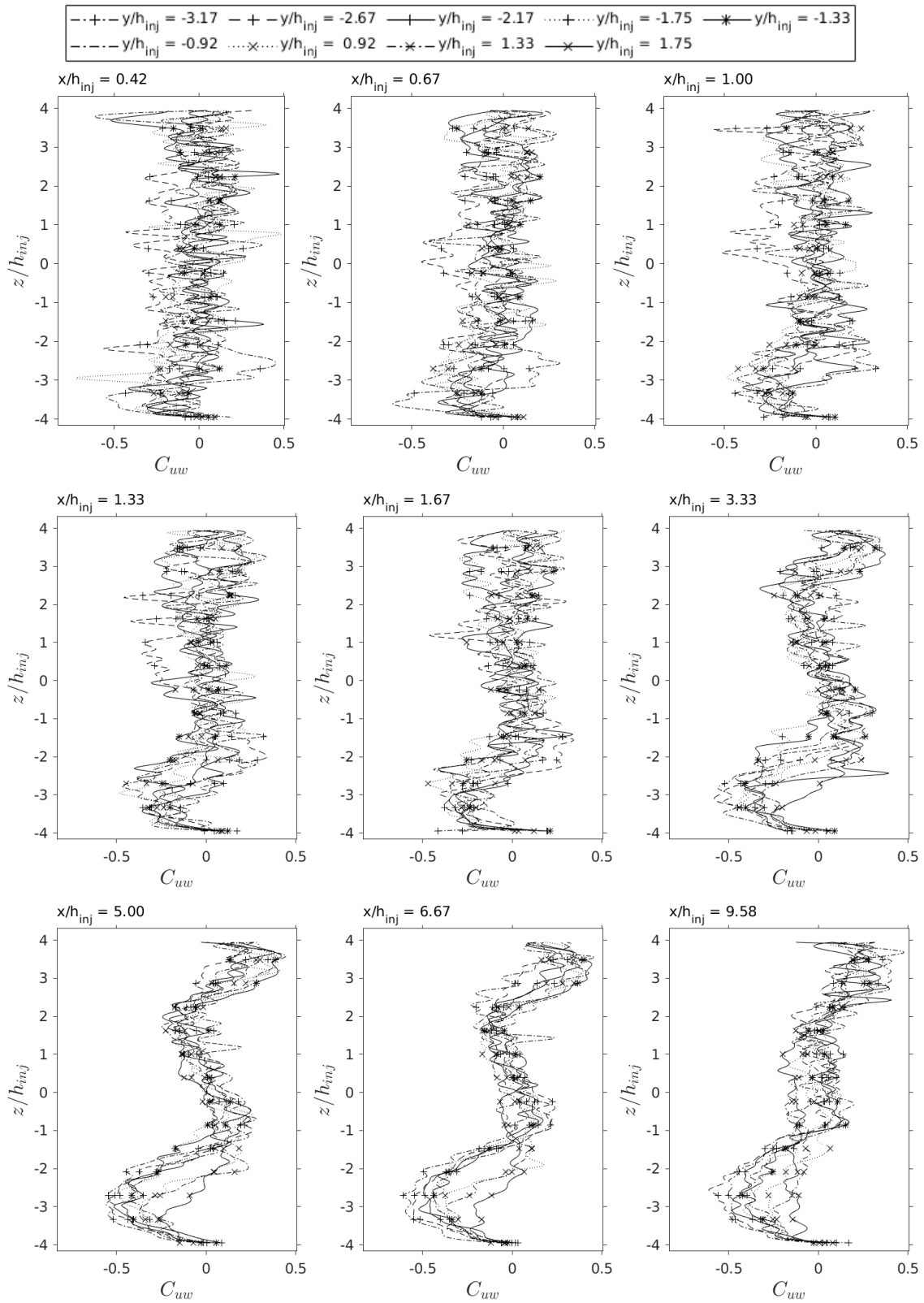
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.44 - perfis transversais horizontais do coeficiente  $C_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $C_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



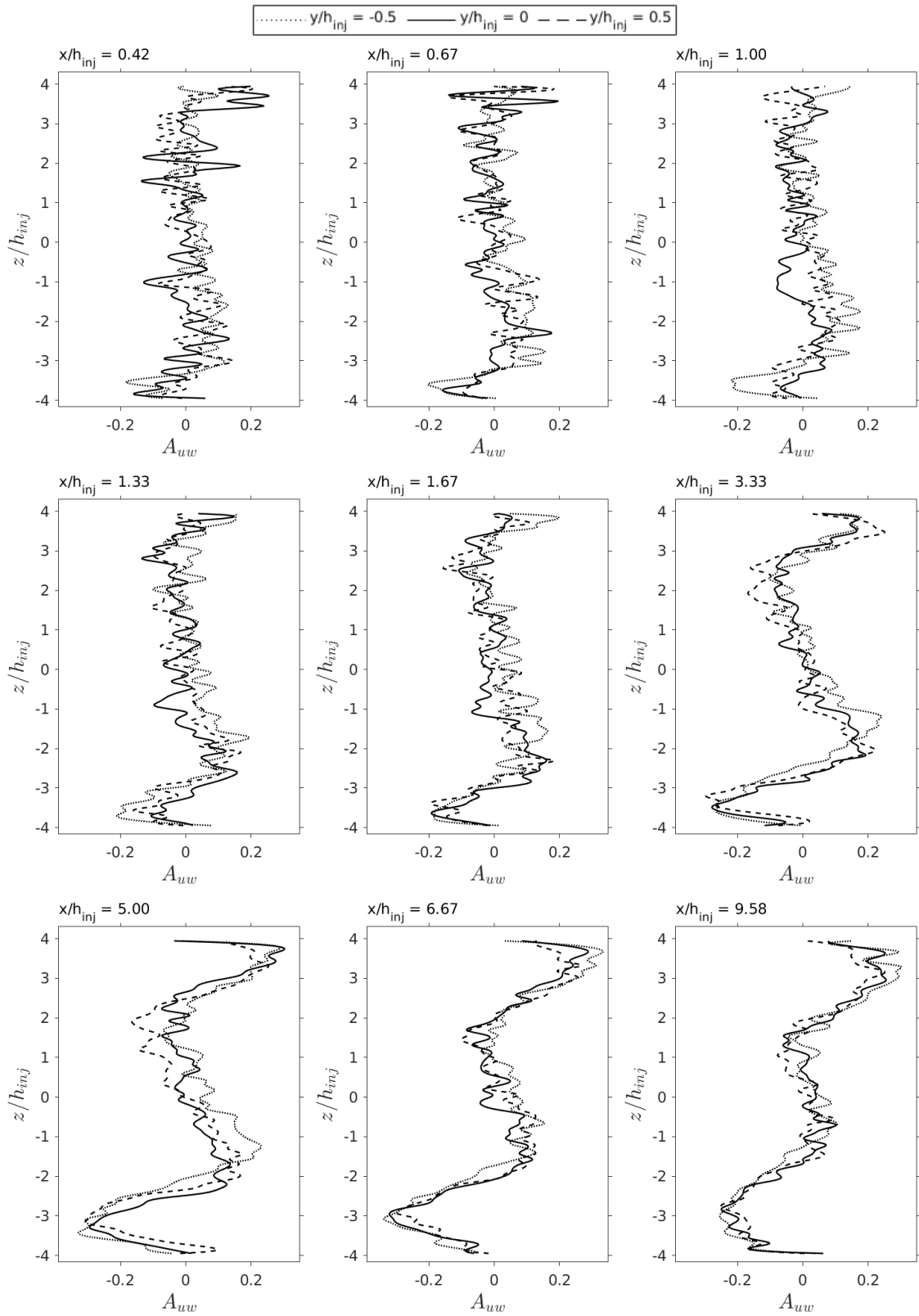
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.45 - perfis transversais horizontais do coeficiente  $C_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $C_{uw} = \pm 0,12$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

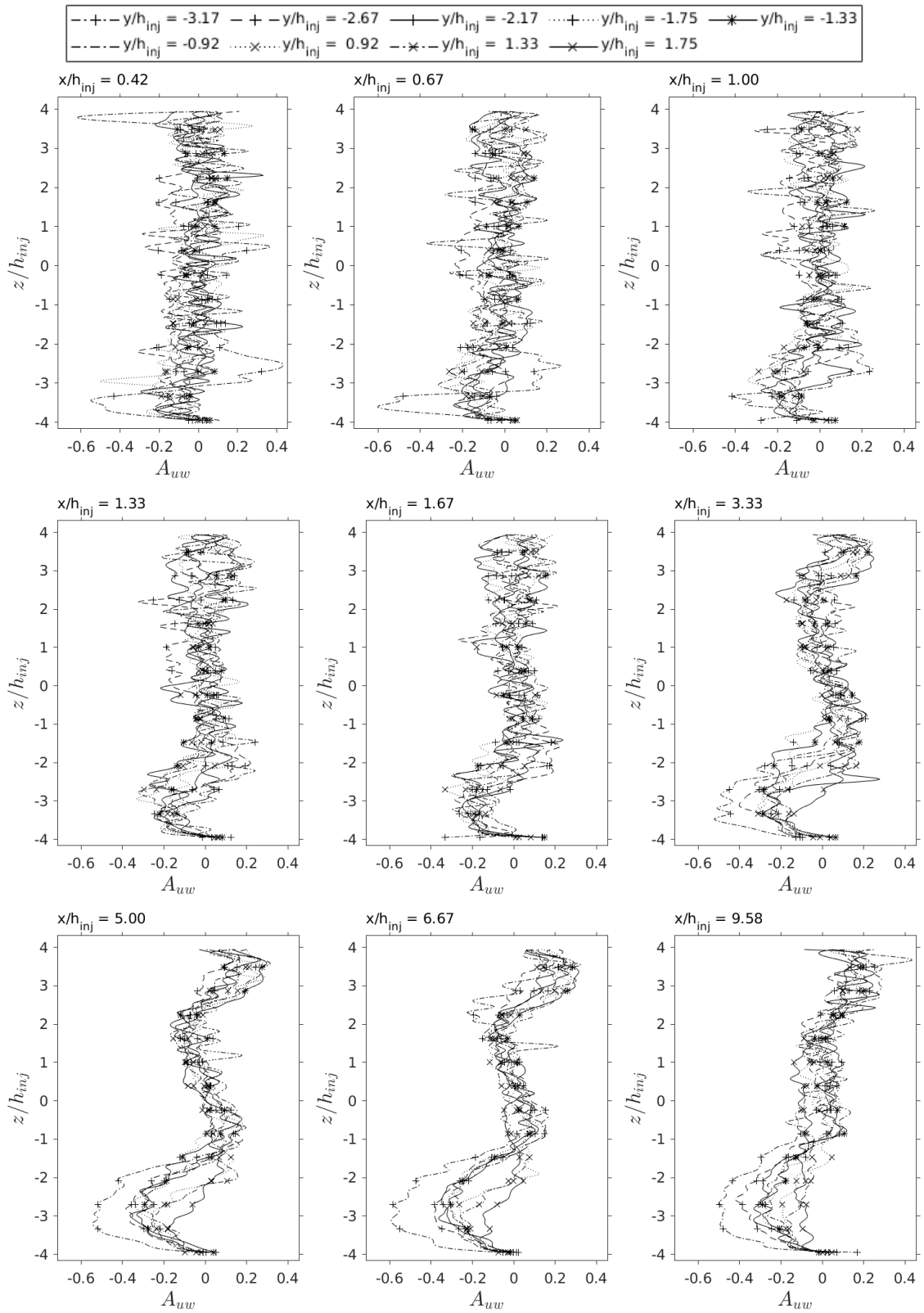
Figura 5.46 - perfis transversais horizontais do coeficiente  $A_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $A_{uw} = \pm 0,11$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

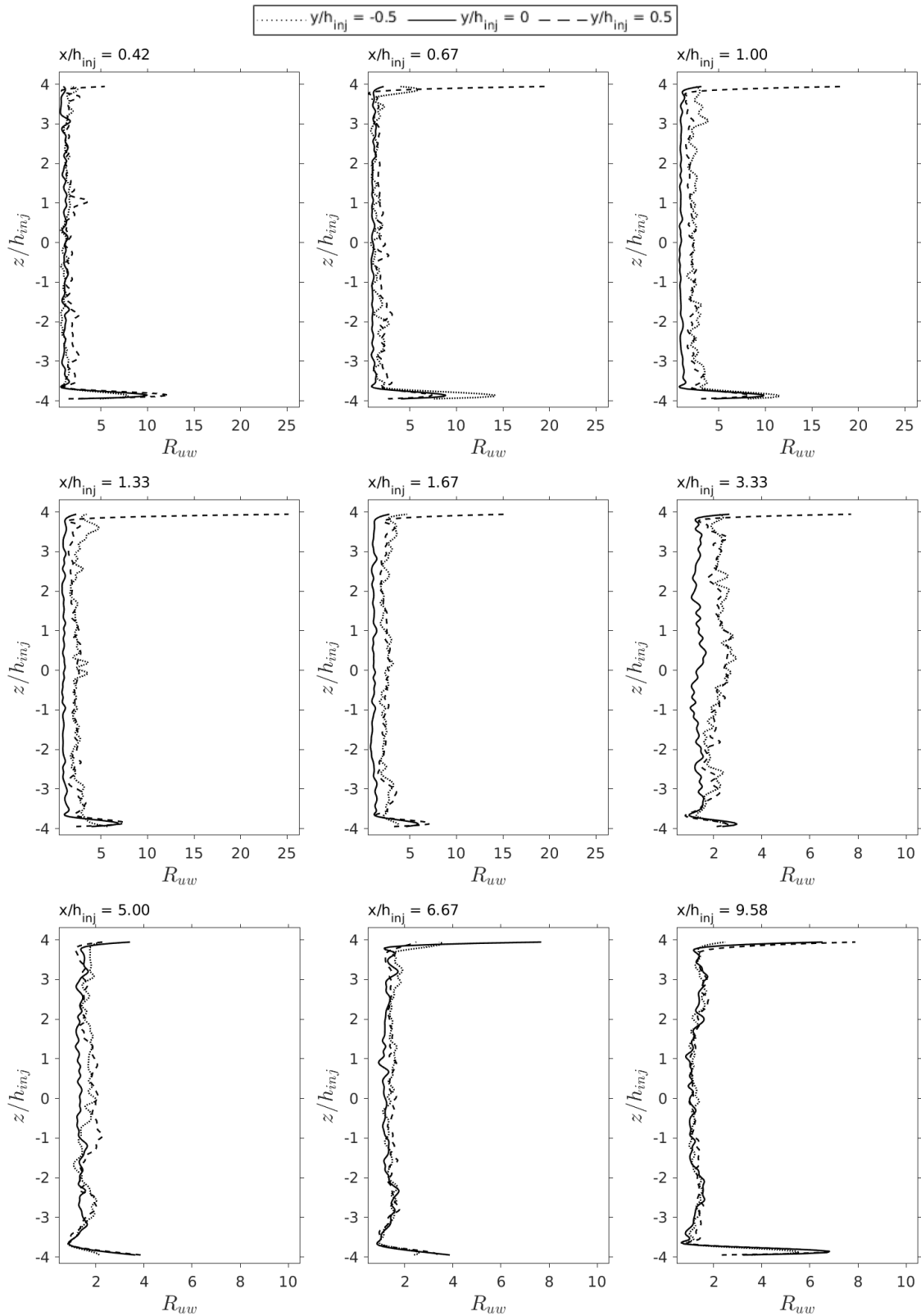


Figura 5.47 - perfis transversais horizontais do coeficiente  $A_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $A_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



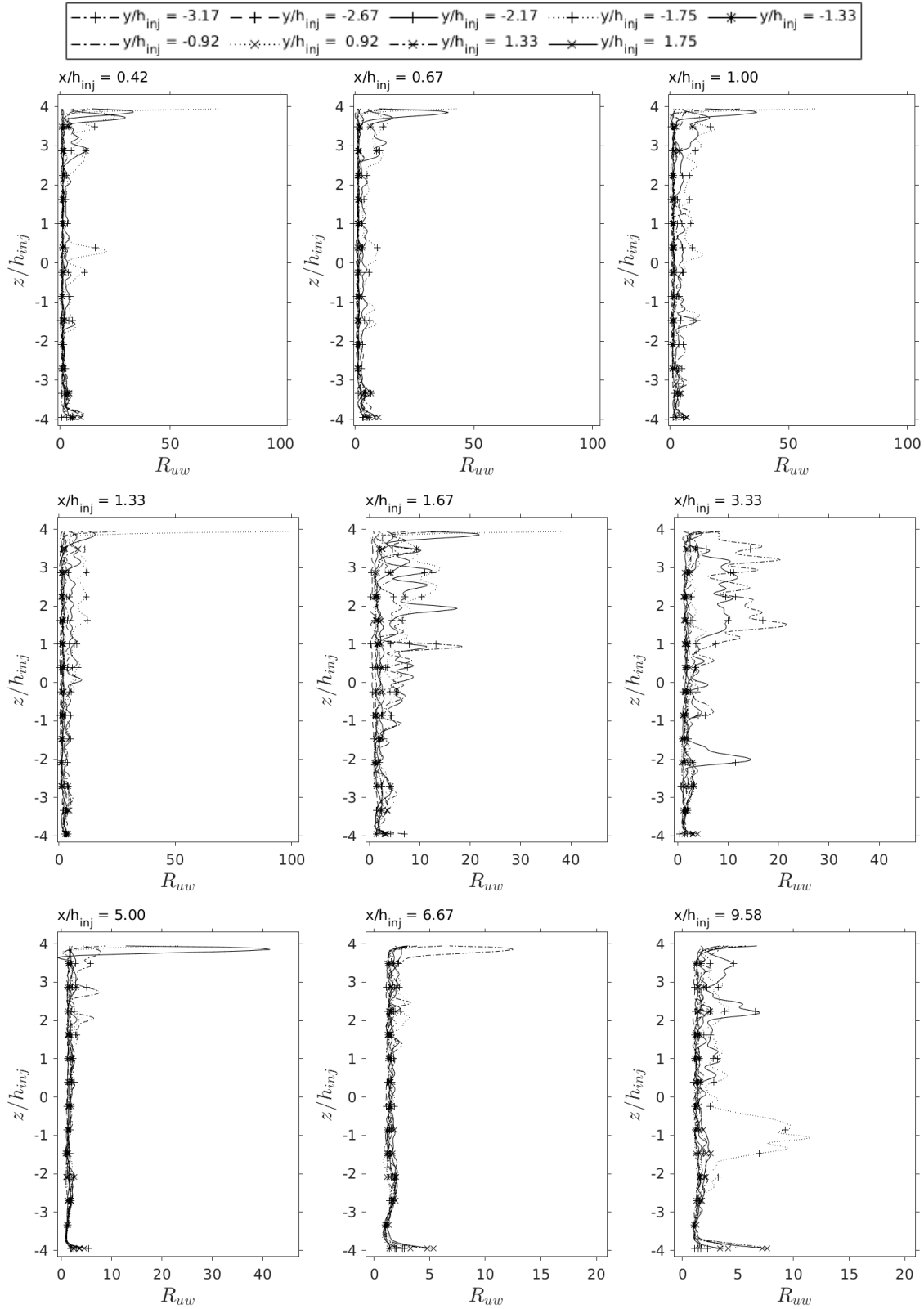
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.48 - perfis transversais horizontais do coeficiente  $R_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $R_{uw} = \pm 0,38$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.49 - perfis transversais horizontais do coeficiente  $R_{uw}$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $R_{uw} = \pm 0,69$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

## 5.8 Correlações espaciais

A presente seção é destinada a apresentar e analisar os diversos perfis e isocontornos das correlações espaciais das flutuações da velocidade longitudinal, da velocidade normal e da velocidade transversal do escoamento turbulento na região principal. Foram obtidas as correlações espaciais tanto das seções verticais quanto das seções horizontais. Os gráficos das correlações espaciais são divididos em três grupos distintos. O primeiro deles é composto pelos perfis das auto-correlações espaciais longitudinais para  $\vec{r}$  variável e  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (c, 0, 0)$ , onde  $c$  é uma constante. No segundo grupo há os perfis das correlações espaciais longitudinais, normais e transversais, nos quais um dado  $\xi_i$  é variável e os demais  $\xi_j$  nulos, em determinados pontos dos planos  $xy$  e  $xz$ . O terceiro e último grupo são os isocontornos das correlações espaciais em função de dois componentes de  $\vec{\xi}$  em determinados pontos da região principal. As equações das correlações espaciais estão na Tabela 2.4. Assim como nas correlações da região de entrada, os valores de  $\xi_1$  das correlações espaciais, cujo  $\xi_1$  é constante, são 1,41 *mm* para as seções verticais e 1,50 *mm* para as seções horizontais.

Algumas características das auto-correlações espaciais longitudinais dos perfis das seções horizontais, podem ser observadas nas Figuras 5.54, 5.55, 5.56 e 5.57. Nos perfis das seções que estão a jusante das faces posteriores dos injetores, as auto-correlações são baixas nas regiões próximas aos injetores, mas crescem no sentido longitudinal. Isso se deve à variação da faixa de tamanhos dos vórtices, pois há uma relação entre as correlações espaciais e o padrão dos vórtices do escoamento turbulento (TOWNSEND, 1976). O aumento das correlações espaciais longitudinais no sentido longitudinal implica na diminuição da faixa de tamanhos dos vórtices no escoamento turbulento, a qual é influenciada pela intensidade turbulenta. A faixa de tamanhos dos vórtices na região próxima aos injetores é mais ampla devido à produção de vórtices pelas camadas de cisalhamento localizadas nestas regiões. A partir de  $x/h_{inj} = 3,33$ , a auto-correlação de  $u'$ ,  $r_{uu}$ , e a auto-correlação de  $w'$ ,  $r_{ww}$ , atingem valores superiores a 0,8, pois nesta região a turbulência é menos intensa e é mais homogênea.

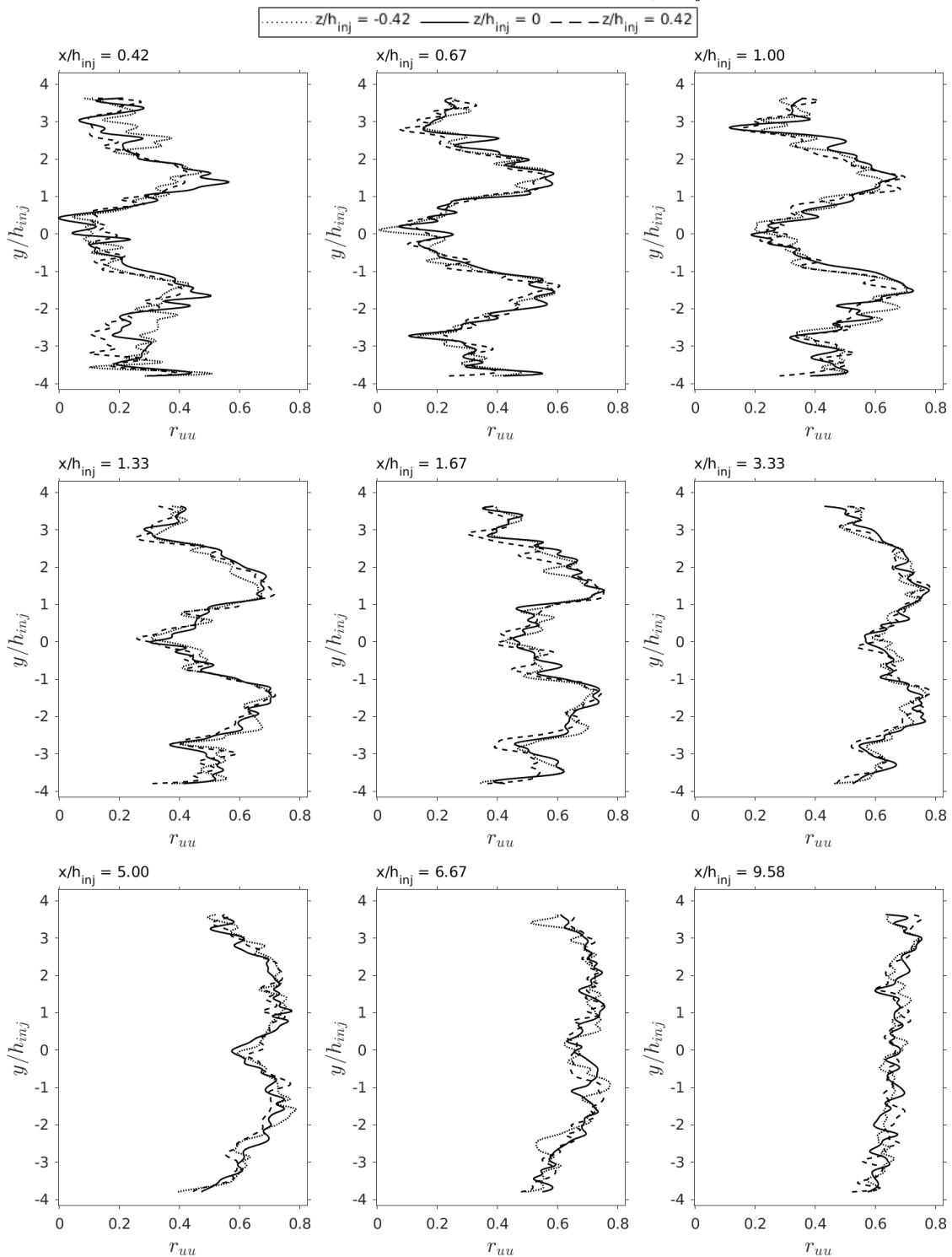
Somado a isso, nos perfis das seções que estão nas mesmas alturas do escoamento principal, isto é, entre os injetores, as auto-correlações são maiores no começo da região principal com relação as auto-correlações dos perfis das outras seções. Essa característica das auto-correlações no escoamento principal mostra que as faixas de tamanho dos vórtices é menor, pois a turbulência nestas regiões é menos intensa. Um outro aspecto das auto-correlações espaciais a ser observado é a diminuição dos seus

valores nas vizinhanças das paredes laterais. Isso se deve a ampliação da faixa de tamanhos dos vórtices no escoamento causada pelos fortes gradientes de velocidade próximos as paredes.

Nas seções verticais, os perfis das auto-correlações espaciais longitudinal de  $u'$  e de  $v'$ , exibidos pelas Figuras 5.50, 5.51, 5.52 e 5.53 mostram baixas correlações das estruturas coerentes nas zonas de recirculação e seus entornos. Somado a isso, ao longo de  $x/h_{inj}$ , as auto-correlações adquire um caráter mais homogêneo com valores superiores a 0,6. Essas características das auto-correlações espaciais mostram que a faixa de tamanhos dos vórtices do escoamento são maiores nas vizinhanças das zonas de recirculação. Este aumento da faixa de tamanhos dos vórtices é causado pela geração de vórtices pelas camadas de cisalhamento presentes nas zonas de recirculação.

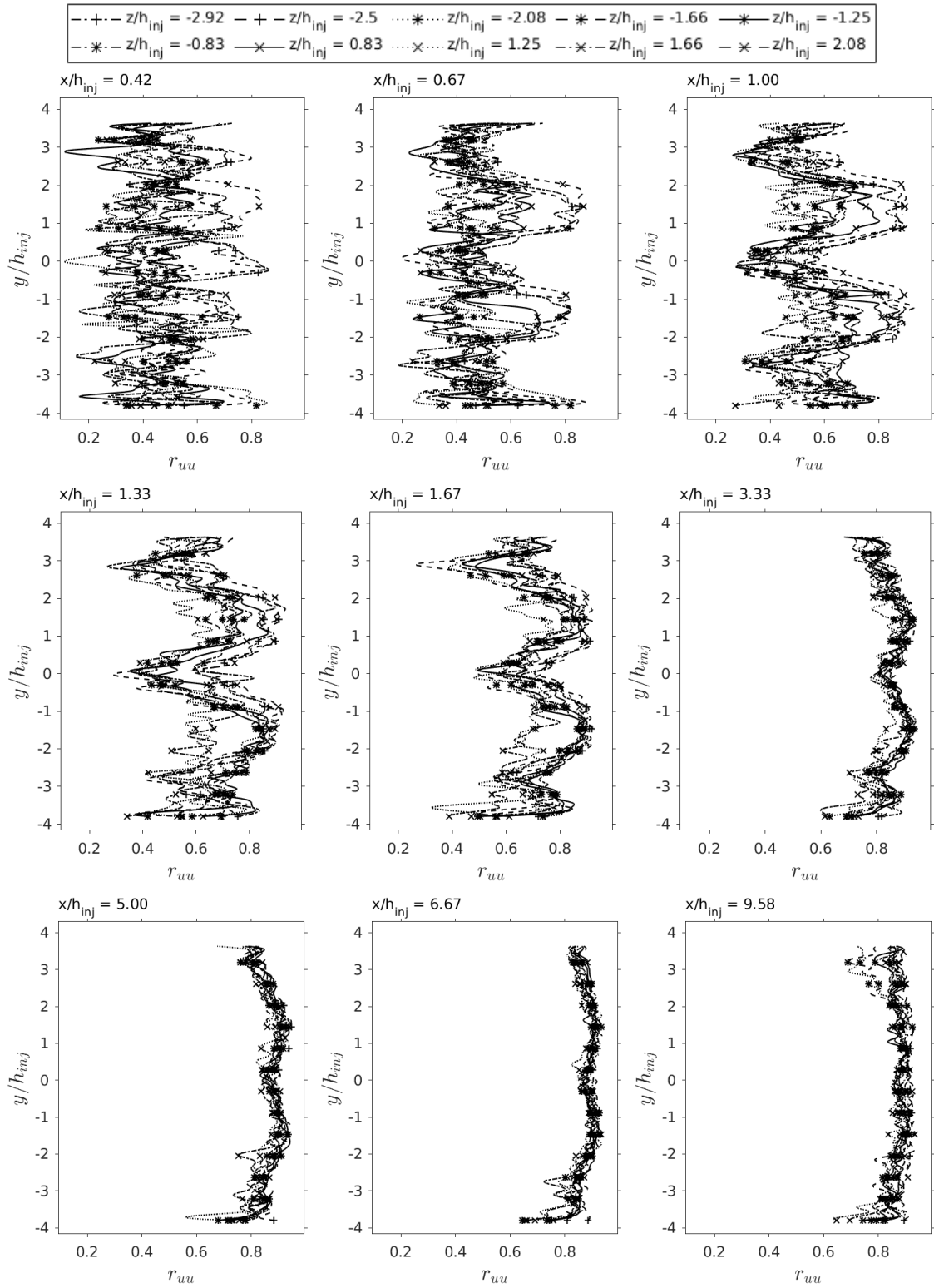
Pode-se observar que os valores de  $r_{uu}$  e de  $r_{vv}$  são maiores nas regiões entre os injetores, isto é, no escoamento principal, assim como foi constatado nas auto-correlações espaciais longitudinais das seções horizontais. Verifica-se também que nas alturas dos injetores, os valores de  $r_{uu}$  e de  $r_{vv}$  aumentam no sentido longitudinal. Somado a isso, próximo as paredes superiores e inferiores, os valores de  $r_{uu}$  e de  $r_{vv}$  diminuem, pois as faixas dos tamanhos das estruturas coerentes são maiores em virtude das camadas limites turbulentas das paredes. Além disso, observa-se que os perfis de  $r_{uu}$  e de  $r_{vv}$  de  $z/h_{inj} = \pm 0,42$ , presentes nas Figuras 5.50 e 5.52, não têm uma simetria plena com relação a  $z/h_{inj} = 0$ , devida às variações locais da turbulência.

Figura 5.50 - Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de  $u$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,15$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



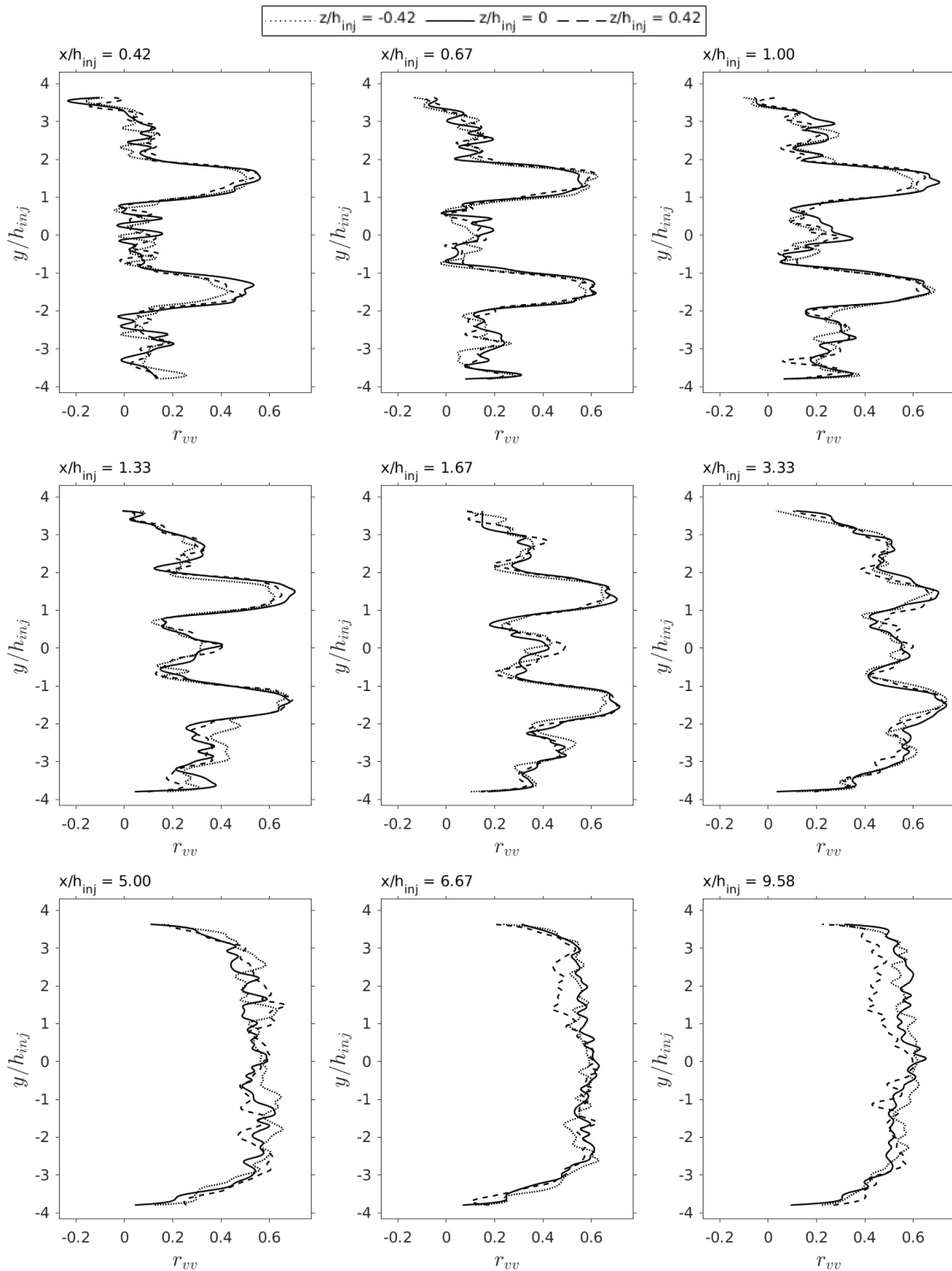
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.51 - Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de  $u$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,14$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

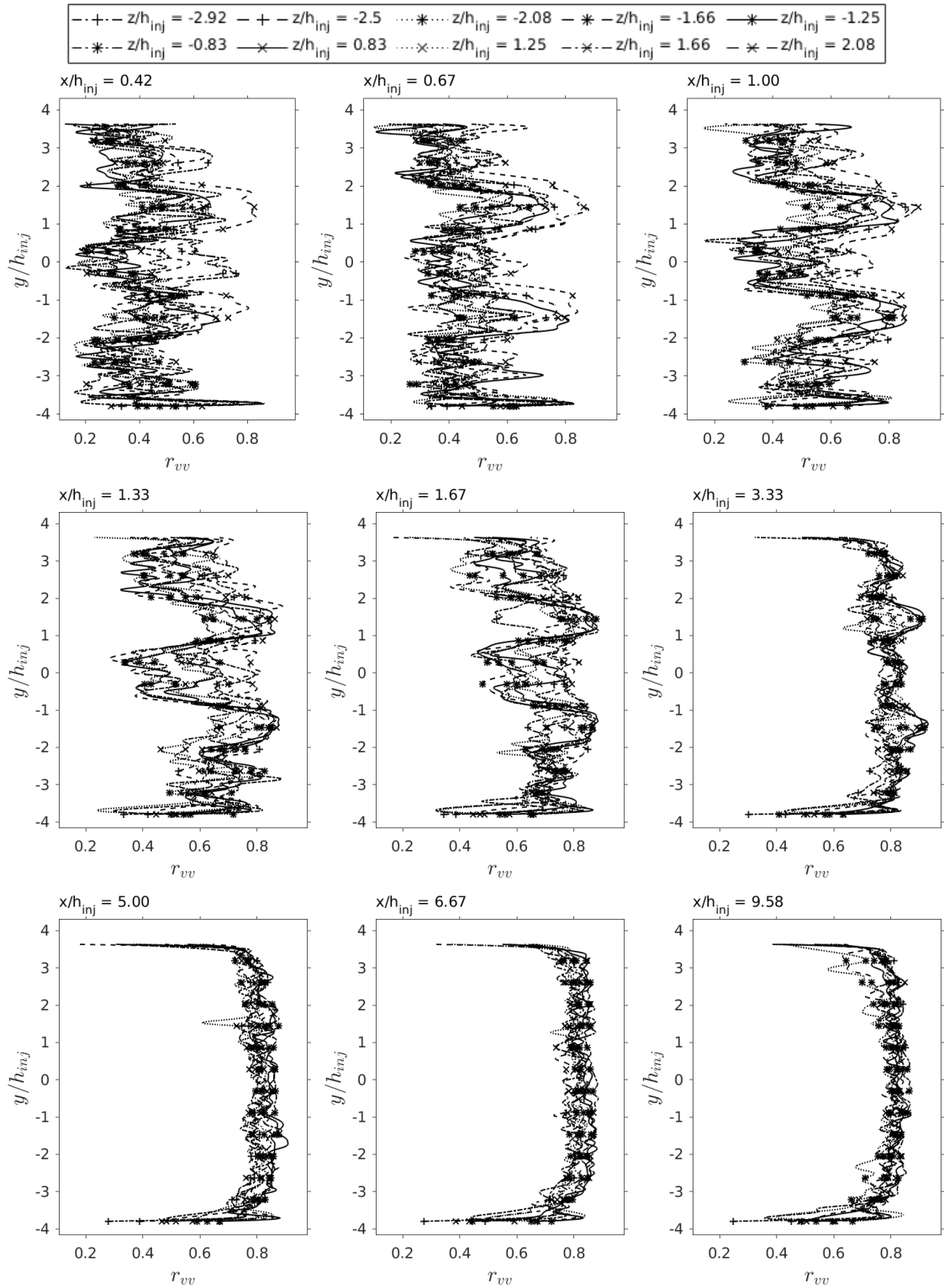
Figura 5.52 - Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de  $v$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,14$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

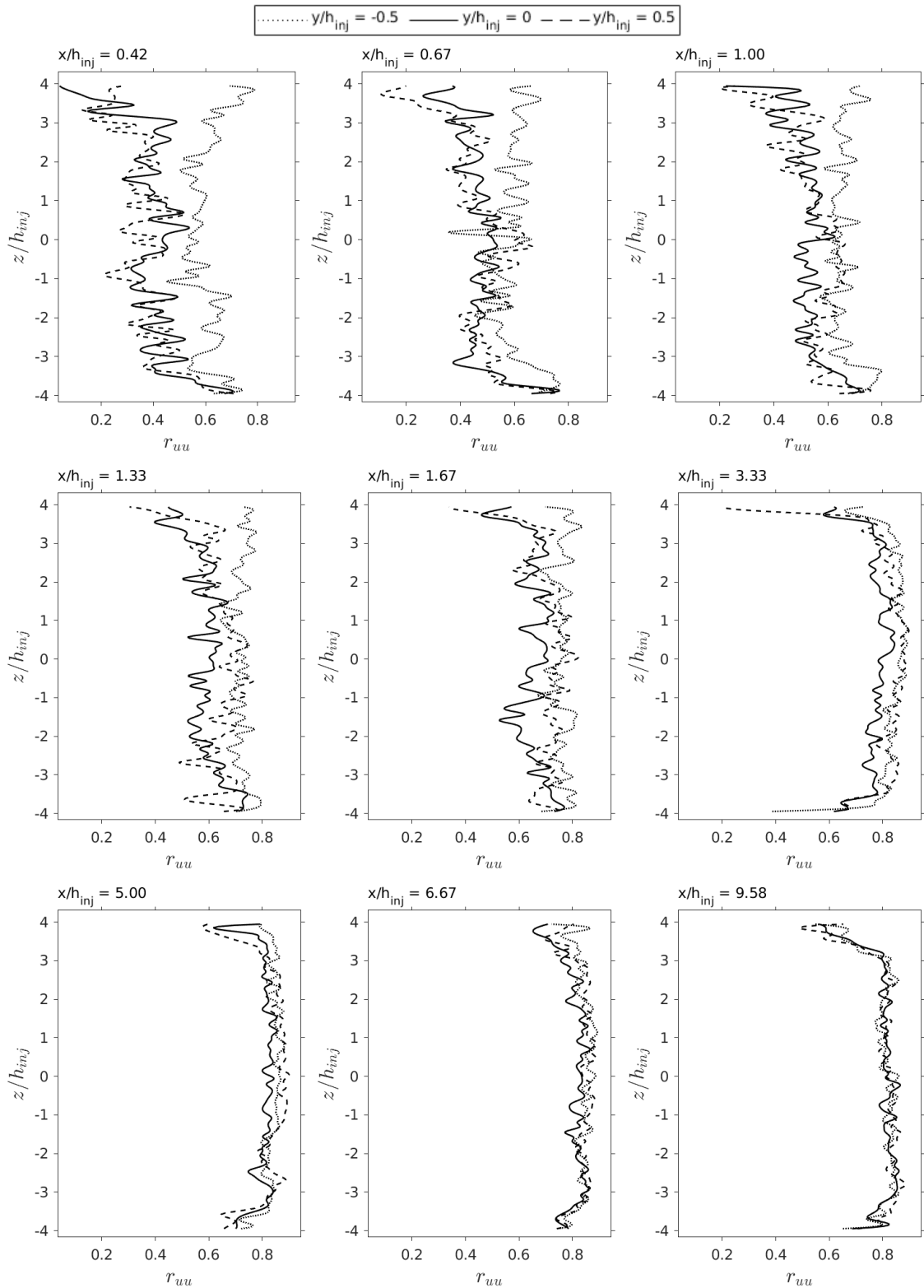


Figura 5.53 - Região Principal: perfis transversais verticais da auto-correlação espacial longitudinal de  $v$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,13$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



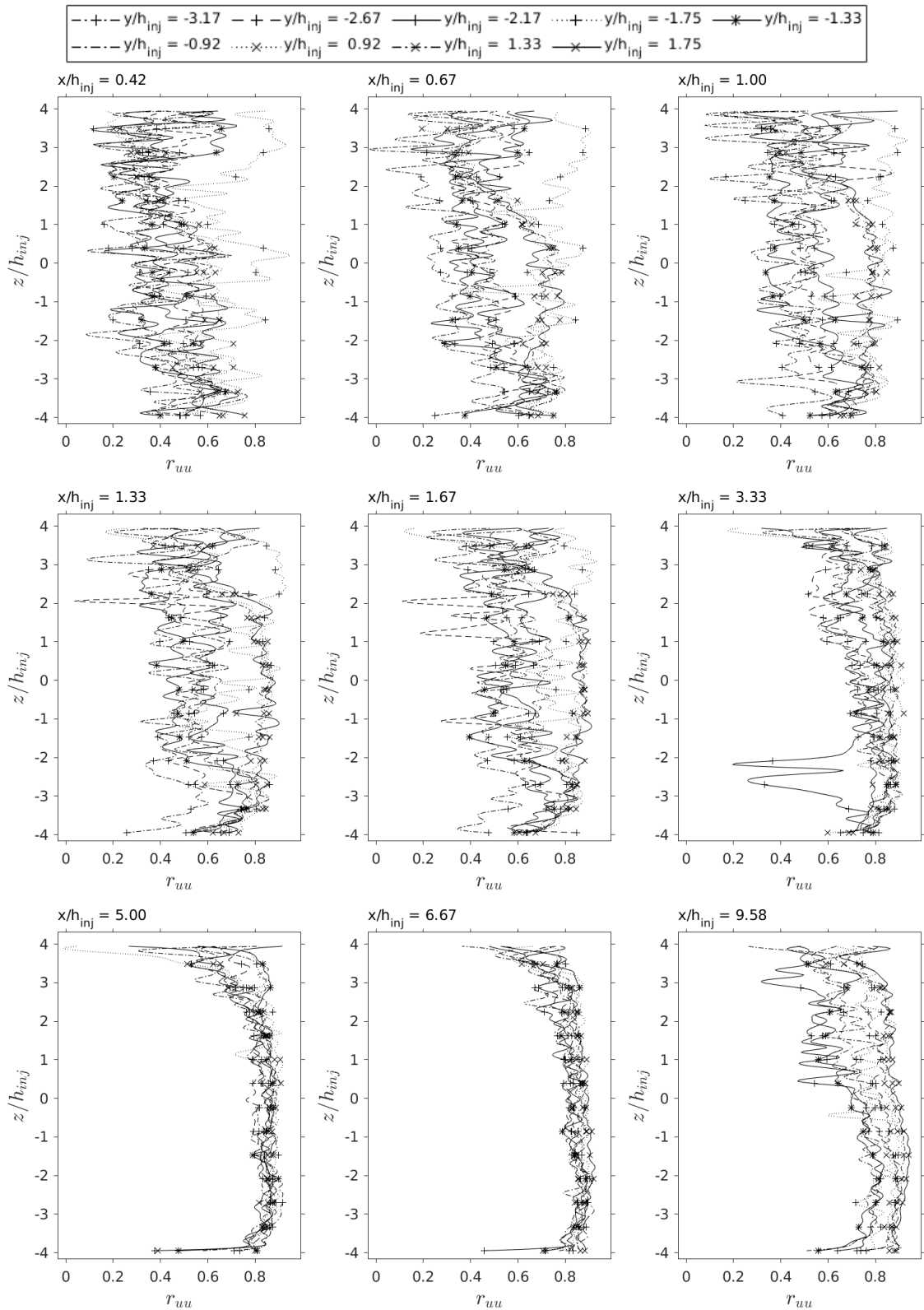
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.54 - Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de  $u$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,13$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



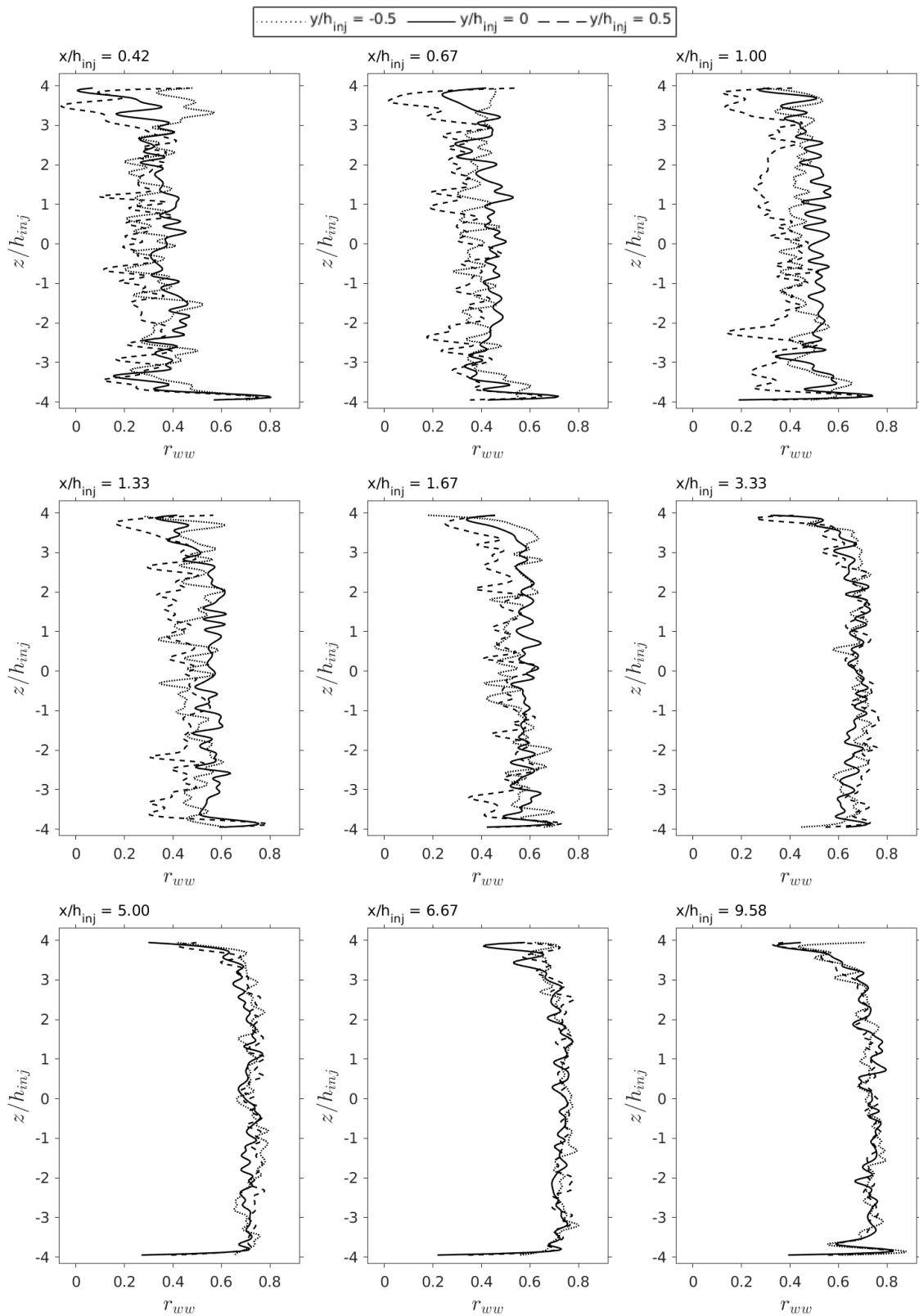
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.55 - Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de  $u$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,17$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



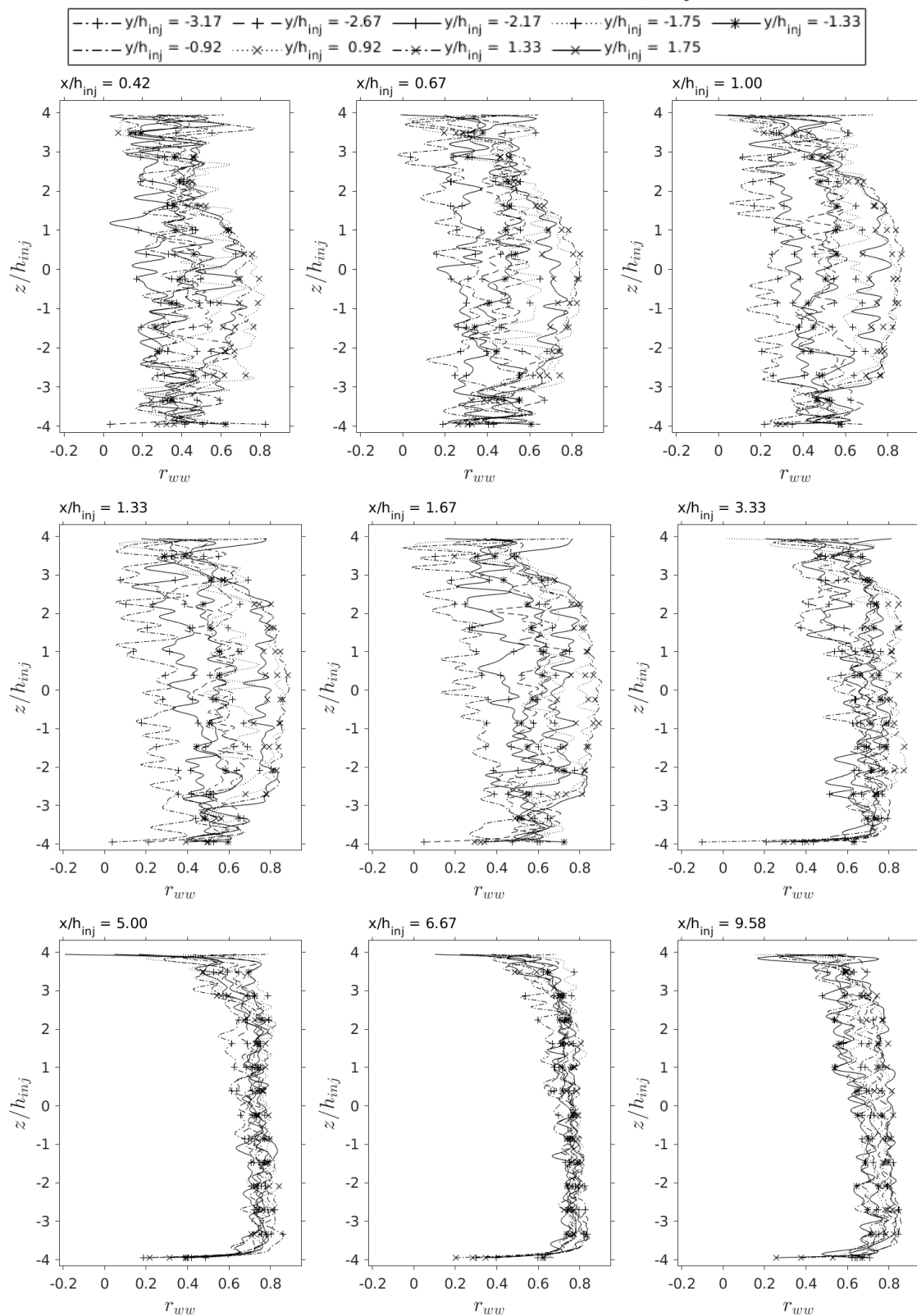
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.56 - Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de  $w$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,13$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

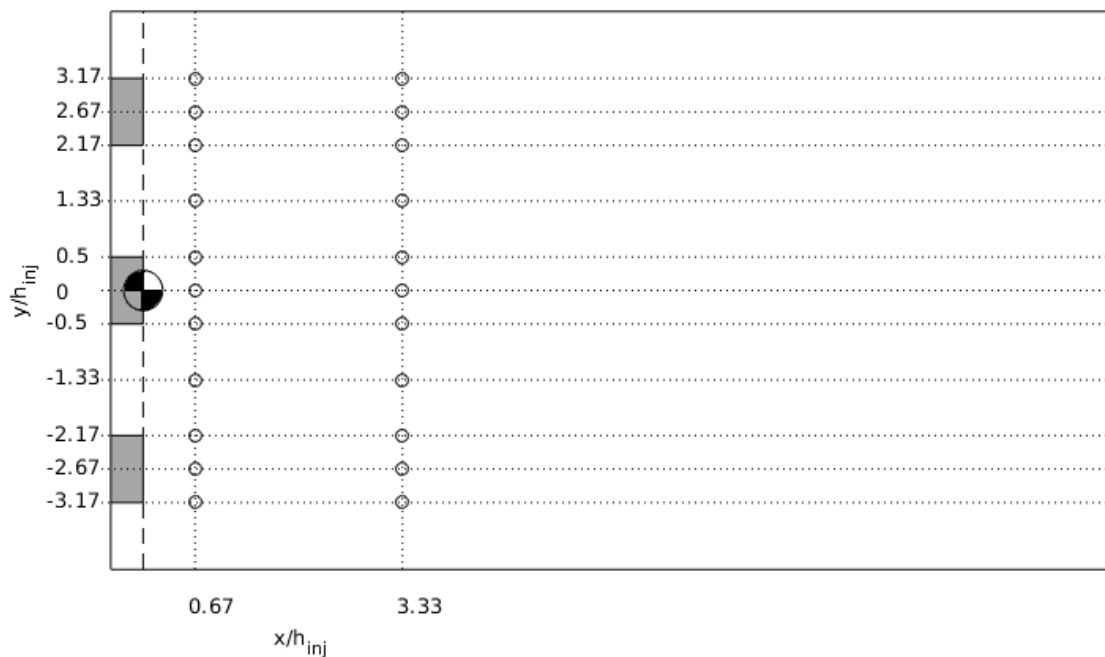
Figura 5.57 - Região principal: perfis transversais horizontais da auto-correlação espacial longitudinal de  $w$  para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,14$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

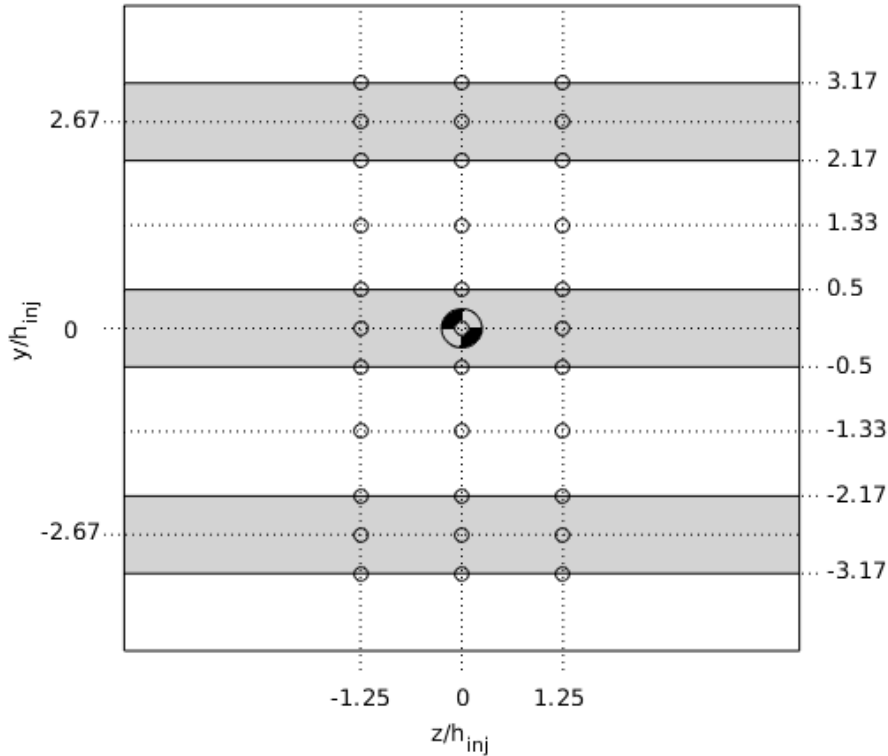
Nesta segunda parte desta seção, serão tratados as correlações espaciais com  $\xi_i$  variável e com os demais nulos em determinados pontos da região principal. As Figuras 5.58 e 5.59 mostram as localizações de interesse na região principal das correlações espaciais. Não levamos em consideração alguns pontos a jusante do injetor superior para as correlações espaciais das seções horizontais, pois não foi efetuado medições nestas alturas com estas seções. Os gráficos abaixo, que são apresentados pelas Figuras 5.60 a 5.83, expõem os perfis das correlações espaciais longitudinais, normais e transversais obtidos nas seções verticais e horizontais da região principal. Os perfis das correlações espaciais foram distribuídos em quatro conjuntos. O primeiro é constituído pelos perfis que ficam no meio de cada injetor, o segundo pelos perfis localizados entre os injetores, e o terceiro e o quarto são constituídos pelos perfis localizados nas bordas inferiores e superiores dos injetores respectivamente.

Figura 5.58 - Localização dos pontos das auto-correlações espaciais e das correlações cruzadas espaciais das flutuações em função de  $\xi_i$  na região principal da câmara de combustão (vista lateral).



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.59 - Localização dos pontos das auto-correlações espaciais e das correlações cruzadas espaciais das flutuações em função de  $\xi_i$  na região principal da câmara de combustão (vista horizontal).



Fonte: Produção do autor.

Nas Figuras 5.60 a 5.67 são apresentados os perfis das auto-correlações espaciais das seções verticais. Parte das auto-correlações espaciais, em especial as normais, ficaram limitadas em virtude das dimensões da área de visualização do PIV. Tal limitação pode ser vista nas auto-correlações espaciais normais de  $u'$ ,  $r_{uu}(0, \xi_2, 0)$ , e de  $v'$ ,  $r_{vv}(0, \xi_2, 0)$ , das cotas  $y/h_{inj} = \pm 2,67$  e  $y/h_{inj} = \pm 3,17$ , conforme observado nas Figuras 5.61, 5.63, 5.65 e 5.67.

Nos perfis das auto-correlações espaciais é possível verificar que aquelas localizadas na região próxima aos injetores, isto é, em  $x/h_{inj} = 0,67$ , diminuem rapidamente no intervalo entre  $-0,2$  e  $0,2$  em  $\xi_1/h_{inj}$  e em  $\xi_2/h_{inj}$ , enquanto que em  $x/h_{inj} = 3,33$  a redução das auto-correlações é mais suave. Estes contrastes entre as auto-correlações espaciais indicam que a faixa de tamanhos das estruturas coerentes é maior nas proximidades dos injetores. Isso se deve ao fato que as funções de correlação estão relacionadas com o padrão dos vórtices no escoamento turbulento (TOWNSEND, 1976).

Quanto maior for a curvatura das correlações, maior será a faixa de tamanhos dos vórtices. Somado a isso, caso haja uma inflexão na curva da correlação, isto é, se a função da correlação for a adição de duas outras funções de correlação, haverá duas faixas distintas de tamanhos de vórtices na turbulência. Esta segunda característica pode ser observada na auto-correlação espacial longitudinal  $r_{uu}(\xi_1, 0, 0)$ , que é apresentada pela Figura 5.60. A inflexão da auto-correlação em questão está em  $x/h_{inj} = 0,67$ , em  $\xi_1/h_{inj} = -0,15$  e  $\xi_1/h_{inj} = 0,15$ . Tal característica pode ser observada também nas demais auto-correlações espaciais apresentadas pelas Figuras 5.61 a 5.67. Essas duas características das auto-correlações espaciais próximas dos injetores indicam que há produção de vórtices pelas camadas de cisalhamento, que estão nas bordas das zonas de recirculação.

Na comparação das auto-correlações espaciais de  $u'$  apresentadas pelas Figuras 5.60 e 5.61, pode-se verificar que aquelas que estão na estação  $x/h_{inj} = 0,67$ , na profundidade  $z/h_{inj} = 0$  e em  $y/h_{inj} = \pm 1,33$  têm curvas menos acentuadas com relação àquelas localizadas nas demais profundidades e nas mesmas cotas e estação. Isso se deve a influência dos gradientes de velocidade do escoamento turbulento causados pela interação deste com as paredes. Tal característica também pode ser observada nas auto-correlações espaciais de  $v'$ , que são apresentadas pelas Figuras 5.64 e 5.65. Pode-se observar também que entre as auto-correlações  $r_{uu}$ , que estão nas mesmas alturas das bordas das faces posteriores dos injetores, que são apresentadas pelas Figuras 5.62 e 5.63, aquelas que estão mais próximas das paredes têm curvas mais acentuadas. Isso se deve ao aumento da intensidade turbulenta próximo as paredes que aumentam a faixa dos tamanhos dos vórtices, conforme observado na Seção 5.6.

Além disso, verifica-se que as auto-correlações espaciais de  $u'$ , que são apresentadas pelas Figuras 5.60 a 5.63, não são simétricas em torno de  $\xi_1 = 0$  e de  $\xi_2 = 0$ . As auto-correlações espaciais de  $v'$ , que são apresentadas pelas Figuras 5.64 a 5.67, também são assimétricas em torno de  $\xi_1 = 0$  e de  $\xi_2 = 0$ . Somado a isso, observa-se que algumas auto-correlações espaciais de  $u'$ , tais como aquela localizada em  $(x/h_{inj}, y/h_{inj}, z/h_{inj}) = (3,33, 3,17, 1,15)$ , não corresponde aos seus pares, isto é, as auto-correlações que estão na mesma estação e cota. Essas características das auto-correlações são causadas pela própria natureza da turbulência somado com a qualidade das medições com PIV que é afetado por esta.

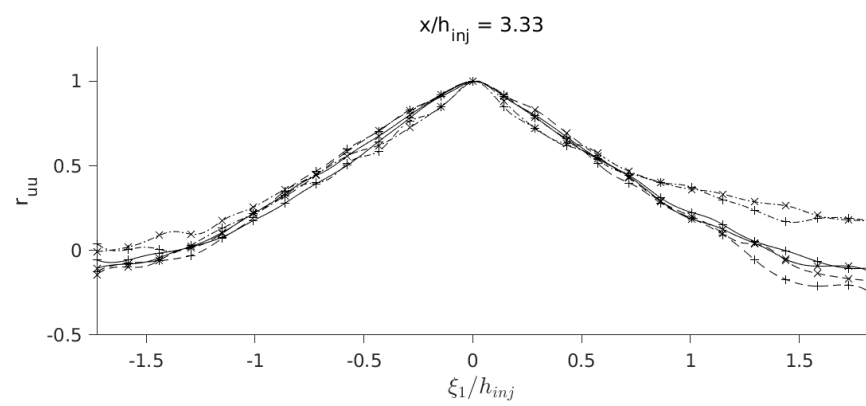
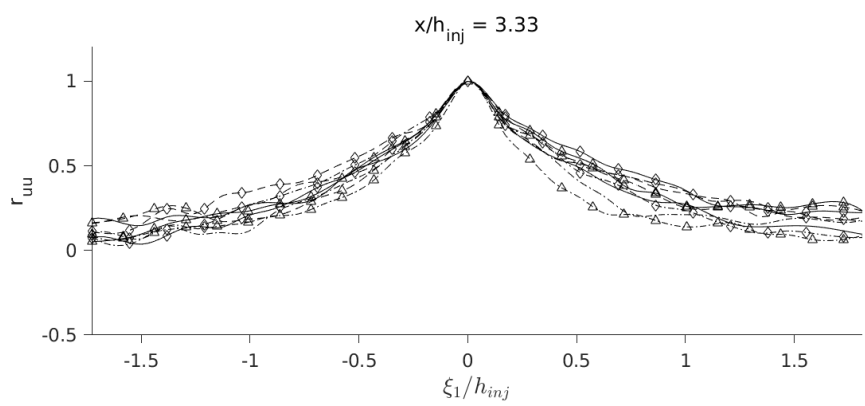
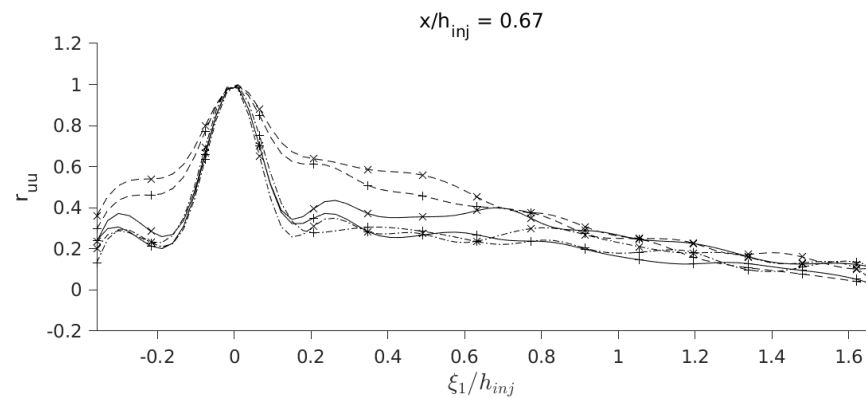
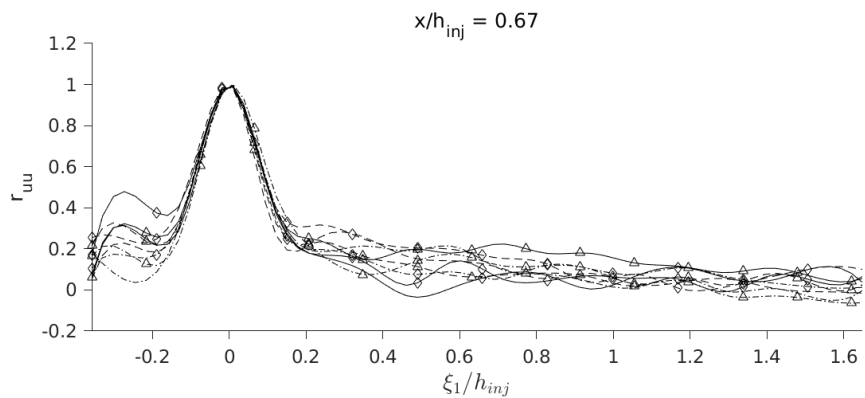
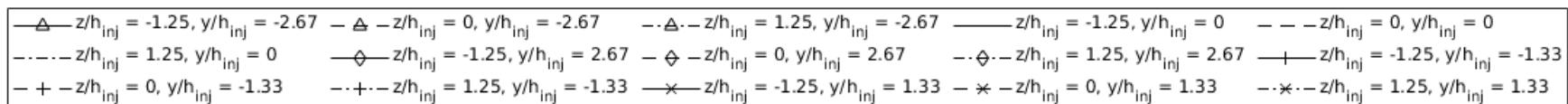
Verifica-se que a assimetria das curvas das auto-correlações  $r_{uu}(0, \xi_2, 0)$  da estação  $x/h_{inj} = 3,33$ , que são apresentadas pela Figura 5.63, é mais acentuada com relação a assimetria observada nas curvas das auto-correlações da estação  $x/h_{inj} = 0,67$ .



Observa-se que as curvas das auto-correlações  $r_{uu}(0, \xi_2, 0)$  situadas em  $\xi_2 > 0$ , que estão na mesma altura da borda inferior das faces posteriores dos injetores, são mais acentuada com relação as curvas situadas em  $\xi_2 < 0$ . O mesmo é observado nas auto-correlações  $r_{uu}(0, \xi_2, 0)$ , que estão na mesma altura da borda superior das faces posteriores dos injetores. No entanto, para estas auto-correlações, as curvas mais acentuadas são aquelas situadas em  $\xi_2 < 0$ . Se for comparar estas auto-correlações com as auto-correlações  $r_{vv}(0, \xi_2, 0)$ , que são apresentadas pela Figura 5.67, verifica-se que as curvas destas são mais acentuadas no sentido contrário as regiões das esteiras a jusante dos injetores. Essas características mostram a influência das esteiras nas auto-correlações espaciais.

Além disso, verifica-se também que nos perfis das auto-correlações espaciais normais a redução destas correlações é muito mais acentuada do que aquela observada nas auto-correlações espaciais longitudinais. As auto-correlações espaciais normais têm uma redução mais acentuada devido ao fato delas passarem pelas regiões de cisalhamento intenso da região principal, conforme observado na Figura 5.61. Essa característica pode ser observada nas Figuras 5.63, 5.65, 5.67, 5.69, 5.71, 5.73 e 5.75.

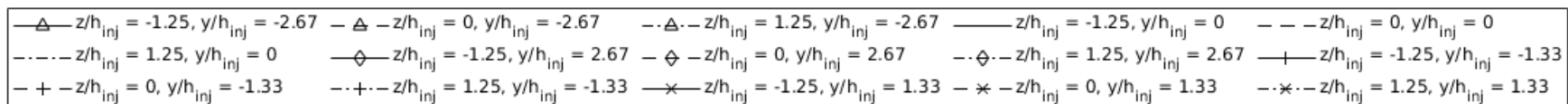
Figura 5.60 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,11$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



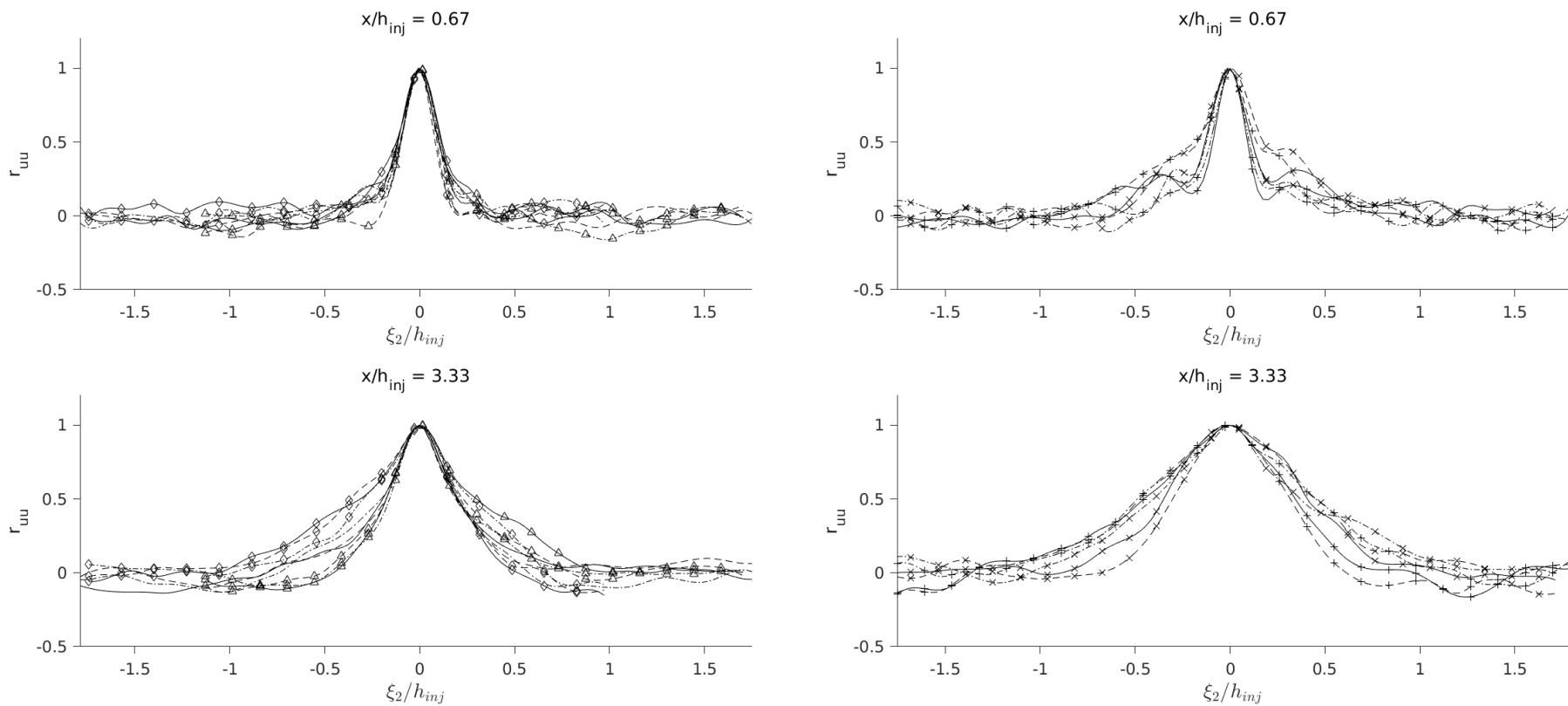
192

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.61 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_2$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,15$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .

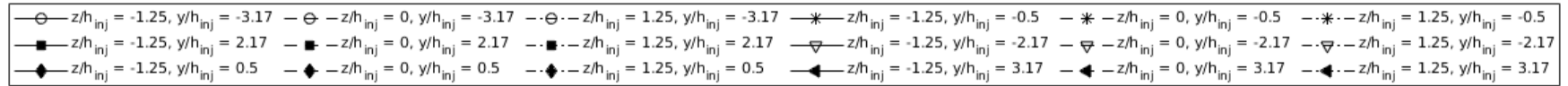


193

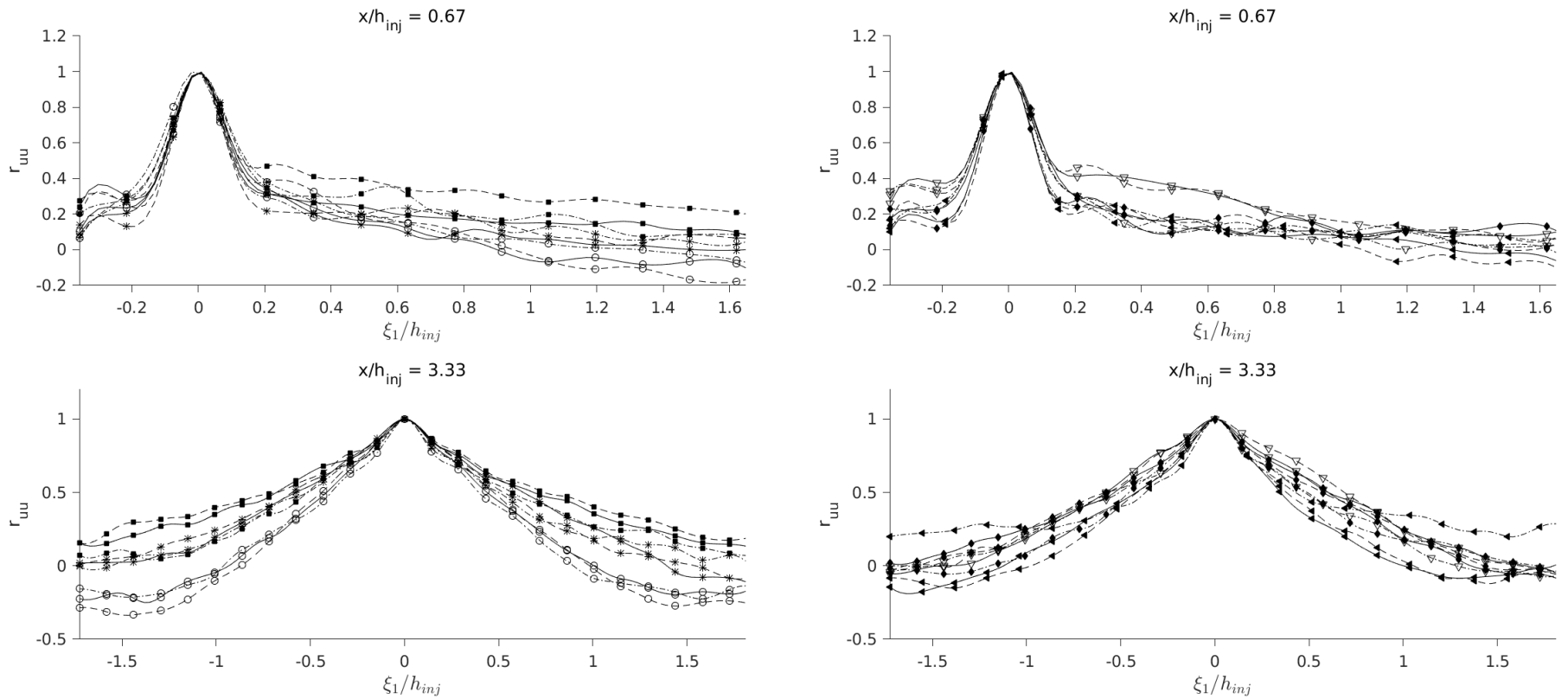


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.62 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .

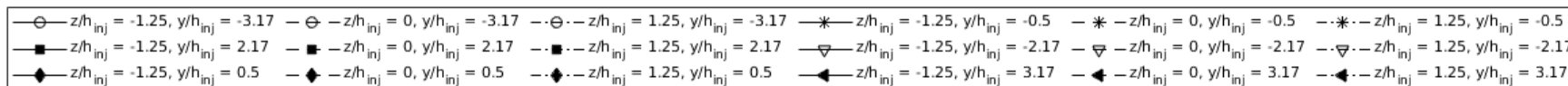


194

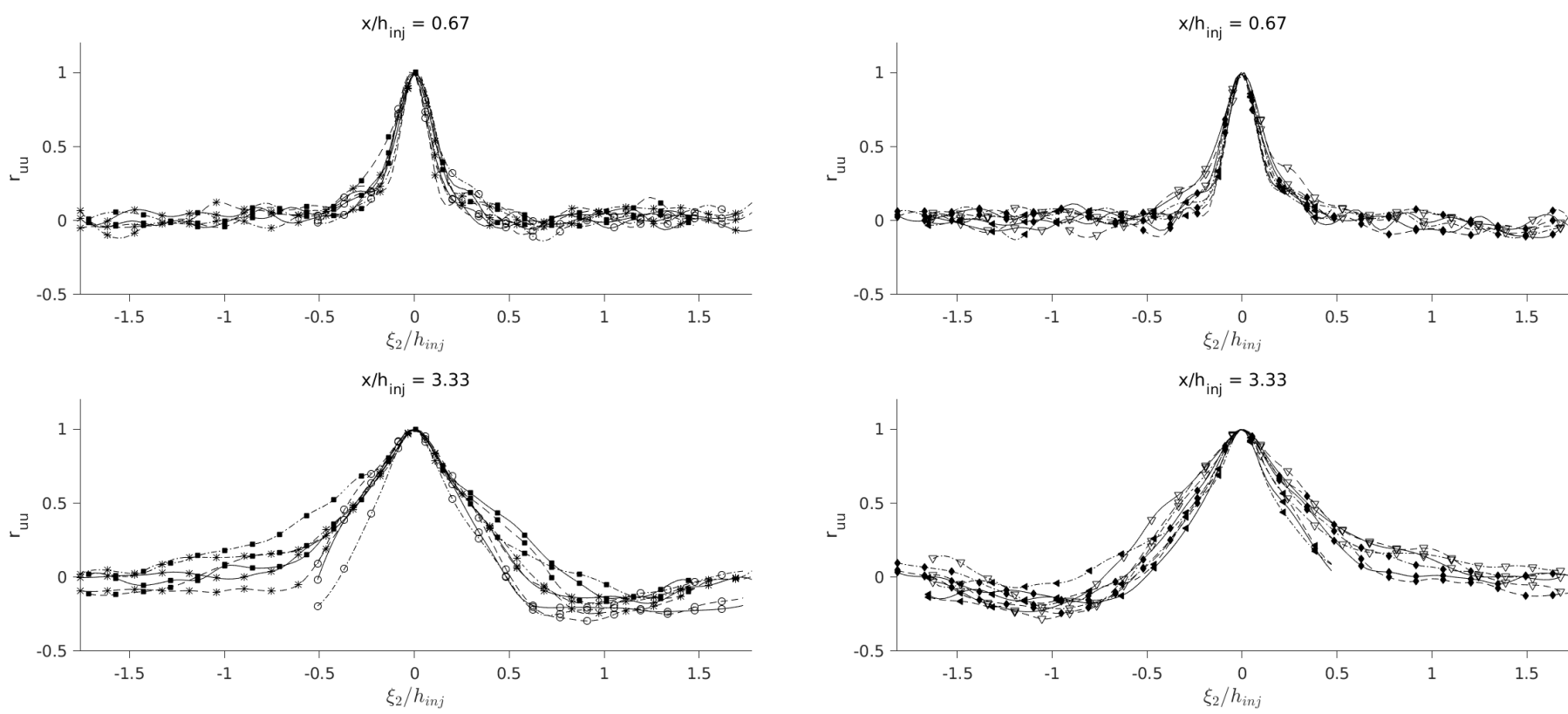


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.63 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_2$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,15$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .

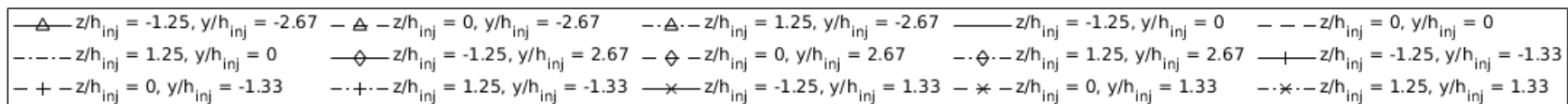


195

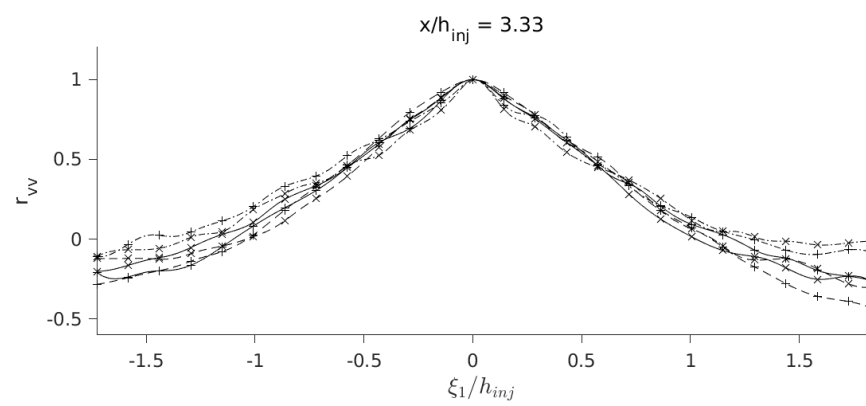
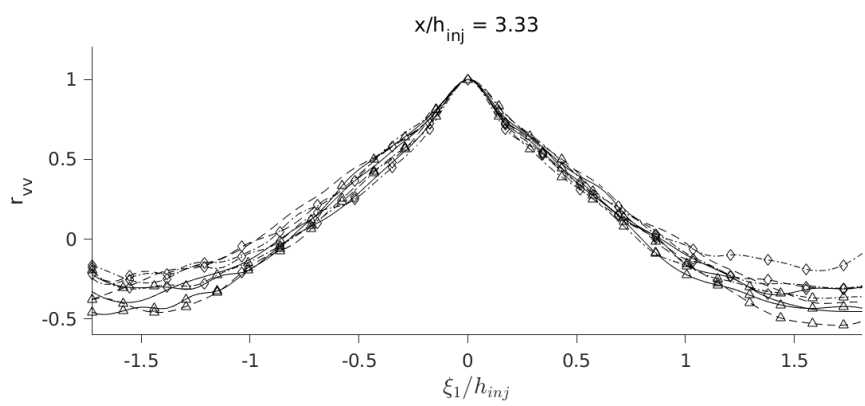
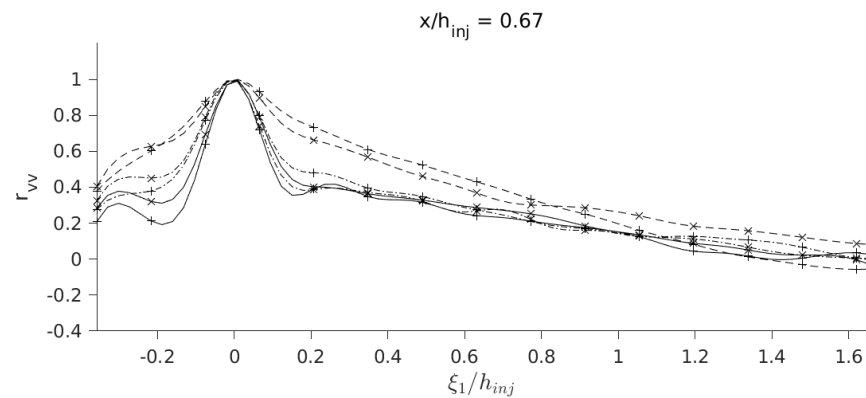
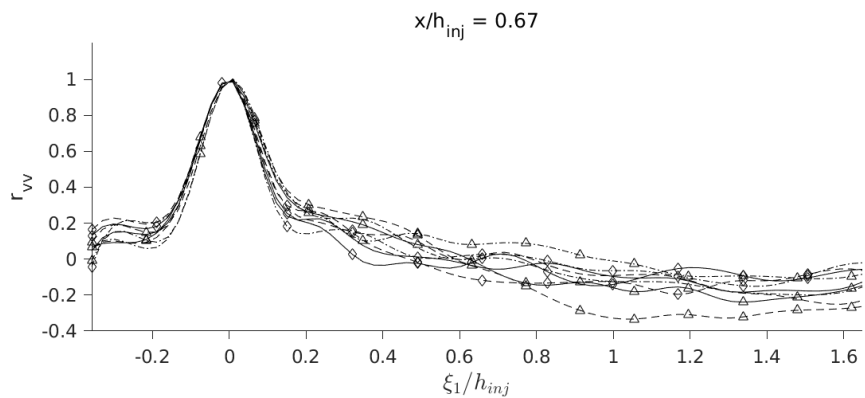


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.64 - Perfis da auto-correlação espacial de  $v'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .

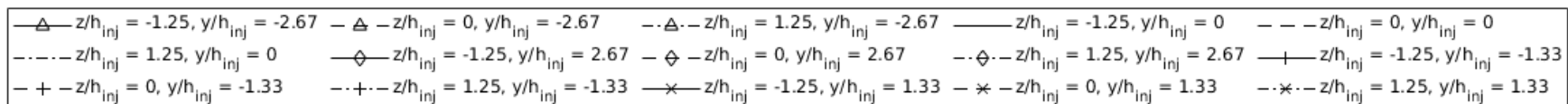


196

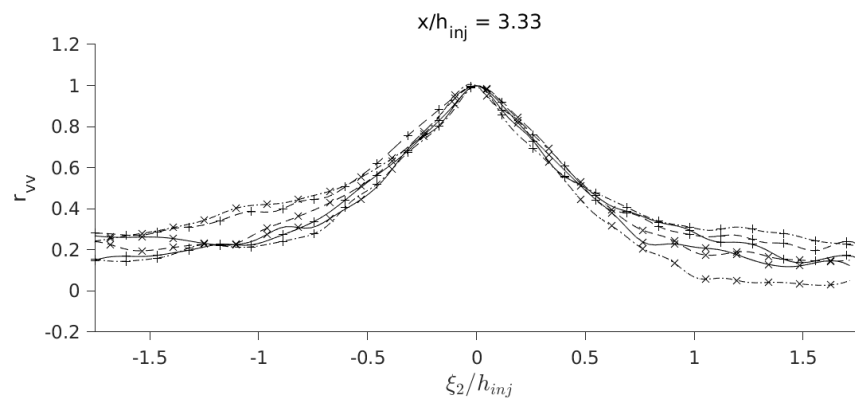
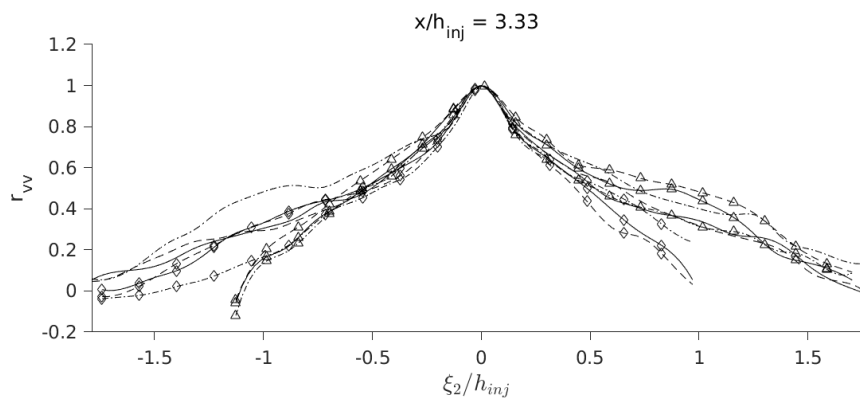
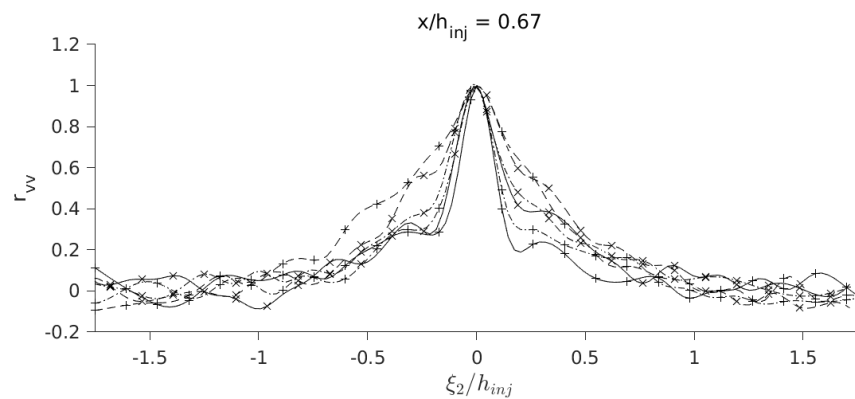
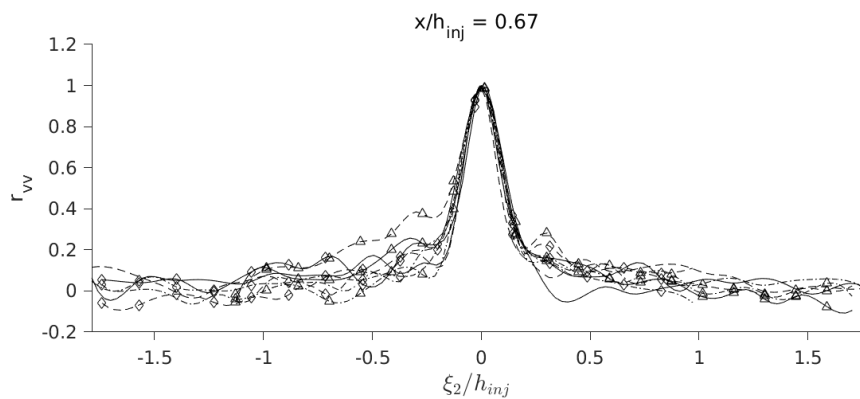


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.65 - Perfis da auto-correlação espacial de  $v'$  em função de  $\xi_2$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,14$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .

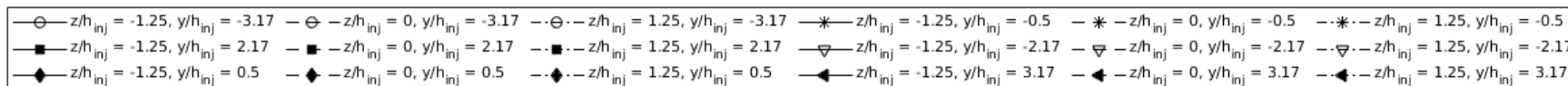


197

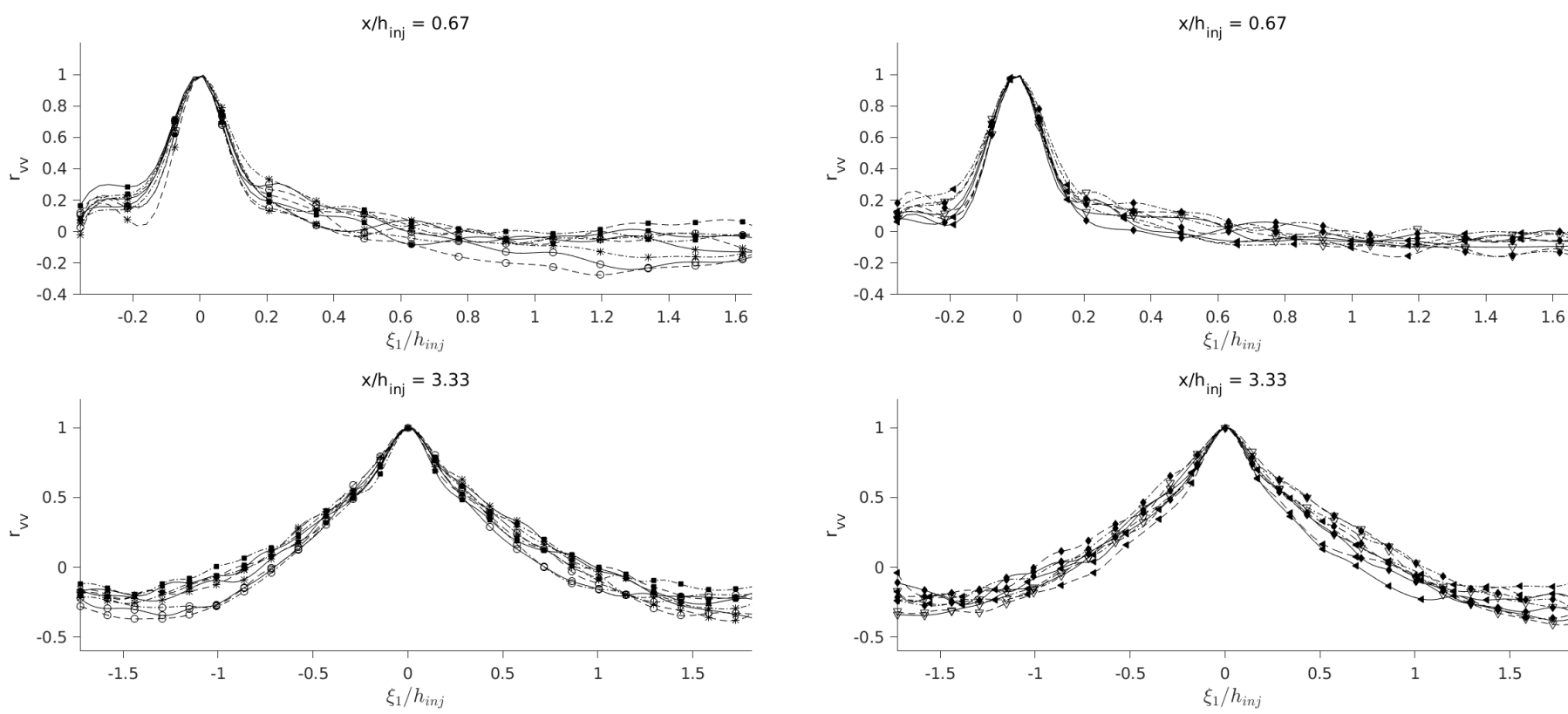


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.66 - Perfis da auto-correlação espacial de  $v'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



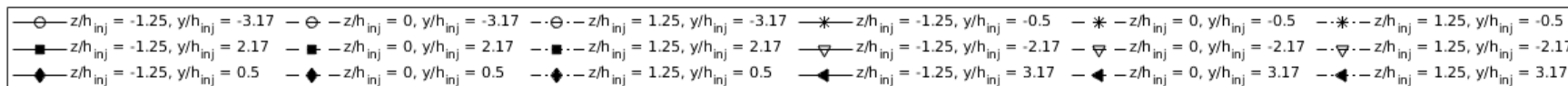
198



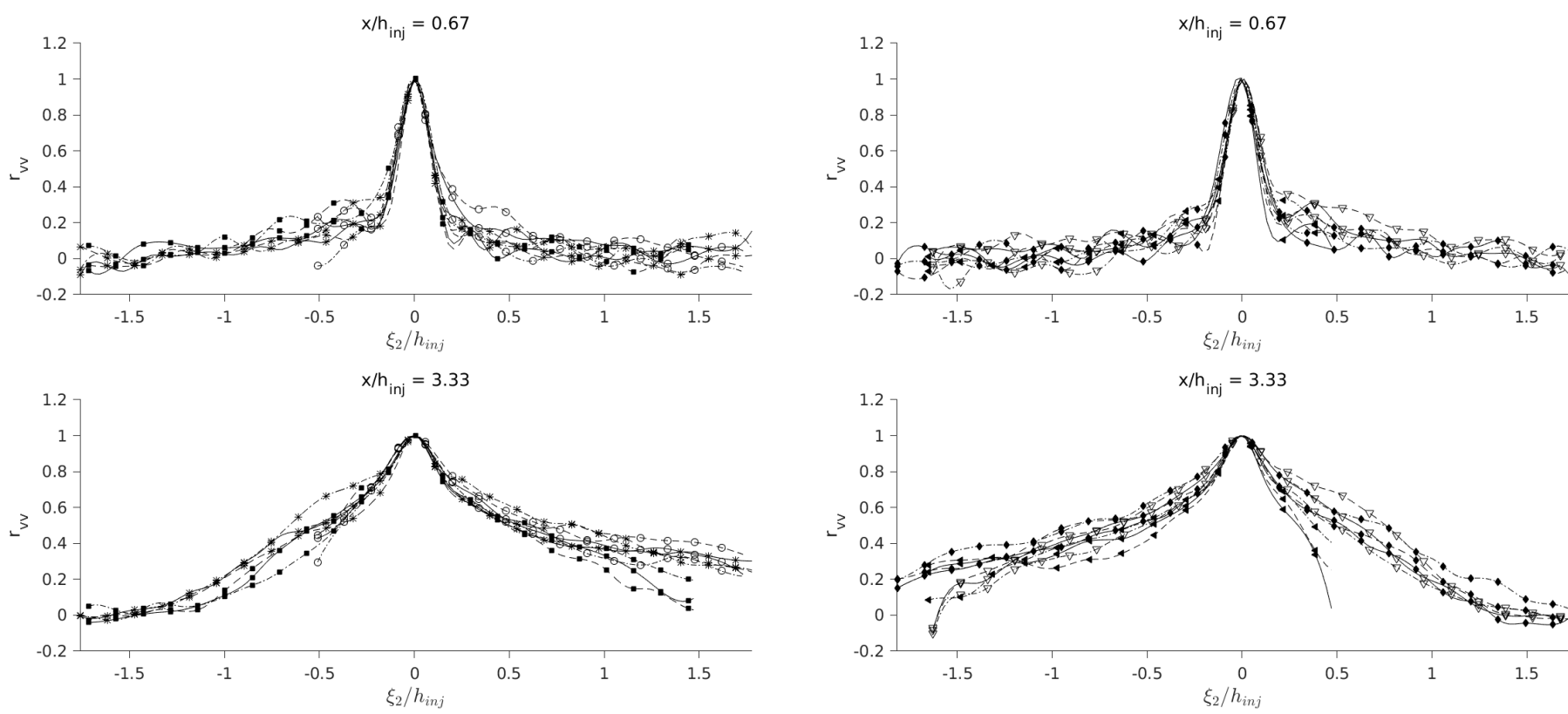
Fonte: Produção do autor.



Figura 5.67 - Perfis da auto-correlação espacial de  $v'$  em função de  $\xi_2$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,14$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



199



Fonte: Produção do autor.

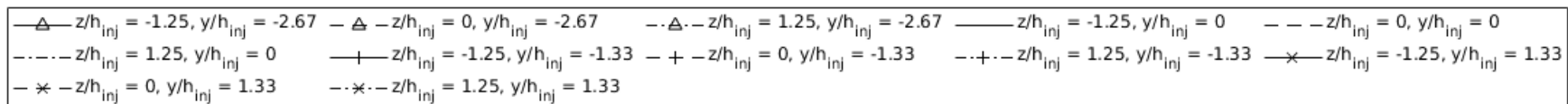
Da Figura 5.68 até a Figura 5.75 são apresentados os perfis das auto-correlações espaciais de pontos específicos da região principal, estimados a partir das medições efetuadas nas seções horizontais. Diversas características dos perfis das auto-correlações espaciais das seções horizontais são parecidas com os das seções verticais. Entre essas características, verifica-se que as curvas dos perfis das auto-correlações espaciais também são mais acentuadas em  $x/h_{inj} = 0,67$  com relação aquelas localizadas em  $x/h_{inj} = 3,33$ . Observa-se também que as curvas nos perfis de  $r_{uu}$  e de  $r_{ww}$  em  $x/h_{inj} = 0,67$  são descontínuas. Além disso, sobre as auto-correlações espaciais transversais, pode-se observar que os valores de  $r_{uu}(0,0,\xi_3)$  e de  $r_{vv}(0,0,\xi_3)$  diminuem muito mais rapidamente em  $\xi_3/h_{inj} \in [-0,2; 0,2]$  do que os valores das auto-correlações espaciais longitudinais nesta mesma faixa em  $\xi_1/h_{inj}$ .

Nos perfis de  $r_{uu}$  e de  $r_{ww}$  presentes nas Figuras 5.68, 5.69, 5.72 e 5.73 verifica-se que aqueles que estão em  $x/h_{inj} = 0,67$  e em  $y/h_{inj} = 1,33$  têm curvas mais suaves com relação aqueles que estão em  $x/h_{inj} = 0,67$  e em  $y/h_{inj} = -1,33$ . Pode-se observar também nas Figuras 5.68 e 5.69 que os perfis de  $r_{uu}$  que estão em  $x/h_{inj} = 3,33$  e em  $y/h_{inj} = 0$  têm curvas mais suaves com relação àqueles localizados em  $x/h_{inj} = 3,33$  e em  $y/h_{inj} = -2,67$ . Tal diferença entre os perfis de  $r_{uu}$  pode ser observada na Figura 5.60.

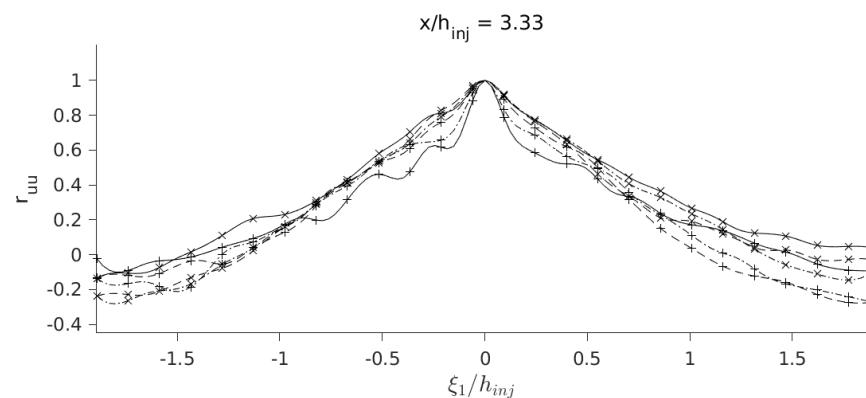
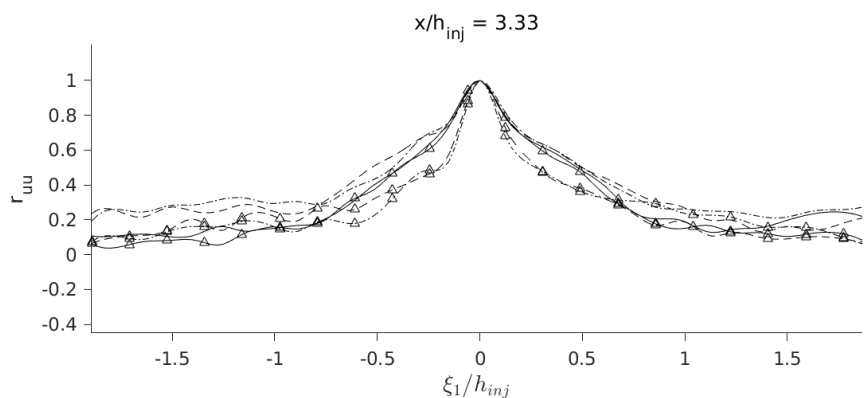
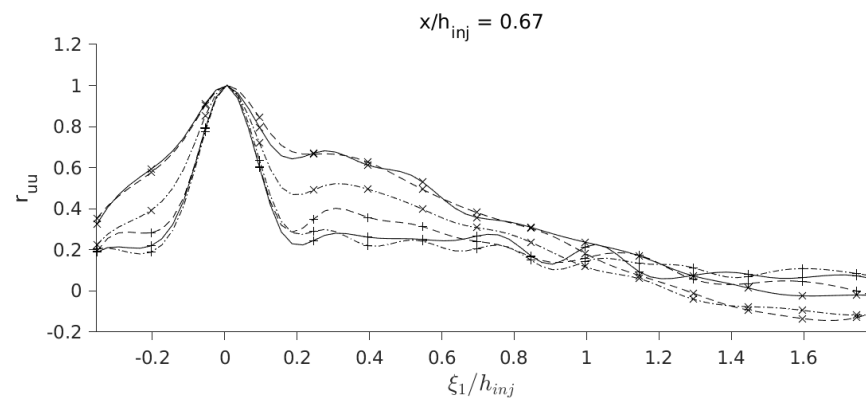
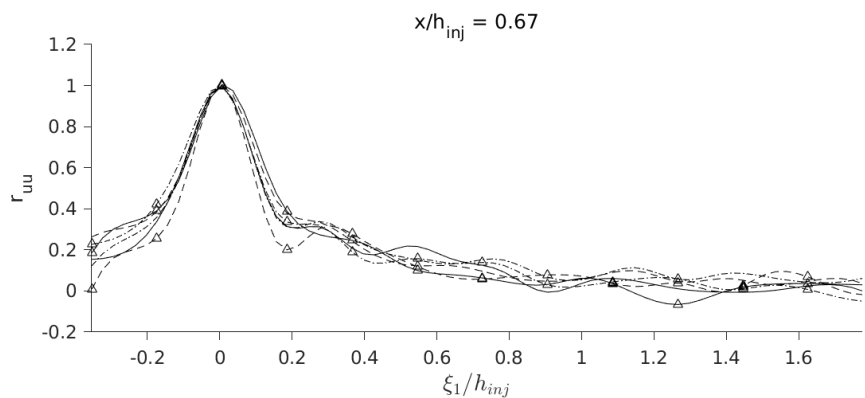
Nos perfis de  $r_{uu}$  e de  $r_{ww}$ , que são apresentados pelas Figuras 5.70, 5.71, 5.74 e 5.75, verifica-se que, em geral, aqueles localizados na bordas das faces posteriores do injetor central têm curvas mais suaves com relação àqueles localizados nas bordas das faces posteriores do injetor inferior. Essa diferença entre os perfis das auto-correlações em questão se deve à camada limite turbulenta da parede inferior, que contribui no aumento da intensidade da turbulência em torno do injetor inferior.

Um detalhe a ser comentado está na falta de simetria dos perfis das auto-correlações em torno de  $\xi_1$  e de  $\xi_3$ . Somado a isso, observa-se que os perfis de  $r_{uu}(0,0,\xi_3)$ , que estão presentes na Figura 5.69, em  $x/h_{inj} = 3,33$  e em  $y/h_{inj} = \pm 1,33$  são mais dispersos em  $\xi_3/h_{inj} < 0$ . Essas características das curvas dos perfis de  $r_{uu}$  e de  $r_{ww}$  são causadas pelo comportamento local da turbulência e da qualidade das medições com PIV.

Figura 5.68 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,11$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .

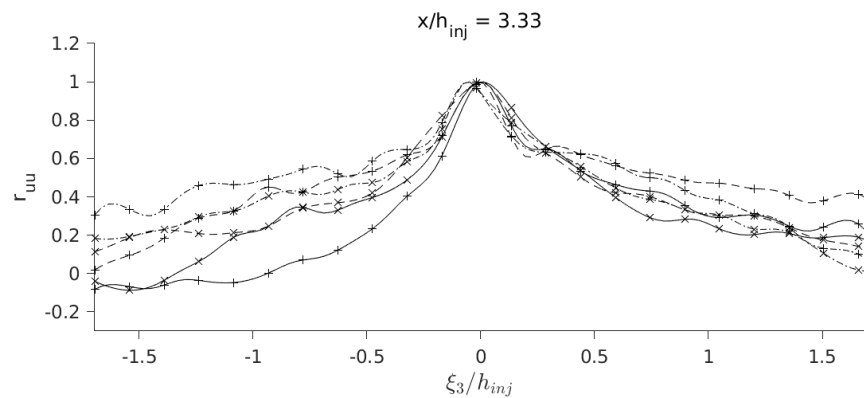
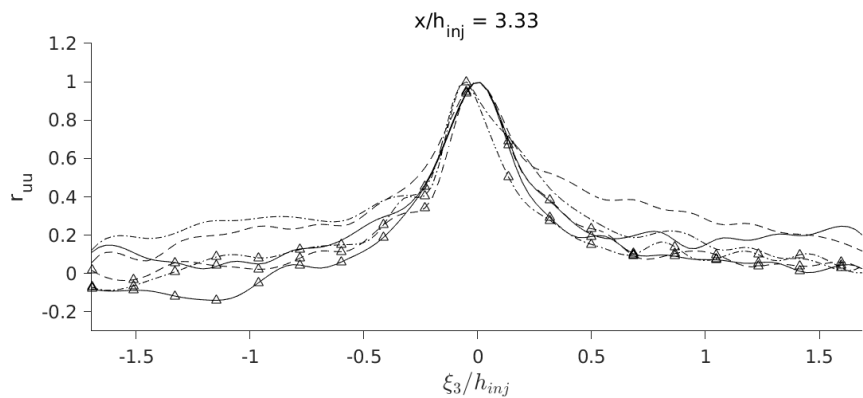
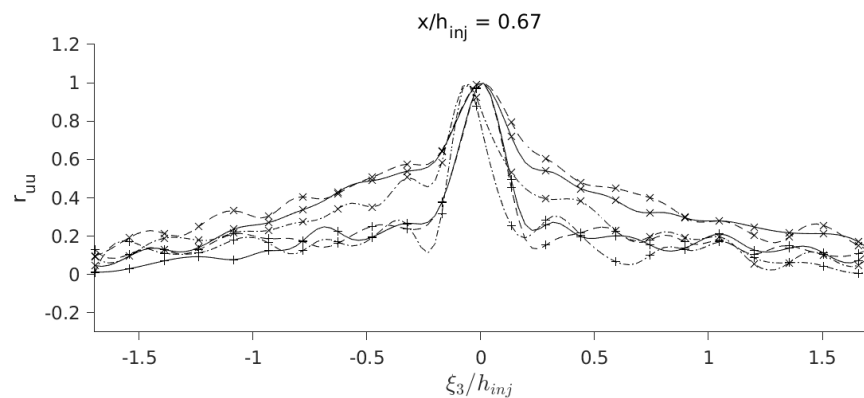
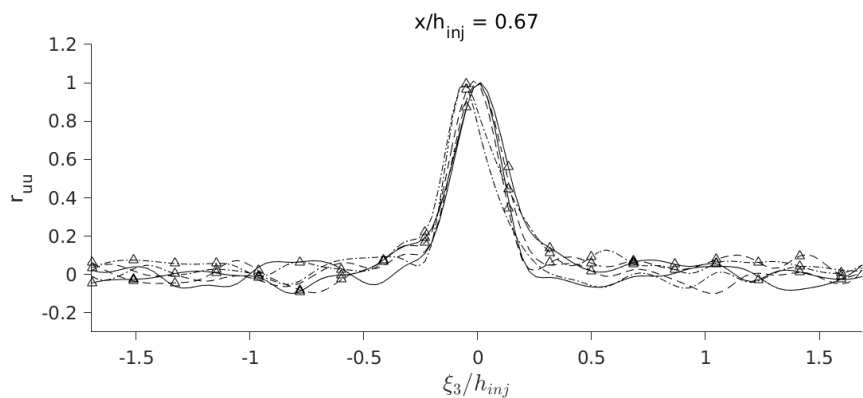
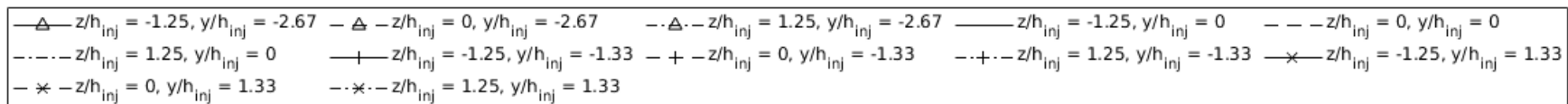


201



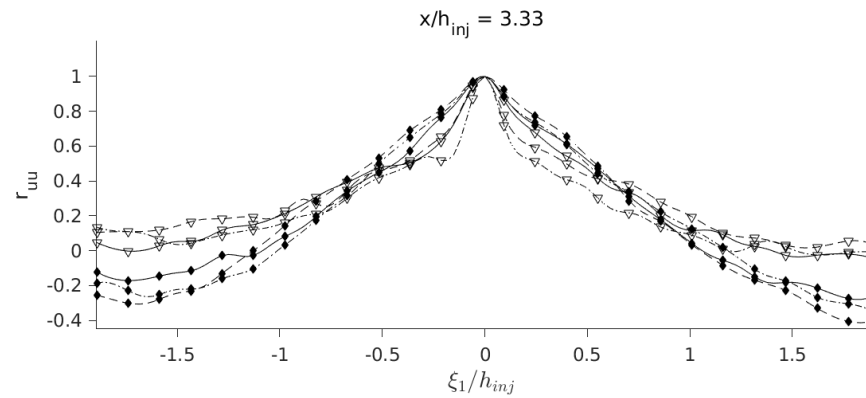
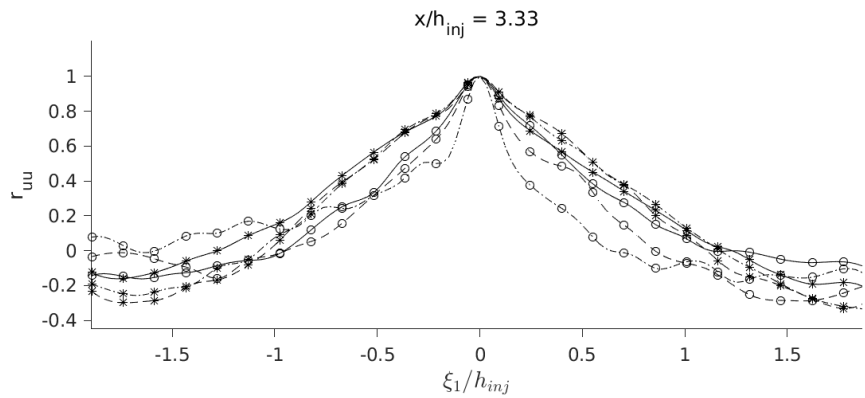
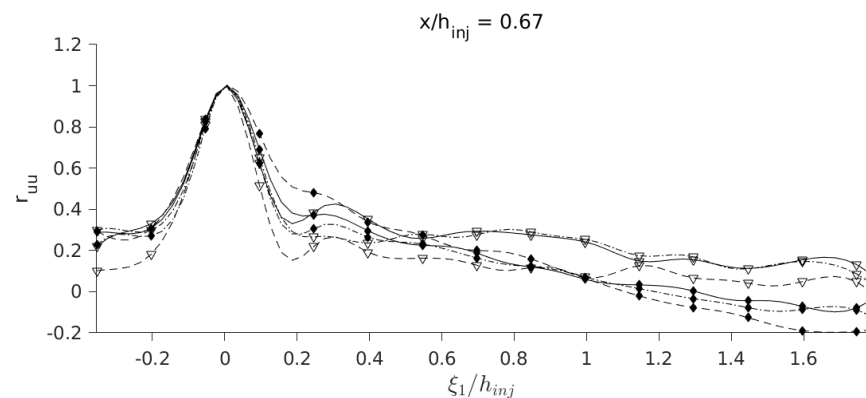
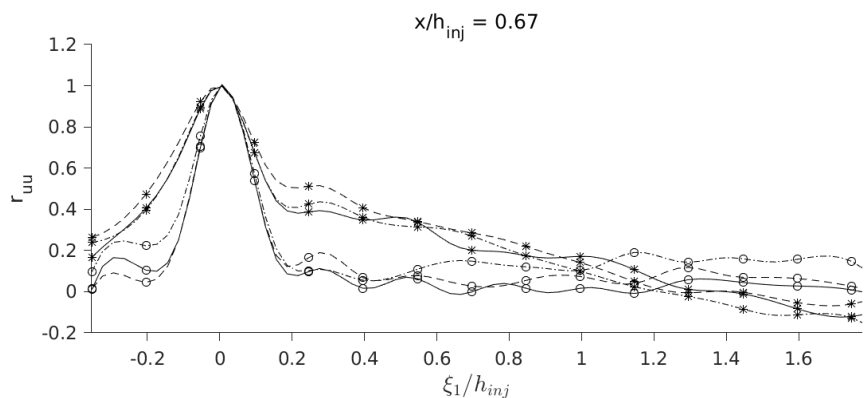
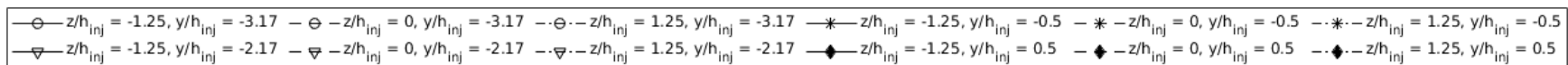
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.69 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_3$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,16$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

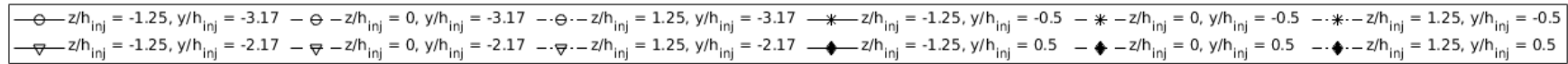
Figura 5.70 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



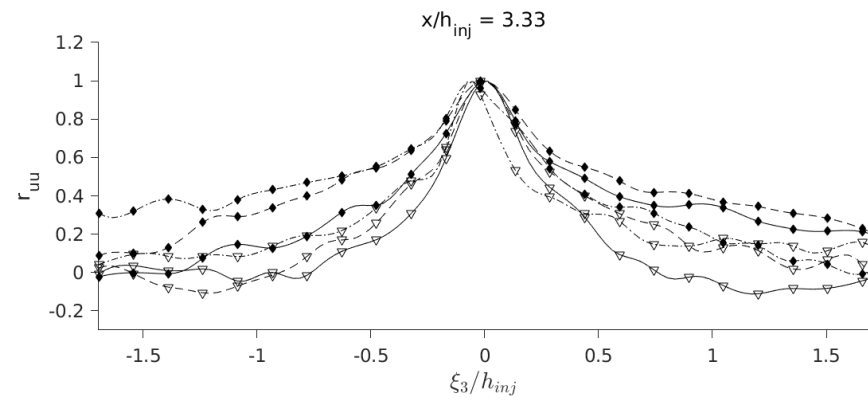
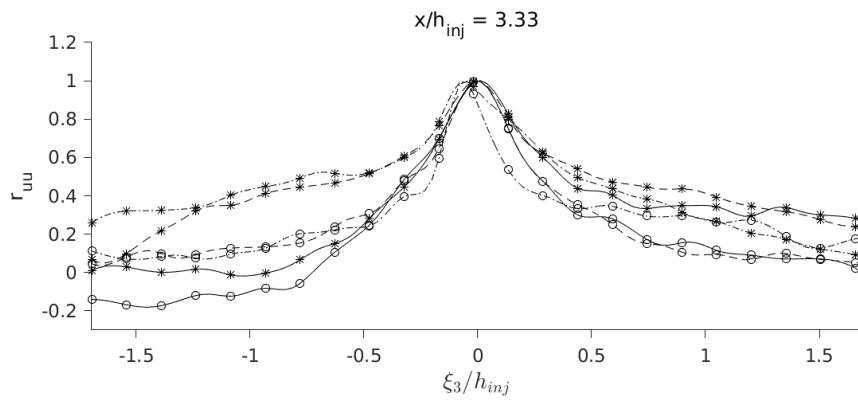
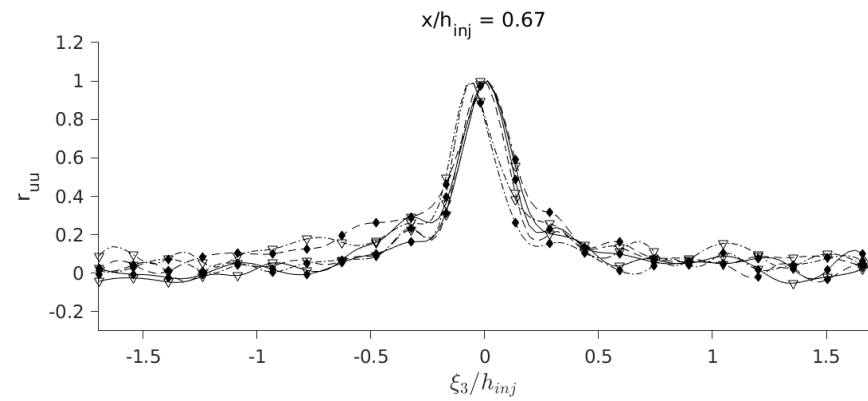
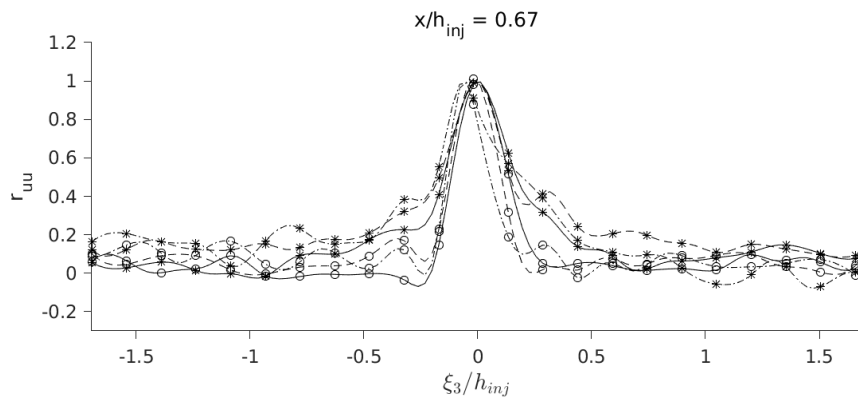
203

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.71 - Perfis da auto-correlação espacial de  $u'$  em função de  $\xi_3$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,16$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .

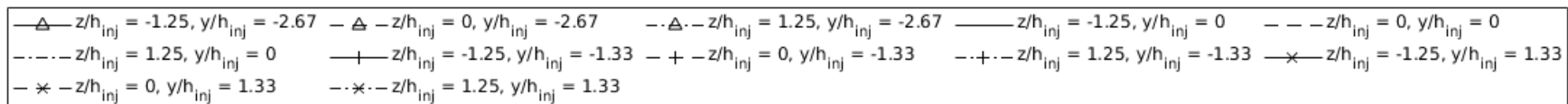


204

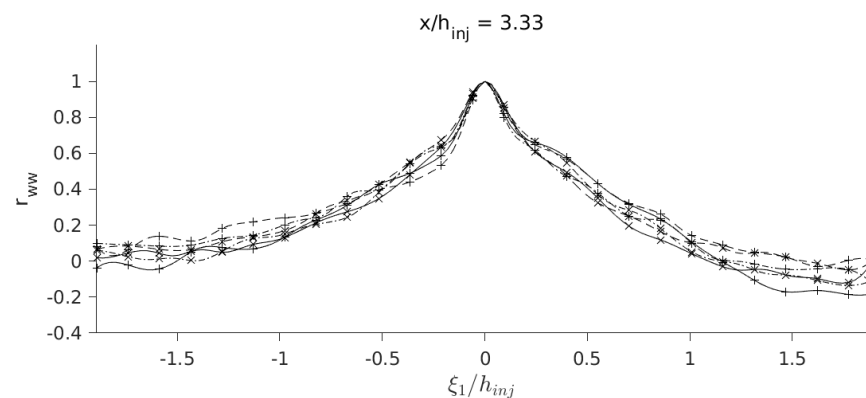
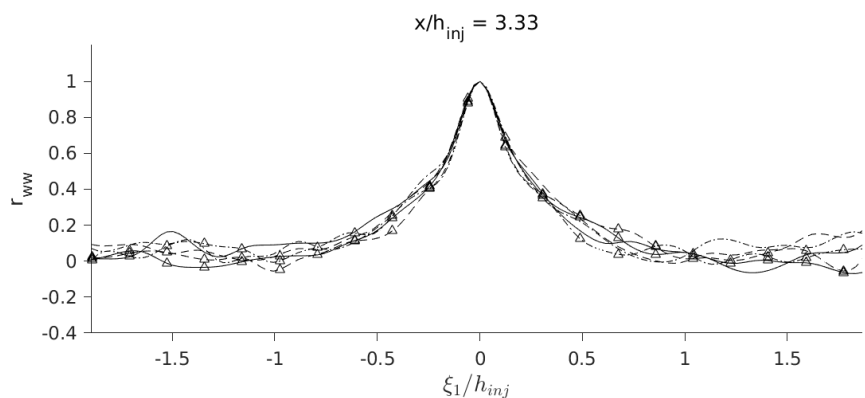
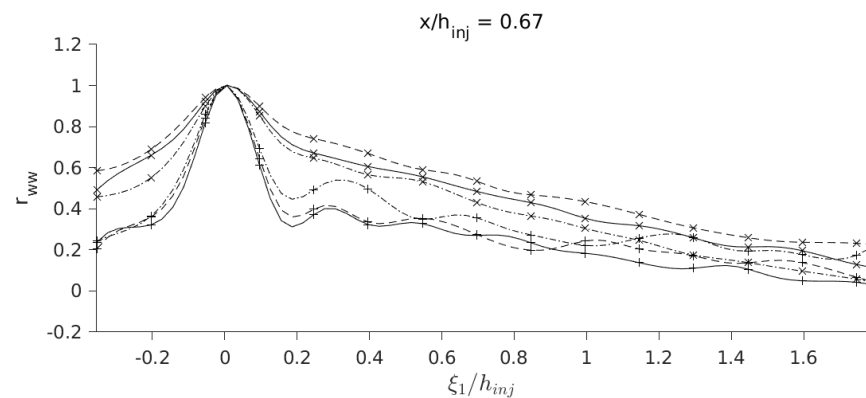
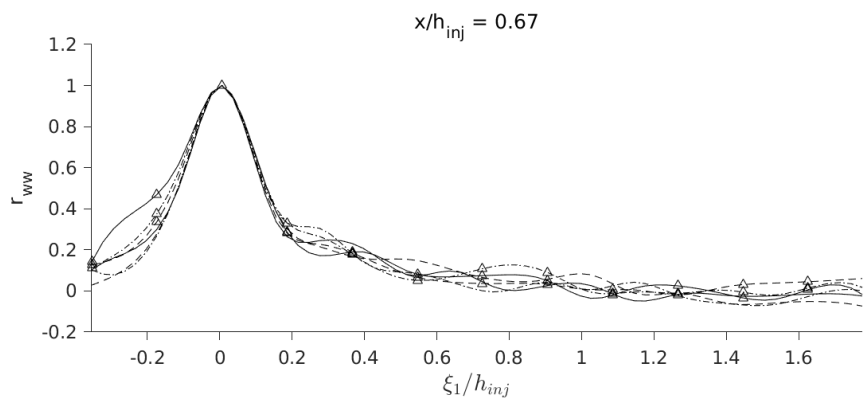


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.72 - Perfis da auto-correlação espacial de  $w'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .

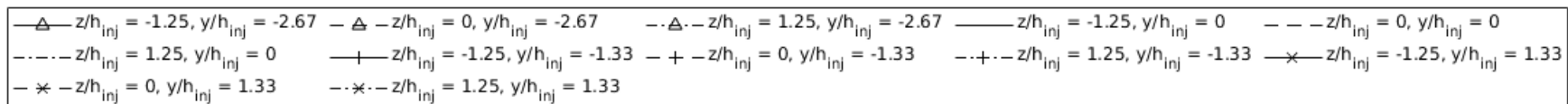


205

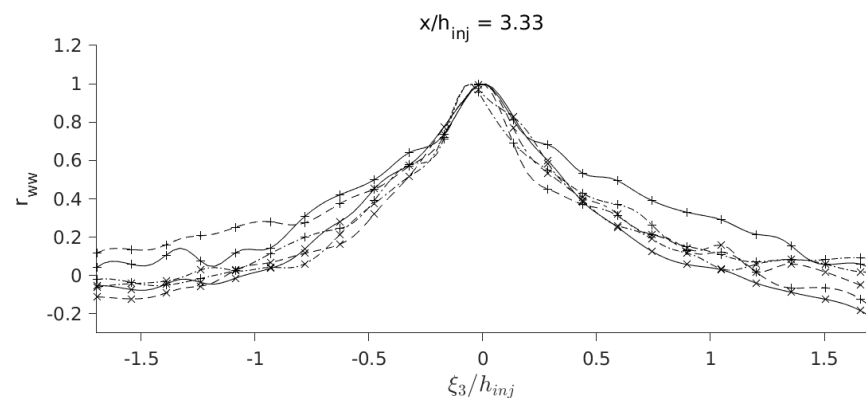
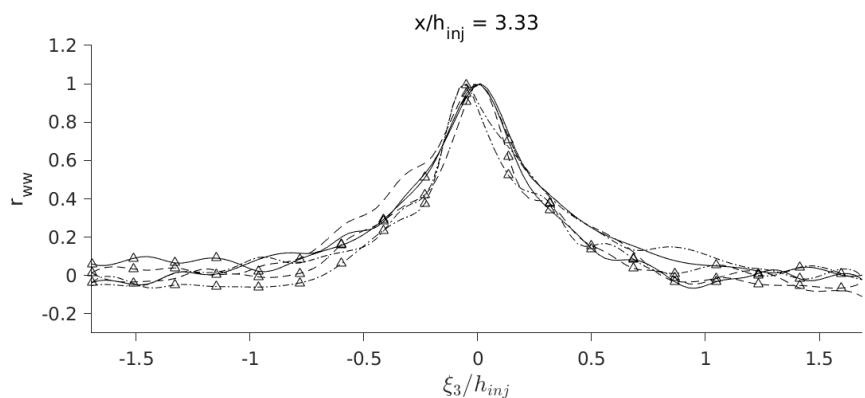
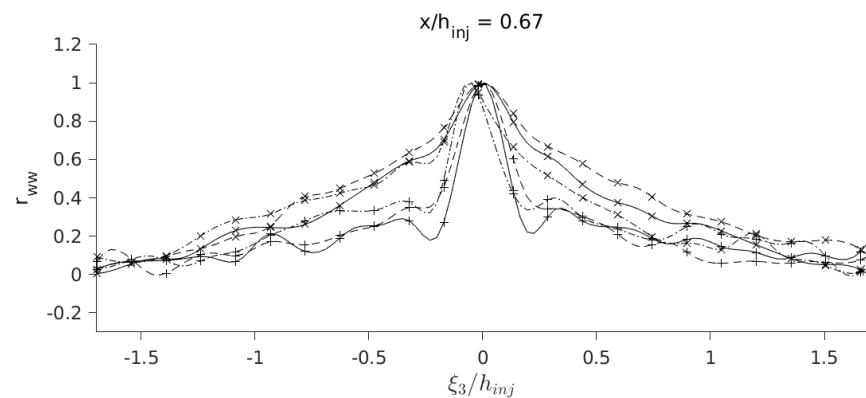
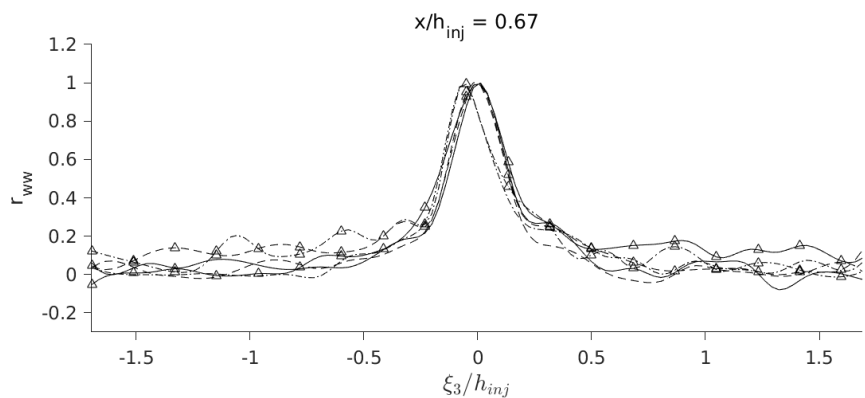


Fonte: Produção do autor.

Figura 5.73 - Perfis da auto-correlação espacial de  $w'$  em função de  $\xi_3$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,14$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



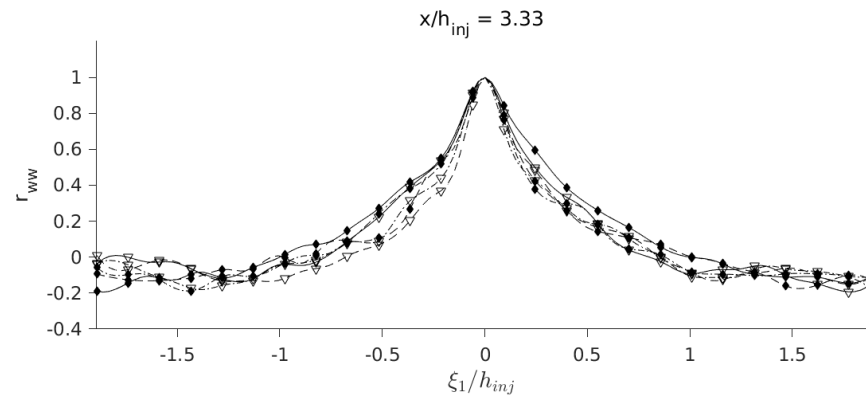
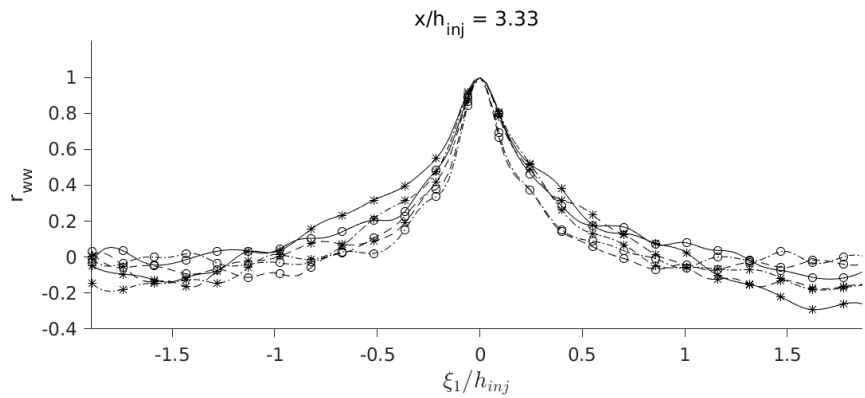
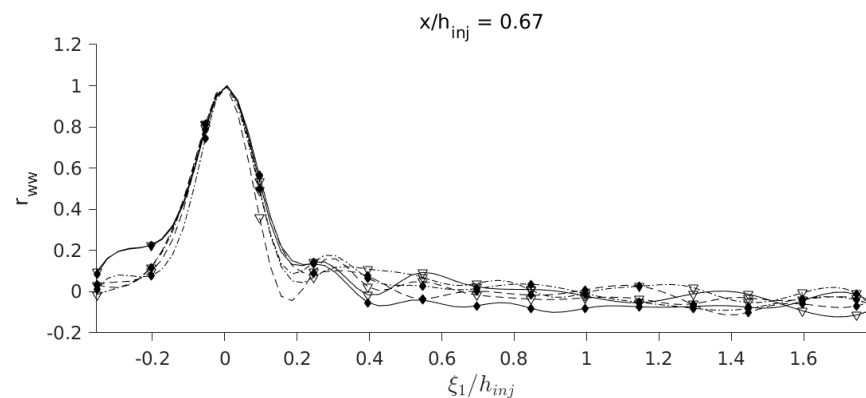
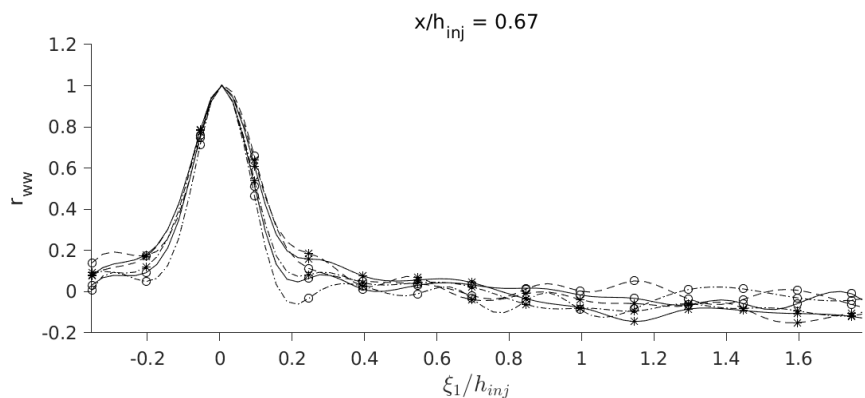
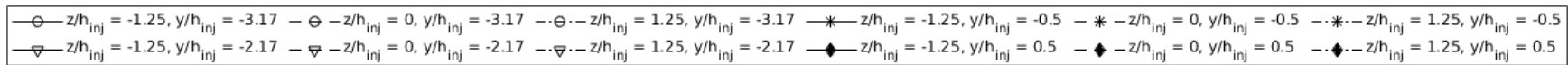
206



Fonte: Produção do autor.



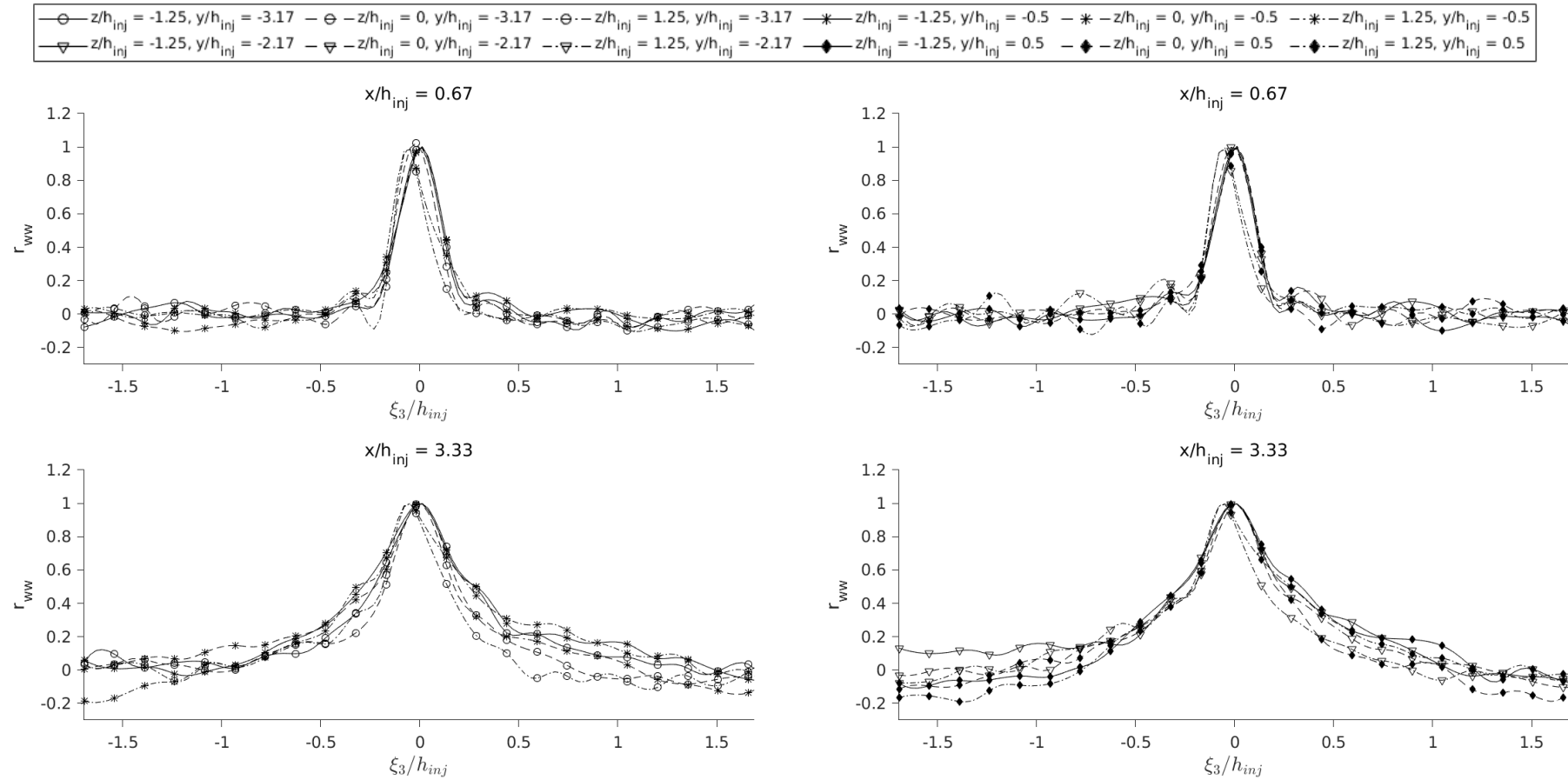
Figura 5.74 - Perfis da auto-correlação espacial de  $w'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais).  
 Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



207

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.75 - Perfis da auto-correlação espacial de  $w'$  em função de  $\xi_3$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,15$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Da Figura 5.76 até a Figura 5.83 são apresentados os perfis das correlações cruzadas de  $u'$  com  $v'$ ,  $r_{uv}$ , e de  $u'$  com  $w'$ ,  $r_{uw}$ . As correlações cruzadas que foram calculadas a partir das medições com PIV nas seções verticais são mostradas pelas Figuras 5.76 a 5.79, enquanto que aquelas que foram calculadas a partir dos dados das seções horizontais são apresentadas pelas Figuras 5.80 a 5.83. As correlações  $r_{uv}(0, \xi_2, 0)$  localizadas em  $y/h_{inj} = \pm 2,67$  e  $y/h_{inj} = \pm 3,17$ , que são apresentadas pelas Figuras 5.77 e 5.79, têm menos valores em  $\xi_2$  pois foram limitadas pela área de visualização. As correlações  $r_{uv}(0, 0, \xi_3)$  não tiveram o mesmo problema.

Comparando a correlação  $r_{uv}(\xi_1, 0, 0)$  com a  $r_{uv}(0, \xi_2, 0)$ , verifica-se que as curvas da correlação  $r_{uv}(0, \xi_2, 0)$  são mais suaves com relação aos perfis da correlação cruzada longitudinal, conforme observado nas Figuras 5.76 a 5.79. Essa característica dos perfis em questão é oposta nos perfis das auto-correlações espaciais. A razão disso reside no fato da interseção entre o escoamento principal com as esteiras, isto é, onde ocorre a mistura de ambos, se estender mais na direção longitudinal. Como as correlações cruzadas são maiores nestas interseções, logo as curvas das correlações cruzadas normais são mais suaves em comparação as das correlações cruzadas longitudinais.

Nos perfis de  $r_{uv}$  localizados a jusante dos centros das faces posteriores dos injetores e entre os injetores, que são apresentados pelas Figuras 5.76 a 5.79, pode-se observar que aqueles que são mais próximos dos injetores, quase sempre, não atingem valores superiores a 0,3 e inferiores a  $-0,3$ . Além disso, nestes mesmos perfis, verifica-se também que, usualmente, não há nenhum pico ou vale característico, mas apenas flutuações locais de baixa amplitude. A razão disso se deve ao fato que, nestas localidades, as correlações cruzadas espaciais estão distantes das camadas de cisalhamento, onde  $r_{uv}$  tem valores mais elevados. No entanto, os perfis de  $r_{uv}$  localizados em  $x/h_{inj} = 3,33$  e a jusante do centro da face posterior do injetor superior e inferior atingem valores superiores a 0,3 e inferiores a  $-0,3$  respectivamente. Tal característica não é observada nos perfis de  $r_{uv}$  localizados a jusante do centro da face posterior do injetor central e em  $x/h_{inj} = 3,33$ . Essa diferença entre os perfis de  $r_{uv}$  se deve a influência das camadas limites turbulentas das paredes na geometria das esteiras ao longo da região principal.

Os perfis das correlações cruzadas localizados nas mesmas alturas das bordas dos injetores, que são apresentadas pelas Figuras 5.78 e 5.79, têm características distintas dos outros perfis. Observa-se que os perfis das bordas inferiores dos injetores atingem seus maiores valores em torno de  $\xi_1/h_{inj} = 0$  e diminuem linearmente ao longo de

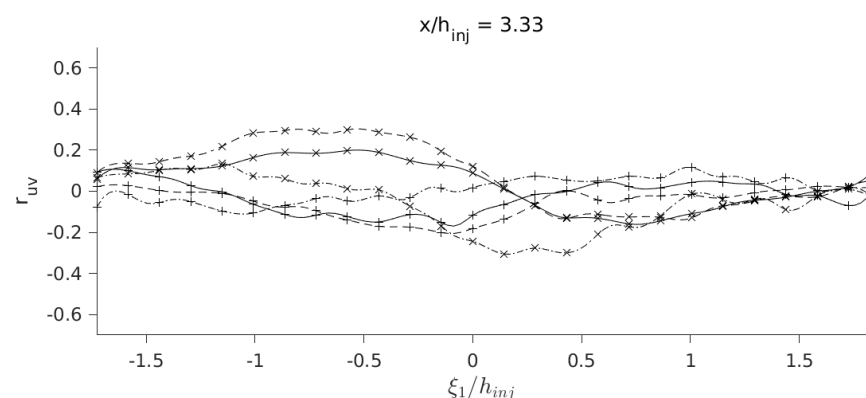
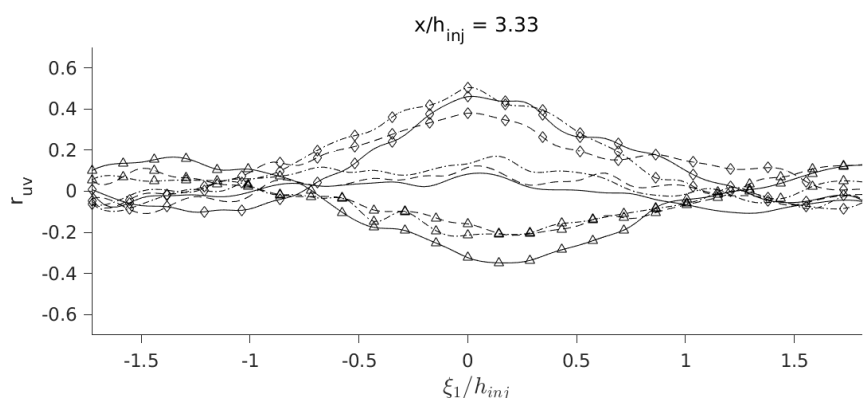
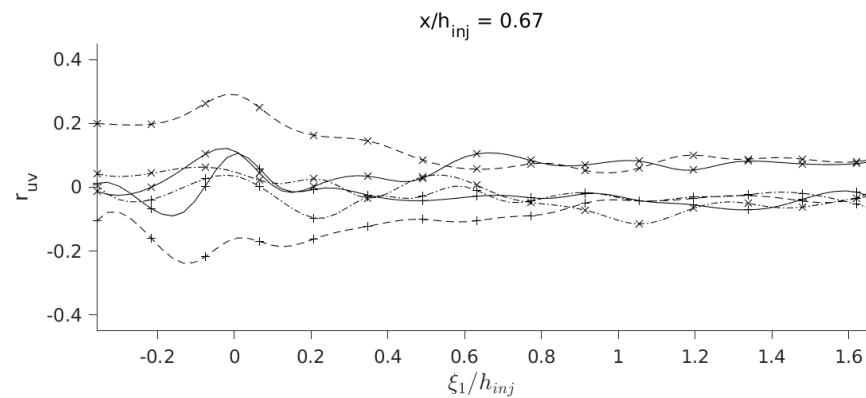
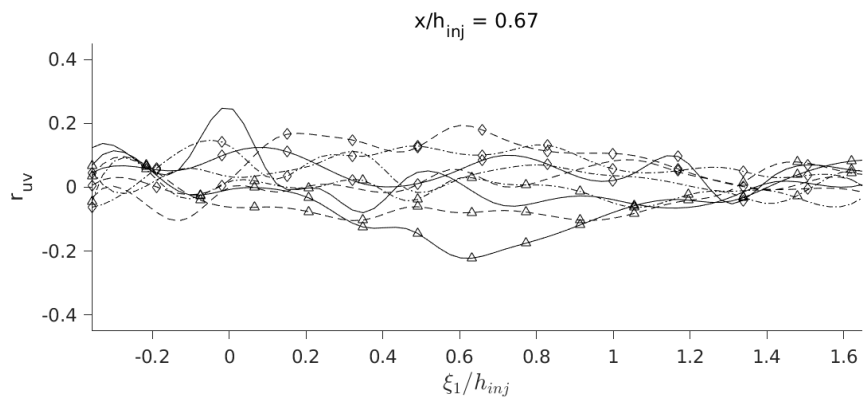
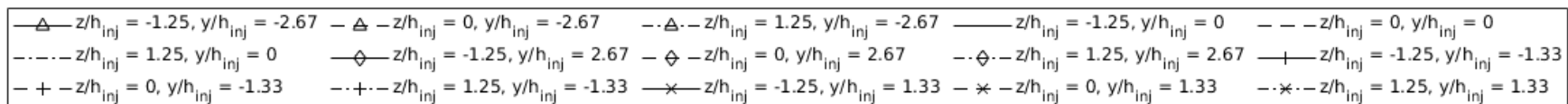
$\xi_1/h_{inj}$ . O inverso é observado nos perfis das bordas superiores dos injetores. Tais aspectos dos perfis de  $r_{uv}$  nas localidades em questão, assim como as características dos demais perfis de  $r_{uv}$ , se devem a camada de mistura existente na interseção do escoamento principal e as esteiras. Além disso, os perfis de  $r_{uv}(\xi_1,0,0)$  das cotas  $y/h_{inj} = \pm 3,17$  em  $x/h_{inj} = 3,33$ , que estão mais próximos das paredes inferior e superior, respectivamente, têm curvas mais acentuadas com relação aos perfis de  $r_{uv}(\xi_1,0,0)$  das demais cotas. A razão disso está na influência dos gradientes de velocidade próximos as paredes.

Entre os perfis das correlações cruzadas localizados nas mesmas alturas das bordas dos injetores, aqueles que estão na estação  $x/h_{inj} = 3,33$ , na profundidade  $z/h_{inj} = 1,25$ , e nas cotas  $y/h_{inj} = 2,17$  e  $y/h_{inj} = 3,17$ , não seguem o padrão observado nos demais perfis. A razão disso reside no próprio comportamento da turbulência nesta localidade e na qualidade das medições com PIV.

Com relação as correlações cruzadas que foram calculadas a partir das medições das seções horizontais, que são apresentadas pelas Figuras 5.80 a 5.83, verifica-se que os perfis de  $r_{uw}(\xi_1,0,0)$ , de modo geral, ficam na faixa de  $-0,25$  a  $0,25$ , assim como parte dos perfis de  $r_{uw}(0,\xi_2,0)$ . Nos pontos localizados em  $x/h_{inj} = 3,33$  nas regiões entre os injetores e nas bordas das faces posteriores dos injetores, as correlações cruzadas são positivas quando  $\xi_3/h_{inj} < 0$  e negativas quando  $\xi_3/h_{inj} > 0$ . Além disso, as curvas das correlações cruzadas  $r_{uw}$  não são mais proeminentes do que as das correlações cruzadas  $r_{uv}$ .

Verifica-se que os perfis de  $r_{uw}(\xi_1,0,0)$ , que são apresentados pelas Figuras 5.80 e 5.82, na maior parte dos casos, não apresentam nenhum pico ou vale característico. Dentre os perfis em questão, aqueles que apresentam alguma flutuação característica são os da posição  $(x/h_{inj}, y/h_{inj}, z/h_{inj}) \in \{(0,67, -2,67, 0); (3,33, \pm 0,5, -1,25)\}$ . As flutuações destes perfil em questão se deve a uma característica local da turbulência. Alguns perfis de  $r_{uw}(0,\xi_2,0)$ , que são apresentados pela Figura 5.81, têm a mesma característica.

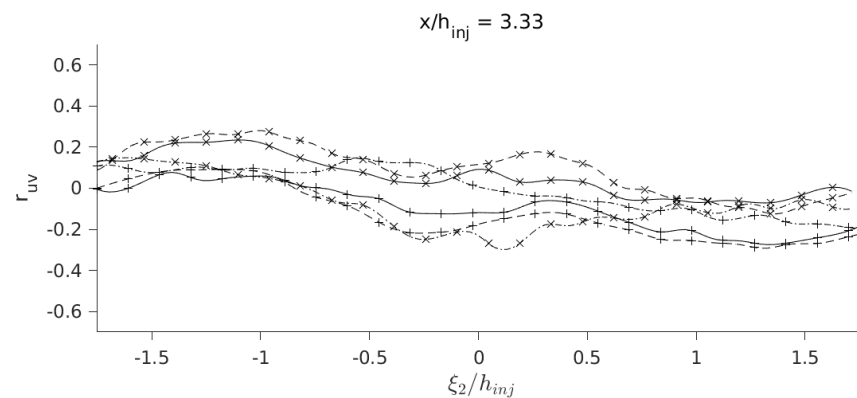
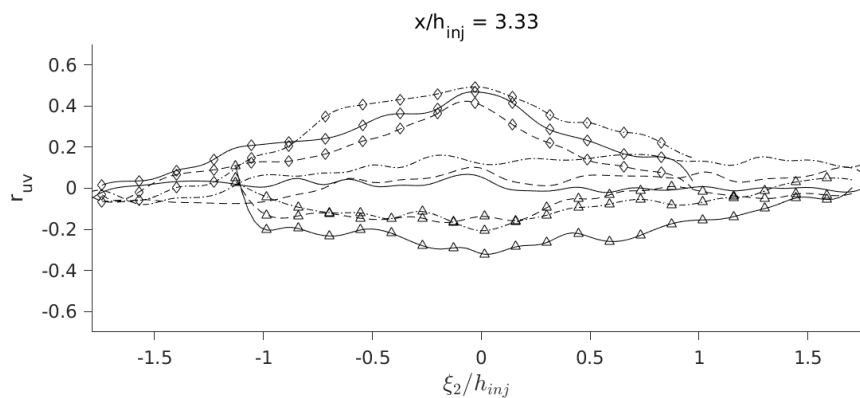
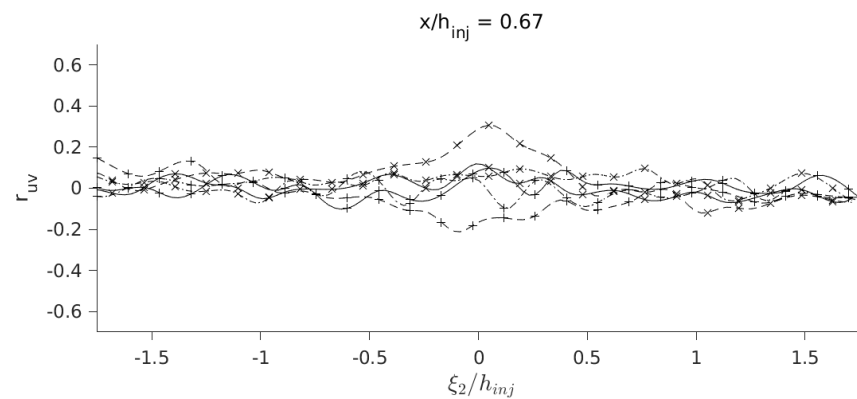
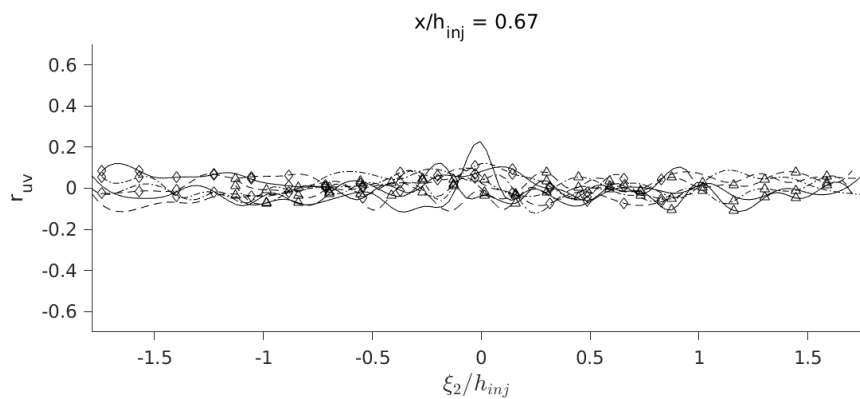
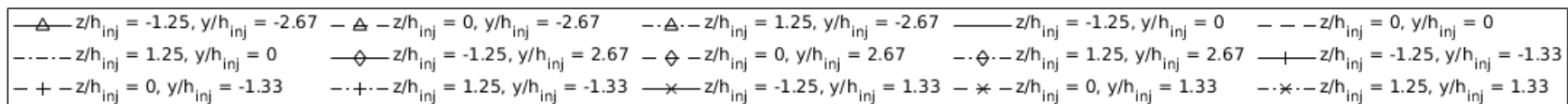
Figura 5.76 - Perfis da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,11$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



211

Fonte: Produção do autor.

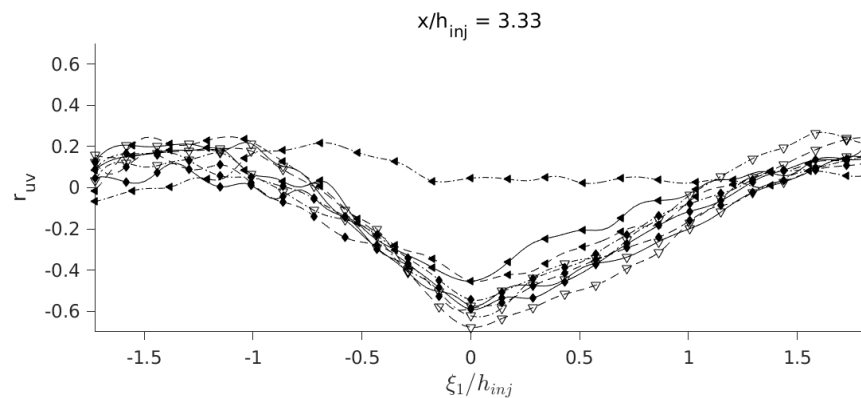
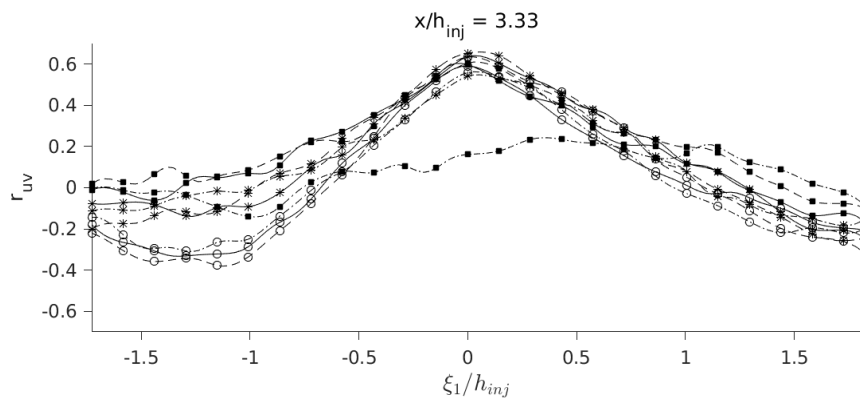
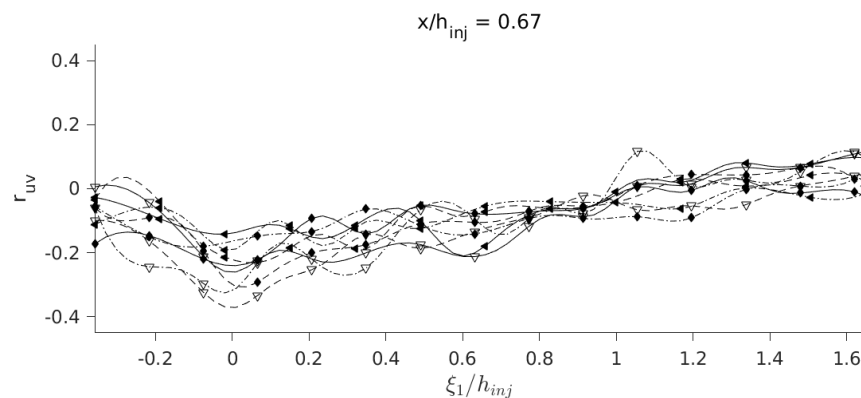
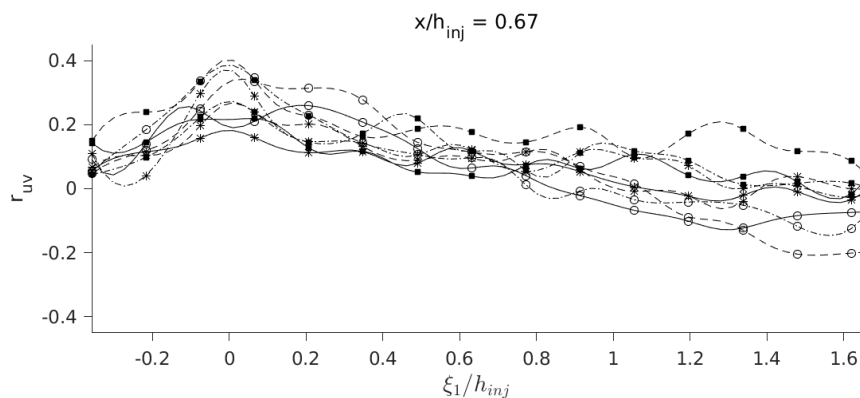
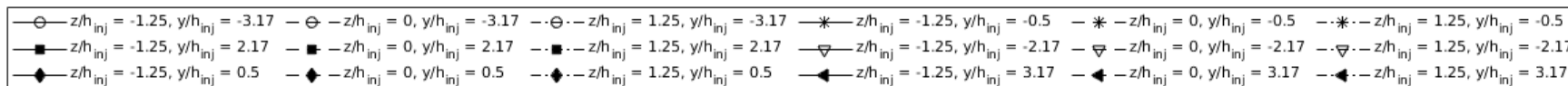
Figura 5.77 - Perfis da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  em função de  $\xi_2$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,16$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



212

Fonte: Produção do autor.

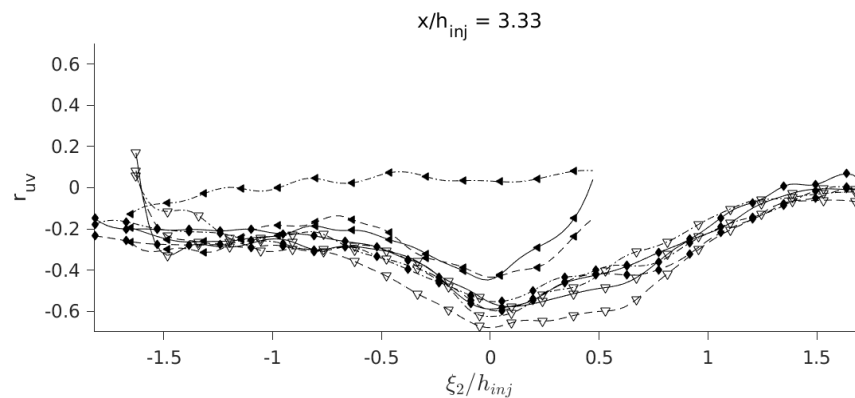
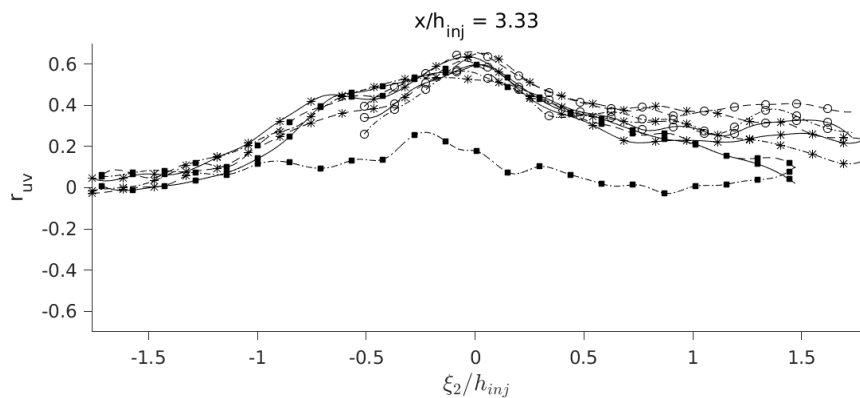
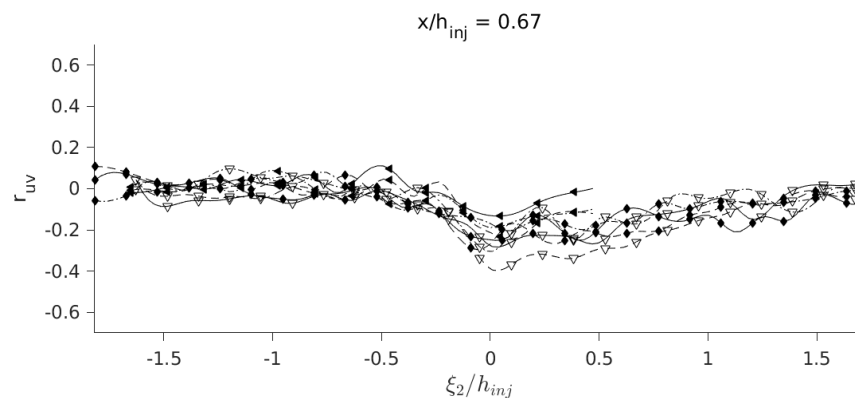
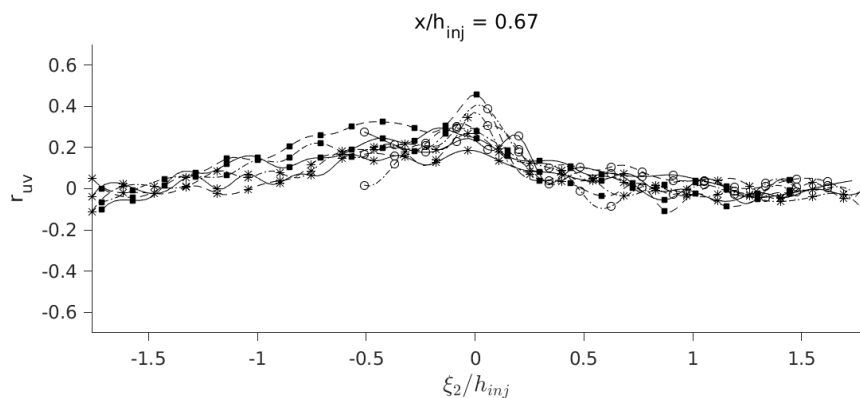
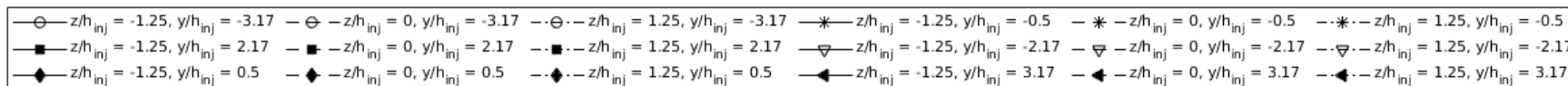
Figura 5.78 - Perfis da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



213

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.79 - Perfis da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  em função de  $\xi_2$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções verticais).  
 Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,16$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .

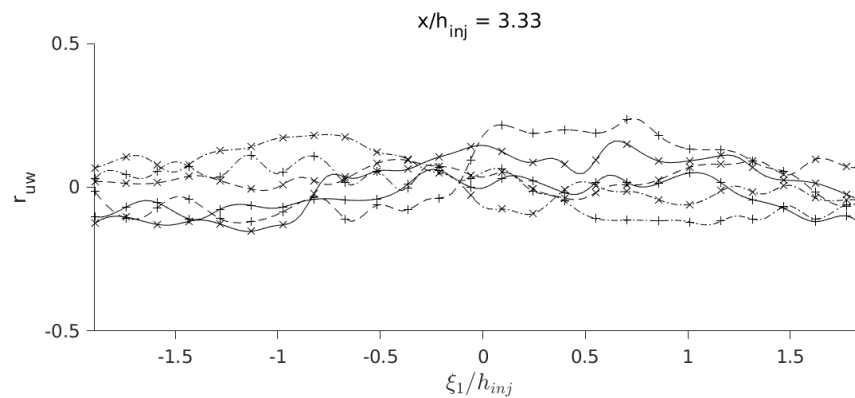
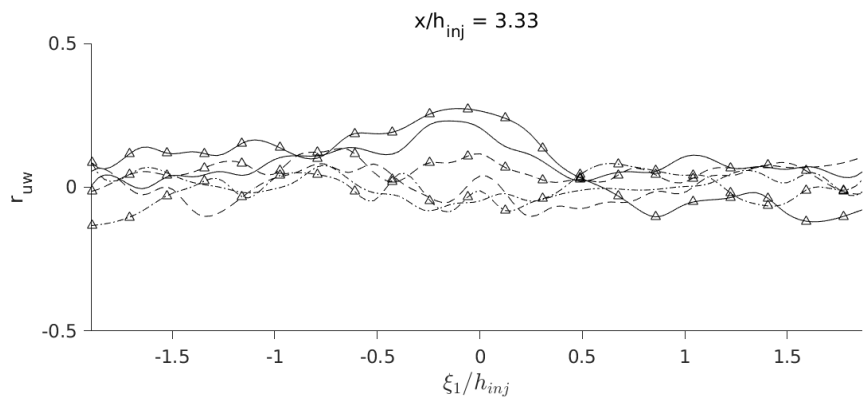
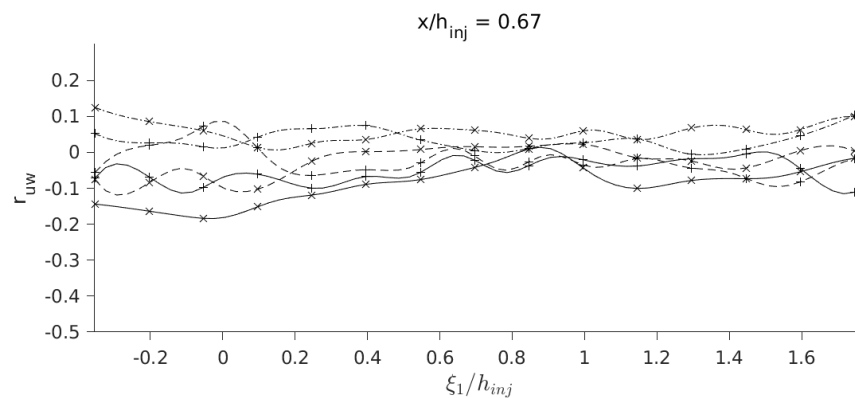
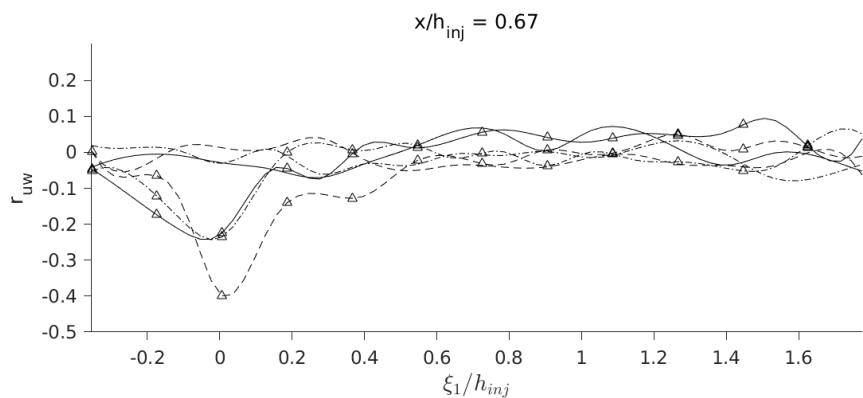
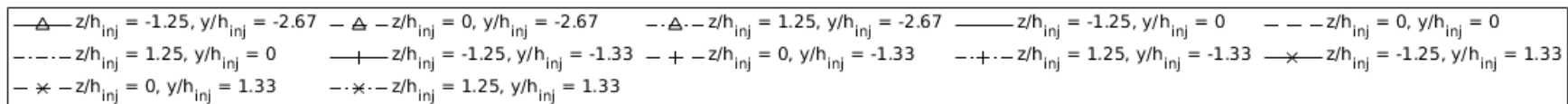


214

Fonte: Produção do autor.



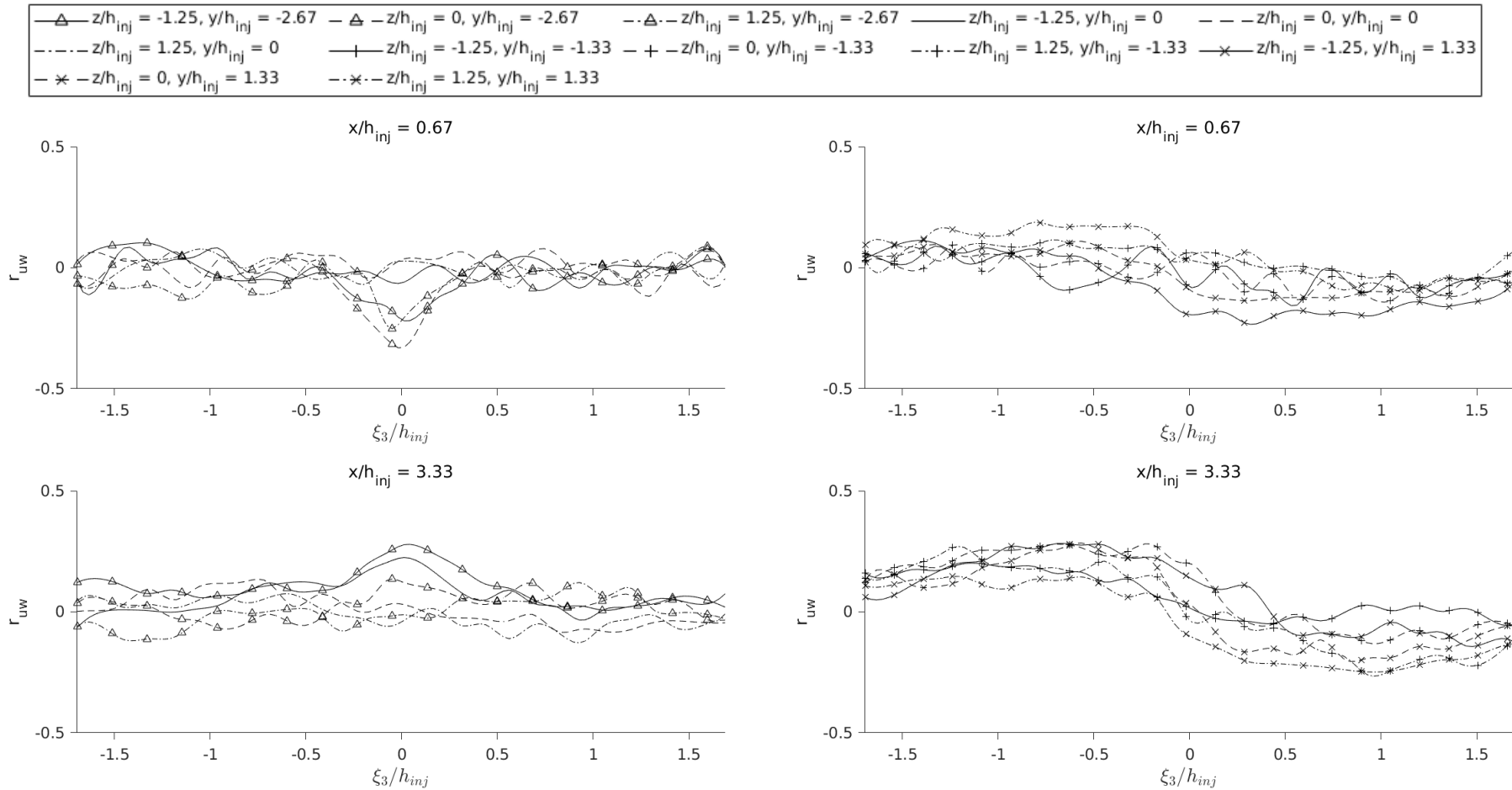
Figura 5.80 - Perfis da correlação cruzada espacial de  $u'$  e  $w'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,11$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



215

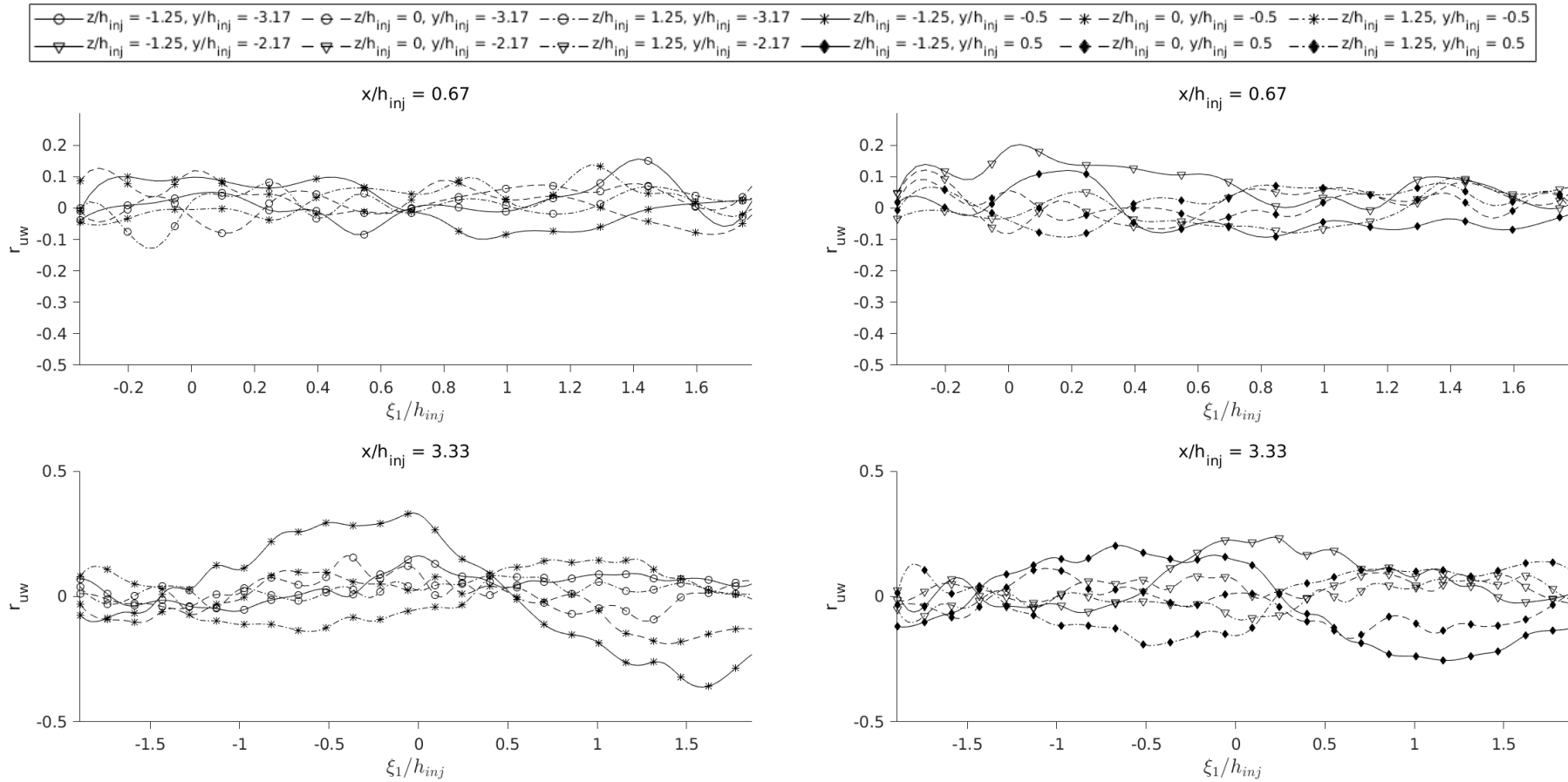
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.81 - Perfis da correlação cruzada espacial de  $u'$  e  $w'$  em função de  $\xi_3$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,16$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



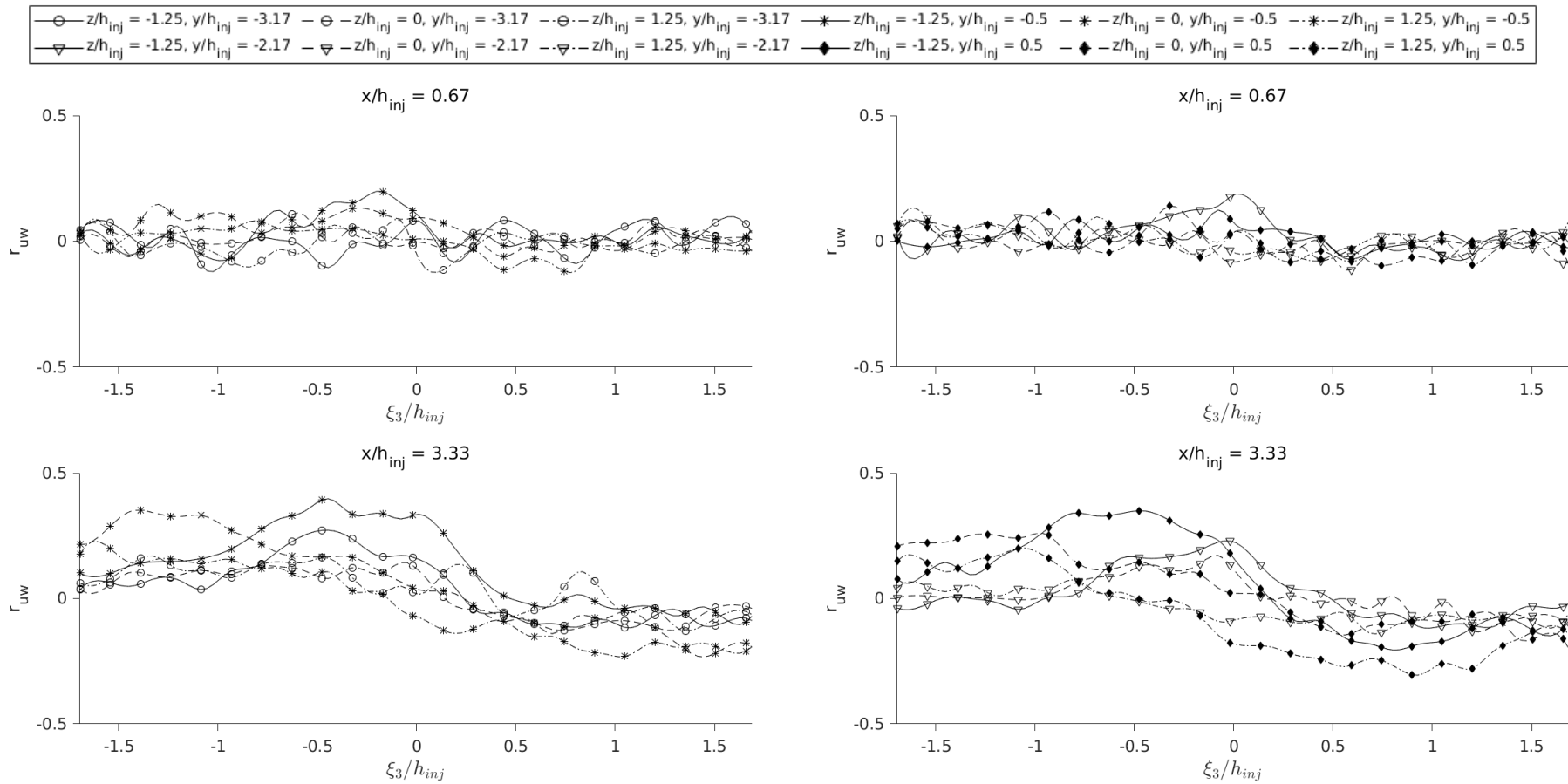
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.82 - Perfis da correlação cruzada espacial de  $u'$  e  $w'$  em função de  $\xi_1$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.83 - Perfis da correlação cruzada espacial de  $u'$  e  $w'$  em função de  $\xi_3$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,16$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

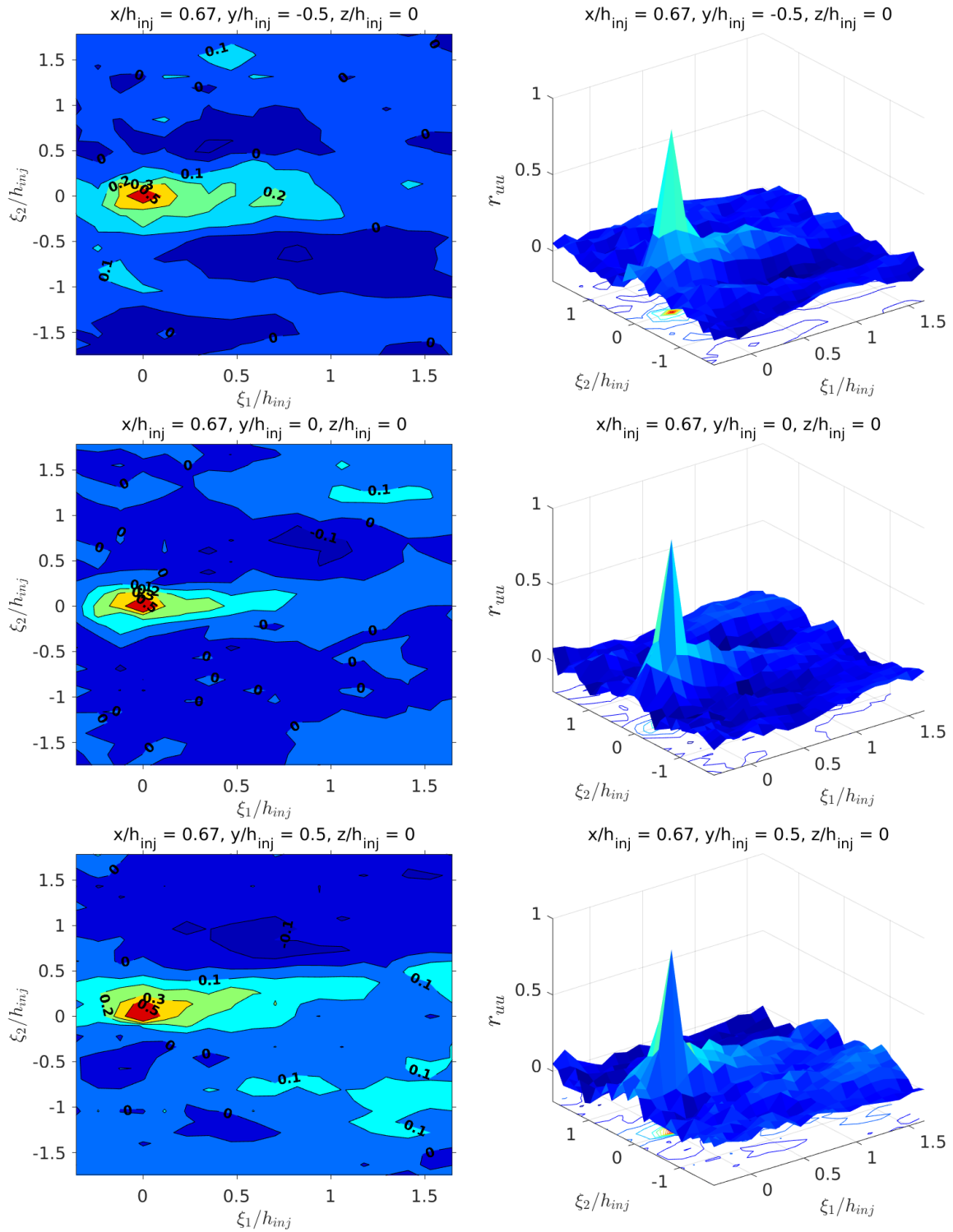
A terceira e última parte desta seção aborda as correlações espaciais em função de duas componentes de  $\vec{\xi}$  em determinados pontos da região principal. Da Figura 5.84 até a Figura 5.101 são apresentados os isocontornos destas correlações espaciais. Os pontos escolhidos da região principal são apresentados pelas Figuras 5.58 e 5.59 e somente aqueles localizados em  $z/h_{inj} = 0$  e em torno do injetor central e nas regiões entre os injetores. Também são apresentados superfícies tridimensionais das correlações espaciais, que foram calculadas a partir das medições com PIV nas seções verticais, junto com os isocontornos delas nas Figuras 5.84 a 5.95.

Pode-se verificar nos isocontornos das correlações espaciais de  $u'$ ,  $v'$  e  $w'$  que estão localizados nos pontos próximos ao injetor central, que a redução da correlação em torno de  $(\xi_1/h_{inj}, \xi_2/h_{inj}) = (0,0)$  e de  $(\xi_1/h_{inj}, \xi_3/h_{inj}) = (0,0)$  é muito mais intensa do que os isocontornos localizados nas regiões entre injetores. Entretanto, nos isocontornos das auto-correlações espaciais mais distantes dos injetores, não é observado esse contraste.

Nos isocontornos de  $r_{uu}(\xi_1, \xi_2, 0)$ , que são apresentados pelas Figuras 5.84 e 5.85, verifica-se que em algumas regiões longes de  $(\xi_1/h_{inj}, \xi_2/h_{inj}) = (0,0)$  os valores de  $r_{uu}(\xi_1, \xi_2, 0)$  são um pouco maiores em relação aqueles encontrados em outras regiões. Essas "ilhas" podem ser observadas nos isocontornos de  $r_{uu}(\xi_1, \xi_2, 0)$  das posições  $(x/h_{inj}; y/h_{inj}; z/h_{inj}) \in \{(0,67; 0; 0); (0,67; -1,33; 0)\}$ . Há outras ilhas nos isocontornos das Figuras 5.84 e 5.85 e nos demais isocontornos presentes nas Figuras 5.86 a 5.101.

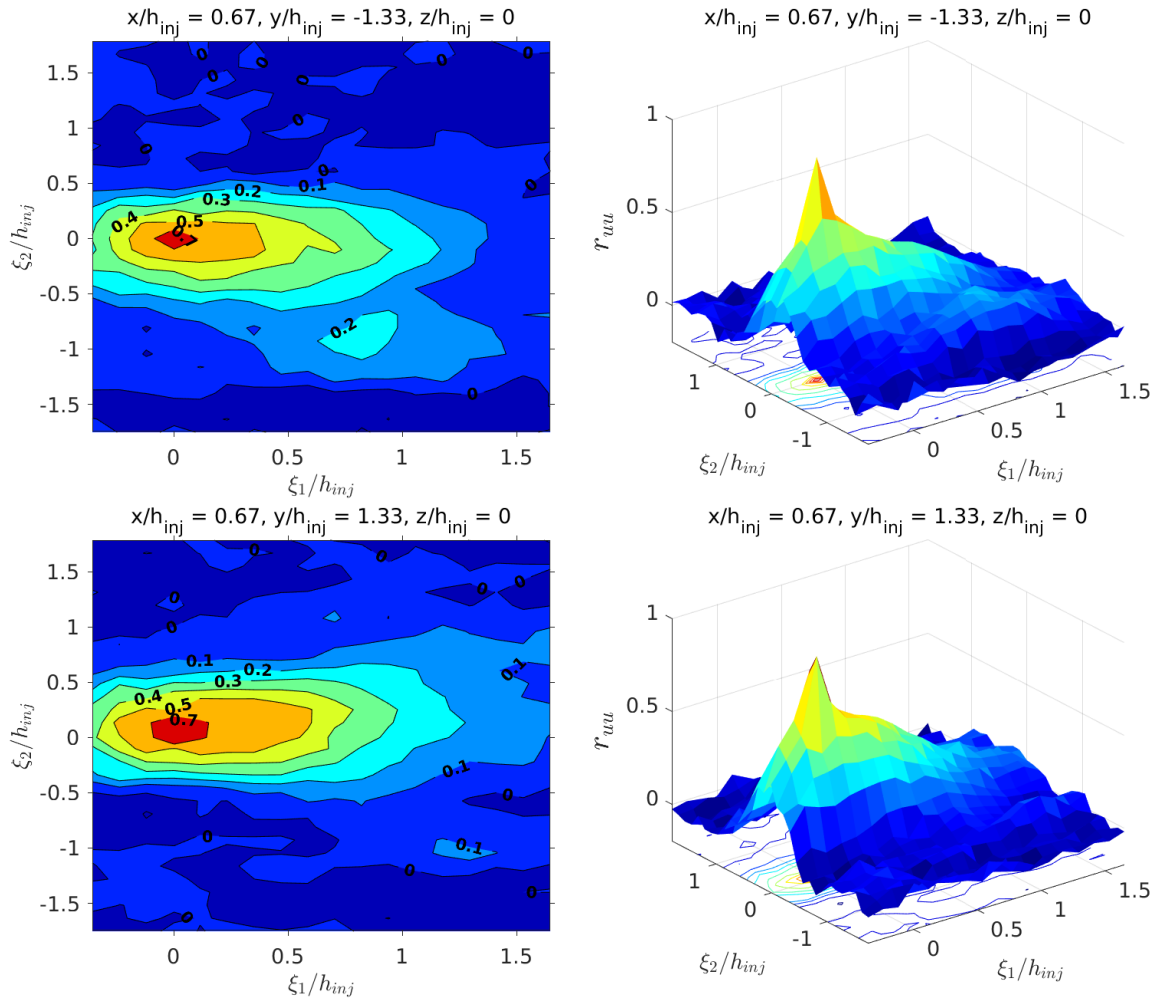
Além disso, pode-se verificar nos isocontornos da correlação cruzada espaciais, que apresentados pelas Figuras 5.92, 5.93, 5.94, 5.95, 5.100 e 5.101, que as correlações cruzadas espaciais próximas aos injetores são relativamente homogêneas no plano  $\xi_1\xi_2$  e no plano  $\xi_1\xi_3$ . No entanto, as correlações cruzadas espaciais distantes dos injetores apresentam certos padrões nos seus isocontornos com vales e picos bem definidos, com exceção da correlação cruzada da altura  $y/h_{inj} = 0$ .

Figura 5.84 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{uu}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,05$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



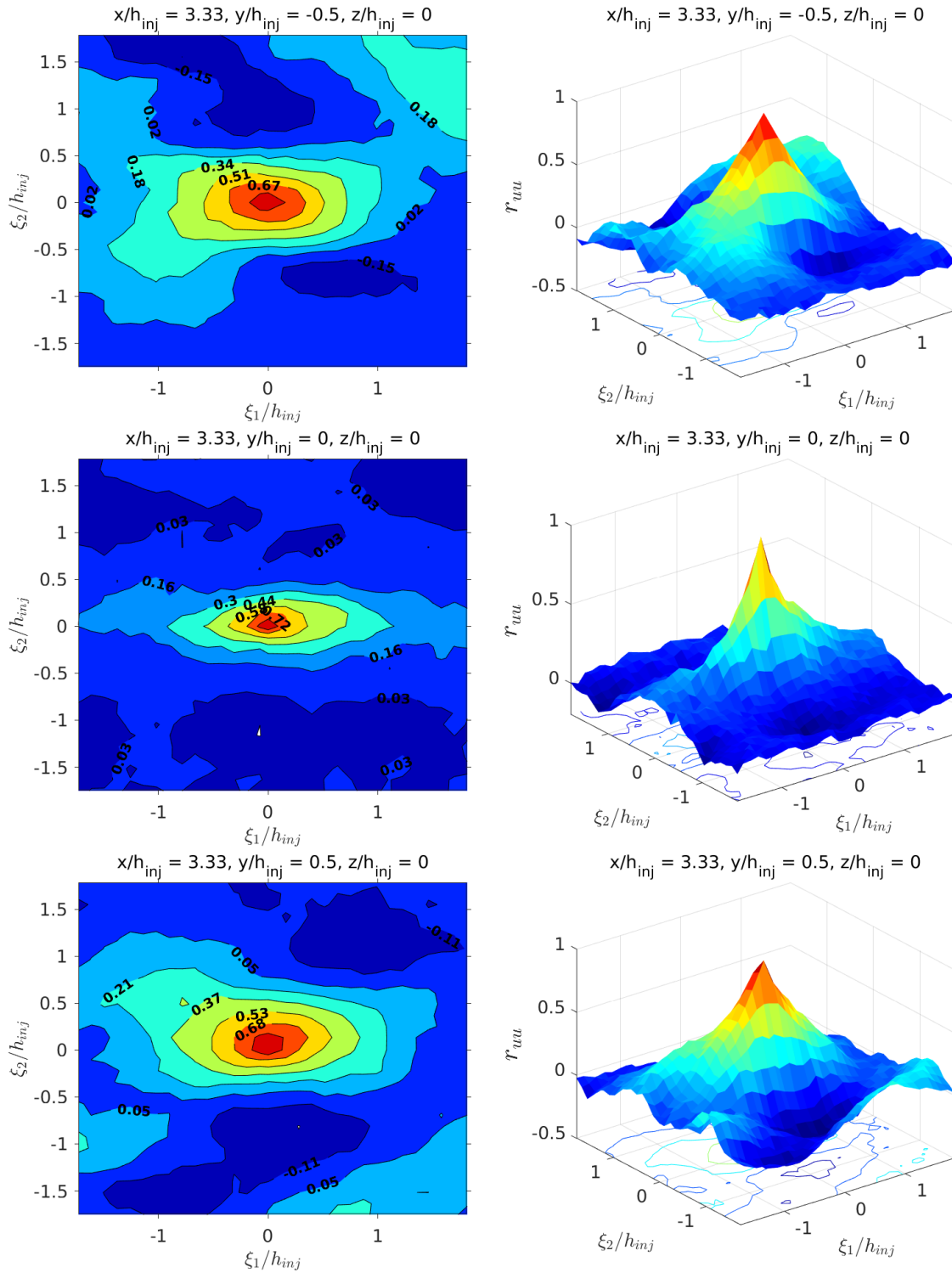
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.85 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{uu}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,05$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

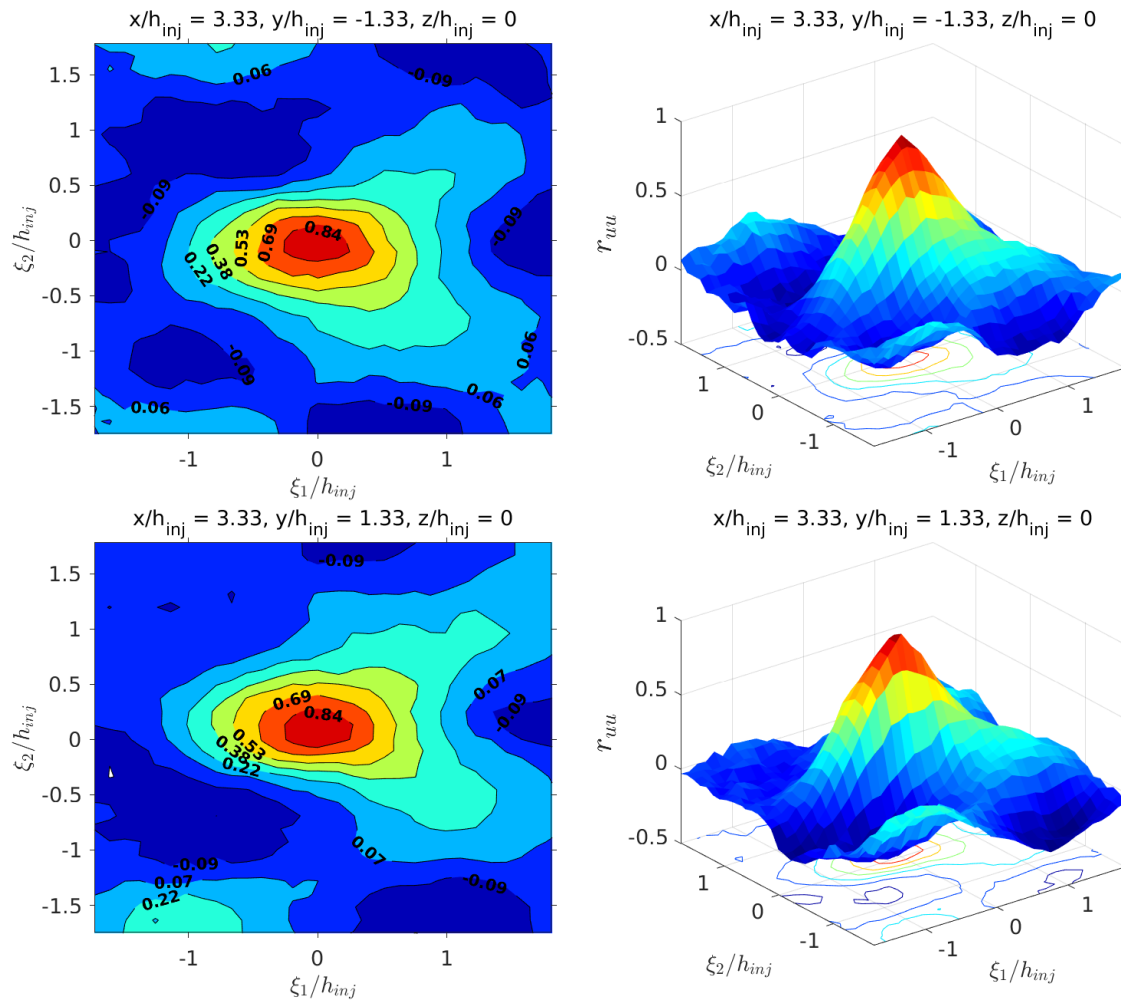
Figura 5.86 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{uu}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

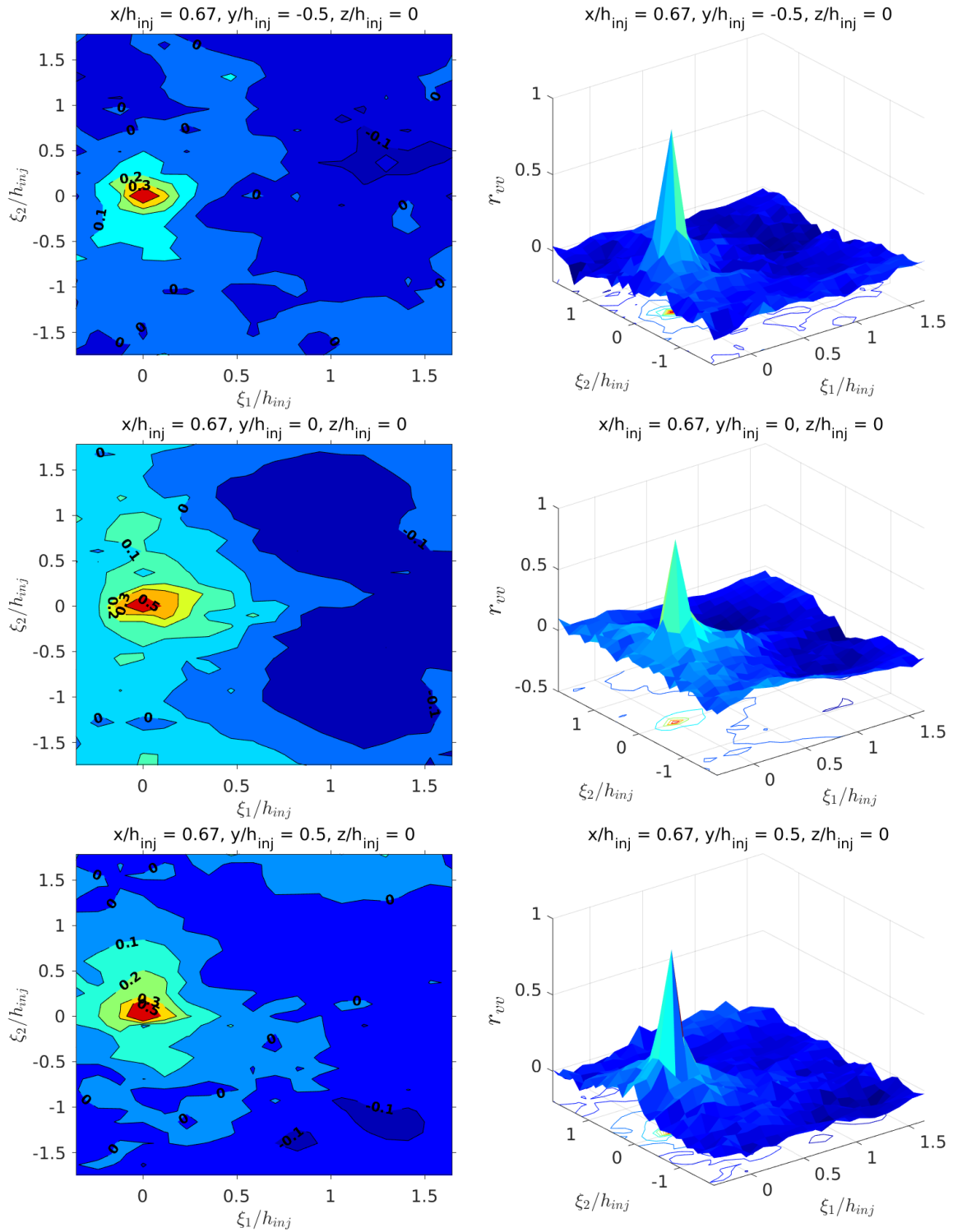


Figura 5.87 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{uu}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



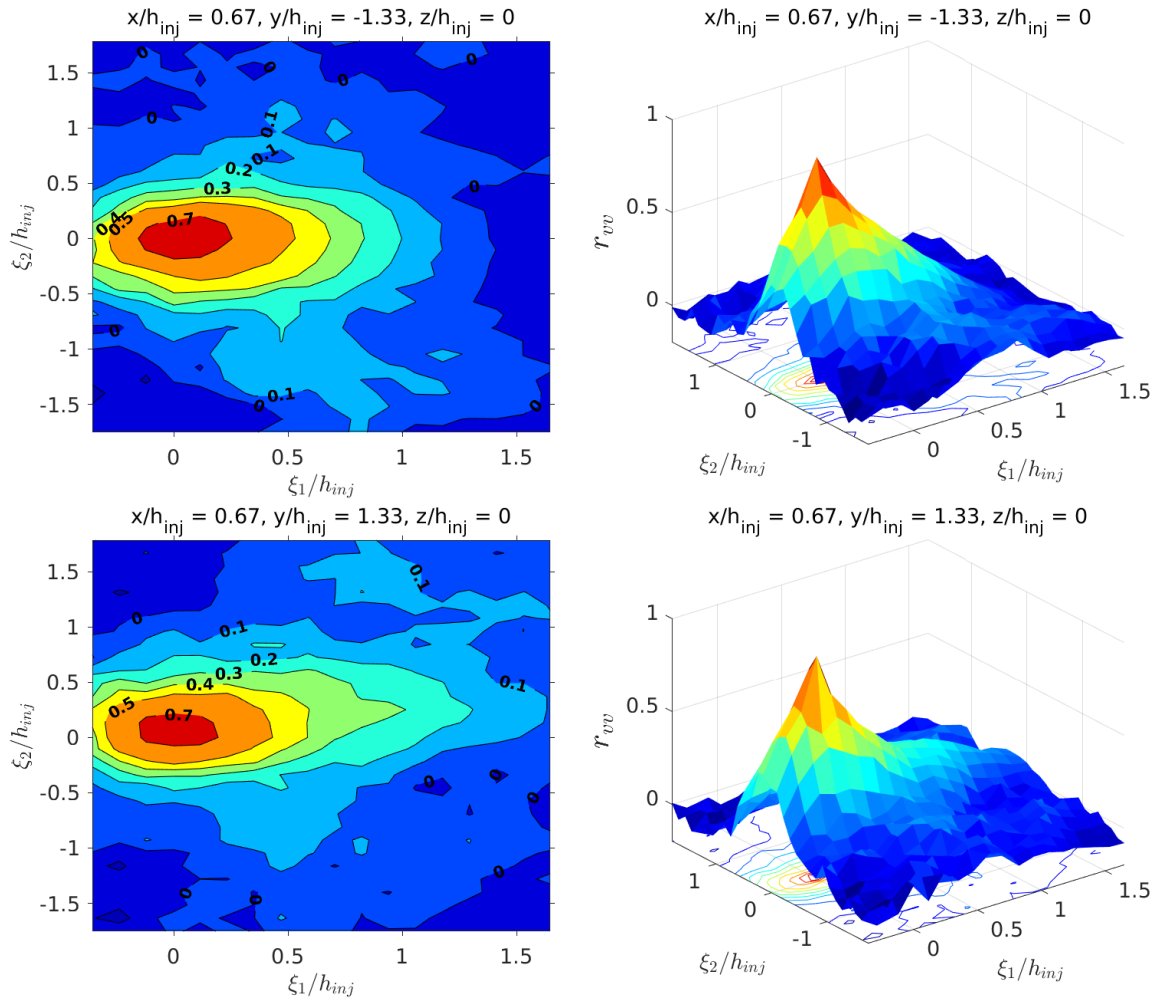
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.88 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{vv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,05$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



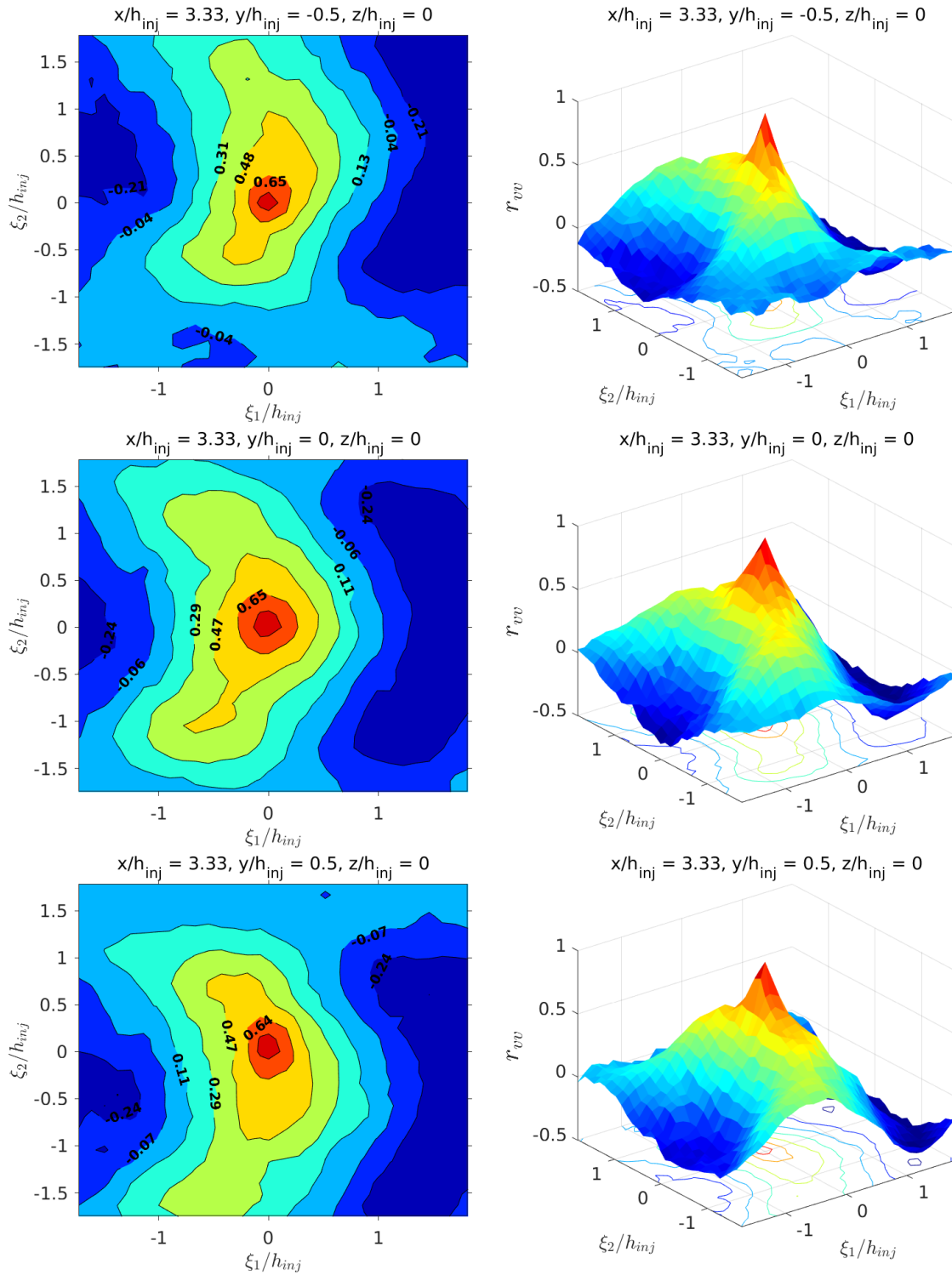
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.89 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{vv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,05$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



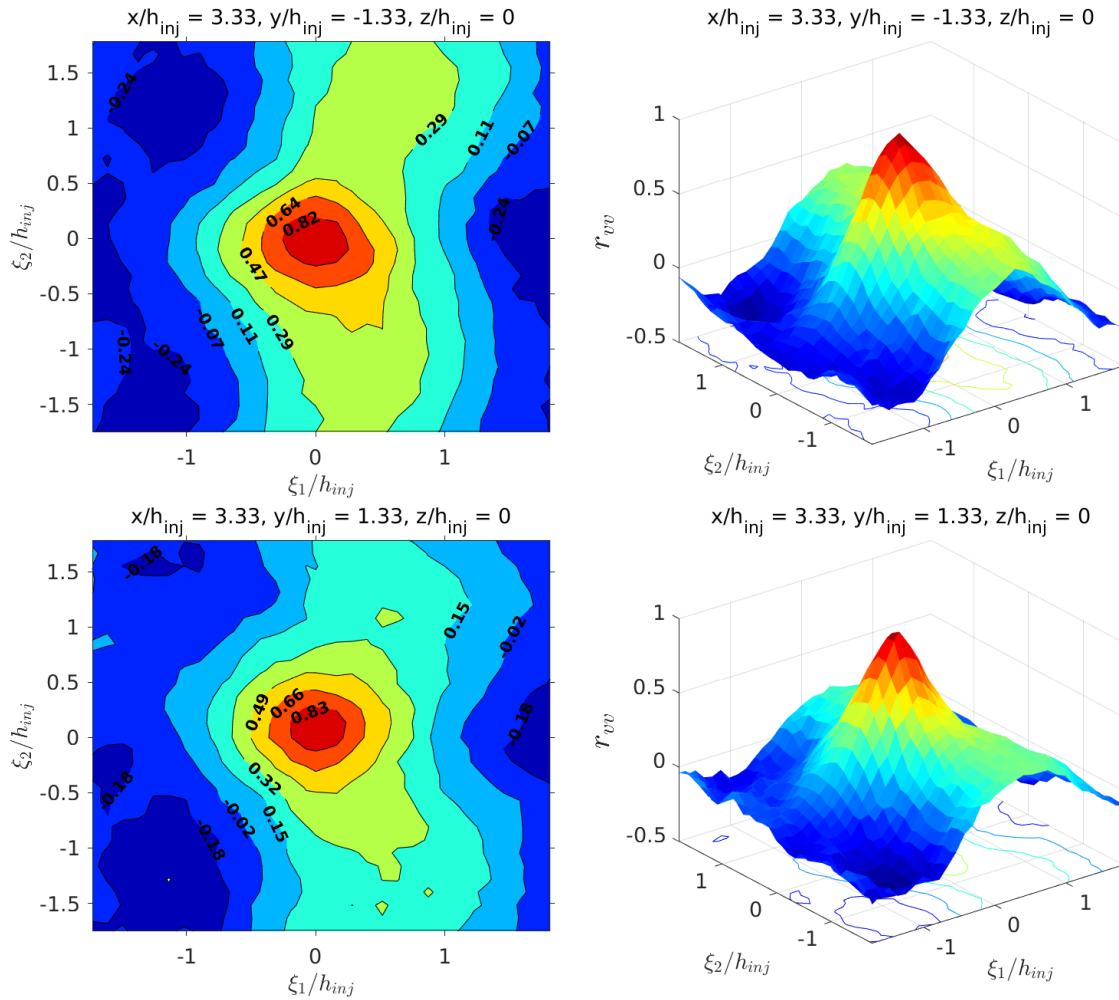
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.90 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{vv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



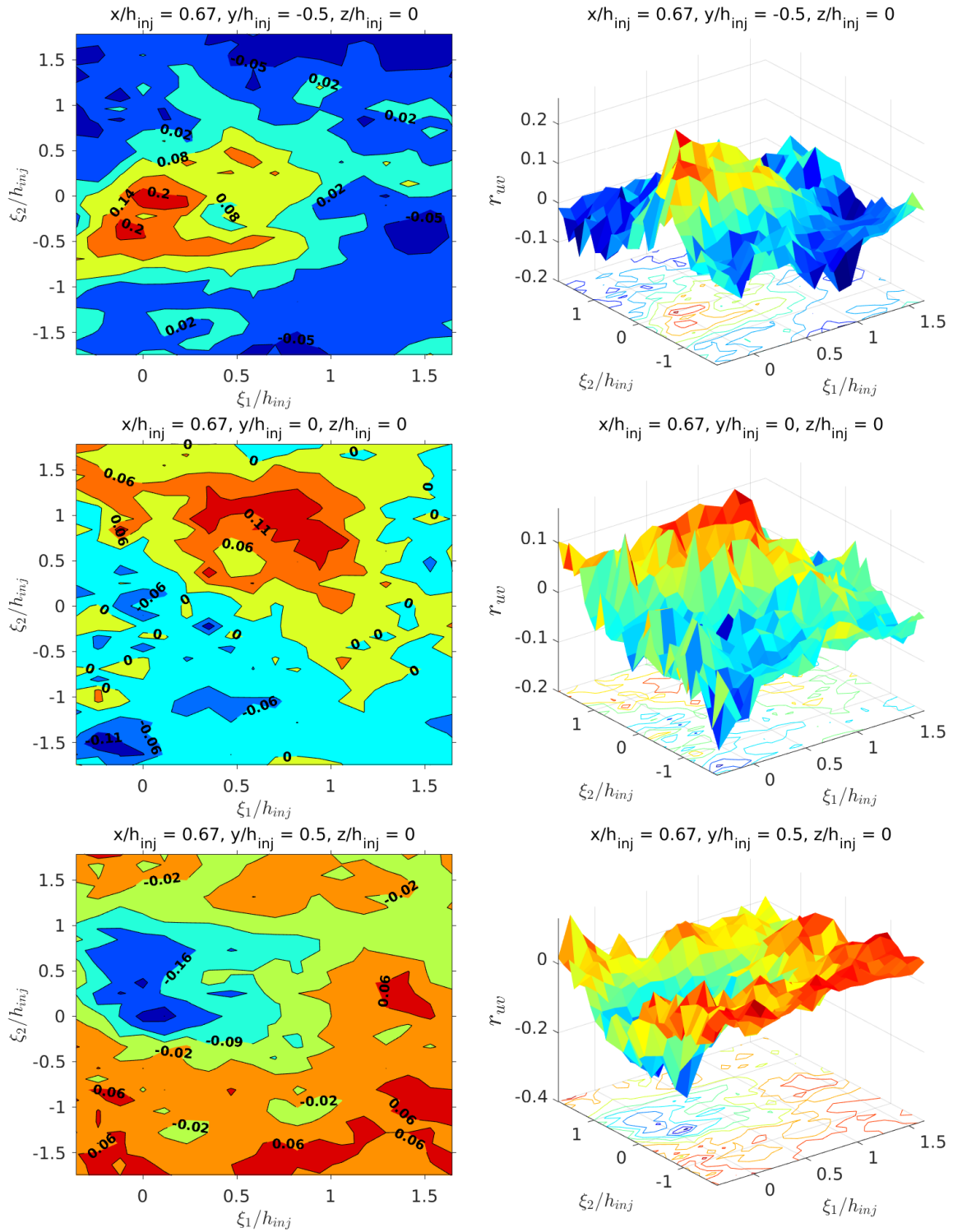
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.91 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{vv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{vv} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



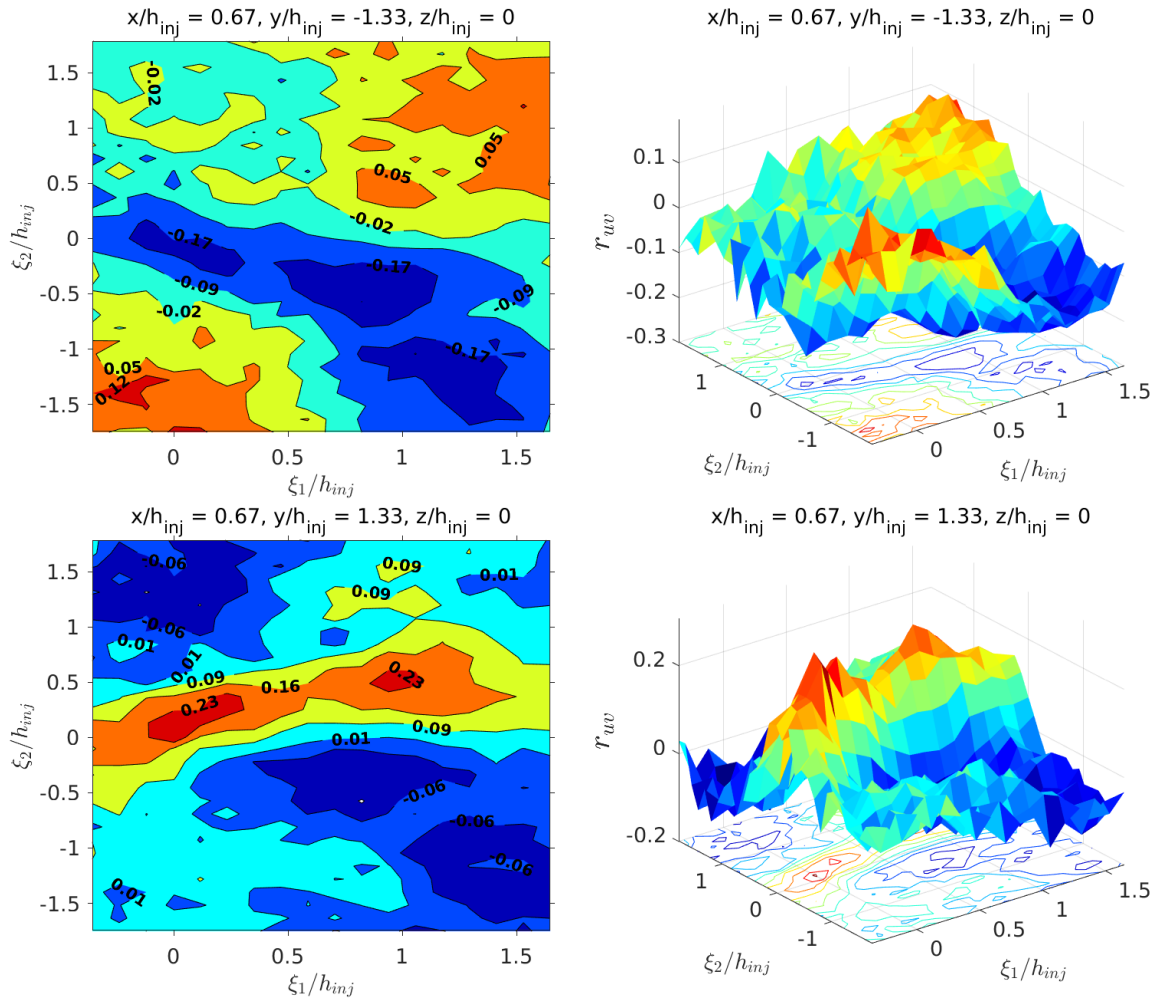
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.92 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,05$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



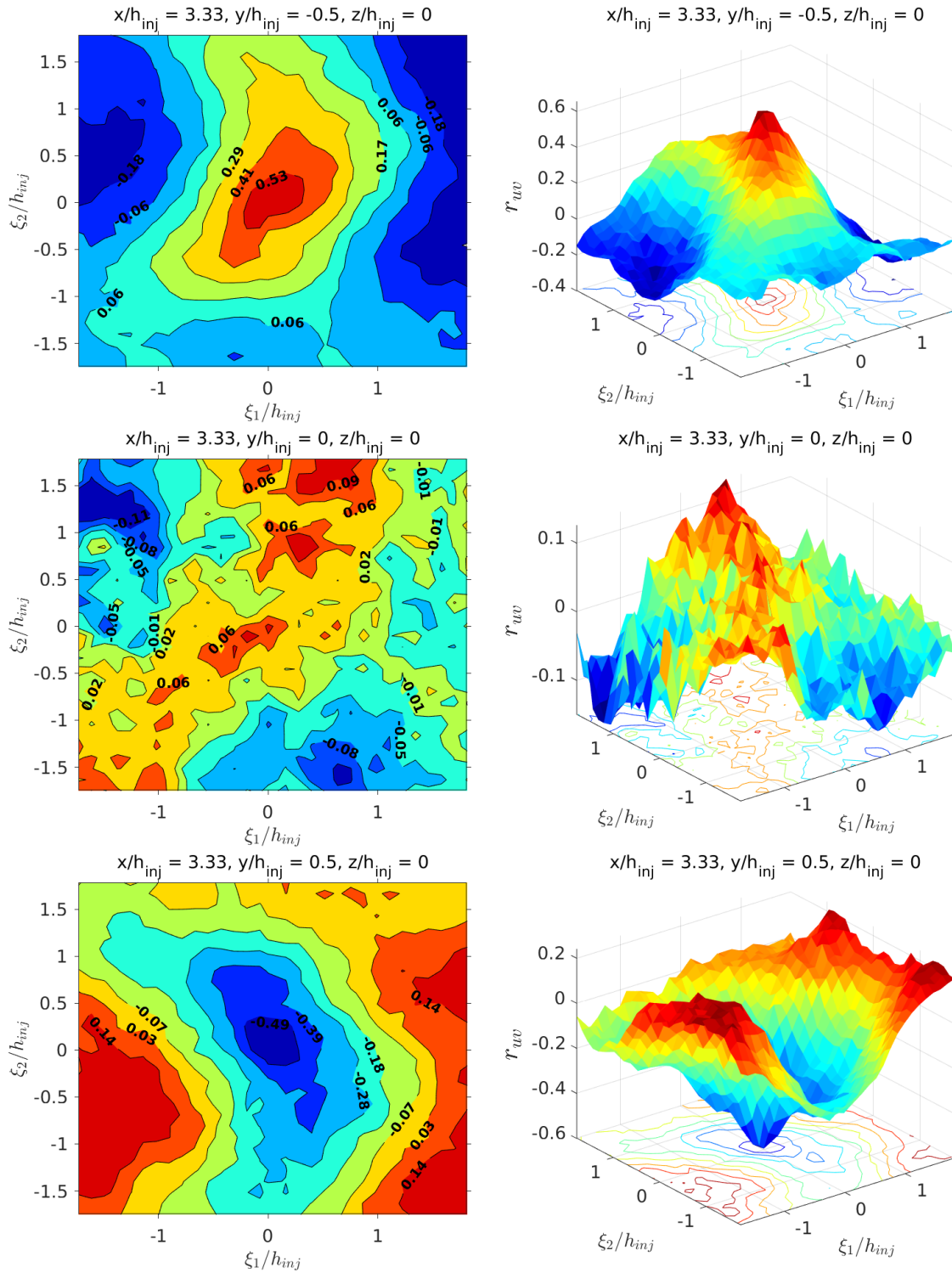
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.93 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,05$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

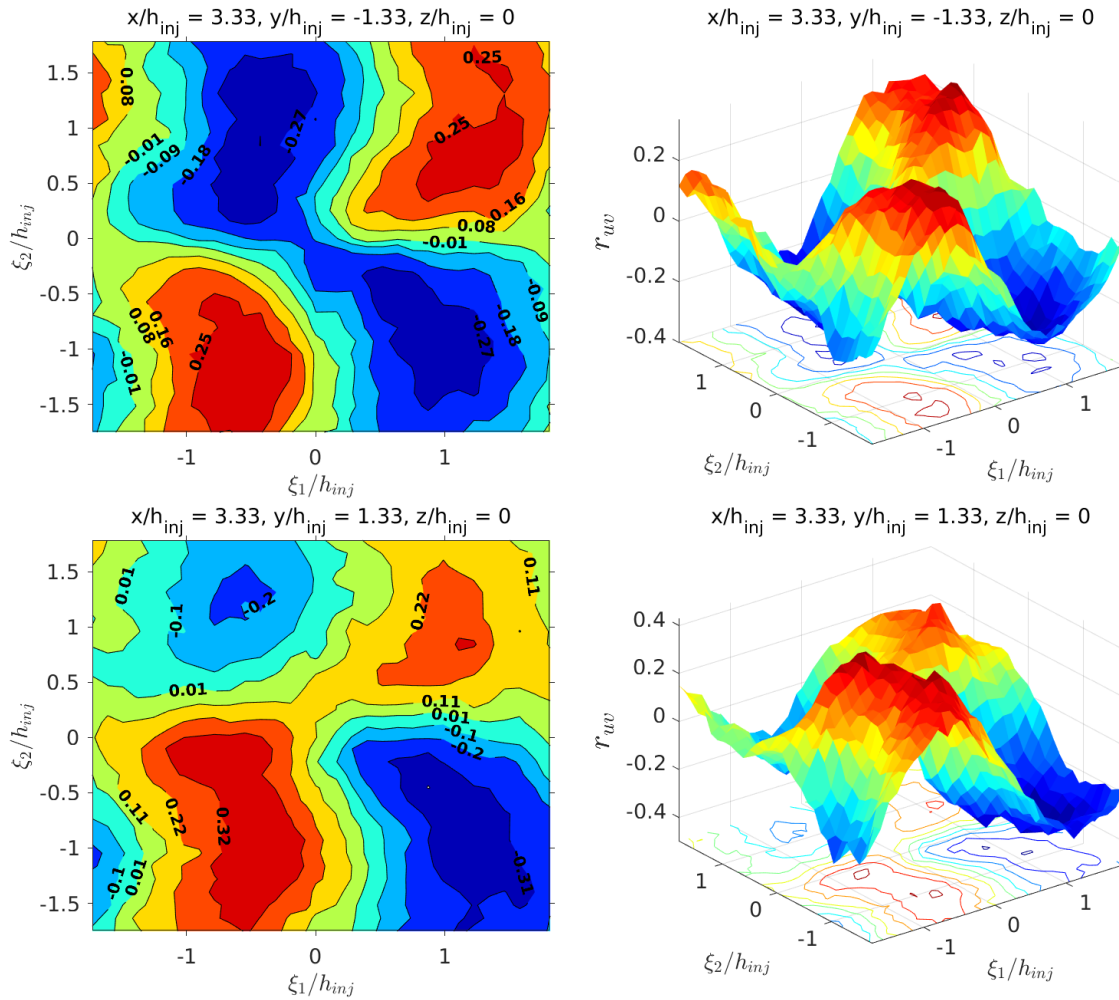
Figura 5.94 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

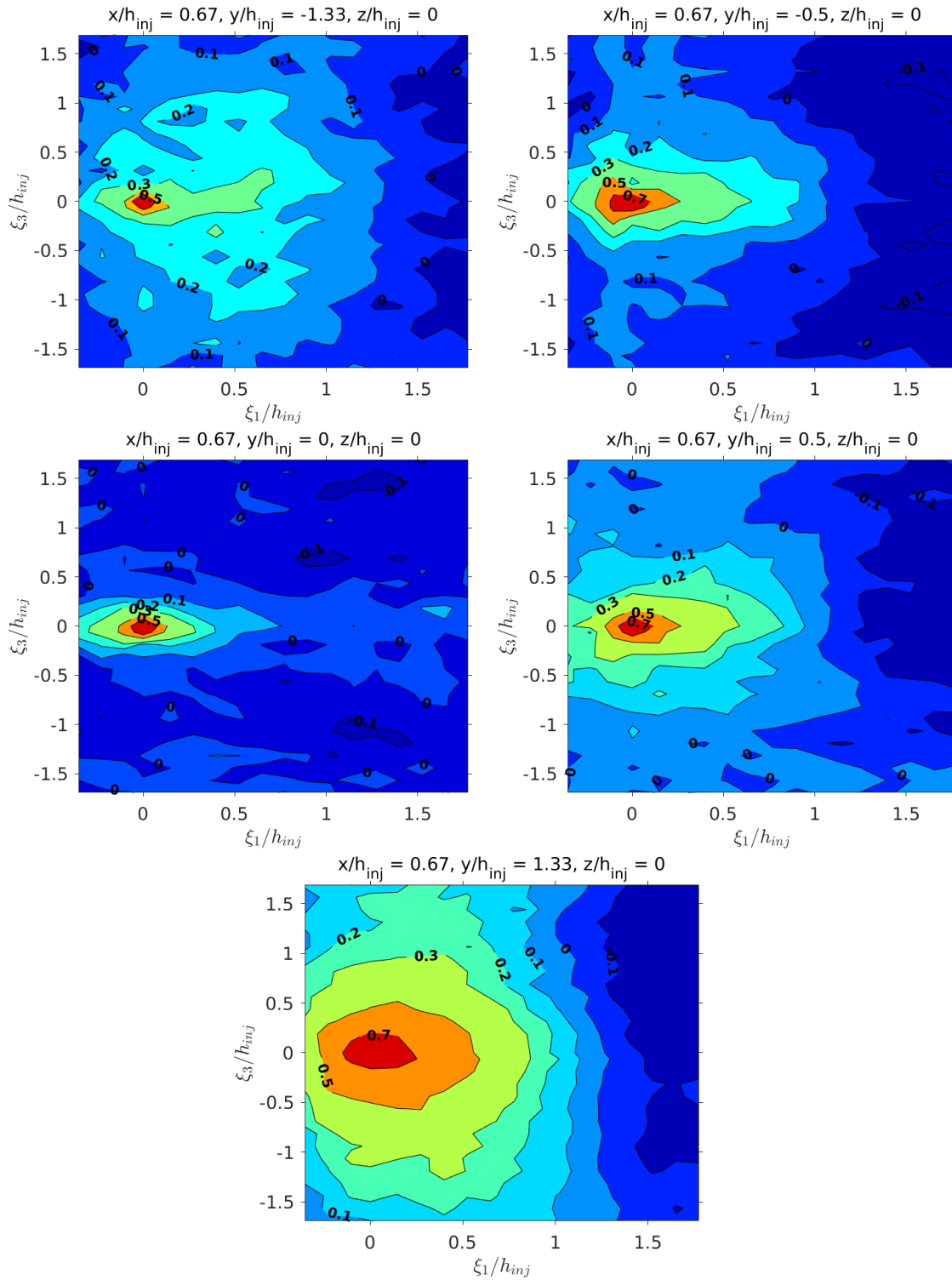


Figura 5.95 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uv}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seção vertical central). Incerteza média de  $r_{uv} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_2/h_{inj} = \pm 0,04$ .



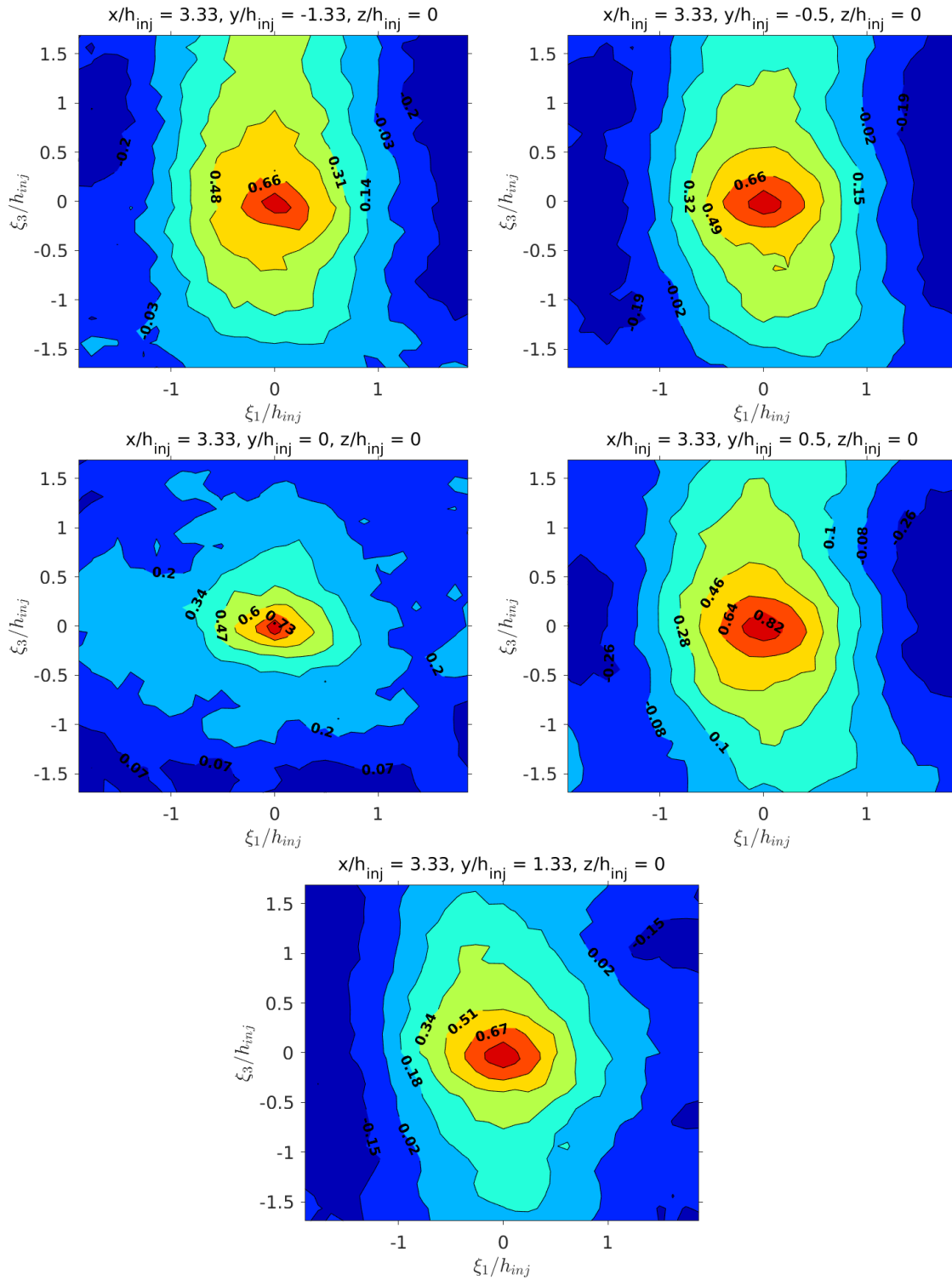
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.96 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{uu}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



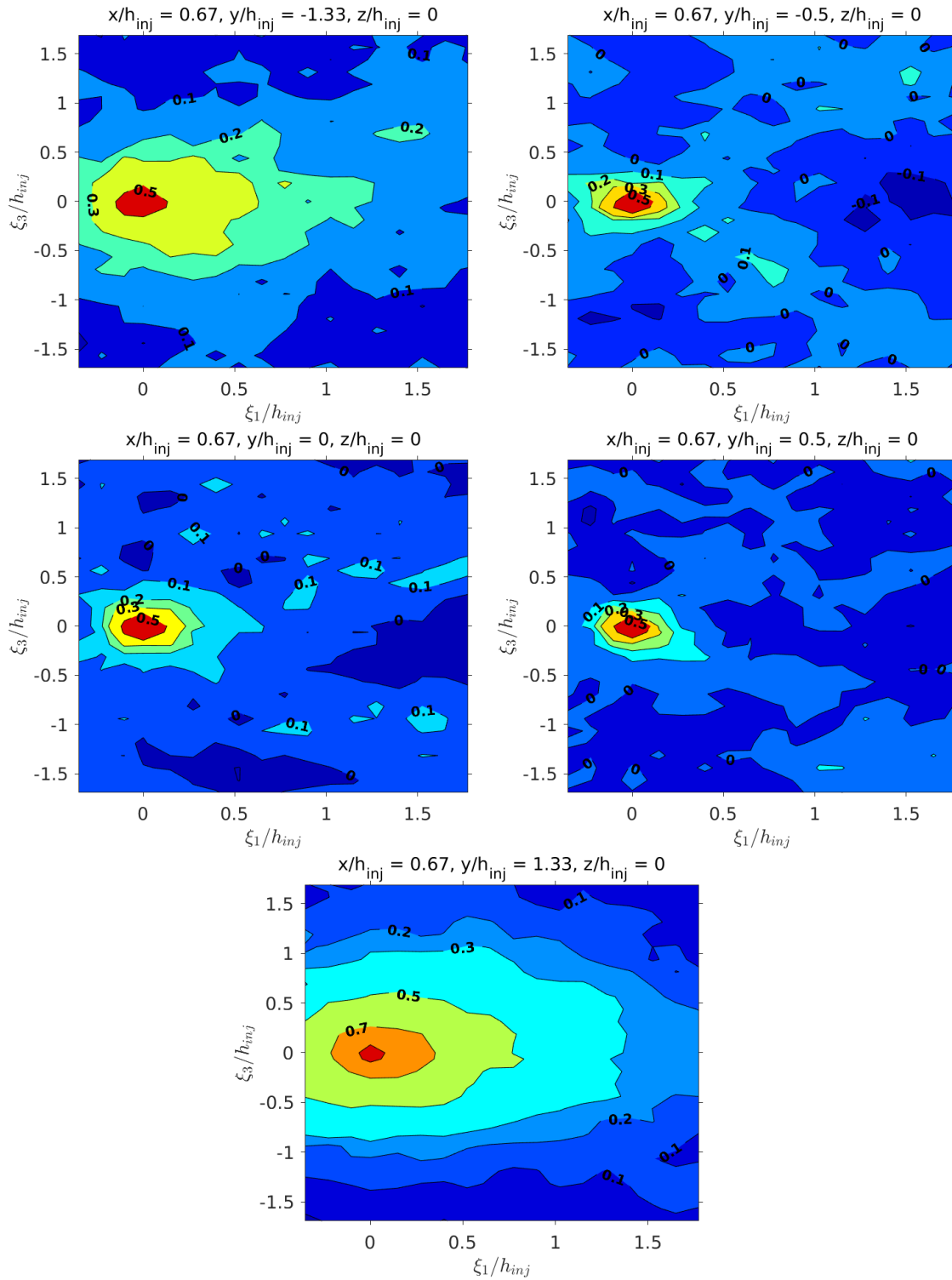
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.97 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{uu}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uu} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



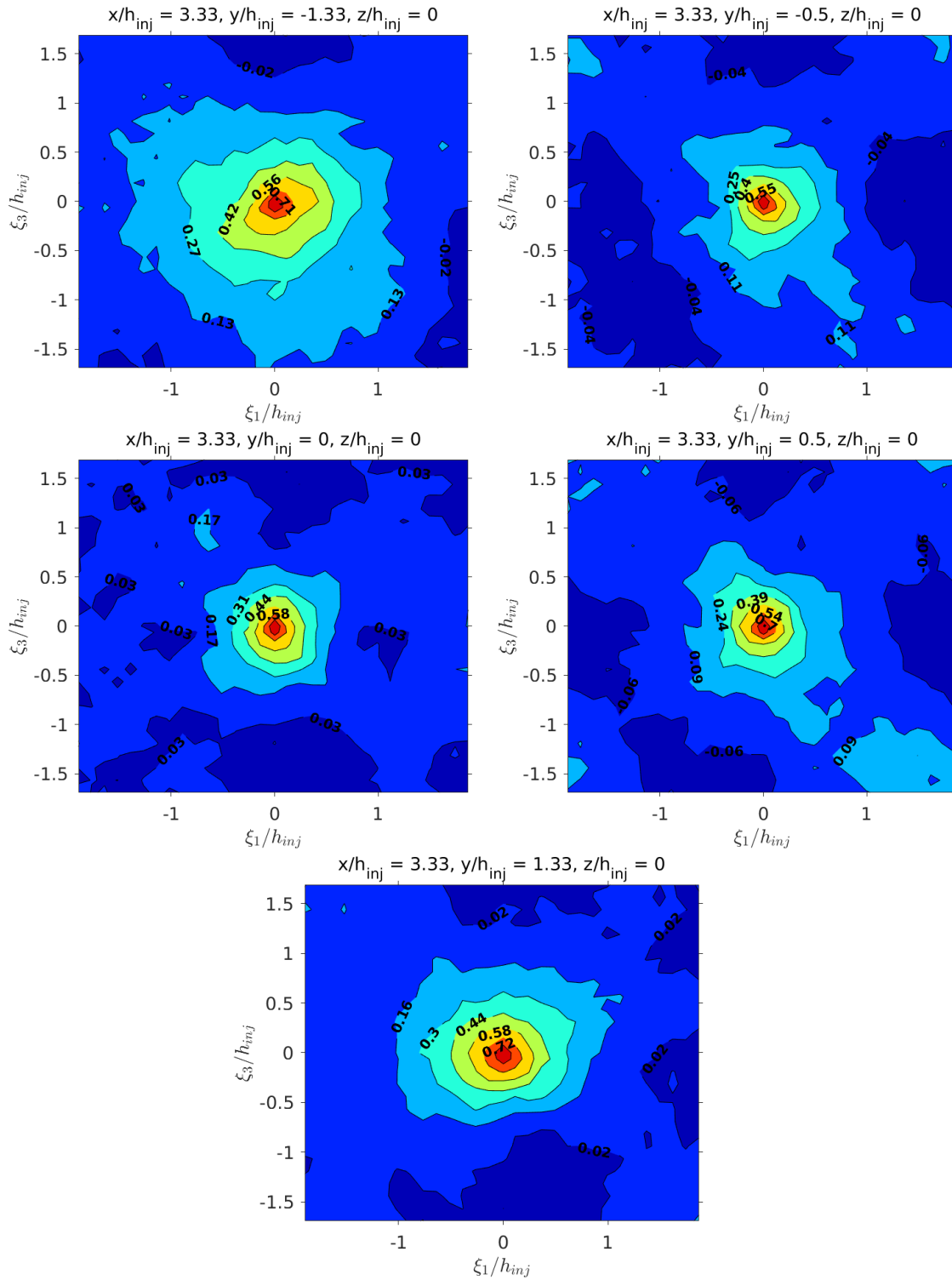
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.98 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{ww}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



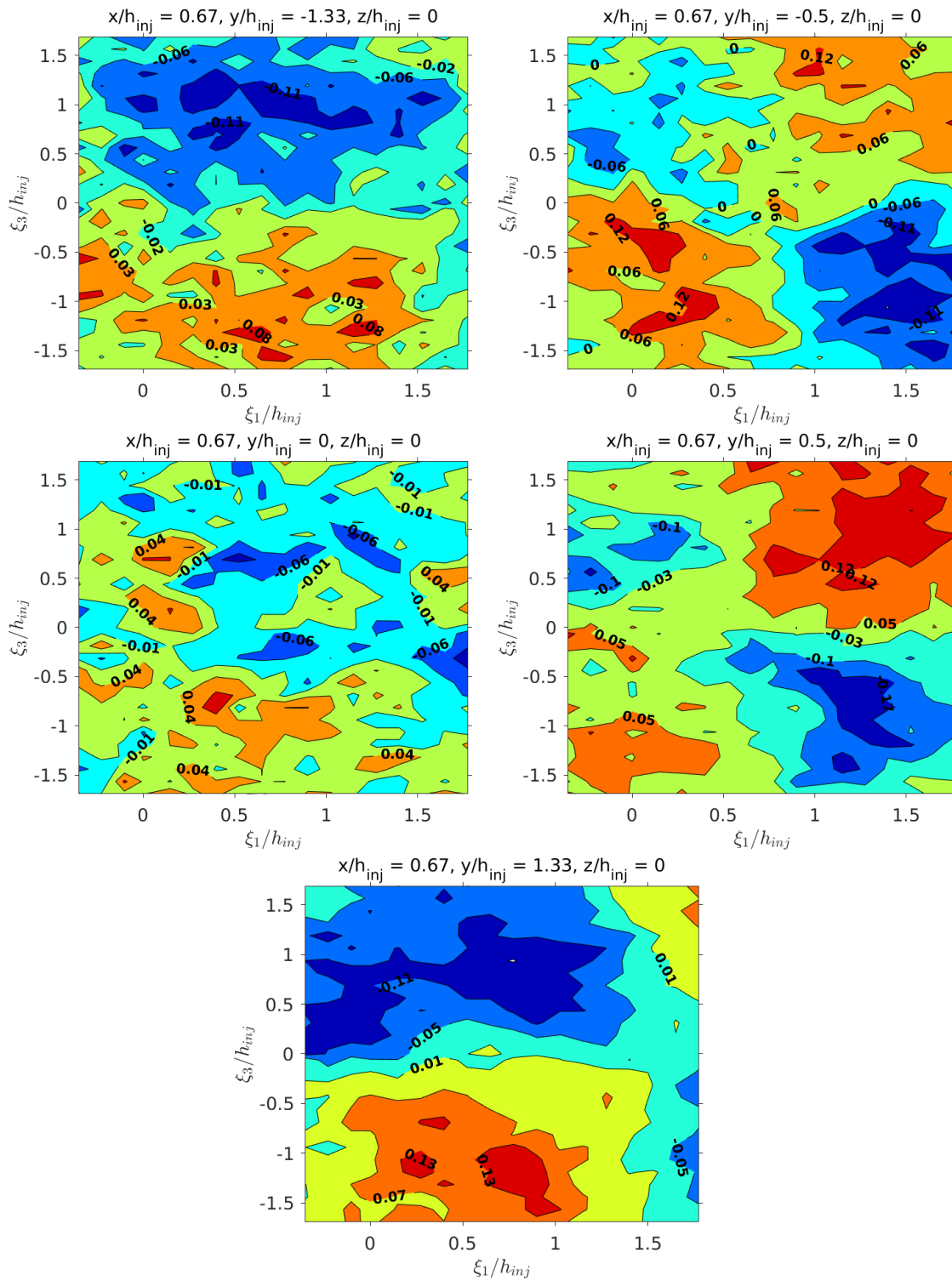
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.99 - Isocontornos da auto-correlação espacial  $r_{ww}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{ww} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



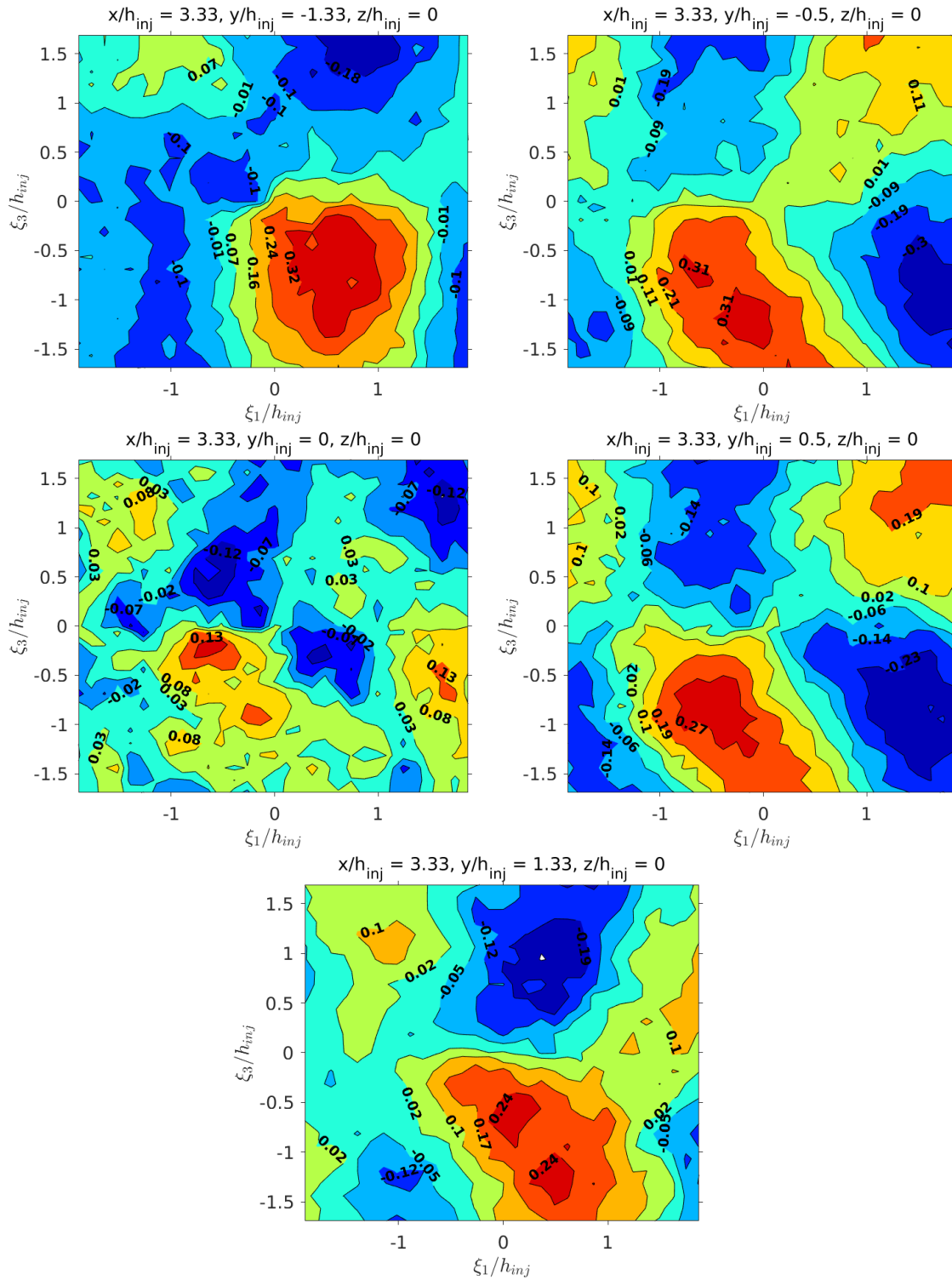
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.100 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uw}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 0,67$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,10$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.101 - Isocontornos da correlação cruzada espacial  $r_{uw}$  na região principal em  $x/h_{inj} = 3,33$  (seções horizontais). Incerteza média de  $r_{uw} = \pm 0,09$ , incerteza de  $\xi_1/h_{inj} = \pm 0,04$ , incerteza de  $\xi_3/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

## 5.9 Escalas espaciais turbulentas

Nesta seção serão apresentados e analisados as escalas de comprimento da turbulência nas seções verticais e horizontais da região principal. As escalas integrais de comprimento foram estimadas a partir das auto-correlações espaciais e as demais escalas não foram calculadas por causa da limitação da resolução espacial e temporal do PIV utilizado. O limite superior da integração das auto-correlações em  $\xi_1$  em  $x/h_{inj} = 0,67$  equivale a  $\xi_1/h_{inj} = 1,65$ , e em  $x/h_{inj} = 3,33$  equivale a  $\xi_1/h_{inj} = 1,81$ . Os valores das integrais com os limites superiores em questão são satisfatórios e suficientes para caracterizar as escalas de comprimento integrais. Além disso, não foi usada a relação entre as escalas de comprimento com as escalas de tempo, pois a hipótese de Taylor afirma que tal relação só é válida se intensidade turbulenta for pequena, conforme abordado na Subseção 2.3.3. Como a intensidade turbulenta em  $U_m$  na região principal atinge valores superiores a 0,2, a hipótese de Taylor não pode ser aplicada nas escalas desta região.

Da Figura 5.102 até a Figura 5.105 são apresentadas os perfis transversais verticais e horizontais das escalas integrais de comprimento nas estações  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  das seções verticais. Observa-se nos perfis das escalas de comprimento da estação  $x/h_{inj} = 0,67$ , que são apresentados pela Figura 5.102, que todas as menores escalas integrais estão a jusante das faces posteriores dos injetores. Nos perfis das escalas de comprimento da estação  $x/h_{inj} = 3,33$ , que são apresentados pela Figura 5.103, verifica-se que as escalas de comprimento são mais homogêneas em relação àquelas da estação  $x/h_{inj} = 0,67$ . Somado a isso, observa-se em  $x/h_{inj} = 3,33$  que  $L_{I,u,\xi_1}$  são superiores a  $L_{I,v,\xi_1}$ . Verifica-se também que  $L_{I,u,\xi_1}$  em  $x/h_{inj} = 3,33$  são menores próximos as paredes. Isso se deve a presença das camadas limites turbulentas próximas das paredes.

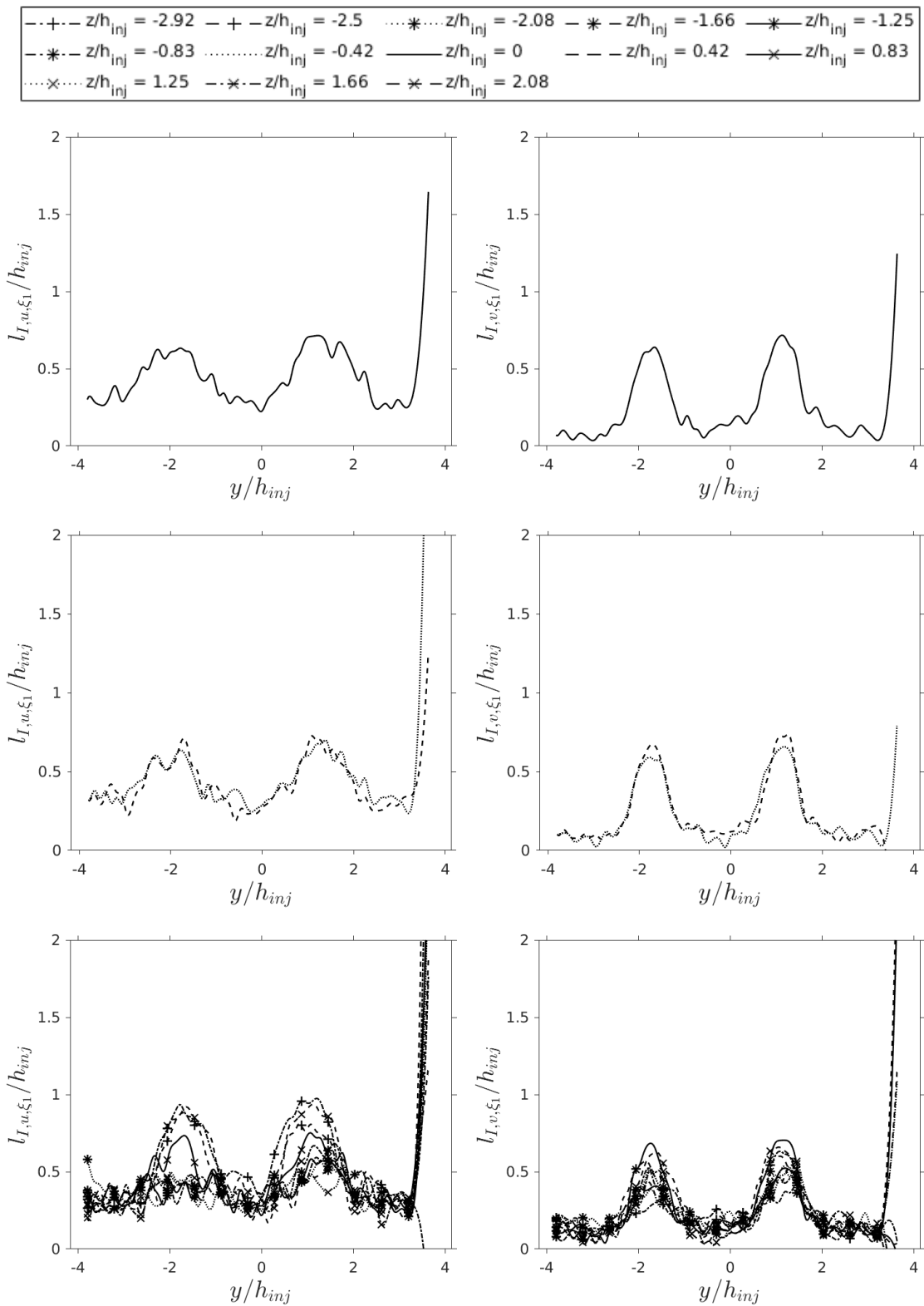
Com relação aos perfis transversais horizontais das escalas de comprimento nas seções horizontais, que são apresentados pelas Figuras 5.104 e 5.105, verifica-se que eles são, de modo geral, mais homogêneos do que os perfis das seções verticais. Nos perfis da estação  $x/h_{inj} = 0,67$ , que são apresentados pela Figura 5.104, verifica-se que os perfis das seções horizontais que estão na mesma altura do escoamento principal têm valores maiores que aqueles encontrados nas demais seções horizontais. Observa-se nos perfis das estações  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 3,33$  que próximo às paredes laterais existem oscilações, que são causadas pelos intensos gradiente de velocidade produzidos pelo cisalhamento. Pode-se constatar que, nos perfis de  $L_{I,w,\xi_1}$ , os valores mínimos dos perfis estão localizados próximos às paredes. Além disso,



verifica-se que  $L_{I,u,\xi_1}$  são superiores a  $L_{I,w,\xi_1}$ . Observa-se nos perfis de  $L_{I,u,\xi_1}$  da estação  $x/h_{inj} = 3,33$ , que são apresentados pelas Figura 5.105, que os valores das escalas de comprimento em questão aumenta nas proximidades das paredes.

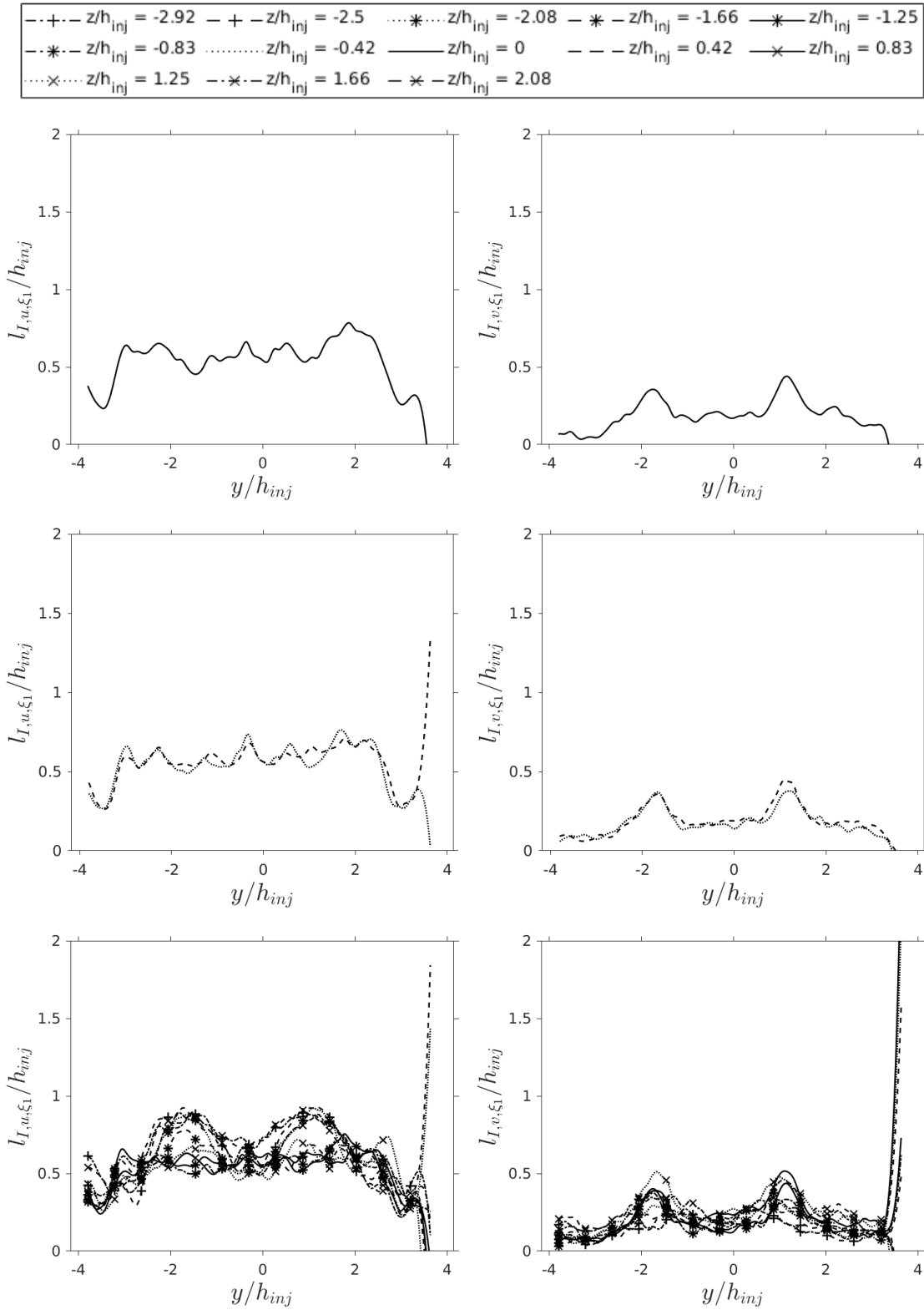
Pode-se constatar que na maioria dos perfis das escalas de comprimento das seções verticais e horizontais há oscilações de alta amplitude em torno de  $y/h_{inj} = 3,7$  e de  $z/h_{inj} = 3,7$ , causada pela baixa qualidade das medições do PIV nesta região. Somado a isso, verifica-se que as escalas de comprimento das seções verticais são assimétricas em  $y/h_{inj}$  e em  $z/h_{inj}$ . A assimetria é maior nos perfis das escalas de comprimento das seções verticais e horizontais mais distantes do centro da região principal. Além disso, a seção horizontal  $y/h_{inj} = -1,75$  tem mais oscilações de alta amplitude com relação as demais seções horizontais. Tal característica se deve a baixa qualidade das medições com PIV da seção em questão.

Figura 5.102 - Perfis transversais verticais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções verticais da região principal (esteira próxima,  $x/h_{inj} = 0,67$ ). Incerteza média de  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,79 \text{ mm}$  e de  $l_{I,v,\xi_1} = \pm 2,24 \text{ mm}$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



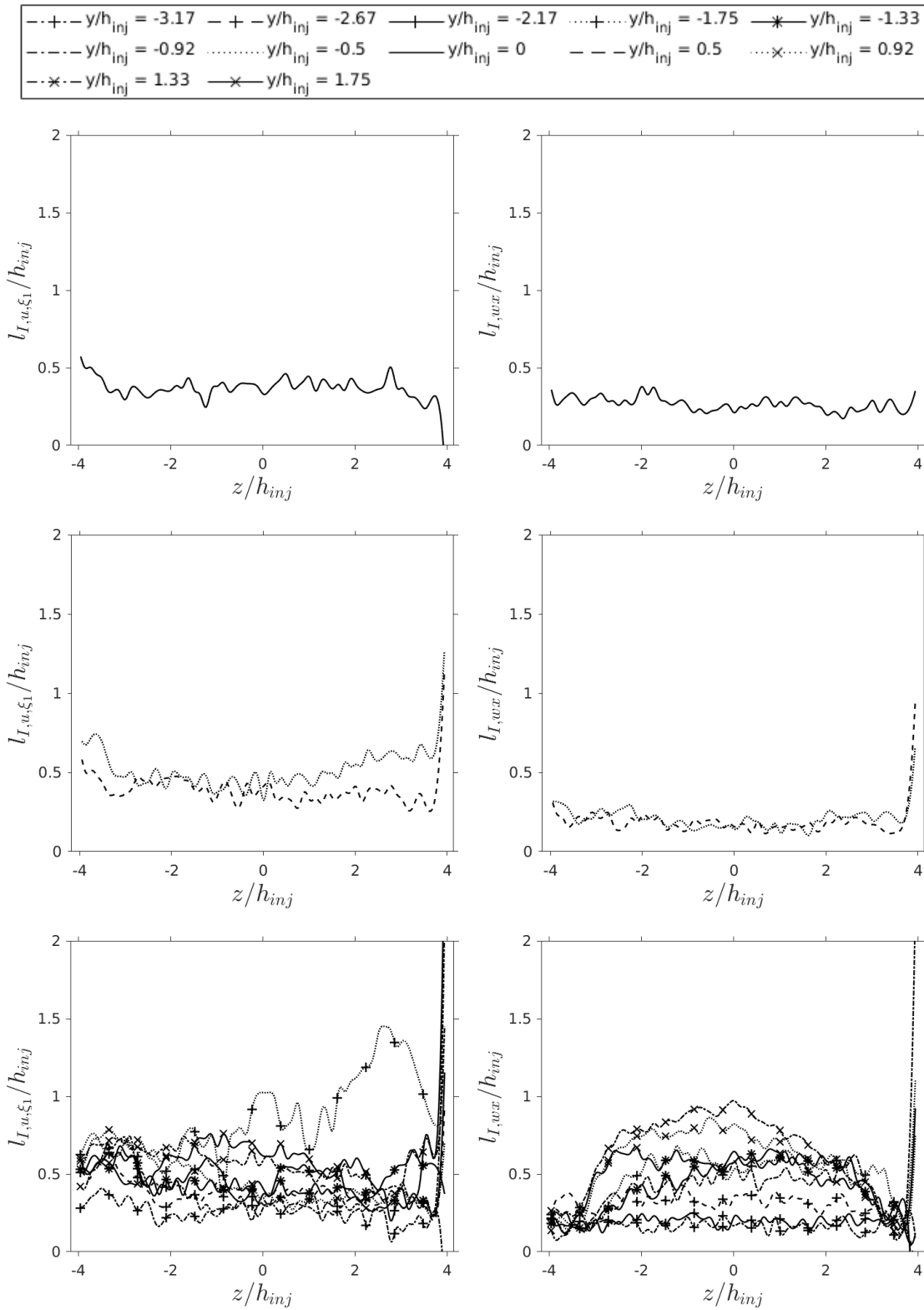
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.103 - Perfis transversais verticais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções verticais da região principal (esteira distante,  $x/h_{inj} = 3,33$ ). Incerteza média de  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,71 \text{ mm}$  e de  $l_{I,v,\xi_1} = \pm 3,48 \text{ mm}$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



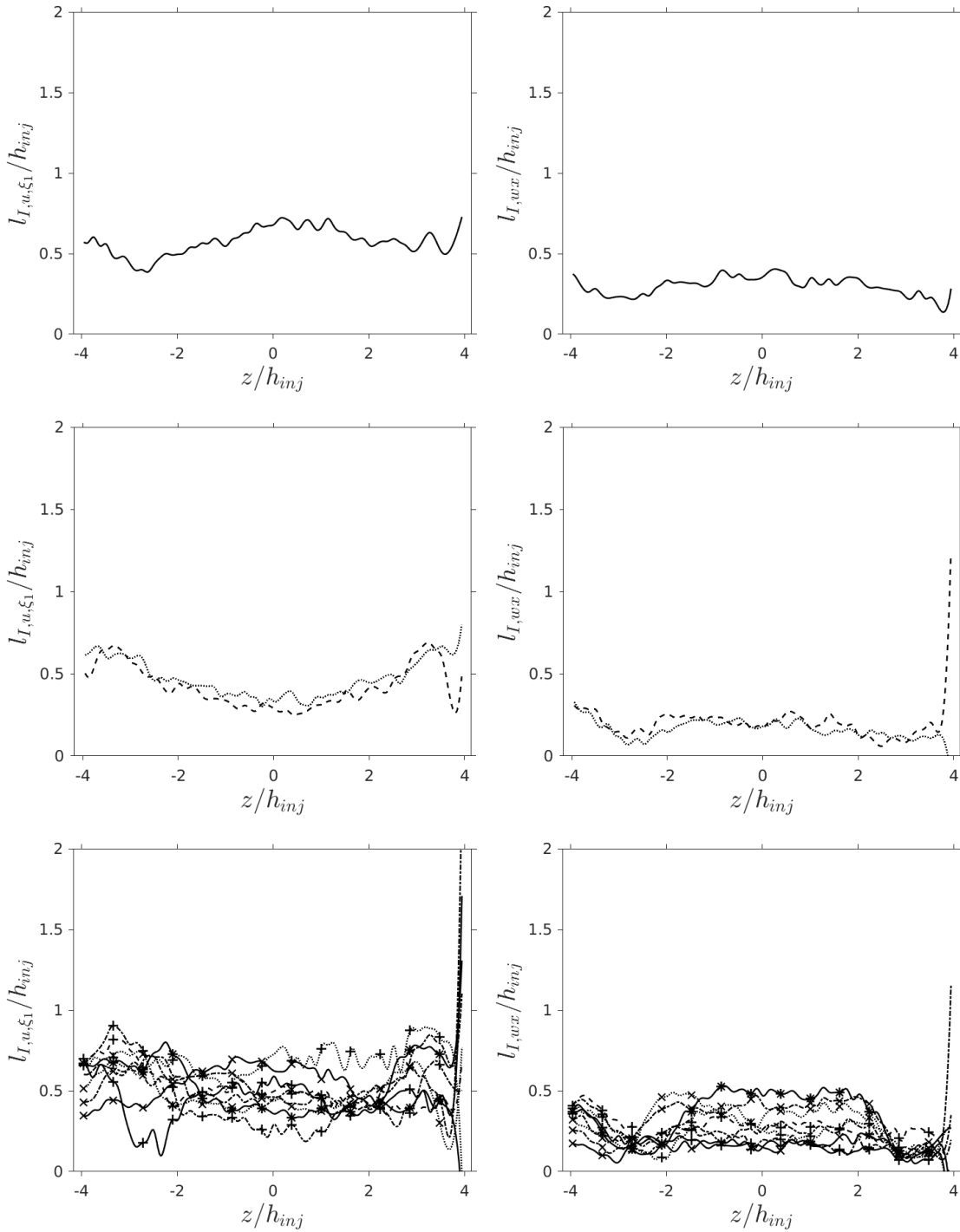
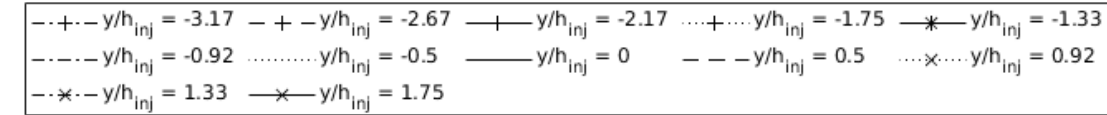
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.104 - perfis transversais horizontais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções horizontais da região principal (esteira próxima,  $x/h_{inj} = 0,67$ ). Incerteza média de  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 6,78 \text{ mm}$  e de  $l_{I,w,\xi_1} = \pm 1,11 \text{ mm}$ . Incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.105 - perfis transversais horizontais da escala de comprimento integral das componentes da velocidade nas seções horizontais da região principal (esteira distante,  $x/h_{inj} = 3,33$ ). Incerteza média de  $l_{I,u,\xi_1} = \pm 0,71 \text{ mm}$  e de  $l_{I,w,\xi_1} = \pm 0,93 \text{ mm}$ . Incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

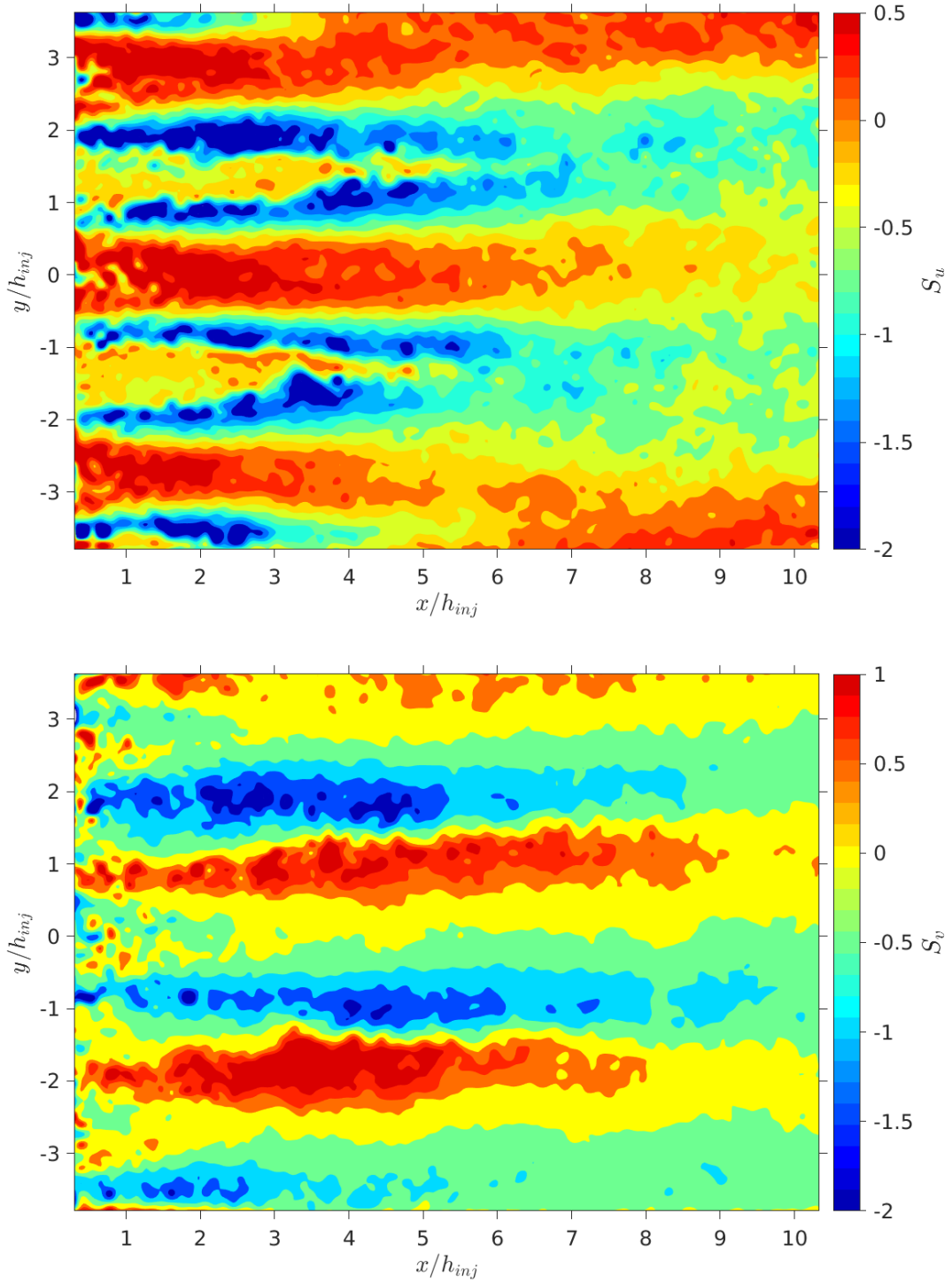
### 5.10 Momento de terceira ordem normalizado (assimetria)

Nesta seção são apresentados e analisados os isocontornos e os perfis do momento de terceira ordem normalizado das velocidades longitudinal, normal e transversal do escoamento na região principal. Os isocontornos de  $S_u$  e  $S_v$  da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  são apresentados pela Figura 5.106. Os perfis de  $S_u$ ,  $S_v$  e  $S_w$  das seções verticais e horizontais são apresentados pelas Figuras 5.107 a 5.114.

Verifica-se nos isocontornos de  $S_u$ , que são apresentados pela Figura 5.106, que os maiores e menores valores de  $S_u$  estão localizados nas regiões onde o gradiente da intensidade turbulenta é elevado. Estas regiões são as bordas das esteiras e as zonas de recirculação. Nas superfícies delimitadoras das esteiras, verifica-se que  $S_u$  é negativo, ou seja, flutuações maiores que  $\bar{u}$  são mais comuns nesta região. E nas zonas de recirculação,  $S_u$  é positivo, ou seja, valores de  $u'$  menores que  $\bar{u}$  são mais frequentes. Comparando os maiores e menores valores de  $S_u$ , verifica-se que  $S_u$  nas bordas das esteiras tem valores na faixa de  $-1$  a  $-2$ , enquanto que nas zonas de recirculação os valores de  $S_u$  giram torno de  $0,5$ . Os valores negativos  $S_u$  nas bordas das esteiras se deve aos movimentos turbulentos de larga escala nestas regiões, que são abordados na Subseção 2.3.1. Além disso, observa-se que  $S_u$  não é diretamente proporcional ao gradiente da intensidade turbulenta em toda região principal. Porque na entrada da região principal  $k$  atinge seus maiores valores e diminui drasticamente ao longo de  $x/h_{inj}$ , conforme observado na Seção 5.6. Verifica-se também que a assimetria de  $u$  diminui a medida que as esteiras se alargam no sentido longitudinal.

Nos isocontornos de  $S_v$ , que também são apresentados pela Figura 5.106, têm características em comum com os isocontornos de  $S_u$ . Verifica-se que os menores e maiores valores de  $S_v$  se concentram nas bordas das esteiras. Nas bordas das esteiras, que estão nas mesmas alturas das bordas superiores das faces posteriores dos injetores,  $S_v$  é positivo, ou seja, valores de  $v'$  menores que  $\bar{v}$  são mais frequentes. E  $S_v$  é negativo nas outras bordas das esteiras, pois valores de  $v'$  maiores que  $\bar{v}$  são mais frequentes. Tal aspecto da assimetria de  $v'$  corresponde as características de  $\sqrt{v'^2}$  observada na Seção 5.4. Além disso, essa característica de  $S_v$  em torno das bordas das esteiras se deve aos vórtices de arrastamento. Assim como foi constatado nos isocontornos de  $S_u$ , verifica-se que  $S_v$  não é diretamente proporcional ao gradiente da intensidade turbulenta em toda região principal. Comparando os maiores e menores valores de  $S_v$ , observa-se que não encontra considerável desigualdade entre elas.

Figura 5.106 - Isocontornos da assimetria das componentes longitudinal e normal de velocidade  $u$  e  $v$  na seção vertical central  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Incerteza média de  $S_u = \pm 0,38$  e de  $S_v = \pm 0,33$ . Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Pode-se observar nos perfis de  $S_u$ ,  $S_v$  e  $S_w$  para determinadas estações, que são apresentados pelas Figuras 5.107 a 5.114, várias oscilações de diversos tamanhos em todas as seções. Essas oscilações diminuem de tamanho e número a partir de  $x/h_{inj} = 3,33$ . A assimetria, na maior parte dos casos, está dentro da faixa de  $-2$  a  $2$ .

Os perfis de  $S_u$  e  $S_v$  das seções verticais, que são apresentados pelas Figuras 5.107 a 5.110, são completos de vales e de picos, que diminuem de tamanho e de número progressivamente na direção longitudinal. Observa-se nos perfis, geralmente, que os valores de  $S_u$  são mais negativos nas alturas das bordas das faces posteriores dos injetores e são mais positivos nas alturas dos centros destas faces. Embora os perfis de  $S_u$  tenham este padrão em comum, eles contêm várias oscilações particulares em diversos trechos de  $y/h_{inj}$ . Os perfis de  $S_v$  têm seus maiores e menores valores nas alturas das bordas dos injetores. Além disso verifica-se pequenas oscilações de  $S_v$  nos centros das zonas de recirculação.

Sobre os perfis de  $S_u$  das seções horizontais, que são apresentados pelas Figuras 5.111 a 5.112, verifica-se que os valores de  $S_u$  nestes perfis estão de acordo com aqueles encontrados nas seções verticais. Pode-se observar nos perfis  $y/h_{inj} = -0,5$  e  $y/h_{inj} = 0,5$ , que são apresentados pelas Figuras 5.111, que os valores de  $S_u$  são negativos em boa parte de  $z/h_{inj}$  e a partir da estação  $x/h_{inj} = 1$ . Observa-se também que  $S_u$  atinge os menores valores em  $x/h_{inj} = 1,33$  e, a partir desta estação, diminui de intensidade ao longo de  $x/h_{inj}$ . Estes valores negativos de  $S_u$  se devem aos movimentos turbulentos de larga escala nas bordas da esteira central. É importante ressaltar que os perfis de  $S_u$  das seções verticais em questão não estão completamente alinhados às bordas da esteira central, pois as dimensões desta aumentam transversalmente ao longo de  $x/h_{inj}$ . Além disso, pode-se observar que  $S_u$  é mais negativo em  $z/h_{inj} < 0$  do que em  $z/h_{inj} > 0$ . Essas características de  $S_u$  não são observadas nos perfis de  $y/h_{inj} = 0$ .

Quanto aos perfis de  $S_u$  das seções horizontais que estão nas mesmas alturas do escoamento principal, que são apresentados pela Figuras 5.112, verifica-se que, usualmente, os valores de  $S_u$  são negativos em boa parte de  $z/h_{inj}$  e a partir da estação  $x/h_{inj} = 1,67$ . A causa destes valores negativos está nos movimentos turbulentos de larga escala, assim como foi observado nas seções verticais.

Os perfis de  $S_w$ , que são apresentados pelas Figuras 5.113 a 5.114, diferente dos perfis de  $S_u$  das seções horizontais, não possuem, em geral, valores menores que  $-1$  ou superiores a  $1$ . Verifica-se também que nas estações  $x/h_{inj} \in \{5; 6,67; 9,58\}$  e

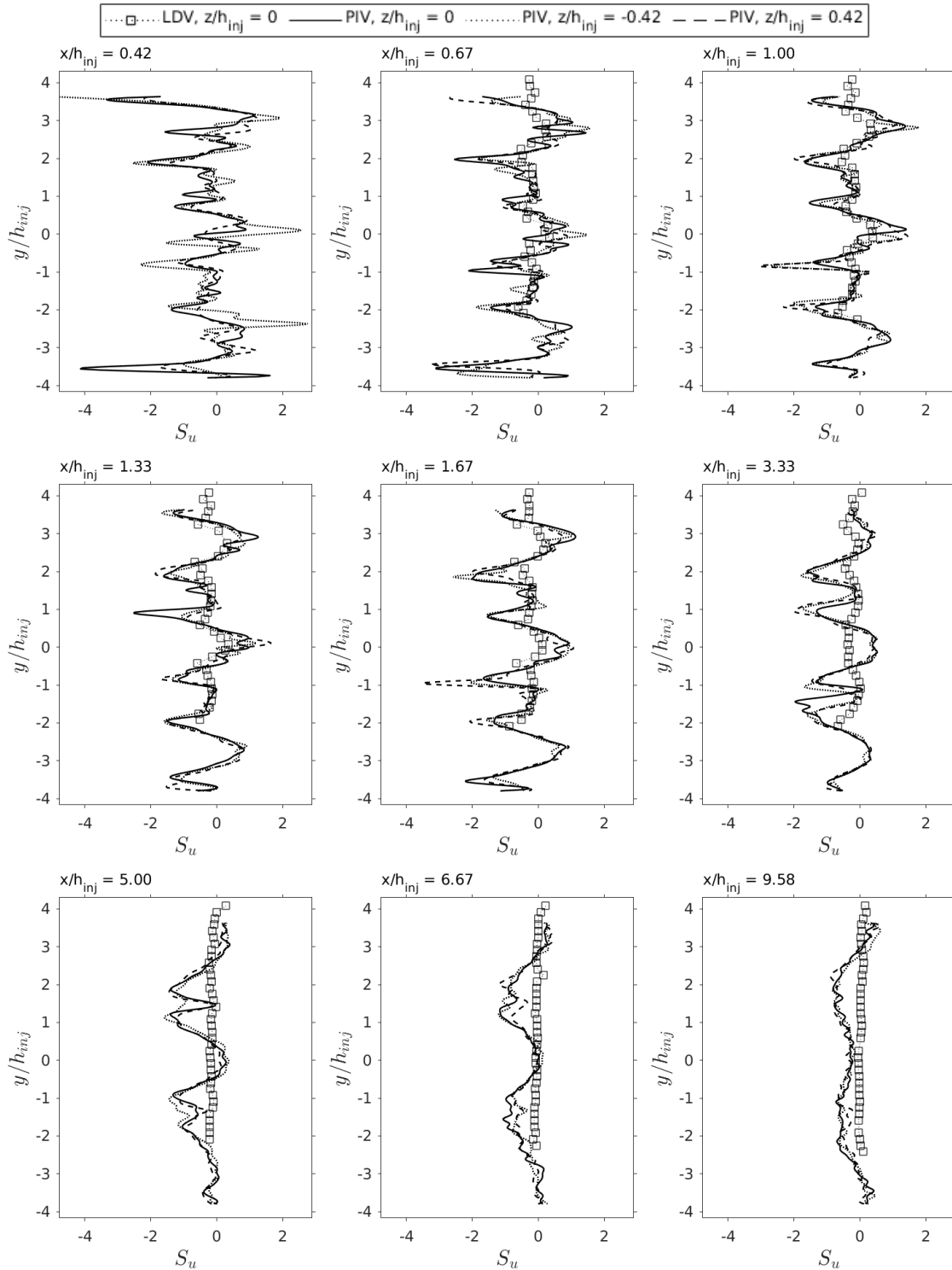


próximo das paredes laterais os perfis de  $S_w$  fazem pequenas curvas. Essas curvas são causadas pelas camadas limites turbulentas das paredes.

Os perfis de  $S_u$  e de  $S_w$  das seções horizontais  $y/h_{inj} \in \{-3,17; -2,67; -2,17; -1,75\}$ , que também estão presentes nas Figuras 5.112 e 5.114, contêm grandes oscilações em todas as estações. Essas oscilações só diminuem de tamanho a partir de  $x/h_{inj} = 5$ . Esta particularidade destas seções se deve a baixa qualidade das medições com PIV. Verifica-se também que em todos os perfis de  $S_u$  e de  $S_w$  das seções horizontais, assim como os perfis de  $S_u$  e de  $S_w$  das seções verticais, há pequenas e médias oscilações. Essas oscilações são causadas pelas características locais da turbulência.

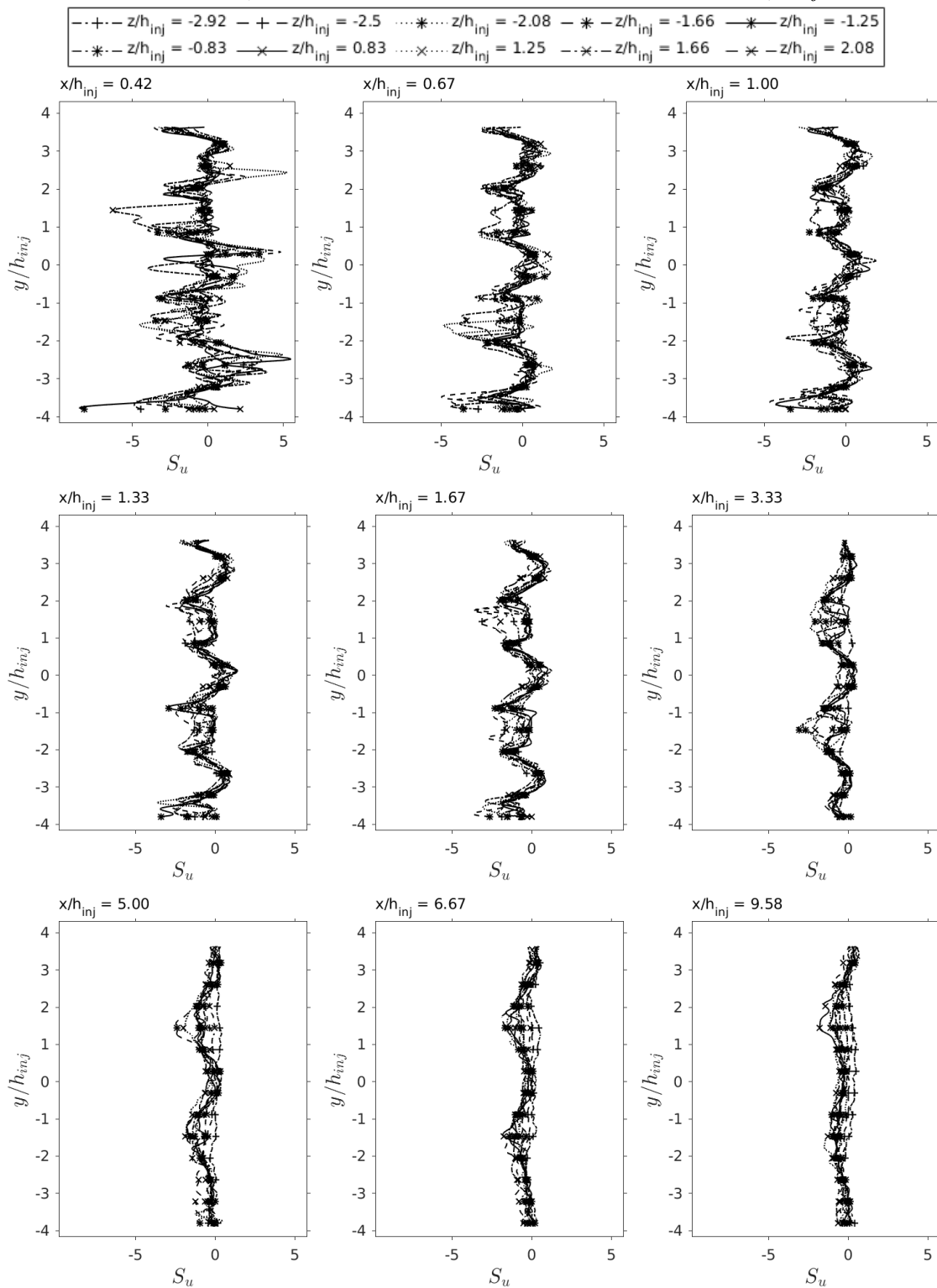
Comparando os valores da assimetria do LDV com os do PIV, pode-se verificar que não há uma boa convergência entre estes em geral. Não existe nenhum valor superior a 1 e nem inferior a  $-1$  entre os resultados do LDV. Essa diferença entre os resultados das duas técnicas reside ao fato que a resolução temporal do LDV é muito maior do que a do PIV. Além disso, o PIV não consegue detectar flutuações de velocidade de altas frequências tal como o LDV, resultando nas oscilações observadas na assimetria.

Figura 5.107 - Perfis transversais verticais da assimetria da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $S_u = \pm 0,50$ . LDV: Incerteza média de  $S_u = \pm 0,01$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



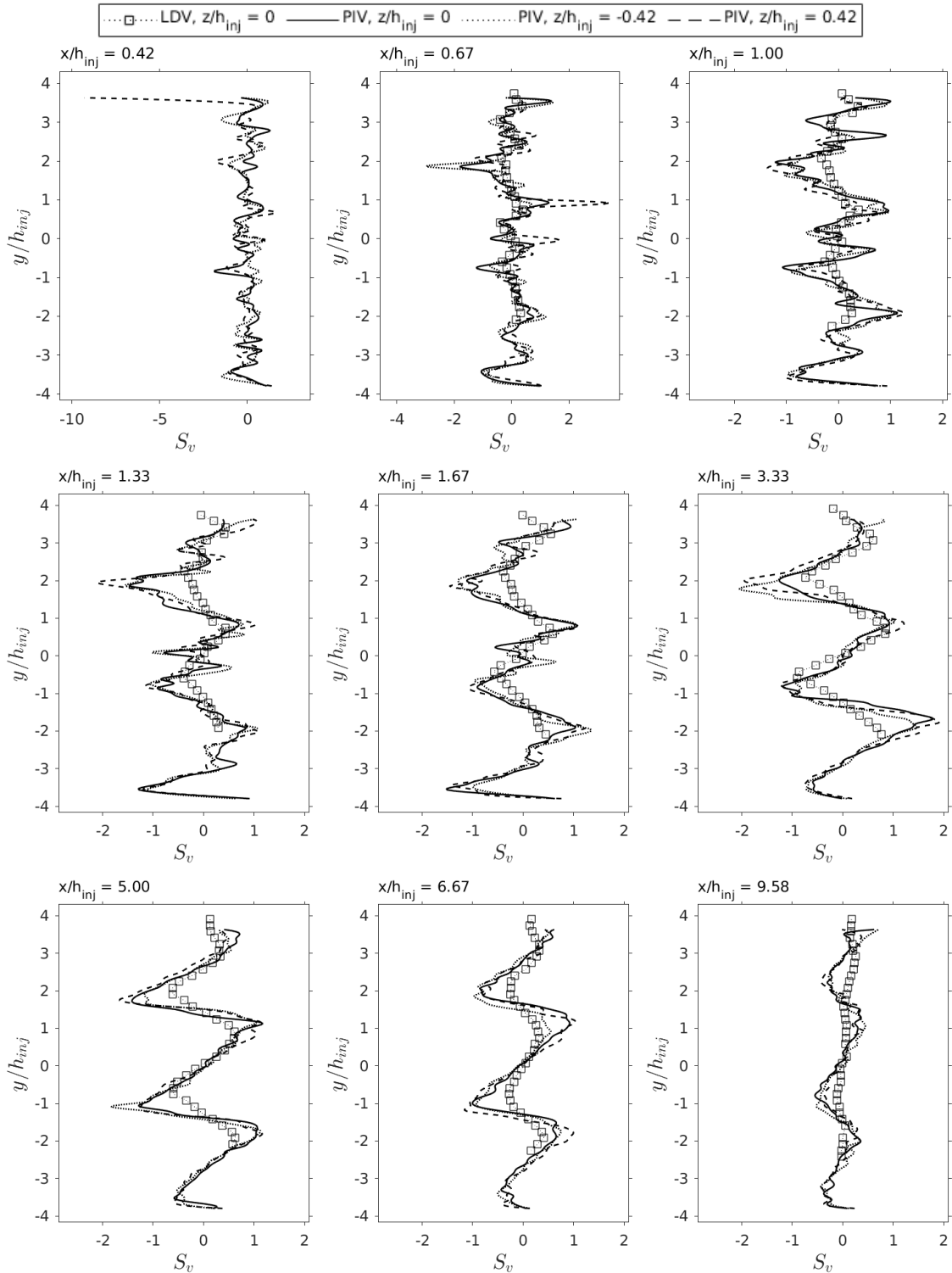
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.108 - Perfis transversais verticais da assimetria da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $S_u = \pm 0,56$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



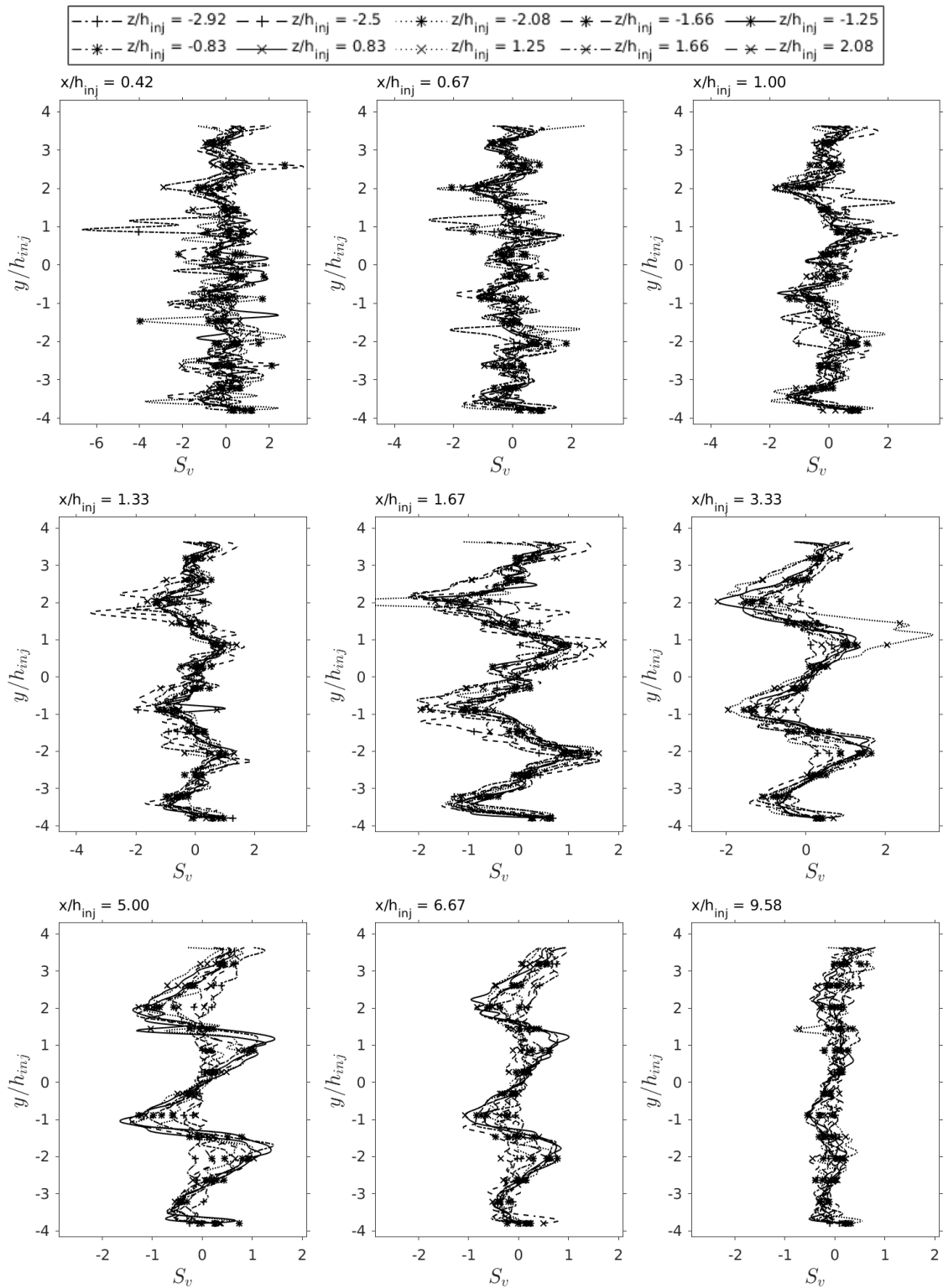
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.109 - Perfis transversais verticais da assimetria da componente normal de velocidade  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $S_v = \pm 0,45$ . LDV: Incerteza média de  $S_v = \pm 0,01$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



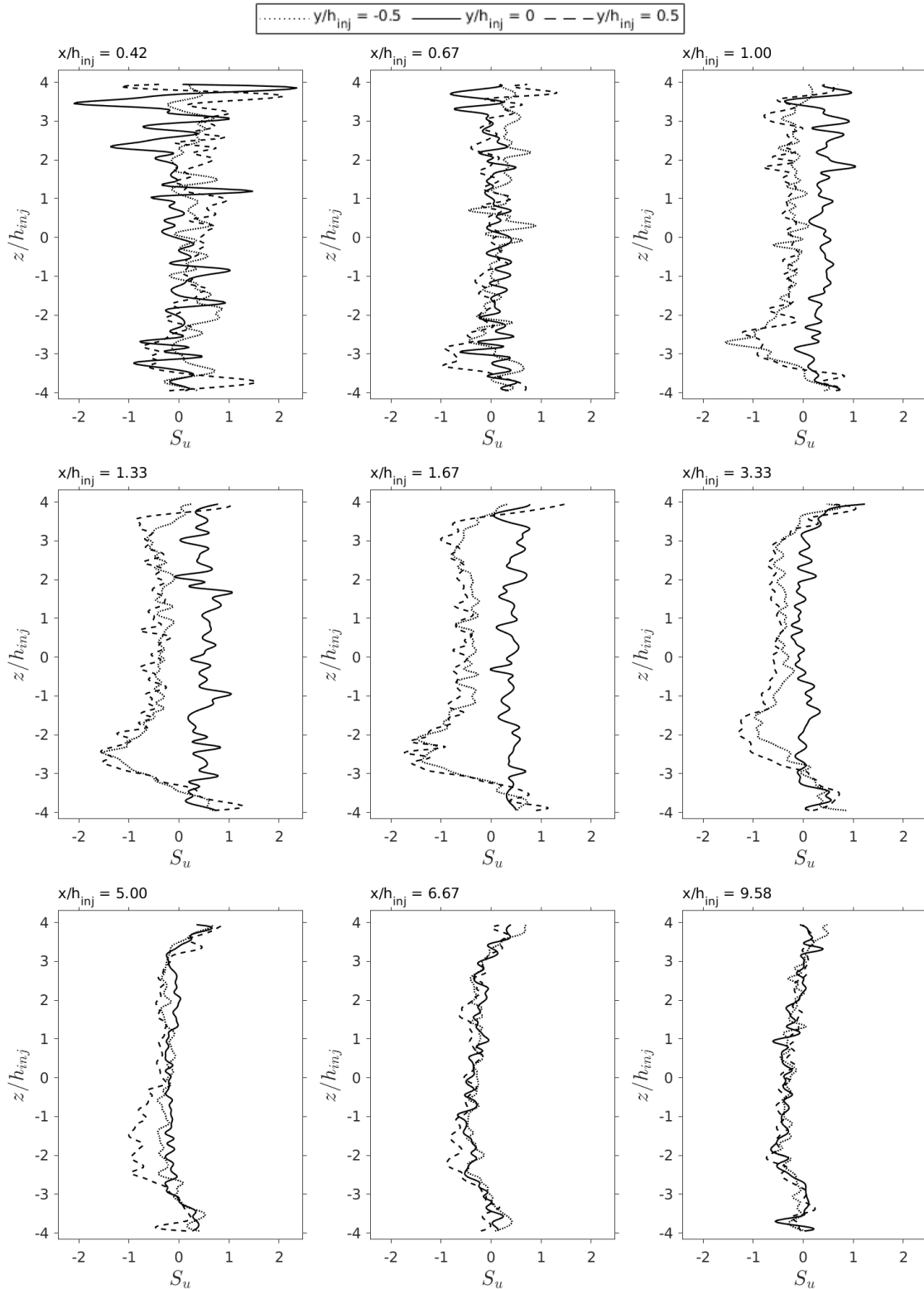
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.110 - Perfis transversais verticais da assimetria da componente normal de velocidade  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $S_v = \pm 0,48$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



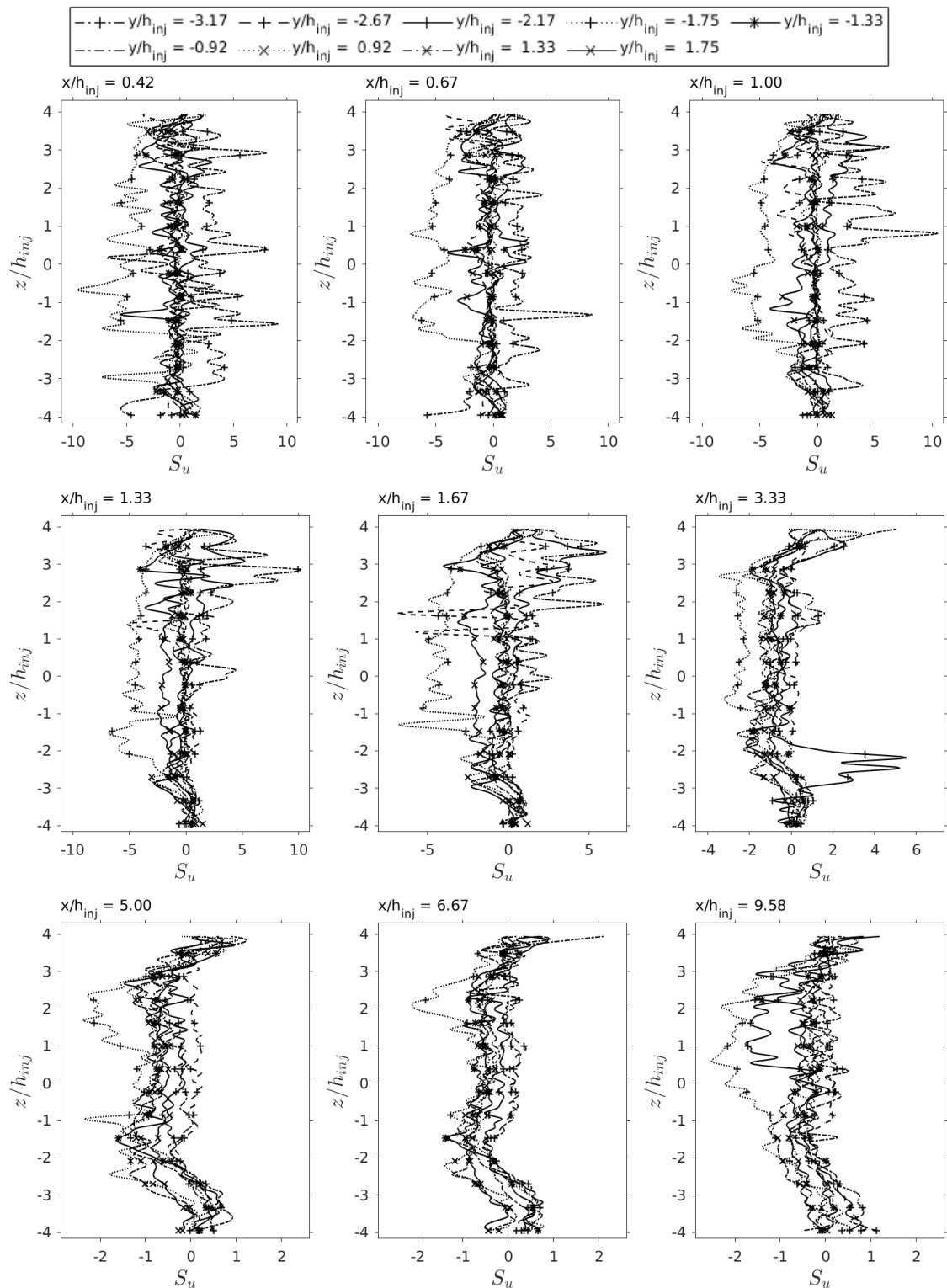
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.111 - perfis transversais horizontais da assimetria da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $S_u = \pm 0,34$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



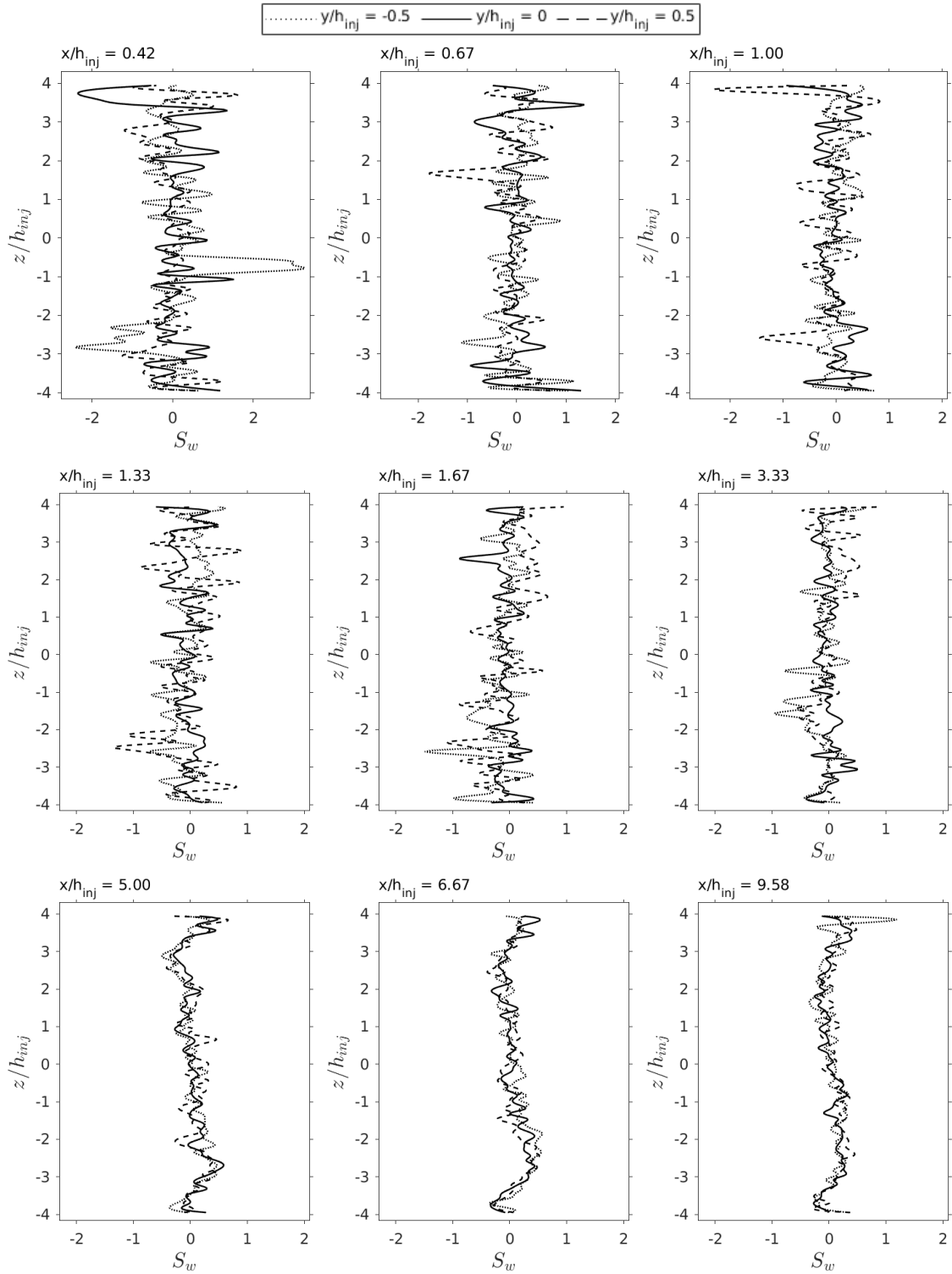
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.112 - perfis transversais horizontais da assimetria da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $S_u = \pm 0,99$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

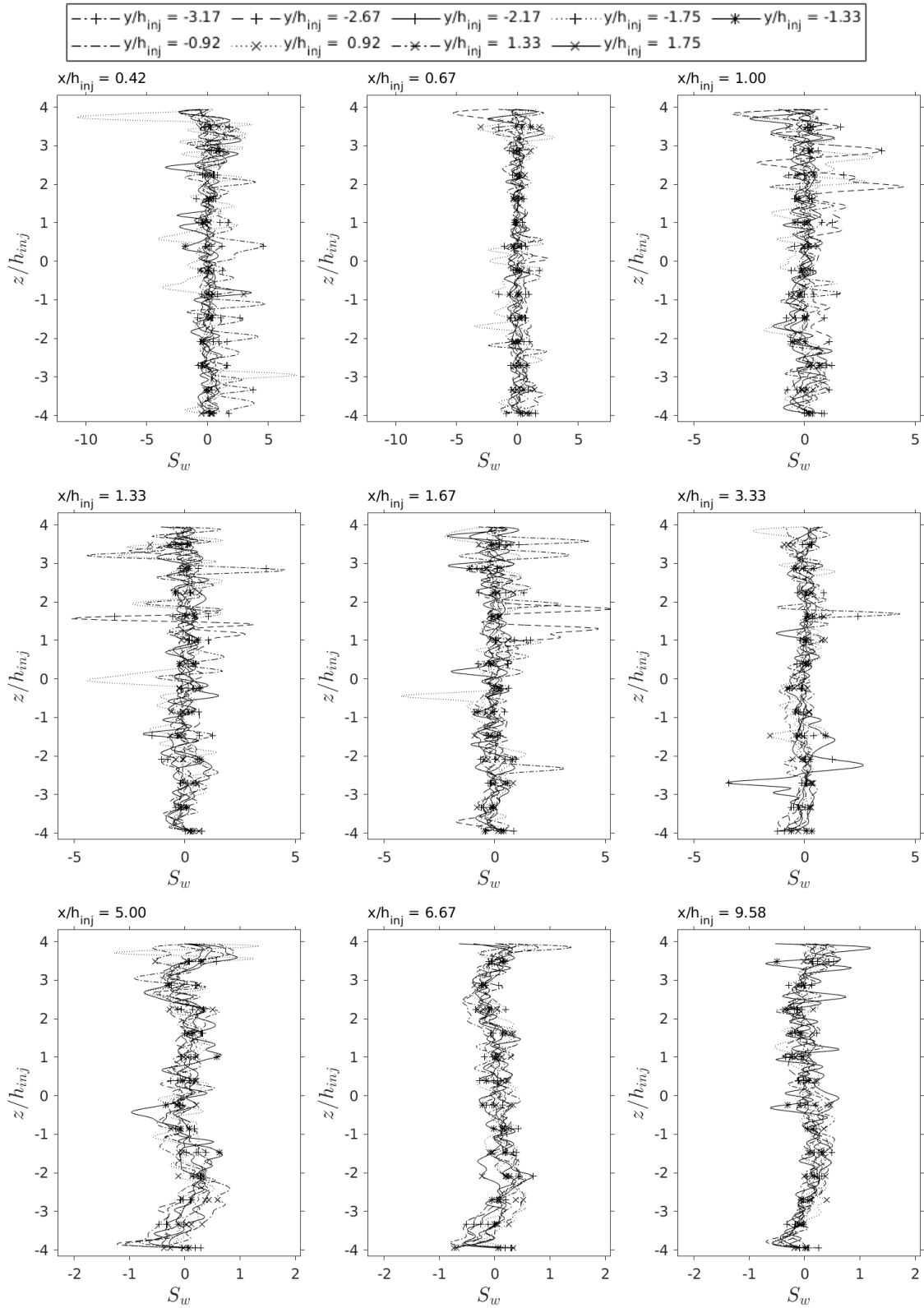
Figura 5.113 - perfis transversais horizontais da assimetria da componente transversal de velocidade  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $S_w = \pm 0,46$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.



Figura 5.114 - perfis transversais horizontais da assimetria da componente transversal de velocidade  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $S_w = \pm 0,66$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

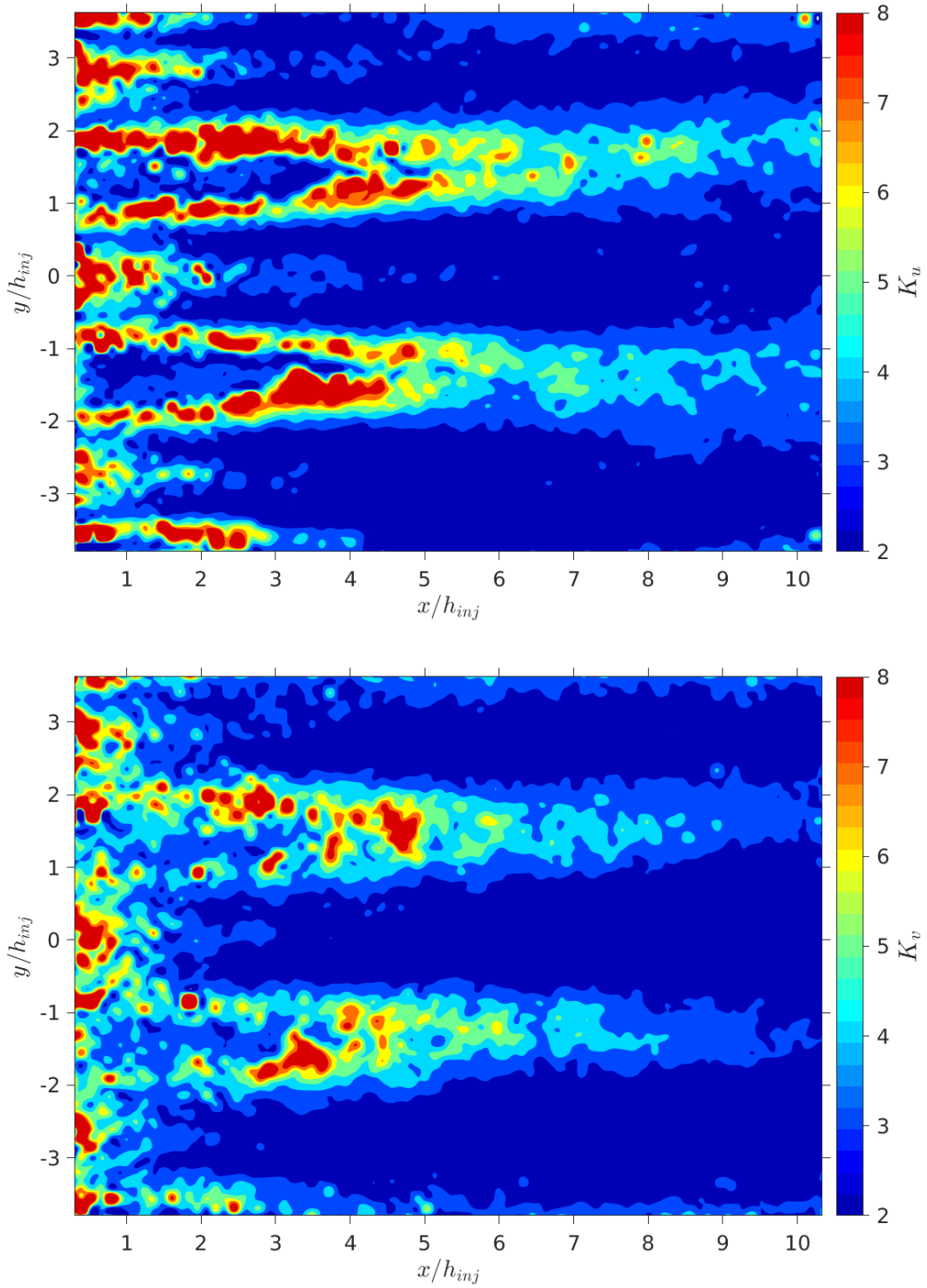
### 5.11 Momento de quarta ordem normalizado (curtose)

Nesta Seção são analisados as curtoses das componentes da velocidade na região principal. Os isocontornos de  $K_u$  e de  $K_v$  da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$  são apresentados pela Figura 5.115. Da Figura 5.116 até a Figura 5.123 são apresentadas os perfis do momento de quarta ordem normalizado das seções horizontais e verticais da região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ .

Nos isocontornos de  $K_u$  da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ , apresentado pela Figura 5.115, verifica-se que a curtose de  $u$  atinge valores superiores nas bordas das esteiras e nas zonas de recirculação. Na faixa até de  $x/h_{inj} = 0$  a  $x/h_{inj} = 5$ ,  $K_u$  atinge valores superiores a 8 nas bordas das esteiras, que se alargam ao longo de  $x/h_{inj}$ . Nas zonas de recirculação  $K_u$  também possui valores superiores a 8. Verifica-se que as áreas em que  $K_u \geq 8$  que estão nas zonas de recirculação se estendem até  $x/h_{inj} = 2$ . Dentro das esteiras  $K_u$  possui valores inferiores em torno de 2. A curtose tem valores muito elevados nas bordas das esteiras devido ao processo de arrastamento, que também influencia na assimetria das componentes de velocidade, como foi observado na Seção 5.10. Este processo, que é uma interação entre o escoamento da esteira e o escoamento principal, aumenta a intermitência nas estruturas coerentes da turbulência. Nas zonas de recirculação, os valores elevados de  $K_u$  são causadas por flutuações turbulentas ordinárias.

Quanto aos isocontornos de  $K_v$  da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ , que também são apresentados pela Figura 5.115, verifica-se que  $K_v$  é muito menos intenso na região principal em relação a  $K_u$ . Nas bordas das esteiras, somente em algumas localidades  $K_v$  excede valores superiores a 8. Nas zonas de recirculação,  $K_v \geq 8$  assim como  $K_u$ . Além disso, observa-se que o alargamento das regiões onde  $K_v \leq 2$  ao longo de  $x/h_{inj}$  é maior do que o alargamento das regiões onde  $K_u \approx 2$ . Observando os isocontornos de  $K_u$  e  $K_v$ , pode-se constatar que o escoamento não é plenamente homogêneo em boa parte da região principal.

Figura 5.115 - Isocontornos da curtose das componentes longitudinal e normal de velocidade  $u$  e  $v$  na seção vertical central  $z/h_{inj} = 0$  da região principal. Incerteza média de  $K_u = \pm 2,19$  e de  $K_v = \pm 1,76$ . Incerteza de  $x/h_{inj} = \pm 0,04$  e de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



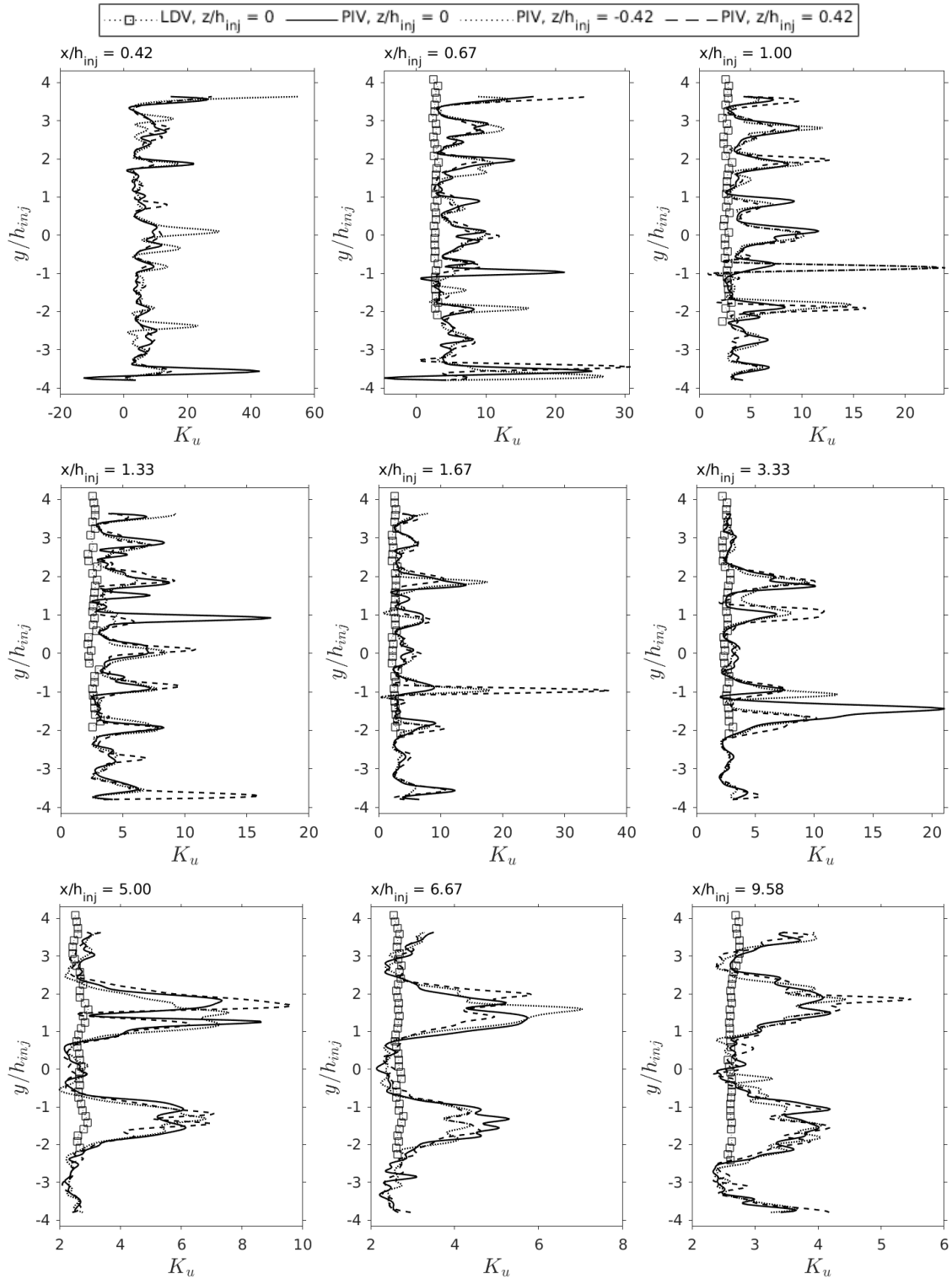
Fonte: Produção do autor.

Observa-se nas Figuras 5.116 a 5.119 que os perfis de  $K_u$  e  $K_v$  nas estações que estão entre  $x/h_{inj} = 0,67$  e  $x/h_{inj} = 9,58$  possuem oscilações de média e grande amplitude nas alturas das bordas das esteiras e nas zonas de recirculação. Essas oscilações são causadas pelos movimentos turbulentos de larga escala. Verifica-se também que os perfis de  $K_u$  e  $K_v$  das seção verticais  $z/h_{inj} = \pm 0,42$  não são plenamente simétricas com relação a  $z/h_{inj} = 0$ . Além disso os perfis de  $K_u$  e  $K_v$  das seção verticais, que são apresentados pelas Figuras 5.117 e 5.119, não são integralmente idênticos. Isso se deve as características locais da turbulência.

Os perfis de  $K_u$  e  $K_w$  das seções horizontais, que são apresentados pelas Figuras 5.120 a 5.123, têm aspectos diferentes daqueles observados nos perfis de  $K_u$  e  $K_v$  das seção verticais. Verifica-se que nas cinco primeiras estações  $K_u$  e  $K_w$  têm oscilações de média e grande amplitude, principalmente na estação  $x/h_{inj} = 0,42$ . Essas oscilações de grande amplitude diminuem em número e de tamanho ao longo de  $x/h_{inj}$ . Pode-se constatar também que a distribuição destas oscilações em  $z/h_{inj}$  é arbitrária. Tais oscilações se devem a forte anisotropia nas vizinhanças das zonas de recirculação e ao movimento tridimensional do escoamento turbulento. Embora os perfis de  $K_u$  e  $K_w$  tenham essas oscilações, na maior parte dos casos, os valores das curtoses de  $u$  e  $w$  estão na faixa de 2,5 a 5. Além disso, desconsiderando as oscilações de grande amplitude, não foi observado diferença entre as seções horizontais. Portanto, os perfis de  $K_u$  e  $K_w$  não mostram a influência dos movimentos turbulentos de larga escala no escoamento.

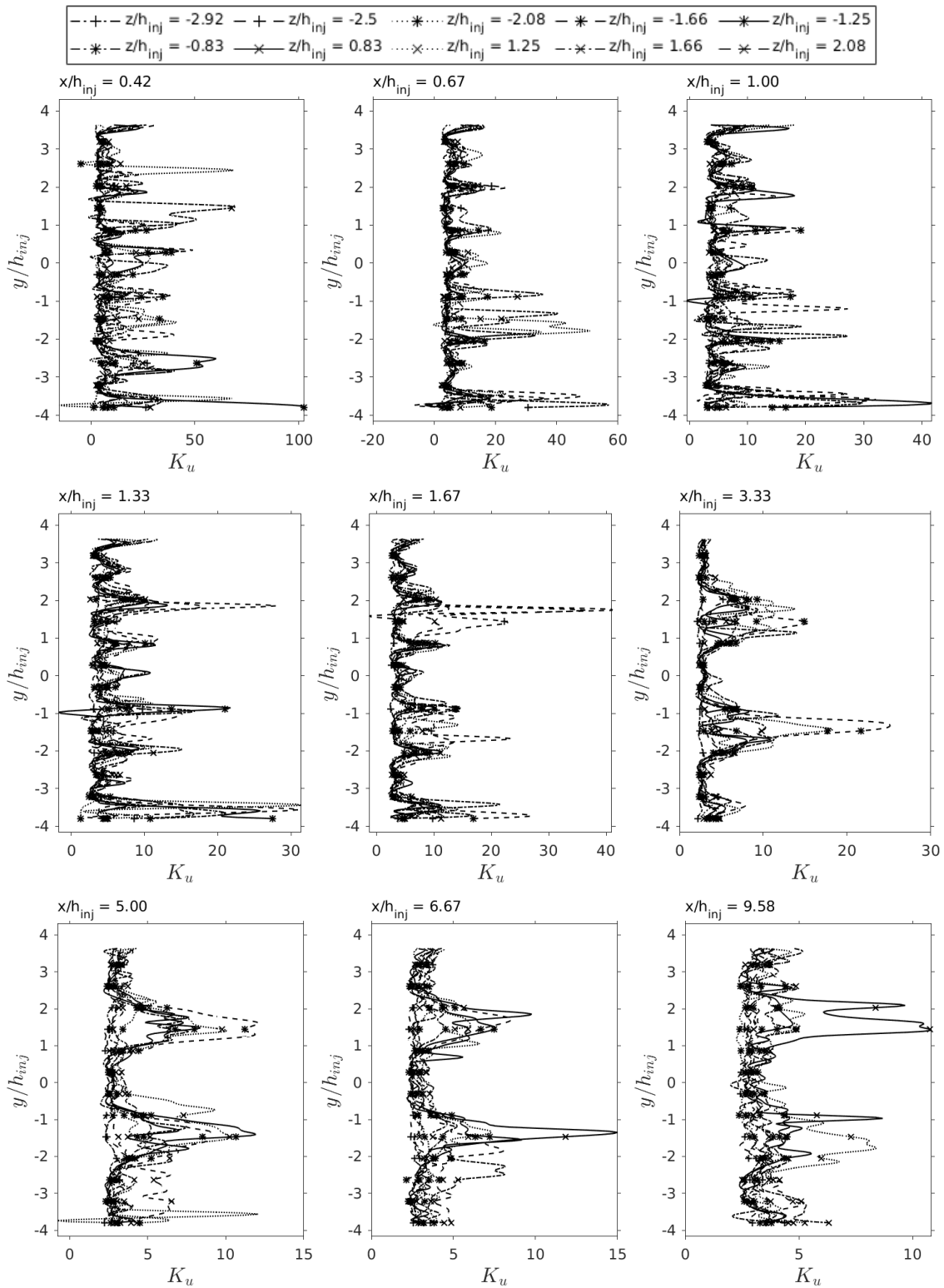
Na comparação dos perfis obtidos de  $K_u$  e  $K_v$  pelo PIV com aqueles obtidos pelo LDV, que são apresentados pela Figura 5.116, pode-se observar que os com LDV não contêm nenhum valor superior a 4 tal como diversos valores da curtose do PIV. Somado a isso, embora não exista uma convergência da maioria dos valores de  $K_v$  do LDV com os do PIV, pode-se observar que nas distâncias 5,00, 6,67 e 9,58 em  $x/h_{inj}$  há um alinhamento entre os valores máximos e mínimos dos valores de  $K_v$  entre as duas técnicas. Diferenças entre a curtose e a assimetria com PIV e com LDV também foram observadas em Romano (1992).

Figura 5.116 - Perfis transversais verticais da curtose da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $K_u = \pm 3,19$ . LDV: Incerteza média de  $K_u = \pm 0,18$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



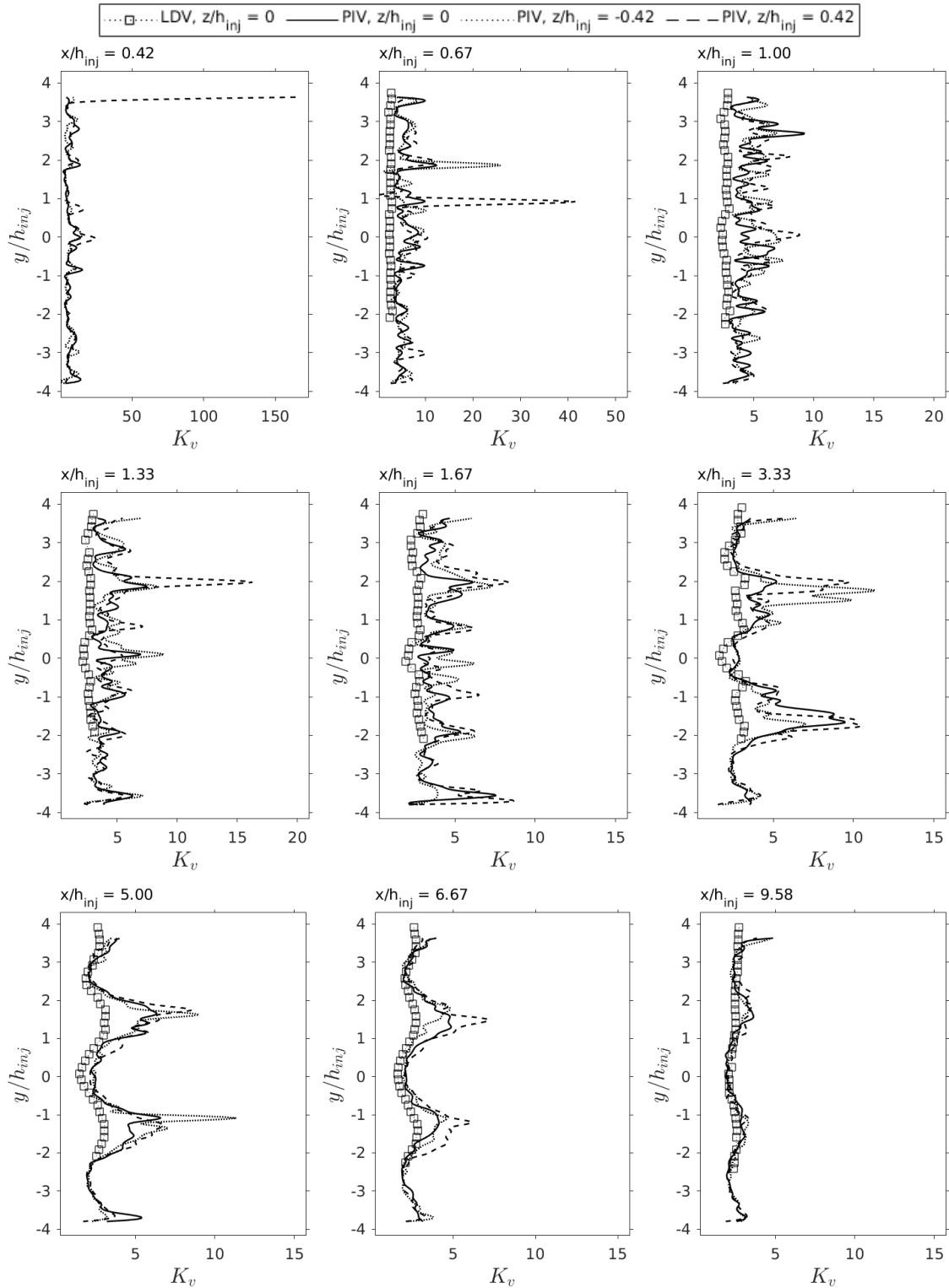
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.117 - Perfis transversais verticais da curtose da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $K_u = \pm 3,90$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



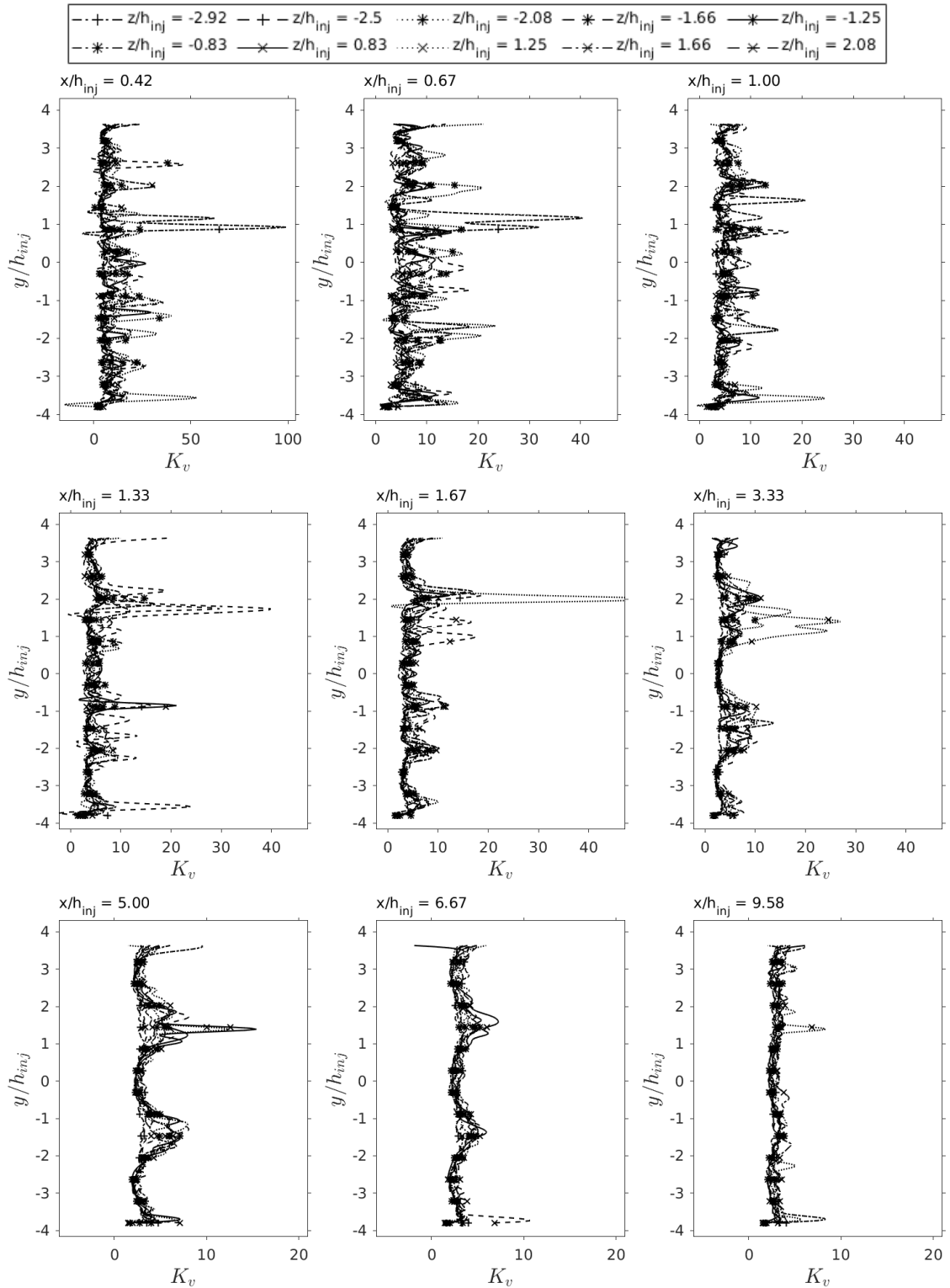
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.118 - Perfis transversais verticais da curtose da componente normal de velocidade  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (seções verticais). PIV: Incerteza média de  $K_v = \pm 2,94$ . LDV: Incerteza média de  $K_v = \pm 0,17$ . Incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

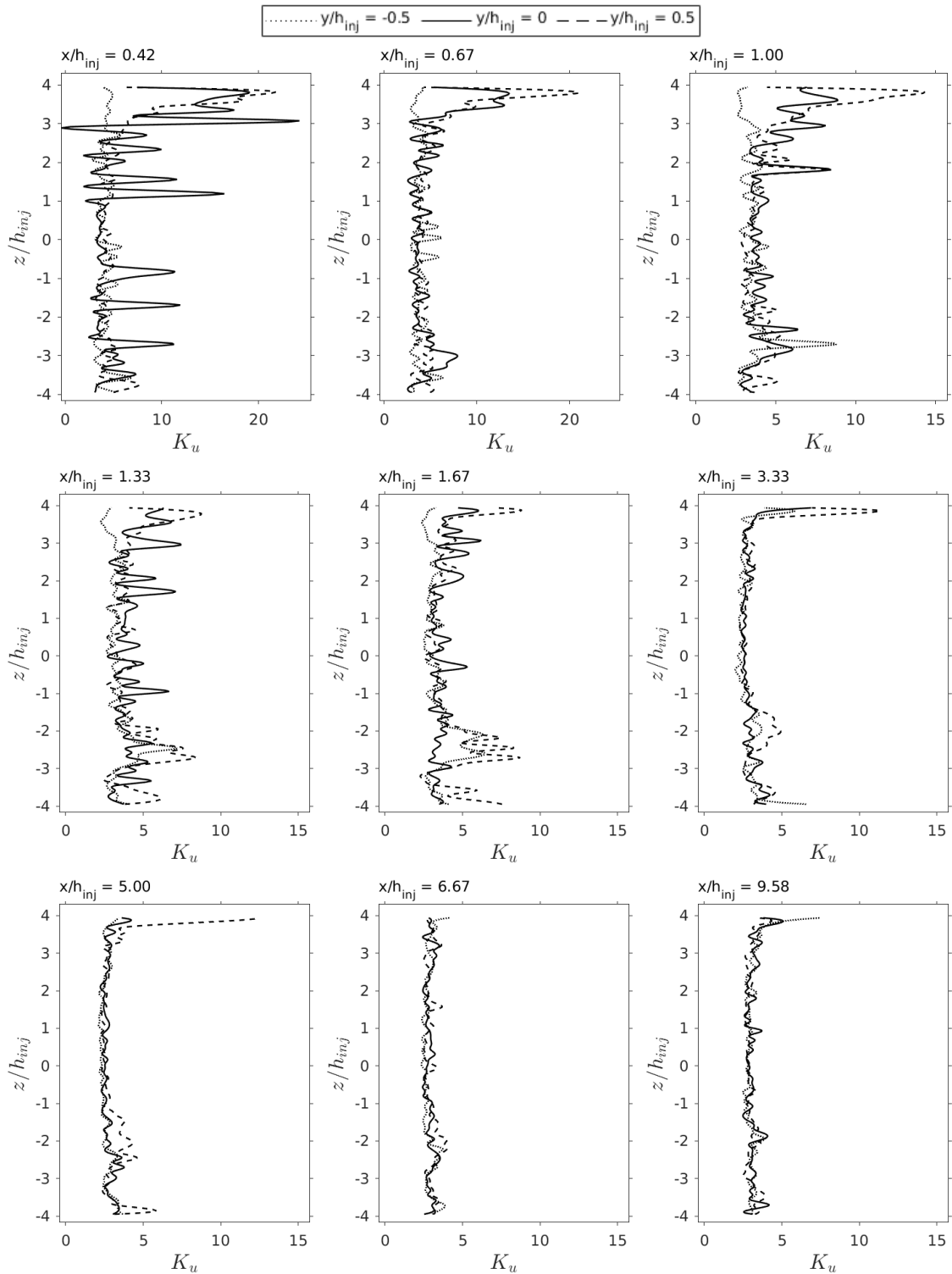
Figura 5.119 - Perfis transversais verticais da curtose da componente normal de velocidade  $v$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções verticais). Incerteza média de  $K_v = \pm 3,22$ , incerteza de  $y/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

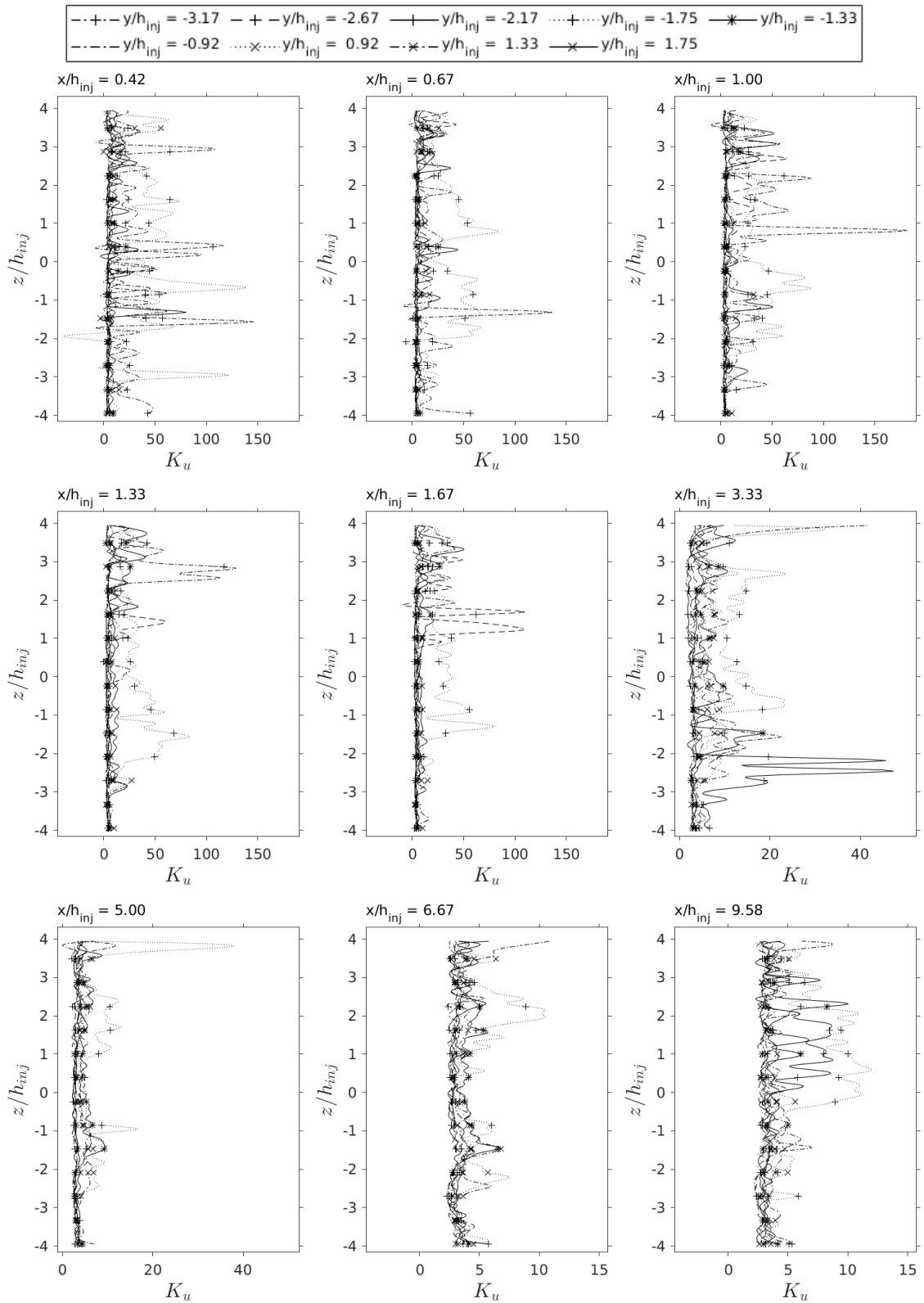


Figura 5.120 - perfis transversais horizontais da curtose da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $K_u = \pm 1,95$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



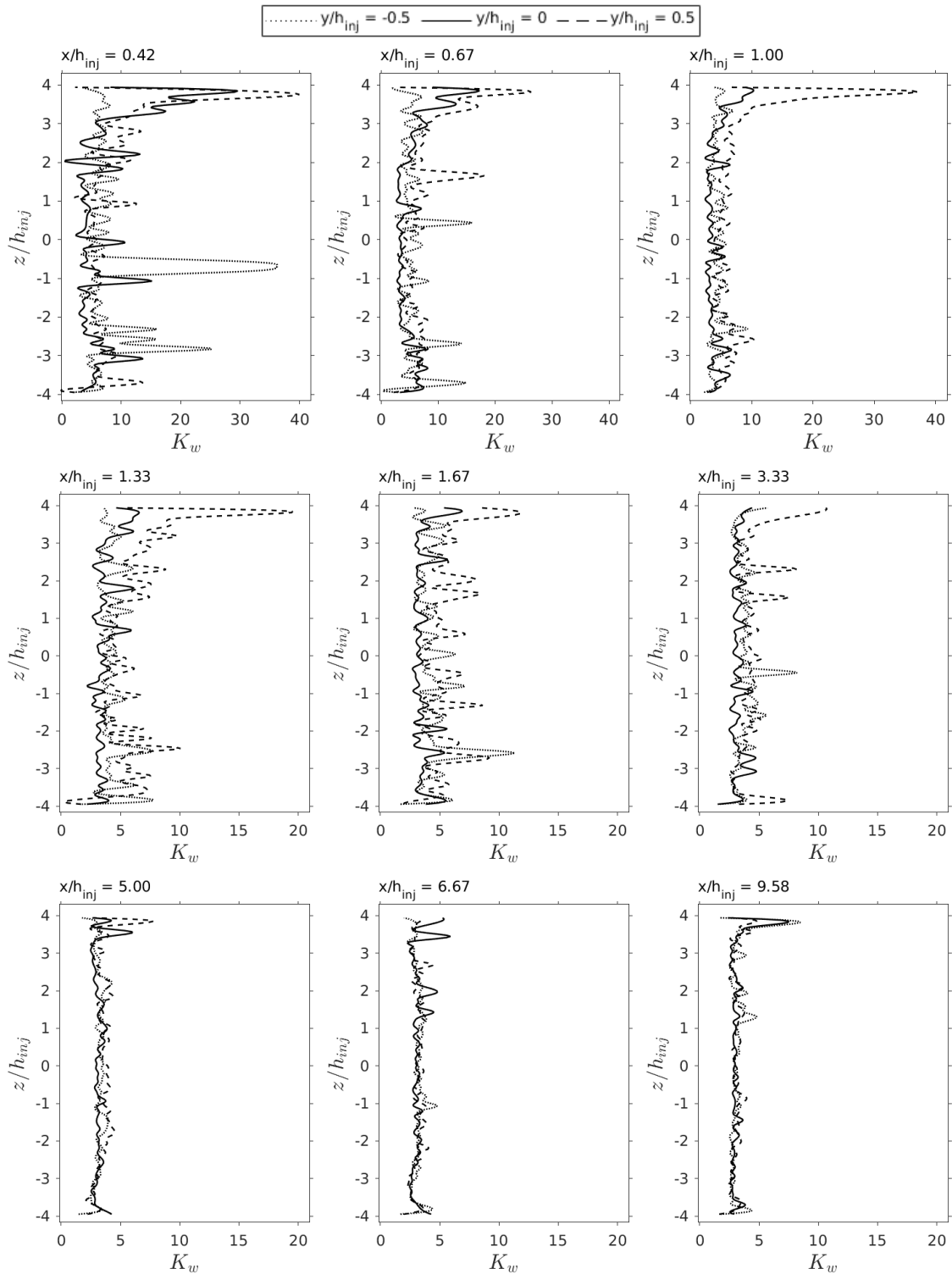
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.121 - perfis transversais horizontais da curtose da componente longitudinal de velocidade  $u$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $K_u = \pm 8,57$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



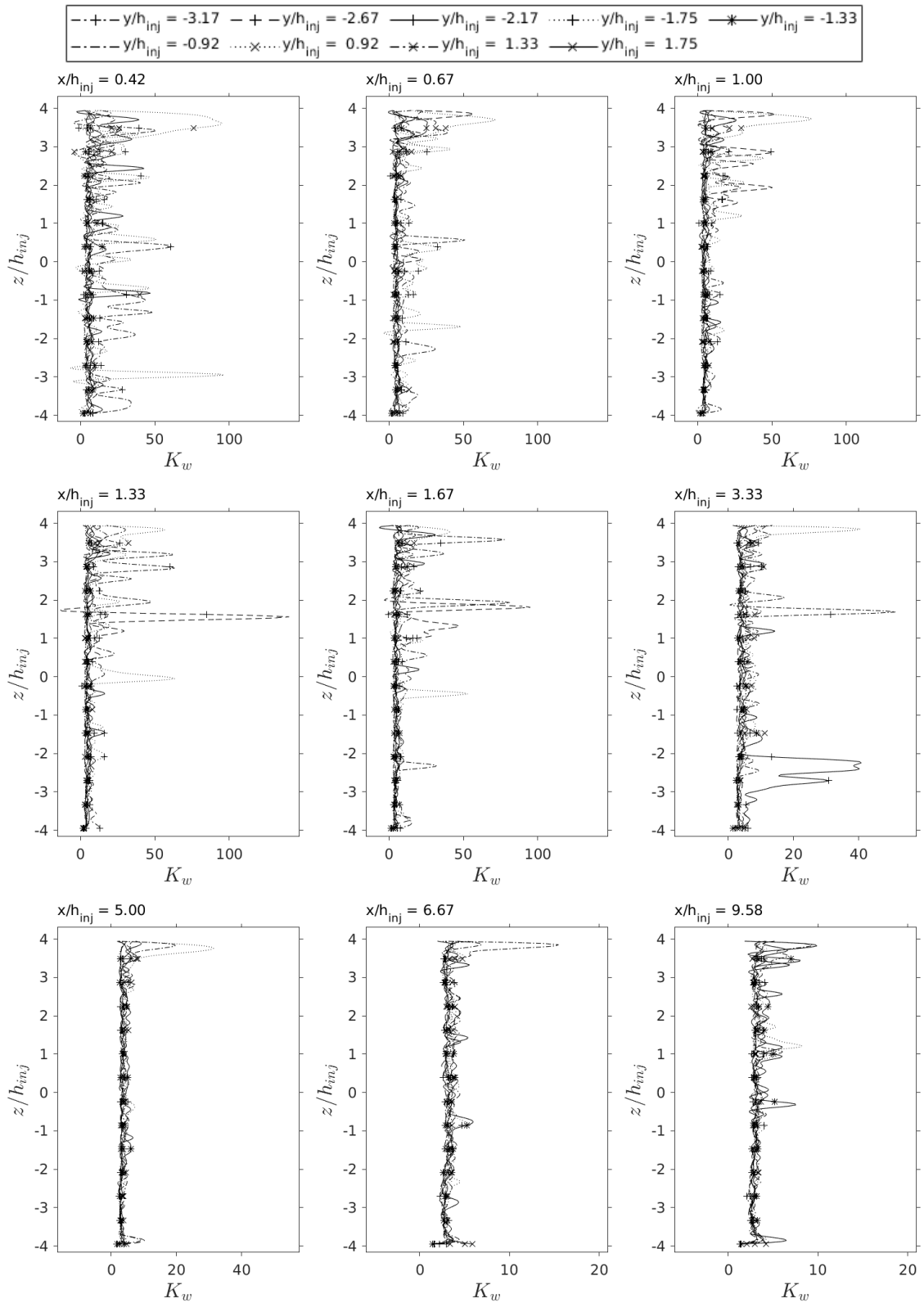
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.122 - perfis transversais horizontais da curtose da componente transversal de velocidade  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $K_w = \pm 3,02$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.123 - perfis transversais horizontais da curtose da componente transversal de velocidade  $w$  na região principal para determinadas estações de  $x/h_{inj}$  (seções horizontais). Incerteza média de  $K_w = \pm 5,27$ , incerteza de  $z/h_{inj} = \pm 0,04$ .



Fonte: Produção do autor.

## 5.12 Funções densidade de probabilidade

Na presente seção são analisados algumas funções densidade de probabilidade (PDF) de alguns pontos em torno do injetor central localizados em  $z/h_{inj} = 0$ . As localizações das PDFs são apresentadas pelas Figuras 5.58 e 5.59. Nos gráficos das PDFs, são apresentados os valores da curtose e da assimetria de cada PDF. Nas PDFs da seção vertical central, são apresentados, também, a curtose e a assimetria das PDFs obtidas no trabalho de Trevisan (2018) nos mesmos pontos de interesse. Somado a isso, foi sobreposto a curva da distribuição normal sobre as PDFs. As localizações das PDFs em questão são apresentadas pelas Figuras 5.58 e 5.59.

Sobre as PDFs das velocidades longitudinal, normal e transversal das seções verticais e horizontais em alguns pontos da região principal, apresentadas pelas Figuras 5.124 a 5.131, pode-se verificar algumas características. Pode-se constatar que, normalmente, os valores da curtose das PDFs de  $v$  da seção vertical central e das PDFs de  $u$  das seções horizontais são mais próximos de 3 nos pontos mais distantes dos injetores em relação aos pontos mais próximos a estes. No entanto, os valores da curtose das PDFs de  $u$  da seção vertical central e das PDFs de  $w$  das seções horizontais se distanciam de 3 nos pontos mais distantes dos injetores. Quanto as assimetrias, apenas as PDFs de  $v$  da seção vertical central nos pontos mais distantes dos injetores obtiveram assimetrias mais próximas de 0, tendência oposta ao que foi observado nas PDFs dos pontos mais próximos dos injetores.

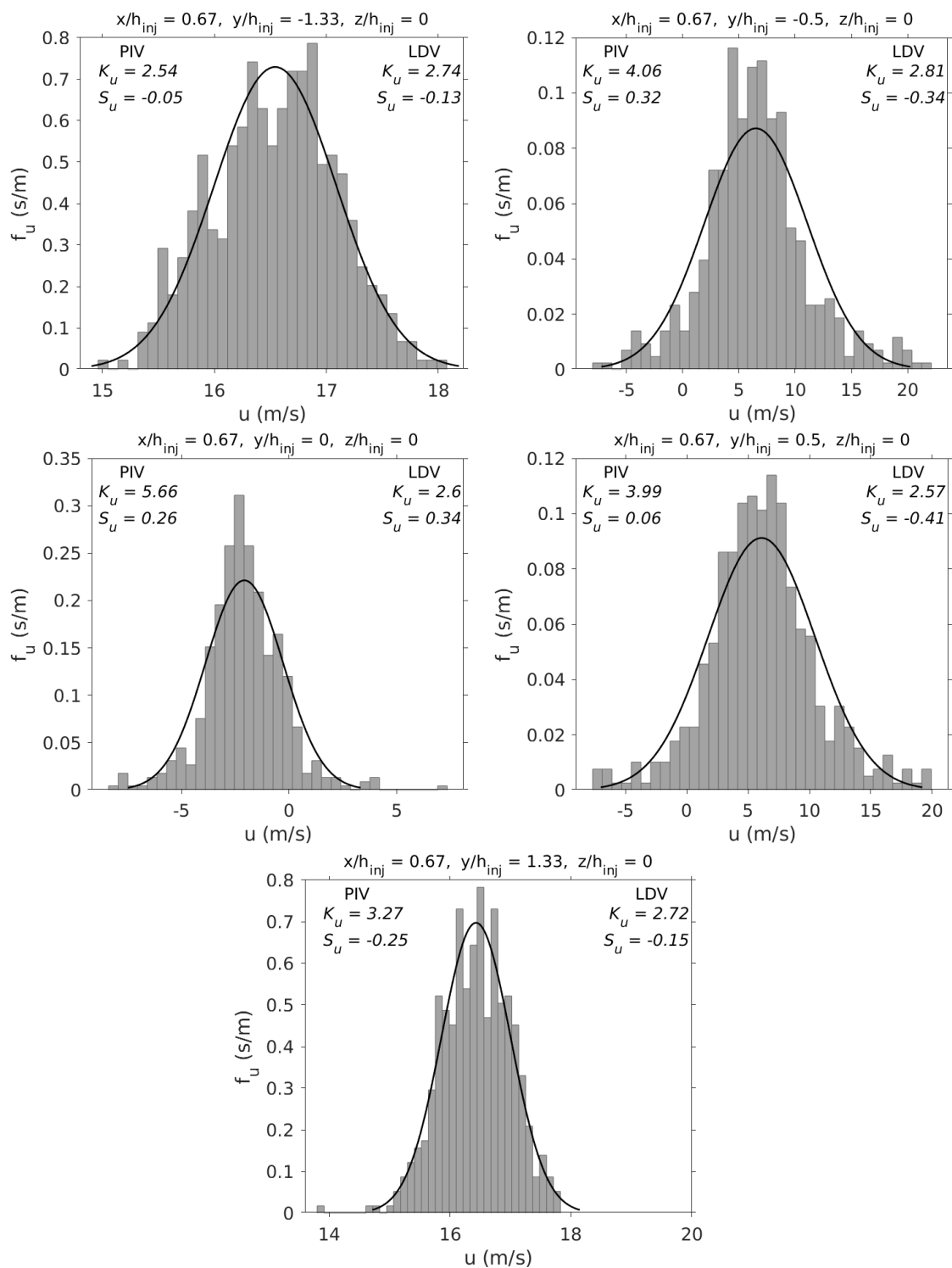
Se levar em consideração apenas os pontos que estão na mesma altura do centro da superfície do injetor central e das bordas deste, pode-se verificar que, em geral, a curtose é mais próxima de 3 nos pontos mais distantes dos injetores com relação aos valores da curtose dos pontos mais próximos deste. Este aspecto dos valores da curtose é justificado pela variação da intermitência da turbulência entre os pontos mais próximos e os pontos mais distantes dos injetores. Essa variação da intermitência se deve a interação das esteiras com o escoamento principal, que também aumenta ou diminui a assimetria, conforme observado na Seção 5.10.

Sobre as assimetrias das PDFs, verifica-se que apenas as assimetrias das PDFs da seção vertical central nos pontos mais distantes dos injetores são mais próximos de 0 em comparação com os valores dos pontos mais próximos dos injetores. Embora os valores da assimetria entre as PDFs tenham essas diferenças, boa parte deles não têm valores superiores a 1 e nem inferiores a  $-1$ . Característica em comum pode ser observada entre as curtoses das PDFs também, a maioria das PDFs não tem curtoses de valores superiores a 10. O único PDF que tem curtose superior a 10 é a PDF de

$u$  da seção vertical central localizado em  $(x/h_{inj}; y/h_{inj}; z/h_{inj}) = (3,33; -1,33; 0)$ , apresentada pela Figura 5.125, pois algumas medições de  $u$  obtiveram valores aberrantes.

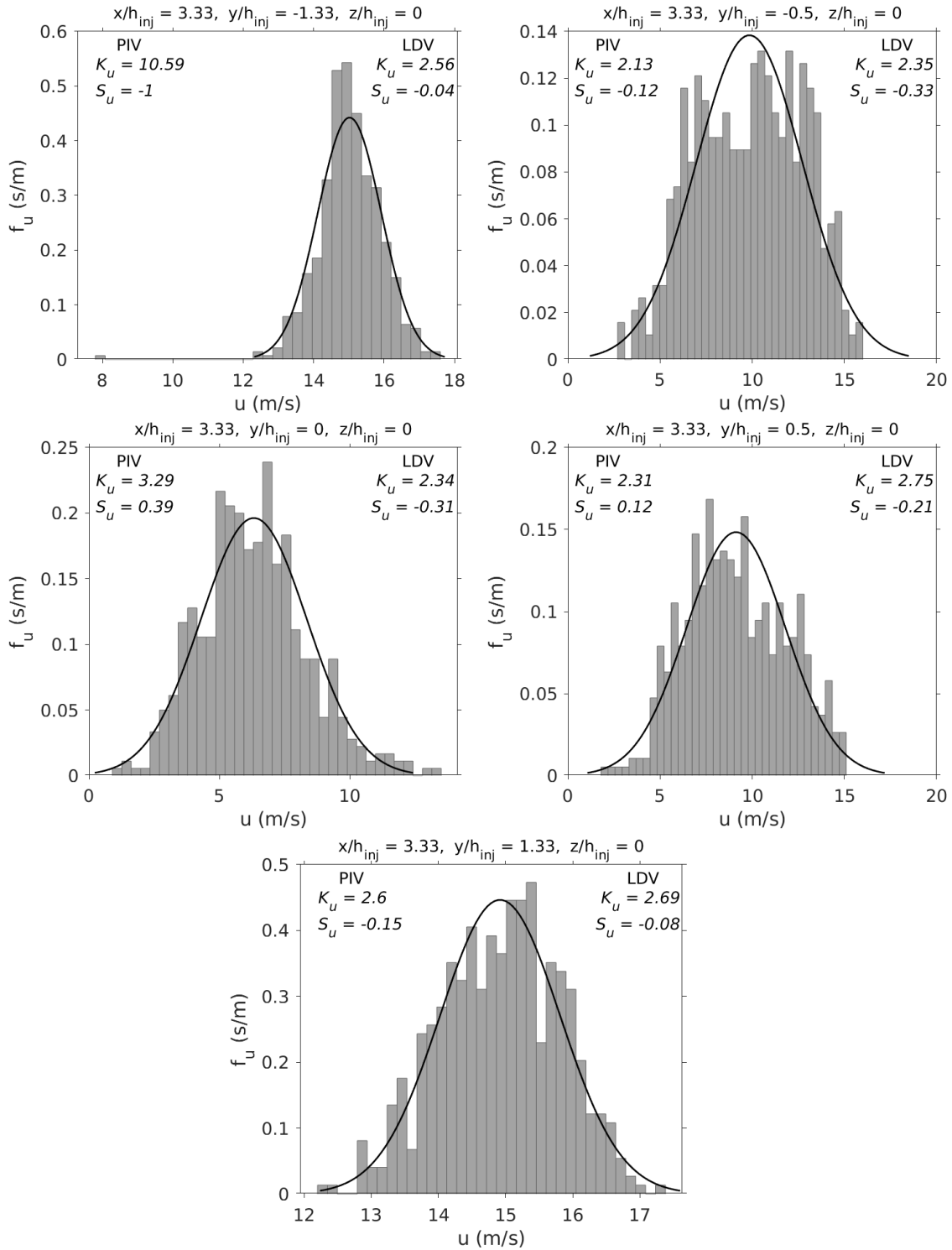
Comparando as PDFs de  $u$  da seção vertical central com as das seções horizontais, verifica-se que, embora sejam as mesmas posições, as distribuições dos valores de  $u$ , bem como os valores da curtose e da assimetria, são distintos. Essa diferença das PDFs de  $u$  entre as seções se deve ao fato do escoamento turbulento ter comportamento tridimensional. Analisando a curtose e a assimetria do LDV e comparando os seus valores com os valores da curtose e assimetria com PIV, pode-se observar que os valores da curtose do LDV, de modo geral, são mais próximos de 3. Embora essa diferença entre as curtoses entre as duas técnicas, não foi constatado diferença substancial nos valores da assimetria entre as duas técnicas. Por fim, comparando as distribuições normais e as PDFs, verifica-se que boa parte dos valores das velocidades dos histogramas estão na distribuição normal.

Figura 5.124 - Exemplos de histogramas de  $u$  em determinados pontos da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{u}$  e  $\sigma_u$ , com os valores de  $K_u$  e de  $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira próxima  $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de  $u = 0,87$  m/s. Incerteza de  $f_u = \pm 5$  %.



Fonte: Produção do autor.

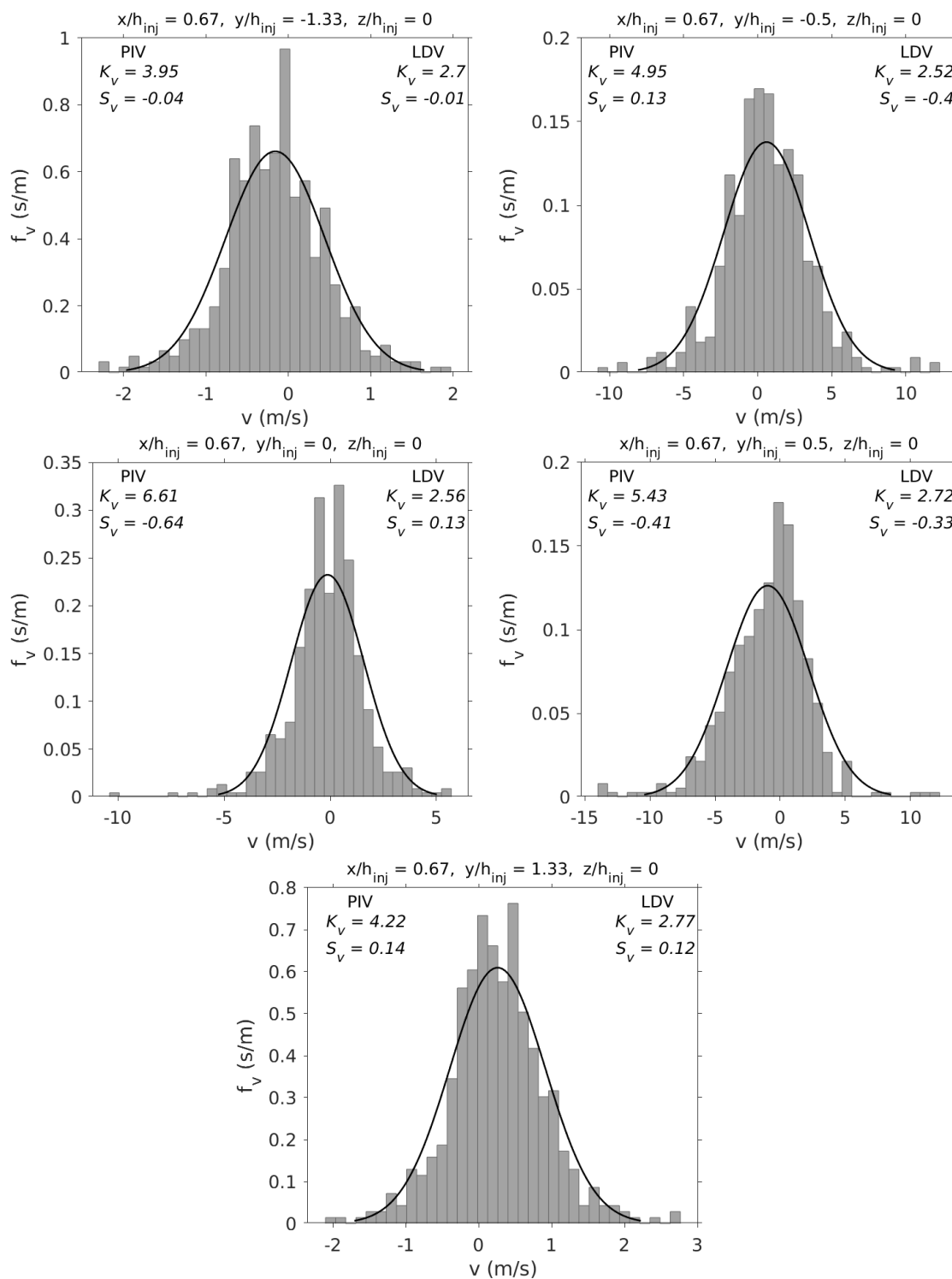
Figura 5.125 - Exemplos de histogramas de  $u$  em determinados pontos da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{u}$  e  $\sigma_u$ , com os valores de  $K_u$  e de  $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira distante  $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de  $u = 0,48$  m/s. Incerteza de  $f_u = \pm 5$  %.



Fonte: Produção do autor.

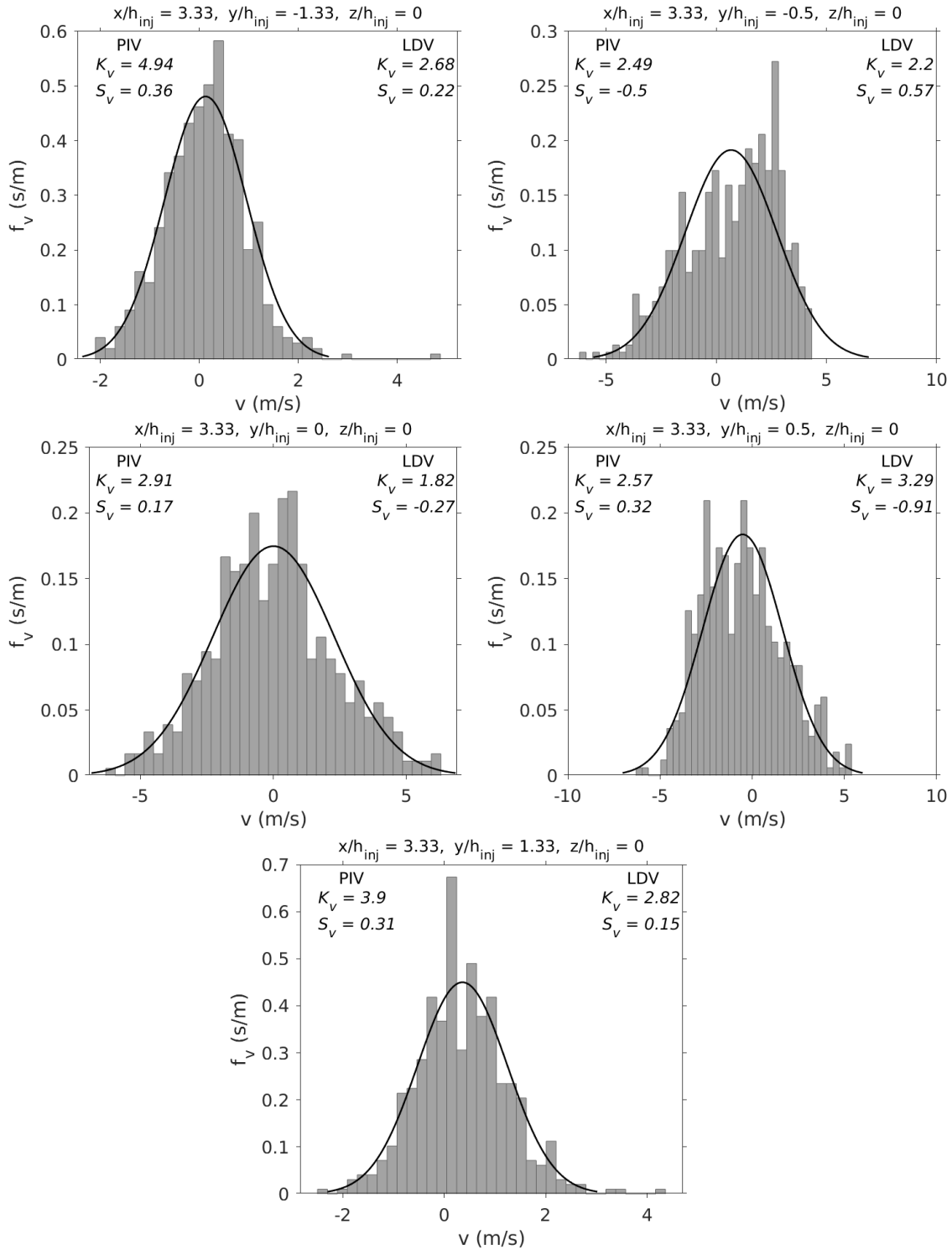


Figura 5.126 - Exemplos de histogramas de  $v$  em determinados pontos da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{v}$  e  $\sigma_v$ , com os valores de  $K_v$  e de  $S_v$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira próxima  $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de  $v = 0,75 \text{ m/s}$ . Incerteza de  $f_v = \pm 5 \%$ .



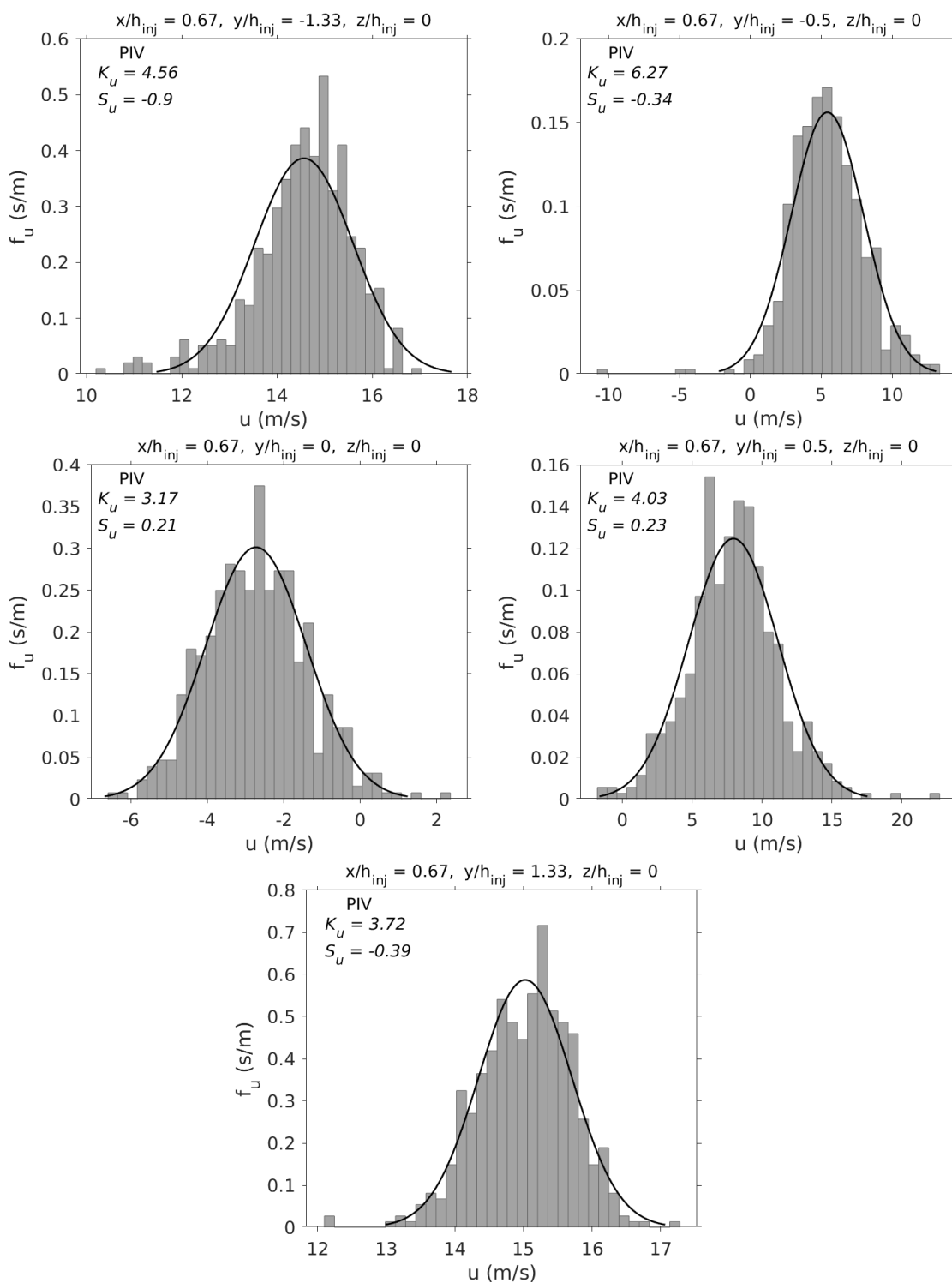
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.127 - Exemplos de histogramas de  $v$  em determinados pontos da seção vertical  $z/h_{inj} = 0$ , comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{v}$  e  $\sigma_v$ , com os valores de  $K_v$  e de  $S_v$ , calculados a partir das medições com PIV e comparados com LDV (TREVISAN, 2018) (esteira distante  $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de  $v = 0,44$  m/s. Incerteza de  $f_v = \pm 5\%$ .



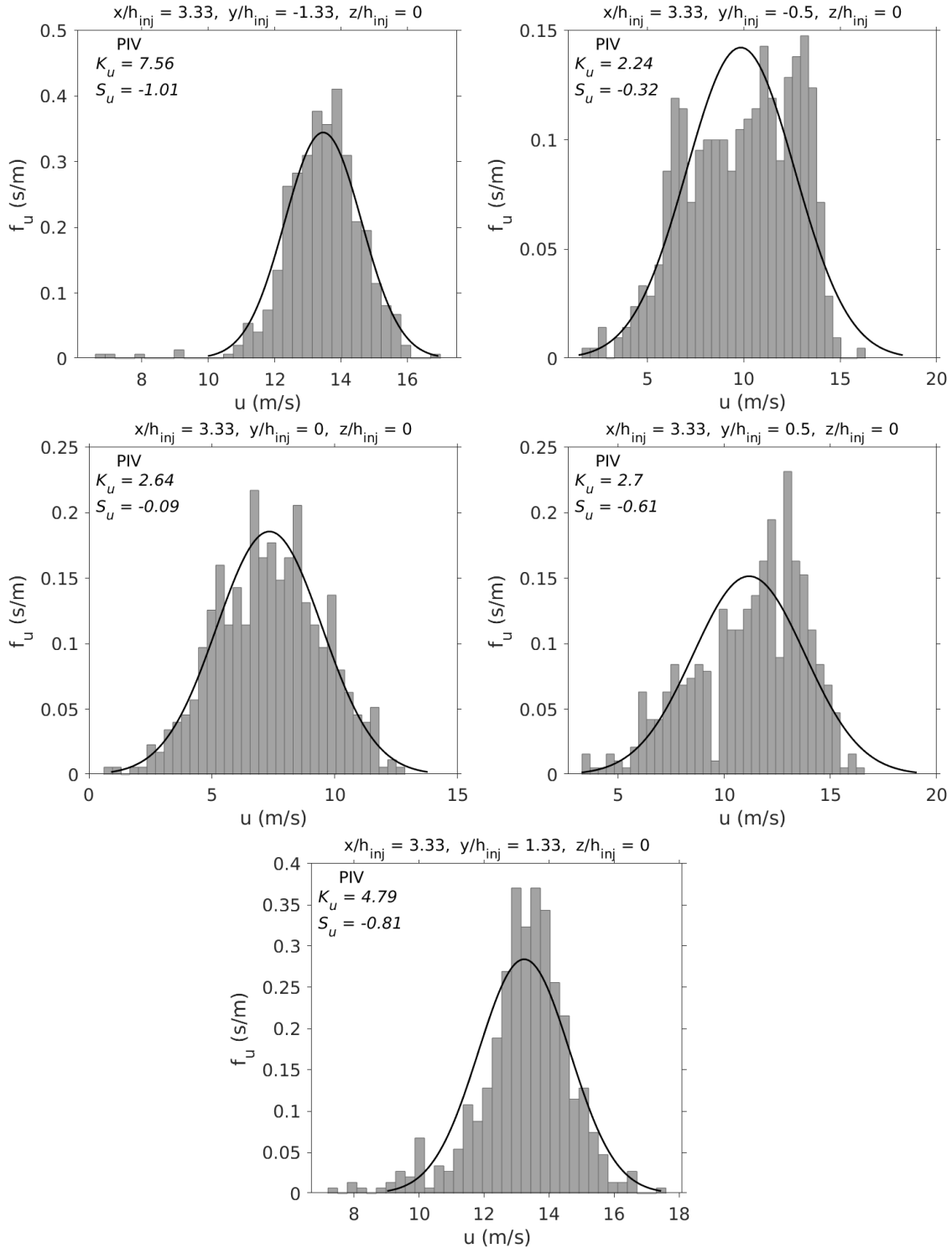
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.128 - Exemplos de histogramas de  $u$  em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{u}$  e  $\sigma_u$ , com os valores de  $K_u$  e de  $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira próxima  $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de  $u = 0,68$  m/s. Incerteza de  $f_u = \pm 5$  %.



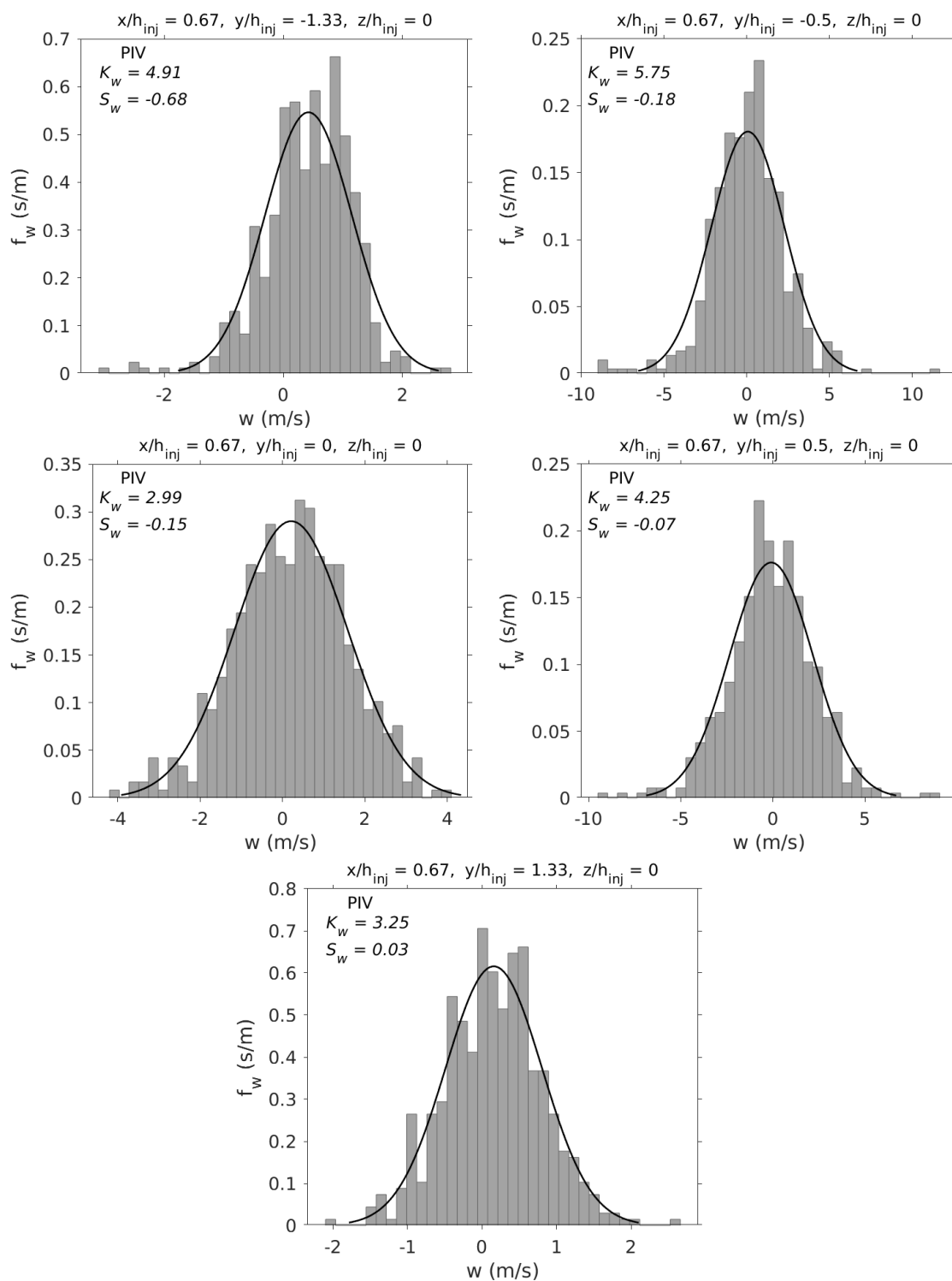
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.129 - Exemplos de histogramas de  $u$  em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{u}$  e  $\sigma_u$ , com os valores de  $K_u$  e de  $S_u$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira distante  $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de  $u = 0,41$  m/s. Incerteza de  $f_u = \pm 5\%$ .



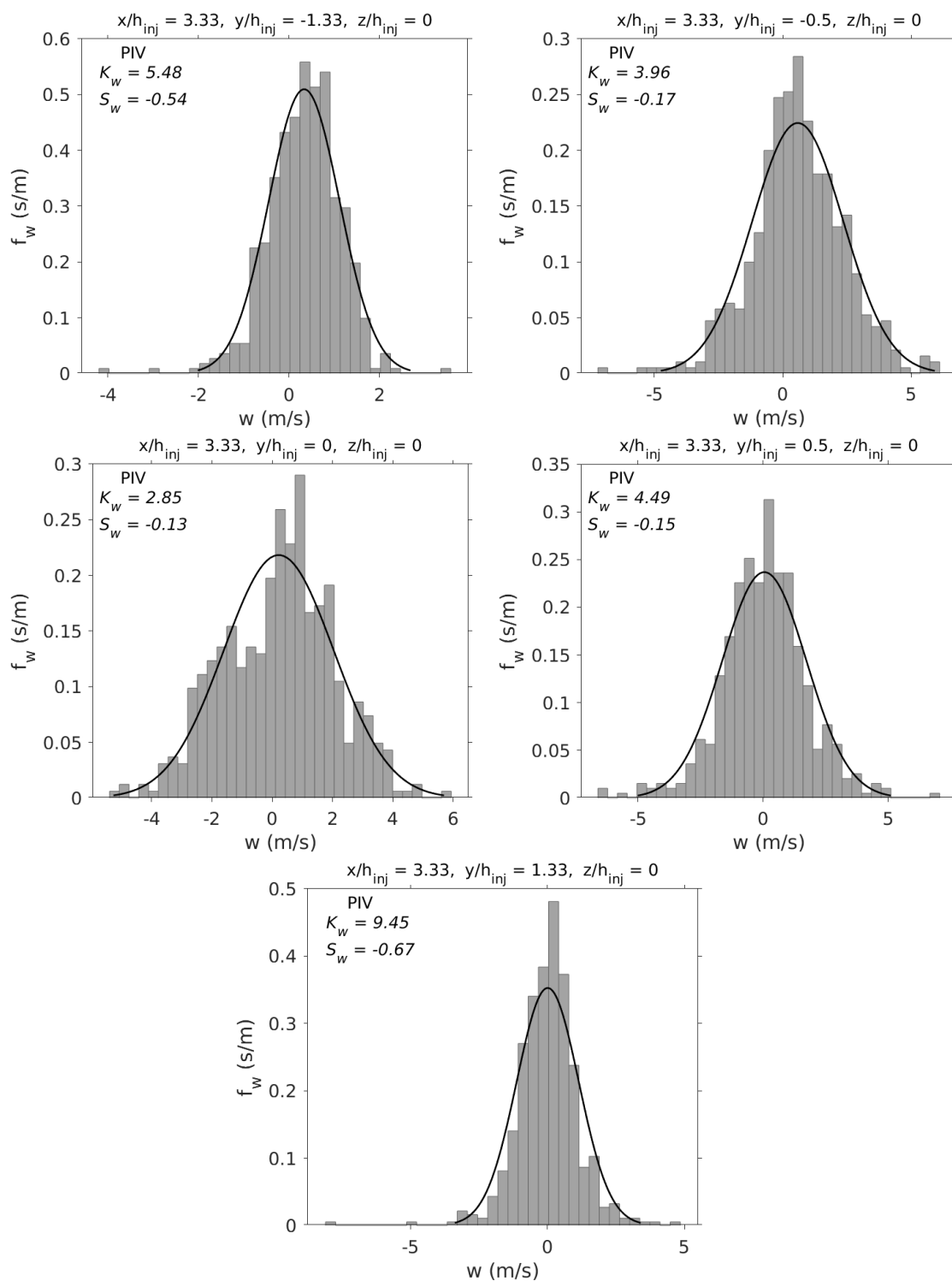
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.130 - Exemplos de histogramas de  $w$  em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{w}$  e  $\sigma_w$ , com os valores de  $K_w$  e de  $S_w$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira próxima  $x/h_{inj} = 0,67$ ). Resolução máxima de  $w = 0,57$  m/s. Incerteza de  $f_w = \pm 5\%$ .



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.131 - Exemplos de histogramas de  $w$  em determinados pontos de determinadas seções horizontais, comparados com as distribuições normais baseadas em  $\bar{w}$  e  $\sigma_w$ , com os valores de  $K_w$  e de  $S_w$ , calculados a partir das medições com PIV (esteira distante  $x/h_{inj} = 3,33$ ). Resolução máxima de  $w = 0,38$  m/s. Incerteza de  $f_w = \pm 5\%$ .



Fonte: Produção do autor.

### 5.13 Conclusão das análises das características do escoamento inerte na região principal

Este capítulo foi destinado a investigar os diversos parâmetros caracterizadores do escoamento inerte turbulento na região principal a partir das medições com PIV. Nesta investigação foram observadas regiões de cisalhamento intenso nas interfaces das zonas de recirculação com o escoamento principal, onde foram gerados estruturas coerentes de larga escala altamente anisotrópicas. Também foi observado que, nas proximidades das paredes, o escoamento tinha altos gradientes de velocidade devido as camadas limites turbulentas. Este aspecto do escoamento afetou a qualidade das medições com PIV. Fora das vizinhanças das zonas de recirculação, o escoamento tendia a ter características do escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Nestas regiões distantes dos injetores, foi observado flutuações longitudinais, normais e transversais de pouca intensidade. Outras conclusões das análises das características do escoamento inerte são expostas a seguir:

–As zonas de recirculação a jusante dos injetores não mantêm o mesmo comprimento ao longo do eixo  $z$ . Verificou-se que a diferença entre as zonas de recirculação na seção vertical central é muito pequena. Mas os perfis longitudinais de  $\bar{u}$  são assimétricos em  $z/h_{inj}$ . Além disso, nas regiões próximas às paredes, os comprimentos das zonas de recirculação média atingem seus menores valores. Isso se deve a presença de altos gradientes de velocidade nestas regiões.

–As intensas flutuações de velocidade médias, os tensores turbulentos de cisalhamento, a intensidade turbulenta, a razão de anisotropia entre outros parâmetros constatarão regiões de cisalhamento intenso localizados próximos às zonas de recirculação. Foi observado também, a partir destes parâmetros, que as flutuações de velocidade eram mais intensas próximo das paredes laterais. Além disso, estes parâmetros caracterizadores mostraram que a turbulência do escoamento perde força no sentido longitudinal. Isso se deve a destruição das estruturas coerentes da turbulência e a dissipação da energia cinética turbulenta pela viscosidade.

–Foi verificado forte anisotropia nas regiões onde são gerados os vórtices e nas bordas das esteiras, conforme os coeficientes de anisotropia analisados. O coeficiente de correlação e o coeficiente de anisotropia mostraram que os tensores turbulentos de cisalhamento são mais intensos nas bordas das esteiras.

–As flutuações longitudinais são mais intensas do que as flutuações normais e transversais nas regiões de cisalhamento das zonas de recirculação com relação a outras

localidades da região principal. Além disso, nestas mesmas regiões e nas bordas das esteiras, o tensor de cisalhamento atinge seus maiores e menores valores.

–1/3 da região principal apresenta velocidade longitudinal média e flutuação longitudinal média com caráter bidimensional. Este aspecto do escoamento turbulento favorece a geração de vórtices.

–Em torno das zonas de recirculação as correlações espaciais das flutuações, assim como as escalas de comprimento do escoamento, são menores. Isso se deve ao alargamento da faixa de tamanhos dos vórtices pelas camadas de cisalhamento destas regiões, que são responsáveis pela geração de vórtices. Verificou-se também que, a partir das análises das correlações espaciais, há duas faixas de tamanho de vórtices nas regiões onde eles são gerados. Tal aspecto mostra que os vórtices que são gerados têm dimensões diferentes daqueles que pertencem ao escoamento principal.

–Os valores da curtose e da assimetria das funções densidade de probabilidade das velocidades também foram afetados pela geração dos vórtices e pela interação das esteiras com o escoamento principal. Os valores da curtose e da assimetria mostraram que há forte intermitência na turbulência nas bordas das esteiras e nas camadas de cisalhamento das zonas de recirculação. Esta característica da turbulência se deve à distribuição de tamanhos das estruturas coerentes no escoamento.

Na comparação entre os resultados com PIV e com LDV, verificou-se que, de modo geral, os resultados das duas técnicas tiveram boa concordância, embora divergiram em certos aspectos. Essa diferença entre os resultados das duas técnicas pode ser notada nas regiões de alta intensidade turbulenta. Nestas regiões, os parâmetros caracterizadores associados a flutuação normal, os valores máximos dos valores com PIV são inferiores aos com LDV. Verificou-se também que o PIV obteve menos detalhes das zonas de recirculação em comparação ao LDV. Além disso, observou-se que os valores da curtose e da assimetria das medições com LDV não mostraram o comportamento intermitente da turbulência na mesma forma nos resultados com PIV.

Apesar dessas diferenças, observou-se, em geral, convergência mais significativa entre as duas técnicas nas regiões mais distantes das zonas de recirculação. Os contrastes entre as duas técnicas, se deve à limitação da resolução temporal do PIV que o impossibilita de medir oscilações de velocidade de baixa amplitude. Diferente do PIV, o LDV tem uma resolução temporal muito superior e a capacidade de detectar flutuações de velocidade de altas frequências.



## 6 COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Comentários conclusivos

Os resultados obtidos da presente investigação experimental, cujo objetivo central é analisar as características do escoamento inerte turbulento em uma câmara de combustão usando PIV, possibilitou a obtenção de uma maior compreensão do objeto de estudo. A câmara de combustão tem geometria retangular com três injetores planos bloqueando parcialmente a passagem de ar. As medições do PIV, que é do tipo padrão, foram efetuadas a montante (região de entrada) e a jusante (região principal) dos injetores. Destas medições de velocidade instantânea foram obtidos diversos parâmetros caracterizadores da turbulência, tal como correlações espaciais, escalas, intensidade turbulenta, entre outros. Estes parâmetros possibilitaram uma análise detalhada do escoamento inerte turbulento. Somado a isso, a comparação dos resultados do PIV com aqueles medidos com LDV, consolidou não apenas o entendimento do escoamento em questão mas também assegurou que validações de modelos físicos de turbulência, que usam DFC, sejam possíveis. Além disso, foi adquirido um maior entendimento das medições e das calibrações do PIV no BEIC para se obter os melhores resultados possíveis.

Os resultados obtidos estão de acordo com as previsões a respeito do comportamento do escoamento inerte turbulento na câmara de combustão. Na região de entrada, conforme foi previsto pelas previsões e confirmado pelos resultados, as características do escoamento são as mesmas do escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Na região principal, estruturas coerentes e periódicas são geradas pelo cisalhamento criado pela interação entre o fluxo principal e os injetores. As paredes da câmara de combustão também contribuíram na intensificação da turbulência do escoamento. Foram observadas regiões de intenso cisalhamento nas bordas das faces posteriores dos injetores bem como camadas limites próximas às paredes. Além disso, nas regiões distantes das zonas de recirculação, o escoamento tende a ter características próximas ao escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Isso se deve à dissipação da energia cinética turbulenta pela viscosidade bem como a destruição das estruturas turbulentas.

Além do escoamento ser turbulento plenamente desenvolvido na região de entrada também foi observado outras características. Nas regiões próximas às paredes a intensidade turbulenta é mais intensa com relação às demais regiões. Verificou-se também que o escoamento na região de entrada obedece a lei logarítmica. Além

disso, observou-se que as flutuações médias de velocidade do escoamento na região de entrada são pequenas se forem comparadas com as flutuações encontradas na região principal. Essa caracterização do escoamento na região de entrada é fundamental nos modelos de DFC de turbulência que serão validados a partir dos resultados do presente estudo.

Sobre os resultados da região principal, foi observado que as flutuações médias de velocidade e entre outros parâmetros caracterizadores são mais intensos nas bordas dos injetores devido ao cisalhamento. Em frente a cada injetor foi formado uma zona de recirculação cujo comprimento e velocidade média máxima de retorno foram medidos. Foi observado que, em geral, as zonas de recirculação são dissimétricas. Observou-se pouca diferença entre as zonas de recirculação na seção vertical central. O aspecto bidimensional da distribuição de velocidade, a forte anisotropia, intermitência da turbulência e a distribuição dos tamanhos dos vórtices evidenciam a produção periódica dos vórtices pelas camadas de cisalhamento.

Os coeficientes de anisotropia mostraram que a anisotropia é mais intensa nas regiões de produção de vórtices. Os coeficientes de anisotropia e os coeficientes de correlação mostraram também que os tensores turbulentos de cisalhamento são mais intensos nas bordas das esteiras, que se alargam no sentido longitudinal. Observou-se também forte intermitência do escoamento turbulento nas bordas das esteiras, conforme a análise da curtose e da assimetria da velocidade. Quanto às razões de anisotropia, foi verificado que as flutuações longitudinais são muito mais intensas nas regiões de produção de vórtices em comparação às flutuações normal e transversal.

As análises feitas das correlações espaciais em pontos fixos mostraram que a diminuição das correlações entre as estruturas turbulentas é muito mais intensa nas regiões próximas aos injetores do que nas regiões mais distantes. Já as correlações espaciais de  $\xi$  fixo são maiores nas regiões mais distantes. Tais aspectos mostram que nas regiões próximas aos injetores, há duas faixas de tamanho de vórtices. Uma faixa pertence aos vórtices do escoamento principal, e a outra pertence aos vórtices produzidos pelas camadas de cisalhamento. A faixa de tamanhos dos vórtices é menor nas esteiras distantes, devido ao fato do escoamento turbulento ser mais homogêneo. As escalas de comprimento do escoamento são menores nas vizinhanças das zonas de recirculação.

Os resultados do PIV, de modo geral, tiveram boa concordância com os do LDV na câmara de combustão. No entanto, observou-se mais divergências entre as técnicas na região principal em relação a região de entrada. As escalas de comprimento e

de tempo são os únicos parâmetros caracterizadores que apresentaram discrepância significativa entre as duas técnicas na região de entrada. Na região principal, os resultados atingem as maiores divergências nas regiões com intenso cisalhamento. Nas regiões distantes dos injetores, em geral, a divergência entre as duas técnicas é menor. Estas diferenças entre as duas técnicas, se deve a limitação da resolução temporal e espacial do PIV que impossibilita a técnica de medir oscilações de velocidade de baixa intensidade.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Seguem algumas sugestões de trabalhos futuros no BEIC que implementarão o estudo da presente investigação:

- Análise do escoamento inerte turbulento usando o PIV *time-resolved*, cuja frequência de amostragem é próxima ou igual ao do LDV, ou outro tipo de PIV;
- Análise do escoamento reativo estável/instável turbulento usando PIV e/ou PLIF;
- Análise de outros parâmetros caracterizadores da turbulência;
- Análises das características do escoamento inerte e reativo com diferentes números de Reynolds e razões de equivalência com PIV;
- Investigação do escoamento inerte ou reativo com outros tipos de injetores;
- Desenvolvimento de modelos físicos e matemáticos usando DFC.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIAN, R. J. Twenty years of particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 39, n. 2, p. 159–169, 2005. 17, 18, 19
- AHMED, S. A.; NEJAD, A. S. Premixed, turbulent combustion of axisymmetric sudden expansion flows. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 13, n. 1, p. 15–21, 1992. 9, 11
- ALLISON, P. M.; CHEN, Y.; IHME, M.; DRISCOLL, J. F. Coupling of flame geometry and combustion instabilities based on kilohertz formaldehyde plif measurements. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, n. 3, p. 3255–3262, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113000732>>. 9, 11
- ATKINSON, C.; COUDERT, S.; FOUCAUT, J.; STANISLAS, M.; SORIA, J. The accuracy of tomographic particle image velocimetry for measurements of a turbulent boundary layer. **Experiments in Fluids**, v. 50, n. 4, p. 1031–1056, 2011. 21
- BAILLOT, F.; LESPINASSE, F. Response of a laminar premixed v-flame to a high-frequency transverse acoustic field. **Combustion and Flame**, v. 161, n. 5, p. 1247–1267, Maio 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010218013004227>>. 7, 12
- BANHAWY, Y. E.; SIVASEGARAM, S.; WHITELOW, J. H. Premixed, turbulent combustion of a sudden-expansion flow. **Combustion and Flame**, v. 50, p. 153–165, 1983. 9, 12
- BARAIYA, N. A.; CHAKRAVARTHY, S. R. Effect of syngas composition on high frequency combustion instability in a non-premixed turbulent combustor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 12, p. 6299–6312, Mar. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919302472>>. 12, 13
- BASLEY, J.; PASTUR, L. R.; LUSSEYRAN, F.; FAURE, T. M.; DELPRAT, N. Experimental investigation of global structures in an incompressible cavity flow using time-resolved piv. **Experiments in Fluids**, v. 50, n. 4, p. 905–918, 2011. 21

BENABED, A. **Contribution à l'étude de la remise en suspension de particules générée par le pas humain au sein d'une ambiance du bâtiment.** Tese (Doutorado) — Université de La Rochelle, 2017. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01804988>>. 48

BENEDICT, L. H.; GOULD, R. D. Towards better uncertainty estimates for turbulence statistics. **Experiments in Fluids**, v. 22, n. 2, p. 129–136, 1996. 50, 51

BERBEE, J. G.; EILZEY, J. L. The effect of aspect ratio on the flow over a rearward-facing step. **Experiments in Fluids**, v. 7, n. 7, p. 447–452, Jul. 1989. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00187062>>. 9, 12

BESSION, M. **Étude expérimental d'une zone de combustion en écoulement turbulent stabilisée en aval d'un élargissement brusque symétrique.** Tese (Doutorado) — l'Université de Poitiers, Poitiers, 2001. 1, 2, 3, 10, 11, 15, 29, 34, 35, 72, 113

BOILLOT, A.; PRASAD, A. K. Optimization procedure for pulse separation in cross-correlation piv. **Experiments in Fluids**, v. 21, n. 2, p. 87–95, 1996. 51

BROWN, G. L.; ROSHKO, A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 64, n. 4, p. 775–816, Julho 1974. 15

BUCHHAVE, P. Particle image velocimetry - status and trends. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 5, n. 5, p. 586–604, 1992. 17

CENEDESE, A.; DOGLIA, G.; ROMANO, G.; MICHELE, G. D.; TANZINI, G. LDA and PIV velocity measurements in free jets. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 9, n. 2, p. 125–134, 1994. ISSN 0894-1777. Special Issue on Measurement in Turbulent Flow. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0894177794901058>>. 113, 142

CORÁ, R. **Controle passivo de instabilidade de combustão utilizando ressonadores de Helmholtz.** Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010. 3

CULICK, F.; YANG, V. Instability phenomenology and case studies: overview of combustion instabilities in liquid-propellant rocket engines. In: YANG, V.;

- ANDERSON, W. E. (Ed.). **Liquid rocket engine combustion instability**. [S.l.]: Progress in Astronautics and Aeronautics, 1995. cap. 1, p. 3–37. 7
- DAVIDSON, P. A. **Turbulence: an introduction for scientists and engineers**. [S.l.]: Oxford University Press, 2004. 23, 27, 28, 29, 32
- DURÃO, D. F. G.; HEITOR, M. V.; PEREIRA, J. C. F. Measurements of turbulent and periodic flows around a square cross-section cylinder. **Experiments in Fluids**, v. 6, n. 5, p. 298–304, Janeiro 1988. 29
- ELIAS, I. Acoustical resonances produced by combustion of a fuel-air mixture in a rectangular duct. **Journal of The Acoustical Society of America**, v. 31, n. 3, p. 296, 1958. Disponível em:  
<<https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1907715>>. 8, 12
- EMERSON, B.; O’CONNOR, J.; JUNIPER, M.; LIEUWEN, T. Density ratio effects on reacting bluff-body flow field characteristics. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 706, p. 219–250, Set. 2012. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/density-ratio-effects-on-reacting-bluffbody-flow-field-characteristics/2C4CDA70352DA00DAC3885E2A7B04738>>. 12, 13
- FRITSCHÉ, D. **Origin and control of thermoacoustic instabilities in lean premixed gas turbine combustion**. Tese (Doutorado) — Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zürich, 2005. 8
- GALATI, C. **Etude numérique et expérimentale de la distribution de fluide dans un échangeur de chaleur compact à plaques**. Tese (Doutorado) — Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2017. 51
- HABIBALLAH, M.; VINGERT, L.; DUTHOIT, V.; VUILLERMOZ, P. Research as a key in the design methodology of liquid-propellant combustion devices. **Journal of Propulsion and Power**, v. 14, n. 5, p. 782, 1998. 7, 8
- HART, D. P. Piv error correction. **Experiments in Fluids**, v. 29, n. 1, p. 13–22, 2000. 51
- HASSEL, E. P.; LINOW, S. Laser diagnostics for studies of turbulent combustion. **Measurement Science and Technology**, v. 11, n. 2, p. R37–R57, 2000. 16
- HEITOR, M. V.; TAYLOR, A. M. K. P.; WHITELOW, J. H. Influence of confinement on combustion instabilities of premixed flames stabilized on

- axisymmetric baffles. **Combustion and Flame**, v. 57, n. 1, p. 109–121, Julho 1984. 8
- HINZE, J. O. **Turbulence**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1975. 23, 26, 28, 30, 31, 32, 34
- HUAND, H.; DABIRI, D.; GRARIB, M. On errors of digital particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, v. 8, n. 12, p. 1427–1440, 1997. 51
- HUANG, Y.; YANG, V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 4, p. 293–264, 2009. 8
- HYUN, B. S.; BALACHANDAR, R.; YU, K.; PATEL, V. C. Assessment of piv to measure mean velocity and turbulence in open-channel flow. **Experiments in Fluids**, v. 35, n. 3, p. 262–267, Set. 2003. 113
- KIM, M.; YOON, J.; PARK, S.; LEE, M.; YOON, Y. Effects of unstable flame structure and recirculation zones in a swirl-stabilized dump combustor. **Applied Thermal Engineering**, v. 58, n. 1-2, p. 125–135, Set. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113002895>>. 9, 11, 14
- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid mechanics**. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2008. 59, 113
- LAVISION. **DaVis 7.2 Software**. Germany, 2007. 47
- \_\_\_\_\_. **FlowMaster**. Germany, 2007. 17, 19, 21, 46
- LUBARSKY, E.; SHCHERBIK, D.; BIBIK, A.; ZINN, B. Open loop control of severe combustion instabilities by fuel flow modulation at non resonant frequencies. In: AIAA AEROSPACE SCIENCE MEETING AND EXHIBIT, 42., 2004. **Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**. Reno, NV, USA, 2004. 9
- MCKENDRICK, D. **Physical modelling of turbulent single- and multi-phase, impinging jets using particle image velocimetry**. Tese (Doutorado) — The University of Leeds, Leeds, 2015. 49



MCMANUS, K.; VANDSBURGER, U.; BOWMAN, C. Combustion performance enhancement through direct shear layer excitation. **Combustion and Flame**, v. 82, n. 1, p. 75–92, 1990. 2, 9, 10, 12, 14

MEADOWS, J.; AGRAWAL, A. K. Time-resolved particle image velocimetry measurements of nonreacting flow field in a swirl-stabilized combustor without and with porous inserts for acoustic control. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 137, n. 4, Out. 2014. 8, 11

\_\_\_\_\_. Time-resolved piv of lean premixed combustion without and with porous inert media for acoustic control. **Combustion and Flame**, v. 162, n. 4, p. 1063–1077, Abril 2015. 1, 8, 9, 11

MICHELIS, T. **Boundary layer separation: diagnostics and control**. Dissertação (Master of Science in Aerospace Engineering) — Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2017. 50

NAGARAJAN, B.; BARAIYA, N. A.; CHAKRAVARTHY, S. R. Effect of inlet flow turbulence on the combustion instability in a premixed backward-facing step combustor. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 37, n. 4, p. 5189 – 5196, 2019. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748918303262>>. 12, 13

NAJJARI, M. R.; MONTAZERIN, N.; AKBARI, G. Statistical piv data validity for enhancement of velocity driven parameters in turbomachinery jet-wake flow. **Combustion and Flame**, v. 82, n. 1, p. 75–92, 1990. 21

NAKAGAWA, S.; HANRATTY, T. J. Particle image velocimetry measurements of flow over a wavy wall. **Physics of Fluids**, v. 13, n. 11, p. 3504–3507, Jul. 2001. 142

NEZU, I.; NAKAYAMA, T. Space-time correlation structures of horizontal coherent vortices in compound open-channel flows by using particle-tracking velocimetry. **Journal of Hydraulic Research**, v. 35, n. 2, p. 191–208, 1997. 113, 142

O’CONNOR, J.; ACHARYA, V.; LIEUWEN, T. Transverse combustion instabilities: acoustic, fluid mechanic, and flame processes. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 49, p. 1 – 39, 2015. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128515000027>>. 1, 13

O'CONNOR, J.; LIEUWEN, T. Disturbance field characteristics of a transversely excited burner. **Combustion Science and Technology**, v. 183, n. 5, p. 427–443, Fevereiro 2011. ISSN 0010-2202. 9, 12

POPE, S. B. **Turbulent flows**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. 26, 28, 29, 30, 32, 34, 35, 36, 37

PRASAD. Particle image velocimetry. **Current Science**, v. 79, n. 1, p. 51–60, 2000. 16, 21, 52

RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; WERELEY, S. T.; J., K. **Particle image velocimetry : a practical guide**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2007. 50, 51

RICHECOEUR, F.; DUCRUIX, S.; SCOUFLAIRE, P.; CANDEL, S. Experimental investigation of high-frequency combustion instabilities in liquid rocket engine. **Acta Astronautica**, v. 62, n. 1, p. 18 – 27, 2008. ISSN 0094-5765. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576507001348>>. 1, 8, 11

ROMANO, G. P. PIV and LDV velocity measurement near walls and in the wake of a delta wing. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 16, n. 4–5, p. 293–309, 1992. 258

SAMPATH, R.; CHAKRAVARTHY, S. R. Investigation of intermittent oscillations in a premixed dump combustor using time-resolved particle image velocimetry. **Combustion and Flame**, v. 172, p. 309 – 325, 2016. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218016301468>>. 12, 13

SANQUER, S. **Etude expérimentale du sillage d'un obstacle, en présence de combustion, dans un écoulement de canal turbulent pleinement développé : échelles de la turbulence et analyse critique des modèles de transport et de combustion**. Tese (Doctorat en Énergétique) — Université de Poitiers, Poitiers, 1998. 2, 3, 10, 11, 14, 15, 29, 35, 58, 72, 113, 158, 164

SCHADOW, K.; GUTMARK, E. Combustion instability related to vortex shedding in dump combustors and their passive control. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 18, n. 2, p. 117–132, 1992. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128592900202>>. 1, 14, 15, 16

SEQUERA, D.; AGRAWAL, A. K. Passive control of noise and instability in a swirl-stabilized combustor with the use of high-strength porous insert. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 134, n. 5, Março 2012. 7

SPIEGEL, M. R.; STEPHENS, L. J. **Statistics**. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018. 27

TAYLOR, J. R. **An introduction to error analysis - the study of uncertainties in physical measurements**. 2. ed. Sausalito, California: University Science Books, 1997. 49

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge, Massachusetts, and London, England: The Massachusetts Institute of Technology, 1972. 22, 33, 34, 37

TOWNSEND, A. A. **The structure of turbulent shear flow**. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1976. 27, 28, 29, 178, 189

TREVISAN, B. P. **Um estudo experimental da interação turbulência, combustão e acústica**. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, 2018. xiii, xiv, xv, xvi, xvii, xviii, xix, xx, xxi, xxii, xxvii, xxviii, xxix, xxxi, 3, 5, 42, 44, 45, 57, 58, 60, 61, 66, 74, 76, 77, 79, 82, 96, 99, 101, 104, 106, 107, 111, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 123, 128, 130, 143, 145, 151, 156, 157, 160, 164, 166, 168, 170, 248, 250, 259, 261, 267, 269, 270, 271, 272

WESTERGAARD, C. H. **PIV measurements of turbulent structures**. Tese (PhD in Physics) — The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1994. 48

WESTERWEEL, J.; ELSINGA, G.; ADRIAN, R. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 45, n. 1, p. 409–436, 2013. 19, 21, 22

WORTH, N. A.; DAWSON, J. R. Self-excited circumferential instabilities in a model annular gas turbine combustor: Global flame dynamics. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, n. 2, p. 3127 – 3134, 2013. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748912000624>>. 11, 13

ZINN, B. T.; NEUMEIER, Y. An overview of active control of combustion instabilities. In: AIAA AEROSPACE SCIENCE MEETING AND EXHIBIT, 35.,

1997. **Proceedings of the 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.**  
Reno, NV, USA: AIAA Meeting Paper on Disc, 1997. 8

## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.