

Higor Fabiano Pereira de Castro

**AVALIAÇÃO TERMO-HIDRÁULICA
EXPERIMENTAL DE GRADES
ESPAÇADORAS COMERCIAIS PARA
REATORES *PWR* E DE PROTÓTIPO
FABRICADO POR IMPRESSORA *3D***

Brasil

Agosto de 2020

Higor Fabiano Pereira de Castro

**AVALIAÇÃO TERMO-HIDRÁULICA EXPERIMENTAL
DE GRADES ESPAÇADORAS COMERCIAIS PARA
REATORES *PWR* E DE PROTÓTIPO FABRICADO
POR IMPRESSORA *3D***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

Orientadora: Maria Auxiliadora Fortini Veloso
Coorientador: André Augusto Campagnole dos Santos

Brasil
Agosto de 2020

C355a	<p>Castro, Higor Fabiano Pereira de. Avaliação termo-hidráulica experimental de grades espaçadoras comerciais para reatores PWR e de protótipo fabricado por impressora 3D [recurso eletrônico] / Higor Fabiano Pereira de Castro. – 2020. 1 recurso online (198 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Maria Auxiliadora Fortini Veloso. Coorientador: André Augusto Campagnole dos Santos.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 182-198.</p> <p>Bibliografia: f. 176-180. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Reatores de água pressurizada - Teses. 3. Dinâmica dos fluidos computacional - Teses. I. Veloso, Maria Auxiliadora Fortini. II. Santos, André Augusto Campagnole dos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.039(043)</p>
-------	---



FOLHA DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO TERMO-HIDRÁULICA EXPERIMENTAL DE GRADES
ESPAÇADORAS COMERCIAIS PARA REATORES PWR E DE PROTÓTIPO
FABRICADO POR IMPRESSORA 3D**

HIGOR FABIANO PEREIRA DE CASTRO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 04 de setembro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Maria Auxiliadora Fortini Veloso

Profa. Maria Auxiliadora Fortini Veloso - Orientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Santos

Dr. André Augusto Campagnole dos Santos - Coorientador
CDTN/CNEN

Antonella Lombardi Costa

Profa. Antonella Lombardi Costa
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Carlos Eduardo Velasquez Cabrera

Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

GPBarros
PDra. Graiciany de Paula Barros
CNEN/CDTN

mf

Prof. Sérgio de Moraes Harriot
PUC- Minas

Marcio Araujo Pessoa
Dr. Márcio Araújo Pessoa
CDTN/CNEN

Belo Horizonte, 4 de setembro de 2020.

aos meus pais Heli e Natalina e à minha esposa Daniela

Agradecimentos

Muitas mãos foram necessárias para que esta produção acadêmica fosse concluída.

Agradecimentos especiais são direcionados aos meus orientadores e amigos: Maria Auxiliadora e André Campagnole. Embora pareça clichê, não poderia deixar de dizer que faltam palavras para descrever o quanto sou grato pela orientação e amizade construídas ao longo dessa trajetória.

Agradeço aos professores e funcionários do DEN/UFMG por todo conhecimento compartilhado em especial à Aline Silva e Thales Santos pela dedicação e profissionalismo ao resolver questões importantes recorrentes.

Agradeço aos servidores do SETRE/CDTN em especial ao Edson Ribeiro pela dedicação e auxílio nas montagens das seções de testes e na fabricação da famigerada grade impressa.

Ao Antônio Carlos Lopes por toda assistência prestada à solução dos problemas relativos ao funcionamento da bomba hidráulica e do *Chiller*.

Ao José Augusto Ribeiro pela assistência técnica prestada ao equipamento de *LDV* num momento crucial.

Ao Marlúcio Antônio pela ajuda com a usinagem das varetas utilizadas em uma das seções de testes.

Agradeço aos meus amigos do laboratório de termo-hidráulica e neutrônica do CDTN especialmente ao Tiago Vieira, Guilherme Vidal, Marcos Barroso, Márcio Pessoa, Eduardo Salomão, Gabriel Caio, Wallen Ferreira, Rebeca Cabral e Ester Fiorillo por toda ajuda na montagem da seção de testes, realização dos testes e auxílio com as análises dos resultados obtidos. Ao Daniel Campolina, Graiciany Barros e Vitor Vasconcelos por toda dedicação e experiência compartilhada que levarei comigo por toda a vida.

Aos preciosos comentários e sugestões gentilmente tecidos pelos membros da banca de defesa em especial à Antonella Lombardi, Carlos Cabrera, Graiciany Barros, Márcio Pessoa e Sérgio Hanriot.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos, pois sem ela não teria sido possível me dedicar nesse projeto.

À INB, em especial ao Diego Alvim que prestou assistência na usinagem de peças fundamentais para a montagem de uma das seções de testes.

À FAPEMIG, CNPq e FINEP pelo subsídio financeiro que tornou possível a conclusão desse projeto.

Agradeço à minha família e esposa que são o alicerce da minha vida e por todo apoio que sempre me deram.

Peço desculpas caso eu tenha esquecido alguém, pois ao longo desses quatro anos e meio, foram muitas pessoas envolvidas e que tornaram possível a realização desse trabalho.

Enfim, parafraseando Carl Sagan: **"Diante da vastidão do tempo e da imensidão do Universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com vocês."**

*“Caminhante no hay caminho,
se hace caminho al andar.”*
(Trecho do Poema “Cantares” de Antonio Machado.)

Resumo

As grades espaçadoras são importantes componentes presentes em elementos combustíveis de reatores nucleares à água pressurizada, *PWR – Pressurized Water Reactor*. Essas grades são responsáveis por manter a integridade estrutural do elemento combustível e contribuem com a melhoria da eficiência termo-hidráulica do reator. Com o objetivo de desenvolver uma grade espaçadora nacional de alta eficiência, estudos com grades espaçadoras comerciais e protótipos fabricados em impressora *3D* têm sido realizados no Laboratório de Termo-Hidráulica e Neutrônica – LTHN do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN. Neste trabalho foi avaliado o desempenho termo-hidráulico de três grades espaçadoras, sendo dois tipos comerciais (aletadas e de canais) e de uma grade impressa do tipo de canais. As grades foram testadas em elementos combustíveis nucleares representativos de modelos comerciais distintos, porém constituídos por arranjos quadrados de 5x5 varetas. Parâmetros de turbulência foram determinados a partir de velocidades medidas a jusante das grades espaçadoras por meio da técnica de velocimetria laser *Doppler (LDV – Laser Doppler Velocimetry)*. Para a grade aletada foram avaliadas cinco condições de escoamento para Reynolds (Re) na faixa de 18×10^3 a 54×10^3 . Os resultados mostraram diferenças significativas no comportamento do escoamento para essa faixa de Re . Os testes de comparação entre as três grades foram feitos para $Re = 27 \times 10^3$. Os resultados de comparação entre as grades mostraram que sob o ponto de vista termo-hidráulico, a grade espaçadora aletada é superior à grade comercial de canais e também com relação à grade impressa avaliada. Entretanto a partir dos resultados obtidos para a grade espaçadora impressa comprovou-se a viabilidade do uso da técnica de prototipagem no desenvolvimento de novos elementos combustíveis nucleares. Foi criado e disponibilizado um banco de dados experimental da grade impressa que poderá ser utilizado como dados de entrada em códigos de simulação numérica e análise termo-hidráulica de subcanais e para validar simulações de fluidodinâmica computacional (*CFD – Computational Fluid Dynamic*).

Palavras-chave: Grades Espaçadoras. Reatores *PWR*. Termo-Hidráulica Experimental. *LDV*. *CFD*.

Abstract

Spacer grids are important components in nuclear fuel assemblies of Pressurized Water Reactors – PWR. These grids are responsible for maintaining the structural integrity of the fuel assemblies and contribute to enhance the thermo-hydraulic efficiency of the reactor. In order to develop a high-efficiency national spacer grid, studies with commercial spacer grids and prototypes manufactured using a 3D printer have been carried out at the Thermo-Hydraulic and Neutronic Laboratory (LTHN) of the Nuclear Technology Development Center - CDTN. Thermo-hydraulic performance of three spacer grids was evaluated in this work: Two types of commercial (mixing vanes and channels) and one printed grid (channels). Spacer grids were tested in different representative nuclear fuel assemblies with a 5x5 square rod bundle. Turbulence parameters were determined from velocities measured downstream of the spacer grids using the Laser Doppler Velocimetry – LDV. For the mixing vanes spacer grid, five flow conditions were evaluated by Reynolds in range of 18×10^3 to 54×10^3 . The comparison tests between these three spacer grids were made for $Re = 27 \times 10^3$. Results showed significant differences in flow behavior for the Re range selected. The comparison results between spacer grids showed that the mixing vane spacer grid is superior to subchannel type and printed grid based on the thermo-hydraulic performance. From the results obtained from the printed spacer grid it was possible to demonstrate the viability of 3D printed prototypes for assessment and development of nuclear fuel assemblies. An experimental benchmark data base was generated for a printed spacer grid and the obtained data can be used as input data in numerical simulation codes and sub-channel thermo-hydraulic analysis and can also be used to validate computational fluid dynamics (CFD) simulations.

Keywords: Spacer Grids. PWR reactors. Experimental Thermo-Hydraulic. LDV. CFD.

Lista de figuras

Figura 1.1 – Reatores de Potência no Mundo	28
Figura 2.1 – <i>PWR</i> típico	32
Figura 2.2 – O elemento combustível nuclear de um reator <i>PWR</i>	33
Figura 2.3 – Mistura cruzada e por rotação provocado pelas grades espaçadoras.	35
Figura 2.4 – Grades espaçadoras com aletas (A) e sem aletas (B).	36
Figura 2.5 – Elementos presentes nas grades aletadas e de canais.	37
Figura 3.1 – Laboratório de Termo-Hidráulica e Neutrônica do Serviço de Tecnologia de Reatores do CDTN.	45
Figura 3.2 – Estrutura contendo o circuito hidráulico utilizado no LTHN.	46
Figura 3.3 – Circuito hidráulico	46
Figura 3.4 – Montagem da Seção de Testes 2.	48
Figura 3.5 – Peças impressas utilizadas na ST2.	49
Figura 3.6 – Detalhe do projeto da caixa superior.	49
Figura 3.7 – Principais dimensões das seções de testes.	50
Figura 3.8 – Grade Impressa Testada.	52
Figura 3.9 – Detalhes de estruturas da grade impressa observadas através de um projetor de perfil.	53
Figura 3.10–Mapeamento dos elementos da grade impressa nas proximidades da região de medição.	54
Figura 3.11–Grade 2x2 fabricada com o uso da técnica do molde.	55
Figura 3.12–Principais dimensões da placa de orifício utilizada.	56
Figura 3.13–Tela de monitoramento dos principais parâmetros do escoamento.	57
Figura 3.14–Dimensões do volume de medição	58
Figura 3.15–Refração dos feixes laser do <i>LDV</i>	60
Figura 3.16–Relação entre a temperatura da água e a posição do volume de medição.	62
Figura 3.17–Posicionamento da sonda <i>LDV-2D</i> em relação à seção de testes.	63
Figura 3.18–Montagem de um relógio comparador acoplado na mesa-xyz.	65
Figura 3.19–Deslocamento do relógio comparador ao longo da seção de testes.	66
Figura 3.20–Verificação do alinhamento entre o feixe de vareta e a grade espaçadora.	67
Figura 3.21–Esquema que representa a posição onde $z = 0$	68
Figura 3.22–Representação do encontro dos feixes do <i>LDV</i> com a parede de acrílico.	69
Figura 3.23–Esquema para representar o centro do subcanal.	70
Figura 3.24–Esquema para representar o centro do subcanal.	70
Figura 3.25–Limites inferiores e superiores nas regiões de medição.	71
Figura 3.26–Detalhe do posicionamento do <i>LDV</i> pelo topo das ST1 e ST2	72
Figura 3.27–Representação da determinação da coordenada $(0, y)$	73

Figura 3.28–Representação da determinação da coordenada $(x, 0)$	73
Figura 3.29–Aparato construído para deslocar as grades espaçadoras	74
Figura 3.30–Esquema das regiões de medição pelo topo das seções de testes ST1 e ST2	76
Figura 3.31–Matriz experimental detalhada	76
Figura 3.32–Histogramas obtidos de um dos testes com boa qualidade de sinal	77
Figura 3.33–Histogramas obtidos de um dos testes com má qualidade de sinal	78
Figura 3.34–Detalhe das posições para medição da perda de pressão na seção de testes.	81
Figura 3.35–Procedimento para medição da vorticidade.	84
Figura 3.36–Diagrama de causa e efeito para as principais fontes de incertezas dos perfis de velocidade.	85
Figura 3.37–Possíveis desalinhamentos entre os eixos	87
Figura 3.38–Rotações que foram realizadas em torno dos eixos z , x' e y'	87
Figura 3.39–Diagrama de causa e efeito para as principais fontes de incertezas da velocidade média do escoamento.	89
Figura 3.40–Diagrama de causa e efeito para as principais fontes de incertezas da velocidade média do escoamento.	90
Figura 3.41–Exemplo da representação da incerteza expandida normalizada através de áreas entre as curvas	93
Figura 3.42–Exemplo da representação da incerteza expandida normalizada através do mapa de calor	93
Figura 4.1 – Distribuição de amostragem na altura de $1, 22Dh$ a jusante da grade aletada.	95
Figura 4.2 – Distribuição de amostragem na altura de $2, 44Dh$ a jusante da grade aletada.	96
Figura 4.3 – Distribuição de amostragem na altura de $7, 33Dh$ a jusante da grade aletada.	96
Figura 4.4 – Influência das componentes de incertezas relacionadas com a metade do ângulo de encontro dos feixes $u(\theta)$ e frequência Doppler $u(f_D)$	100
Figura 4.5 – Influência das componentes de incertezas padrão $u(\sigma(V_i))$ e desalinhamento dos eixos $u(Des)$	100
Figura 4.6 – Testes de repetitividade para $Re = 18 \times 10^3$ e $1, 22Dh$ a jusante da grade espaçadora	101
Figura 4.7 – Testes de repetitividade para $Re = 54 \times 10^3$ e $1, 22Dh$ a jusante da grade espaçadora.	102
Figura 4.8 – Histogramas obtidos na posição normalizada $(0p, -0.5p)$, do primeiro teste para $Re = 27 \times 10^3$ na altura de $1, 22Dh$ a jusante da grade presente na ST1.	103
Figura 4.9 – Perfil de velocidade (u) normalizado pela velocidade média do escoamento ($\langle \bar{w} \rangle$) para as três alturas a jusante da grade espaçadora ao longo do eixo $y/p = 0$	104

Figura 4.10–Perfil de velocidade (v) normalizado pela velocidade média do escoamento ($\langle \bar{w} \rangle$) para três alturas a jusante da grade espaçadora ao longo do eixo $y/p = 0$	104
Figura 4.11–Detalhes das estruturas presentes nas medidas de campo completo obtidas para $z/p = 1, 22$ a jusante da grade aletada.	106
Figura 4.12–Campo vetorial de velocidades para $Re = 18 \times 10^3$	107
Figura 4.13–Campo vetorial de velocidades para $Re = 27 \times 10^3$	108
Figura 4.14–Campo vetorial de velocidades para $Re = 36 \times 10^3$	109
Figura 4.15–Campo vetorial de velocidades para $Re = 54 \times 10^3$	110
Figura 4.16–Campo vetorial de velocidades para $z/Dh = 1, 22$	112
Figura 4.17–Campo vetorial de velocidades para $z/Dh = 2, 44$	113
Figura 4.18–Campo vetorial de velocidades para $z/Dh = 7, 33$	114
Figura 4.19–Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 1, 22$	115
Figura 4.20–Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 2, 44$	116
Figura 4.21–Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/DH = 7, 33$	116
Figura 4.22–Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 1, 22$	117
Figura 4.23–Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 2, 44$	118
Figura 4.24–Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 7, 33$	118
Figura 4.25–Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada ao longo do eixo $y/p = 0$	119
Figura 4.26–Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante de uma grade aletada ao longo do eixo $y/p = 0$	120
Figura 4.27–Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada ao longo do eixo $y/p = 0$	120
Figura 4.28–Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 18 \times 10^3$	122
Figura 4.29–Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 54 \times 10^3$	123
Figura 4.30–Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 18 \times 10^3$	124
Figura 4.31–Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 54 \times 10^3$	125
Figura 4.32–Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 18 \times 10^3$	126

Figura 4.33–Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 54x10^3$	127
Figura 4.34–Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 18x10^3$	129
Figura 4.35–Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 27x10^3$	130
Figura 4.36–Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 36x10^3$	131
Figura 4.37–Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 54x10^3$	132
Figura 4.38–Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST1 para a altura de $1,22Dh$	133
Figura 4.39–Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST1 para a altura de $2,44Dh$	134
Figura 4.40–Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST1 para a altura de $7,33Dh$	134
Figura 4.41–Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST2 para 4 alturas a jusante da grade espaçadora comercial do tipo canais.	135
Figura 4.42–Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{u} e \bar{v} obtidas pelo topo da ST1 para três alturas a jusante da grade comercial aletada.	136
Figura 4.43–Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{u} e \bar{v} obtidas pelo topo da ST2 para três alturas a jusante da grade comercial de canais.	137
Figura 4.44–Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{u} e \bar{v} obtidas pelo topo da ST2 para três alturas a jusante da grade impressa.	138
Figura 4.45–Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 1.	139
Figura 4.46–Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 2.	140
Figura 4.47–Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 3.	140
Figura 4.48–Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{v} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 1.	141
Figura 4.49–Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{v} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 2.	142
Figura 4.50–Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 3.	142

Figura 4.51–Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas para 3 alturas a montante e 1 a jusante da ST2.	143
Figura 4.52–Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{v} obtidas para 3 alturas a montante e 1 a jusante da ST2.	144
Figura 4.53–Tensor normal de Reynolds ($u'u'$) normalizado pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para alturas a jusante das três grades espaçadoras ao longo do eixo $y/p = 0$, para $Re = 27x10^3$	145
Figura 4.54–Tensor normal de Reynolds ($v'v'$) normalizado pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para alturas a jusante das três grades espaçadoras ao longo do eixo $y/p = 0$, para $Re = 27x10^3$	145
Figura 4.55–Tensor cisalhante de Reynolds ($u'v'$) normalizado pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para alturas a jusante das três grades espaçadoras ao longo do eixo $y/p = 0$, para $Re = 27x10^3$	146
Figura 4.56–Detalhe do Campo de velocidades obtido à 1, $22Dh$ a jusante da grade comercial de canais.	147
Figura 4.57–Detalhe do Campo de velocidades obtido à 1, $22Dh$ a jusante da grade impressa.	148
Figura 4.58–Detalhes da geometria da grade impressa e os efeitos causados no escoamento na região mais próxima da grade.	149
Figura 4.59–Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas à 1, $22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	150
Figura 4.60–Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas à 2, $44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	151
Figura 4.61–Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas à 7, $33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	152
Figura 4.62–Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas à 18, $73Dh$ a jusante das grades espaçadoras de canais e impressa.	153
Figura 4.63– \overline{SF} obtido a jusante das três grades avaliadas	154
Figura 4.64–RMS das componentes de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) das três grades avaliadas.	155
Figura 4.65–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à 1, $22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	157
Figura 4.66–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à 2, $44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	158
Figura 4.67–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à 7, $33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	159
Figura 4.68–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à 18, $73Dh$ a jusante das grades espaçadoras de canais e impressa.	160
Figura 4.69–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à 1, $22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	161

Figura 4.70–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à 2, $44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	162
Figura 4.71–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à 7, $33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	163
Figura 4.72–Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à 18, $73Dh$ a jusante das grades espaçadoras de canais e impressa.	164
Figura 4.73–Intensidade de Turbulência I obtida a jusante das três grades avaliadas	165
Figura 4.74–Energia Cinética de Turbulência k obtida a jusante das três grades avaliadas	166
Figura 4.75–Energia Cinética de Turbulência k obtida à 1, $22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	167
Figura 4.76–Energia Cinética de Turbulência k obtida à 2, $44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	168
Figura 4.77–Energia Cinética de Turbulência k obtida à 7, $33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.	169
Figura 4.78–Comparação do coeficiente de perda de pressão médio \bar{K} obtido para as três grades espaçadoras testadas.	170
Figura A.1 –Desenho da grade impressa utilizado antes da fabricação.	183
Figura A.2 –Desenho da grade impressa contendo detalhes da região de medição após fabricação.	184
Figura C.1 –Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 27x10^3$	193
Figura C.2 –Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 36x10^3$	194
Figura C.3 –Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 27x10^3$	195
Figura C.4 –Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 36x10^3$	196
Figura C.5 –Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 27x10^3$	197
Figura C.6 –Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 36x10^3$	198

Lista de quadros

Quadro 1 – Dados dos Reatores Nucleares: Angra 1 e 2.	34
Quadro 2 – Configurações ópticas e propriedades geométricas do volume de medição projetado no ar.	59
Quadro 3 – Configurações ópticas e propriedades geométricas do volume de medição na água para $\lambda = 532nm$	60
Quadro 4 – Configurações ópticas e propriedades geométricas do volume de medição na água para $\lambda = 561 nm$	60

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Principais trabalhos que avaliaram seções de testes com múltiplos Re .	43
Tabela 3.1 – Dados das seções de testes	50
Tabela 3.2 – Dados da medida dos elementos localizados no topo da grade impressa e indicados na Fig. 3.10	54
Tabela 3.3 – Dados da medida das espessuras das regiões da grade impressa indicadas na Fig. 3.10.	55
Tabela 3.4 – Transmissores diferenciais de pressão	56
Tabela 3.5 – Parâmetros para o cálculo de C	61
Tabela 3.6 – Ângulos associados ao procedimento de alinhamento da mesa-xyz com a seção de testes	67
Tabela 3.7 – Parâmetros do LDV para obtenção dos perfis de velocidade pela lateral da seção de testes.	79
Tabela 3.8 – Parâmetros do LDV para obtenção dos perfis de velocidade pelo topo da seção de testes	79
Tabela 4.1 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{u} e \bar{v} através do topo da ST1.	94
Tabela 4.2 – Síntese da incerteza expandida normalizada de todos os parâmetros avaliados para as alturas ao longo da posição $y/p = 0$	97
Tabela 4.3 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{w} e \bar{v} através da lateral da ST2.	98
Tabela 4.4 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{u} e \bar{v} através do topo da ST2.	98
Tabela 4.5 – Síntese da incerteza expandida normalizada dos principais parâmetros avaliados para as alturas ao longo da posição $y/p = 0$ para a ST2 com a grade comercial do tipo canais.	98
Tabela 4.6 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{u} e \bar{v} através do topo da ST2 com a presença da grade impressa.	99
Tabela 4.7 – Síntese da incerteza expandida normalizada de todos os parâmetros avaliados para as alturas ao longo da posição $y/p = 0$ para a ST2 com a grade impressa.	99
Tabela 4.8 – Porcentagem de pontos cuja incerteza é menor ($\Delta\bar{V} - \bar{U}$).	119
Tabela B.1 – Resultados para a altura de $z = 1,22Dh$ a jusante da grade impressa apresentados na Fig. 4.44.	185
Tabela B.2 – Resultados para a altura de $z = 2,44Dh$ a jusante da grade impressa apresentados na Fig. 4.44.	187

Tabela B.3—Resultados para a altura de $z = 7,33Dh$ a jusante da grade impressa apresentados na Fig. 4.44.	189
---	-----

Lista de abreviaturas e siglas

<i>BWR</i>	<i>Boiling Water Reactor</i> - Reator a Água Fervente
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i> – Fluidodinâmica Computacional
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
<i>CHF</i>	<i>Critical Heat Flux</i> - Fluxo de Calor Crítico
ECN	Elemento Combustível Nuclear
<i>FDM</i>	<i>Fused Deposition Modeling</i> - Modelagem por Fusão e Deposição
<i>HIPS</i>	<i>High Impact Polystyrene</i> - Poliestireno de Alto Impacto
<i>HWA</i>	<i>Hot Wire Anemometer</i> - Anemômetro de Fio Quente
<i>IAEA</i>	<i>International Atomic Energy Agency</i> - Agência Internacional de Energia Atômica
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
<i>LDV</i>	<i>Laser Doppler Velocimetry</i> – Velocimetria por Laser Doppler
LTHN	Laboratório de Termo-hidráulica e Neutrônica
<i>LES</i>	<i>Large Eddy Simulations</i> - Simulações das Grandes Escalas da Turbulência
<i>LIF</i>	<i>Laser Induced Fluorescence</i> - Fluorescência Induzida por Laser
<i>MIR</i>	<i>Matched Index of Refraction</i> - Índice de Refração Combinado
<i>PIV</i>	<i>Particle Image Velocimetry</i> - Velocimetria por Imagens de Partículas
<i>PLA</i>	<i>Polylactic Acid</i> - Ácido Poliático
<i>PTV</i>	<i>Particle Tracking Velocimetry</i> - Velocimetria por Rastreamento de Partículas
<i>PVA</i>	<i>Polyvinyl Alcohol</i> - Poliacetato de Vinila
<i>PWR</i>	<i>Pressurized Water Reactor</i> – Reator de Água Pressurizada
<i>RANS</i>	<i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i> - Navier Stokes Mediado por Reynolds

ST Seção de Testes

WMS *Wire Mesh Sensor* - Sensor de Malha de Eletrodos

Lista de símbolos

D	Diâmetro da tubulação da placa de orifício	m
D_h	Diâmetro hidráulico	m
$D_L/2$	Raio da cintura do feixe	m
D_L	Espessura do feixe de laser	m
\overline{DH}	Diâmetro hidráulico médio	m
DP_o	Perda de pressão na placa de orifício	Pa
d_i	Diâmetro interno do orifício da placa de orifício	m
d_e	Diâmetro externo do orifício da placa de orifício	m
E	Fator de expansão do feixe de laser	-
E	Espessura da placa de orifício	m
F	Distância focal das lentes	m
f_D	Frequência Doppler	s^{-1}
I_w	Intensidade de turbulência axial média	-
K	Coefficiente de perda de pressão	-
k	Energia cinética de turbulência	m^2/s^2
k	Fator de abrangência	-
N	Número de franjas	-
N	Número de observações ou testes realizados	-
p	Passo entre varetas	m
P_{st}	Pressão na entrada da seção de testes	Pa
Re	Número de Reynolds	-
$R_z(\psi)$	Matriz rotação	-
$R_z(\theta)$	Matriz rotação	-
$R_z(\phi)$	Matriz rotação	-

\overline{SF}	Escoamento secundário médio	-
$S(\overline{V}_i)$	Desvio padrão amostral do perfil de velocidade médio V_i	m/s
T_{st}	Temperatura na região de entrada da seção de testes	K
T_o	Temperatura na região de placa de orifício	K
u	Componente de velocidade lateral paralelo ao eixo-x	m/s
\bar{u}	Componente de velocidade lateral médio paralelo ao eixo-x	m/s
u'	Flutuação da componente de velocidade u	m/s
u'^2	Tensor de Reynolds	m^2/s^2
$u'u'$	Tensor de Reynolds	m^2/s^2
u_c	Incerteza combinada	m/s
$u_c(V_i)$	Incerteza combinada da componente de velocidade i	m/s
$u(\lambda)$	Incerteza do comprimento de onda gerado pelo laser	m
$u(\text{sen}(\theta/2))$	Incerteza da metade do ângulo de encontro dos feixes do laser	$^\circ$
$u(f_D)$	Incerteza relacionada com a frequência Doppler	Hz
$u(D)$	Incerteza do diâmetro da lente	m
u_{des}	Incerteza relacionada com o desalinhamento entre os eixos	m/s
$u(F)$	Incerteza da distância focal da lente	m
$u(dz)$	Comprimento do volume de medição	m
$u(\sigma)$	Incerteza padrão	m/s
$u(cal)$	Incerteza de calibração	m/s
$u_\sigma(\overline{V}_i)$	Incerteza padrão amostral do perfil de velocidade médio V_i	m/s
$u(\bar{u})$	Incerteza da velocidade média	m/s
$u(u(t))$	Incerteza da velocidade instantânea	m/s
$U_N(u'u')$	Incerteza expandida normalizada dos tensores de Reynolds	-
$U_N(v'v')$	Incerteza expandida normalizada dos tensores de Reynolds	-
$U_N(u'v')$	Incerteza expandida normalizada dos tensores de Reynolds	-

$U(SF)$	Incerteza expandida do escoamento secundário médio	-
$U(Z)$	Incerteza expandida da posição	m
$u'v'$	Tensor de Reynolds	m^2/s^2
V_i	Componente de velocidade i	m/s
\vec{V}	vetor velocidade resultante	m/s
v	Componente de velocidade lateral paralelo ao eixo-y	m/s
\bar{v}	Componente de velocidade lateral médio paralelo ao eixo-y	m/s
v'	Flutuação da componente de velocidade v	m/s
$v'v'$	Tensor de Reynolds	m^2/s^2
v'^2	Tensor de Reynolds	m^2/s^2
w	Componente de velocidade axial paralelo ao eixo-z	m/s
\bar{w}	Componente de velocidade axial médio paralelo ao eixo-z	m/s
w'	Flutuação da componente de velocidade w	m/s
$\langle \bar{w} \rangle$	Velocidade média do escoamento	m/s
w'^2	Tensor de Reynolds	m^2/s^2
α	Incerteza combinada do ângulo de desalinhamento	$^\circ$
Δx	Variação da posição do volume de medição	m
ΔP	Perda de pressão	Pa
δx	Diâmetro do volume de medição em x	m
δy	Diâmetro do volume de medição em y	m
δz	Comprimento do volume de medição em z	m
δf	Espaçamento entre as franjas de interferência	m
λ	Comprimento de onda do laser	m
$\bar{\mu}$	Viscosidade dinâmica da água	$Pa.s$
ρ	Massa específica	kg/m^3
θ	Ângulo de encontro dos feixes	$^\circ$

θ_1	Ângulo de desalinhamento	$^{\circ}$
θ_2	Ângulo de desalinhamento	$^{\circ}$
$\theta_{m\u00e9dio}$	Ângulo de desalinhamento	$^{\circ}$
ω_z	vorticidade	s^{-1}

Sumário

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	Contextualização	28
1.2	Objetivos	30
1.3	Justificativa	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1	Reatores Nucleares a Água Pressurizada (<i>PWR</i>)	32
2.2	Elementos Combustíveis Nucleares	33
2.3	Grades Espaçadoras	34
2.4	Estado da arte	37
3	METODOLOGIA	44
3.1	Descrição geral do experimento	45
3.1.1	O circuito hidráulico utilizado	45
3.1.2	Seções de testes 1 e 2	47
3.1.3	As grades espaçadoras utilizadas	51
3.2	Instrumentação	56
3.2.1	Sistemas de medição da vazão, pressão e temperatura	56
3.2.2	Sistema de medição da velocidade	57
3.3	Metodologia de medição dos perfis de velocidades pela lateral da ST2	63
3.3.1	Medição das componentes de velocidades \bar{w} e \bar{v}	63
3.3.2	Procedimento de alinhamento do <i>LDV</i> pela lateral da seção de testes	64
3.3.3	Matriz experimental para medição de \bar{w} e \bar{v} pela lateral da ST2	70
3.4	Metodologia de medição dos perfis de velocidades pelo topo da seção de testes	72
3.4.1	Medição das componentes de velocidades \bar{u} e \bar{v}	72
3.4.2	Procedimento de alinhamento do <i>LDV</i> pelo topo das seções de testes	72
3.4.3	Deslocamento da grade no feixe de varetas	74
3.4.4	Matriz experimental para medição de \bar{u} e \bar{v} pelo topo das ST1 e ST2	75
3.5	Procedimento de medição da velocidade	77
3.6	Metodologia de medição da perda de pressão	81
3.7	Outras grandezas avaliadas	82
3.7.1	Proposta de avaliação de outras grandezas	82
3.8	Análise de incerteza	84
3.8.1	Análise de incerteza para os perfis de velocidades médias \bar{u} e \bar{v}	84

3.8.2	Avaliação da incerteza da velocidade média do escoamento $\langle \bar{w} \rangle$	89
3.8.2.1	Incerteza expandida normalizada	90
3.8.3	Incerteza da posição	90
3.8.4	Avaliação da Incerteza do escoamento secundário médio	91
3.8.5	Avaliação da Incerteza dos Tensores de Reynolds	91
3.9	Representação das incertezas experimentais nos gráficos	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
4.1	Condições experimentais e síntese das incertezas experimentais obtidas	94
4.1.1	Condições experimentais para ST1	94
4.1.2	Condições experimentais para ST2 com grade comercial do tipo de canais	97
4.1.3	Condições experimentais para ST2 com grade impressa	98
4.2	Resultados da medição pelo topo da ST1 para múltiplos Re	101
4.2.1	Análise dos tensores de Reynolds para múltiplos Re	119
4.3	Lateral vs Topo para ST1 e ST2	133
4.3.1	Comparação perfis de velocidade axial (\bar{w}) para ST1 e ST2	138
4.3.2	Comparação perfis de velocidade lateral (\bar{v}) para ST1 e ST2	141
4.3.3	Perfis de velocidades lateral (\bar{v}) e axial (\bar{w}) a montante da grade comercial de canais na ST2	143
4.4	Tensores de Re obtidos através do topo das ST1 e ST2 para todas as grades avaliadas	144
4.5	Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas através do topo das ST1 e ST2	147
4.6	Resultado do \overline{SF} a jusante das três grades avaliadas	154
4.7	Resultados para o RMS das velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas através do topo das ST1 e ST2	155
4.8	Resultado da Energia Cinética de Turbulência avaliada a jusante das três grades	166
4.9	Resultado da avaliação da perda de pressão ΔP obtida para as três grades espaçadoras.	170
5	CONCLUSÕES	172
5.1	Trabalhos futuros	174
	REFERÊNCIAS	176

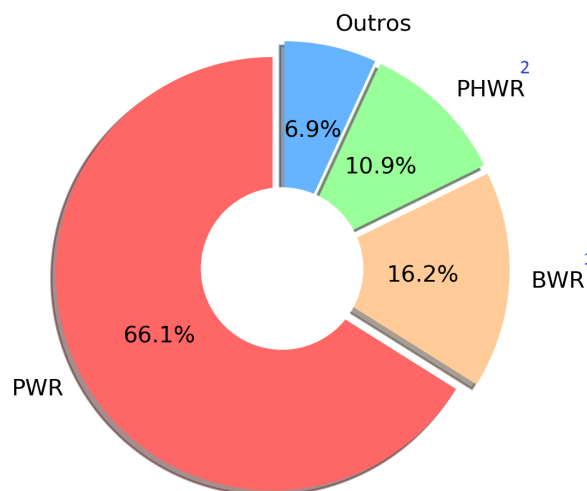
ANEXOS	181
ANEXO A – PROJETOS DA GRADE IMPRESSA.	182
ANEXO B – RESULTADOS DOS PERFIS DE VELOCIDADES NORMALIZADOS $u/\langle \bar{w} \rangle$, $v/\langle \bar{w} \rangle$ E SUAS RESPECTIVAS INCERTEZAS EXPANDIDAS NORMALIZADAS $U_{(u/\langle \bar{w} \rangle)}$ E $U_{(v/\langle \bar{w} \rangle)}$ PRA TRÊS ALTURAS A JUSANTE DA GRADE IMPRESSA.	185
ANEXO C – CAMPO TENSORIAL REFERENTE AOS $Re = 27x10^3$ E $Re = 36x10^3$ DA GRADE ALETADA.	192

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os reatores nucleares de potência são máquinas térmicas resultantes de alto desenvolvimento tecnológico agregado. Atualmente existem cerca de 451 reatores nucleares de potência distribuídos em 34 países, dentre eles o Brasil. Os reatores mais comuns no mundo são do tipo *PWR* (*Pressurized Water Reactor* - Reator a Água Pressurizada) como pode ser observado na Fig. 1.1. Inclusive, os reatores nucleares que compõe a matriz energética do Brasil, Angra 1 e Angra 2 são reatores do tipo *PWR*. Angra 3 juntamente com outros 54 reatores correspondem a 82% dos reatores em construção no mundo (IAEA, 2019).

Figura 1.1 – Reatores de Potência no Mundo



Fonte:(IAEA, 2019)

Dentre os vários dispositivos que compõem um reator nuclear, os elementos combustíveis podem ser considerados os componentes mais importantes. Eles são constituídos de dois bocais e um arranjo de varetas. No interior das varetas são alocadas pastilhas de dióxido de urânio. Essas varetas estão organizadas em arranjos quadrados ou triangulares

¹ *BWR* - *Boiling Water Reactors* - Reatores a Água Fervente

² *PHWR* - *Pressurized Heavy Water Reactors* - Reatores a Água Pesada Pressurizada

mantidos em posição fixa por grades espaçadoras posicionadas ao longo do comprimento. Na estrutura das grades pode haver elementos misturadores, como aletas, que fazem com que a água, ao passar por sua estrutura, sofra desvios no seu percurso garantindo assim, que o escoamento turbulento seja melhorado bem como também o processo de transferência de calor da superfície das varetas para o fluido refrigerante (TONG; WEISMAN, 1996). No entanto, a presença das grades espaçadoras e das aletas presentes nestas aumentam a perda de carga localizada no circuito. Portanto, no projeto de grades procura-se obter um equilíbrio entre a perda de carga e a mistura turbulenta (TODREAS; KAZIMI, 2011; IKEDA, 2014).

Diversos estudos visando alcançar este equilíbrio entre os fenômenos de mistura turbulenta e de perda de carga têm sido realizados. Para auxiliar nestes estudos, simulações numéricas usando códigos de fluidodinâmica computacional – (*CFD – Computational Fluids Dynamics*) e códigos de subcanais são amplamente empregados. Um exemplo destes códigos é o *ANSYS CFX 19.2* (ANSYS, 2019).

Os estudos envolvendo códigos de *CFD* que investigam o comportamento do escoamento de um fluido ao passar pelas grades espaçadoras necessitam de dados experimentais para que os mesmos possam ter maior credibilidade e serem validados.

Com o intuito de subsidiar as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) no desenvolvimento de um elemento combustível totalmente nacional para reatores *PWR*, foi criado o projeto DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS NUCLEARES E MATERIAIS E PEÇAS PARA COMBUSTÍVEIS NUCLEARES (Convênio FINEP nº 01.07.0548.00). Este projeto contou com a participação de instituições que atuam nas diversas áreas que envolvem o desenvolvimento de um combustível nuclear: Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE – COPPE/PEMM, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Centro Tecnológico da Marinha - CTMSP e Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, que como o IPEN está vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.

Como participante do projeto, o Laboratório de Termo-hidráulica do Setor de Tecnologia de Reatores do CDTN se comprometeu com o desenvolvimento de uma metodologia numérico-experimental para subsidiar o projeto de grades espaçadoras com dispositivos de mistura. A metodologia deverá empregar a ferramenta de modelagem *CFD*, sendo verificada e validada através de experimentos com medições de perda de carga e de velocidade local com *LDV* (*Laser Doppler Velocimetry* - Velocimetria por Laser Doppler) especialmente projetados para este fim.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar três grades espaçadoras, sendo 2 modelos comerciais e um protótipo impresso, de reatores nucleares *PWR*, a partir de grandezas termo-hidráulicas obtidas experimentalmente. Aplicar a metodologia desenvolvida para verificar a viabilidade do uso de grades espaçadoras fabricadas por impressão 3D no desenvolvimento tecnológico de grades espaçadoras nacionais. O principal instrumento de medição utilizado será um *LDV-2D*.

Os objetivos específicos são:

1. Realizar experimentos em duas seções de testes compostas por feixes de 5 x 5 varetas com duas grades espaçadoras comerciais distintas e uma grade impressa do tipo canais.
2. Avaliar os fenômenos de turbulência e perda de pressão no escoamento de água principalmente a jusante das grades comerciais. As principais grandezas mensuradas serão os perfis de velocidades laterais e axiais, componentes de flutuação dessas velocidades, escoamento secundário médio, intensidade de turbulência e perdas de pressão a jusante das grades espaçadoras comerciais.
3. Aplicar a metodologia desenvolvida nos experimentos realizados nas grades comerciais para propor e imprimir um protótipo de grade espaçadora confeccionada por impressão 3D, permitindo assim testar a viabilidade do uso desse processo de prototipagem no desenvolvimento de novos elementos combustíveis nucleares.
4. Comparar os fenômenos de turbulência, perdas de pressão em função do número de Reynolds e também o padrão de mistura e sua extensão em função de características geométricas das três grades espaçadoras testadas.
5. Descrever e quantificar as fontes de incertezas dos resultados experimentais. Esta análise detalhada é necessária para comparar os resultados experimentais com os dados de simulações numéricas de *CFD*.
6. Construir um banco de dados experimentais para ser utilizado nos procedimentos de verificação e validação de simulações numéricas realizadas com os códigos de *CFD*, como por exemplo o *Ansys CFX* ou códigos abertos como por exemplo, o *OpenFOAM*. E também para serem utilizados em códigos de subcanais, como o *Pantera*.

1.3 Justificativa

Estudos do comportamento termofluidodinâmico em elementos combustíveis nucleares têm recebido forte impulso nos últimos anos. Isto se deve ao desenvolvimento de ferramentas computacionais, como os programas do tipo *CFD*, que detalham melhor o comportamento de escoamentos em geometrias complexas, e de instrumentos de medição, em especial, os medidores de velocidade locais não intrusivos, como os *LDV* e *PIV*. Como consequência, estes estudos têm levado a consideráveis aperfeiçoamentos nos projetos dos elementos combustíveis nucleares.

Dos dispositivos presentes no elemento combustível, as grades espaçadoras têm recebido bastante atenção, devido a sua importante função estrutural e termo-hidráulica. A compreensão de forma precisa e confiável do comportamento destes componentes, sob quaisquer condições de escoamento, melhora a qualidade dos projetos dos elementos combustíveis. A utilização da metodologia numérica com programas do tipo *CFD* tem sido extremamente útil nestes estudos. Entretanto, é necessário que se estabeleçam procedimentos adequados para sua utilização.

A demonstração da confiabilidade da metodologia e do procedimento numérico deve ser realizada de maneira exaustiva antes da sua aceitação. Uma das etapas desse processo é a validação dos modelos numéricos através de testes experimentais. Alguns grupos têm realizado e disponibilizado dados de *benchmarks* experimentais como, por exemplo, em [Chang, Kim e Song \(2014\)](#).

Devido ao avanço e redução de custos, o uso da técnica de fabricação aditiva ou impressão em *3D* para a prototipagem rápida de modelos gerados no computador estão mais acessíveis. Geralmente os protótipos produzidos por impressões *3D* têm limitações relativas às propriedades mecânicas do material. Porém, o desenvolvimento da tecnologia permite que atualmente, máquinas de custo reduzido sejam capazes de fabricar protótipos com materiais de maior resistência que podem ser utilizados para testes funcionais. Isto é, o protótipo poderá ser testado em condições reais de uso. No entanto, é necessário que sejam feitas análises de viabilidade técnica no uso de peças fabricadas por este processo para avaliações consistentes de engenharia. Alguns grupos no exterior têm utilizado tais técnicas como, por exemplo, em [Ylönen \(2013\)](#) e [In, Shin e Lee \(2015\)](#) para estudos em grades espaçadoras. No Brasil, entretanto, ainda não existem grupos que desempenhem tais atividades. Por essa razão este trabalho se propõe a utilizar essa técnica como meio de desenvolvimento tecnológico de uma grade espaçadora nacional.

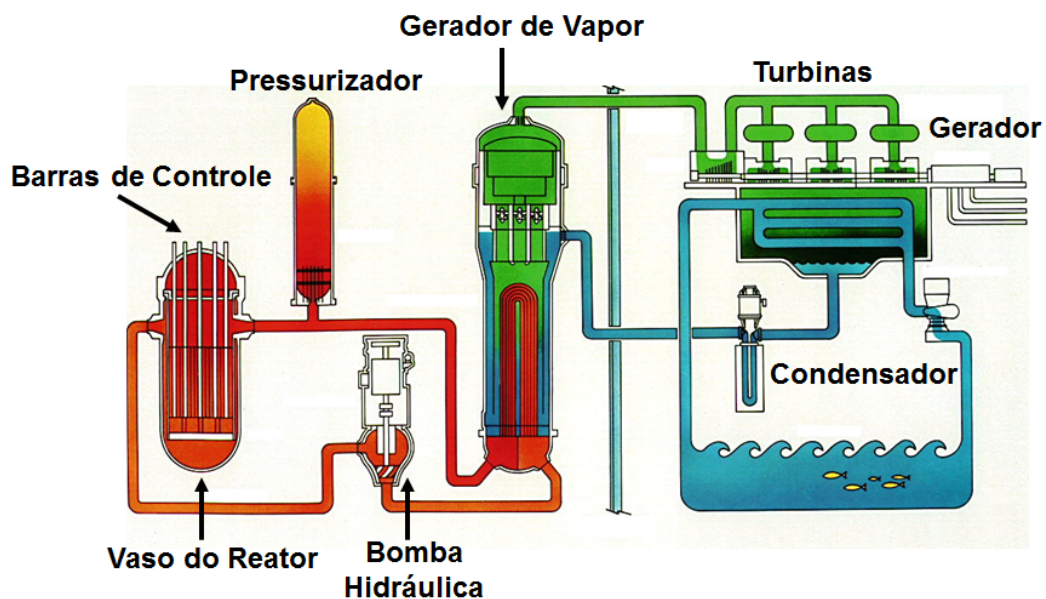
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reatores Nucleares a Água Pressurizada (*PWR*)

Existem diversas maneiras de se classificar um reator nuclear. Uma delas se refere ao propósito de sua utilização. Isto é, se o reator é predominantemente utilizado para fins de pesquisa, treinamento, teste de materiais, dentre outros será denominado reator de pesquisa. Se o reator é destinado à geração de energia elétrica, este por sua vez será chamado de reator de potência.

Na Fig. 2.1 podem ser vistos os diversos tipos de componentes de um reator *PWR*.

Figura 2.1 – *PWR* típico



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2012).

Na Fig. 2.1 nota-se a existência de três circuitos independentes: primário, secundário e terciário. No circuito primário a água entra no vaso do reator a cerca de 290°C , remove o calor gerado e sai com uma temperatura de aproximadamente 300°C . A água nesse circuito permanece em estado líquido por estar submetida à uma pressão de cerca de 154 bar imposta por um dispositivo responsável pela pressurização desse circuito. O circuito primário fornece calor ao circuito secundário dentro de um dispositivo chamado de gerador de vapor. A água no gerador de vapor está sob uma pressão de 50 bar aproximadamente e com temperatura superior à temperatura de saturação para essa pressão, por essa razão a

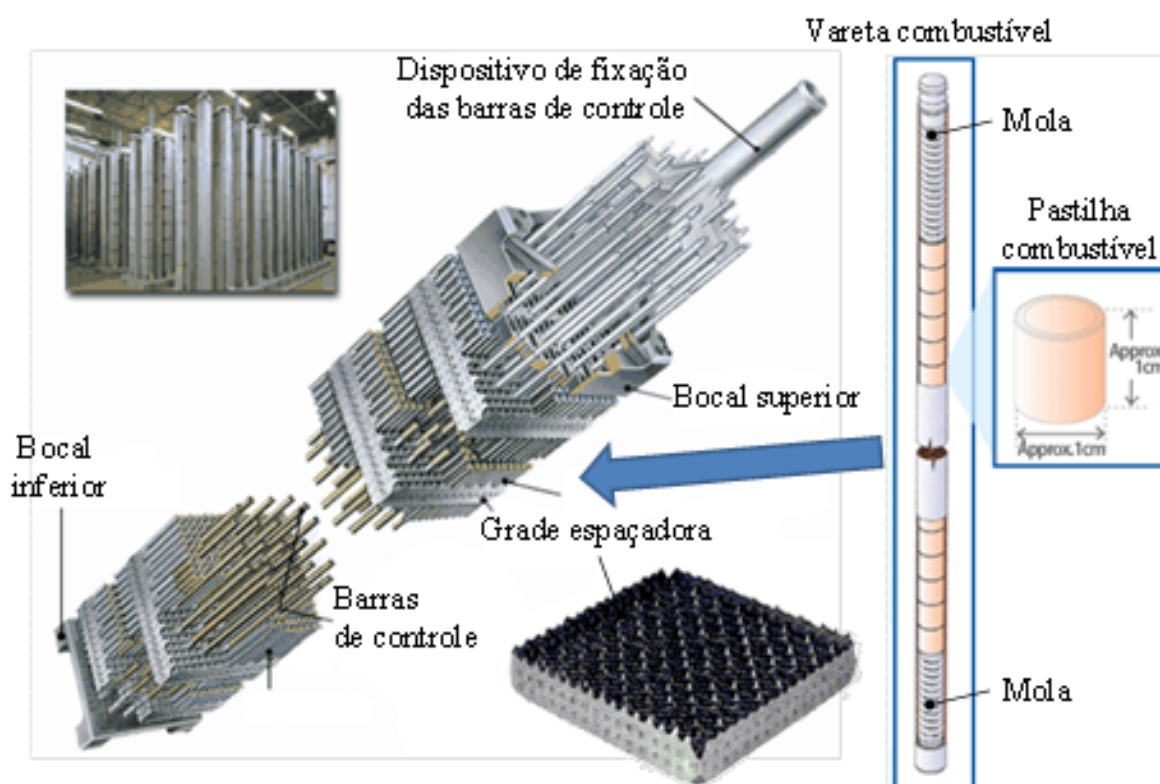
água em seu interior transforma-se no vapor responsável por girar as turbinas acopladas aos geradores de energia elétrica. O vapor remanescente na saída da turbina é condensado no trocador de calor do circuito terciário.

Essa foi uma breve descrição sobre o funcionamento global de um reator nuclear de potência do tipo *PWR*. A seguir serão fornecidos maiores detalhes sobre os principais dispositivos presentes no núcleo de um reator de potência *PWR*, os elementos combustíveis nucleares.

2.2 Elementos Combustíveis Nucleares

Os Elementos Combustíveis Nucleares (ECN) estão alocados no núcleo dos reatores e são constituídos por diversos componentes, tais como: bocal inferior, bocal superior, feixe de varetas, grades espaçadoras e tubos guia de barras de controle. Na Fig. 2.2 pode ser observada uma representação dos componentes que constituem um ECN.

Figura 2.2 – O elemento combustível nuclear de um reator *PWR*.



Fonte: (SANTOS, 2012).

As varetas são constituídas de uma liga de zircônio e possuem cerca de um centímetro de diâmetro por quatro metros de comprimento. No interior das varetas são inseridas as pastilhas de dióxido de urânio (UO_2). Essas varetas são organizadas num arranjo quadrado podendo variar a disposição de acordo com o projeto. Em geral pode ser um arranjo

16x16 varetas ou 17x17 varetas. As grades espaçadoras são responsáveis por manter o espaçamento entre as varetas e também contribuem para garantir a integridade estrutural do ECN. Várias grades são dispostas axialmente ao longo do feixe de varetas. Portanto a combinação destes dispositivos é denominada de ECN.

Quadro 1 – Dados dos Reatores Nucleares: Angra 1 e 2.

Parâmetro	Angra 1	Angra 2
Arranjo de Varetas	16x16	16x16
Número de ECN	121	193
Varetas por ECN	235	236
Barras de Controle	33	61
Quantidade de Grades	11	10
Temperatura média de saída do Primário [$^{\circ}C$]	302,7	308,6
Pressão do Primário [bar]	154,1	154,0
Rendimento Térmico [%]	34,2	35,8
Potência Bruta [kWe]	640	1350
Potência Nominal [kWe]	609	1280

Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).

Sob o ponto de vista da proteção radiológica em uma instalação nuclear o revestimento das varetas é considerada a primeira barreira de segurança, por abrigar em seu interior as pastilhas de dióxido de urânio. No interior das varetas ocorre o processo da queima do combustível, através da fissão dos átomos de Urânio. As varetas possuem propriedades termo-hidráulicas que lhes permitem suportar altos valores de pressão e temperatura conforme exemplificado no Quadro 1, para as usinas de Angra 1 e Angra 2. Além de suportar essas condições extremas, o revestimento das varetas também deve possuir propriedades neutrônicas específicas. Ou seja, o revestimento deverá ter uma baixa probabilidade de interação com nêutrons, em outras palavras, ele deverá possuir uma pequena seção de choque de absorção (LAMARSH; BARATTA, 2001).

2.3 Grades Espaçadoras

As grades espaçadoras são um dos componentes presentes em ECN de reatores *PWR*. Existem diferentes tipos de grades espaçadoras. Algumas possuem funções distintas, tais como estrutural e de melhoria do fenômeno da turbulência do escoamento de água que passa pelos elementos de mistura presentes. Maior turbulência colabora com a transferência de calor das varetas para o fluido de trabalho, contribuindo para o afastamento da condição de ebulição nucleada (do Inglês, *DNB - Departure from Nucleate Boiling*).

Por outro lado as grades espaçadoras aumentam a perda de carga no circuito. Estudos tem sido realizados com o intuito de otimizar esta relação entre os fenômenos

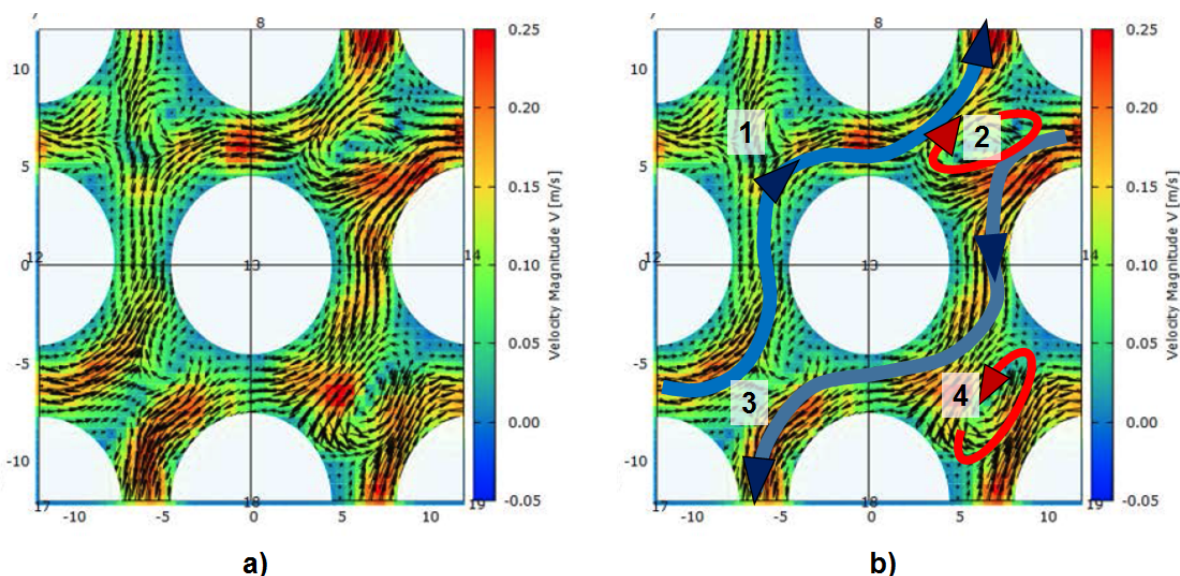
da perda de carga e de turbulência. Estes estudos têm contribuído tanto para a obtenção da eficiência como também para garantir a segurança em uma central nuclear (CHUNG, 1998),(CARAGHIAUR; ANGLART; FRID, 2009),(NAVARRO; SANTOS, 2011),(HAN; YANG; ZHA, 2018).

As grades fixam as varetas por meio de molas que possibilitam a expansão axial diferencial entre as varetas. Dessa maneira as varetas podem deformar sem que haja tensão excessiva devido à expansão.

Em um mesmo ECN pode haver diferentes tipos de grades espaçadoras. Algumas dessas grades possuem elementos misturadores em suas estruturas que são responsáveis por causar desvios no percurso do escoamento de água. Devido à esses desvios o escoamento turbulento é intensificado e contribui para a melhoria da transferência de calor.

Na Fig. 2.3 adaptada do trabalho de Powell et al. (2018) é apresentado o comportamento do escoamento de água após passar por uma grade espaçadora.

Figura 2.3 – Mistura cruzada e por rotação provocado pelas grades espaçadoras.



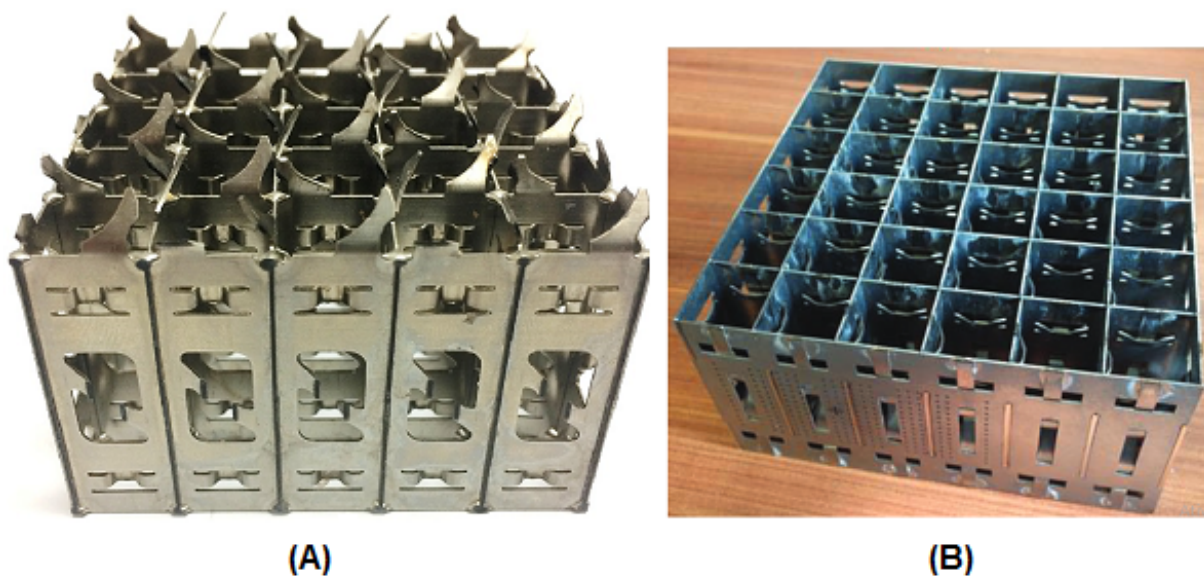
Fonte: Adaptado de (POWELL et al., 2018).

Na Fig. 2.3 quatro subcanais enumerados de um a quatro estão distribuídos ao redor de uma vareta e os vetores indicam o sentido com o qual o fluido escoar por entre os subcanais. Pode-se notar dois tipos de desvios causados pelos elementos de misturas das grades espaçadoras o *crossflow* (mistura cruzada) e o *swirlflow* (mistura por rotação). A mistura cruzada é caracterizada principalmente pela transferência de massa e energia entre os subcanais. No interior dos subcanais pode surgir uma mistura rotacional, isto é, um vórtice que dependendo da geometria da grade poderá possuir um formato circular ou elíptico. Na Fig. 2.3 estão destacados em azul, dois exemplos de movimentos cruzados (um

movimento cruzado que se desloca do subcanal 3 para 1 e outro de 2 para 4). Dois exemplos de mistura por rotação estão representados em vermelho (no interior dos subcanais 2 e 4).

De acordo com a geometria, as grades podem ser divididas em dois grupos: aletadas ou de canais. Na Fig. 2.4 podem ser vistos estes dois modelos.

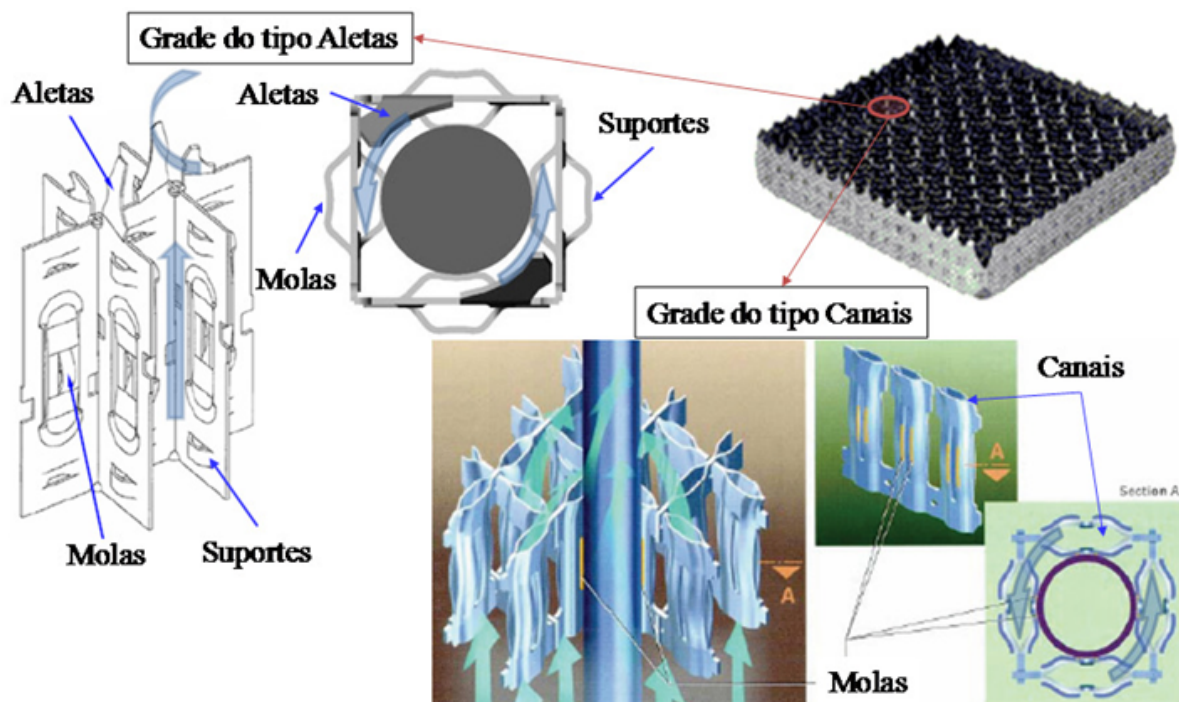
Figura 2.4 – Grades espaçadoras com aletas (A) e sem aletas (B).



Fonte: (NGUYEN; HASSAN, 2017) e (WEICHSELBAUM et al., 2015).

Em (A) está representado o modelo de grade com aletas, e em (B) está representado um modelo de canais. As grades espaçadoras presentes nos ECN da usina de Angra 1 são do tipo aletada, e as grades de Angra 2 são do tipo de canais. Na Fig. 2.5 são apresentados alguns elementos que são semelhantes e outros que diferem esses dois tipos de grades espaçadoras.

Figura 2.5 – Elementos presentes nas grades aletadas e de canais.



Fonte: (SANTOS, 2012).

Nota-se que as molas são elementos comuns presentes em ambas as grades e as aletas são elementos que diferenciam esses dois tipos. Neste trabalho serão apresentados resultados para grades semelhantes a esses dois tipos. Poderá ser notado que o padrão no escoamento após passar pelas grades são distintos.

No trabalho de Santos (2012) foi realizada uma avaliação detalhada dos diversos tipos de geometria das grades espaçadoras. Na literatura percebe-se que o tipo de grade mais estudado e investigado são as grades aletadas.

Na próxima seção será apresentado um panorama geral dos principais estudos envolvendo grades espaçadoras, sendo eles numéricos ou experimentais dos parâmetros termo-hidráulicos obtidos através do escoamento de água após passar pelas grades.

2.4 Estado da arte

Ao longo dos anos tem-se observado um crescente aumento na utilização de técnicas específicas, sejam numéricas ou experimentais, para investigação do escoamento de água em feixes de varetas que servem de representação dos ECN comerciais. As técnicas mais frequentemente utilizadas para medição da velocidade do escoamento de água são Velocimetria por Laser *Doppler* (do Inglês, *Laser Doppler Velocimetry* - LDV de duas e três dimensões ((SANTOS, 2012) (CARAGHIAUR; ANGLART; FRID, 2009)), e Velocimetria por Imagens de Partículas (do Inglês, *Particle Image Velocimetry* - PIV

((HOSOKAWA et al., 2012) (DOMINGUEZ-ONTIVEROS; ESTRADA-PEREZ; HASSAN, 2010) (DOMINGUEZ-ONTIVEROS; HASSAN, 2009)). Estas técnicas são amplamente utilizadas devido às suas vantagens, como por exemplo: são não intrusivas, e apresentam ótima resolução espacial e temporal.

Experimentos mostram que os efeitos de mistura no escoamento por rotação (*swirl-flow*) e por deslocamento entre os subcanais (*cross-flow*) reduzem a intensidade com o afastamento a jusante da grade espaçadora. Estes estudos experimentais contribuem com o desenvolvimento de metodologias de validação com códigos de *CFD*.

Em 1974 Rowe , Johnson e Knudsen (ROWE; JOHNSON; KNUDSEN, 1974) investigaram parâmetros no escoamento utilizando um *LDV -2D* em um feixe de varetas com grades espaçadoras e cujo regime de escoamento foi investigado para número de Reynolds (*Re*) compreendidos entre 50×10^3 a 200×10^3 . Este estudo foi um dos primeiros a divulgar que o comportamento do regime do escoamento não é afetado com mudança no número de *Re*, ou seja, ao realizar medidas com *Re* distintos os perfis de velocidades medidos apresentaram o mesmo comportamento.

Após Rowe, outros trabalhos relativamente mais recentes também não notaram alteração nos parâmetros normalizados do escoamento através de experimentos envolvendo múltiplos *Re*. Como por exemplo, Nagayoshi e Nishida (1998), que avaliaram um único feixe de varetas com e sem a presença de grades espaçadoras para múltiplos números de *Re* usando um *HWA - Hot Wire Anemometer* - Anemometro de Fio Quente.

Porém esse fato não é consenso, pois no trabalho de Caraghiaur, Anglart e Frid (2009) foram notadas diferenças com relação à intensidade de turbulência e nos perfis de velocidade normalizados mensurados com um *LDV - 2D* em um feixe de varetas com grades espaçadoras. As medições foram realizadas tanto a jusante quanto a montante da grade espaçadora. Os experimentos foram realizados para uma faixa de *Re* entre 25×10^3 e 42×10^3 .

A partir disso, no LTHN do CDTN, foram realizados experimentos para verificar o comportamento dos perfis de velocidade axial \bar{w} e lateral \bar{v} para múltiplos *Re* após passar por uma grade espaçadora presente em um arranjo composto por 5x5 varetas. Os resultados obtidos concordam com Rowe, Johnson e Knudsen (1974) e Nagayoshi e Nishida (1998), e para *Re* entre 18×10^3 e 54×10^3 os parâmetros normalizados não alteraram os seus comportamentos (CASTRO, 2016).

Na primeira parte da Tabela 2.1 são apresentados os principais trabalhos envolvendo experimentos com múltiplos *Re*. Na segunda parte da Tabela são apresentados alguns dos trabalhos realizados entre os anos de 2015 e 2020 e que configuram o estado da arte no estudo de escoamento de água em feixes de varetas com a presença de grades espaçadoras.

Percebe-se que a utilização de técnicas de visualização do escoamento tem se tornado

mais robusta, possibilitando que experimentos de alta fidelidade fossem conduzidos. E assim servir de banco de dados (*benchmark*) experimental para validação de simulações de *CFD*. A partir de dados experimentais, modelos matemáticos aplicados nas simulações de *CFD* podem ser aprimorados (CONNER; KAROUTAS; XU, 2015).

Um exemplo de proposta de aprimoramento que utilizou dados experimentais pode ser visto no trabalho apresentado por Mao et al. (2017). Os autores se preocuparam em apresentar um modelo para avaliação dos efeitos de mistura em subcanais provocados pelas grades espaçadoras do tipo aletada. O modelo proposto por eles é denominado (*DRM* - *Distributed Resistance Method* - Método de Resistência Distribuída). Nesse método um termo fonte relacionado com a geometria das grades foi incluído nas equações de *momentum*. O resultado obtido por cálculos de subcanais são comparados com dados experimentais e resultados de simulação com *CFD*. Os dados de experimentos auxiliaram na escolha desse modelo. Ainda nesse trabalho, foi realizada uma comparação entre o modelo convencional de código de subcanais e o modelo proposto (*DRM*). Embora o modelo proposto pelos autores seja capaz de representar as condições do escoamento no experimento, a geometria utilizada não levou em consideração *dimples*, molas e pontos de solda. O código de subcanais utilizado para implementação da melhoria foi o COBRA-IV e o *CFD* comercial utilizado foi o ANSYS CFX-14.0.

Nota-se que em diversos trabalhos, sobretudo naqueles realizados em centros de pesquisas, que possuem excelente infraestrutura e que medem perfis de velocidades e efeitos de turbulência com *LDV* e *PIV*, utilizam seções de testes semelhantes àquelas utilizadas por este estudo. As diversas seções de testes utilizadas são compostas por feixes de varetas cujos arranjos são reduzidos, por exemplo 4x4, 2x1 e o mais comum de 5x5 varetas. *A priori*, verificou-se que para avaliação de parâmetros relacionados com perfis de velocidade e perda de pressão em determinados escoamentos não é necessário realizar em escala 1:1 para obtenção dos mesmos resultados. Isso facilita tanto nas montagens experimentais como também no tempo de cálculo para as simulações de *CFD* que são previstos nos guias de boas práticas de aplicação.

Os testes e simulações realizados nesses arranjos reduzidos apresentam geralmente resultados que contém um comportamento global do escoamento entre o feixe de varetas com vistas de topo e pela lateral da seção de testes. Os aparatos experimentais, sejam eles *PIV* ou *LDV* quando posicionados pela lateral da seção de testes fornecem dados principalmente da componente de velocidade axial \bar{w} , e quando são posicionados pelo topo das seções de testes, fornecem informações referentes às componentes de velocidades laterais \bar{u} e \bar{v} . Os padrões de escoamento cruzado e vórtices são obtidos por essas componentes de velocidades laterais.

Os padrões do escoamento observados após passar pelas grades espaçadoras possui características distintas dependendo da geometria das grades. Mesmo para as grades com

aletas são observados padrões elípticos e circulares dependendo da distância que se mede o escoamento a partir da grade. Em diversos trabalhos é possível notar essas características, como, por exemplo, nos trabalhos de [In et al. \(2015\)](#) e [Chang, Kim e Song \(2014\)](#).

Outros estudos investigaram padrões observados no escoamento a partir de técnicas de medições diferentes do *PIV* ou *LDV* como por exemplo o *WMS* - *Wire Mesh Sensor* - Sensores de Malha de Eletrodos utilizado por [Ylönen \(2013\)](#) e o *LIF* - *Laser Induced by Fluorescence* - Fluorescência Induzida por Laser, utilizado por [Li et al. \(2019\)](#). De maneira bastante sucinta, o *WMS* é uma técnica de medição intrusiva, capaz de medir efeitos de mistura no escoamento a partir de eletrodos introduzidos nele. O *WMS* é uma evolução do *HWA*, pois é capaz de fornecer informações mais detalhadas do escoamento. No caso do *LIF* se trata de uma técnica de medição não intrusiva que também é capaz de fornecer informações sobre os efeitos de mistura no escoamento a partir de traçadores que emitem radiação luminosa em frequências específicas do espectro quando são iluminadas por laser. A radiação emitida pelos traçadores são captadas por uma câmera de alta resolução. No *WMS* também são introduzidos traçadores no escoamento, porém eles sofrem interferência física devido à presença de sensores no escoamento responsáveis pela medição do comportamento dos mesmos. Essas técnicas possuem funcionamentos distintos em relação ao *PIV* e *LDV*, porém fornecem informações do escoamento similares no que se refere aos efeitos de mistura.

Mesmo nos trabalhos que apresentam dados completos do escoamento é possível notar a necessidade de se avaliar regiões específicas, principalmente nas regiões próximas às aletas, molas e *dimples*. Como exemplo, [Li et al. \(2019\)](#) perceberam que o movimento induzido pelas aletas no escoamento nas suas proximidades não é uniforme. O escoamento observado nas proximidades das molas é mais intenso do que o observado nas proximidade dos *dimples*. A explicação dos autores está no fato de que os *dimples* oferecem uma resistência maior ao escoamento por possuírem uma área maior comparada à das molas. A grandeza mensurada pelos autores foi a concentração relativa (RC) e o coeficiente de variação no espaço e tempo da mistura, ambas associadas à difusão do traçador a jusante das grades espaçadoras.

O conhecimento das nuances presentes no escoamento permitem que projetos de aprimoramento das grades espaçadoras sejam executados, assim como também características relacionadas com a disposição desses componentes nas seções de testes e como a alteração dos mesmos poderá resultar em melhorias nos projetos.

No entanto não basta apenas ser capaz de realizar experimentos e simulações numéricas em regiões específicas no escoamento. Também é necessário que as incertezas das medições sejam apresentadas de maneira adequada. Nos últimos cinco anos percebeu-se que os trabalhos passaram a mostrar de maneira detalhada as incertezas obtidas durante os experimentos. Mas ainda são poucos os trabalhos que fornecem essa análise mais detalhada.

No trabalho já citado anteriormente, [Li et al. \(2019\)](#), fizeram uma abordagem a respeito dos erros sistemáticos e das incertezas obtidas durante o procedimento experimental, inclusive propondo melhorias para reduzir erros sistemáticos associados ao uso das lentes. No trabalho de [Santos et al. \(2019\)](#) foram apresentadas de maneira completa as incertezas expandidas normalizadas de todas as grandezas avaliadas. Configurando assim em excelentes guias para expressar corretamente as incertezas experimentais além das normas vigentes para esse fim.

Seguindo essa mesma abordagem o trabalho de [Waite, Prasser e Podowski \(2020\)](#) compararam dados experimentais obtidos por [Ylönen \(2013\)](#), avaliaram a teoria e o estudo computacional da distribuição de fase ao redor e a jusante de grade espaçadoras aletadas. Os dados foram obtidos do trabalho de [Navarro e Santos \(2009\)](#) da grade de [Karoutas, Gu e Sholin \(1995\)](#). Uma discussão sobre as incertezas e limitações computacionais também foram realizadas. Os autores reconhecem que há fontes de incertezas inerentes à técnica experimental utilizada (*WMS*) mas, mesmo assim, são dados importantes para validarem modelos. Na primeira parte do *paper* são abordadas as fontes de incerteza do experimento. Na segunda parte é feita uma descrição de um modelo de *CMDF* - *Computational Multiphase Fluid Dynamics* - Mecânica dos Fluidos Computacional Multifásico. E assim são comparadas e apresentadas as relações entre as incertezas e a consistência e acurácia do modelo utilizado. Vale ainda mencionar que a grade espaçadora avaliada por esse estudo foi um modelo impresso.

O uso de técnicas de prototipagem, tem se tornado mais acessível com o passar dos anos. Em alguns trabalhos como no de [In, Shin e Lee \(2015\)](#) foram realizados experimentos em um feixe de varetas de arranjo 4x4 com uma grade espaçadora com aletas impressa. Os testes desse trabalho foram realizados com uma vareta aquecida e verificou-se o comportamento do escoamento tanto a jusante quanto a montante da grade. Esse trabalho serviu de *benchmark* para validação numérica de outros trabalhos como o dos autores [Bieder e Costa \(2018\)](#).

Observa-se um crescente número de informações sobre características encontradas em regiões cada vez mais específicas no escoamento de água em feixes de varetas com grades espaçadoras. O aprimoramento de técnicas tanto experimentais quanto numéricas passa pela necessidade de se ter dados com qualidade. O uso de técnicas de prototipagem a baixo custo podem ser utilizadas no desenvolvimento de novas grades espaçadoras. Ainda são poucos os trabalhos com abordagem experimental que utilizam grades impressas. Assim como também existem poucas informações sobre as limitações no uso da técnica. Além das grandes diferenças mecânicas entre os materiais (aço e polímero), existe a rugosidade que é diferenciada para vários métodos de impressão. A limitação de espessura e qualidade microscópica também são relevantes.

Embora as técnicas de visualização do escoamento tenham evoluído consideravel-

mente, o uso do *LDV* para caracterização do escoamento ainda tem se mostrado bastante útil devido às suas vantagens em relação ao uso do *PIV*, por exemplo, em [Kumara et al. \(2010\)](#). Inclusive um dos principais bancos de dados disponíveis para validação de códigos de *CFD* foram fornecidos por medidas realizadas com *LDV*.

No próximo capítulo será apresentada a metodologia utilizada para avaliação de duas grades espaçadoras comerciais de reatores nucleares *PWR* a partir de medições realizadas principalmente por meio de um *LDV-2D*. Essa metodologia será aplicada para avaliar a viabilidade do uso de grades espaçadoras fabricadas por impressão 3D no desenvolvimento tecnológico de grades espaçadoras nacionais.

Tabela 2.1 – Principais trabalhos que avaliaram seções de testes com múltiplos Re

Referência	Fluido	Re [10^3]	Técnica	Principais grandezas	Tipo de grade
Rowe, Johnson e Knudsen (1974)	Água	50, 100 e 200	LDV	\bar{w} e u'	Sem grade
Nagayoshi e Nishida (1998)	Ar	50, 80, 100 e 120	HWA	\bar{w} , v' e w'	convencional de BWR
Caraghiaur, Anglart e Frid (2009)	Água	25, 32 e 42	LDV	ΔP , \bar{w} , v' e w'	com aletas
Hosokawa et al. (2012)	Água	12.5, 18.75 e 25	PIV / MIR	\bar{w} , w' , $k_{x,y,z}$	Sem grade
Ylönen (2013)	Água	9.8, 28, 40 e 51	WMS	Ω	com aletas (impressa)
Xiong et al. (2014)	Água	15.2 e 29.9	LDV-3D	u' , v' e w'	Sem aletas
Principais trabalhos realizados entre 2015 e 2020					
In et al. (2015)	Água	33	LDV / PIV / MIR	\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}	com aletas (impressa)
Chen et al. (2016)	Água	20	CFD	ΔP e SF	com aletas
Capone, Benhamadouche e Hassan (2016)	Água	100	CFD	P , SF , u' , v' , w' e $k_{x,y,z}$	com aletas
Cheng, Chen e Zhang (2017)	Água	85	CFD	P , \bar{u} , \bar{w} e $k_{x,y,z}$	com aletas
Mao et al. (2017)	Água	359	CFD e SC	ΔP , SF e \bar{w}	com aletas
Xiong et al. (2018)	Água	16	PIV / MIR	\bar{u} , \bar{v} , e $k_{x,y}$	com aletas
Han, Yang e Zha (2018)	Água	10 a 55	CFD	ΔP , SF , e $k_{x,y}$	com aletas
Powell et al. (2018)	Água	14 e 28	PIV / PTV / MIR	\bar{u} e \bar{v}	com aletas
Končar e Košmrlj (2018)	Água	50	CFD	\bar{v} , \bar{w} , u' , v' e w'	com aletas
Chen et al. (2017)	Água	14.6 e 34.8	CFD	ΔP , \bar{w} e w'	com aletas
Qu et al. (2019a)	Água	39.6	PIV-2D / MIR	\bar{u} , \bar{v} , u' , v' e $k_{x,y}$	com aletas
Qu et al. (2019b)	Água	6.6 a 39.0	PIV-2D / MIR	\bar{u} , \bar{v} , \bar{w} , u' , v' , w' e $u'v'$	com aletas
Santos et al. (2019)	D-Limoneno	27	PIV / MIR	\bar{u} , \bar{w} , u' , w' , $u'u'$, $w'w'$ e $u'w'$	com aletas
Li et al. (2019)	Água	10.5	LIF / MIR	RC , COV	com aletas
Wang et al. (2020)	Água	50	CFD	ΔP , \bar{u} , \bar{v} e \bar{w}	com aletas

Fonte: Elaborado pelo autor

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia experimental que permitiu avaliar e comparar os parâmetros termo-hidráulicos medidos em duas seções de testes. A primeira seção de testes (ST1) avaliada é um feixe de varetas contendo grades espaçadoras comerciais do tipo aletada. Na segunda seção de testes (ST2) será avaliado um feixe de varetas contendo grades espaçadoras comerciais do tipo canais. Ainda na segunda seção de testes será avaliada uma grade espaçadora impressa desenvolvida no próprio laboratório. As principais grandezas termo-hidráulicas avaliadas foram os perfis de velocidades e a perda de pressão do escoamento de água a jusante das grades espaçadoras. Para medição desses perfis de velocidades foi utilizado um *LDV-2D* através de duas posições distintas (lateral e topo) nas seções de testes. Duas componentes de velocidades, axial (w) e lateral (v), foram medidas através da posição lateral das duas seções de testes e a jusante das duas grades e varetas comerciais. Duas componentes de velocidades laterais, (u) e (v), foram mensuradas pelo topo das duas seções de testes e a jusante das duas grades comerciais e da grade impressa. A perda de pressão (ΔP) foi mensurada por transdutores diferenciais de pressão.

A partir dos perfis de velocidades medidos outras grandezas também puderam ser avaliadas, tais como o escoamento secundário médio (\overline{SF}) e os tensores de Reynolds $u'u'$, $v'v'$ e $u'v'$, além dos fenômenos de mistura cruzada do escoamento entre subcanais e das misturas de rotação no interior dos mesmos.

Embora os principais resultados tenham sido obtidos a jusante das grades espaçadoras, também foram realizados alguns testes a montante de uma das grades para auxiliar na construção e consolidação da metodologia aplicada.

O regime do escoamento também será descrito em detalhes. A princípio os testes foram realizados para regimes de escoamentos com números de Reynolds compreendidos entre 18×10^3 e 54×10^3 para o feixe de varetas e grade espaçadora presentes na (ST1). Essa faixa de Reynolds escolhida é a mesma avaliada no trabalho de [Castro \(2016\)](#), isso permitirá comparações entre os resultados. Na (ST2) foram realizados testes para número de $Re = 27 \times 10^3$.

Nesse capítulo serão apresentados também procedimentos de alinhamento entre os feixes do *LDV* com a seção de testes e região de interesse para todas as medições de maneira criteriosa. Através da repetitividade dos testes foi possível avaliar a consistência do sistema.

A análise de incerteza inferida e apresentada no final dos resultados foi baseada na norma ISO GUM ([ISO; OIML, 1995](#)).

As metodologias de obtenção dos perfis de velocidade pelo topo e pela lateral da seção de testes foram comparadas e serviram de referência para avaliação do modelo da grade espaçadora impressa considerada na (ST2).

3.1 Descrição geral do experimento

3.1.1 O circuito hidráulico utilizado

Os experimentos foram realizados em um circuito hidráulico localizado no Laboratório de Termo-Hidráulica e Neutrônica (LTHN) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) como mostrado na Fig. 3.1. Na Fig. 3.2 é apresentado o ambiente onde está localizada a estrutura que contém o circuito hidráulico utilizado no LTHN para acoplagem das seções de testes.

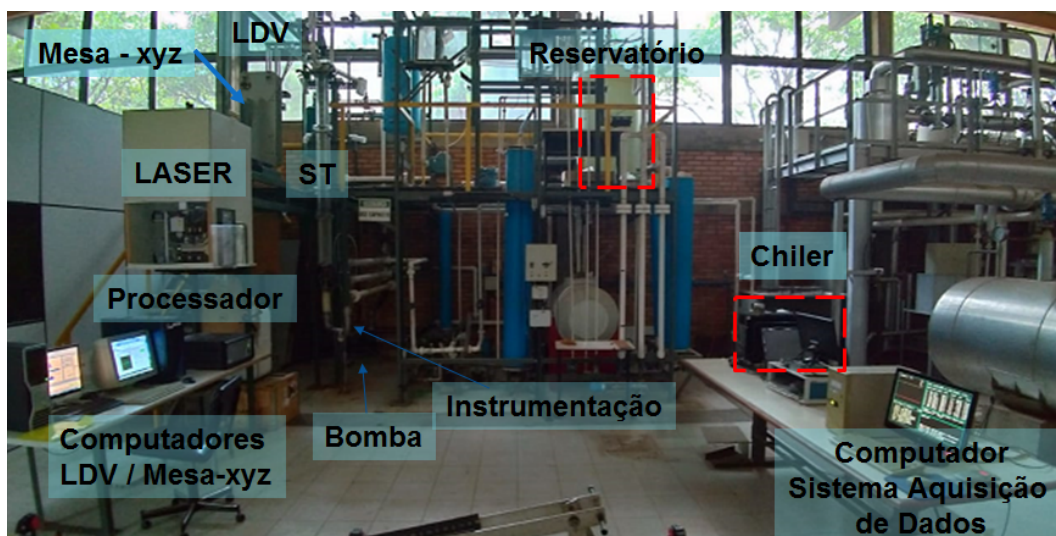
Figura 3.1 – Laboratório de Termo-Hidráulica e Neutrônica do Serviço de Tecnologia de Reatores do CDTN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

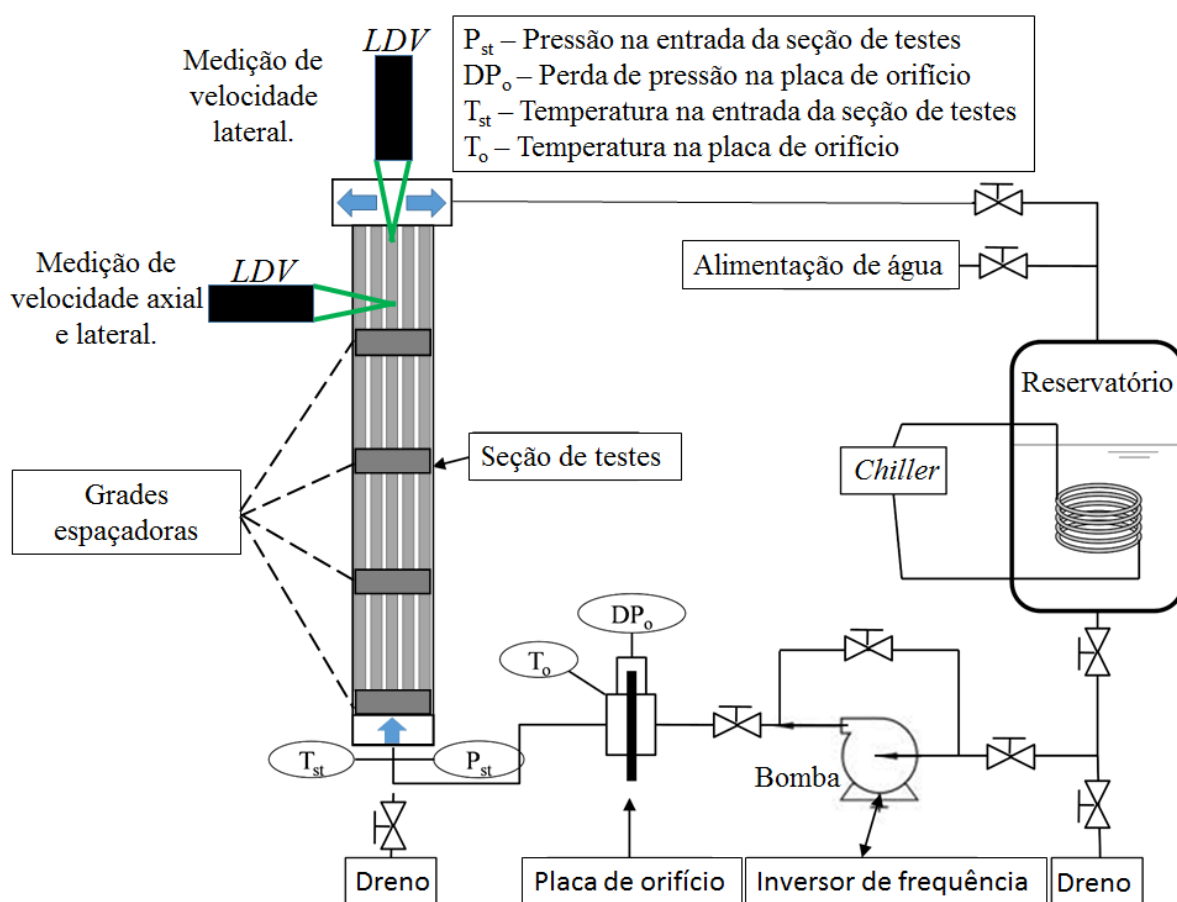
Uma representação simplificada do circuito utilizado pode ser visto na Fig. 3.3. Nesse circuito, uma bomba de 15HP (50 m.c.a.) de potência foi utilizada para propeler água de um reservatório de 1000 litros de capacidade para a seção de testes. Um inversor de frequências foi ligado a essa bomba para permitir a variação da vazão e assim, obter Re distintos durante os testes. As seções de testes utilizadas nesse circuito foram compostas por um feixe de 5x5 varetas com quatro grades espaçadoras presentes ao longo de sua estrutura. Para garantir que a temperatura da água fosse mantida à $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ durante a realização dos testes nesse circuito, foi utilizado um trocador de calor (*Chiller*).

Figura 3.2 – Estrutura contendo o circuito hidráulico utilizado no LTHN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.3 – Circuito hidráulico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na subsecção 3.1.2 serão fornecidos maiores detalhes sobre as semelhanças e diferenças das duas seções testes utilizadas (ST1) e (ST2).

3.1.2 Seções de testes 1 e 2

A primeira seção de testes (ST1) também foi utilizada nos trabalhos de Santos (2012) e Castro (2016). Tanto as varetas quanto as grades espaçadoras da ST1 são representativas de um modelo comercial. As grades espaçadoras alocadas nesse feixe de varetas são do tipo de aletas. A ST1 possui duas laterais de aço inoxidável e as outras duas laterais e o topo de acrílico com 20mm de espessura. As laterais e o topo da ST1 são de acrílico para permitir a medição dos perfis de velocidade e misturas cruzadas e de rotação nos subcanais por meio do *LDV*. O feixe de varetas da ST1 possui sistemas de fixação nas duas extremidades compostos por pinos e cones de aço inoxidável.

Através do topo da ST1 foi possível mensurar duas componentes dos perfis de velocidades laterais \bar{u} e \bar{v} . E pela lateral da ST1, as componentes de velocidades axial \bar{w} e lateral \bar{v} foram obtidas. Os resultados referentes à essas medições de velocidades pela lateral da ST1 foram obtidos do trabalho de Castro (2016).

Em uma das laterais da ST1 foram feitos 19 orifícios (*taps*) para medição das perdas de pressão do escoamento ao passar pelo conjunto de varetas e grades espaçadoras distribuídos ao longo da ST1.

Uma segunda seção de testes (ST2) foi construída para investigar a natureza do escoamento de água através de um feixe de varetas com grades espaçadoras representativas de um modelo comercial do tipo canais. A montagem da ST2 foi realizada no LTHN, onde foram realizados alguns processos de usinagem e de colagem das peças de acrílico. Na Fig. 3.4 são apresentados alguns detalhes das peças de acrílico utilizadas para construção do envoltório da ST2.

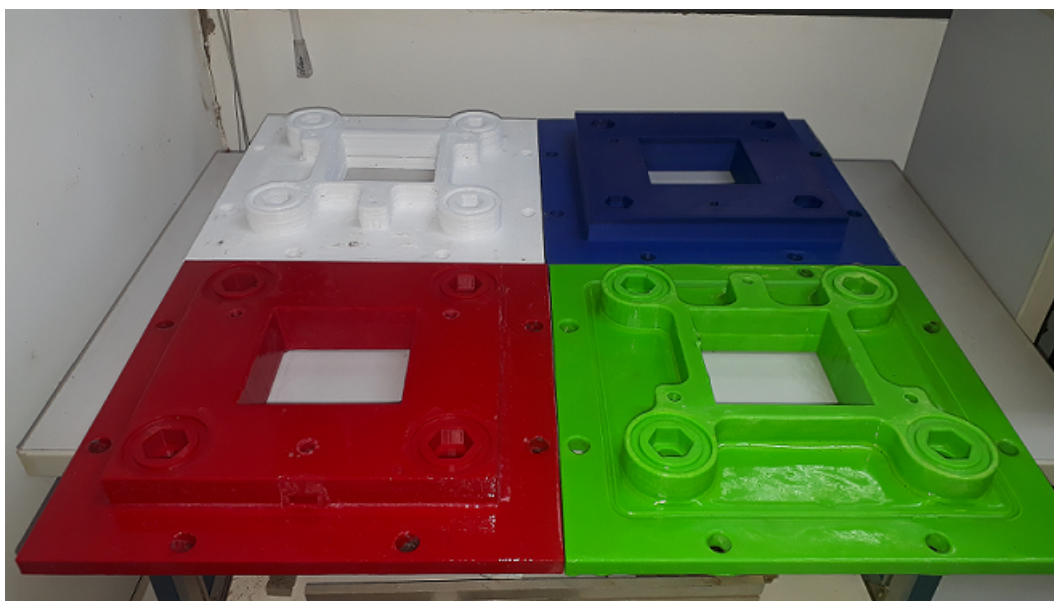
Figura 3.4 – Montagem da Seção de Testes 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

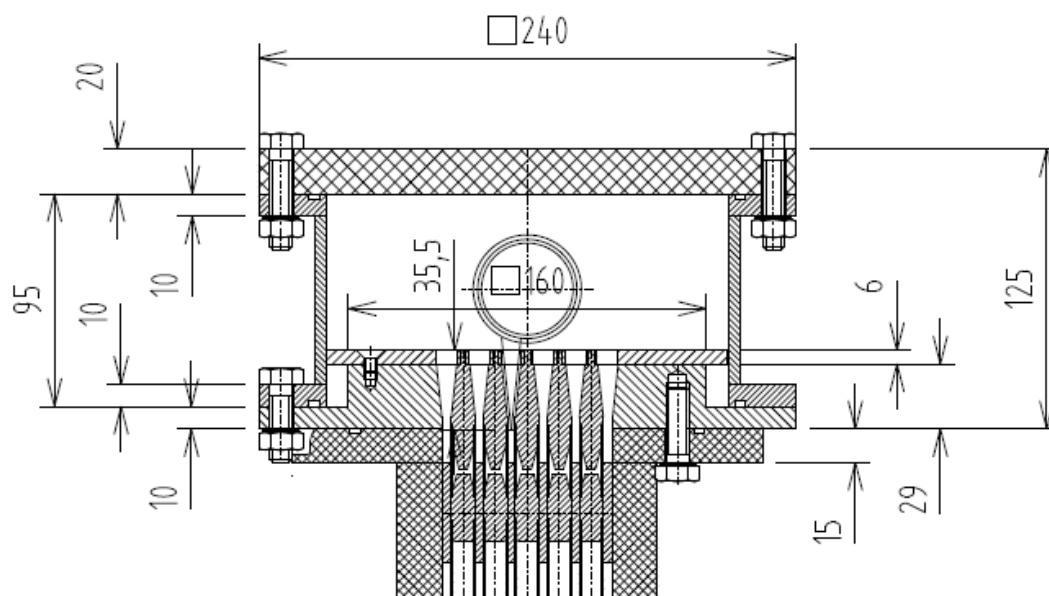
A ST2 possui sistemas de fixação do feixe de varetas idêntico ao utilizado na ST1 exceto pelas dimensões envolvidas. A usinagem das peças usadas para fixar o feixe de varetas no interior da ST2 foi feita pela INB - Indústrias Nucleares do Brasil. Algumas peças utilizadas para montagem dessa estrutura foram produzidas no LTHN com auxílio de uma impressora 3D. Foram realizadas algumas tentativas inclusive para substituir esses pinos e placas metálicas presentes na estrutura por materiais impressos. A utilização dessas peças se mostrou bastante viável visto que pôde atender às exigências da montagem. Na Fig. 3.5 estão algumas peças impressas que foram testadas e modificadas até alcançarem o nível desejado. Na Fig. 3.6 é possível ver a estrutura da caixa superior da seção de testes onde o feixe de varetas está acoplado.

Figura 3.5 – Peças impressas utilizadas na ST2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.6 – Detalhe do projeto da caixa superior.

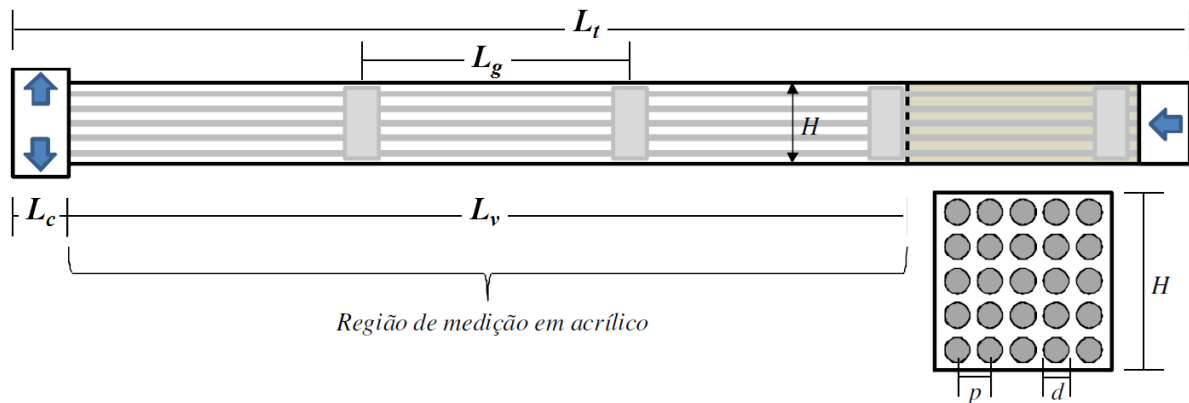


Fonte: Elaborado por Edson Ribeiro ¹.

Na Fig. 3.7 estão representadas as principais dimensões utilizadas nas seções ST1 e ST2. A Tab. 3.1 sintetiza tais informações.

¹ Técnico e projetista no CDTN/CNEN.

Figura 3.7 – Principais dimensões das seções de testes.



Fonte: (SANTOS, 2012)

Tabela 3.1 – Dados das seções de testes

Dimensão	ST1		ST2	
	Valor [mm]	Incerteza [mm]	Valor [mm]	Incerteza [mm]
L_t	2350,0	1,0	2289,0	1,0
L_v	1850,0	1,0	1615,1	1,0
L_g	523,0	1,0	545,0	1,0
L_c	200,0	0,5	200,0	0,5
H	68,35	0,05	76,2	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a construção da ST2 foram feitas algumas melhorias na montagem que permitiram a realização dos experimentos de maneira mais ágil em comparação àqueles que foram realizados na ST1. Uma dessas melhorias se refere ao fato de a ST2 possuir peças moduladas possibilitando maior mobilidade na troca das peças. Ou seja, na ST1 para alterar as posições da grade era necessário desacoplar a ST1 por inteiro do circuito e para isso foi preciso o auxílio de uma ponte rolante devido à massa envolvida. A ST2 é formada pela combinação de três peças móveis porém mais leves do que a ST1, portanto sem a necessidade de utilizar uma ponte rolante para o desacoplamento da ST2 do circuito. Todas as peças que compõem o envoltório da ST2 (laterais e flanges) foram construídos de acrílico tornando mais leve a estrutura. Essas alterações ainda permitirão que em trabalhos futuros não seja necessário desacoplar toda a estrutura do circuito, pois foram construídas outras peças móveis que poderão ser convenientemente trocadas para obtenção das posições de medição em relação à grade.

As estruturas presentes no topo das duas seções de testes (ST1 e ST2) que permitem medir as duas componentes dos perfis de velocidades \bar{u} e \bar{v} são semelhantes. A medição pela lateral das componentes \bar{w} e \bar{v} foi realizada de maneira semelhante. No entanto, o passo e

diâmetro das varetas presentes na ST2 são 16,07% e 17,6% respectivamente maiores do que as dimensões da ST1, isso resultou numa região de medição maior.

Outra diferença entre as duas montagens está no número de acessos disponíveis (*taps*) nas laterais destinadas a conectar os engates rápidos dos transdutores diferenciais de pressão utilizados. Na ST1, 19 orifícios foram feitos em uma das duas laterais de aço inoxidável e na ST2 foram feitos 4 orifícios para medição das perdas de pressão em uma lateral de acrílico.

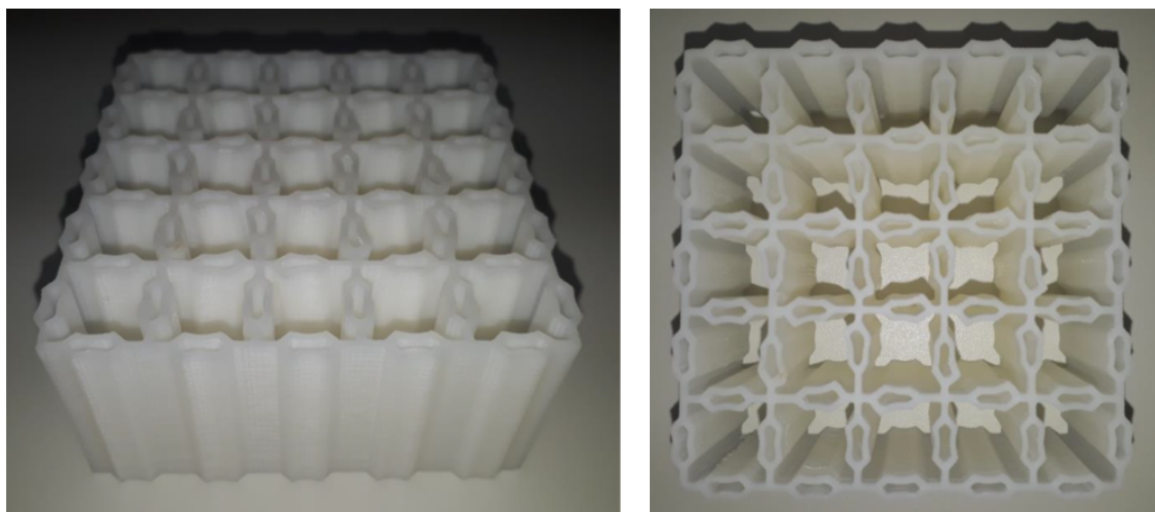
3.1.3 As grades espaçadoras utilizadas

Foram verificadas as características termo-hidráulicas de três grades espaçadoras distintas. Para a ST1 foi avaliado um dos tipos de grades espaçadoras comerciais presentes em ECN de reatores *PWR*. Na ST2, foram avaliados dois tipos de grades espaçadoras, sendo um modelo comercial utilizado em um reator *PWR* e a outra grade que foi construída no próprio laboratório através da técnica de prototipagem rápida.

Ao longo da ST1 foram utilizadas 4 grades espaçadoras comerciais do tipo com aletas, semelhantes à grade (A) apresentada na Fig. 2.4. Os elementos que promovem a mistura do escoamento de água ao passar por essas grades são as aletas. Estão distribuídas no topo da grade e geram dois tipos de movimentos laterais no escoamento. Há movimentos cruzados e rotacionais, vórtices que ocorrem no interior dos subcanais.

A grade utilizada na ST2 também possui elementos capazes de promover misturas no escoamento a jusante da grade espaçadora. Porém, ao invés de utilizar aletas em sua estrutura, as recirculações ocorrem devido aos desvios do escoamento nas faces internas da grade. Essa também é comercial assim como a grade utilizada na ST1, porém é do tipo de canais e é semelhante à grade (B) apresentada na Fig. 2.4. A grade impressa testada na ST2 pode ser vista na Fig. 3.8.

Figura 3.8 – Grade Impressa Testada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa grade impressa foi elaborada para ser do mesmo modelo que a avaliada do tipo canal. Um dos fatores que justificaram esse modelo de grade está relacionado com a integridade estrutural dos dispositivos de mistura, pois, o modelo com aletas poderia sofrer deformações, caso o material testado não fosse estruturalmente consistente. Então foram testados dois tipos de técnicas para fabricação da grade espaçadora impressa, uma direta e outra indireta.

A primeira técnica avaliada foi a *FDM - Fused Deposition Modelling* - Modelagem por Fusão e Deposição através de uma impressora 3D. Consistiu na obtenção direta da grade após ter sido confeccionada camada por camada através da fusão de filamento. Para confecção dessa grade impressa, foram testados pelo menos quatro tipos de materiais sendo eles, *ABS*, *HIPS*, *PLA*¹ e *TRITAN*². O primeiro material testado foi o *ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene* - Acrilonitrila Butadieno Estireno, pois, alguns trabalhos na literatura como, por exemplo, em [Ylönen \(2013\)](#) haviam utilizado esse mesmo material. No entanto, o *HIPS - High Impact Polystyrene* - Poliestireno de Alto Impacto, foi o material que melhor atendeu as exigências e por isso foi o escolhido para confecção da grade impressa. Essa foi a técnica escolhida para fabricação do protótipo de grade impressa testada.

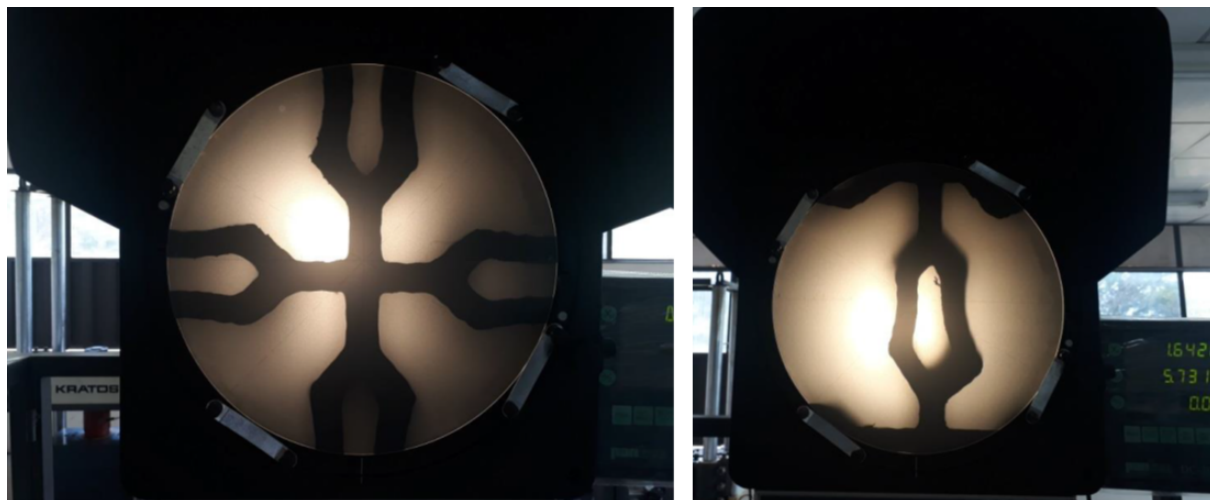
Após a escolha da técnica e dos materiais apropriados, a grade foi fabricada e em seguida foram necessários outros cuidados com relação à possíveis defeitos de fabricação. Por exemplo a deposição excessiva de material no interior dos canais da grade. Então, o excesso foi lixado e com o auxílio de um projetor de perfil foi possível visualizar melhor esses defeitos. Na Fig. 3.9 pode ser visto detalhes de estruturas presentes na grade, visualizadas

¹ *PLA - Polylactic Acid* - Ácido Polilático

² *TRITAN* é mais conhecido como Nylon

a partir de um projetor de perfil.

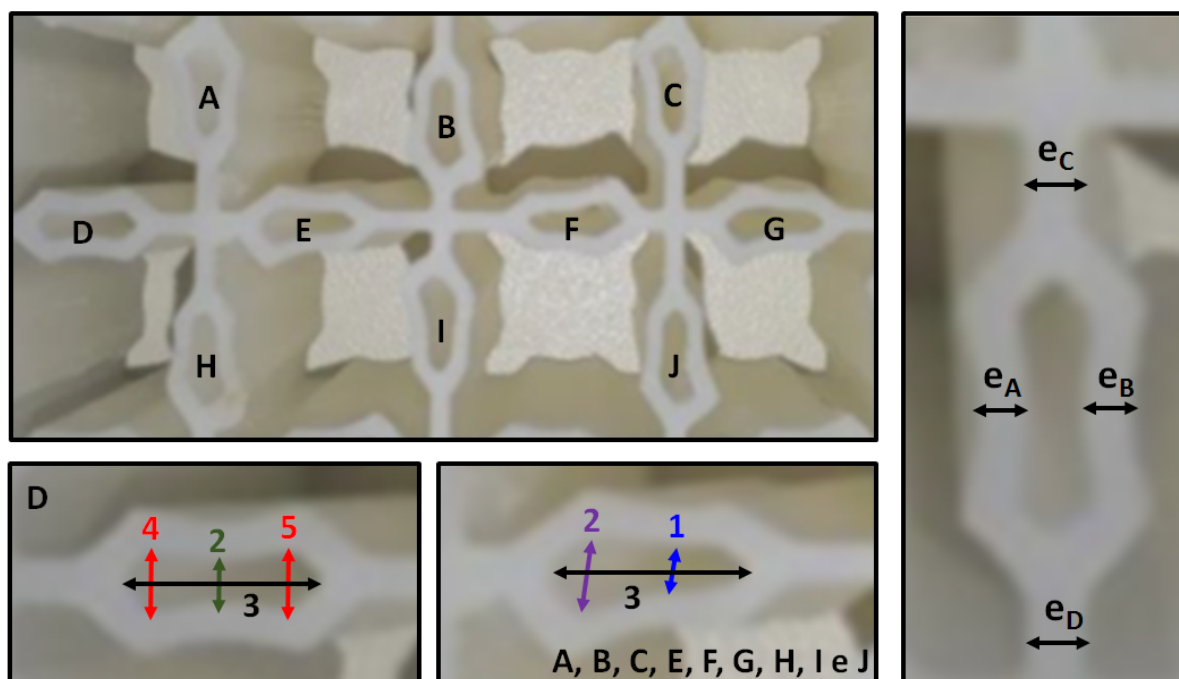
Figura 3.9 – Detalhes de estruturas da grade impressa observadas através de um projetor de perfil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o auxílio do projetor de perfil as dimensões da grade foram verificadas e a região de medição mapeada. Um esquema do mapeamento desses elementos pode ser visto na Fig. 3.10, os dados são apresentados nas Tabs. 3.2 e 3.3. No Anexo A podem ser vistos os projetos da grade antes (Fig. A.1) e com detalhes da verificação pós fabricação (Fig. A.2).

Figura 3.10 – Mapeamento dos elementos da grade impressa nas proximidades da região de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.2 – Dados da medida dos elementos localizados no topo da grade impressa e indicados na Fig. 3.10

Elementos [mm]	Topo					Base			
	1	2	3	4	5	2	3	4	5
A	1,49	2,31	5,56	x	x	1,28	5,95	1,58	1,65
B	1,37	2,33	5,56	x	x	1,33	6,03	1,75	1,68
C	1,34	2,3	5,74	x	x	1,33	6,03	1,75	1,68
D	x	1,58	6,05	1,97	1,95	1,39	5,66	1,86	1,82
E	1,51	2,45	5,97	x	x	1,46	5,97	1,85	1,89
F	1,41	2,44	5,69	x	x	1,4	5,83	1,71	1,71
G	1,51	2,43	5,71	x	x	1,33	5,71	1,77	1,75
H	1,42	2,34	5,73	x	x	1,33	6,12	1,77	1,8
I	1,33	2,15	5,76	x	x	1,29	5,98	1,61	1,63
J	1,41	2,28	5,87	x	x	1,26	5,94	1,57	1,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

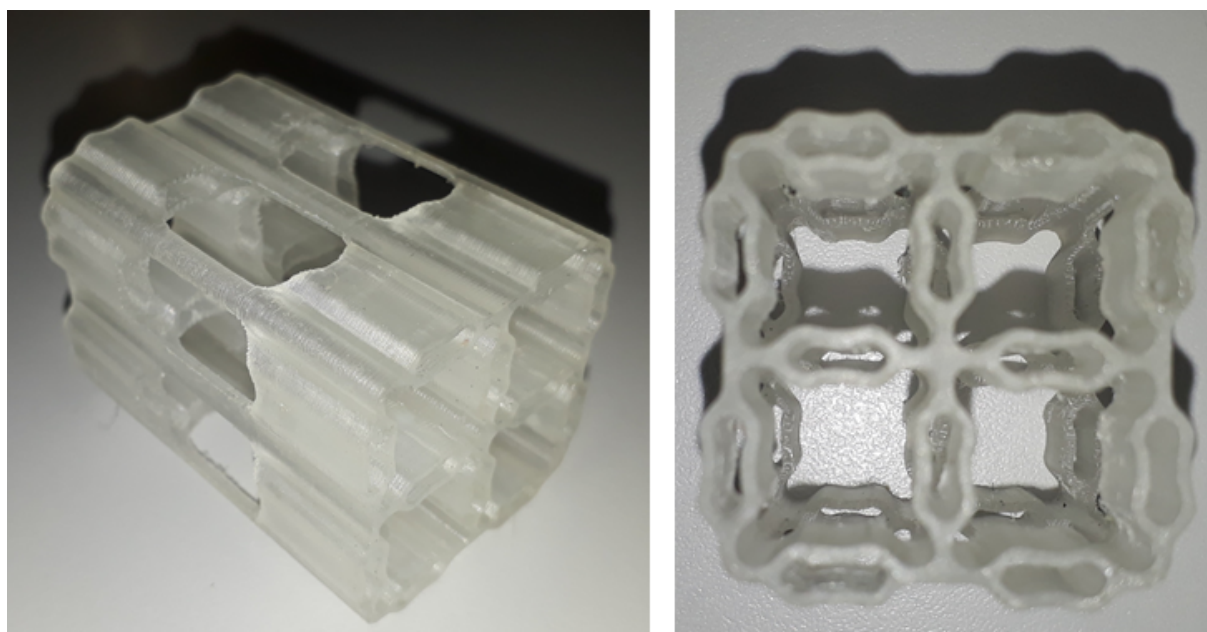
Tabela 3.3 – Dados da medida das espessuras das regiões da grade impressa indicadas na Fig. 3.10.

Espessura	Horizontal	Vertical
e_A	0,98	1,14
e_B	1,00	1,13
e_C	1,16	1,26
e_D	1,15	1,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma segunda técnica foi avaliada para fabricação de grade utilizando impressão 3D. Essa segunda técnica consistiu na confecção de um molde construído em impressora 3D a ser preenchido por uma cola acrílica (do tipo S330) e posteriormente, esse molde foi dissolvido em água. Na Fig. 3.11 é possível ver uma grade 2x2 fabricada com essa técnica.

Figura 3.11 – Grade 2x2 fabricada com o uso da técnica do molde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

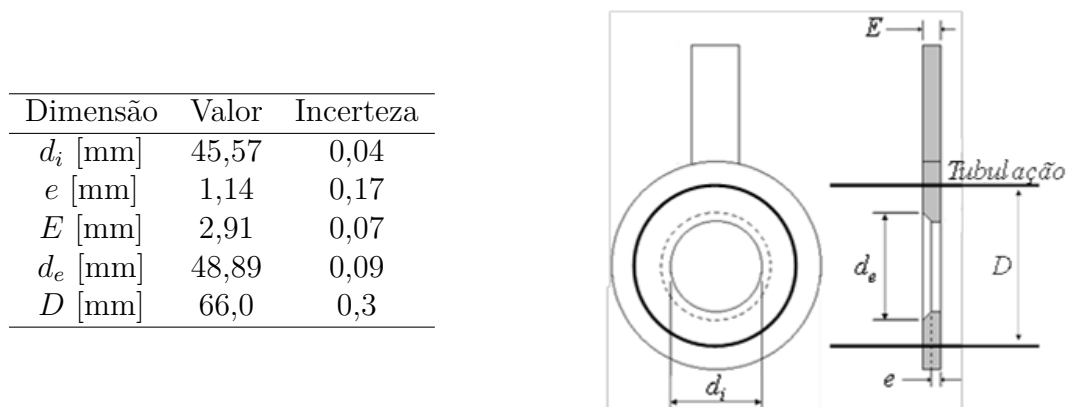
O material utilizado para dissolução foi o PVA - *Polyvinyl Alcohol* - poliacetato de vinila. Essa técnica se mostrou promissora e poderá ser aplicada em trabalhos futuros.

3.2 Instrumentação

3.2.1 Sistemas de medição da vazão, pressão e temperatura

A vazão foi determinada através da perda de carga causada por uma placa de orifício confeccionada segundo a norma ISO 5167-1 (5167-1, 1991). Podem ser observados na Fig. 3.12 os principais dados da placa de orifício utilizada. A partir da vazão, foram determinados os números de Reynolds para cada teste específico.

Figura 3.12 – Principais dimensões da placa de orifício utilizada.



Fonte: (SANTOS, 2012)

Para determinação e monitoramento da pressão no circuito hidráulico foram utilizados transmissores diferenciais de pressão. Na tabela 3.4 são apresentados os dados dos transmissores utilizados neste trabalho. Esses transmissores diferenciais de pressão foram calibrados segundo procedimentos desenvolvidos no próprio laboratório (NAVARRO, 2011).

Tabela 3.4 – Transmissores diferenciais de pressão

Transmissor	Faixa [mbar]	Incerteza de calibração [mbar]
0	6000,00	39,65
1	1000,00	5,79
2	350,00	3,43
3	120,00	0,76

Fonte: Elaborado pelo autor.

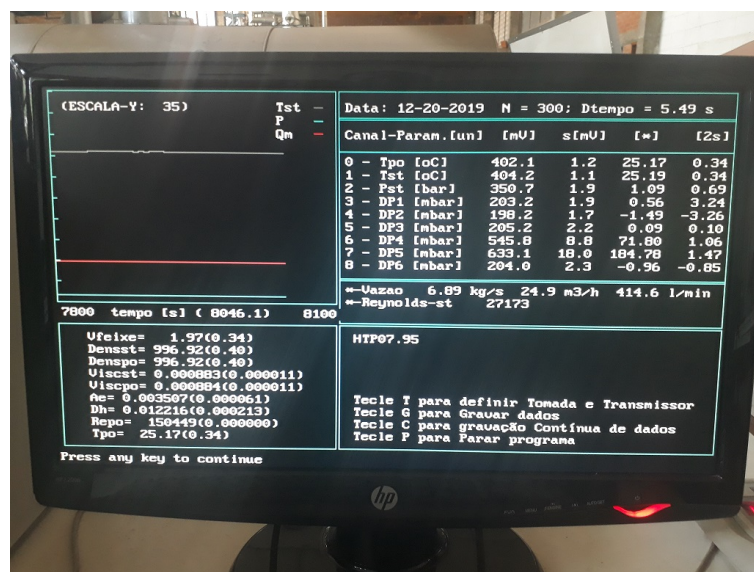
O transmissor *zero* foi utilizado para acompanhar e registrar a pressão de entrada na seção de testes. O procedimento experimental utilizado para monitorar o diferencial de pressão na seção de testes foi baseado na metodologia utilizada por Chun e Oh (1998) e In, Oh e Chun (2002).

As temperaturas nas regiões da placa de orifício e seção de testes foram mensuradas por meio de dois termopares do tipo J. A faixa de operação dos termopares foi de 0 a 100°C

e a incerteza obtida foi de $\pm 0,48^{\circ}\text{C}$. Para monitoramento da temperatura ambiente foi utilizado um termopar do tipo K cuja incerteza corresponde a $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$. Esses termopares foram calibrados seguindo procedimentos internos utilizados pelo laboratório (NAVARRO, 2012).

Os sinais provenientes da instrumentação utilizada para a aquisição de dados relacionados com a pressão e temperatura foram captados por um sistema de amplificação (placa PCLD-789D). Essa placa possui um ganho de 50 com $\pm 0,0244\%$ da faixa. Foi utilizado um sistema de conversão de sinal (PCL-818HD) com $1 \pm 0,01\%$ de ganho. Ambas as placas utilizadas são Advantech. A conversão final de sinal para valores com as unidades desejadas foi obtida por um programa escrito na linguagem BASIC desenvolvido pela equipe do próprio laboratório. Esse programa recebeu o nome de FEIXE. Com esse programa foi possível acompanhar em tempo real os parâmetros relacionados ao escoamento. Por exemplo, as temperaturas nas regiões da seção de testes e placa de orifício, pressão do sistema, vazão e perda de pressão obtida pelos transdutores de pressão. A tela de monitoramento dessas grandezas é apresentada na Fig. 3.13.

Figura 3.13 – Tela de monitoramento dos principais parâmetros do escoamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que os dados apresentados na Fig. 3.13 correspondem à uma condição de regime permanente, onde, a temperatura (tst), pressão (p) e vazão (Qm) na região da seção de testes alcançaram a estabilidade necessária para início do teste.

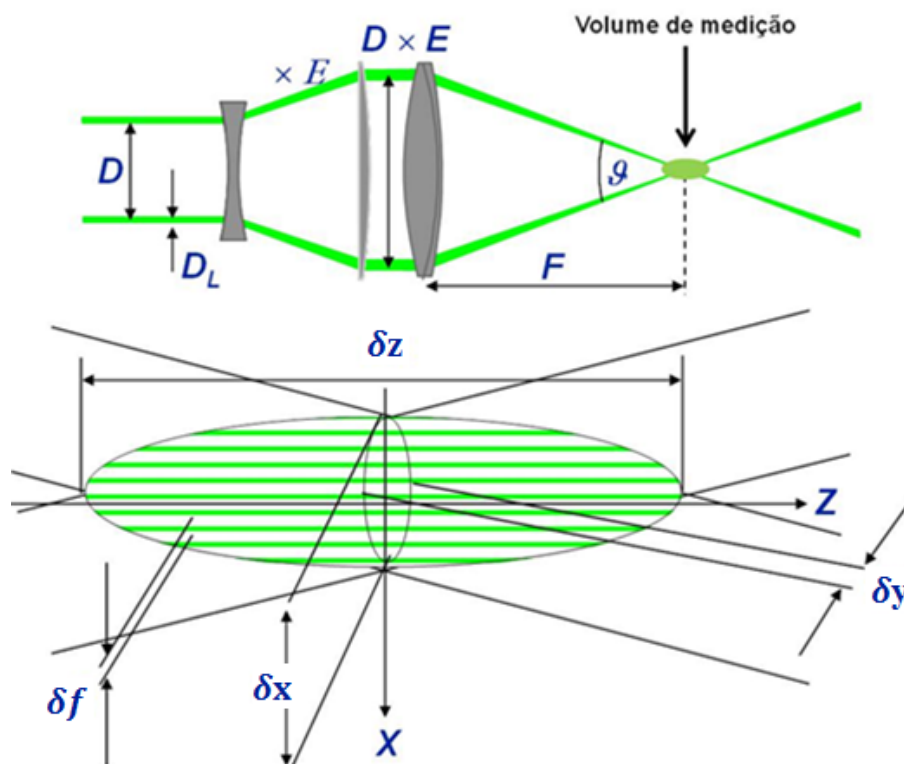
3.2.2 Sistema de medição da velocidade

Os perfis de velocidade foram medidos com um *LDV-2D* da marca Dantec. O *LDV-2D* mede duas componentes das velocidades vetoriais de partículas que seguem o

escoamento. Essas partículas servem de traçadoras cujas principais características são possuir a mesma densidade do fluido de trabalho e boa reflectância. As partículas utilizadas nos testes foram a poliamida de $5\mu m$ de diâmetro que são dispersas na água e seguem o escoamento até chegarem à região de medição. Quando as partículas passam pelo foco dos feixes do laser projetados na água, espalham a luz para todas as direções. Então a luz espalhada é captada e amplificada em um fotodetector. A luz espalhada é constituída por um espectro de frequências. A diferença entre o espectro de frequências da luz emitida e da luz espalhada é processada e convertida para valores de velocidades através do programa *BSA Flow* da Dantec (DANTEC, 2006).

O foco dos dois pares de Laser do *LDV* projetados no escoamento constituem em um volume de medição semelhante ao da Fig. 3.14. Esse volume de medição possui um formato elipsoidal cujas dimensões podem ser representadas por δx , δy e δz . Esse volume de medição pode ter as suas dimensões alteradas de acordo com a lente escolhida e com a mudança de meio. No Quadro 2 estão representadas algumas das principais propriedades ópticas e geométricas do volume de medição, projetado no ar, associadas a três tipos distintos de lentes. Vale ainda mencionar que cada par dos feixes projetados no escoamento formam um elipsoide. Portanto são projetados dois volumes de medições no escoamento.

Figura 3.14 – Dimensões do volume de medição



Fonte: Adaptado de (DANTEC, 2006)

Para medição das componentes de velocidade pela lateral da seção de testes foi utilizada uma lente de distância focal igual a 400,7 mm e para medição das componentes

Quadro 2 – Configurações ópticas e propriedades geométricas do volume de medição projetado no ar.

$\lambda = 514,5 \text{ nm}, D_L = 2,2 \text{ mm}, 2d = 38 \text{ mm}$				
Distância focal das lentes (F)	[mm]	160	400	600
Ângulo de encontro dos feixes (θ)	[°]	13,54	5,44	3,63
Raio da cintura do feixe ($D_L/2$)	[mm]	0,024	0,060	0,089
Diâmetro do volume de medição (δx ou δy)	[mm]	0,05	0,12	0,18
Comprimento do volume de medição (δz)	[mm]	0,40	2,51	5,65
Espaçamento entre as franjas de interferência (δf)	[μm]	2,18	5,42	8,13
Número de franjas (N)	-	22	22	22

Fonte: (ZHANG, 2010)

de velocidade através do topo da seção de testes foi utilizada uma lente de distância focal igual a 159,6 mm. Note que estas lentes possuem valores bem próximos aos apresentados no Quadro 2.

Pode-se observar no quadro 2 que dependendo da lente escolhida as dimensões do volume de medição também irão alterar.

As dimensões dx , dy , e dz do volume de medição podem ser obtidas a partir das Eq. 3.1, Eq. 3.2 e Eq. 3.3 (ZHANG, 2010).

$$\delta x = 4F\lambda/\pi ED_L \cos(\theta/2) \quad (3.1)$$

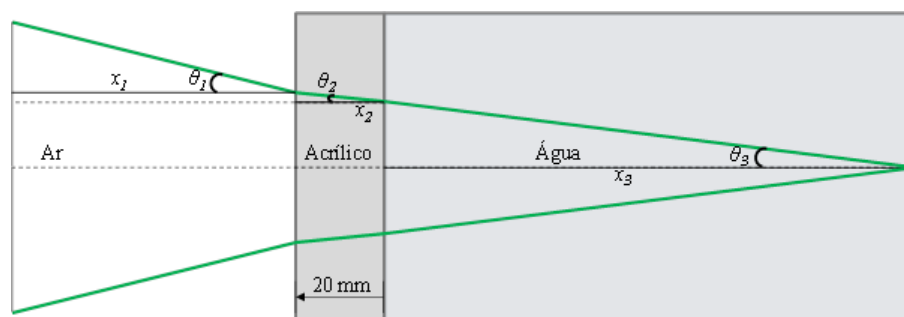
$$\delta y = 4F\lambda/\pi ED_L \quad (3.2)$$

$$\delta z = 4F\lambda/\pi ED_L \sin(\theta/2) \quad (3.3)$$

onde, (F) é a distância focal da lente, (λ) é o comprimento de onda do laser, (E) é o fator de expansão, (D_L) é a espessura do feixe de laser.

Além das dimensões do volume de medição, a distância focal das lentes também é alterada devido a esse fenômeno. Na Fig. 3.15 pode ser observado como a distância focal poderá ser influenciada pela mudança de meios.

Figura 3.15 – Refração dos feixes laser do LDV



Fonte: (SANTOS, 2012)

As dimensões do volume de medição são alteradas devido ao fenômeno da refração da luz (ZHANG, 2010). Então foi necessário realizar outras correções devido a esse fenômeno. Nos Quadros 3 e 4 são apresentadas as configurações e propriedades geométricas do volume de medição na água cujos feixes possuem comprimentos de ondas iguais a 532nm e 561nm , respectivamente.

Quadro 3 – Configurações ópticas e propriedades geométricas do volume de medição na água para $\lambda = 532\text{nm}$

$\lambda = 532\text{ nm}, D_L = 2,2\text{mm}, 2d = 38,78\text{mm}$			
Distância focal das lentes (F)	[mm]	159,6	400,7
Ângulo de encontro dos feixes (θ)	[°]	5,20	2,08
Diâmetro do volume de medição (δx ou δy)	[mm]	0,05	0,12
Comprimento do volume de medição (δz)	[mm]	0,54	3,39

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 4 – Configurações ópticas e propriedades geométricas do volume de medição na água para $\lambda = 561\text{ nm}$

$\lambda = 561\text{ nm}, D_L = 2,2\text{mm}, 2d = 39,02\text{mm}$			
Distância focal das lentes (F)	[mm]	159,6	400,7
Ângulo de encontro dos feixes (θ)	[°]	5,23	2,10
Diâmetro do volume de medição (δx ou δy)	[mm]	0,05	0,13
Comprimento do volume de medição (δz)	[mm]	0,57	3,56

Fonte: Elaborado pelo autor

O volume de medição na água (Quadro 3 e Quadro 4) é em média 1,5 vezes maior do que o volume de medição no ar (Quadro 2). Porém, o volume de medição obtido com a lente de distância focal igual a $400,7\text{mm}$ é cerca de 40 vezes maior do que o obtido com a lente de $159,6\text{mm}$. Isto é, se o volume de medição fosse uma esfera, o seu raio seria de $0,39\text{mm}$ e $0,11\text{mm}$ para as lentes de distância focal de $400,7\text{mm}$ e $159,6\text{mm}$, respectivamente.

As mudanças relacionadas com as transições de meios podem ser calculadas considerando a Lei de Snell-Descartes (lei da refração) representada pela Eq. 3.4.

$$\text{sen}(\beta) = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}(\alpha) \quad (3.4)$$

O índice de refração da água foi calculado a partir da Eq.3.5 de acordo com o *IAPWS - International Association for the Properties of Water and Steam* (HARVEY; GALLAGHER; SENGER, 1998).

$$n_{\text{água}} = \sqrt{\frac{2\bar{\rho}C + 1}{1 - \bar{\rho}C}} \quad (3.5)$$

Onde C é dado por,

$$C = a_0 + a_1\bar{\rho} + a_2\bar{T} + a_3\bar{\lambda}^2\bar{T} + \frac{a_4}{\bar{\lambda}^2} + \frac{a_5}{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_{UV}^2} + \frac{a_5}{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_{IR}^2} + a_7\bar{\rho}^2 \quad (3.6)$$

A Tab. 3.5 fornece os parâmetros necessários para serem utilizados na Eq. 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros para o cálculo de C.

$a_0 = 0,244257733$	$a_1 = 9,74634476e - 3$	$a_2 = -3,73234996e - 3$
$a_3 = 2,68678472e - 4$	$a_4 = 1,58920570e - 3$	$a_5 = 2,45934259e - 3$
$a_6 = 0,900704920$	$a_7 = -1,66626219e - 2$	$\bar{\lambda}_{UV} = 0,2292020$
$\bar{\lambda}_{IR} = 5,432937$	$\bar{T} = T/T^*$	$\bar{\rho} = \rho/\rho^*$
$\bar{\lambda} = \lambda/\lambda^*$	$T^* = 273,15K$	$\rho^* = 1000kg/m^3$
$\lambda^* = 589nm$		

Fonte: (HARVEY; GALLAGHER; SENGER, 1998).

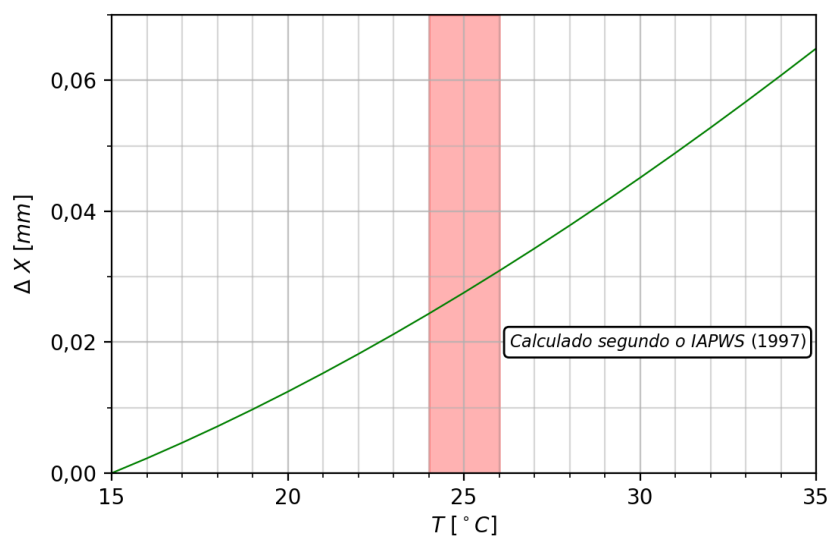
A Eq. 3.5 é válida para as condições cujos parâmetros possuem as seguintes faixas:

- Temperatura de $-12^\circ C \leq T \leq 500^\circ C$.
- Massa específica de $0kg/m^3 \leq \rho \leq 1060kg/m^3$.
- Comprimento de onda de $200nm \leq \lambda \leq 1100nm$.

Após a aplicação da Eq. 3.5 para os lasers utilizados no *LDV*, considerando a temperatura da água igual a $25^\circ C$ na pressão de 1,09 bar, foram obtidos os valores de $n_{\text{água}}$ igual a $1,3384 \pm 5x10^{-3}$ e $n_{\text{água}}$ de $1,3373 \pm 5x10^{-3}$, para os comprimentos de onda de 532 nm e 561 nm, respectivamente.

A partir da Eq. 3.5 foi avaliada a influência da variação de temperatura na posição do volume de medição no interior da seção de testes. A relação entre essas duas grandezas pode ser observada na Fig. 3.16.

Figura 3.16 – Relação entre a temperatura da água e a posição do volume de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

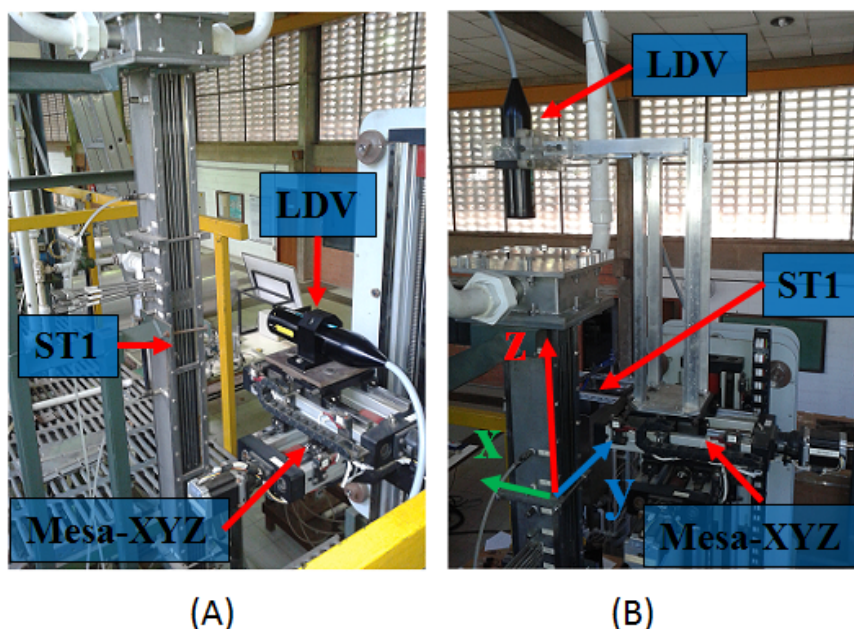
Ao observar a Fig. 3.16 nota-se que a variação de temperatura durante os testes ($25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) não influenciou de maneira significativa na mudança de posição do volume de medição devido aos efeitos da refração da luz. Vale ainda mencionar que a ordem de grandeza da variação de posição obtida durante os testes é semelhante ao do particulado utilizado (poliamida de $5\mu\text{m}$).

A metodologia apresentada para medição dos perfis de velocidades com o uso de um *LDV-2D*, apresentada por Chang, Kim e Song (2014), foi semelhante à utilizada neste trabalho. Esses pesquisadores descreveram cuidadosamente a maneira como o volume de medição altera devido à mudança de índice de refração e como a alteração das dimensões do volume de medição podem influenciar nas medições.

No entanto, o efeito de interferência entre as varetas é um desafio no que se refere ao uso dessas técnicas de medição com *LDV* e *PIV*. Uma das maneiras encontradas para solucionar este problema é a utilização de varetas de *fluorinated ethylene-propylene* – *FEP*. Essa resina em combinação com um fluido cujo índice de refração seja semelhante, reduz os ruídos inseridos nos sinais e também evita ter que corrigir a transição entre os meios. Essa técnica é chamada de *MIR - Matched Index Refraction* - Casamento de Índices de Refração. Alguns autores contribuíram no desenvolvimento deste estudo: Conner et al. (2011), In et al. (2015) e Nguyen et al. (2018). Outro desafio associado à investigação experimental em feixes de varetas é o alinhamento entre os feixes do *LDV* com a região de interesse. O método de interferência dos feixes do *LDV* com as varetas foi utilizado para alinhar os feixes do *LDV* com a região de medição. Na seção 3.8 será realizada uma abordagem mais aprofundada sobre esse tema.

A sonda *LDV* foi acoplada à um sistema de deslocamento automático em três dimensões (*xyz*) de alta precisão ($\pm 0,05mm$). Na Fig. 3.17 estão representadas as duas maneiras utilizadas para o acoplamento da sonda *LDV* na mesa-xyz.

Figura 3.17 – Posicionamento da sonda *LDV-2D* em relação à seção de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma os feixes laser incidiram na seção de testes através de duas posições distintas. Em (A) a sonda *LDV-2D* está posicionada pela lateral da seção de testes e em (B) pelo topo. Na seção 3.3 e 3.4 será apresentada a matriz experimental definida para ambos os posicionamentos (A) e (B).

Nas seções 3.3 e 3.4 serão descritos os procedimentos para medição dos perfis de velocidade pela lateral e pelo topo da seção de testes respectivamente. Os resultados referentes aos perfis de velocidades \bar{w} e \bar{v} apresentados para a sonda *LDV-2D* posicionada pela lateral da ST1 foram obtidos do trabalho de Castro (2016). Esses resultados serão comparados com as medições obtidas através do acoplamento da sonda pelo topo da ST1 e também com resultados na ST2.

3.3 Metodologia de medição dos perfis de velocidades pela lateral da ST2

3.3.1 Medição das componentes de velocidades \bar{w} e \bar{v}

Através da lateral da seção de testes foram mensuradas as componentes de velocidade (\bar{w}) e (\bar{v}) para quatro alturas a jusante das grades 1, $22Dh$, 2, $44Dh$, 7, $33Dh$ e

$18,73Dh$, onde Dh é o diâmetro hidráulico da seção de testes. Estes testes foram realizados para $Re = 27 \times 10^3$. A componente de velocidade \bar{w} está orientada ao longo da direção z e a componente \bar{v} na direção y . Esses eixos estão definidos na Fig. 3.19. A seguir serão apresentados os passos para satisfazer essas condições.

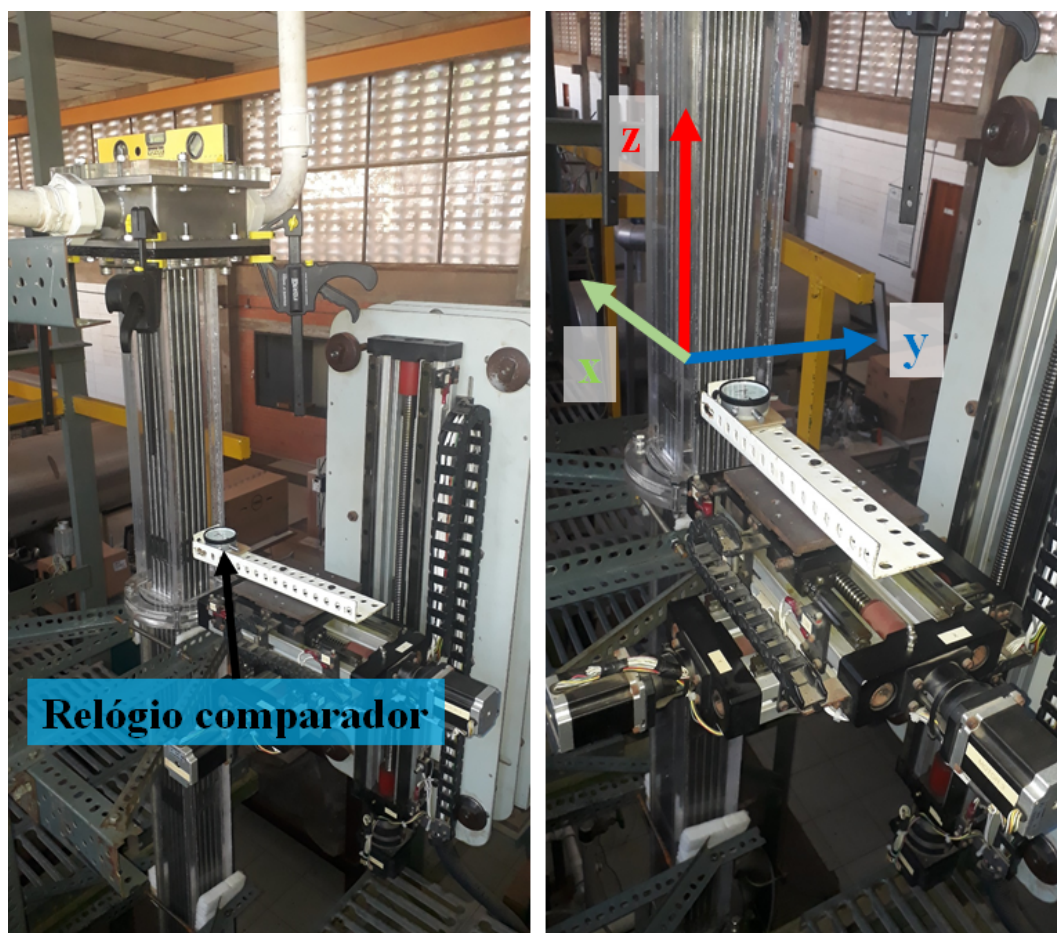
3.3.2 Procedimento de alinhamento do *LDV* pela lateral da seção de testes

Esse procedimento de alinhamento do *LDV* posicionado pela lateral da seção de testes foi aplicado na ST2. O procedimento está dividido em duas etapas.

Na primeira etapa de alinhamento da sonda *LDV* com a seção de testes foi realizada uma criteriosa manobra de acoplamento da sonda com a mesa-xyz. Durante essa fixação foram utilizados alguns instrumentos de precisão para ajustar e verificar o alinhamento da sonda junto com a mesa-xyz. Os instrumentos de precisão utilizados foram: esquadro de precisão, paquímetro e relógio comparador.

Antes de acoplar a sonda *LDV* na mesa-xyz, fixou-se o relógio comparador na mesa para alinhamento dos eixos da mesa-xyz com as faces externas da seção de testes, conforme pode ser visto na Fig. 3.18.

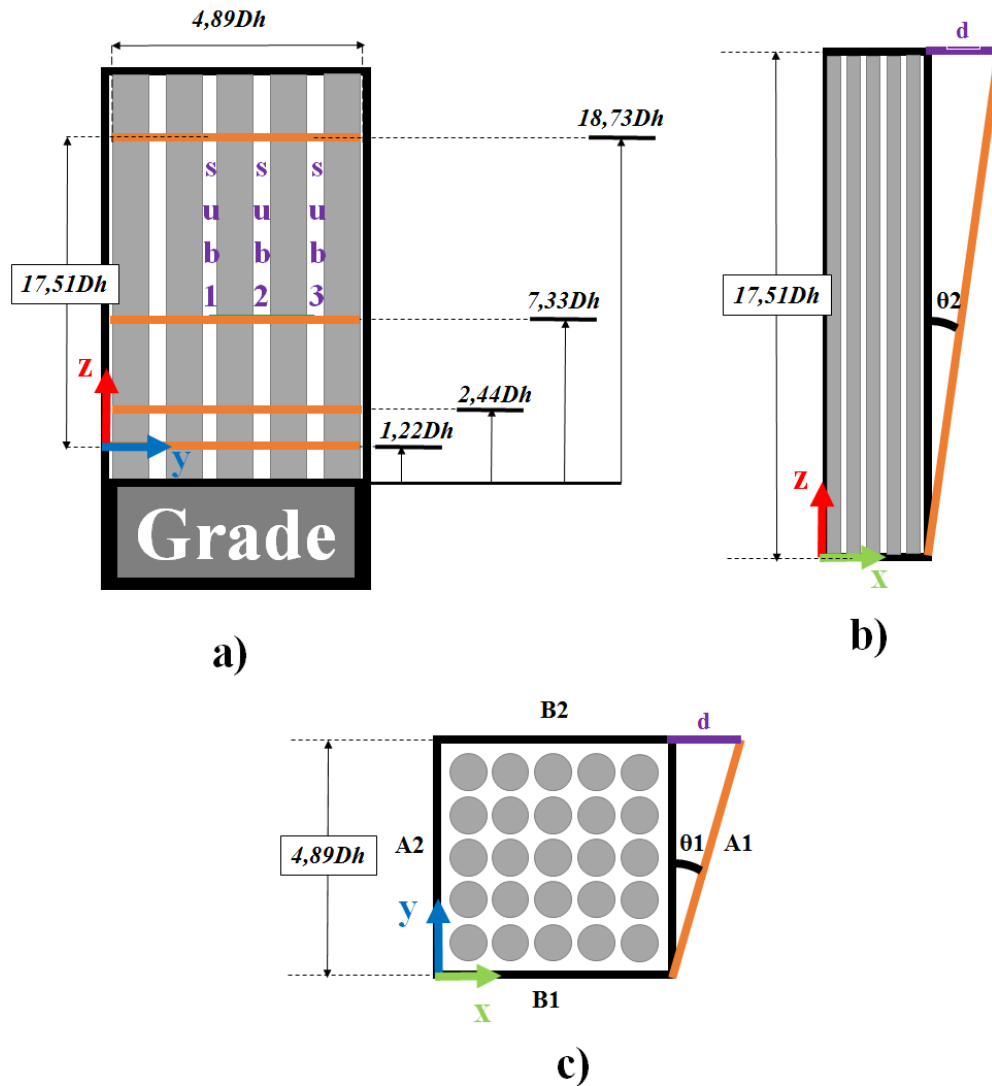
Figura 3.18 – Montagem de um relógio comparador acoplado na mesa-xyz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após fixar o relógio comparador na mesa-xyz, foram realizadas algumas medições para alinhar o eixo da mesa com as faces externas da seção de testes. Na Fig. 3.19 estão representadas as posições utilizadas pelo relógio comparador para realizar o processo de alinhamento.

Figura 3.19 – Deslocamento do relógio comparador ao longo da seção de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na fig 3.19 a) é apresentada a vista frontal da seção de testes e das regiões acima da grade espaçadora por onde o relógio comparador se deslocou. O relógio comparador se deslocou com auxílio da mesa-xyz em quatro alturas normalizadas: $1,22Dh$, $2,44Dh$, $7,33Dh$ e $18,73Dh$. Essas alturas normalizadas foram escolhidas para a realização dos testes. Inclusive foram as mesmas alturas mensuradas em Castro (2016). Porém, não foram realizadas medições para a altura normalizada $18,73Dh$ através do topo da ST1. Para cada altura normalizada, o relógio se deslocou uma distância igual a $4,89Dh$ ao longo do eixo- y . Pelo eixo- z o relógio se deslocou $17,51Dh$. Nas Fig. 3.19 b) e c) estão representadas as distâncias percorridas pelo relógio comparador, considerando os desalinhamentos a serem corrigidos entre os planos- zx e yx com os eixos correspondentes aos da mesa-xyz. Devido ao desalinhamento, foi possível detectar uma variação d em cada um desses pares ordenados. Para cada uma das variações d mensuradas foram obtidos os ângulos θ_1 e

θ_2 . De posse desse valor associado ao desalinhamento dos eixos foi possível corrigi-los na mesa-xyz, pois a mesma possui um sistema de ajuste. Na Tab. 3.6 estão representados os valores obtidos após ter sido realizado o ajuste na mesa-xyz.

Tabela 3.6 – Ângulos associados ao procedimento de alinhamento da mesa-xyz com a seção de testes

z	θ_1 [°]	θ_2 [°]	$\theta_{médio}$ [°]
1, 22Dh	0,019	0,031	0,025
2, 44Dh	0,19	0,0057	0,098
7, 33Dh	0,016	0,029	0,022
18, 73Dh	0,095	0,0023	0,049

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do alinhamento entre os eixos da mesa-xyz com a seção de testes, foi necessário verificar outros alinhamentos, como o do feixe de varetas com a grade espaçadora, conforme pode ser observado na Fig. 3.20.

Figura 3.20 – Verificação do alinhamento entre o feixe de varetas e a grade espaçadora.



Fonte: Elaborado pelo autor.

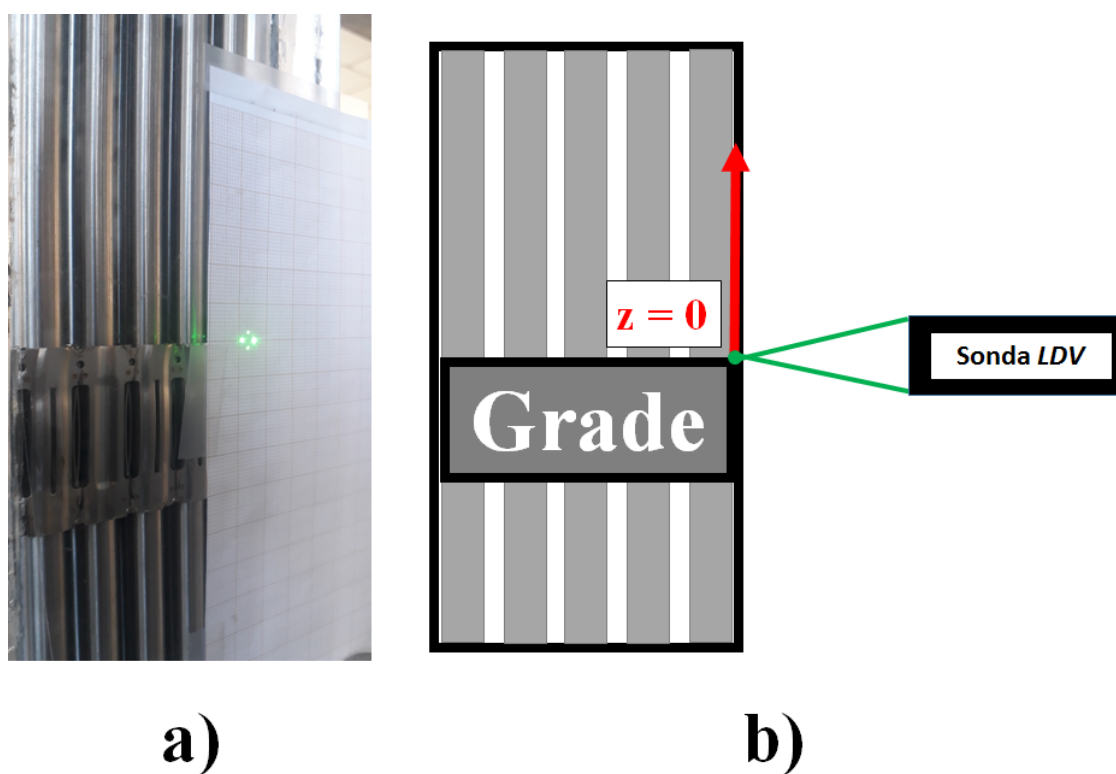
Após ter sido verificado o alinhamento entre os eixos da mesa-xyz com a seção de testes e dos feixes de varetas com a grade espaçadora, o mesmo foi feito para alinhar os feixes laser do *LDV* com a região de medição entre o feixe de varetas.

Com a sonda *LDV* fixada na mesa-xyz inicia-se a segunda parte dessa metodologia de alinhamento. Nessa etapa, a principal tarefa consiste em utilizar a interferência dos feixes do laser com três superfícies: 1) com o feixe de varetas, 2) com a parede interna do acrílico e 3) com a grade espaçadora. Utilizou-se recurso visual e também os parâmetros dos sinais coletados do laser no programa *BSA FLOW* ao acompanhar a movimentação da mesa-xyz, onde a sonda *LDV* está acoplada. Foram necessários alguns cuidados durante a realização do alinhamento por interferência, como por exemplo a utilização de óculos

de proteção. Outro procedimento de segurança foi utilizar os feixes do laser atenuados para um valor máximo próximo a 800V, para evitar a saturação da corrente do anodo no fotomultiplicador.

A altura de referência $z = 0$ foi determinada pelo deslocamento vertical da mesa-xyz, que foi deslocada de maneira que quando o foco do laser tangenciasse a extremidade da grade espaçadora, houvesse um aumento da corrente do anodo. Em outras palavras, a posição $(x, y, 0)$ foi atribuída ao instante em que a corrente do anodo apresentou um valor máximo durante o deslocamento da mesa. Essa posição também pode ser observada quando o foco dos feixes apresenta um brilho máximo. A Fig. 3.21 representa a posição de referência associada a $z = 0$. Ainda na Fig. 3.21 a) é possível observar os quatro pontos dos feixes do LDV em uma folha de papel milimetrado na lateral da seção de testes. O eixo dos feixes projetados estão alinhados com a posição referente a $z = 0$. A utilização do papel milimetrado auxiliou no processo de determinação desse eixo de referência.

Figura 3.21 – Esquema que representa a posição onde $z = 0$.

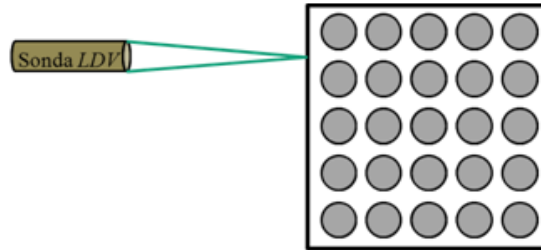


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a determinação da posição de referência $x = 0$, foi utilizado um procedimento semelhante àquele para encontrar a altura de referência $z = 0$. Deslocou-se a mesa-xyz em direção à parede interna de acrílico que envolve o feixe de varetas. Quando o foco dos feixes do laser tangenciam a parede interna do acrílico, a corrente do anodo apresenta um aumento em sua magnitude. A Fig. 3.22 representa a posição correspondente ao encontro

do foco dos feixes do *LDV* com a parede interna de acrílico. Então, a posição de referência $(0, y, z)$ é registrada quando o foco tangencia a parede interna do acrílico.

Figura 3.22 – Representação do encontro dos feixes do *LDV* com a parede de acrílico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar o centro de cada subcanal foi preciso deslocar a mesa-xyz lateralmente, isto é, ao longo do eixo-y. Foi necessário deslocar a mesa-xyz para dois afastamentos laterais máximos, à esquerda e à direita em cada subcanal. O ponto médio entre esses dois deslocamentos máximos foi associado com a posição central do subcanal, ou seja, $(x, 0, z)$. Estão representadas na Fig. 3.23 duas fotografias tiradas em dois instantes distintos. A primeira representa a passagem plena dos feixes do *LDV* no interior de um subcanal. A segunda mostra o instante em que um dos feixes tangencia uma das varetas e portanto um dos feixes fica com a sua intensidade reduzida ao ser projetado no anteparo posicionado na parte posterior da seção de testes. Como serão três subcanais avaliados, para cada subcanal terá um valor associado. O subcanal 1 foi escolhido como o subcanal de referência, isto é, sua posição corresponde à $(x, 0, z)$. Os subcanais 2 e 3 recebem os valores $(x, 1p, z)$ e $(x, 2p, z)$ respectivamente.

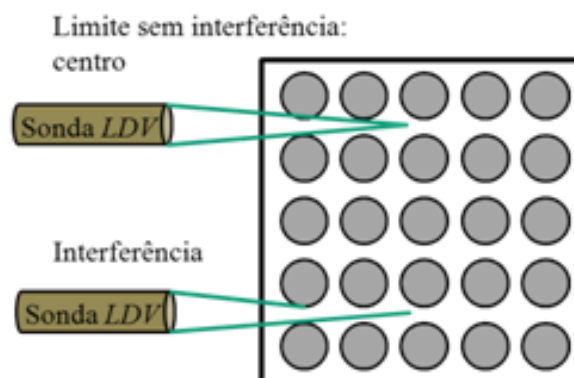
Figura 3.23 – Esquema para representar o centro do subcanal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Fig. 3.24 está representado um esquema que utiliza esse efeito de interferência dos feixes com as varetas para determinação do centro do subcanal.

Figura 3.24 – Esquema para representar o centro do subcanal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

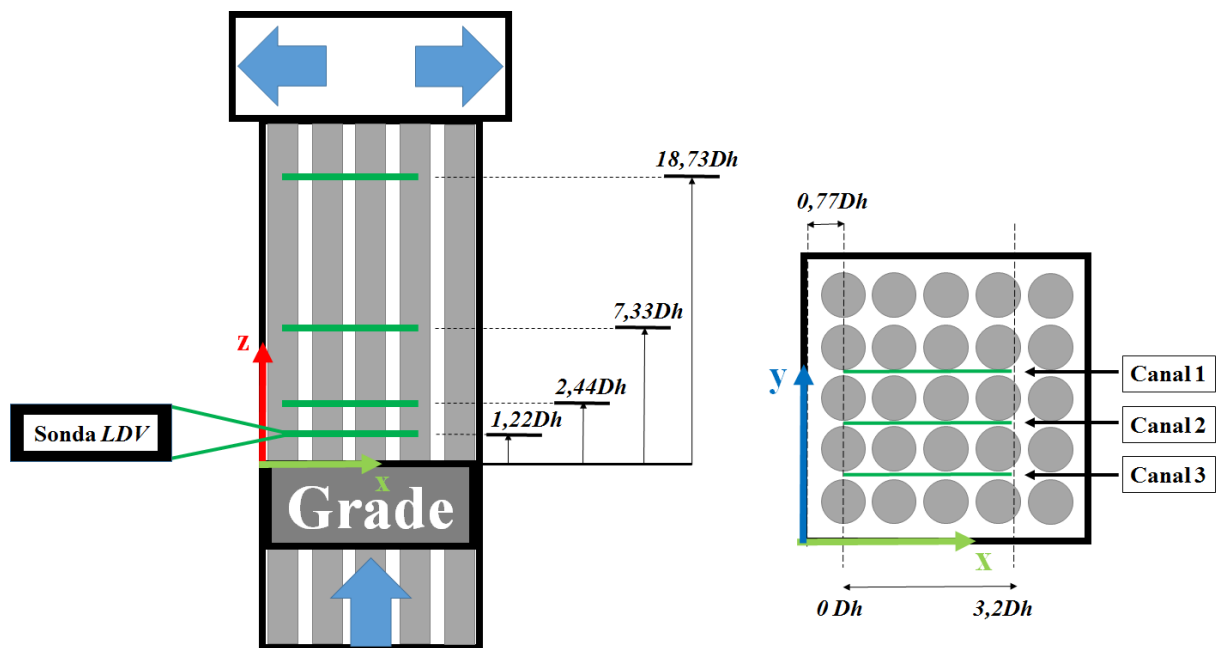
Esses procedimentos de alinhamento foram realizados para encontrar a posição de referência $(0, 0, 0)$ em cada altura a jusante da grade espaçadora.

3.3.3 Matriz experimental para medição de \bar{w} e \bar{v} pela lateral da ST2

Após terem sido realizadas todas as etapas de alinhamento do laser foi necessário determinar os limites de medição no interior dos subcanais para auxiliar na construção

da matriz experimental de pontos para ser lido pelo programa que controla o sistema de deslocamento automático da mesa-xyz. Foram determinados dois limites, um próximo da região da parede e outro onde os feixes laser tangenciam as varetas conforme pode ser observado na Fig. 3.25. Para efeitos práticos após ter sido encontrada a posição $(0, y, z)$ correspondente à posição onde os feixes formam foco na parede interna de acrílico, foi determinado um novo ponto de referência correspondente àquele entre o primeiro par de varetas, isto é, $(0, 77Dh, y, z)$. Portanto, essa região passou a ser a nova posição de referência $(0, y, z)$.

Figura 3.25 – Limites inferiores e superiores nas regiões de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A matriz experimental definida para o posicionamento lateral da ST2 contém um total de 80 pontos ao longo de cada subcanal. Na Fig. 3.25 é possível ver detalhes da matriz escolhida para realização das medidas pela lateral.

Foram escolhidos três subcanais para cada altura, subcanal 1, 2 e 3. O subcanal 1 foi escolhido como subcanal de referência. As medidas iniciam no ponto central entre varetas e se desloca 3,2 passos a partir dessa posição central.

3.4 Metodologia de medição dos perfis de velocidades pelo topo da seção de testes

3.4.1 Medição das componentes de velocidades \bar{u} e \bar{v}

Pelo topo das seções de testes foram mensurados os dados das componentes de velocidade (u e v). Foram escolhidos quatro planos a jusante da grade espaçadora ao longo do eixo- z para medição dessas componentes de velocidade. Esses planos (1, $22Dh$, 2, $44Dh$, 7, $33Dh$ e 18, $73Dh$) foram os mesmos escolhidos para medições pela lateral das seções de testes. Porém, pelo topo da ST1 não foram realizados testes para o plano 18, $73Dh$, os testes para essa altura na ST1 foram realizados apenas pela lateral. Na Fig. 3.26 podem ser observados as duas seções de testes e o posicionamento de topo do *LDV*.

Figura 3.26 – Detalhe do posicionamento do *LDV* pelo topo das ST1 e ST2



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Procedimento de alinhamento do *LDV* pelo topo das seções de testes

No procedimento de alinhamento do *LDV* pelo topo da seção de testes também foi considerado o fenômeno da interferência dos feixes do laser. Foi necessário determinar os eixos de referência $(0, y, z)$, $(x, 0, z)$ e $(x, y, 0)$ de maneira similar à metodologia de alinhamento pela lateral. Esse procedimento foi aplicado nas ST1 e ST2.

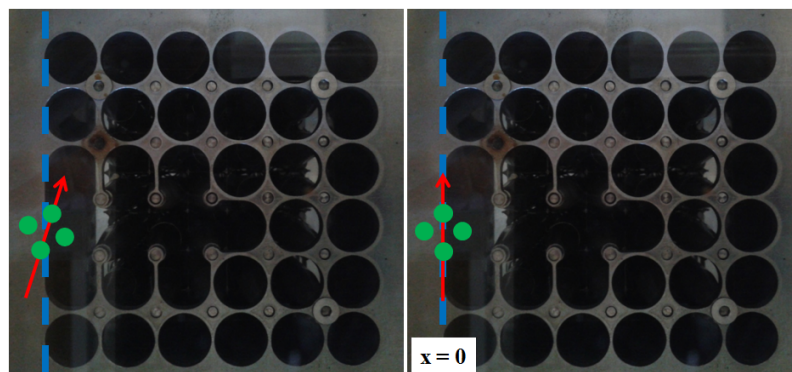
Um suporte foi acoplado na mesa-xyz para posicionar a sonda *LDV* pelo topo conforme pode ser observado na Fig. 3.26. Foi fixada uma região de medição localizada a $0,4Dh$ abaixo do início do cone de encaixe das varetas. Com essa distância foi possível evitar efeitos de saída do escoamento. A distância necessária da sonda à placa superior de acrílico da seção de testes para que a região de medição ficasse à $0,4Dh$ foi determinada a partir dos cálculos envolvendo geometria simples e o índice de refração dos feixes com o acrílico e a água conforme visto na Fig. 3.15.

A distância entre a sonda *LDV* e a placa de acrílico necessária para que a região de medição ficasse a $0,40Dh$ das extremidades das varetas foi de $5,7Dh$. A partir desse valor foi realizado um posicionamento manual da grade ao longo do feixe de varetas. Maiores detalhes sobre esse procedimento de deslocamento manual das grades poderá ser visto na subseção 3.4.3.

Para determinar o eixo de referência correspondente a $x = 0$ utilizou-se a interferência dos feixes com a placa superior de aço inoxidável que serve de fixação das varetas. Na Fig. 3.27 é representada uma das etapas para alinhar os dois pares de feixes laser com a lateral da placa de aço inoxidável. Primeiramente os feixes são posicionados na lateral da placa de inox e posteriormente, o eixo dos feixes são alinhados com essa lateral de tal maneira que um dos pares fique paralelo com a lateral. Em seguida é realizada uma movimentação em dois sentidos para determinação do centro dos feixes.

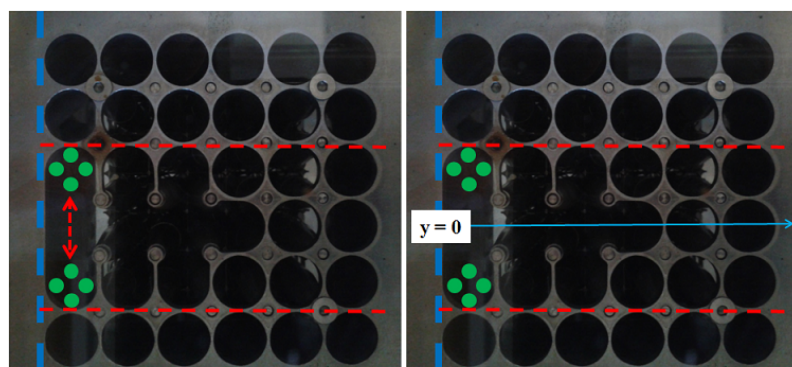
O eixo de referência $y = 0$ foi obtido após dois deslocamentos máximos dos feixes do *LDV* ao longo do *eixo* - y . O ponto médio destes deslocamentos passou a ser o ponto $y = 0$. Essas etapas para obter $y = 0$ podem ser vistas na Fig. 3.28.

Figura 3.27 – Representação da determinação da coordenada $(0, y)$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.28 – Representação da determinação da coordenada $(x, 0)$



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Deslocamento da grade no feixe de varetas

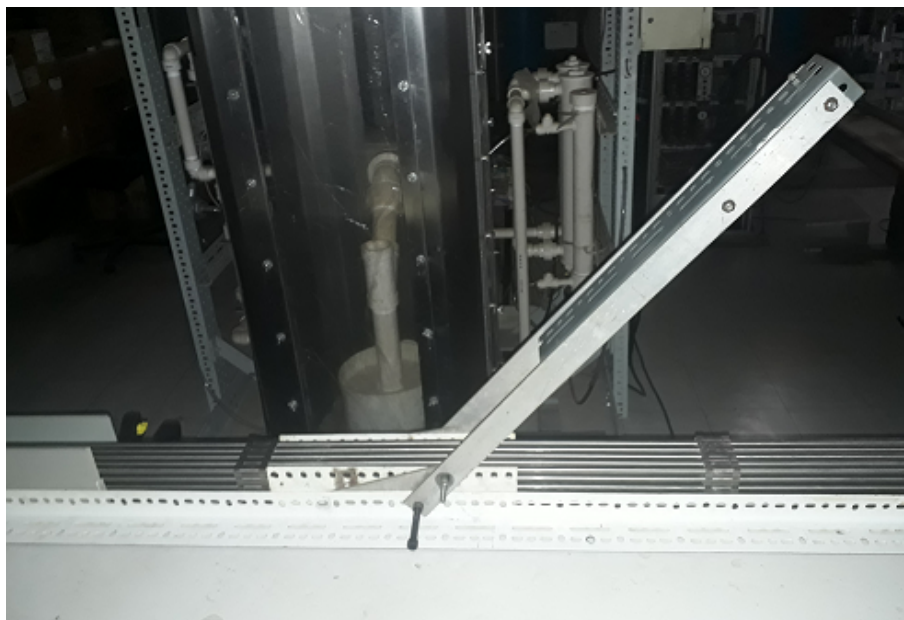
Conforme pode ser notado até então, foram aplicadas metodologias distintas para cada um dos dois posicionamentos da sonda *LDV-2D* em relação à seção de testes. Para as medições realizadas através do posicionamento lateral da seção de testes não houve necessidade de realizar um procedimento de deslocamento da grade ao longo do feixe de varetas. Porém, através do topo da seção de testes foi necessário realizar esse procedimento.

Pela lateral da seção de testes deslocou-se a sonda *LDV-2D* ao longo do eixo-z para quatro alturas normalizadas pelo diâmetro hidráulico Dh entre varetas $1, 22Dh$, $2, 44Dh$, $7, 33Dh$ e $18, 73Dh$. Pelo topo a sonda *LDV-2D* permaneceu estática enquanto a grade foi deslocada manualmente ao longo do feixe de varetas. Para que um posicionamento adequado da grade em relação à posição de medição da seção de testes fosse possível, o feixe de varetas teve que ser retirado da seção de testes.

Após a retirada do feixe da seção de testes, a grade a ser testada era posicionada próximo de uma das extremidades do feixe de varetas sendo, então, deslocada para $1, 22Dh$, $2, 44Dh$, $7, 33Dh$ e $18, 73Dh$ em relação à região de medição, de maneira que essa região deveria ficar à $0, 4Dh$ da extremidade das varetas.

Esses deslocamentos manuais foram possíveis com a ajuda de um dispositivo construído no próprio laboratório conforme pode ser observado na Fig. 3.29.

Figura 3.29 – Aparato construído para deslocar as grades espaçadoras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse dispositivo consiste em um trilho fixo e um conjunto de peças capaz de exercer força sobre as bordas da grade e com auxílio de uma alavanca, deslocar a grade até a posição de interesse. A força exercida para o deslocamento foi aplicada sobre uma

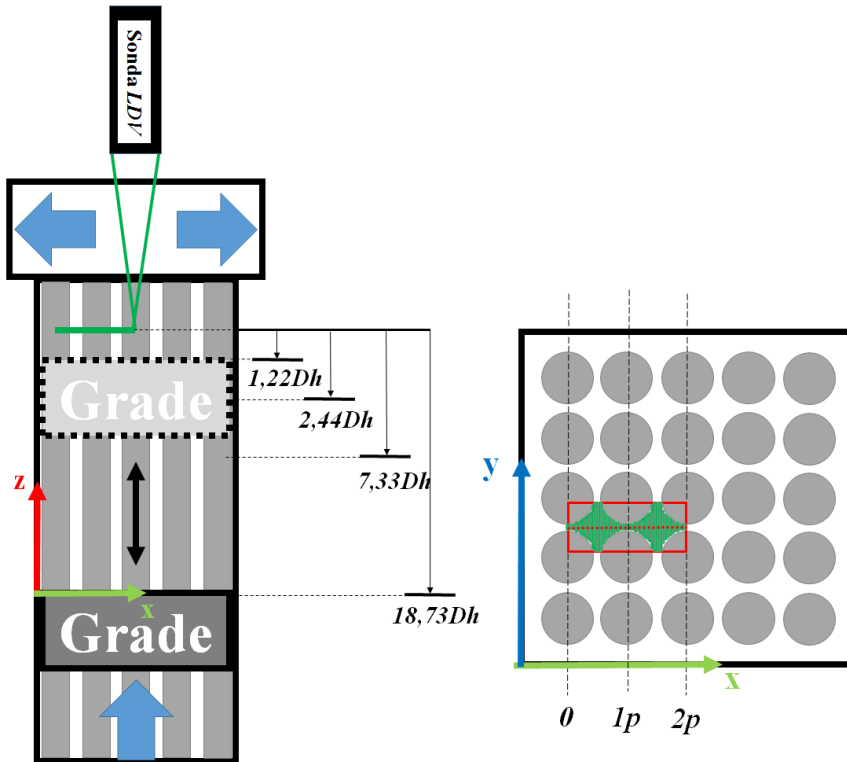
grade por vez e as distâncias de interesse foram conferidas com auxílio de uma régua de precisão e de um paquímetro. Ao final de cada deslocamento de grade, a ortogonalidade das mesmas em relação ao feixe de varetas foi verificada, através de um esquadro também de precisão. Foram realizados três conjuntos de medições com paquímetro para 10 posições de referência. Esse procedimento foi realizado para garantir o correto posicionamento da grade e para determinação da componente de incerteza em relação à região de medição e à grade espaçadora.

Embora esse dispositivo não tenha sido utilizado para deslocar todas as grades de maneira simultânea, ele possui algumas vantagens, tais como, realizar menos força para o deslocamento reduzindo o risco de danos. As dimensões desse dispositivo permitem que o mesmo seja utilizado para deslocar grades de diferentes dimensões.

3.4.4 Matriz experimental para medição de \bar{u} e \bar{v} pelo topo das ST1 e ST2

A matriz experimental construída para medições dos perfis de velocidade pelo topo das seções de testes ST1 e ST2, seguiu procedimentos análogos aos utilizados para elaborar a matriz para medir pela lateral. Ou seja, após os procedimentos de alinhamento, foram obtidos os limites disponíveis na região de medição. Os testes foram realizados para as mesmas quatro alturas a jusante da grade espaçadora utilizadas pela lateral (1, $22Dh$, 2, $44Dh$, 7, $33Dh$ e 18, $73Dh$). Na Fig. 3.30 pode ser visto um esquema que representa a posição da sonda *LDV* pelo topo da seção de testes.

Figura 3.30 – Esquema das regiões de medição pelo topo das seções de testes ST1 e ST2

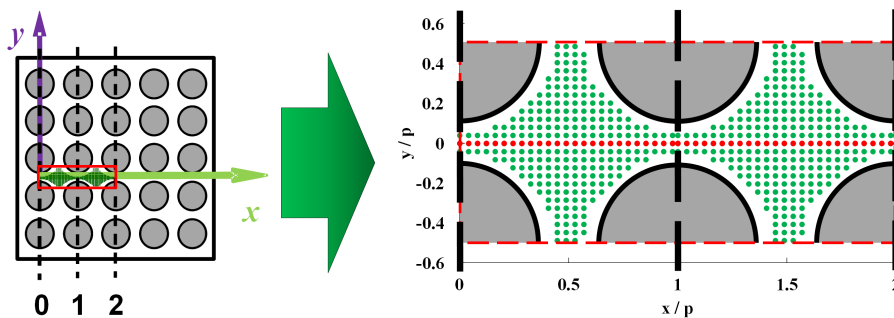


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar essas medições de topo, a sonda *LDV* permaneceu em uma posição fixa no eixo-*z* (altura) de maneira que o seu deslocamento automático, por meio da mesa-*xyz*, só ocorreu ao longo de um plano. Na Fig. 3.31 são mostrados os limites de deslocamento da sonda. Sendo, $0 \leq x \leq 2$ no eixo-*x* e $-0,5 \leq y \leq 0,5$ no eixo-*y*.

A Fig. 3.31 representa a região de medição detalhada. Para a ST1 o plano foi composto por 505 pontos sendo que desses, 51 pontos foram escolhidos ao longo do eixo $y/p = 0$ e outros 25 pontos ao longo do eixo $x/p = 1,5$.

Figura 3.31 – Matriz experimental detalhada



Fonte: Elaborado pelo autor.

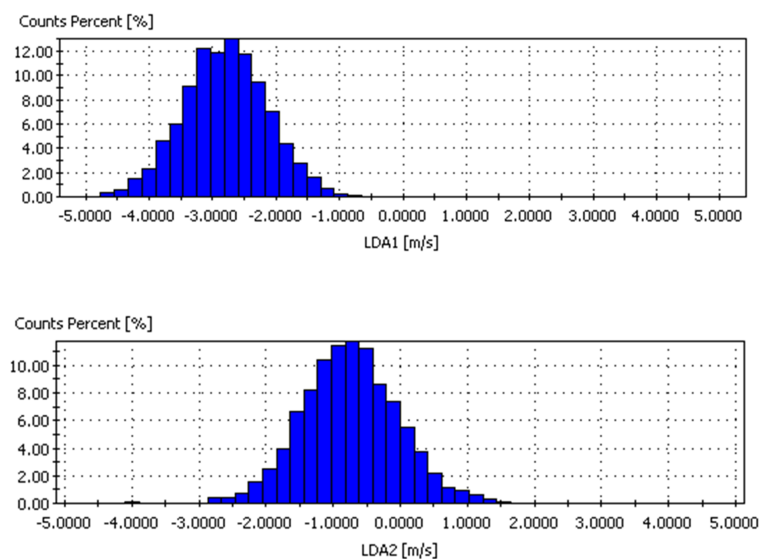
A região de medição da ST2 contém uma quantidade maior de pontos do que a ST1 em virtude das dimensões da ST2 serem maiores do que as da ST1. Foram distribuídos 777 pontos ao longo de dois subcanais de centro para a ST2. Na ST1 foram utilizados 505 pontos.

O conjunto de pontos apresentados na região central (em vermelho) correspondente a $y/p = 0$ corresponde à mesma região utilizada na medição pela lateral. Essa região central corresponde ao subcanal 2 para a ST1 e para a ST2 é equivalente ao subcanal 1 devido à diferença de dimensões entre as seções de testes. Os demais pontos representados em verde foram mensurados apenas pelo topo da seção de testes. Com isso, foi possível comparar as medidas laterais com aquelas feitas pelo topo da seção de testes.

3.5 Procedimento de medição da velocidade

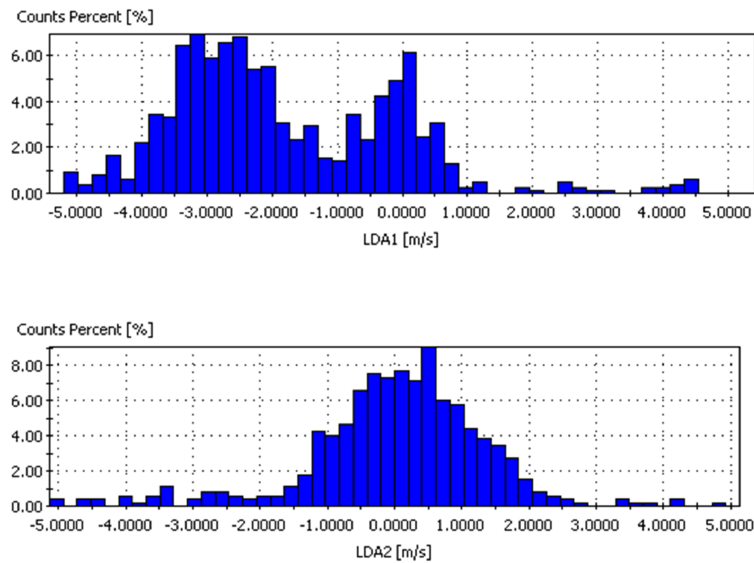
O procedimento de obtenção dos perfis de velocidade através do *LDV-2D* exige que alguns parâmetros sejam configurados no programa BSA-Flow da Dantec. Os principais parâmetros são: ganho de sinal, sensibilidade, intensidade dos feixes e tempo de aquisição de dados. É ainda importante mencionar que o *LDV-2D* emite dois pares de feixes laser no escoamento. E para cada um desses pares foram necessárias configurações distintas. Durante a aquisição de dados foi possível acompanhar em tempo real a qualidade do sinal obtido. Nas Fig. 3.32 e Fig. 3.33 é possível observar os histogramas que são apresentados no programa BSA-Flow.

Figura 3.32 – Histogramas obtidos de um dos testes com boa qualidade de sinal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.33 – Histogramas obtidos de um dos testes com má qualidade de sinal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada um dos histogramas apresentados na Fig. 3.32 representa dados de uma das componentes do *LDV*. Os dados coletados na Fig. 3.32 são referentes a um teste cuja qualidade do sinal foi satisfatória, pois o histograma apresentado segue a uma distribuição normal ou gaussiana. No entanto, o sinal coletado para alguns testes apresentaram uma qualidade de sinais insatisfatórios conforme pode ser notado nos histogramas apresentados na Fig. 3.33. Esses testes com qualidade questionável foram descartados e então foram realizados novos testes para substituição.

Uma das possíveis causas da discrepância observada na Fig. 3.33 são as fontes de ruídos no interior da seção de testes, tais como varetas, grade, etc. No trabalho de Chang, Kim e Song (2014), percebeu-se que quando o volume de medição tangencia as paredes que envolvem a seção de testes, afeta o valor da componente de velocidade, de maneira a subestimar a sua magnitude, pois, parte do sinal processado contém o valor da velocidade da parede (zero).

Na Tab. 3.7 podem ser vistos os principais parâmetros utilizados para obtenção dos perfis de velocidades medidos pela lateral da seção de testes através do *LDV*.

Tabela 3.7 – Parâmetros do *LDV* para obtenção dos perfis de velocidade pela lateral da seção de testes.

Parâmetro	<i>LDV 1</i> (Axial)	<i>LDV 2</i> (Lateral)
Sensibilidade (tensão no fotomultiplicador) [V]	1200	1000
Ganho do sinal do fotomultiplicador [dB]	22	26
Menor / Maior comprimento de sinal gravado	32 / 128	16 / 128
Tempo máximo de aquisição de dados [s]	5	5
Amostragem máxima [número de particulado]	2000	2000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores desses parâmetros possibilitaram a obtenção de sinais de boa qualidade. Para a obtenção dos perfis de velocidade laterais obtidos pelo topo da seção de testes foram escolhidos os valores apresentados na Tab. 3.7.

Tabela 3.8 – Parâmetros do *LDV* para obtenção dos perfis de velocidade pelo topo da seção de testes

Parâmetro	<i>LDV 1</i> (Lateral)	<i>LDV 2</i> (Lateral)
Sensibilidade (tensão no fotomultiplicador) [V]	1200	1200
Ganho do sinal do fotomultiplicador [dB]	22	22
Menor / Maior comprimento de sinal gravado	16 / 128	16 / 128
Tempo máximo de aquisição de dados [s]	5	5
Amostragem máxima [número de particulado]	2000	2000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que os valores ajustados para os perfis de velocidades laterais foram semelhantes. No entanto, os valores obtidos pela lateral da seção de testes foram distintos. Isso ocorre devido à diferença de magnitude entre os perfis de velocidade axial e lateral. Esses parâmetros apresentaram ligeiras variações durante a realização dos experimentos. No entanto esses valores apresentados na Tab. 3.8 foram os mais comuns. Alguns fatores externos podem ter sido responsáveis pelas ligeiras alterações, como por exemplo a temperatura e umidade relativa do ar. Se a umidade relativa do ar, durante a realização dos experimentos, estivesse próximo de 70% os sinais obtidos pelo *LDV-2D* eram afetados. A temperatura interna do equipamento não poderia atingir uma temperatura acima de 35°C. Por essa razão foi necessário manter o equipamento em um ambiente com temperatura e umidade relativa do ar monitoradas por um higrômetro digital.

Essa aquisição de dados obtidos através do *LDV-2D* foi obtido de maneira simultânea com o sistema de aquisição de dados do regime do escoamento apresentado no final da subseção 3.2.1 (Programa FEIXE).

Os sistemas de deslocamento automático (mesa xyz) e de aquisição de dados processados do *LDV-2D* foram conectados por meio de uma conexão serial. Essa conexão serial possibilitou a comunicação entre esses dois sistemas através de um programa feito em Labview. A comunicação entre esses dois sistemas ocorre da seguinte maneira:

- Uma matriz de pontos correspondentes à região escolhida para realização das medições foi inserida em cada um dos sistemas.
- Após execução do comando de início da medição, o computador que recebe os dados processados do *LDV-2D* envia uma mensagem para o computador que controla a mesa-xyz, informando que está pronto para iniciar as medições.
- A mesa-xyz se desloca para a primeira posição da matriz de pontos e, após alcançar a posição inicial, envia uma mensagem para o computador que recebe os dados processados do *LDV-2D* informando que a aquisição de dados já pode ser iniciada.
- Após a aquisição de dados, o computador do *LDV-2D* envia uma mensagem para o computador da mesa-xyz para se deslocar para o próximo ponto da sequência de pontos da matriz.

Esse procedimento se repete de maneira automática até que toda a matriz de pontos seja concluída. A quantidade de pontos varia de acordo com a região a ser mensurada e também de acordo com a seção de testes utilizada conforme foi explicado na subseção 3.1.2. Os programas que realizaram a comunicação entre esses computadores foram desenvolvidos no CDTN através da plataforma *LabVIEW*³.

Antes de iniciar a aquisição de dados, alguns procedimentos de verificação da intensidade do laser gerado pelo *LDV* e do alinhamento do mesmo tiveram que ser realizados. Se a intensidade de algum dos feixes estivesse fora das condições normais de operação, era então necessário realizar um ajuste prévio. Percebeu-se que a umidade relativa do ar deveria ser monitorada constantemente durante a realização dos testes, pois valores de umidade relativa do ar acima de 70% afetava o funcionamento do *LDV*. Em relação aos possíveis desalinhamentos, alguns procedimentos de alinhamento eram realizados. Esses desalinhamentos serão explicados na próxima seção.

O programa FEIXE desenvolvido no ambiente DOS é o responsável por coletar e registrar os dados do escoamento. Esse programa foi instalado em um terceiro computador independente responsável por obter dados da temperatura, pressão e número de Reynolds. O valor da velocidade média do escoamento na região da placa de orifício foi determinado através da perda de carga em uma placa de orifício.

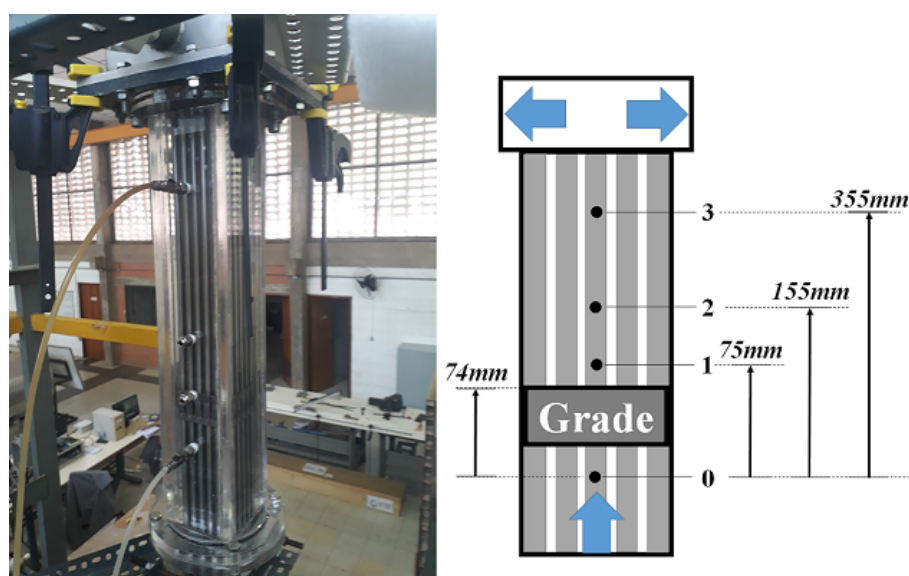
A gravação dos dados dos perfis de velocidade através do *LDV-2D* só foi iniciada após ter sido confirmado que o escoamento alcançou um regime completamente desenvolvido.

³ <https://www.ni.com/pt-br.html>

3.6 Metodologia de medição da perda de pressão

As medidas da perda de pressão ΔP do escoamento após passar pelas grades espaçadoras (de Canais e Impressa) foram obtidas ao longo da seção de testes 2, conforme pode ser visto na Fig. 3.34.

Figura 3.34 – Detalhe das posições para medição da perda de pressão na seção de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A grade espaçadora foi posicionada à 1mm abaixo do *tap* número 1. E as combinações utilizadas para obter as perdas de pressão a jusante da grade foram: tomadas em 0 e 1; 0 e 2; e 0 e 3.

As médias da diferença de pressão, assim como outros parâmetros relacionados com o regime do escoamento, como temperatura, pressão de entrada na seção de testes, tiveram os seus valores médios gravados a cada 100 pontos. O tempo gasto para efetuar a gravação desses pontos foi de dois minutos. Esses parâmetros foram suficientes para se obter uma quantidade significativa de dados.

Sendo assim, de acordo com Chung (1998), o coeficiente de perda de pressão K pode ser calculado a partir da Eq.3.7

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \quad (3.7)$$

Onde, ΔP é a perda de pressão medida através dos transdutores de pressão, ρ a densidade da água obtida através de dados de pressão e temperatura da água e v a velocidade média do escoamento dado por $\langle \bar{w} \rangle$.

3.7 Outras grandezas avaliadas

Além dos perfis de velocidade (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}) e perda de pressão (ΔP), foram avaliadas outras grandezas relacionadas com as flutuações de velocidade e efeitos de turbulência. Essas grandezas avaliadas foram: o Escoamento Secundário Médio (\overline{SF}); a Intensidade de Turbulência Média (I_w) e os tensores de Re ($u'u'$, $v'v'$, $u'v'$). Além dessas, outras grandezas como mistura cruzada e por rotação no interior dos subcanais a jusante das grades espaçadoras foram avaliadas de maneira qualitativa.

A seguir serão descritos os passos utilizados para avaliação dessas grandezas.

Escoamento Secundário Médio (\overline{SF}) é uma grandeza global que relaciona o quanto de movimento lateral há no escoamento. Nesse caso, de acordo com Santos (2012) pode ser obtido a partir das grandezas mensuradas experimentalmente através da Eq. 3.8

$$\overline{SF} = \frac{\sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2}}}{\langle w \rangle} \quad (3.8)$$

A intensidade de turbulência axial média I_w , de acordo com Santos (2012), é obtida experimentalmente a partir da Eq. 3.9

$$I_w = \frac{\overline{w'}}{\langle w \rangle} \quad (3.9)$$

A partir das flutuações de velocidades u' e v' foram obtidos três tensores de Reynolds. Dois tensores normais, $u'u'$ e $v'v'$ e um tensor tangencial $u'v'$. Nesse caso, de acordo com Fox et al. (2013), esses tensores podem ser calculados a partir da Eq.3.10.

$$u'(t) = u(t) - \bar{u} \quad (3.10)$$

Onde,

$u'(t)$ é a flutuação de velocidade, $u(t)$ é a velocidade instantânea e \bar{u} é a velocidade média.

As misturas cruzada (*cross-flow*) e por rotação (*swirl-flow*) foram avaliadas qualitativamente por meio da avaliação dos padrões observados no plano vetorial das componentes de velocidades laterais u e v .

3.7.1 Proposta de avaliação de outras grandezas

Os dados apresentados permitem que sejam avaliadas outras duas grandezas que tornarão ainda mais completa a investigação desses parâmetros termo-hidráulicos. Essas grandezas são: a energia cinética de turbulência (k) e a vorticidade (ω_z).

De acordo com [Hosokawa et al. \(2012\)](#), a energia cinética de turbulência pode ser avaliada pela Eq. 3.11

$$k = k_x + k_y + k_z \quad (3.11)$$

$$k_x = \frac{1}{2}\overline{u'^2}, \quad k_y = \frac{1}{2}\overline{v'^2}, \quad k_z = \frac{1}{2}\overline{w'^2} \quad (3.12)$$

A turbulência foi considerada isotrópica, então a terceira componente k_z foi estimada como a média das outras duas componentes medidas k_x e k_y . Nesse caso a turbulência foi calculada pela Eq. 3.13.

$$k = \frac{1.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})}{2} \quad (3.13)$$

A vorticidade, de acordo com [Chang, Kim e Song \(2014\)](#) poderá ser avaliada pela Eq. 3.14.

$$\omega_z = \left(\frac{\partial(\bar{v})}{\partial(x)} - \frac{\partial(\bar{u})}{\partial(y)} \right) \quad (3.14)$$

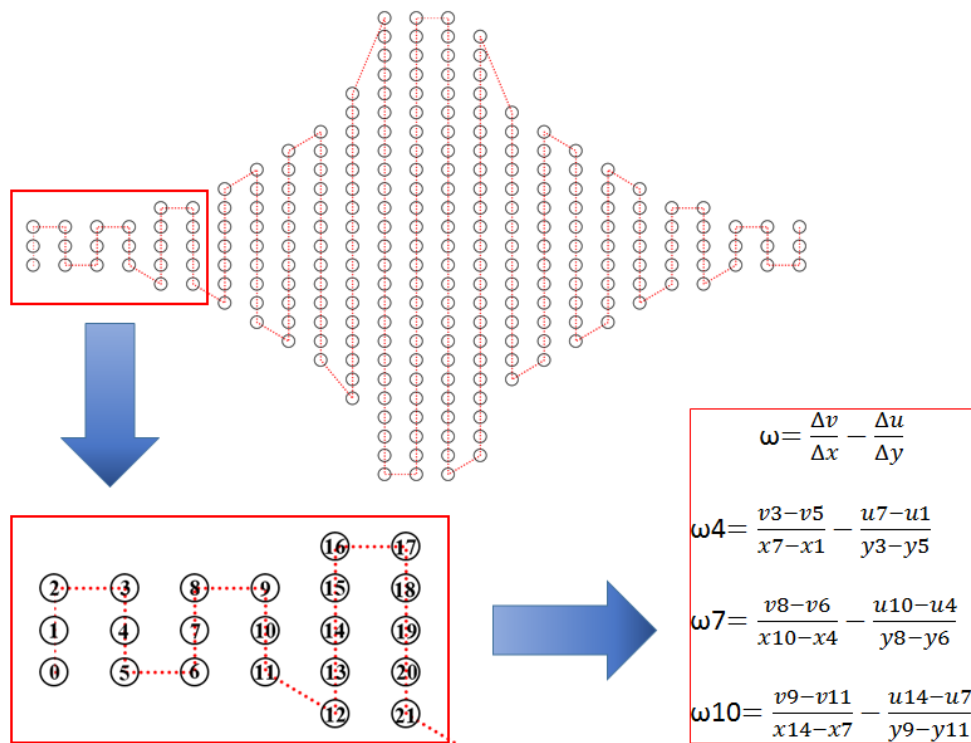
No entanto a vorticidade (ω_z) foi avaliada de forma discreta, tal que:

$$\omega_z = \left(\frac{\Delta(\bar{v})}{\Delta(x)} - \frac{\Delta(\bar{u})}{\Delta(y)} \right) \quad (3.15)$$

$$\omega_z = \left(\frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}} - \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{y_{i,j+1} - y_{i,j-1}} \right) \quad (3.16)$$

Na Fig. 3.35 pode ser visto de maneira simplificada, o procedimento utilizado para determinação da vorticidade.

Figura 3.35 – Procedimento para medição da vorticidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.8 Análise de incerteza

A avaliação da incerteza experimental obtida através das medições realizadas com o *LDV* configura uma importante tarefa. Essa análise é fundamental para o processo de comparação dos experimentos realizados com simulações numéricas de *CFD*. Uma adequada análise de incerteza está associada à qualidade dos resultados obtidos e aponta lacunas e brechas para serem melhoradas. Portanto, nesta seção serão apresentadas as análises de incertezas realizadas para todas as grandezas avaliadas.

3.8.1 Análise de incerteza para os perfis de velocidades médias \bar{u} e \bar{v}

As principais fontes de incertezas dos perfis de velocidades médias foram obtidas a partir das medições realizadas pelo *LDV*. Os parâmetros utilizados pelo *LDV* para obtenção das componentes de velocidades estão representados na Eq. 3.17.

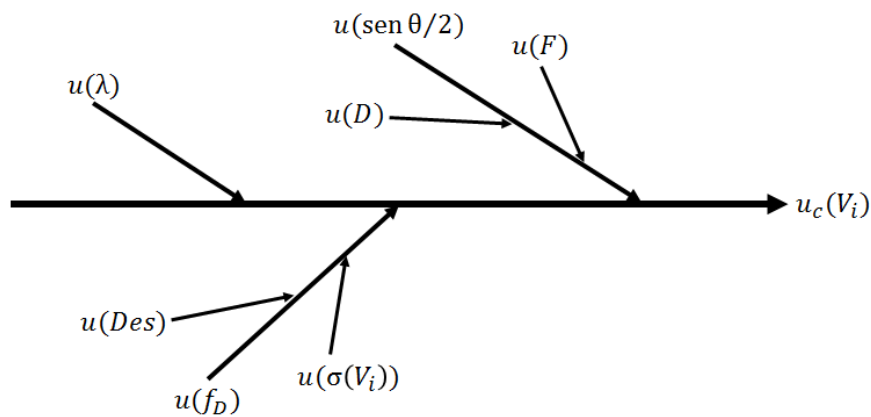
$$V_i = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} f_D \tag{3.17}$$

Onde,

V_i representa a componente de velocidade i . λ é o comprimento de onda do feixe laser gerado. $\theta/2$ corresponde à metade do ângulo de encontro dos feixes. f_D é a frequência Doppler registrada pelo sistema de processamento de dados do *LDV*.

Na Fig. 3.36 é representado um diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito onde são representadas as fontes de incerteza que afetam o perfil de velocidade V_i .

Figura 3.36 – Diagrama de causa e efeito para as principais fontes de incertezas dos perfis de velocidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia de análise das fontes de incertezas experimentais atribuída aos perfis de velocidades foi baseada na norma GUM (2008). Como o perfil de velocidade i é obtido de maneira indireta a partir da Eq.3.17 então a componente de incerteza combinada dessa velocidade ($u_c(V_i)$) pode ser obtida pela Eq.3.18.

$$u_c(V_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_i}{\partial \lambda} u(\lambda)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_i}{2 \partial \sin(\theta/2)} u(\sin(\theta/2))\right)^2 + \left(\frac{\partial V_i}{\partial f_D} u(f_D)\right)^2} \quad (3.18)$$

Onde,

$u(\lambda)$ é a incerteza relacionada com o comprimento de onda gerado pelo laser. $u(\sin(\theta/2))$ é a incerteza relacionada com a metade do ângulo de encontro entre os feixes do laser. $u(f_D)$ é a incerteza relacionada com a frequência Doppler.

Então, a componente de incerteza combinada da velocidade $u_c(V_i)$ pode ser expressa como,

$$u_c(V_i) = \sqrt{\left(\frac{f_D}{2\sin(\theta/2)}u(\lambda)\right)^2 + \left(-\frac{\cos(\theta/2)\lambda f_D}{4\sin^2(\theta/2)}u(\sin(\theta/2))\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}u(f_D)\right)^2} \quad (3.19)$$

Alguns estudos como, por exemplo, [ITTC \(2008\)](#) recomendam que a componente de incerteza $u(\lambda)$ pode ser negligenciada, por possuir pequena magnitude devido às características ópticas de geração do laser. Sendo assim, restarão somente as componentes relacionadas com o ângulo de encontro entre os feixes e a frequência Doppler. Na Eq.3.20 pode ser verificada esta consideração.

$$u_c(V_i) = \sqrt{\left(-\frac{\cos(\theta/2)\lambda f_D}{4\sin^2(\theta/2)}u(\sin(\theta/2))\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}u(f_D)\right)^2} \quad (3.20)$$

A Eq.3.21 fornece a componente de incerteza $u(\sin(\theta/2))$.

$$u(\sin(\theta/2)) = \sqrt{\left(\frac{\partial \sin(\theta/2)}{\partial D}u(D)\right)^2 + \left(\frac{\partial \sin(\theta/2)}{\partial F}u(F)\right)^2} \quad (3.21)$$

Sendo D o diâmetro da lente, F a distância focal da lente utilizada, $u(D)$ a componente de incerteza relacionada com o diâmetro da lente e $u(F)$ a componente de incerteza relacionada com a distância focal da lente.

A Eq.3.22 fornece a componente de incerteza $u(f_D)$.

$$u(f_D) = \sqrt{(u_\sigma(\bar{V}_i))^2 + (u_{des})^2} \quad (3.22)$$

onde,

$u_\sigma(\bar{V}_i)$ é a incerteza padrão amostral do perfil de velocidade médio V_i para N observações ou testes realizados e u_{des} a incerteza relacionada com o desalinhamento entre os eixos.

Os valores dos perfis de velocidades foram determinados a partir de observações independentes, cujas variações foram de duas a oito. A componente $(u_\sigma(\bar{V}_i))$ foi calculada segundo a Eq.3.23 baseada na norma [GUM \(2008\)](#).

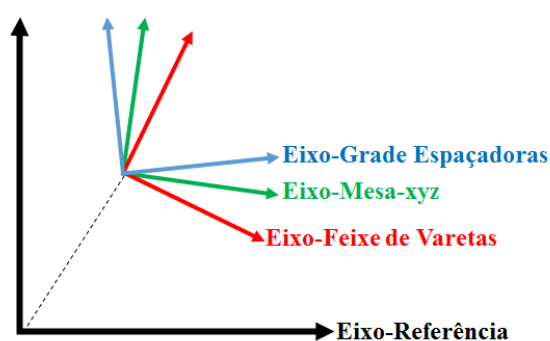
$$u_\sigma(\bar{V}_i) = \sqrt{\left(\frac{S(\bar{V}_i)}{\sqrt{N}}\right)^2} \quad (3.23)$$

Um procedimento de alinhamento da sonda *LDV* com a região de medição foi meticulosamente aplicado. Esse procedimento foi necessário por se tratarem de sistemas independentes, que necessitam de alinhamento padronizado entre alguns aparatos: (sonda

LDV; seção de testes; mesa de deslocamento automático e região de medição). O conceito de ângulos de Euler foi aplicado para avaliação da incerteza experimental devido a esses desalinhamentos.

Durante o planejamento dos testes foi detectada a possibilidade de vários tipos de desalinhamentos. Por exemplo, entre o feixe de varetas e o *housing* (paredes que envolvem a seção de testes), entre as varetas e as grades espaçadoras, entre o sistema de deslocamento automático (mesa-xyz) e a sonda *LDV*, etc. Na Fig.3.37 pode ser visto a representação dos vários desalinhamentos possíveis entre esses eixos.

Figura 3.37 – Possíveis desalinhamentos entre os eixos



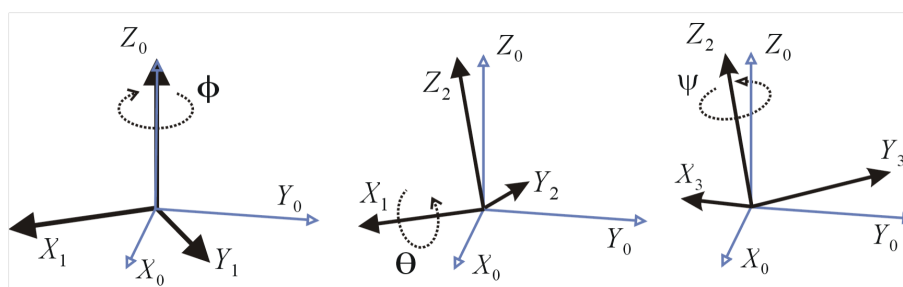
Fonte: Elaborado pelo autor.

A componente de incerteza relacionada com esse desalinhamento é do tipo B e afeta diretamente a magnitude, sentido e direção do vetor velocidade \vec{V} .

O conceito ângulos de Tait-Bryan foi utilizado para obtenção da componente de incerteza devido ao desalinhamento. Esse conceito pode ser chamado de "ângulos de Euler" e é utilizado para descrever a orientação espacial de um corpo rígido em relação a um sistema de coordenadas fixo (LEMOS, 2007).

Este conceito consiste basicamente na mudança de coordenadas através de três rotações sucessivas como pode ser visualizado na Fig. 3.38.

Figura 3.38 – Rotações que foram realizadas em torno dos eixos z, x' e y'



Fonte: (GJORESKI; GAMS, 2011).

As rotações realizadas em torno de cada eixo z , x' e y' podem ser representadas pelas matrizes rotação expressas pelas Eqs.: 3.24, 3.25 e 3.26.

$$R_Z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\text{sen}(\psi) & 0 \\ \text{sen}(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$R_{x'}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ 0 & \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$R_{y'}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\text{sen}(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Para cada eixo foi avaliada uma incerteza de desalinhamento do ângulo igual a $0,25^\circ$. A incerteza combinada deste ângulo é apresentada na Eq. 3.27.

$$\alpha = \sqrt{u_\psi^2 + u_\theta^2 + u_\phi^2} = 0,433^\circ \quad (3.27)$$

Então, para cada rotação foi considerado o mesmo ângulo, isto é, $\psi = \theta = \phi = 0,433^\circ$. Na Eq.3.28 é apresentado o produto dessas matrizes $R_z(\psi)R_{x'}(\theta)R_{y'}(\phi)$ e dessa forma, essas matrizes foram reescritas como $R'_{zx'y'}(\alpha)$.

$$R_{zx'y'}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) - \text{sen}^3(\alpha) & -\cos(\alpha)\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha)\text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha)\text{sen}^2(\alpha) \\ \cos(\alpha)\text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha)\text{sen}^2(\alpha) & \cos^2(\alpha) & \text{sen}^2(\alpha) - \cos^2(\alpha)\text{sen}(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\text{sen}(\alpha) & \text{sen}(\alpha) & \cos^2(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Quando se aplica a matriz $R_{zx'y'}(\alpha)$ no vetor velocidade $\vec{V}(u, v, w)$, esse vetor por sua vez será obtido em outro sistema de coordenadas. E a representação desse vetor nesse novo sistema de coordenadas será $\vec{V}_{des}(u, v, w)$. Esse sistema de coordenadas pode ser observado na Eq.3.29.

$$R_{zx'y'} \vec{V}(u, v, w) = \vec{V}_{des}(u, v, w) \quad (3.29)$$

O vetor velocidade $\vec{V}_{des}(u, v, w)$ pode ser reescrito como,

$$R_{zx'y'}(\alpha) = \begin{bmatrix} (\cos^2(\alpha) - \text{sen}^3(\alpha))u + (-\cos(\alpha)\text{sen}(\alpha))v + (\cos(\alpha)\text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha)\text{sen}^2(\alpha))w \\ (\cos(\alpha)\text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha)\text{sen}^2(\alpha))u + (\cos^2(\alpha))v + (\text{sen}^2(\alpha) - \cos^2(\alpha)\text{sen}(\alpha))w \\ (-\cos(\alpha)\text{sen}(\alpha))u + (\text{sen}(\alpha))v + (\cos^2(\alpha))w \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Então a variação entre os vetores velocidade $\vec{V}(u, v, w)$ (sistema de coordenadas original) e $\vec{V}_{des}(u, v, w)$ (sistema de coordenadas rotacionado) corresponde à componente de incerteza devido ao desalinhamento (u_{des}).

Note que na Eq.3.30 as únicas componentes de incerteza de desalinhamento consideradas foram (u) e (v).

3.8.2 Avaliação da incerteza da velocidade média do escoamento $\langle \bar{w} \rangle$

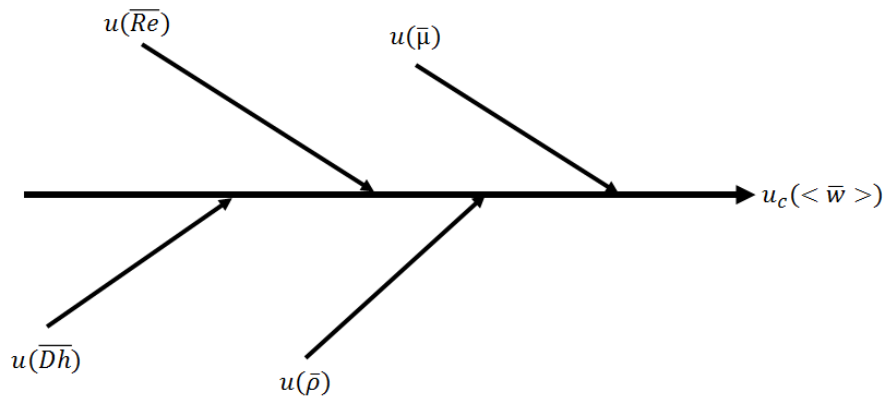
A velocidade média do escoamento ($\langle \bar{w} \rangle$) foi obtida a partir da Eq. 3.31:

$$\langle \bar{w} \rangle = \frac{\overline{Re} \bar{\mu}}{\bar{\rho} Dh} \quad (3.31)$$

\overline{Re} é o número de Reynolds médio, $\bar{\mu}$ é a viscosidade dinâmica da água, $\bar{\rho}$ é a densidade média da água e Dh é o diâmetro hidráulico.

Na Fig. 3.39 é apresentado o diagrama causa e efeito das componentes de incerteza que influenciaram na obtenção da componente de incerteza combinada da velocidade média do escoamento.

Figura 3.39 – Diagrama de causa e efeito para as principais fontes de incertezas da velocidade média do escoamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A componente de incerteza combinada $u_c(\langle \bar{w} \rangle)$ pode ser obtida pela Eq. 3.32.

$$u_c(\langle \bar{w} \rangle) = \sqrt{\left(\frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial \overline{Re}} u(\overline{Re})\right)^2 + \left(\frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial \bar{\mu}} u(\bar{\mu})\right)^2 + \left(\frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial \bar{\rho}} u(\bar{\rho})\right)^2 + \left(\frac{\partial \langle \bar{w} \rangle}{\partial Dh} u(Dh)\right)^2} \quad (3.32)$$

3.8.2.1 Incerteza expandida normalizada

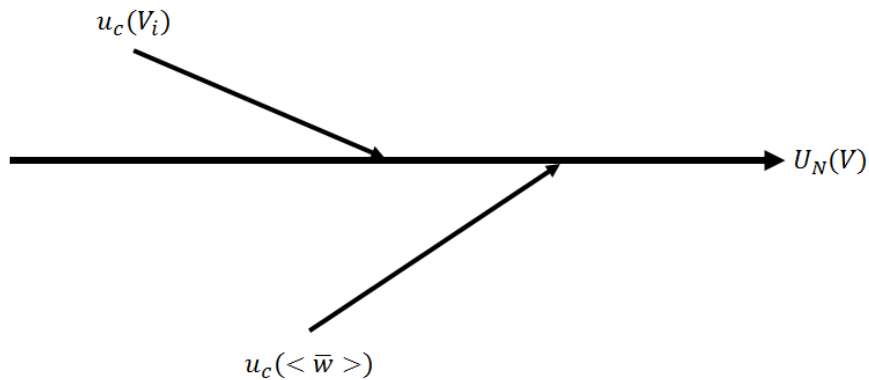
Para a avaliação da incerteza expandida normalizada $U_N(V_i)$ considerou-se a componente de incerteza combinada dos perfis de velocidade médio \bar{u} , \bar{v} e a velocidade média do escoamento $\langle w \rangle$ conforme pode ser visto na Eq.3.33.

$$U_N(V) = k \sqrt{\left(\frac{u_c(V_i)}{\langle \bar{w} \rangle}\right)^2 + \left(\frac{-V_i u_c(\langle \bar{w} \rangle)}{\langle \bar{w} \rangle^2}\right)^2} \quad (3.33)$$

Considerou-se nessa avaliação da incerteza expandida $U_N(V_i)$ um fator de abrangência k igual a 2. O nível de confiança correspondente a esse fator de abrangência é de aproximadamente 95%. Os procedimentos para obtenção do fator de abrangência k foram avaliados segundo as orientações contidas na norma ISO GUM (2008).

Na Fig. 3.40 estão representadas as duas componentes de incertezas que foram utilizadas para determinação da incerteza expandida normalizada $U_N(V)$.

Figura 3.40 – Diagrama de causa e efeito para as principais fontes de incertezas da velocidade média do escoamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A incerteza expandida normalizada avaliada foi menor que 1,24%. As medições pelo topo da seção de testes resultaram em um valor de incerteza menor em comparação com as medições que foram realizadas pela lateral da mesma.

3.8.3 Incerteza da posição

A avaliação da incerteza devida ao posicionamento também foi avaliada seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente nesse capítulo. Então a incerteza expandida da posição é dada pela Eq. 3.34.

$$U(z) = k \sqrt{(u(dz))^2 + u(\sigma)^2 + u(cal)^2} \quad (3.34)$$

Onde,

$u(dz)$ é o comprimento do volume de medição (mostrado na seção), $u(\sigma)$ a incerteza padrão e $u(cal)$ a incerteza de calibração.

O nível de confiança considerado também foi igual a 95%.

3.8.4 Avaliação da Incerteza do escoamento secundário médio

A incerteza expandida do escoamento secundário médio foi avaliada a partir da Eq. 3.35.

$$U(SF) = k \sqrt{\left(\frac{\partial SF}{\partial \bar{u}} u(\bar{u})\right)^2 + \left(\frac{\partial SF}{\partial \bar{v}} u(\bar{v})\right)^2 + \left(\frac{\partial SF}{\partial \langle \bar{w} \rangle} u(\langle \bar{w} \rangle)\right)^2} \quad (3.35)$$

De forma análoga ao procedimento realizado para obter a incerteza expandida normalizada de V_i na subseção 3.8.2.1 foi considerado um fator de abrangência k igual a 2 cujo nível de confiança é de 95%.

3.8.5 Avaliação da Incerteza dos Tensores de Reynolds

A incerteza referente aos tensores de Re , $u_{u'u'}$, $u_{v'v'}$ e $u_{u'v'}$ foi obtida a partir da relação que origina a flutuação de velocidade u' dado pela relação (3.10). A grandeza u' é função da velocidade instantânea $u(t)$ e da velocidade média \bar{u} . Portanto, a incerteza de u' pode ser calculado a partir da Eq.3.36.

$$u(u') = \sqrt{\left(\frac{\partial u'}{\partial u(t)} u(u(t))\right)^2 + \left(\frac{\partial u'}{\partial \bar{u}} u(\bar{u})\right)^2} \quad (3.36)$$

Então, a Eq. 3.36 poderá ser reescrita conforme apresentado na Eq. 3.37

$$u(u') = \sqrt{(u(u(t)))^2 + (u(\bar{u}))^2} \quad (3.37)$$

Onde,

$u(u')$ é a componente de incerteza da velocidade média e $u(u(t))$ é a componente de incerteza da velocidade instantânea.

O procedimento de avaliação da incerteza foi o mesmo usado para obtenção dos perfis de velocidades médias \bar{u} e \bar{v} . Santos et al. (2019) realizaram uma avaliação de incerteza para os tensores de Re bastante similar.

De acordo com as relações $u_{u'u'}$, $u_{v'v'}$ e $u_{u'v'}$ obteve-se a componente de incerteza combinada Uc como pode ser visto nas Eqs.3.38, 3.39 e 3.40.

$$U_c(u'u') = 2u'U(u') \quad (3.38)$$

$$U_c(v'v') = 2v'U(v') \quad (3.39)$$

$$U_c(u'v') = \sqrt{(u'U(v'))^2 + (v'U(u'))^2} \quad (3.40)$$

A incerteza expandida normalizada dos parâmetros $u'u'$, $v'v'$ e $u'v'$ pela velocidade quadrática média do escoamento $\langle \bar{w} \rangle^2$ é obtida respectivamente pelas Eqs.3.41, 3.42 e 3.43.

$$U_N(u'u') = k\sqrt{\left(\frac{\partial u'u' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial u'} U_c(u')\right)^2 + \left(\frac{\partial u'u' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial \langle \bar{w} \rangle} U_c(\langle \bar{w} \rangle)\right)^2} \quad (3.41)$$

$$U_N(v'v') = k\sqrt{\left(\frac{\partial v'v' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial v'} U_c(v')\right)^2 + \left(\frac{\partial v'v' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial \langle \bar{w} \rangle} U_c(\langle \bar{w} \rangle)\right)^2} \quad (3.42)$$

$$U_N(u'v') = k\sqrt{\left(\frac{\partial u'v' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial u'} U_c(u')\right)^2 + \left(\frac{\partial u'v' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial v'} U_c(v')\right)^2 + \left(\frac{\partial u'v' / (\langle \bar{w} \rangle)^2}{\partial \langle \bar{w} \rangle} U_c(\langle \bar{w} \rangle)\right)^2} \quad (3.43)$$

Onde, k é o fator de abrangência escolhido para um intervalo de confiança de 95%.

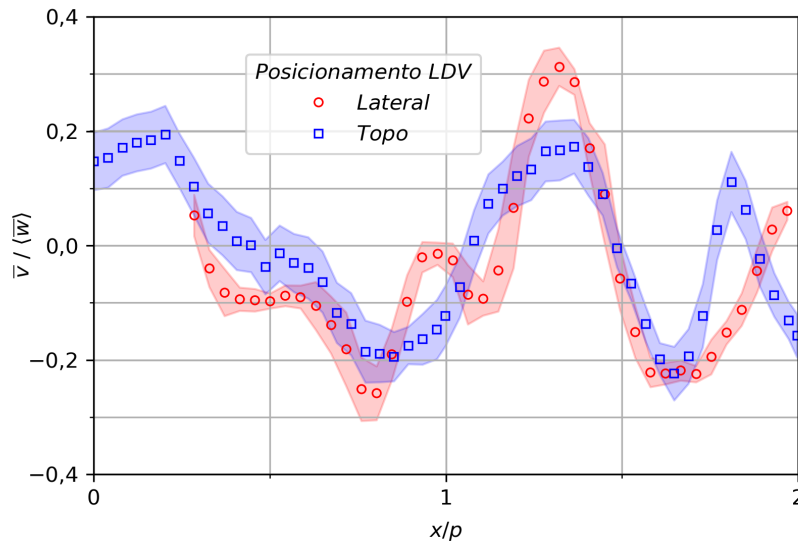
3.9 Representação das incertezas experimentais nos gráficos

As incertezas expandidas de todas as grandezas medidas e avaliadas foram utilizadas para a geração de um intervalo de confiança de 95%. Foram escolhidas duas maneiras para representar essas incertezas nos gráficos.

1. Através da área entre as curvas que representam o comportamento das grandezas envolvidas, conforme visto na Fig. 3.41
2. Mapa de calor associado ao ponto que representa a incerteza, exemplo na Fig. 3.42

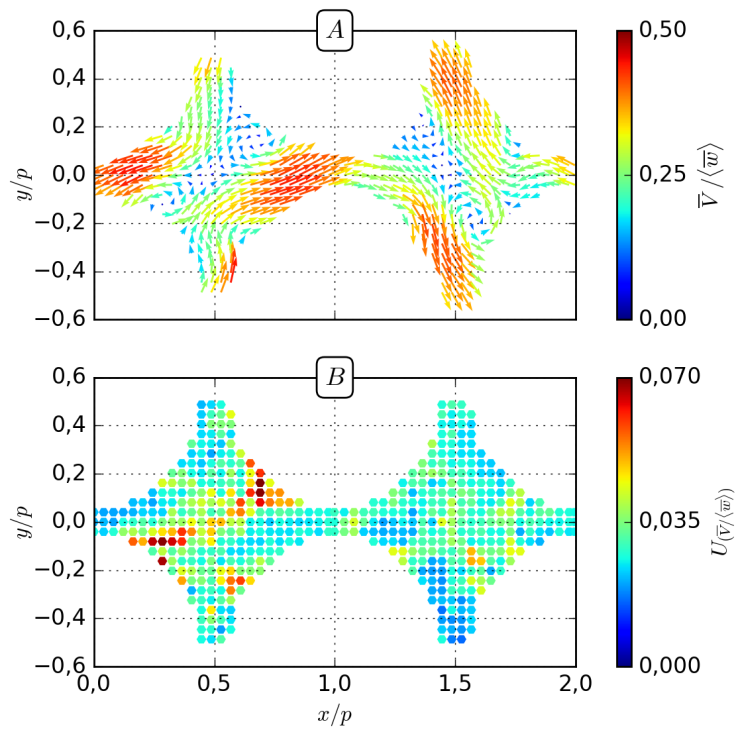
Em A) na Fig. 3.42 temos um campo vetorial de velocidades, a incerteza expandida normalizada de cada vetor em A) é representado no campo de incertezas em B).

Figura 3.41 – Exemplo da representação da incerteza expandida normalizada através de áreas entre as curvas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.42 – Exemplo da representação da incerteza expandida normalizada através do mapa de calor



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentada uma série de resultados experimentais referentes ao comportamento do escoamento de água a jusante de três grades espaçadoras distintas, sendo duas comerciais e uma impressa por técnicas de prototipagem no LTHN. Serão apresentadas as comparações da obtenção dos perfis de velocidade pela lateral e pelo topo da seção de testes para essas três grades.

Serão apresentados e comparados os resultados de parâmetros globais, tais como o escoamento secundário médio (SF) em função do afastamento em relação à grade, além da comparação dos resultados das perdas de pressão do conjunto grade + feixe de varetas.

Outros parâmetros semi-quantitativos: o movimento cruzado entre os subcanais e movimento rotacional (vórtices) que ocorre no interior dos subcanais também serão exibidos.

4.1 Condições experimentais e síntese das incertezas experimentais obtidas

4.1.1 Condições experimentais para ST1

Na Tab. 4.1 estão representados os resultados das condições experimentais que foram cuidadosamente controladas para os testes obtidos através do topo da ST1.

Tabela 4.1 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{u} e \bar{v} através do topo da ST1.

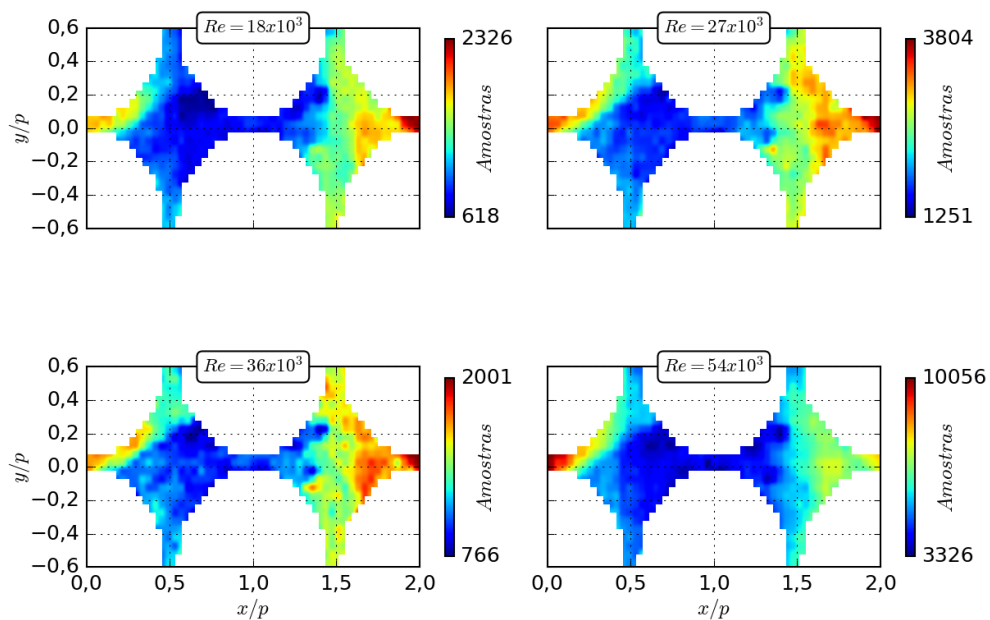
Quantidade de Testes	$Re[10^3]$	$U[10^3]$	$T[^\circ C]$	$U[^\circ C]$	$P[bar]$	$U[bar]$
18	18,17	0,09	25,04	0,98	0,671	0,004
18	27,26	0,06	24,99	0,98	1,020	0,003
18	36,35	0,08	25,01	0,98	1,498	0,004
16	53,67	0,54	25,00	0,99	2,767	0,008

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada parâmetro representado na Tab. 4.1 representa a média dos testes obtidos para as três alturas a jusante da grade aletada na ST1. Para cada altura foram realizados cerca de 6 testes. Isso corresponde a um total de 18 testes por Re avaliado, exceto para $Re = 53,67 \times 10^3$. Na seção 4.2 será apresentada a repetitividade e consistência dos perfis de velocidade obtidos com essas condições.

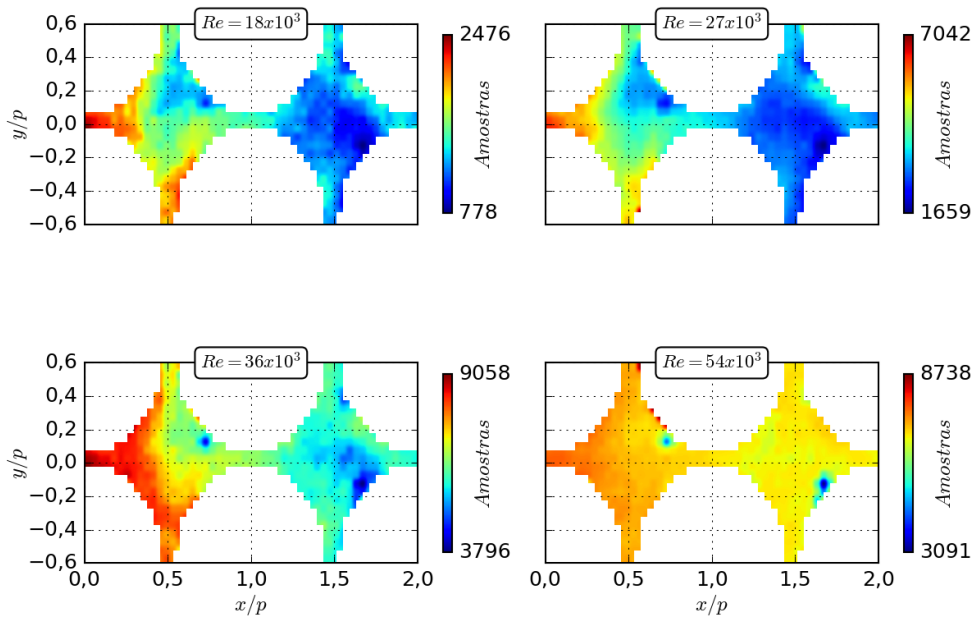
Para cada Re e altura avaliados foram obtidas uma quantidade de amostras distintas, conforme pode ser visto nas Figs. 4.1, 4.2 e 4.3.

Figura 4.1 – Distribuição de amostragem na altura de $1,22Dh$ a jusante da grade aletada.



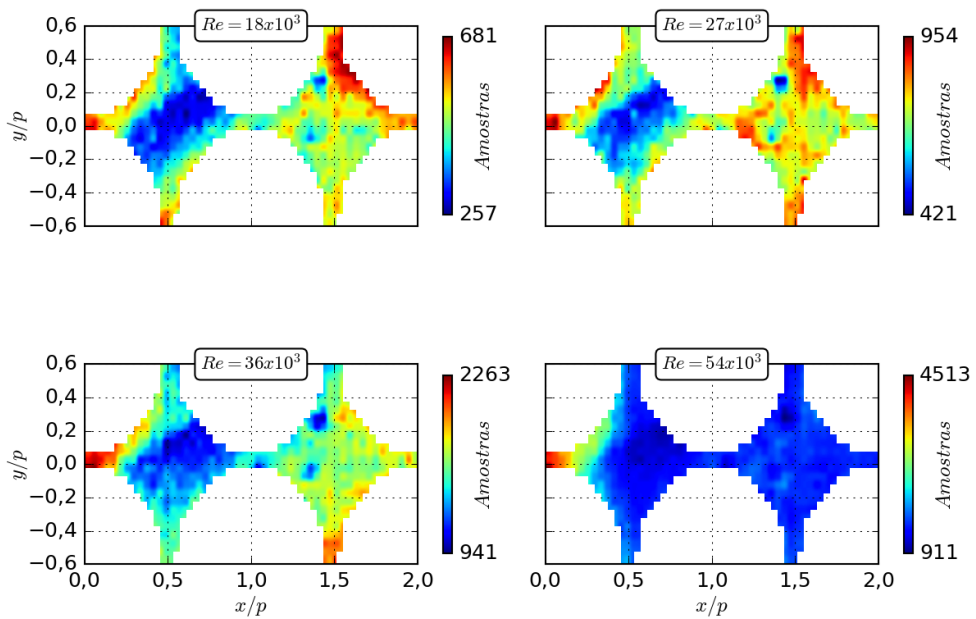
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.2 – Distribuição de amostragem na altura de $2,44Dh$ a jusante da grade aletada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.3 – Distribuição de amostragem na altura de $7,33Dh$ a jusante da grade aletada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As quantidades máximas e mínimas de amostras apresentadas correspondem à soma dos testes para cada altura. Nota-se que a quantidades máxima e mínima de amostras obtidas foram 10056 e 257 respectivamente. A amostragem foi significativa mesmo para as regiões e condições experimentais cujos valores obtidos estavam abaixo da média total. Os testes realizados foram conduzidos em dias diferentes garantindo assim uma aleatoriedade na aquisição desses dados.

Na Tab.4.2 é apresentada uma síntese das incertezas experimentais obtidas para cada parâmetro avaliado na sua respectiva região de medição. Note que a incerteza expandida foi normalizada pela velocidade média do escoamento $\langle \bar{w} \rangle$ ou velocidade quadrática média do escoamento $\langle \bar{w} \rangle^2$.

Tabela 4.2 – Síntese da incerteza expandida normalizada de todos os parâmetros avaliados para as alturas ao longo da posição $y/p = 0$.

$z/Dh = 1,22$	Re $[10^3]$	$U_{\bar{u}}/\langle \bar{w} \rangle$	$U_{\bar{v}}/\langle \bar{w} \rangle$	$U_{\bar{u}'\bar{u}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$	$U_{\bar{v}'\bar{v}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$	$U_{\bar{w}'\bar{w}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$
	18,08	0,022	0,048	0,003	0,003	0,004
	27,20	0,019	0,035	0,003	0,003	0,004
	36,27	0,016	0,032	0,003	0,004	0,002
	54,17	0,016	0,032	0,002	0,002	0,003
$z/Dh = 2,44$	Re $[10^3]$	$U_{\bar{u}}/\langle \bar{w} \rangle$	$U_{\bar{v}}/\langle \bar{w} \rangle$	$U_{\bar{u}'\bar{u}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$	$U_{\bar{v}'\bar{v}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$	$U_{\bar{w}'\bar{w}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$
	18,23	0,011	0,041	0,022	0,048	0,002
	27,30	0,013	0,030	0,019	0,035	0,003
	36,39	0,011	0,030	0,016	0,032	0,003
	53,58	0,012	0,031	0,016	0,032	0,003
$z/Dh = 7,33$	Re $[10^3]$	$U_{\bar{u}}/\langle \bar{w} \rangle$	$U_{\bar{v}}/\langle \bar{w} \rangle$	$U_{\bar{u}'\bar{u}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$	$U_{\bar{v}'\bar{v}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$	$U_{\bar{w}'\bar{w}'}/\langle \bar{w} \rangle^2$
	18,20	0,009	0,034	0,001	0,001	0,002
	27,28	0,011	0,026	0,002	0,001	0,002
	36,38	0,010	0,025	0,002	0,001	0,002
	53,25	0,011	0,023	0,002	0,001	0,002

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Condições experimentais para ST2 com grade comercial do tipo de canais

Nas Tab. 4.3 e Tab. 4.4 são apresentadas as condições experimentais dos resultados obtidos para os testes realizados através da lateral e do topo da ST2 respectivamente com a presença da grade espaçadora comercial do tipo de canais. A síntese da incerteza expandida normalizada dos principais parâmetros obtidos dessas condições estão presentes na Tab.4.5.

Tabela 4.3 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{w} e \bar{v} através da lateral da ST2.

	$Re[10^3]$	$U[10^3]$	$T[^\circ C]$	$U[^\circ C]$	$P[bar]$	$U[bar]$
Canal 1	27,057	0,022	24,88	0,49	1,108	0,002
Canal 2	27,017	0,021	24,86	0,49	1,108	0,002
Canal 3	27,019	0,018	24,86	0,49	1,109	0,002

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{u} e \bar{v} através do topo da ST2.

z/Dh	$Re[10^3]$	$U[10^3]$	$T[^\circ C]$	$U[^\circ C]$	$P[bar]$	$U[bar]$
1,22	27,104	0,026	25,12	0,49	1,084	0,002
2,44	27,110	0,022	24,95	0,49	1,085	0,002
7,33	27,141	0,026	24,93	0,49	1,092	0,002
18,73	27,150	0,044	24,98	0,50	1,095	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.5 – Síntese da incerteza expandida normalizada dos principais parâmetros avaliados para as alturas ao longo da posição $y/p = 0$ para a ST2 com a grade comercial do tipo canais.

z/Dh	1,22	2,44	7,33	18,73
$Re [10^3]$	27,104	27,110	27,141	27,150
$U_{\bar{u}} / \langle \bar{w} \rangle$	0,0158	0,0150	0,0165	0,0147
$U_{\bar{v}} / \langle \bar{w} \rangle$	0,0150	0,0142	0,0146	0,0136
$U_{u'u'} / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0027	0,0019	0,0012	0,0011
$U_{v'v'} / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0026	0,0018	0,0011	0,0011
$U_{u'v'} / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0009	0,0007	0,0004	0,0004
$U_k / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0028	0,0020	0,0012	0,0012

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Condições experimentais para ST2 com grade impressa

Na Tab.4.6 são apresentados os resultados das condições experimentais do regime do escoamento para a grade impressa presente na ST2.

A partir dos resultados obtidos foi possível avaliar a relação entre as componentes de incerteza associada com os perfis de velocidade conforme poderá ser visto a seguir. Percebeu-se que a componente de incerteza relacionada com a metade do ângulo de

Tabela 4.6 – Condições experimentais para obtenção dos perfis de velocidade \bar{u} e \bar{v} através do topo da ST2 com a presença da grade impressa.

z/Dh	$Re[10^3]$	$U[10^3]$	$T[^\circ C]$	$U[^\circ C]$	$P[bar]$	$U[bar]$
1,22	27,116	0,034	24,94	0,50	1,139	0,004
2,44	27,146	0,028	24,87	0,49	1,140	0,003
7,33	27,124	0,031	25,06	0,49	1,147	0,002
18,73	27,171	0,062	25,08	0,51	1,125	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 – Síntese da incerteza expandida normalizada de todos os parâmetros avaliados para as alturas ao longo da posição $y/p = 0$ para a ST2 com a grade impressa.

z/Dh	1,22	2,44	7,33	18,73
Re $[10^3]$	27,116	27,146	27,125	27,171
$U_{\bar{u}} / \langle \bar{w} \rangle$	0,0170	0,0167	0,0157	0,0147
$U_{\bar{v}} / \langle \bar{w} \rangle$	0,0153	0,0154	0,0140	0,0133
$U_{\bar{u}'\bar{u}'} / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0047	0,0042	0,0017	0,0011
$U_{\bar{v}'\bar{v}'} / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0044	0,0041	0,0017	0,0010
$U_{\bar{u}'\bar{v}'} / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0033	0,0030	0,0012	0,00007
$U_k / \langle \bar{w} \rangle^2$	0,0050	0,0045	0,0018	0,0011

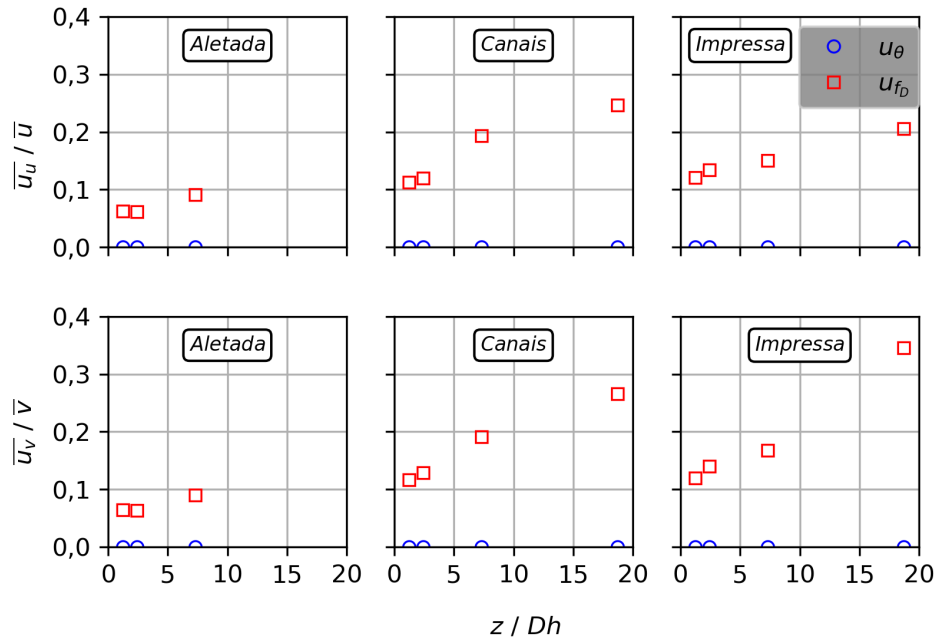
Fonte: Elaborado pelo autor.

encontro dos feixes $u(\theta)$ assim como a componente referente ao comprimento de onda $u(\lambda)$ também possui um valor passível de ser negligenciável, pois a ordem de grandeza dessa componente é 10^{-4} . Na Fig.4.4 pode ser observada a influência das componentes de incerteza $u(\theta)$ e $u(f_D)$ para as duas componentes de velocidades médias \bar{u} e \bar{v} para todas as alturas e grades espaçadoras avaliadas.

Note que a componente de velocidade representada por $u(\theta)$ na Fig.4.4 é a mesma componente $u(\text{sen}\theta/2)$ descrita na Fig.3.36, apenas reescrita com uma sintaxe diferente. Percebe-se ainda que para todas as alturas e grades espaçadoras avaliadas a componente com maior influência é $u(f_D)$. Os valores de incerteza relativas \bar{U}_u/\bar{u} e \bar{U}_u/\bar{v} possuem magnitudes cerca de 50% menores para a grade aletada em relação às grades de canais e impressa. Além disso, com o afastamento em relação à grade a incerteza relativa tende a aumentar também.

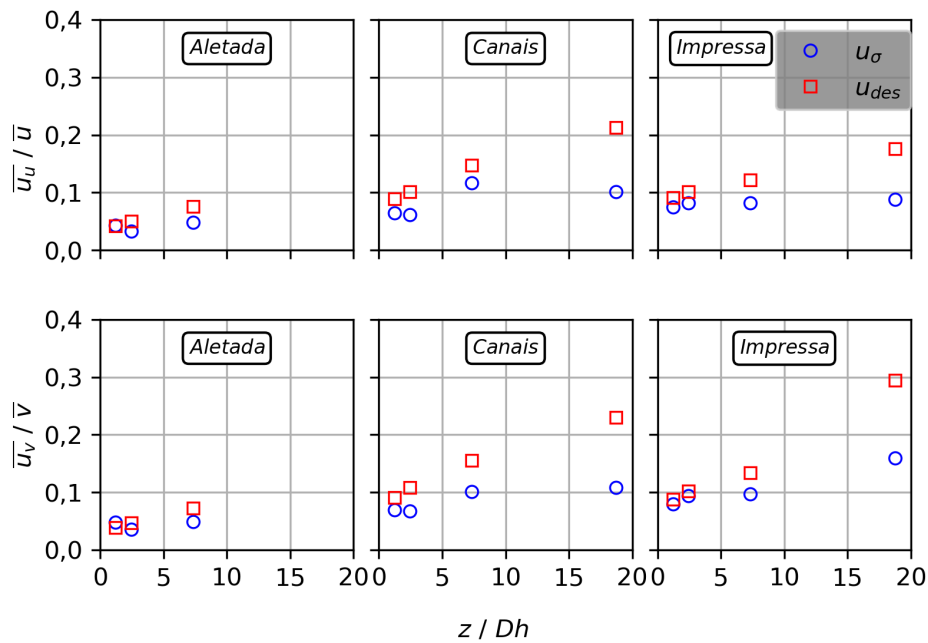
A influência das componentes de incerteza padrão $u(\sigma(V_i))$ e relacionada com o desalinhamento dos eixos $u(Des)$ que compõem $u(f_D)$ pode ser observada na Fig.4.5.

Figura 4.4 – Influência das componentes de incertezas relacionadas com a metade do ângulo de encontro dos feixes $u(\theta)$ e frequência Doppler $u(f_D)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.5 – Influência das componentes de incertezas padrão $u(\sigma(V_i))$ e desalinhamento dos eixos $u(Des)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

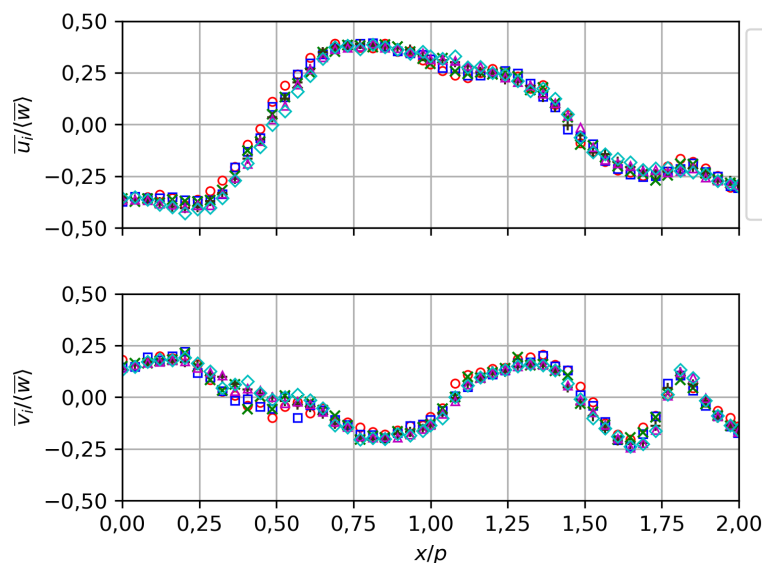
As componentes de incertezas, $u(Des)$ e $u(\sigma(V_i))$, apresentadas na Fig.4.5 possuem valores mais significativos se comparados com a componente $u(\theta)$ presente na Fig.4.4. Note que nas regiões mais próximas da grade ambas as componentes $u(Des)$ e $u(\sigma(V_i))$ possuem valores equivalentes, porém nas posições mais afastadas das grades de canais e impressa a componente $u(Des)$ corresponde ao dobro de $u(\sigma(V_i))$. Esse fato evidencia a importância de se garantir o melhor alinhamento possível do LDV com a seção de testes e regiões de medição.

4.2 Resultados da medição pelo topo da ST1 para múltiplos Re

As Figs. 4.6 e 4.7 mostram os perfis de velocidade obtidos para seis testes realizados para a altura normalizada $1,22Dh$ a jusante da grade espaçadora. Na Fig. 4.6 os seis testes foram realizados para número de $Re = 18 \times 10^3$ e a Fig. 4.7 para número de $Re = 54 \times 10^3$.

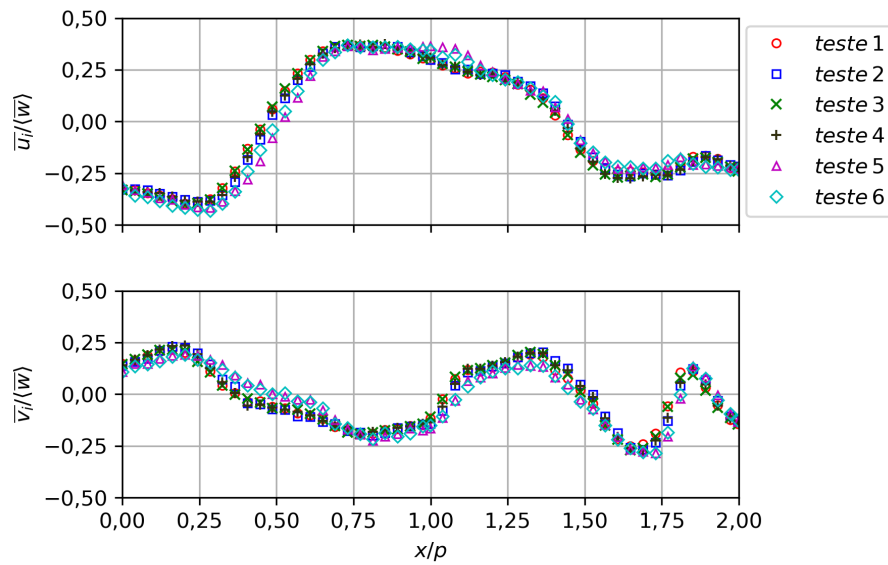
A partir da análise desses testes obteve-se um perfil de velocidade médio e a sua respectiva incerteza expandida normalizada conforme apresentado na seção 3.8.

Figura 4.6 – Testes de repetitividade para $Re = 18 \times 10^3$ e $1,22Dh$ a jusante da grade espaçadora



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Testes de repetitividade para $Re = 54 \times 10^3$ e $1,22Dh$ a jusante da grade espaçadora.

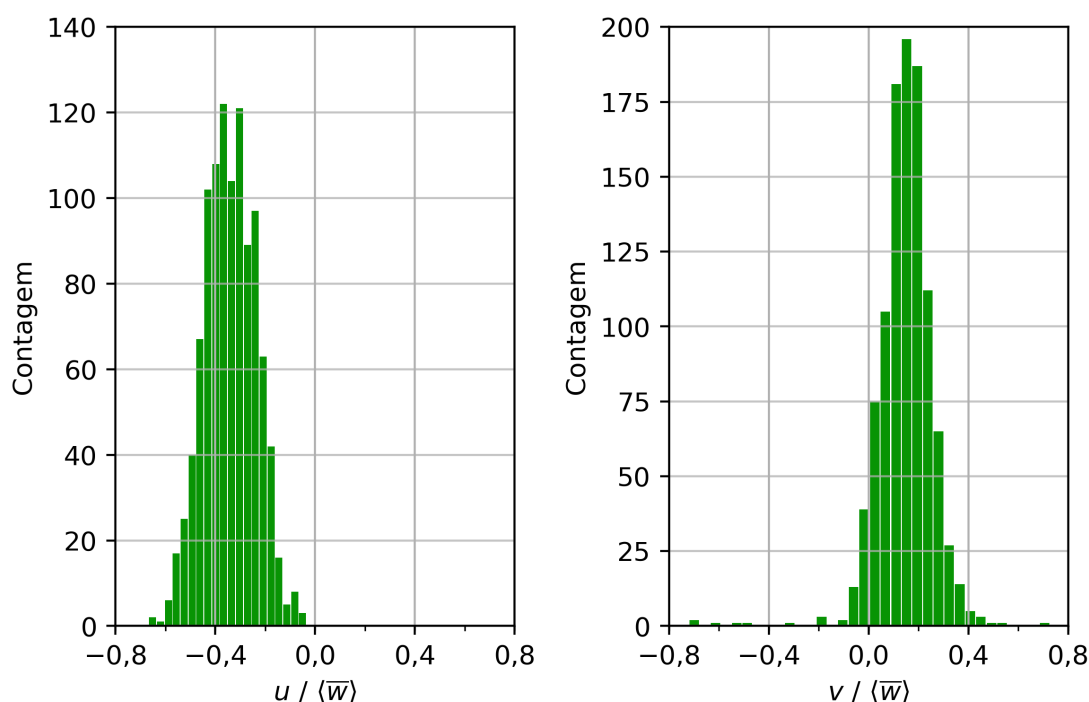


Fonte: Elaborado pelo autor.

Três alturas a jusante da grade espaçadora comercial aletada foram escolhidas para obtenção dos perfis de velocidades laterais \bar{u} e \bar{v} . O eixo normalizado $y/p = 0$ presente em cada uma dessas alturas escolhidas contem 51 pontos.

Histogramas semelhantes aos que podem ser observados na Fig. 4.8, foram gerados para cada um desses pontos.

Figura 4.8 – Histogramas obtidos na posição normalizada $(0p, -0.5p)$, do primeiro teste para $Re = 27 \times 10^3$ na altura de $1,22Dh$ a jusante da grade presente na ST1.

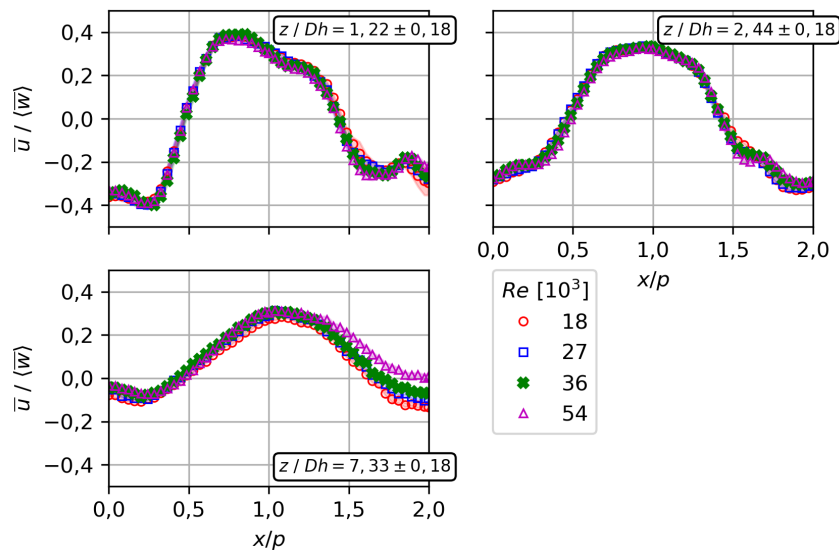


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela análise desses histogramas pode ser notado um comportamento semelhante ao de uma distribuição normal. Todos os histogramas obtidos seguem o mesmo padrão observado na Fig. 4.8. Na pesquisa desenvolvida por [Chang, Kim e Song \(2014\)](#) pode ser notado através de histogramas o quanto as regiões de parede influenciam nas medições dos perfis de velocidade. No trabalho de [Chang, Kim e Song \(2014\)](#) percebeu-se que o comprimento do volume de medição é o principal responsável pela inserção de ruído nas medições de parede. Quando o volume de medição tangencia as paredes da seção de testes faz com que luz espalhada pelo *LDV-2D* seja processada como velocidade nula. O valor da velocidade lida na região em questão passa a ser um misto de velocidade nula e não nula. Portanto, esse fenômeno nas proximidades de paredes causa um efeito de subestimar o valor dos perfis de velocidades.

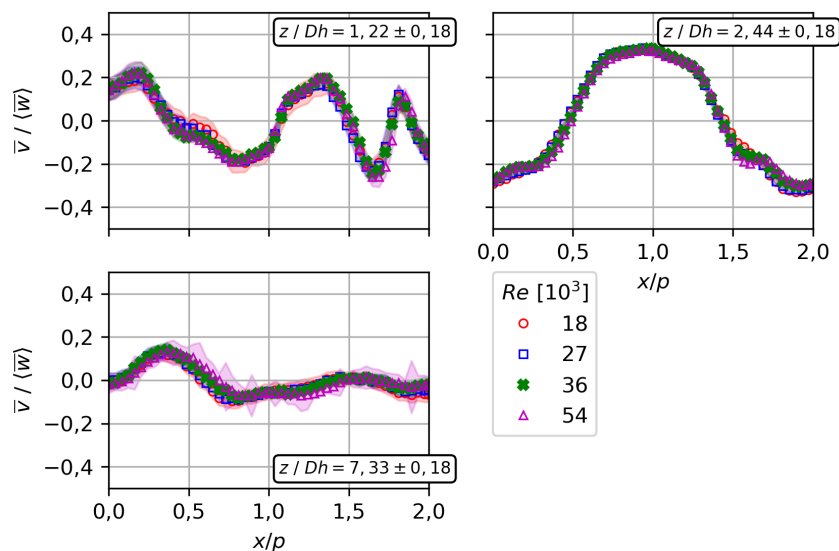
As posições (x e y) que compõem o plano foram normalizadas pelo passo entre as varetas (p) e as alturas em (z) normalizadas pelo diâmetro hidráulico (Dh). As Fig. 4.9 e Fig. 4.10 possuem 51 pontos ao longo de toda a região correspondente à $y/p = 0$. As regiões normalizadas 0 , $1p$ e $2p$ correspondem ao espaço entre as varetas para o eixo y/p em x/p as posições variam entre $-0.5p$ e $0.5p$.

Figura 4.9 – Perfil de velocidade (u) normalizado pela velocidade média do escoamento ($\langle \bar{w} \rangle$) para as três alturas a jusante da grade espaçadora ao longo do eixo $y/p = 0$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.10 – Perfil de velocidade (v) normalizado pela velocidade média do escoamento ($\langle \bar{w} \rangle$) para três alturas a jusante da grade espaçadora ao longo do eixo $y/p = 0$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os perfis de velocidade médio \bar{u} e \bar{v} foram obtidos para quatro números de Re , 18×10^3 , 27×10^3 , 36×10^3 e 54×10^3 . Para que fosse possível a comparação entre esses perfis de velocidade obtidos para Re diferentes, eles foram normalizados pela velocidade média

do escoamento como pode ser visto na Fig. 4.9 e Fig. 4.10. Os parâmetros utilizados para obtenção de \bar{w} foram apresentados na seção 3.3.

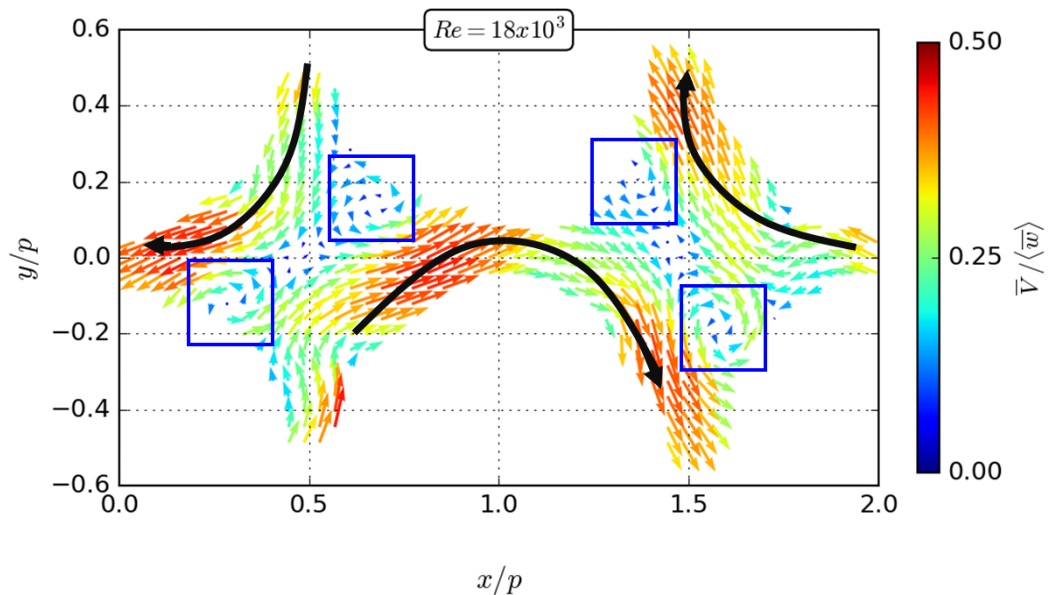
Os perfis de velocidade apresentados nas Figs. 4.9 e 4.10 mostram uma tendência de similaridade apesar de terem sido realizados para regimes de escoamento distintos, isto é, números de Re diferentes. A magnitude da ordem de grandeza apresentada pelos números de Re foi a mesma. Pode ser observado que a magnitude dos perfis de velocidades $\bar{u}/\langle \bar{w} \rangle$ e $\bar{v}/\langle \bar{w} \rangle$ decaem com o afastamento da grade espaçadora.

As incertezas expandidas normalizadas dos perfis de velocidades $\bar{u}/\langle \bar{w} \rangle$ e $\bar{v}/\langle \bar{w} \rangle$ que foram obtidas para os números de Re de 18×10^3 à 54×10^3 estão representadas nas Figs. 4.9 e 4.10 através de uma área que acompanha esses perfis de velocidade, conforme explicado na seção 3.9. A incerteza expandida normalizada para altura $z/Dh = 7,33$ apresentou maiores valores ao longo de x/p para $Re = 54 \times 10^3$.

Nota-se que para as duas alturas mais próximas da grade espaçadora, $z/Dh = 1,22$ e $2,44$ o comportamento se mostrou mais consistente entre si em comparação com a posição $z/Dh = 7,33$. Para a altura $z/Dh = 7,33$ da Fig. 4.9 é observado que a consistência é verdadeira para as posições próximas de $x/p = 0$. Mas, após $x/p = 1,3$ há diferença entre os perfis de velocidade para diferentes Re , principalmente para $Re = 54 \times 10^3$. No entanto, a região ($x/p = 1,3$) apresentou uma característica distinta entre os Re avaliados. Inicialmente, a hipótese levantada foi a de que os feixes do LDV tivessem captado mais ruídos devido à proximidade dos seus feixes com as paredes das varetas. Porém, conforme poderá ser visto a seguir, essas diferenças também foram obtidas nas medições de campo completo pelo topo da ST1.

Essas componentes de velocidades laterais $\bar{u}/\langle \bar{w} \rangle$ e $\bar{v}/\langle \bar{w} \rangle$ foram avaliadas através das medições de campo completo conforme pode ser visto na Fig. 4.11.

Figura 4.11 – Detalhes das estruturas presentes nas medidas de campo completo obtidas para $z/p = 1, 22$ a jusante da grade aletada.

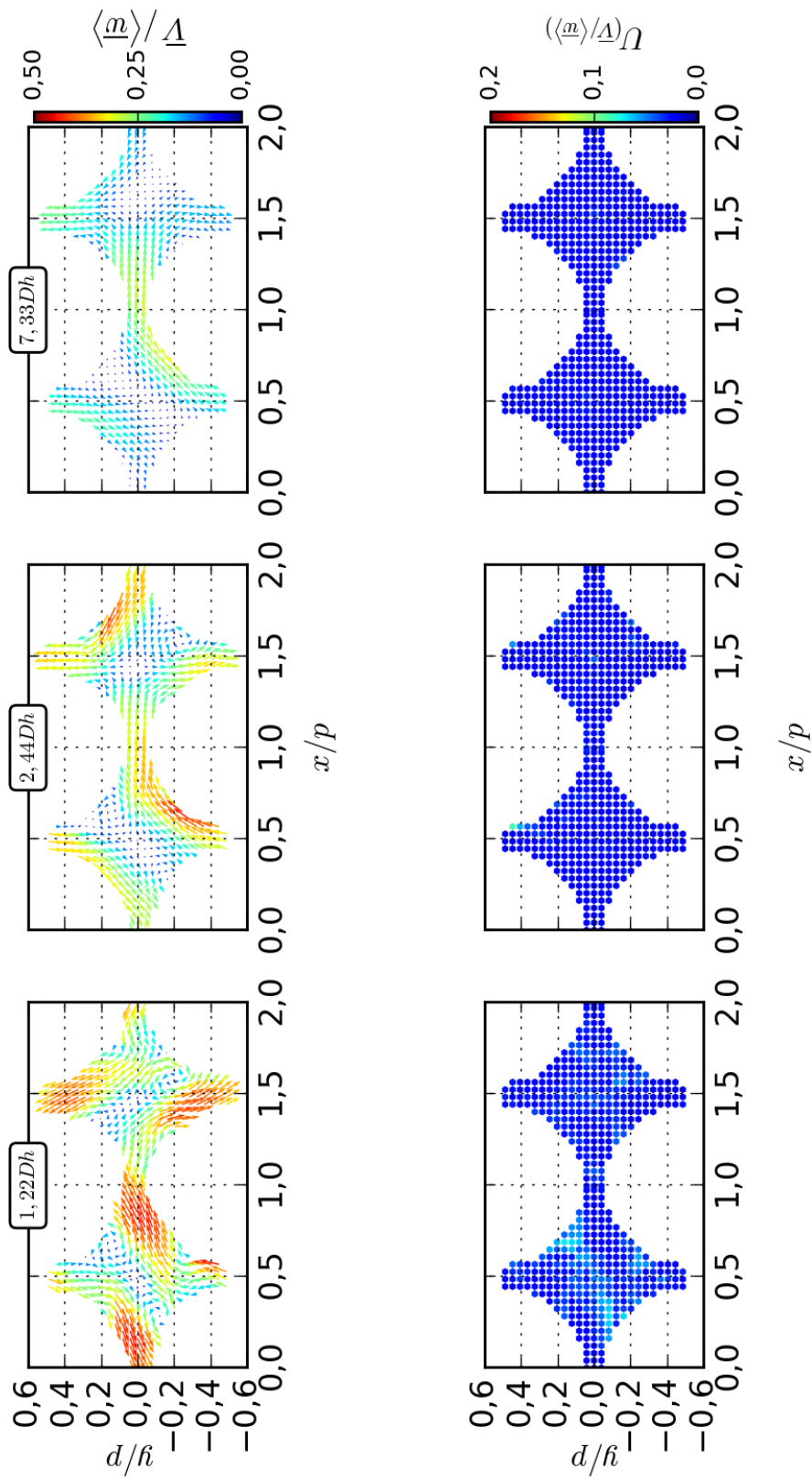


Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das medidas de campo completo é possível observar os movimentos rotacionais e cruzados no interior e entre subcanais. Os movimentos rotacionais secundários foram destacados através dos quadrados azuis na Fig. 4.11 e os movimentos cruzados entre os subcanais, estão representados pelas setas pretas. Note que os movimentos cruzados nessa região do plano se movem em sentido horário ao redor das varetas. Esses movimentos foram induzidos pelas aletas presentes nessa grade. Tais comportamentos provocados no escoamento são difíceis de serem avaliados em medições obtidas ao longo de uma linha.

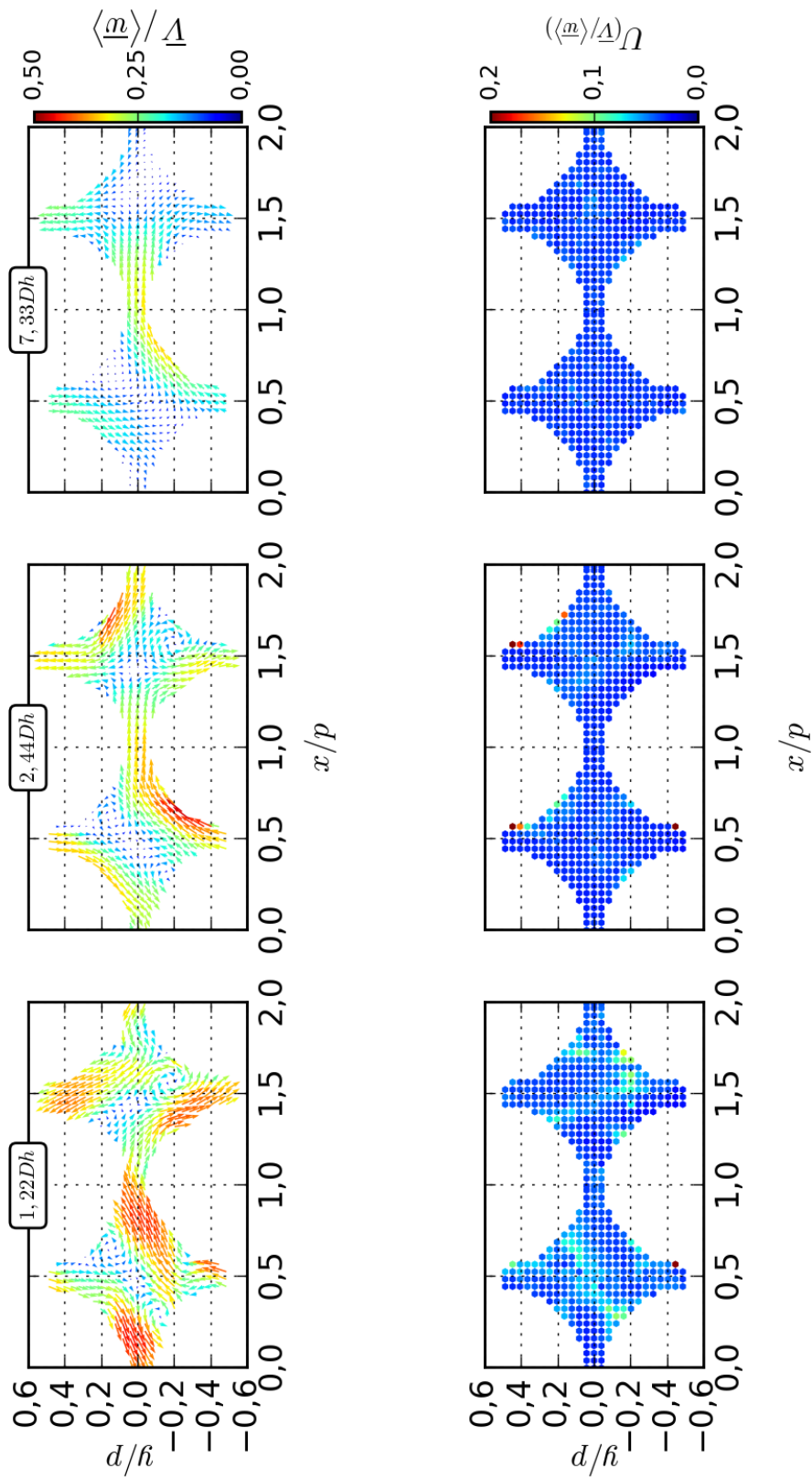
As medidas de campo completo e múltiplos Re para essa grade aletada podem ser observadas através das Figs. 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

Figura 4.12 – Campo vetorial de velocidades para $Re = 18 \times 10^3$.



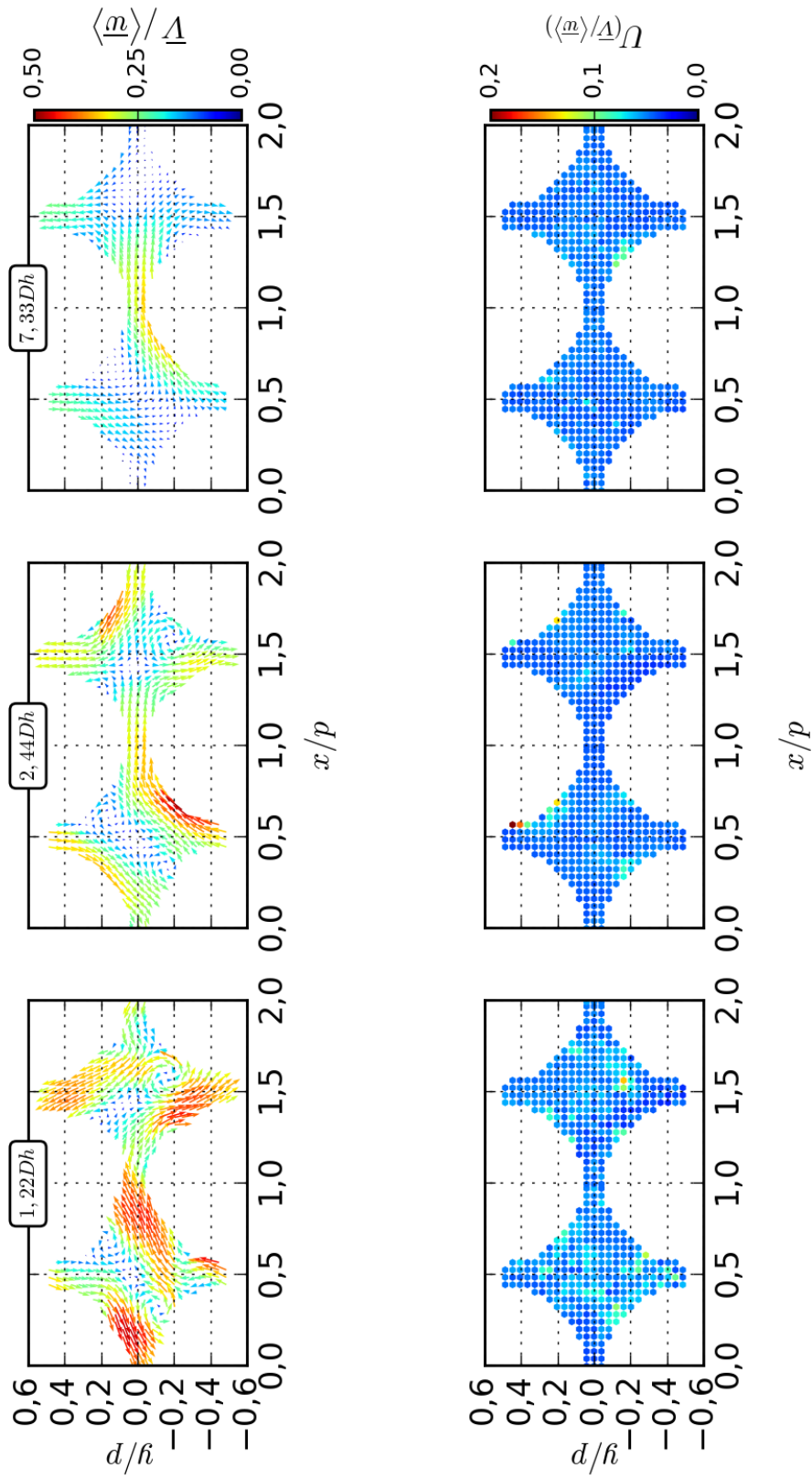
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.13 – Campo vetorial de velocidades para $Re = 27 \times 10^3$.



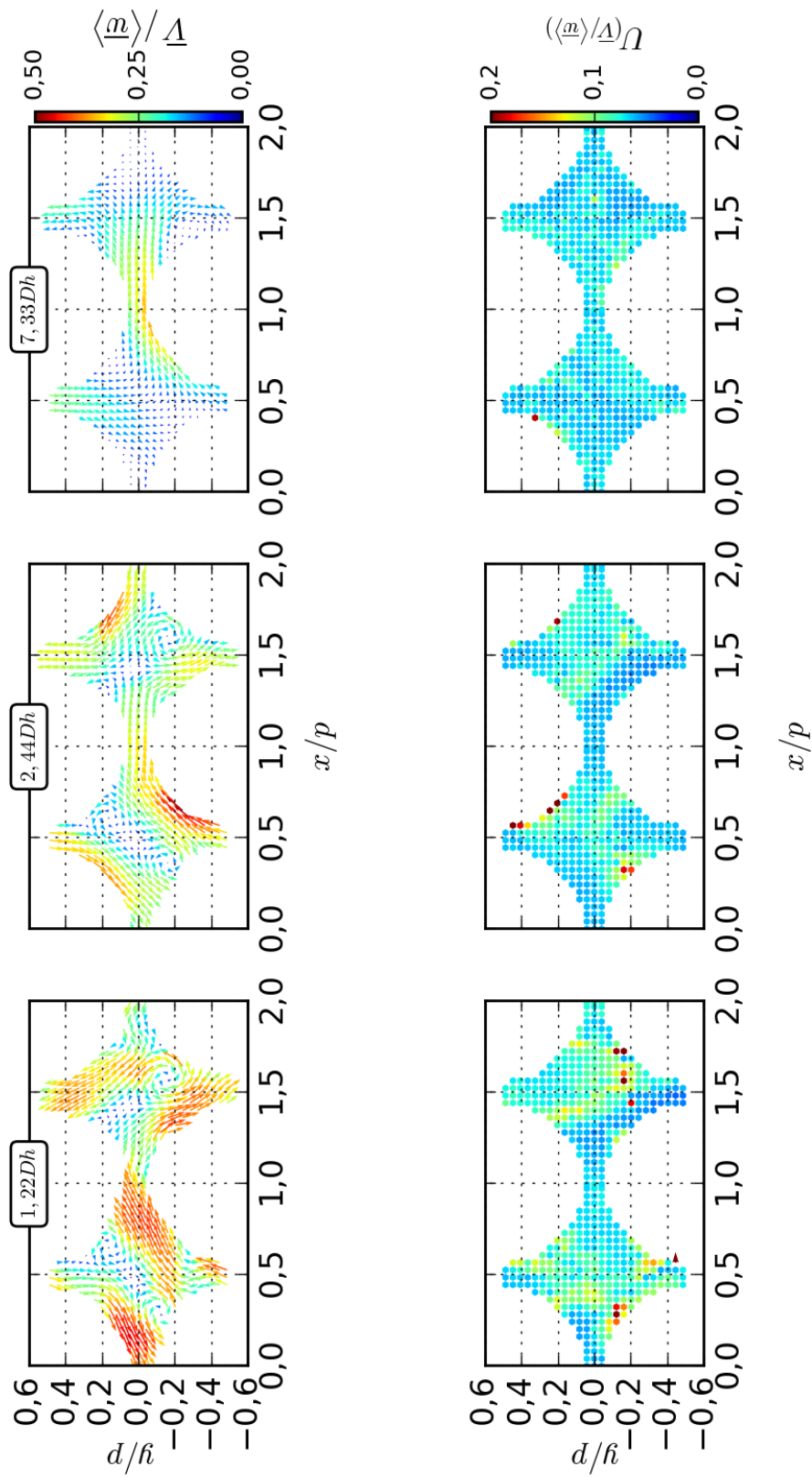
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.14 – Campo vetorial de velocidades para $Re = 36 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.15 – Campo vetorial de velocidades para $Re = 54 \times 10^3$.

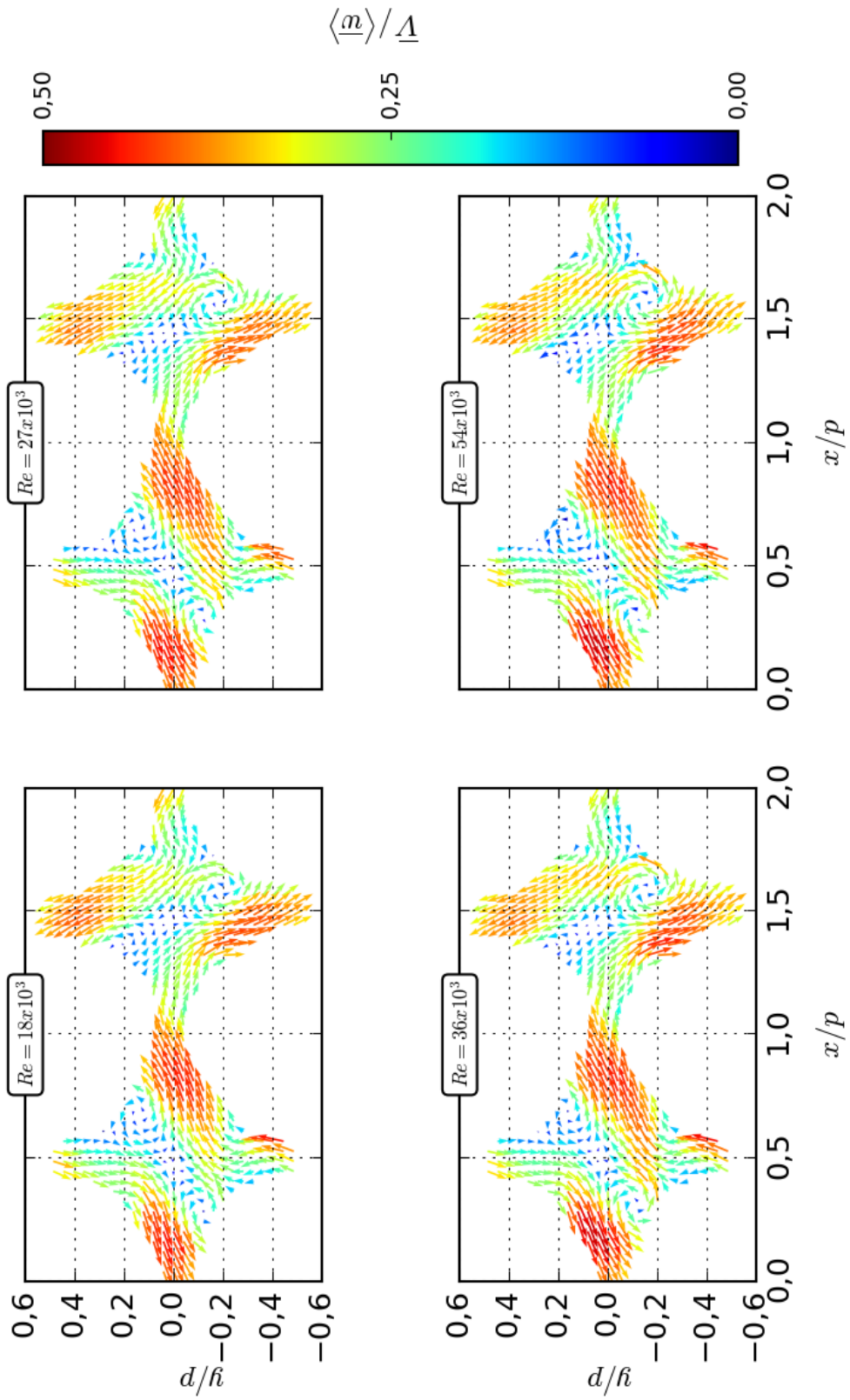


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Figs. 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentadas medidas de campo vetorial formado pela soma das componentes de velocidades laterais (u) e (v). O vetor resultante médio \bar{V} foi normalizado pela velocidade média do escoamento ($\langle \bar{w} \rangle$). Uma característica comum à todos os regimes de escoamento avaliados foi o amortecimento da resultante das velocidades no plano com o afastamento em relação à grade espaçadora. Os movimentos cruzados e rotacionais também mudam suas características com esse distanciamento em relação à grade. Em $z/Dh = 1,22$ é possível notar nitidamente, vórtices secundários no interior do primeiro subcanal, porém esses mesmos vórtices foram dissipados ao chegar na altura $z/Dh = 7,33$. Nessa altura, os movimentos cruzados são predominantes. Essas características foram observadas em todos os Re avaliados. As incertezas expandidas normalizadas também foram apresentadas nessas medidas de campo. Nota-se que essas incertezas expandidas normalizadas aumentam com o aumento de Re . De maneira que a incerteza obtida em $Re = 18 \times 10^3$ é menor do que para $Re = 54 \times 10^3$.

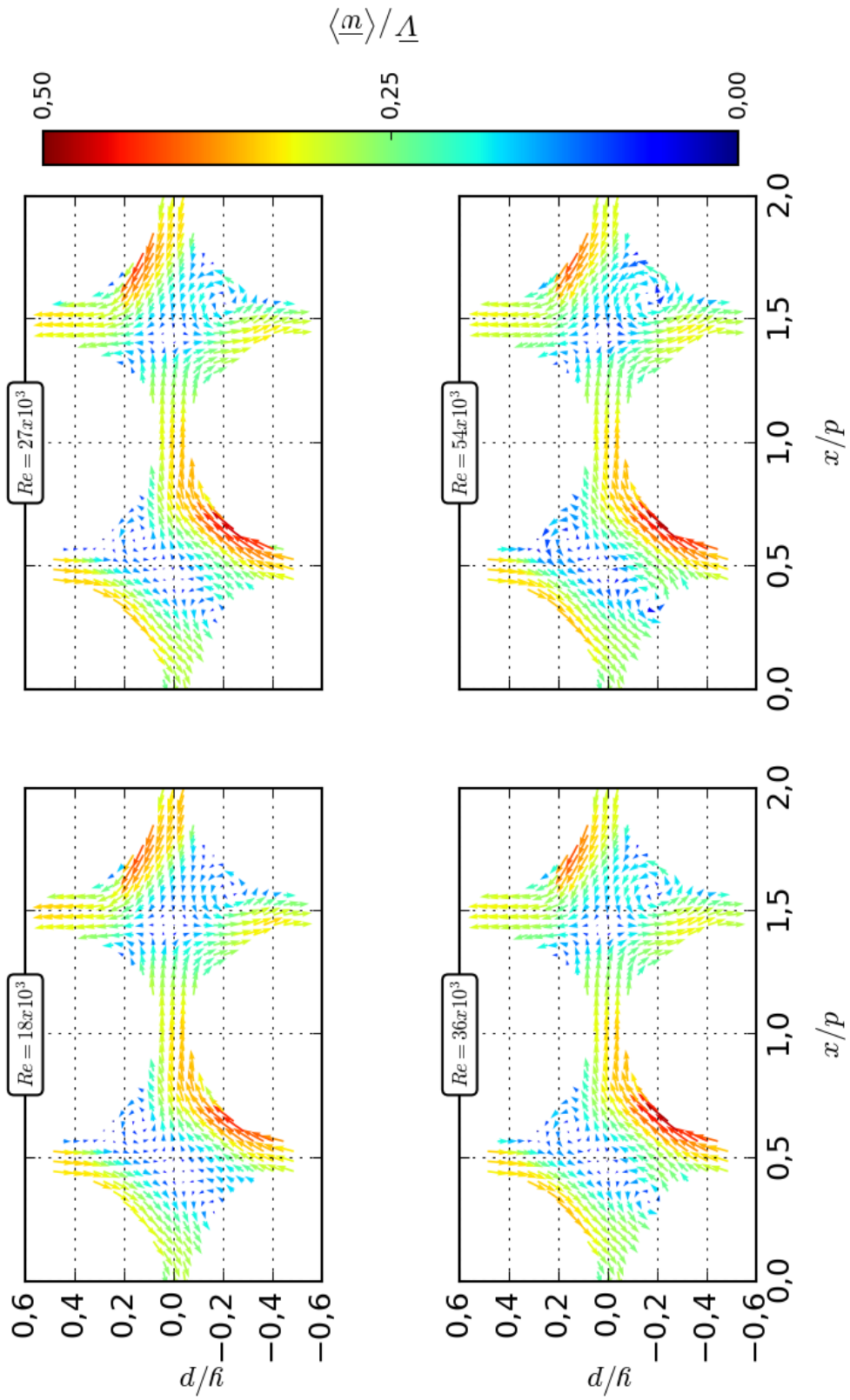
De forma análoga à observada nas Figs. 4.9 e 4.10, foram observadas sutis diferenças no comportamento do escoamento para Re distintos. Nas Figs. 4.16, 4.17 e 4.18 podem ser melhor visualizados o campo de velocidades para as alturas normalizadas $1,22Dh$, $2,44Dh$ e $7,33Dh$ respectivamente.

Figura 4.16 – Campo vetorial de velocidades para $z/Dh = 1,22$.



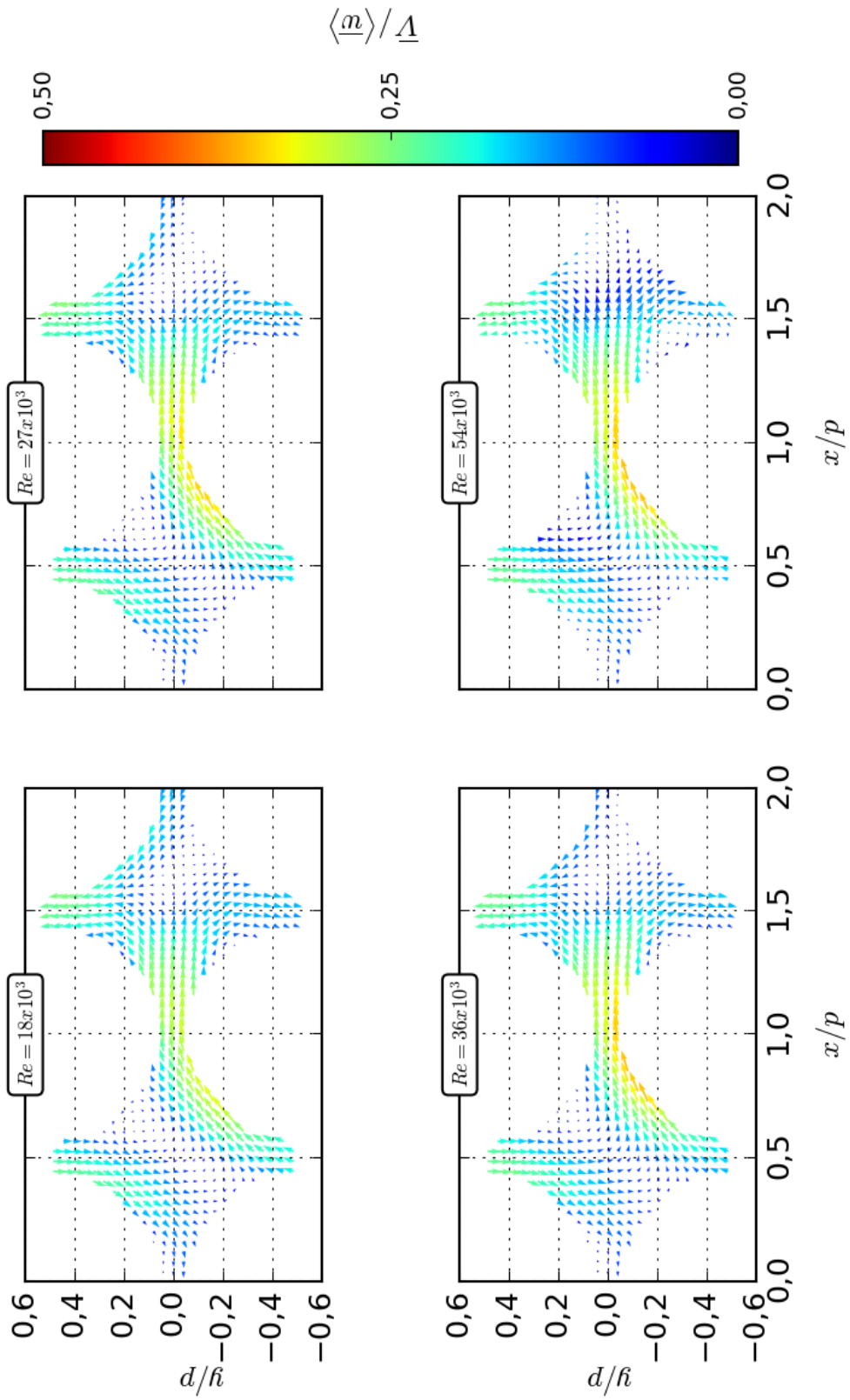
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.17 – Campo vetorial de velocidades para $z/Dh = 2,44$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.18 – Campo vetorial de velocidades para $z/Dh = 7,33$.

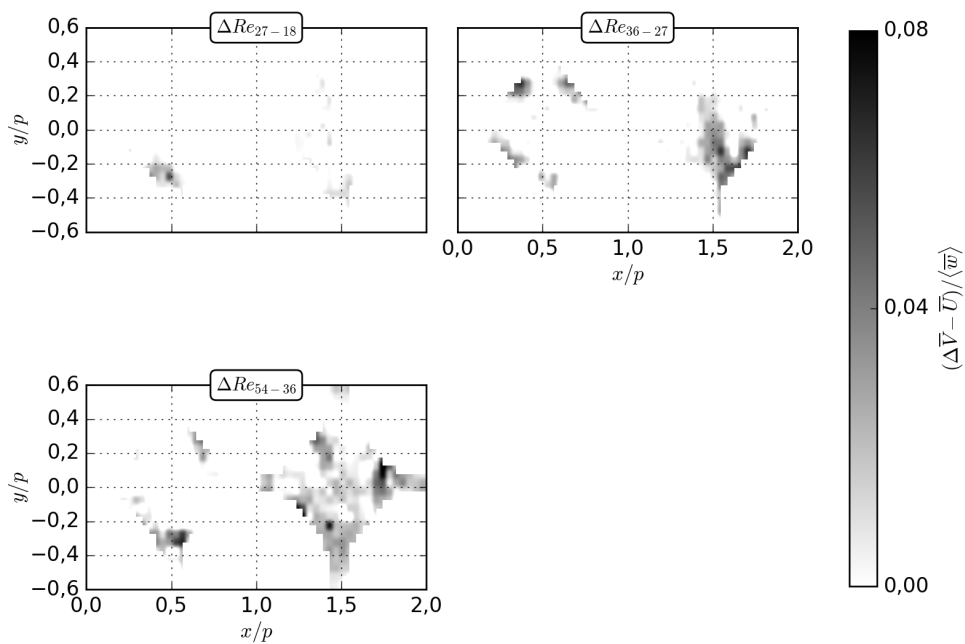


Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais diferenças puderam ser observadas nas intensidades dos vetores velocidades resultantes. Dessa maneira, foi feita uma comparação entre Re consecutivos e entre esses com $Re = 54 \times 10^3$ para destacar as regiões onde as diferenças são de fato menores do que a incerteza experimental.

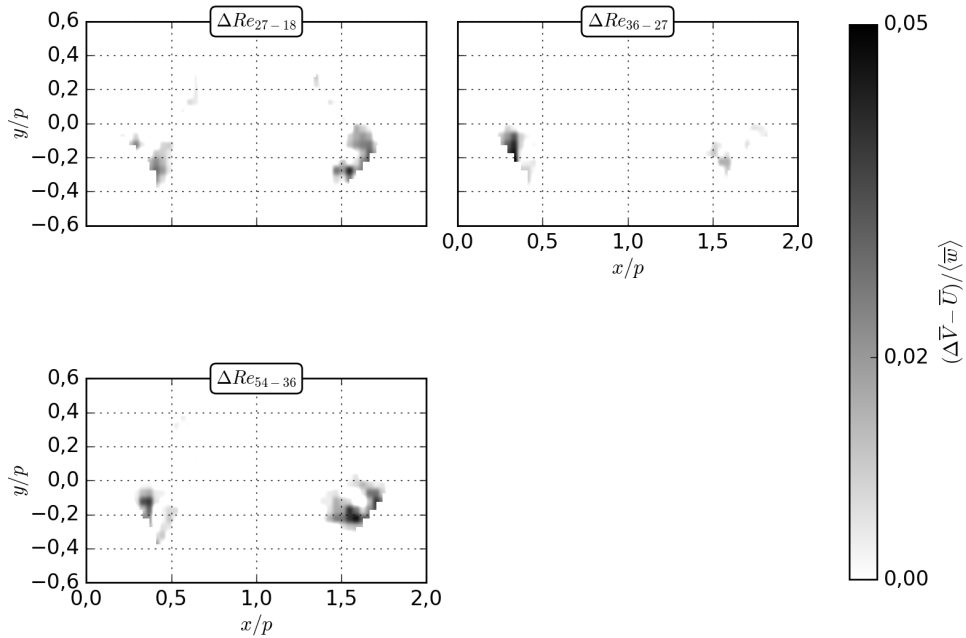
Inicialmente foram obtidas as diferenças entre vetores velocidades resultantes normalizados de Re consecutivos e em seguida subtraiu-se deles a soma da incerteza expandida normalizada desses vetores, ou seja, $((\Delta \bar{V} - \bar{U}) / \langle \bar{w} \rangle)$. Nas Figs. 4.19, 4.20 e 4.21 estão representados os resultados dessas diferenças, onde, ΔRe_{27-18} representa essa operação para a diferença entre os vetores velocidades resultantes normalizados de $Re = 27 \times 10^3$ e $Re = 18 \times 10^3$ com a soma da incerteza experimental normalizada dos vetores obtidos para essas duas condições.

Figura 4.19 – Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 1, 22$.



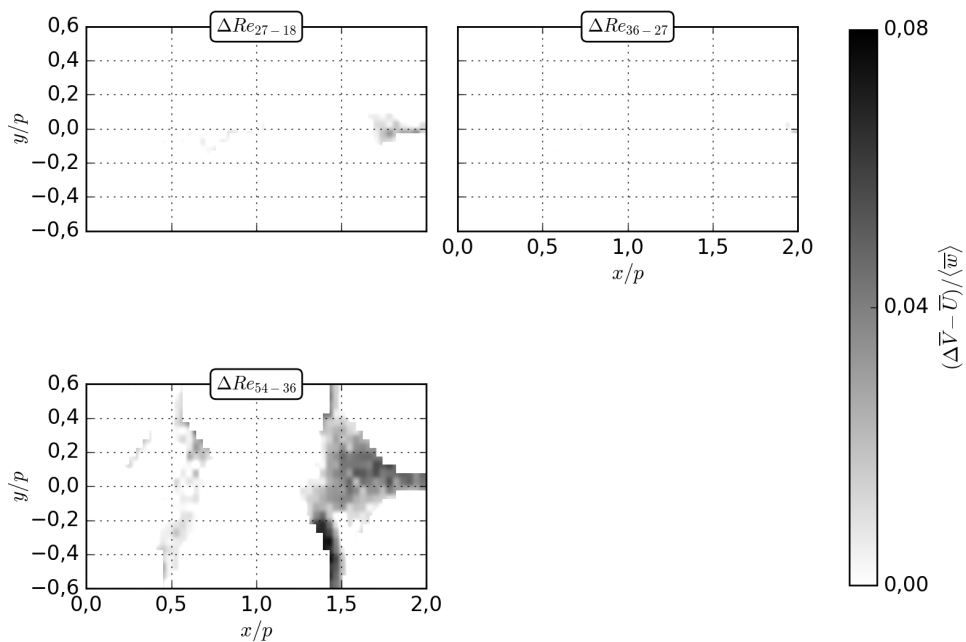
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.20 – Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 2,44$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.21 – Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/DH = 7,33$.

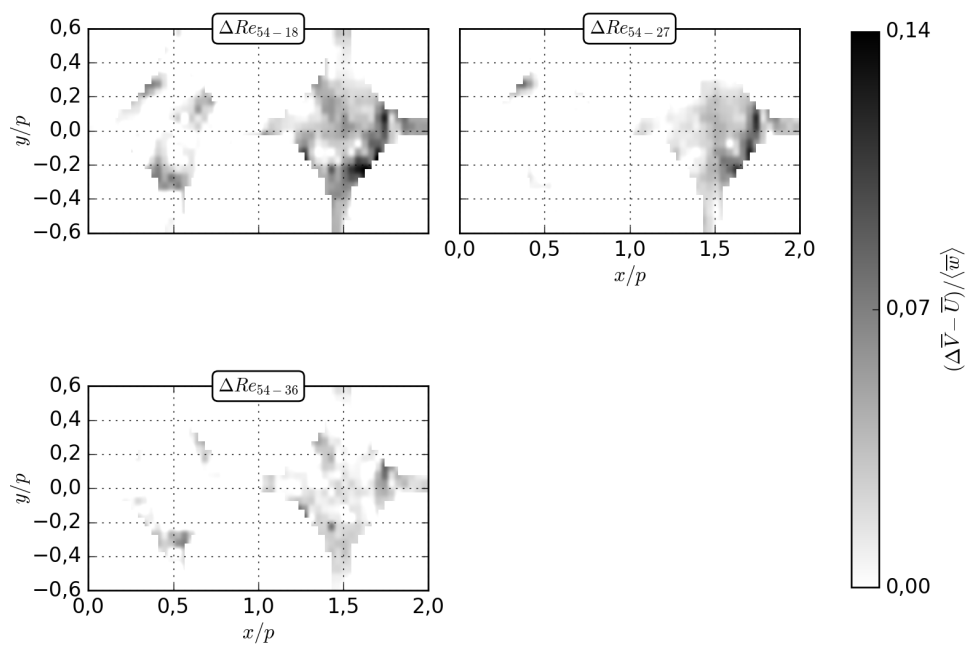


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que as diferenças entre os Re consecutivos para $z/Dh = 1,22$ é crescente no sentido das variações de Re menores para os maiores. Na altura intermediária $z/Dh = 2,44$, as diferenças estão localizadas principalmente nas regiões onde estão os vórtices secundários¹. Na Fig. 4.21 observa-se que as diferenças obtidas para a altura mais afastada ($z/Dh = 7,33$) foram mais evidentes entre $Re = 54 \times 10^3$ e $Re = 36 \times 10^3$ na região do subcanal próximo do centro da ST1.

Essas diferenças também foram obtidas entre $Re = 18 \times 10^3$, $Re = 27 \times 10^3$ e $Re = 36 \times 10^3$ com o de maior valor avaliado, $Re = 54 \times 10^3$. As Figs. 4.22, 4.23 e 4.24 representam a relação dessas diferenças para as três alturas normalizadas, $z/Dh = 1,22$, $z/Dh = 2,44$ e $z/Dh = 7,33$ respectivamente.

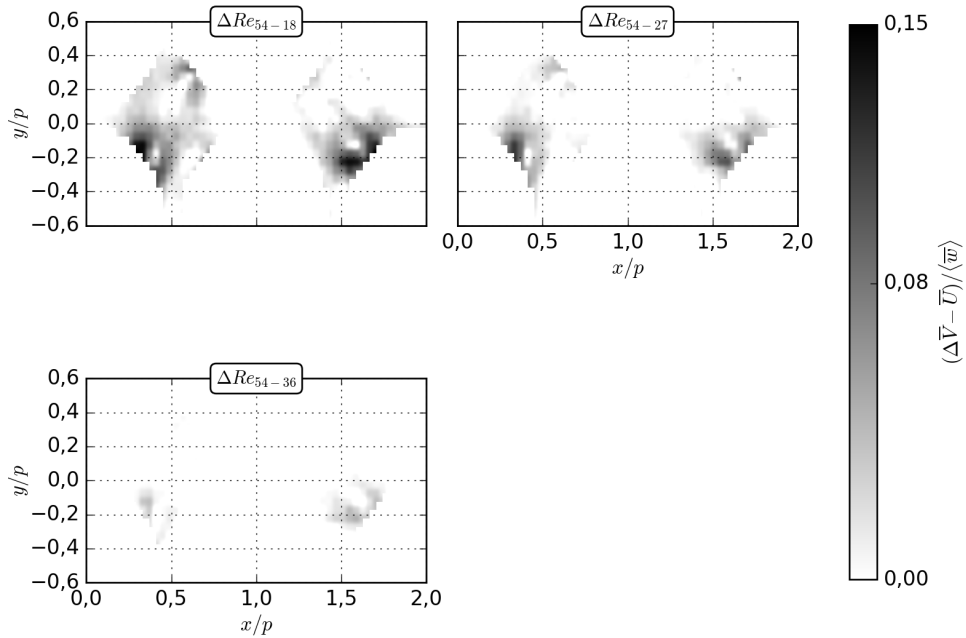
Figura 4.22 – Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 1,22$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

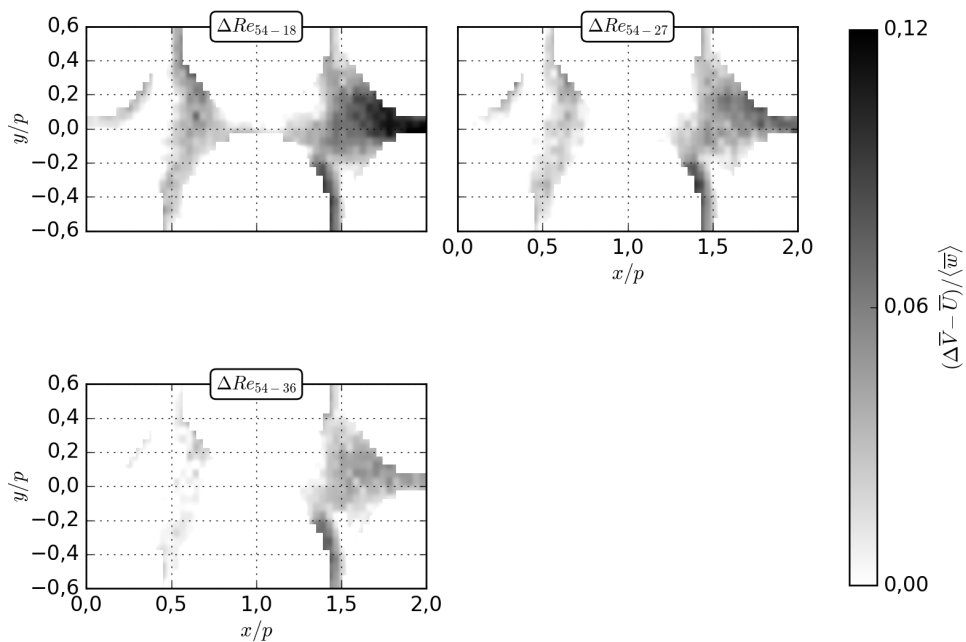
¹ Observe a localização desses vórtices secundários na Fig. 4.17.

Figura 4.23 – Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 2,44$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.24 – Representação da diferença entre o vetor resultante e a incerteza experimental para altura $z/Dh = 7,33$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Fig. 4.22, 4.23 e 4.24 observou-se um padrão segundo o qual, quanto maior a diferença entre os Re observados, maior também será a diferença no comportamento do escoamento relacionado. A maior diferença observada foi entre $Re = 54 \times 10^3$ e $Re = 18 \times 10^3$ e a menor entre $Re = 54 \times 10^3$ e $Re = 36 \times 10^3$. Uma síntese desses resultados é apresentado na Tab. 4.8.

Tabela 4.8 – Porcentagem de pontos cuja incerteza é menor ($\Delta \bar{V} - \bar{U}$).

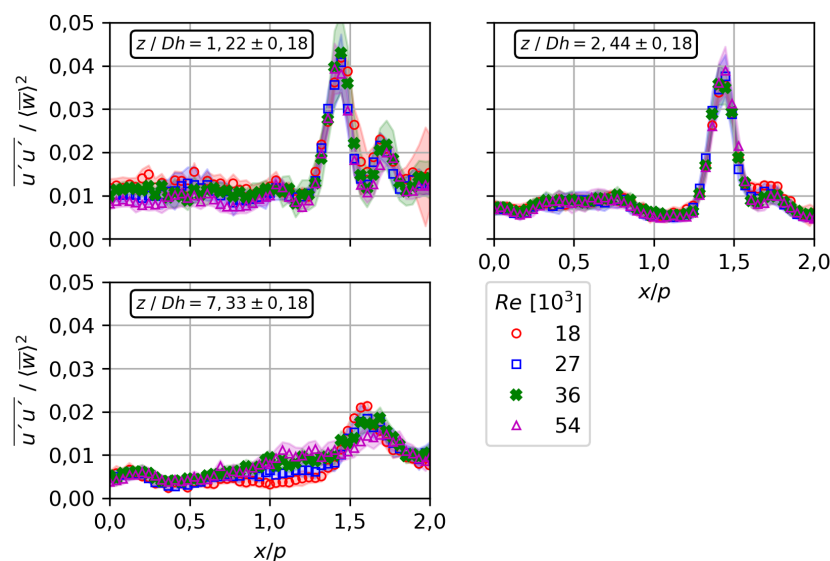
ΔRe	$z = 1,22Dh$ [%]	$z = 2,44Dh$ [%]	$z = 7,33Dh$ [%]
Re_{27-18}	11,1	12,7	8,1
Re_{36-27}	27,7	8,3	2,0
Re_{54-36}	45,3	14,3	54,3
Re_{54-27}	42,8	39,0	66,3
Re_{54-18}	66,3	58,2	76,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Análise dos tensores de Reynolds para múltiplos Re .

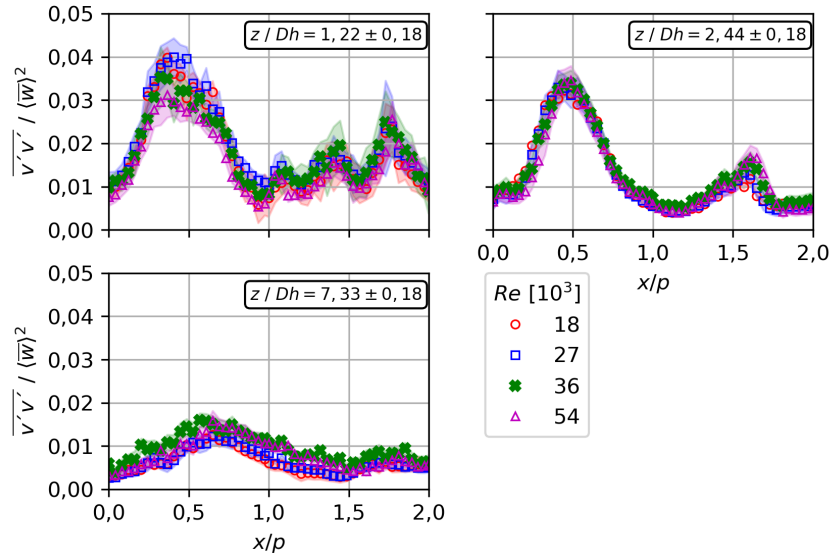
Nesta seção será apresentada a análise de três tensores de Re . Dois termos normais $u'u'$ e $v'v'$ podem ser vistos nas Figs. 4.25 e 4.26. Na Fig.4.27 pode ser visto o termo cisalhante $u'v'$. Todos os tensores avaliados foram normalizados pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$).

Figura 4.25 – Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada ao longo do eixo $y/p = 0$.



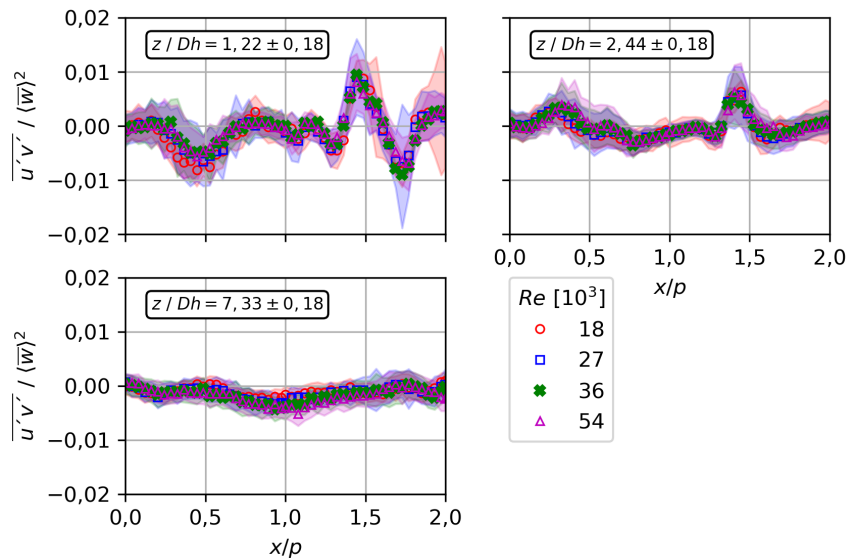
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.26 – Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por $(\langle \bar{w} \rangle^2)$ para três alturas a jusante de uma grade aletada ao longo do eixo $y/p = 0$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.27 – Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por $(\langle \bar{w} \rangle^2)$ para três alturas a jusante da grade aletada ao longo do eixo $y/p = 0$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram observadas diferenças em regiões específicas para os tensores de Re , principalmente nas alturas $z/Dh = 1,22$ e $z/Dh = 7,33$ dos tensores normais $u'u'$ e $v'v'$. Um exemplo de regiões com diferenças mais acentuadas são:

- Para $(u'u')$, faixa entre $x/p = 0$ e $x/p = 1,0$ da altura $z/Dh = 1,22$

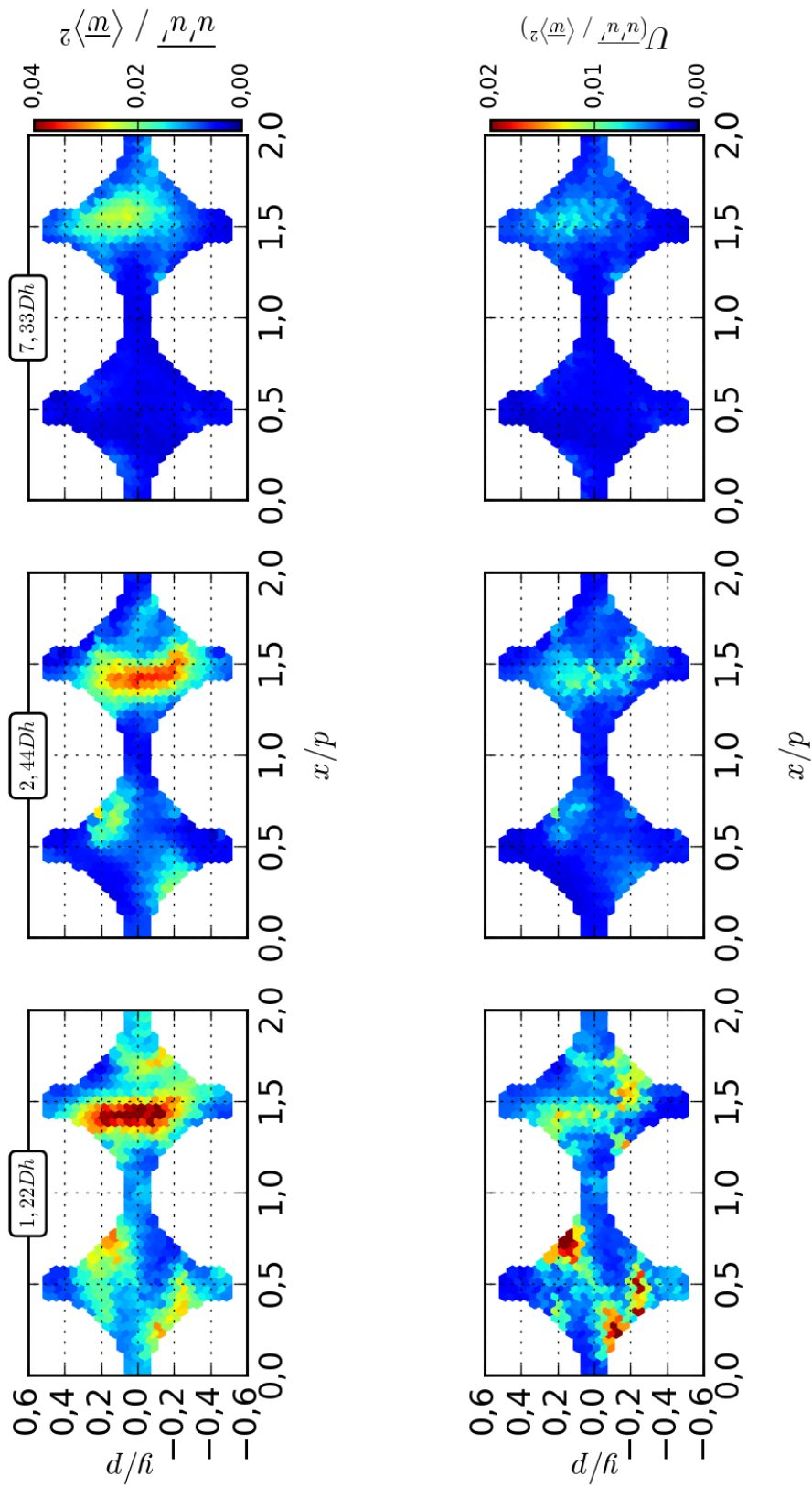
- Para $(u'u')$, faixa entre $x/p = 0,7$ e $x/p = 1,7$ da altura $z/Dh = 7,33$
- Para $(v'v')$, faixa entre $x/p = 0,2$ e $x/p = 0,7$ da altura $z/Dh = 1,22$
- Para $(v'v')$, faixa entre $x/p = 0$ e $x/p = 1,5$ da altura $z/Dh = 7,33$

Essas diferenças observadas comprovam a tendência de alteração no comportamento do escoamento para Re distintos. No entanto, para o tensor cisalhante $u'v'$ essas diferenças não foram estatisticamente significativas.

Percebe-se que todos os tensores de Reynolds avaliados decaem com o afastamento da grade espaçadora. A incerteza expandida normalizada se mostrou maior nas regiões próximas da grade espaçadora. Nota-se também que nas regiões próximas de $x/p = 2$ das Fig. 4.25 e Fig. 4.27 a incerteza se apresentou maior. A principal justificativa para o aumento da incerteza nessas regiões se deve à efeitos associados às reflexões provenientes das superfícies internas da seção de testes, e nessas regiões próximas de $x/p = 2$ se deve à leve interferência com as varetas.

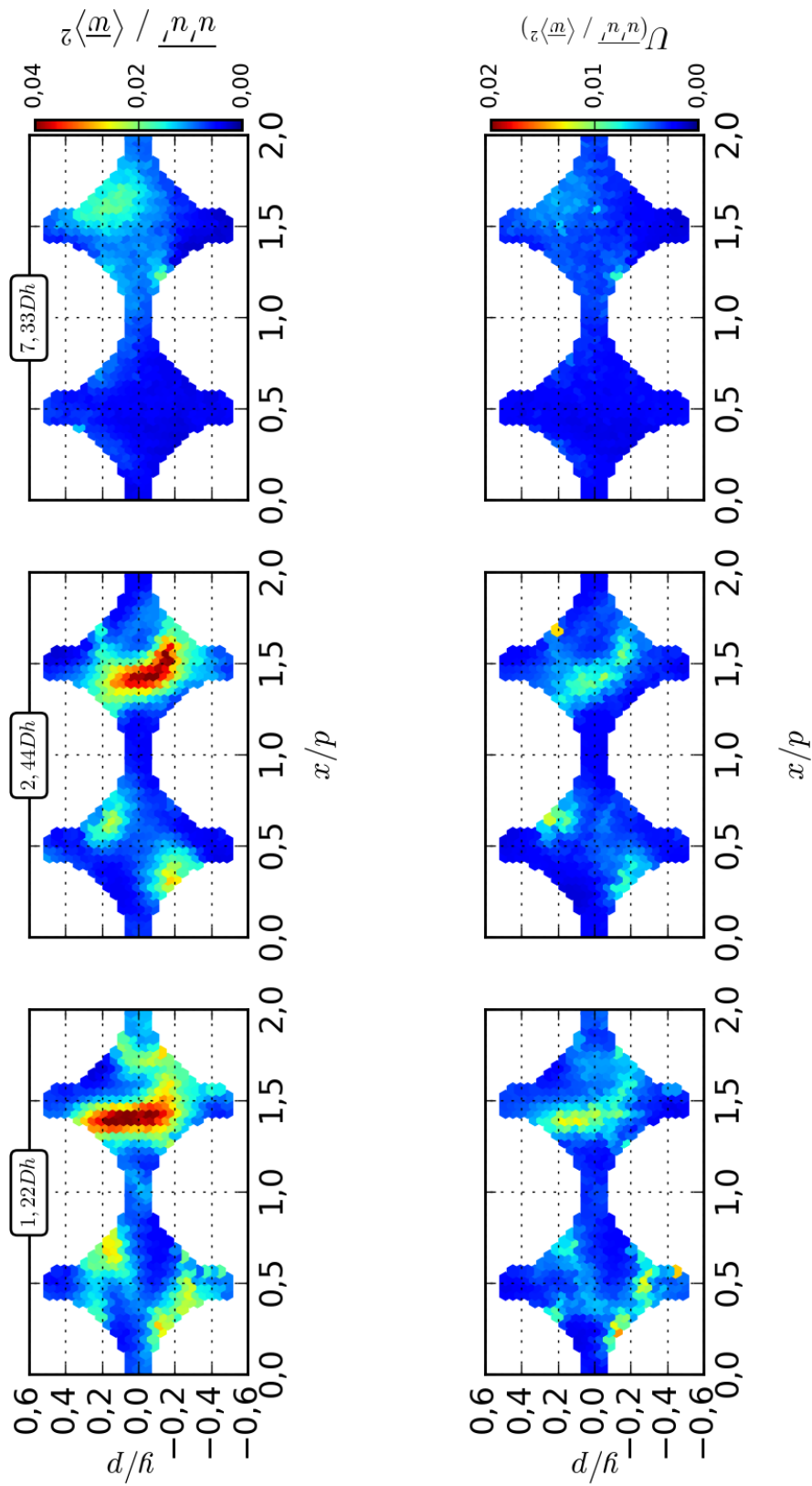
Para melhor ilustrar essas diferenças existentes entre as faixas de Re avaliadas, nas Figs. 4.28, 4.30 e 4.32 são apresentadas medidas de campo tensorial para $Re = 18x10^3$ e as Figs. 4.29, 4.31 e 4.33 para $Re = 54x10^3$. Os resultados referentes aos Re intermediários, $Re = 27x10^3$ e $Re = 36x10^3$, podem ser vistos no Anexo C.

Figura 4.28 – Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 18 \times 10^3$.



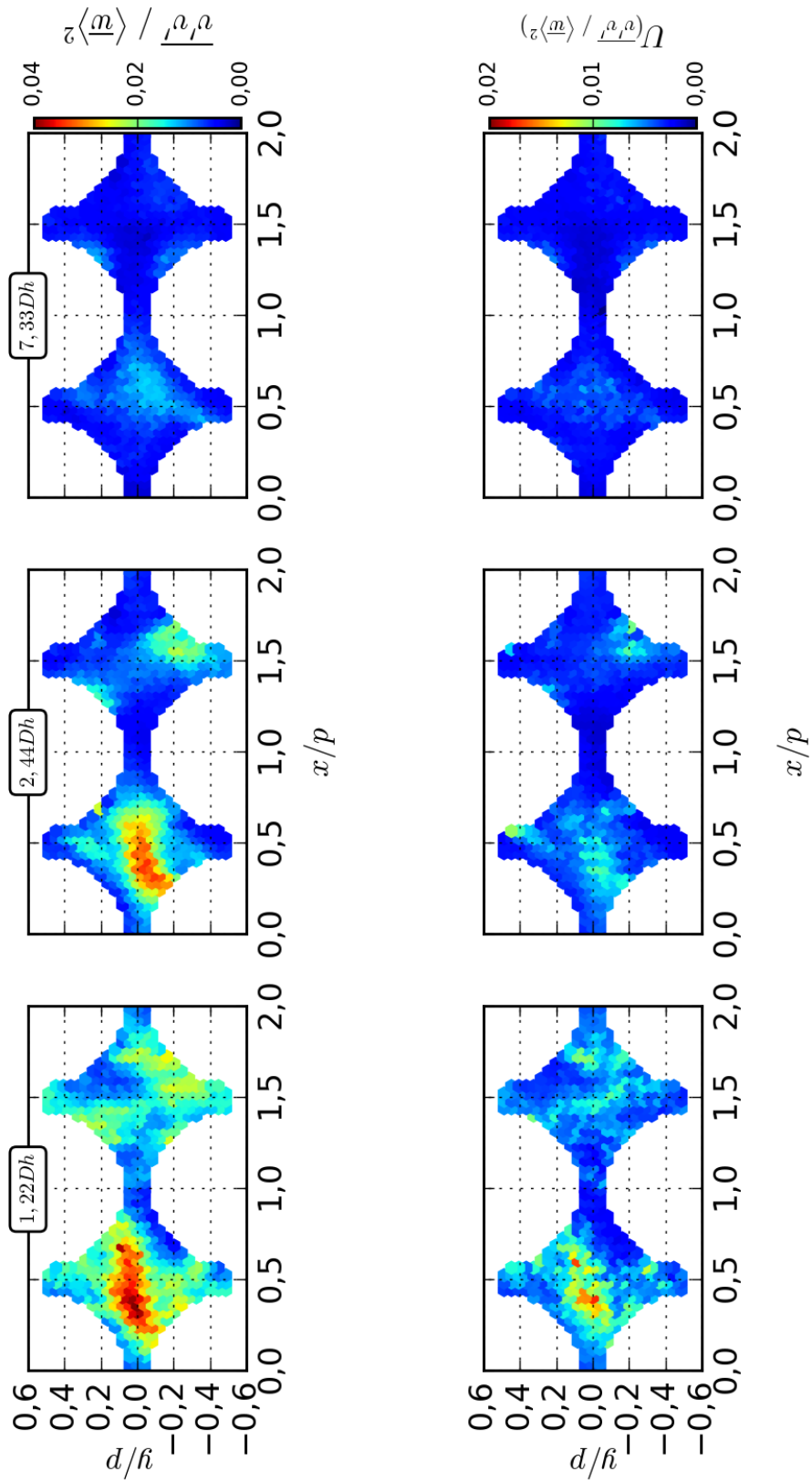
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.29 – Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 54 \times 10^3$.



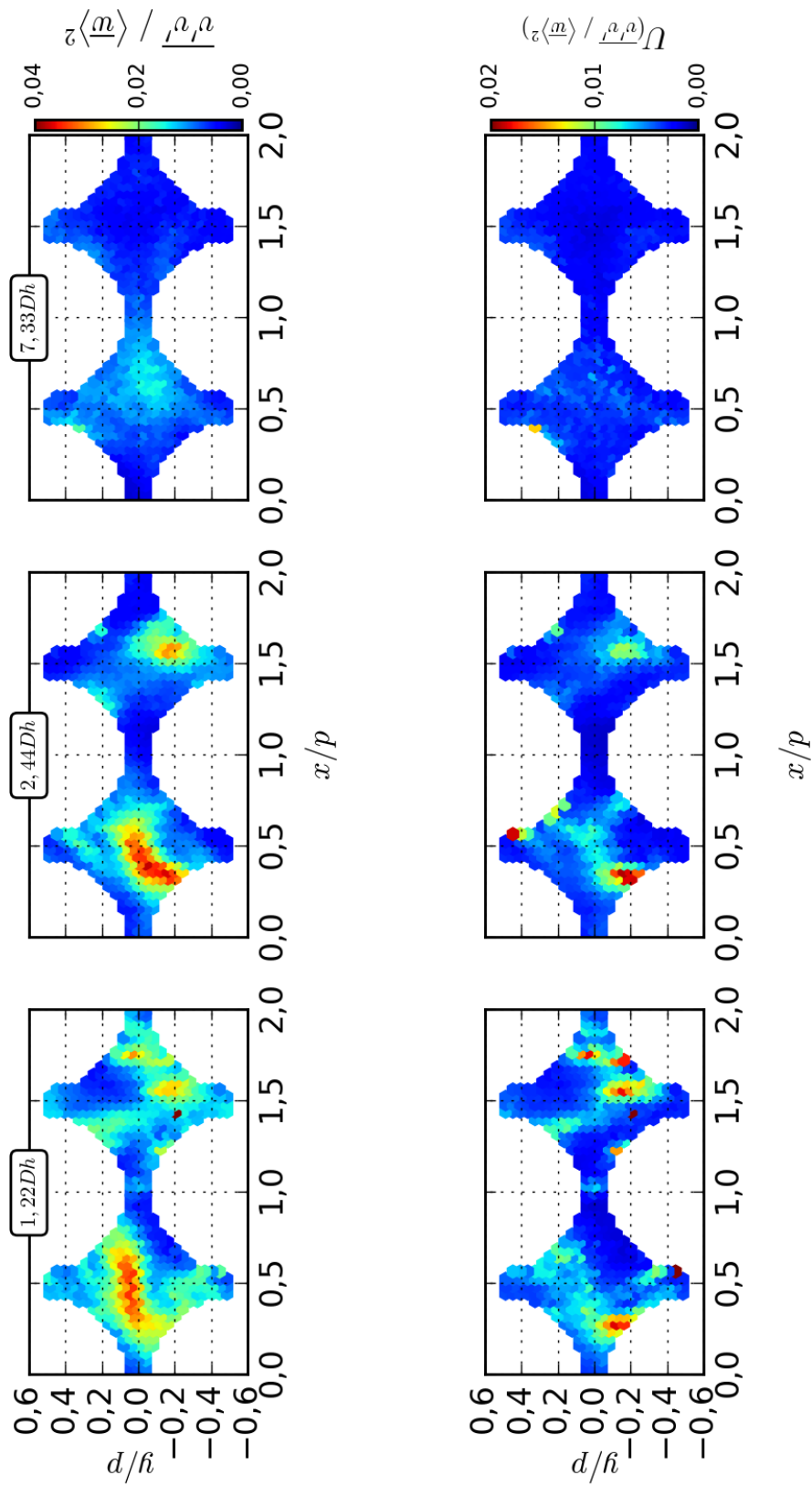
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.30 – Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 18 \times 10^3$.



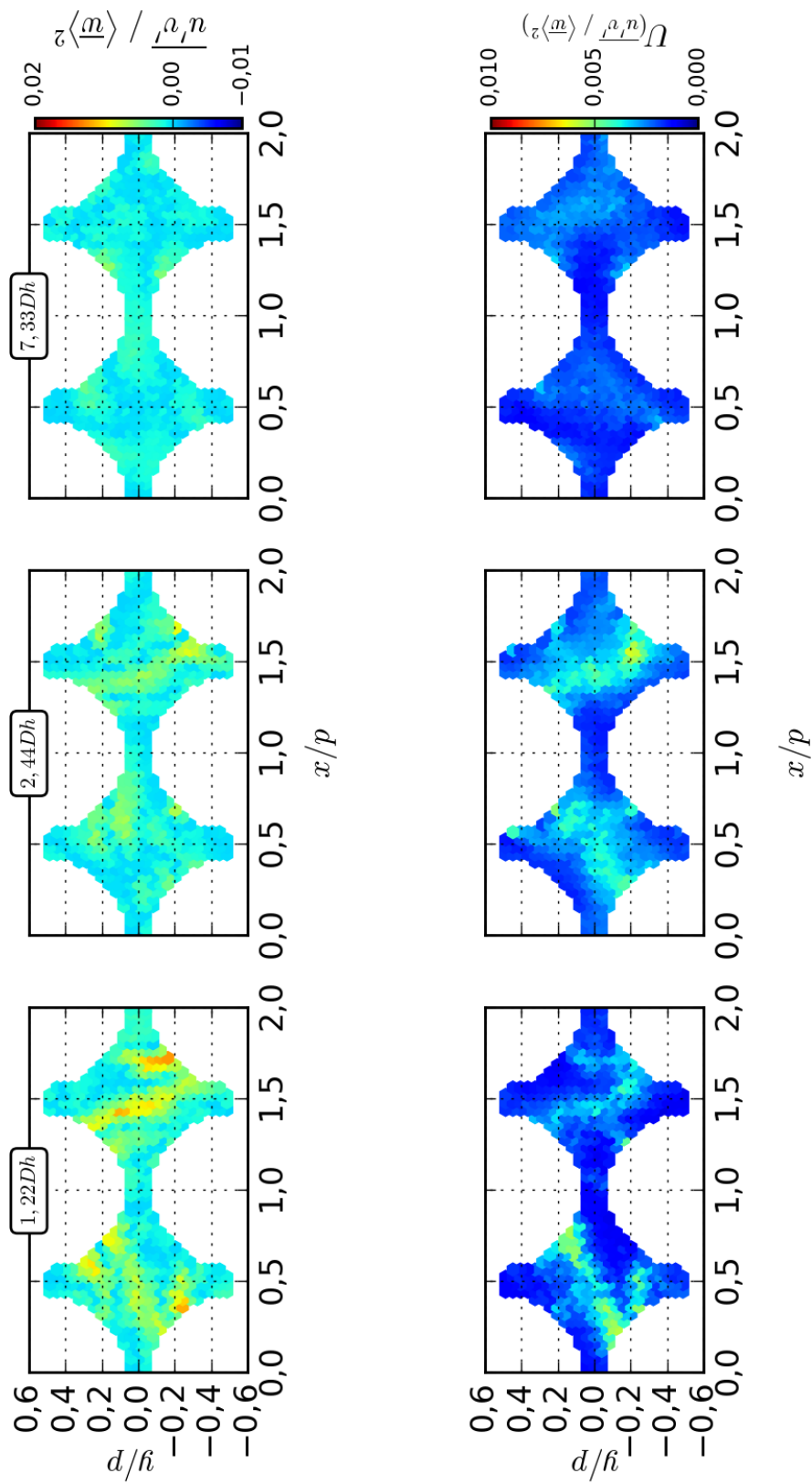
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.31 – Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle >^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 54 \times 10^3$.



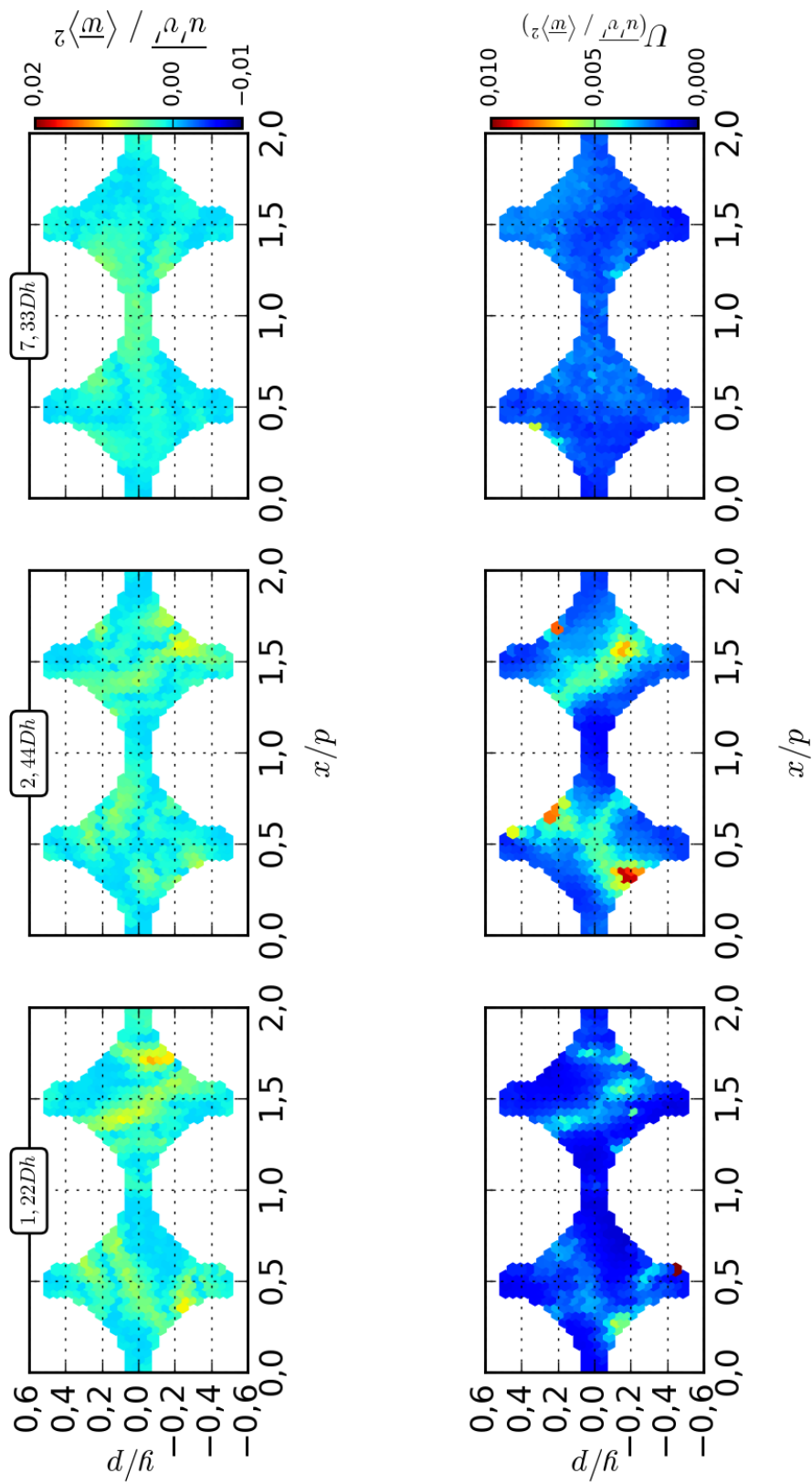
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.32 – Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle >^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 18 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.33 – Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle >^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 54 \times 10^3$.



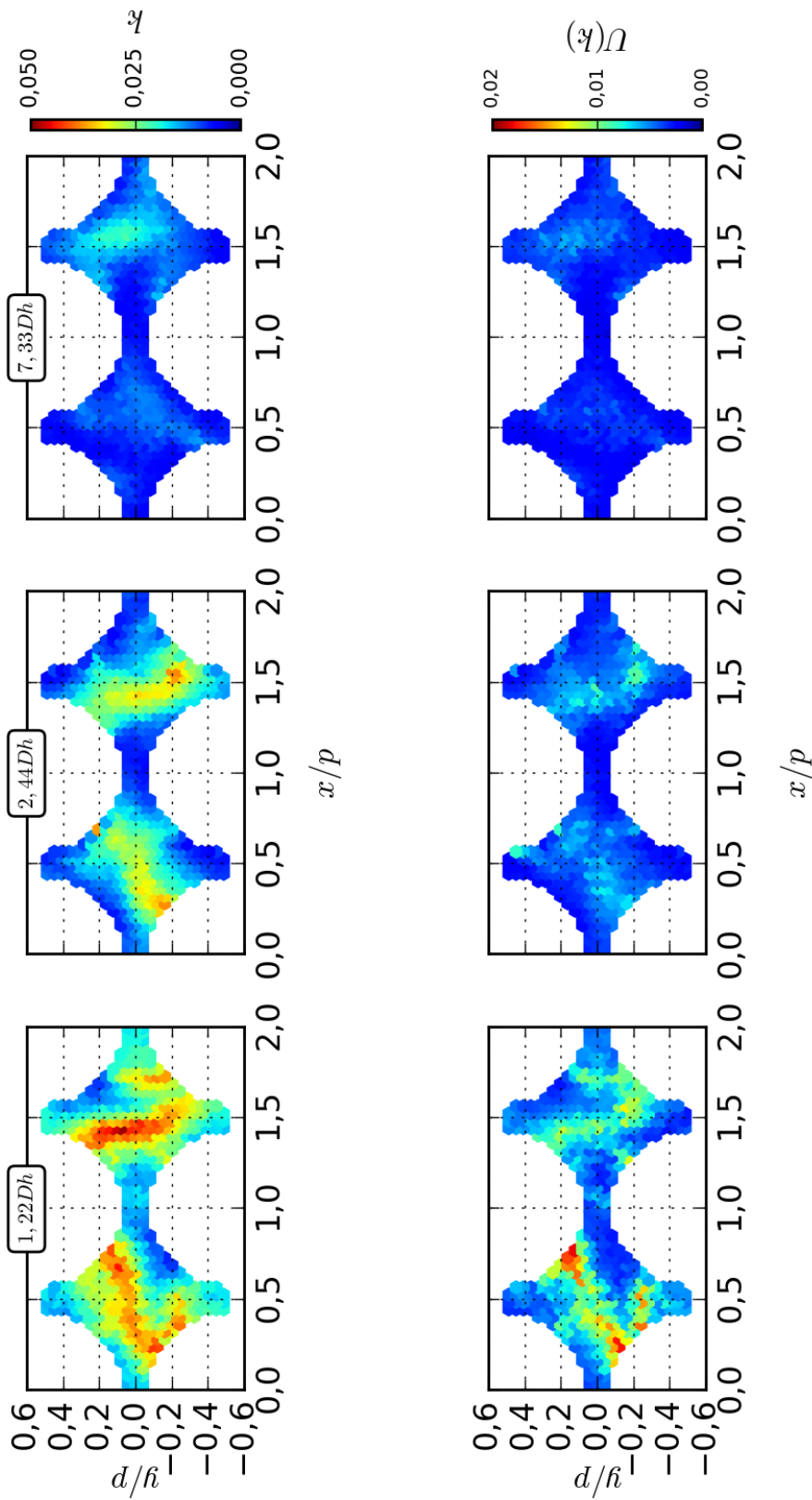
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após observar essas medidas dos tensores de Re obtidas para o campo completo percebeu-se que de fato existem sutis diferenças ao avaliar Re distintos. Algumas dessas diferenças estão na magnitude e em sutis deslocamentos dos máximos no interior do subcanal.

Assim como observado nos perfis de velocidades, a magnitude de todos os tensores de Reynolds avaliados no campo, sejam eles normais ou cisalhantes, também decaíram com o afastamento em relação à grade. Os tensores normais ($u'u'$) e ($v'v'$) também apresentaram diferenças para Re distintos, isto é, tanto para $Re = 18 \times 10^3$ quanto $Re = 54 \times 10^3$. Os tensores normais ($u'u'$) e ($v'v'$) apresentaram maior intensidade em subcanais distintos. Para os tensores cisalhantes ($u'v'$) possuem magnitudes menores com relação aos tensores normais ($u'u'$ e $v'v'$). Os tensores cisalhantes não apresentaram um viés de magnitude preferencial por um subcanal específico. Com relação à incerteza expandida normalizada dos tensores de Reynolds avaliados, percebe-se que a incerteza é maior nas alturas mais próximas da grade assim como também foi observado nas medidas ao longo do eixo $y/p = 0$. Como os tensores avaliados possuem ordem de grandeza baixa comparada com os perfis de velocidade, eles são mais sensíveis ou suscetíveis às influências de turbulência. Ou seja, quanto maior for a turbulência maior também será a sua incerteza.

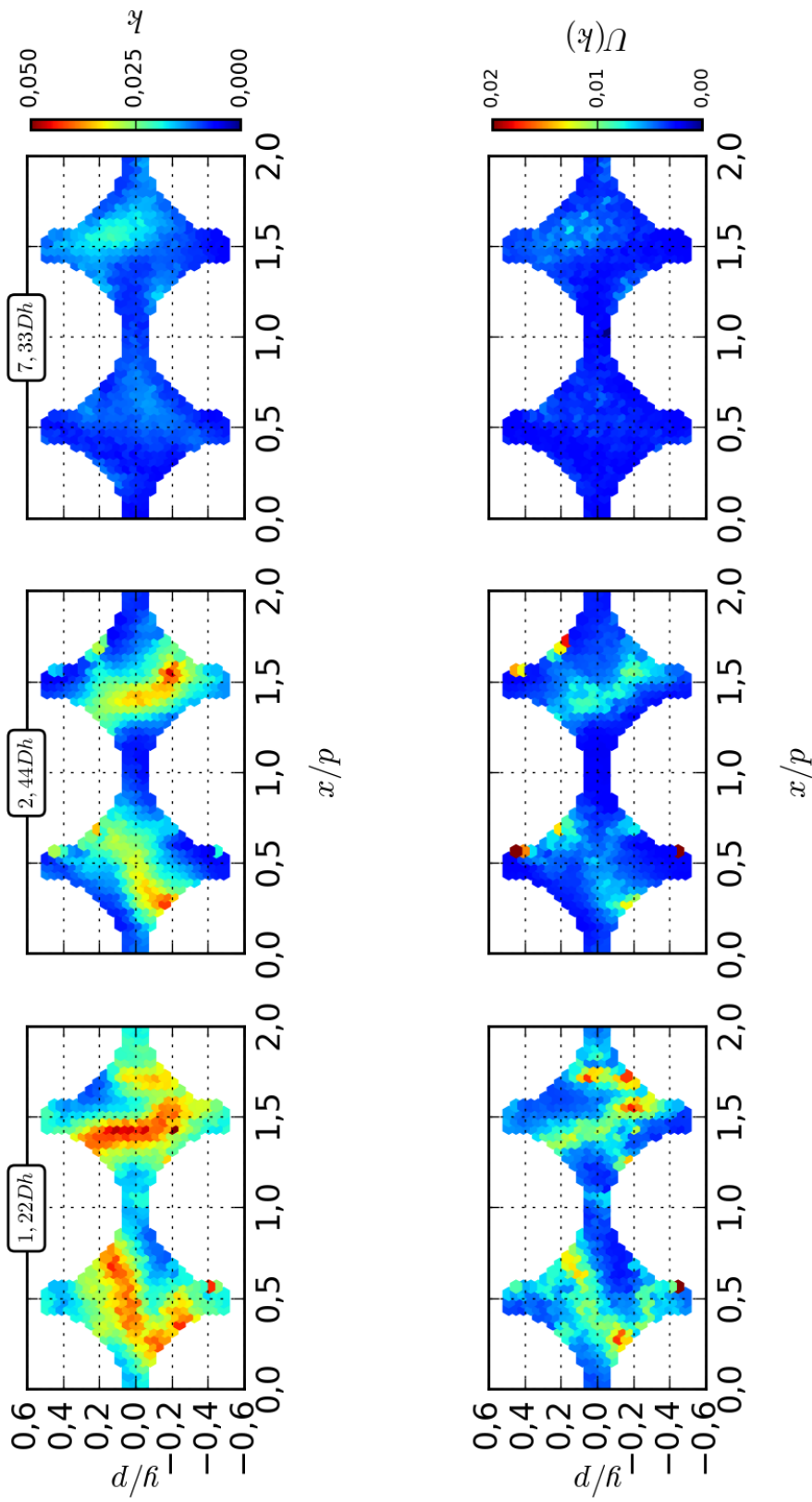
Os resultados para energia cinética de turbulência (k) foram avaliados e podem ser vistos nas Figs. 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37. Essa avaliação tem como objetivo complementar essa análise preliminar sobre o comportamento do regime de escoamento de água para múltiplos Re e de sua influência em grandezas como perfis de velocidades e tensores de Reynolds.

Figura 4.34 – Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 18 \times 10^3$.



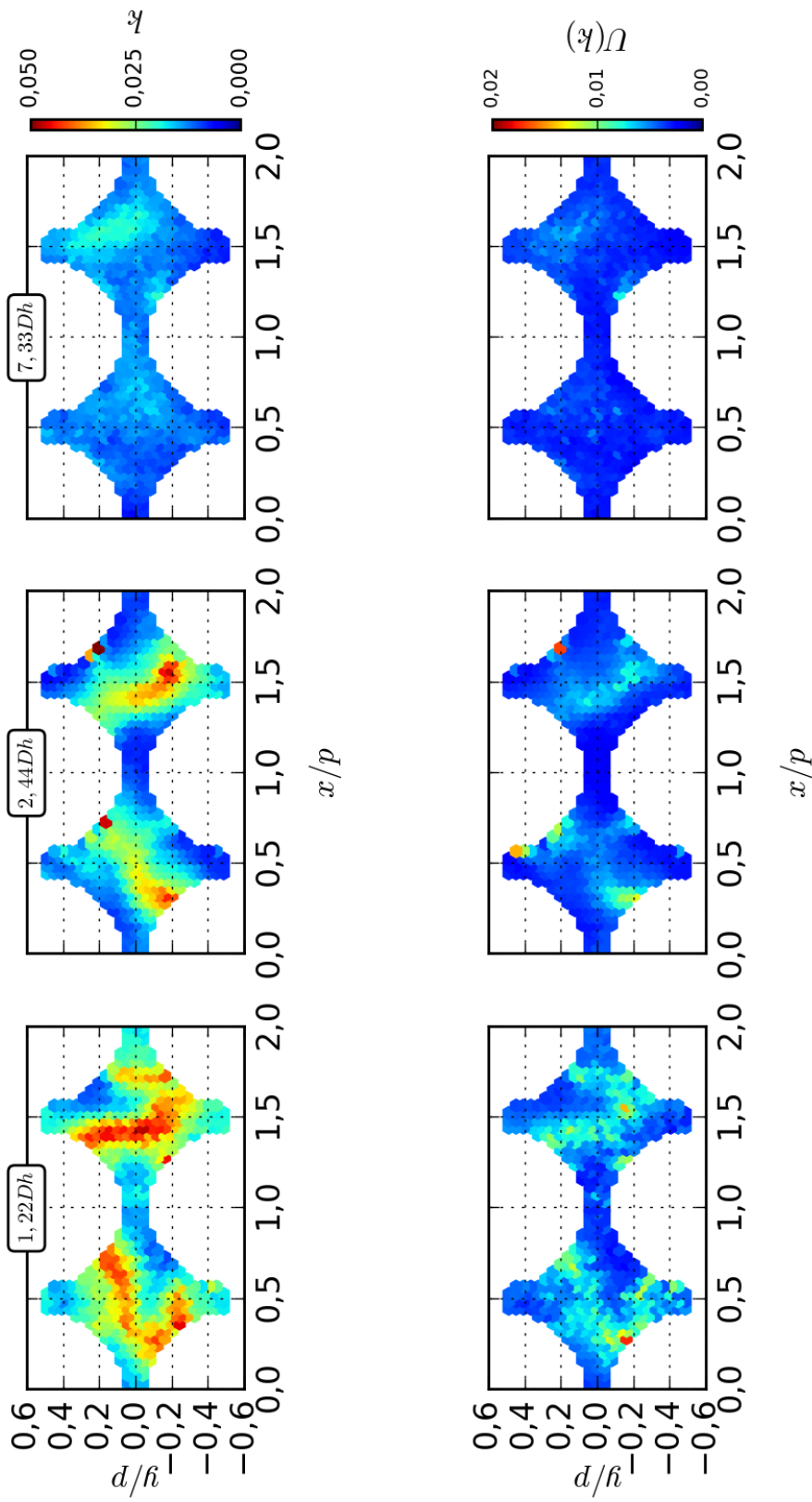
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.35 – Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 27 \times 10^3$.



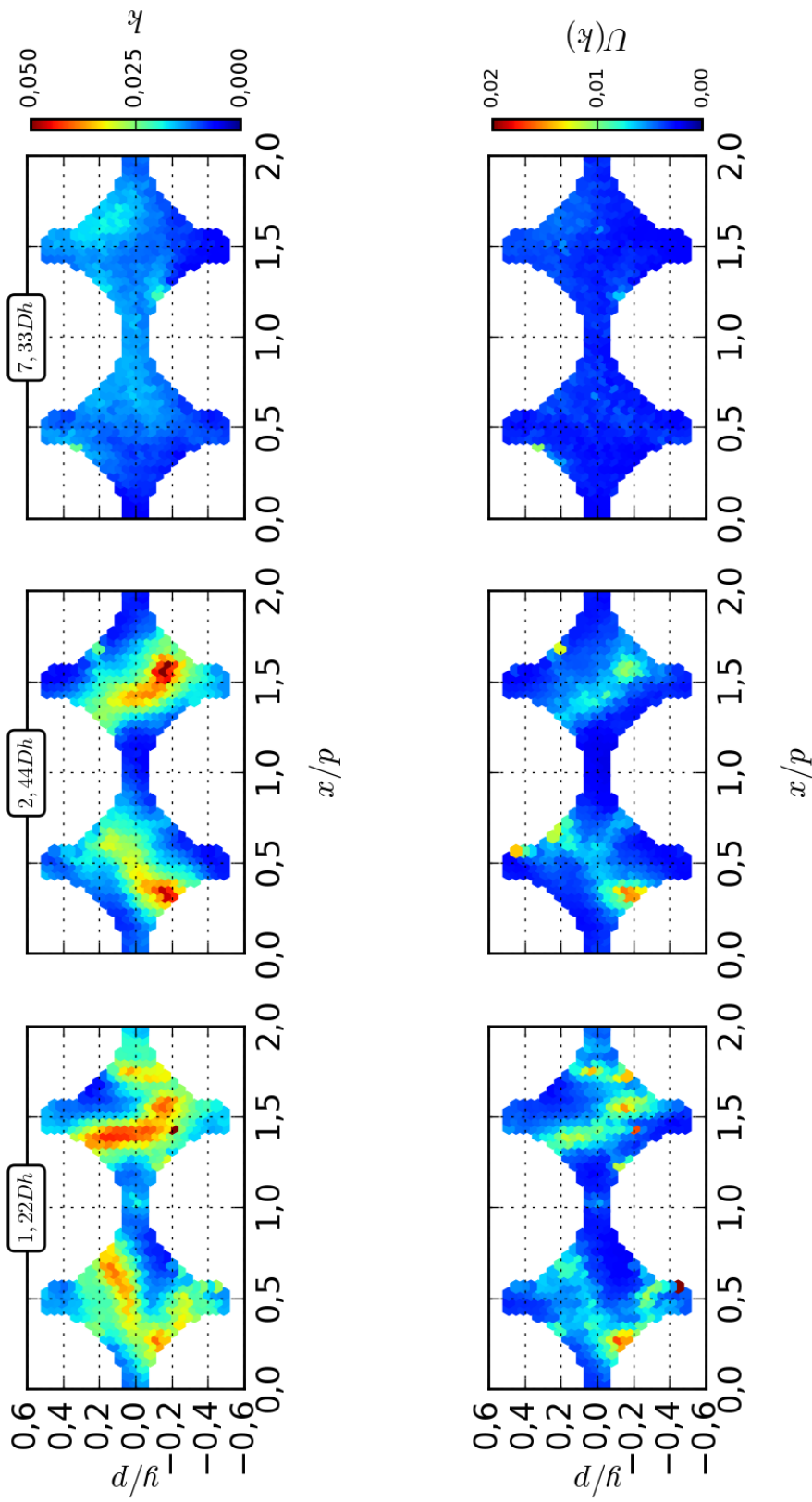
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.36 – Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 36 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.37 – Energia Cinética de Turbulência (k) obtida em três alturas a jusante da grade espaçadora para $Re = 54 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como foi observado nas demais grandezas avaliadas, perfis de velocidade (u e v) e tensores de Reynolds ($u'u'$, $v'v'$ e $u'v'$) a energia cinética de turbulência (k) também decai com o afastamento em relação à grade. A incerteza expandida normalizada de (U_k), apresentou um comportamento similar ao obtido para os tensores, isto é, a incerteza é tanto maior quanto for o valor de (k).

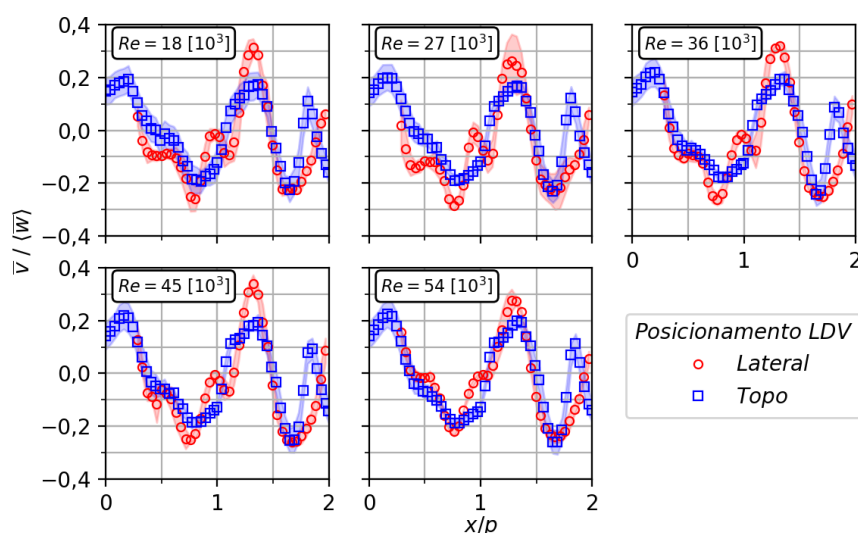
Ao final das três primeiras seções desse capítulo, pode ser notado que todas as grandezas avaliadas, perfis de velocidade, tensores de Re e energia cinética de turbulência apresentaram variações no seu comportamento relativas ao regime de escoamento. Ou seja, essas grandezas, para a faixa de $18 \times 10^3 \leq Re \leq 54 \times 10^3$, apresentaram diferenças significativas.

4.3 Lateral vs Topo para ST1 e ST2

Os valores obtidos pela lateral da ST1 presentes em Castro (2016) foram comparados com os resultados obtidos pelo topo da ST1 apresentados nas seções anteriores desse capítulo.

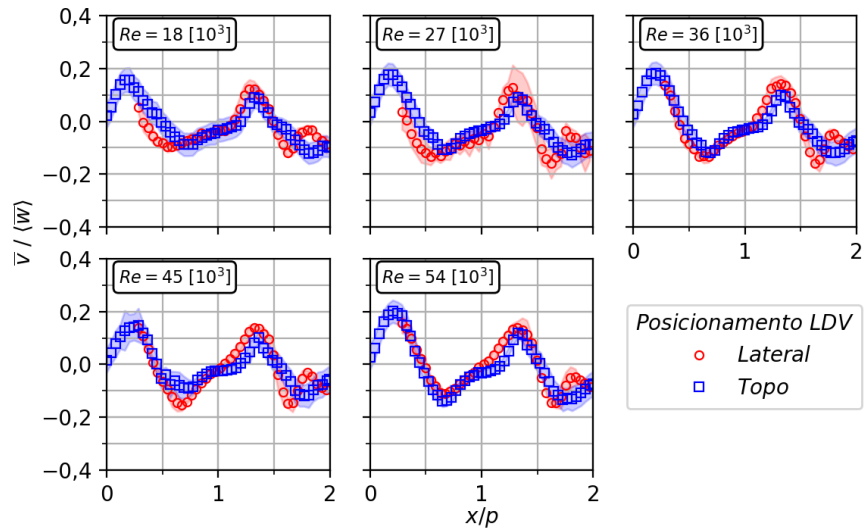
Nas Figs. 4.38, 4.39 e 4.40 são apresentadas as comparações dos perfis de velocidades laterais médias normalizados $\bar{v}/\langle \bar{w} \rangle$ obtidos pela lateral e topo da ST1 para as respectivas alturas de $1,22Dh$, $2,44Dh$ e $7,33Dh$ a jusante da grade espaçadora comercial alçada.

Figura 4.38 – Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST1 para a altura de $1,22Dh$.



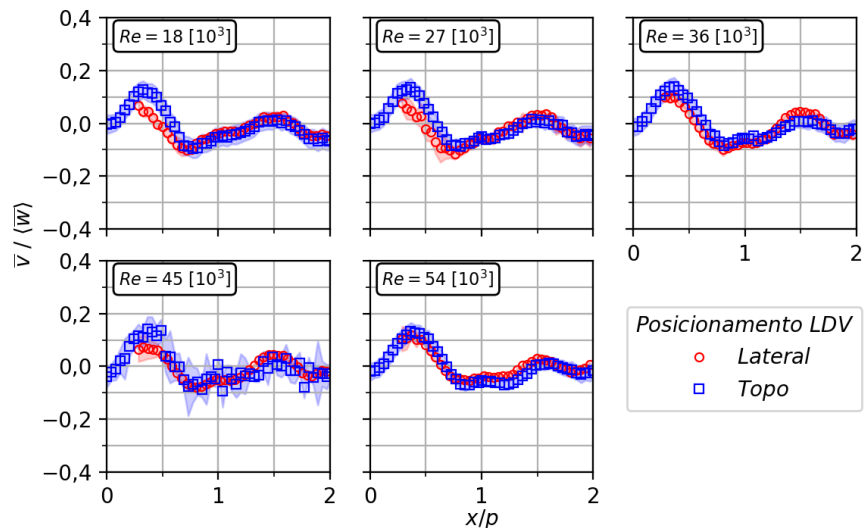
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.39 – Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST1 para a altura de $2,44Dh$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.40 – Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST1 para a altura de $7,33Dh$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses resultados serviram de validação da montagem ST1 utilizada, pois, mesmo medindo os perfis de velocidade através de posições distintas pela seção de testes (lateral e topo) pode ser observado que tanto a montagem pode ser validada como também os

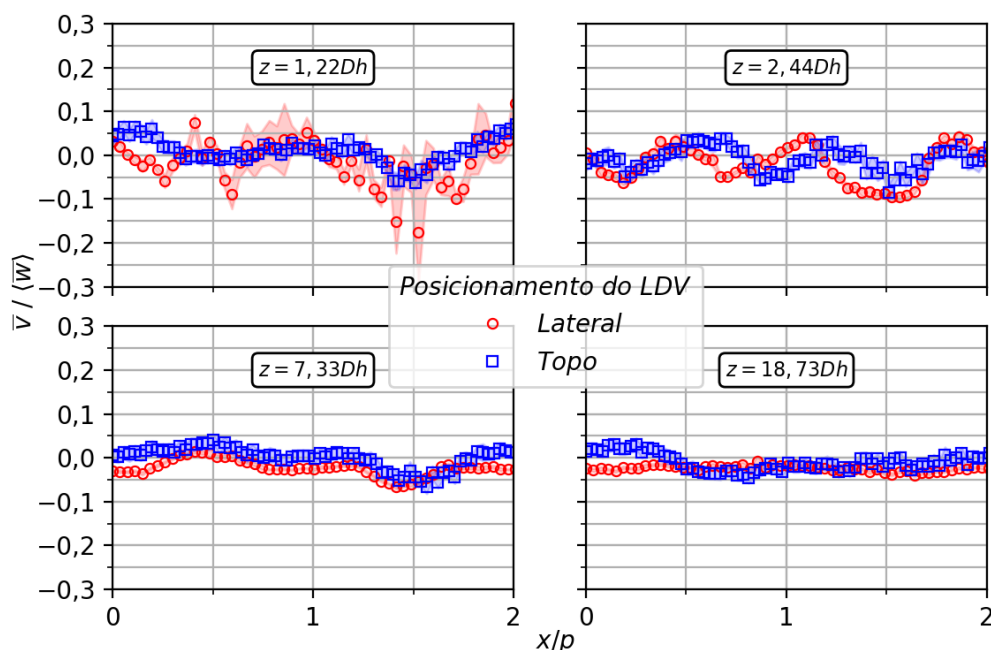
resultados apresentados em Castro (2016). O comportamento dos perfis de velocidade obtidos tiveram comportamentos semelhantes para ambas posições (lateral e topo).

Percebe-se também que os perfis de velocidades $\bar{u}/\langle\bar{w}\rangle$ e $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$ decaem em magnitude com o afastamento em relação à grade espaçadora. Na Fig. 4.38 verifica-se que os perfis obtidos pelo topo se apresentam ligeiramente amortecidos, principalmente na região $x/p = 1, 3$ embora o comportamento seja semelhante. Esse amortecimento está relacionado com as diferenças existentes nos volumes de medição gerados pelo par de laser do LDV que foram apresentados na seção 3.2.2. Ou seja, essa diferença se deve à característica inerente do processo de medição com LDV.

O perfil de velocidade obtido para $Re = 45 \times 10^3$ da Fig. 4.40 foi o que apresentou maior flutuação de valores, pois, o sistema operou próximo do seu regime de ressonância.

Esse mesmo procedimento experimental de comparação da componente de velocidade lateral média \bar{v} obtida por duas posições distintas (lateral e topo) foi aplicado na ST2. Na Fig. 4.41 pode ser observada a comparação do perfil de velocidade lateral médio obtido para $Re = 27 \times 10^3$ através de duas posições distintas ao longo de quatro alturas normalizadas a jusante da grade espaçadora comercial do tipo canais.

Figura 4.41 – Comparação dos perfis de velocidade lateral médio \bar{v} obtidos pela lateral e topo da ST2 para 4 alturas a jusante da grade espaçadora comercial do tipo canais.



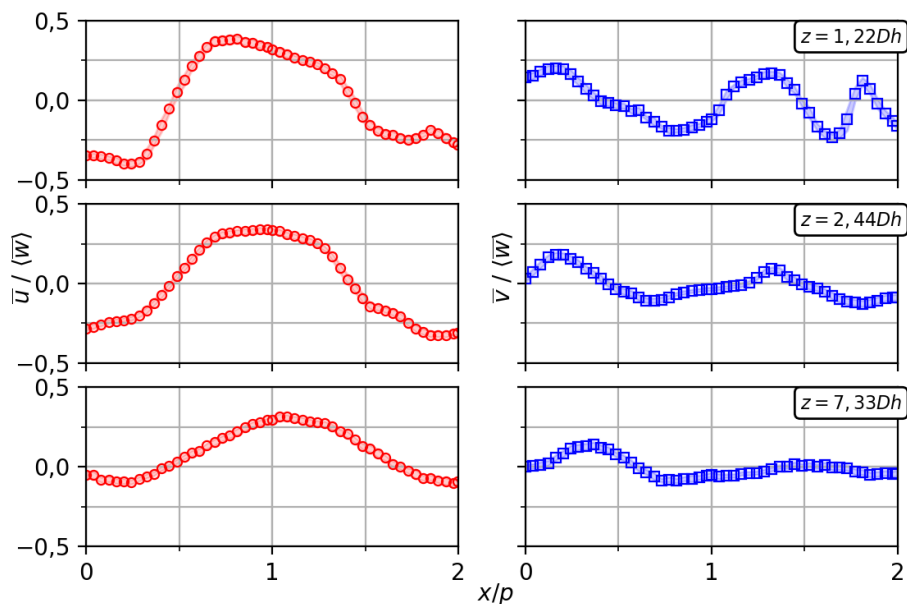
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Fig. 4.41, algumas posições, como por exemplo a altura $z = 1, 22Dh$ apresentou um maior valor de incerteza expandida normalizada comparada com as demais alturas.

Como essa altura é a mais próxima da grade pode ter sido um dos fatores responsáveis do maior valor de incerteza expandida normalizada. Pois, quanto mais próximo das regiões de parede, os ruídos que surgem no sinal do *LDV* coletado se mostraram mais significativos. Na posição $z = 2,44Dh$ alguns pontos apareceram ligeiramente deslocados.

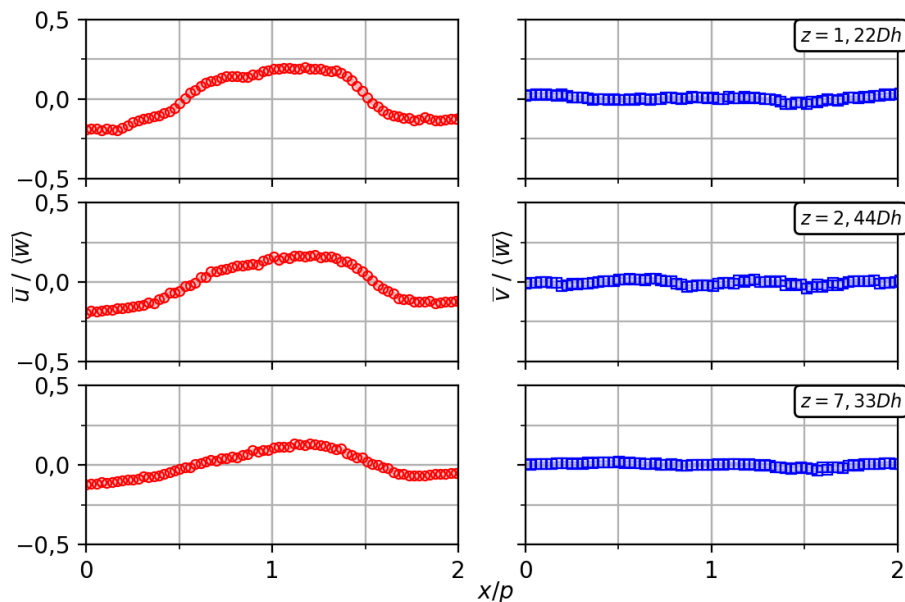
Percebe-se que a magnitude da componente lateral mensurada pela lateral da ST2 se aproxima mais de zero do que a mesma componente mensurada pela lateral da ST1. Além do mais, outras diferenças relacionadas com a flutuação de velocidades puderam ser notadas quando comparadas as duas componentes de velocidades laterais \bar{u} e \bar{v} medidas pelo topo das ST1 e ST2, conforme pode ser visto nas Figs. 4.42 e 4.43 respectivamente.

Figura 4.42 – Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{u} e \bar{v} obtidas pelo topo da ST1 para três alturas a jusante da grade comercial aletada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.43 – Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{u} e \bar{v} obtidas pelo topo da ST2 para três alturas a jusante da grade comercial de canais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Fig. 4.42 são observadas diferenças entre as duas componentes de velocidades que foram medidas pelo topo da seção de testes. Percebe-se que a componente de velocidade $\bar{u}/\langle\bar{w}\rangle$ é maior em magnitude do que a componente $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$. E com o afastamento em relação à grade ambas as componentes decaem, porém a componente $\bar{u}/\langle\bar{w}\rangle$ tende a zero mais rapidamente do que a componente $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$. Na terceira altura, $z = 7, 33Dh$, o movimento lateral de $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$ já se dissipou de maneira considerável.

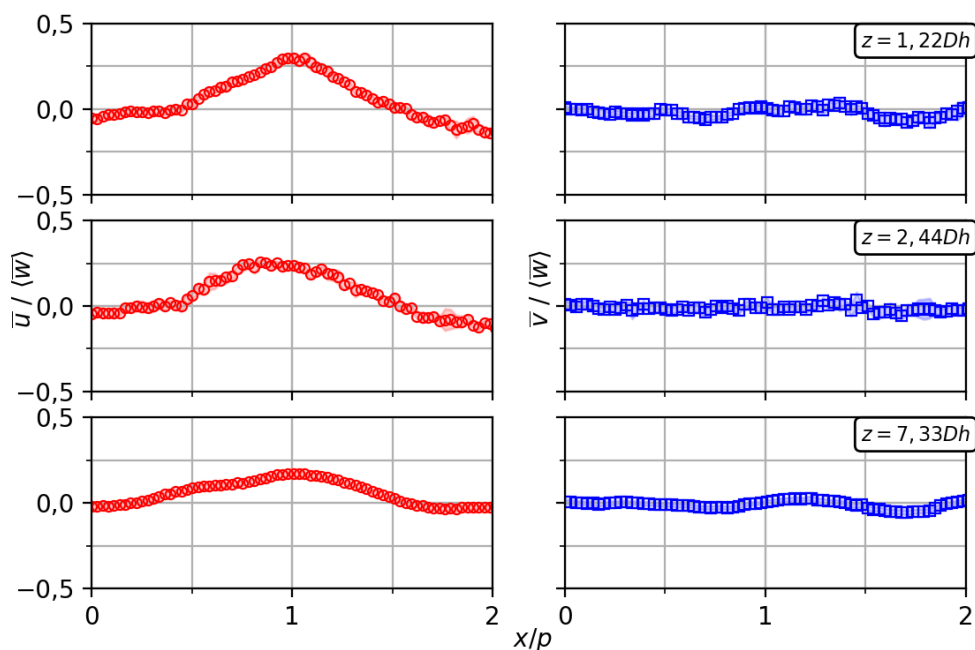
As componentes $\bar{u}/\langle\bar{w}\rangle$ e $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$ apresentadas na Fig. 4.43 também são distintas. Mas, nota-se que a componente lateral $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$ é praticamente nula na região central desse canal. As magnitudes das componentes de velocidades laterais da grade aletada são maiores do que as obtidas para a grade de canais.

Esse processo de medição da componente de velocidade lateral (\bar{v}) pela lateral da seção de testes, pode ser utilizada para validação da construção de seções de testes. No entanto, caso a componente possua um valor muito próximo de zero, como foi o caso dos valores obtidos para as grades avaliadas na ST2, a turbulência acentuada nas proximidades da grade poderá afetar o procedimento de comparação da componente de magnitude menor. Então, embora os resultados obtidos sejam concordantes, poderá acarretar em um maior valor de incerteza.

Na Fig. 4.44 estão representadas as duas componentes de velocidades laterais mensuradas a jusante da grade espaçadora impressa através do topo da ST2. Assim como

foi observado nas Figs. 4.42 e 4.43 a magnitude da componente $\bar{u}/\langle\bar{w}\rangle$ é maior do que $\bar{v}/\langle\bar{w}\rangle$.

Figura 4.44 – Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{u} e \bar{v} obtidas pelo topo da ST2 para três alturas a jusante da grade impressa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os perfis de velocidades apresentados na Fig. 4.44 apresentam comportamentos bastante similares aos observados na Fig. 4.43, cujos modelos de grades são do tipo canais. Os dados que geraram os resultados da Fig. 4.44 estão disponíveis nas tabelas do Anexo B.

Os trabalhos apresentados na Tabela 2.1 também ressaltam que o comportamento dos perfis de velocidade lateral amortecem à medida que se afastam da grade espaçadora. No entanto, a maioria das grades que foram avaliadas nesses estudos se referem às grades espaçadoras do tipo aletadas. As grades espaçadoras do tipo de canais não possuem tantos dados disponíveis na literatura.

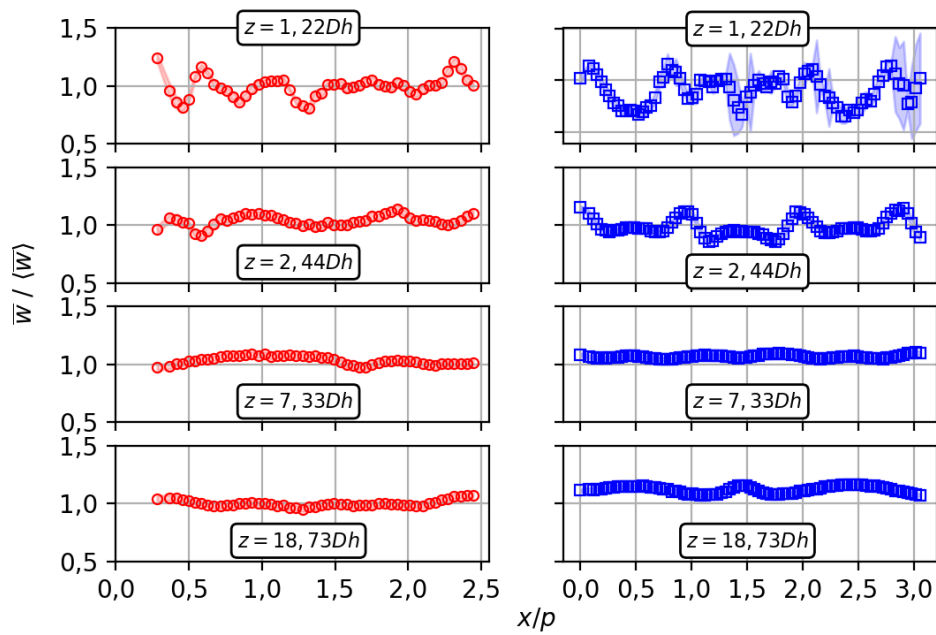
Enfim, sobre a obtenção dos perfis de velocidade pela lateral da seção de testes, pode-se notar que não são suficientes para descrição do padrão de escoamento de água após passar pelas grades, embora forneçam bons indícios sobre o amortecimento de sua intensidade com o afastamento em relação à grade.

4.3.1 Comparação perfis de velocidade axial (\bar{w}) para ST1 e ST2

Nas Figs. 4.45, 4.46 e 4.47 podem ser observados os perfis de velocidades axiais obtidos pela lateral da seção de testes ao longo dos canais 1, 2 e 3, respectivamente. Esses

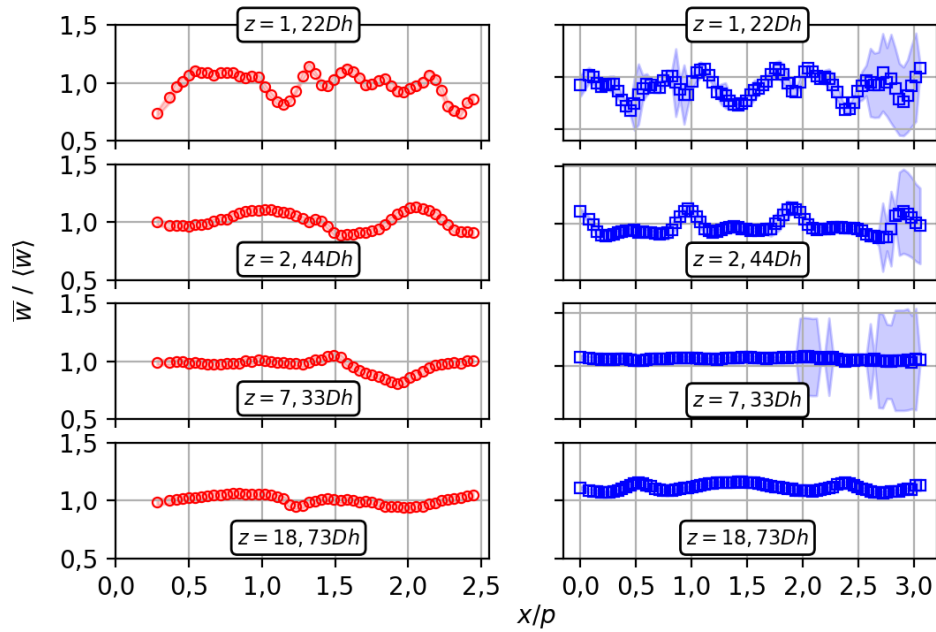
perfis foram mensurados em quatro alturas a jusante das grades avaliadas. A grade testada na ST1 foi a comercial do tipo aletada e na ST2 a comercial de canais.

Figura 4.45 – Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 1.



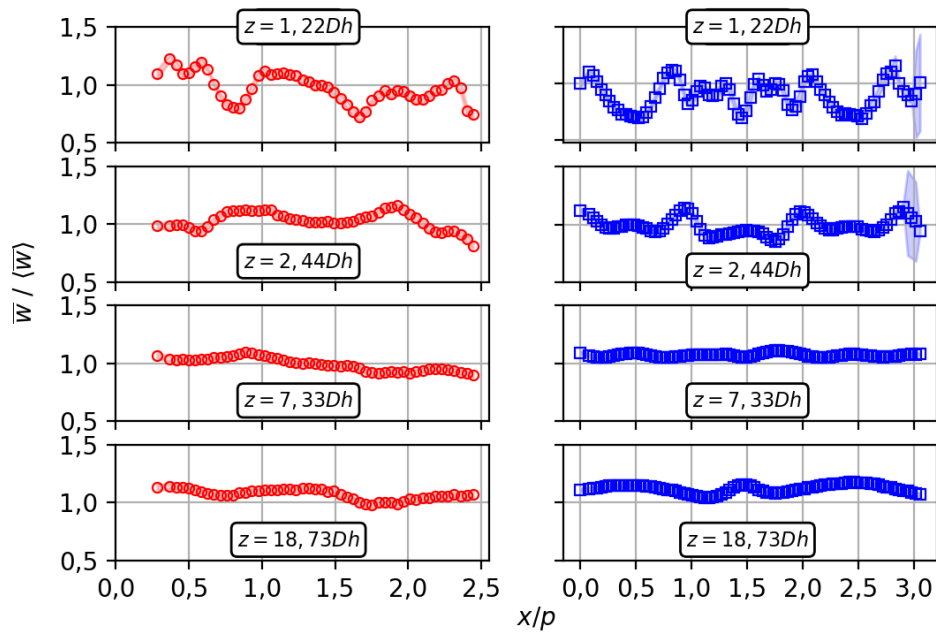
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.46 – Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.47 – Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As regiões de medição ao longo do eixo central de cada canal tiveram as suas posições normalizadas em relação ao passo da respectiva grade. As posições: 0, 1*p*, 2*p* e 3*p* correspondem às regiões centrais entre as varetas.

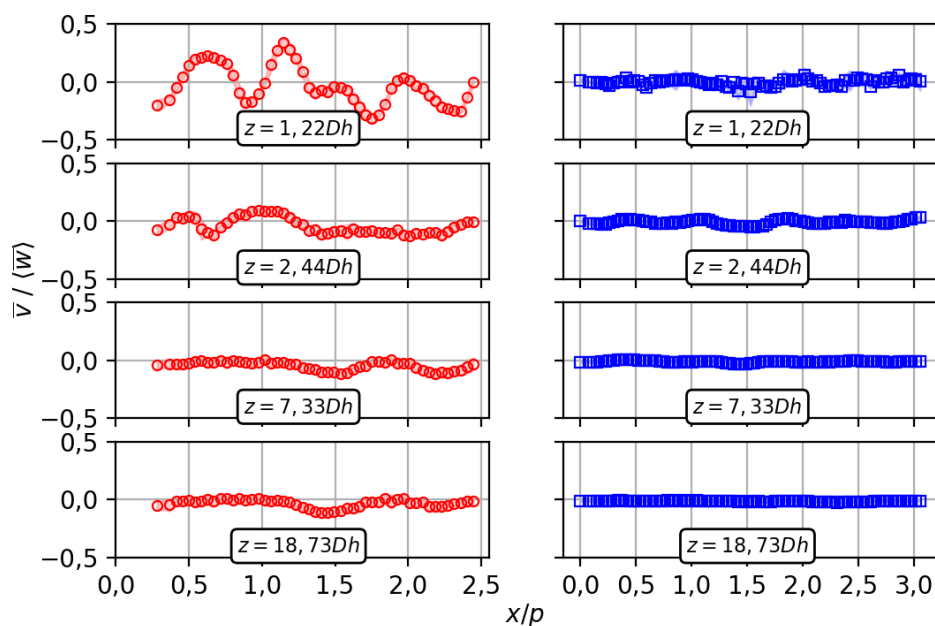
As distâncias normalizadas são diferentes em relação à ST1 e ST2 devido às dimensões da ST2 serem maiores. Por essa razão, as medidas na ST2 puderam ser realizadas à uma distância de 0,5*p* maior do que na ST1.

Percebe-se um comportamento similar de ambas as componentes de velocidade axiais para ST1 e ST2 no que se refere à estabilização com a velocidade média do escoamento à medida em que se afasta da grade espaçadora. O comportamento das componentes axiais, para os canais 1 e 3 da ST2 se mostraram similares. A incerteza expandida normalizada da componente \bar{v} da grade de canais presente na ST2 apresentou-se maior principalmente nas regiões próximas à posição 3*p* das alturas: $z/Dh = 1,22$, $z/Dh = 2,44$ e $z/Dh = 7,33$ do canal 2.

4.3.2 Comparação perfis de velocidade lateral (\bar{v}) para ST1 e ST2

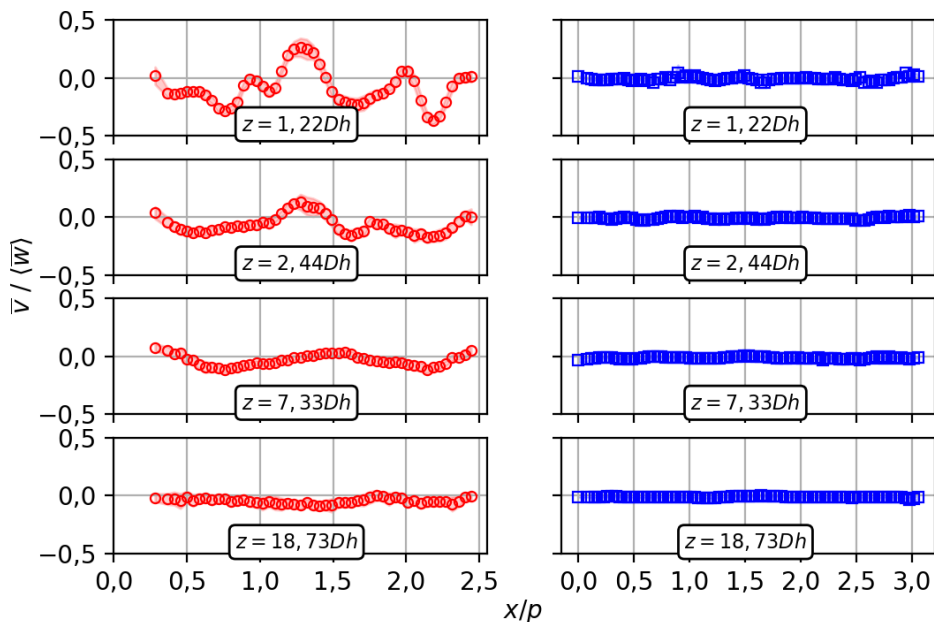
Nas Figs. 4.48, 4.49 e 4.50, podem ser observados os perfis de velocidades axiais obtidos pela lateral da seção de testes ao longo dos canais 1, 2 e 3 respectivamente. Essas quatro alturas mensuradas foram obtidas a jusante das grades avaliadas. A grade testada na ST1 foi a comercial do tipo aletada e na ST2 a comercial de canais.

Figura 4.48 – Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{v} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 1.



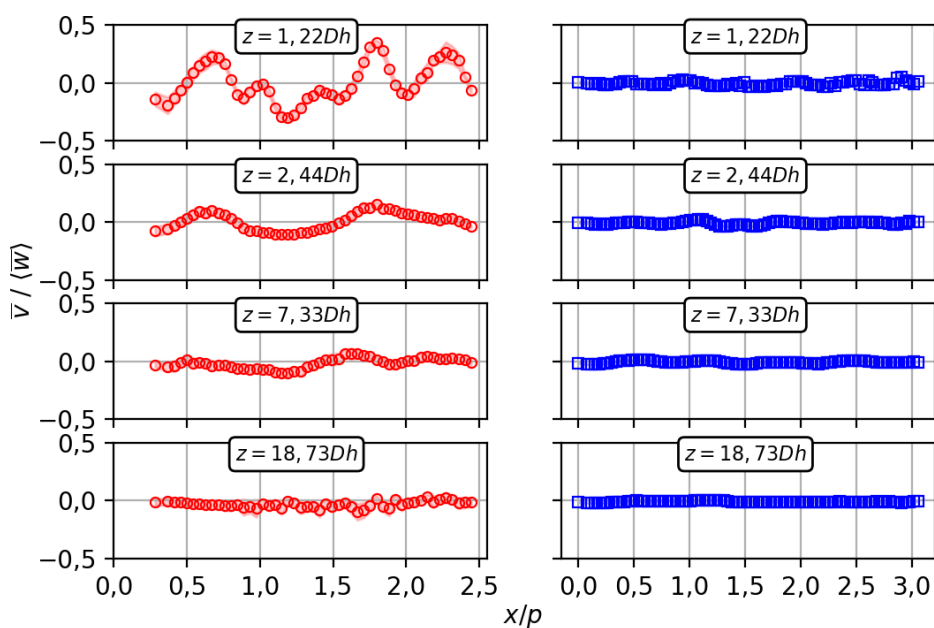
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.49 – Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{v} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.50 – Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{v} obtidas pela lateral da ST1 (esq.) e ST2(dir) referente ao canal 3.



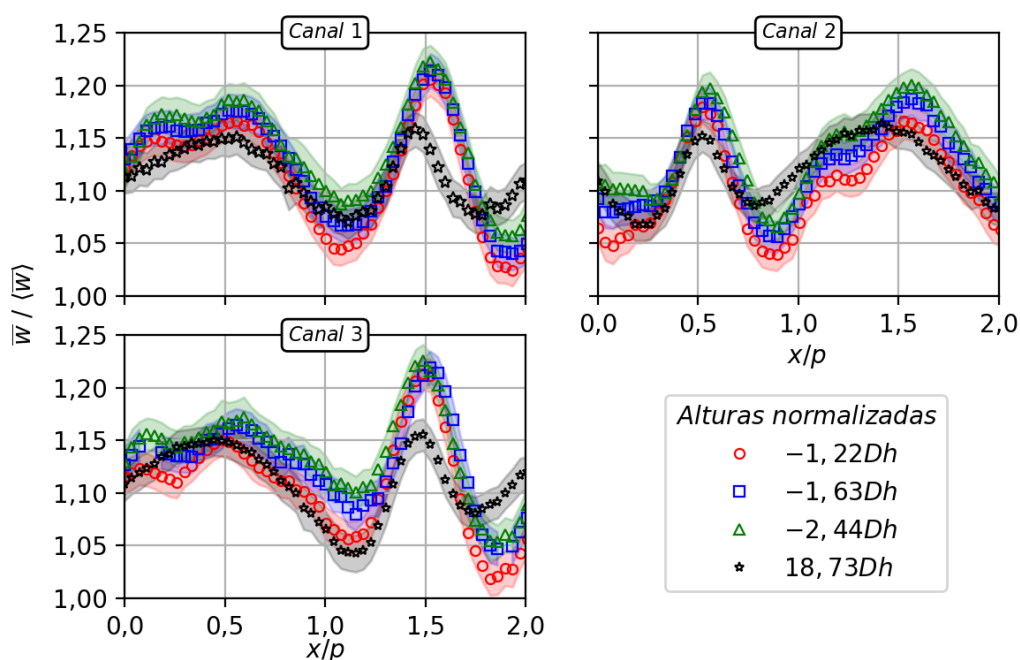
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa avaliação pela lateral das seções de testes (ST1 e ST2) pôde comprovar a diferença de magnitudes das componentes laterais \bar{v} . Mas apenas pela avaliação de uma das componentes laterais não é possível expôr de maneira conclusiva a respeito do comportamento dos movimentos laterais do escoamento. Por isso, há a necessidade de se avaliar um campo de velocidades pelo topo das seções de testes, assim como foi feito na seção 4.2 para a grade aletada.

4.3.3 Perfis de velocidades lateral (\bar{v}) e axial (\bar{w}) a montante da grade comercial de canais na ST2

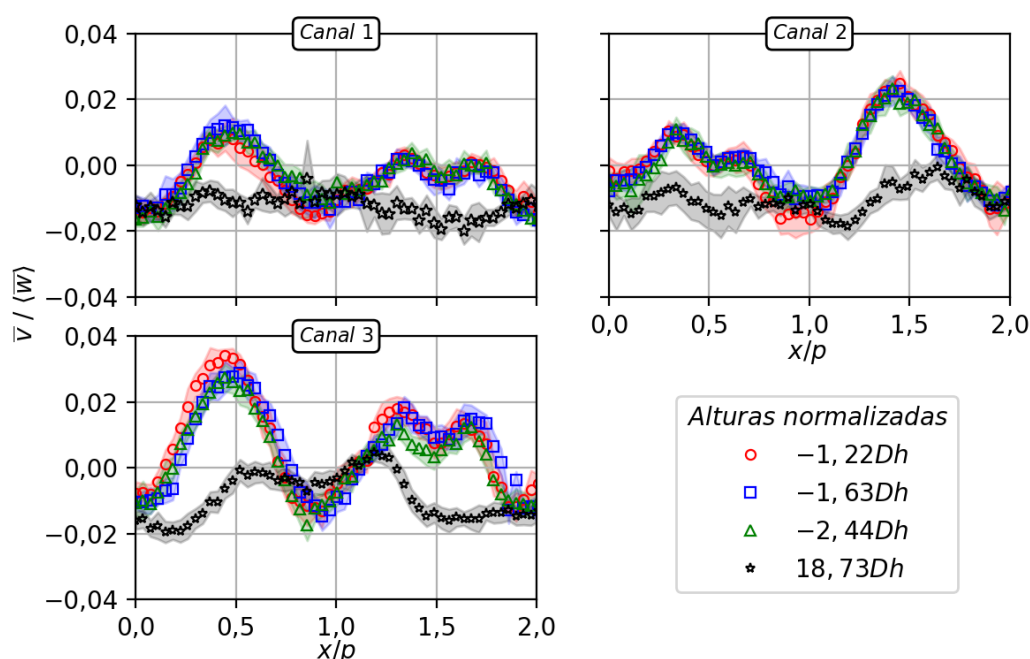
Percebeu-se a necessidade de avaliar o comportamento do escoamento da água na iminência de alcançar a grade de interesse, devido à baixa magnitude obtida da componente de velocidade lateral obtida a jusante da grade comercial de canais na ST2 pela lateral da ST2. As Figs. 4.51 e 4.52 são referentes às componentes de velocidades axial (\bar{w}) e lateral (\bar{v}) obtidas à montante da ST2 para os três canais avaliados.

Figura 4.51 – Comparação entre as componentes de velocidades axiais médias \bar{w} obtidas para 3 alturas a montante e 1 a jusante da ST2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.52 – Comparação entre as componentes de velocidades laterais médias \bar{v} obtidas para 3 alturas a montante e 1 a jusante da ST2.



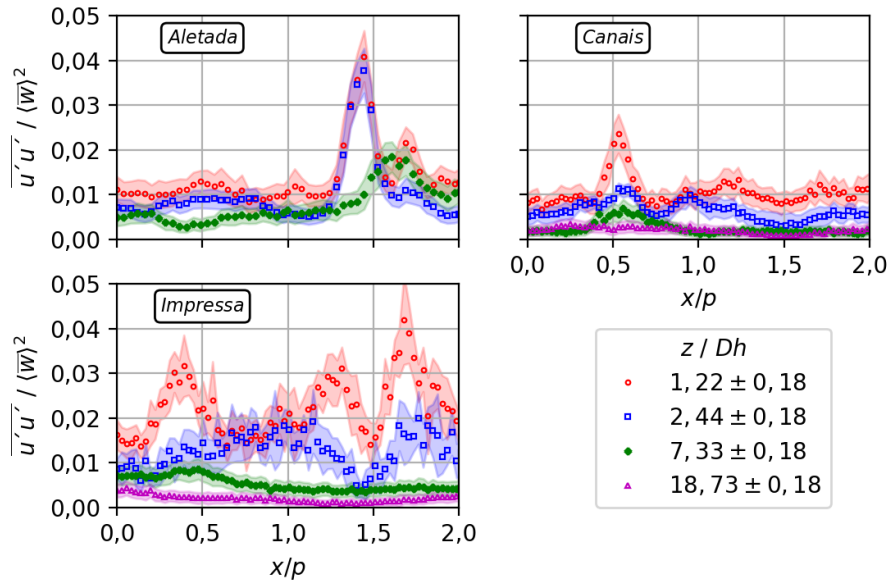
Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições referentes aos perfis de velocidades axiais realizadas a montante da grade de canais presente na ST2 apresentaram um comportamento bastante similar com a última altura mensurada a montante da mesma. Esse comportamento similar já era esperado, pois, as condições a montante da grade possuem características similares às posições mais afastadas a jusante da grade. No entanto, a magnitude da componente de velocidade obtida a jusante se mostrou menor do que às componentes axiais a montante. A componente de velocidade lateral a jusante também possui uma magnitude menor do que as componentes mensuradas a montante da ST2. Esse comportamento pode estar relacionado com os efeitos de entrada de escoamento que a água experimenta imediatamente antes de alcançar a grade espaçadora.

4.4 Tensores de Re obtidos através do topo das ST1 e ST2 para todas as grades avaliadas

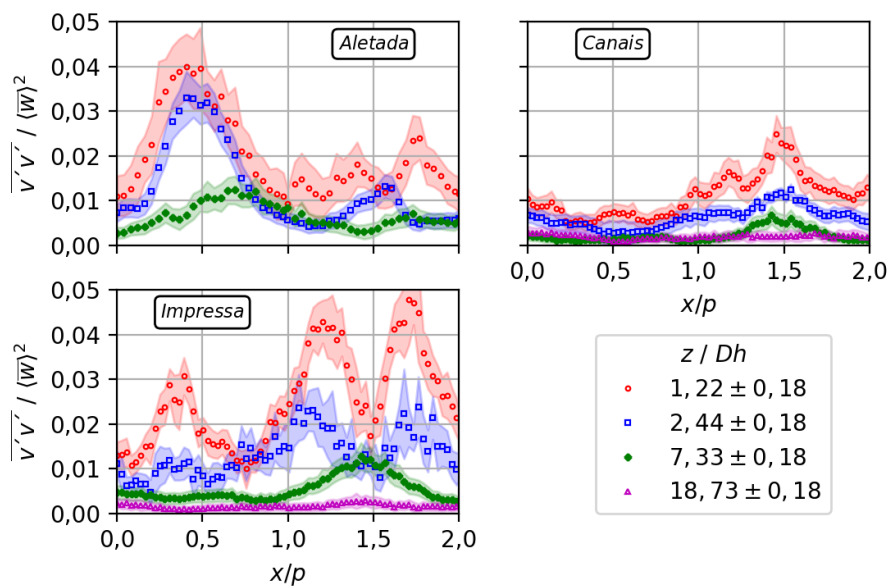
Nas Figs. 4.53, 4.54 e 4.55 são apresentados os resultados das comparações dos Tensores de Re realizados entre as três grades espaçadoras avaliadas. Essas comparações foram feitas para testes realizados com $Re = 27 \times 10^3$ ao longo do eixo $y/p = 0$.

Figura 4.53 – Tensor normal de Reynolds ($u'u'$) normalizado pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para alturas a jusante das três grades espaçadoras ao longo do eixo $y/p = 0$, para $Re = 27 \times 10^3$.



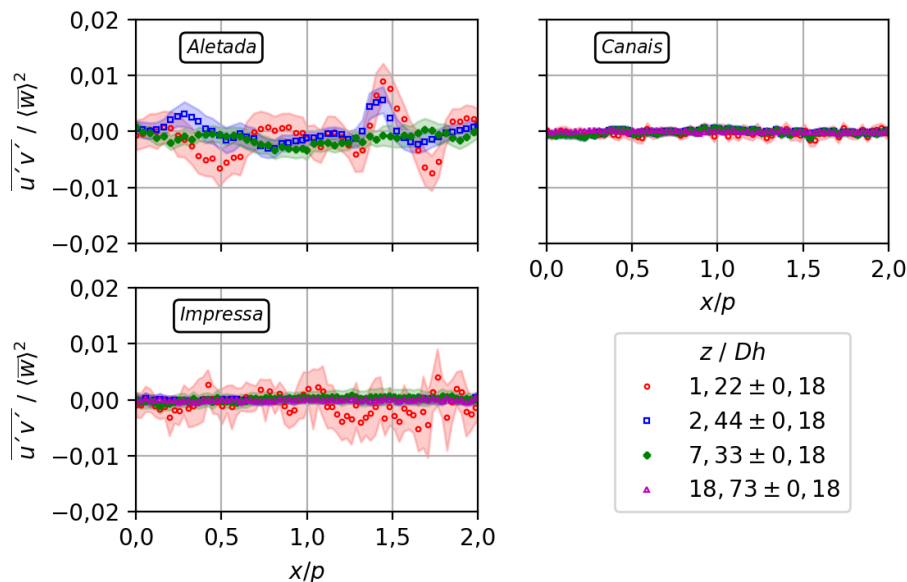
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.54 – Tensor normal de Reynolds ($v'v'$) normalizado pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para alturas a jusante das três grades espaçadoras ao longo do eixo $y/p = 0$, para $Re = 27 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.55 – Tensor cisalhante de Reynolds ($u'v'$) normalizado pela velocidade quadrática média ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para alturas a jusante das três grades espaçadoras ao longo do eixo $y/p = 0$, para $Re = 27 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esse conjunto de resultados, foram realizados testes ao longo de 3 alturas a jusante da grade aletada ($z/Dh = 1,22, 2,44$, e $7,33$) e para 4 alturas ($z/D\bar{H} = 1,22, 2,44, 7,33$, e $18,73$) para as outras duas grades (canais e impressa).

Observa-se que para os tensores normais $u'u'$, a grade impressa tende a ter maior magnitude nas alturas mais próximas da grade em relação às grades comerciais (aletada e canais). Dentre as três, a grade de canais é a que apresentou menor magnitude ao longo do eixo $y/p = 0$. Percebe-se também que os tensores normais $u'u'$ e $v'v'$ rapidamente decaem nas alturas $7,33Dh$ e $18,73Dh$ para as grades canais e impressa. Embora a grade aletada não tenha a quarta altura ($18,73Dh$) para as medidas feitas pelo topo da ST1 nessa análise, é esperado que ela também apresente o mesmo comportamento das demais. Analisando os tensores cisalhantes de Reynolds ($u'v'$) das três grades, nota-se que a grade aletada apresentou um comportamento mais significativo do que as demais. Para a altura $1,22Dh$ da grade impressa, foram observados valores significativos, porém a incerteza expandida normalizada foi maior.

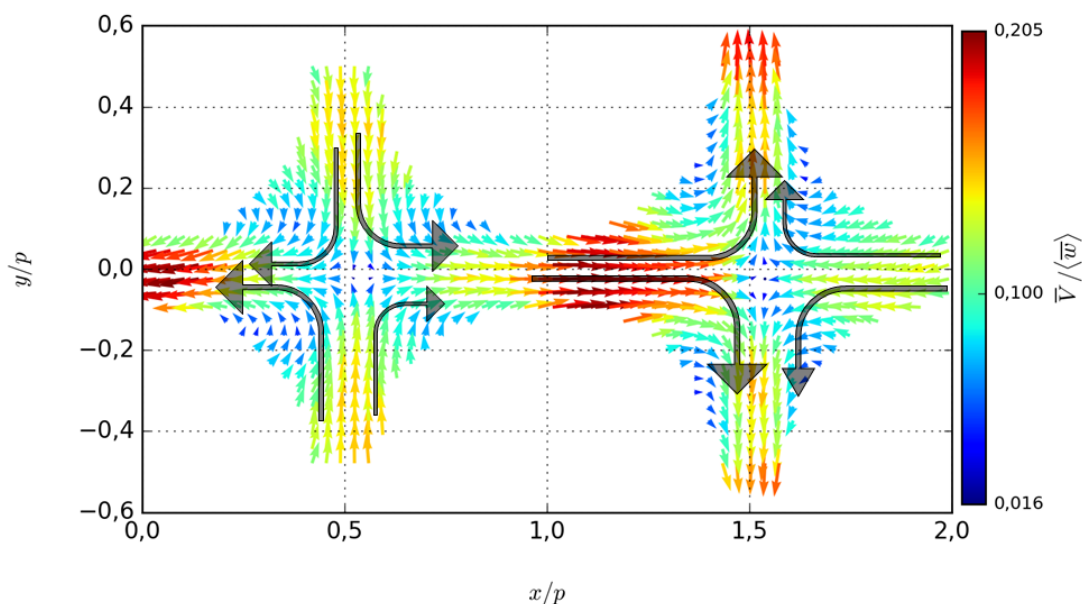
Nas próximas seções serão apresentadas as comparações entre essas grandezas a partir de medidas de campo completo.

4.5 Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas através do topo das ST1 e ST2

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos do campo vetorial de velocidades através do topo das seções ST1 e ST2. Será possível observar em maiores detalhes o comportamento do escoamento de água após passar pelas grades espaçadoras.

Cada uma das três grades avaliadas provocam padrões específicos no escoamento. Na Fig. 4.11 da seção 4.2, foi apresentada a influência da grade comercial aletada sobre o escoamento a jusante da mesma. As principais características são a presença de movimentos cruzados e por rotação nos dois subcanais avaliados. Esses padrões se mantêm em posições acima da grade porém com amortecimento. Esse tipo de comportamento pode ser visto em vários trabalhos presentes na literatura, inclusive na Tabela 2.1. Os padrões observados na grade comercial de canais e na grade impressa, apresentam características predominantemente de movimento cruzado entre subcanais. Na Fig. 4.56 é apresentado o padrão do escoamento para a altura de $1,22Dh$ a jusante da grade comercial de canais.

Figura 4.56 – Detalhe do Campo de velocidades obtido à $1,22Dh$ a jusante da grade comercial de canais.



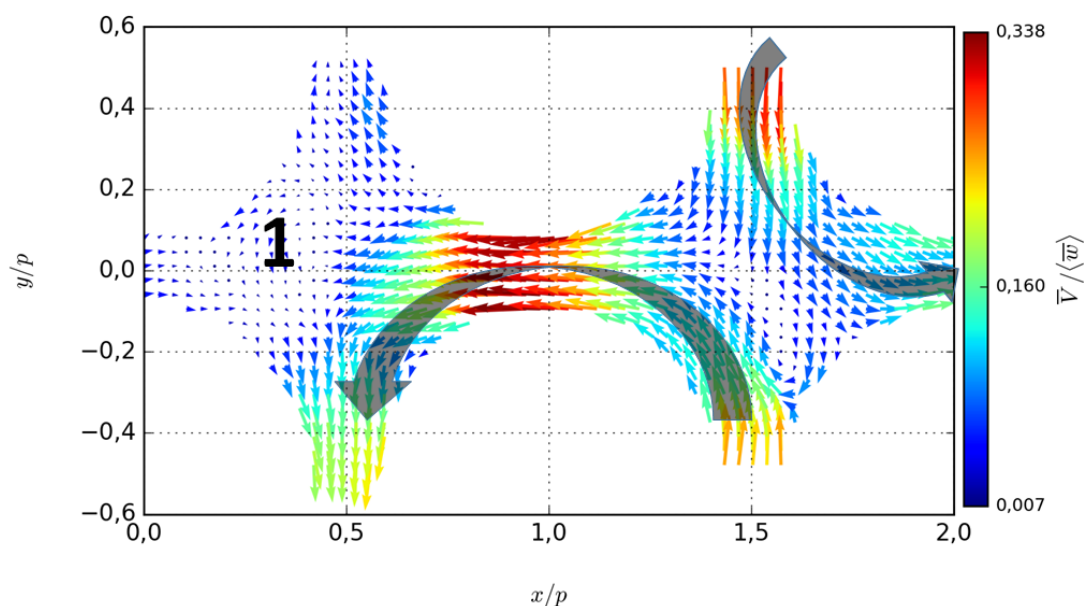
Fonte: Elaborado pelo autor.

As setas na Fig. 4.56 indicam os movimentos cruzados nessa região. Observa-se que eles se encontram no centro dos subcanais e na região entre varetas a magnitude da velocidade alcança o seu valor máximo.

Extrapolando para um caso real, onde as varetas estão aquecidas, os movimentos cruzados serão os principais responsáveis pela remoção de calor da superfície das varetas

para o fluido refrigerante. Observa-se que os movimentos cruzados na grade impressa é mais ordenado do que nas grades comerciais testadas. Na Fig. 4.57 podem ser vistos os detalhes desse comportamento observado para a altura de $1,22Dh$ a jusante da grade impressa.

Figura 4.57 – Detalhe do Campo de velocidades obtido à $1,22Dh$ a jusante da grade impressa.

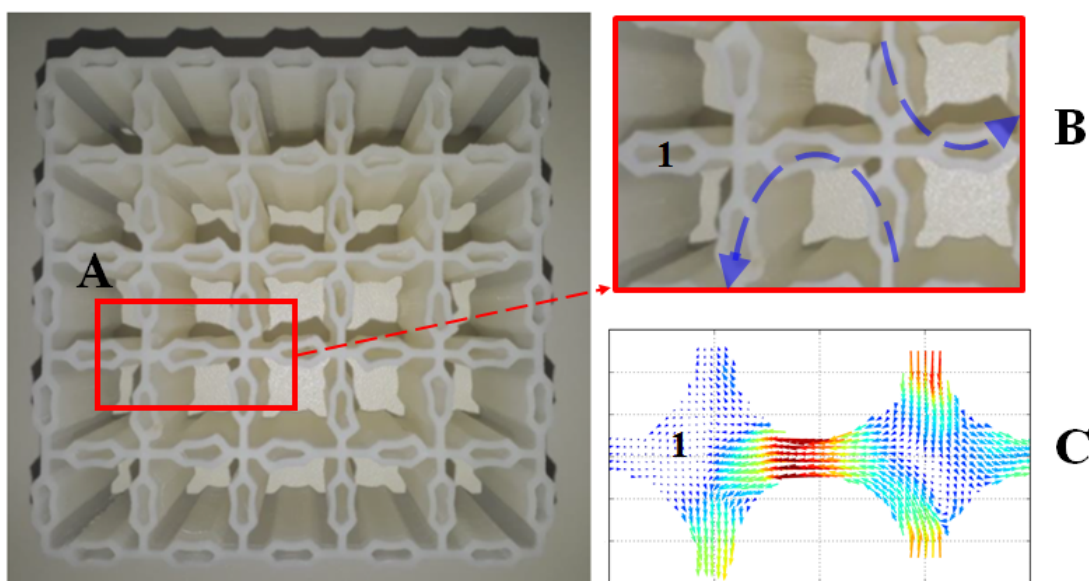


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o movimento cruzado do escoamento nessa região é anti-horário ao redor das varetas. Nota-se também que a magnitude da velocidade do escoamento na região entre varetas foi maior do que o da grade comercial de canais. A geometria exerce grande influencia nas características do escoamento. Pois, no caso da grade comercial de canais os elementos de mistura induzem um movimento cruzado que se deslocam em sentidos opostos se encontrando no interior do subcanal. No caso da grade impressa proposta nesse trabalho, os elementos de mistura geram movimentos que conseguem se deslocar com maior liberdade ao redor das varetas, alcançando assim uma velocidade com magnitude maior comparada com a grade comercial de canais.

Em A) na Fig. 4.58 está destacado a região de medição da grade impressa. Em B) estão em detalhes o movimento esperado do escoamento de água após passar pelas estruturas internas. Em C) observa-se o resultado obtido.

Figura 4.58 – Detalhes da geometria da grade impressa e os efeitos causados no escoamento na região mais próxima da grade.



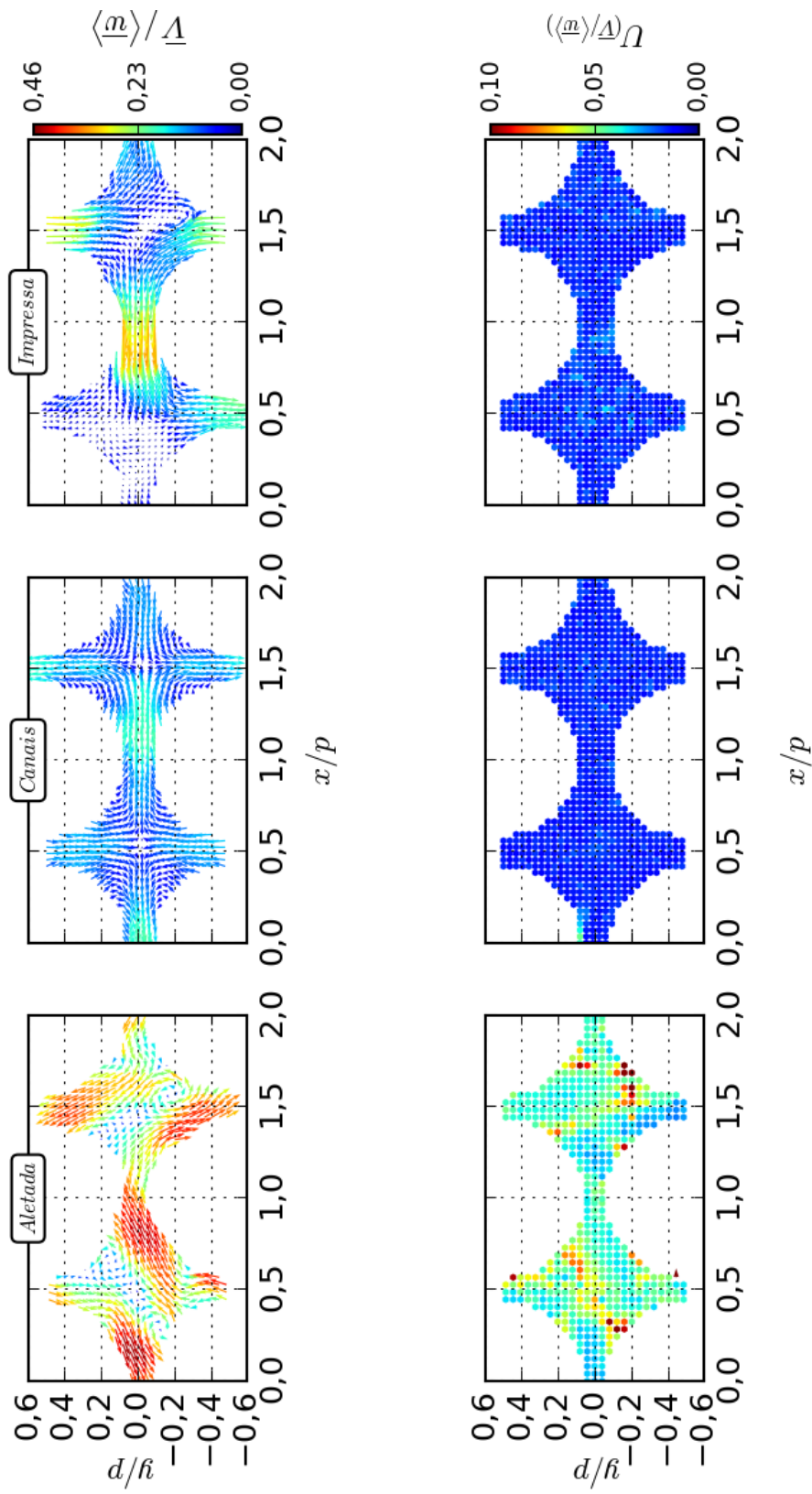
Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse resultado obtido para a grade impressa mostrou correspondência com as expectativas, demonstrando dessa forma, que a técnica de prototipagem pode ser utilizada na avaliação de protótipos de grades espaçadoras. As estruturas projetadas e que estão presentes na grade provocaram o efeito esperado no escoamento. Note que a região marcada como 1 em C) não apresenta efeitos de mistura e a razão pode ser observada na mesma região marcada como 1 em B) o elemento presente nessa região não provoca desvios no deslocamento de água.

Os resultados apresentados nas Figs. 4.59, 4.60, 4.61 e 4.62 são referentes às alturas 1, $22Dh$, 2, $44Dh$, 7, $33Dh$ e 18, $73Dh$ a jusante das grades espaçadoras avaliadas.

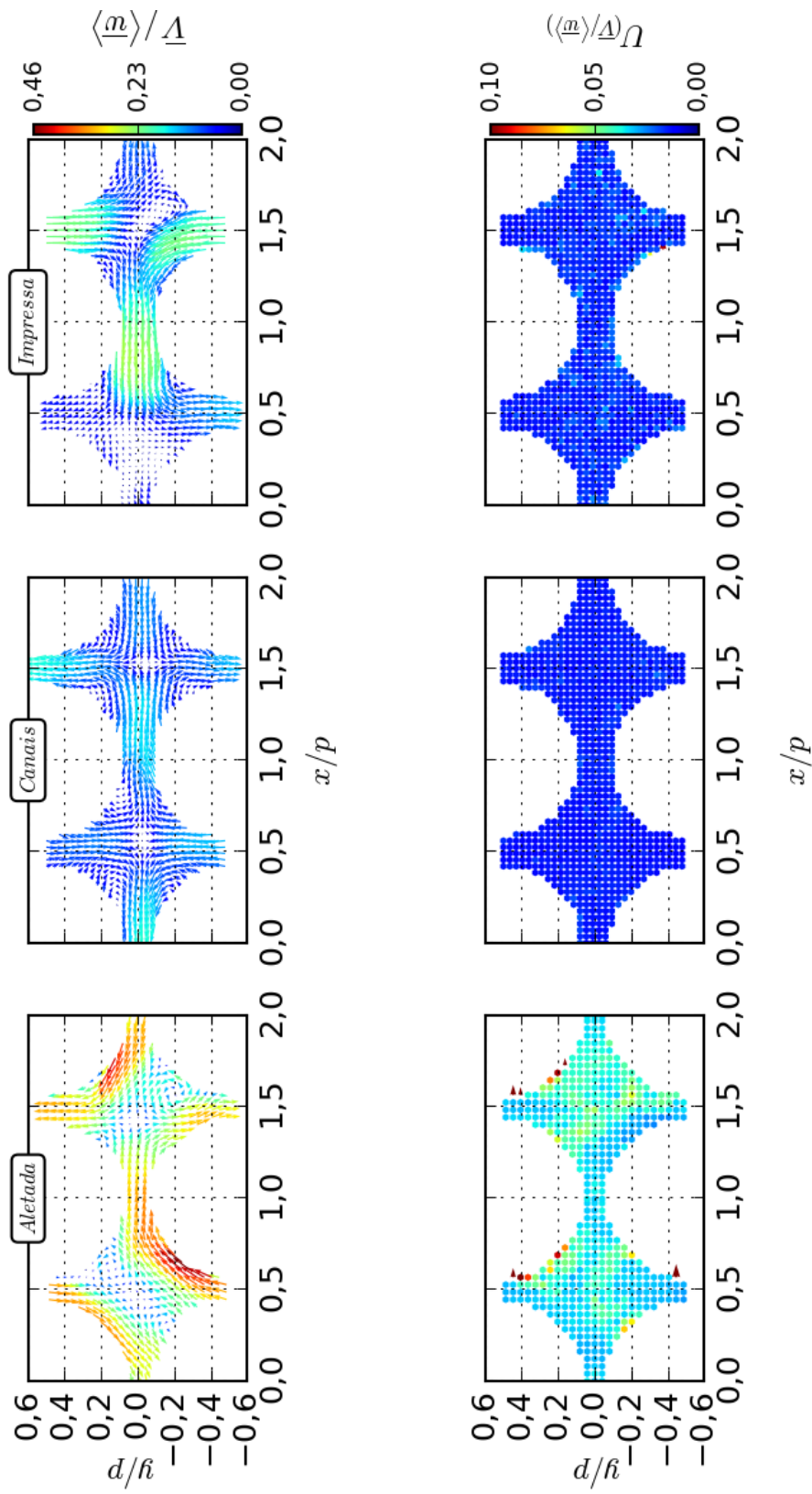
Percebe-se também que a magnitude da velocidade (\vec{V}) obtida para a grade comercial aletada está no limite superior da escala. A intensidade de (\vec{V}) das outras grades foram bastante similares entre si, porém, para a grade impressa essa grandeza obtida foi ligeiramente maior do que a obtida na grade comercial de canais. Os campos de incertezas expandidas normalizadas também estão presentes nesses resultados.

Figura 4.59 – Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas à $1,22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



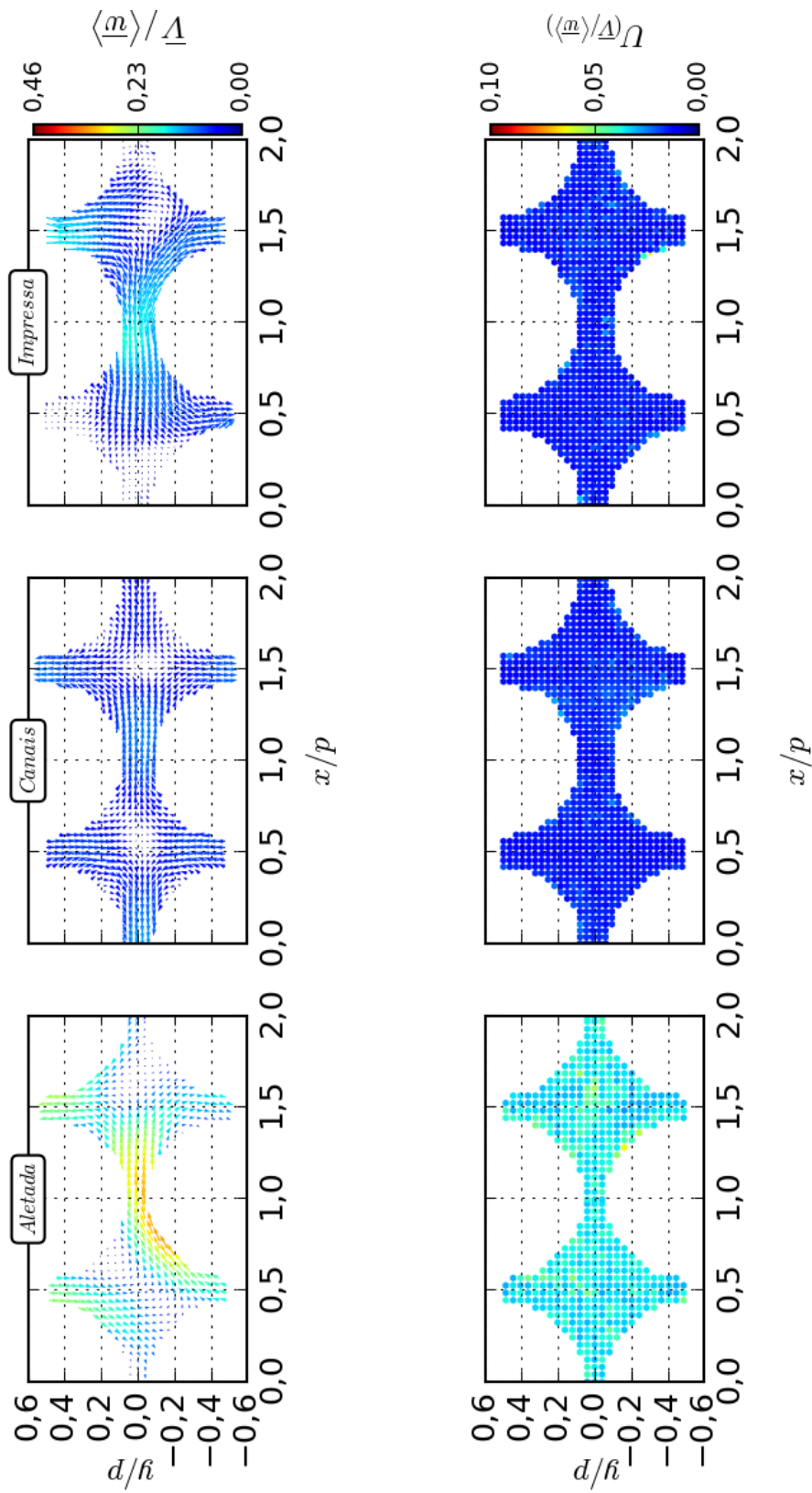
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.60 – Campo de velocidades laterais $\langle \bar{u} \rangle$ e $\langle \bar{v} \rangle$ obtidas à $2,44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



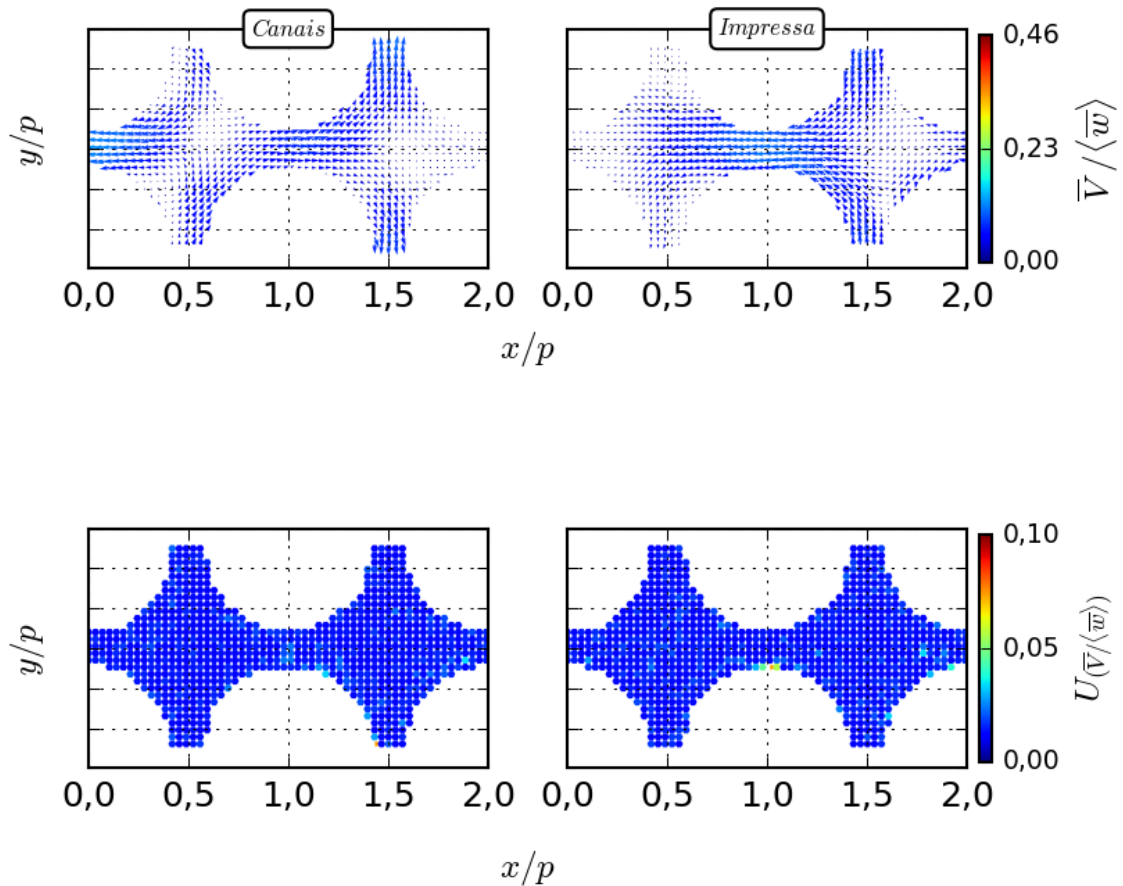
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.61 – Campo de velocidades laterais $\langle \bar{u} \rangle$ e $\langle \bar{v} \rangle$ obtidas à $7,33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.62 – Campo de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas à $18,73Dh$ a jusante das grades espaçadoras de canais e impressa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

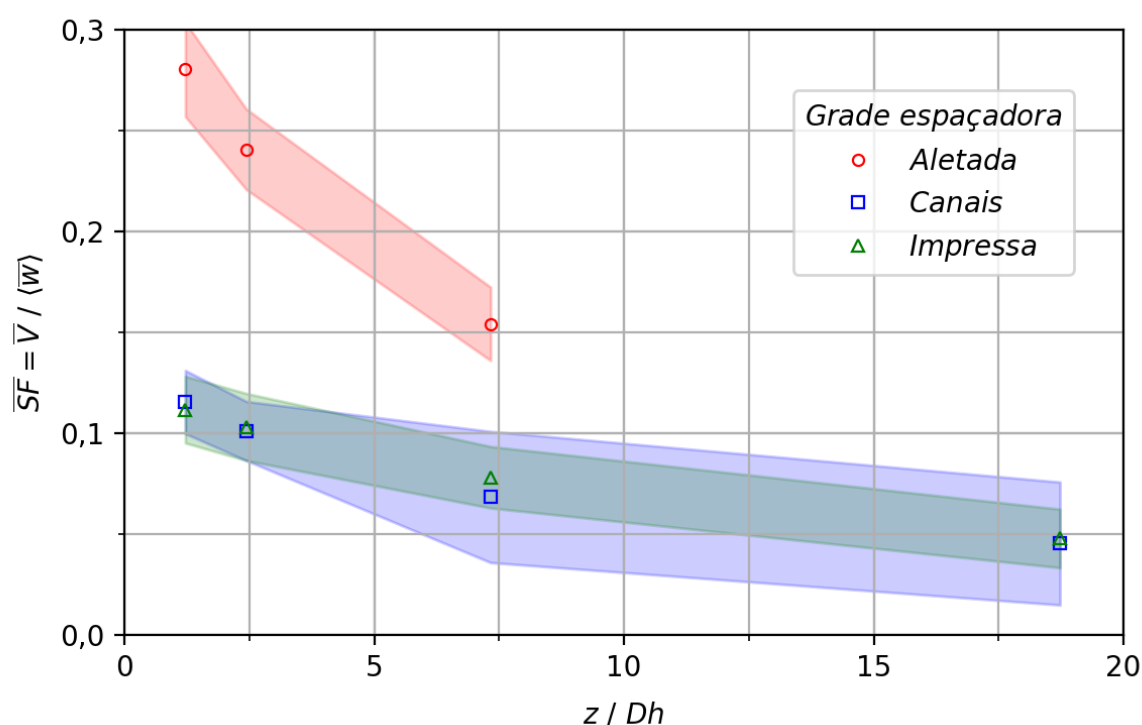
A magnitude do vetor resultante (\vec{V}) no plano, decai com o afastamento em relação à grade. Essa característica está presente tanto nas grades comerciais quanto na grade impressa.

Para a grade aletada, tanto a magnitude de ($\bar{V} / \langle \bar{w} \rangle$) quanto a sua incerteza expandida normalizada ($U(\bar{V} / \langle \bar{w} \rangle)$) foram maiores do que das outras duas grades.

4.6 Resultado do \overline{SF} a jusante das três grades avaliadas

Com o intuito de resumir esses resultados obtidos para cada plano foi realizada uma comparação do escoamento secundário médio (\overline{SF}) para as três grades avaliadas. A determinação de (\overline{SF}) foi possível para as três primeiras alturas $1,22Dh$, $2,44Dh$ e $7,33Dh$ para todas as grades. Entretanto, a quarta altura ($18,73Dh$) foi avaliada apenas para as grades comerciais de canais e impressa através do topo da ST2. O \overline{SF} e a sua incerteza expandida (para um intervalo de 95%) são apresentados na Fig. 4.63.

Figura 4.63 – \overline{SF} obtido a jusante das três grades avaliadas



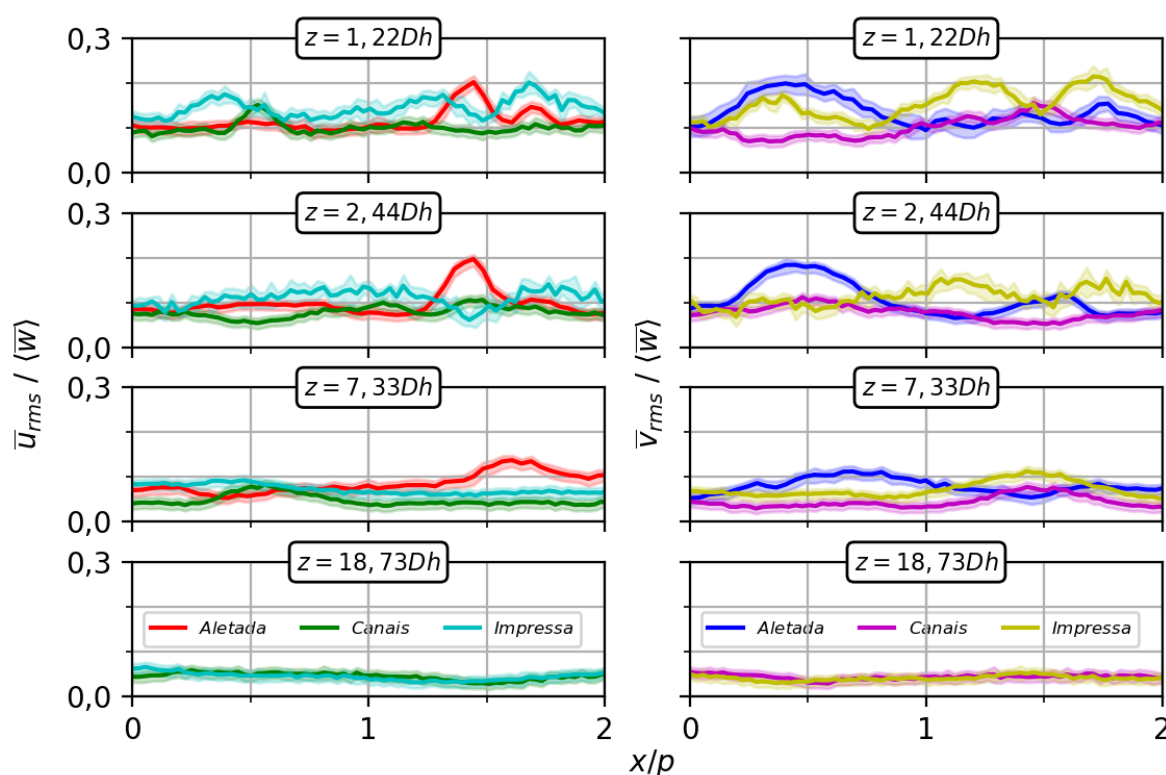
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como foi possível observar nas seções anteriores, o movimento lateral médio decai com o afastamento da grade. Observa-se que o movimento lateral apresentado para a grade comercial aletada avaliada é maior do que as outras duas grades. O movimento secundário observado para as grades comercial de canais e impressa não apresentaram diferenças significativas. No entanto, a incerteza expandida obtida para a grade impressa foi menor.

4.7 Resultados para o *RMS* das velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) obtidas através do topo das ST1 e ST2

Os desvios quadráticos médios (*RMS-Root Squared Mean*) das componentes de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}), isto é, \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} respectivamente, também foram avaliados para as três grades espaçadoras. Conforme pode ser visto na Fig. 4.64. Nota-se que, assim como foi observado com outras grandezas, há um amortecimento tanto de \bar{u}_{rms} quanto de \bar{v}_{rms} para todas as grades com o afastamento em relação a grade. As grades de canais e impressa apresentaram comportamentos semelhantes para uma quarta altura $18,73Dh$ a jusante da grade. Nota-se que no caso da grade aletada quando a componente \bar{u}_{rms} é máxima a outra é mínima. Comportamento semelhante ao que foi observado na avaliação dos tensores de Re normais $u'u'$ e $v'v'$. Tanto a grade aletada quanto a impressa apresentaram amplitudes significativas ao longo desse eixo avaliado, porém para a grade de canais a amplitude foi mais suave.

Figura 4.64 – *RMS* das componentes de velocidades laterais (\bar{u}) e (\bar{v}) das três grades avaliadas.



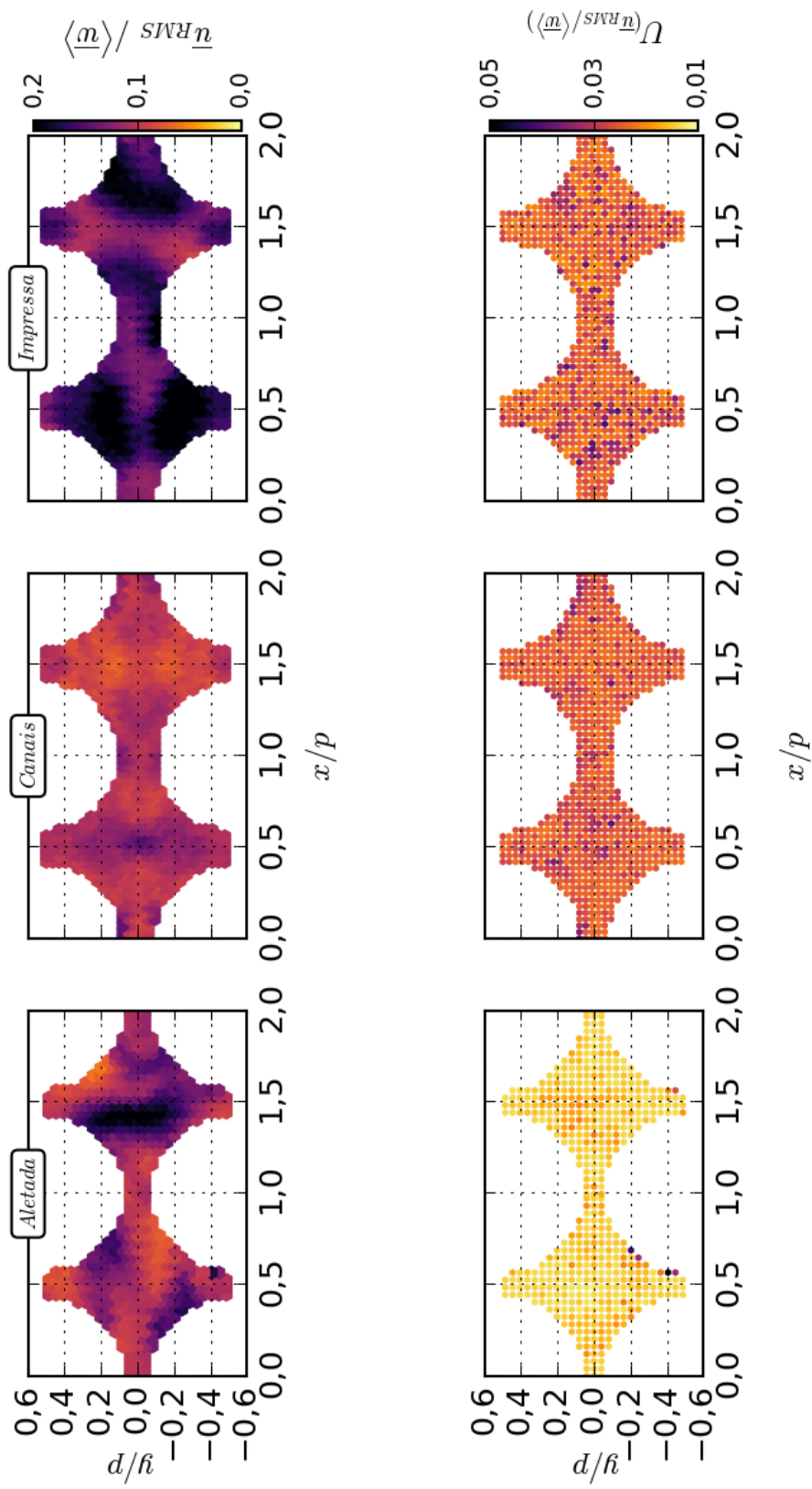
Fonte: Elaborado pelo autor.

As medidas ao longo de apenas um eixo podem fornecer informações rápidas e indícios de um comportamento mais complexo, porém a extrapolação de resultados ao

longo de um eixo para o plano se torna uma tarefa mais árdua. Essas flutuações da velocidade \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} também foram obtidas para o campo completo conforme poderá ser visto a seguir.

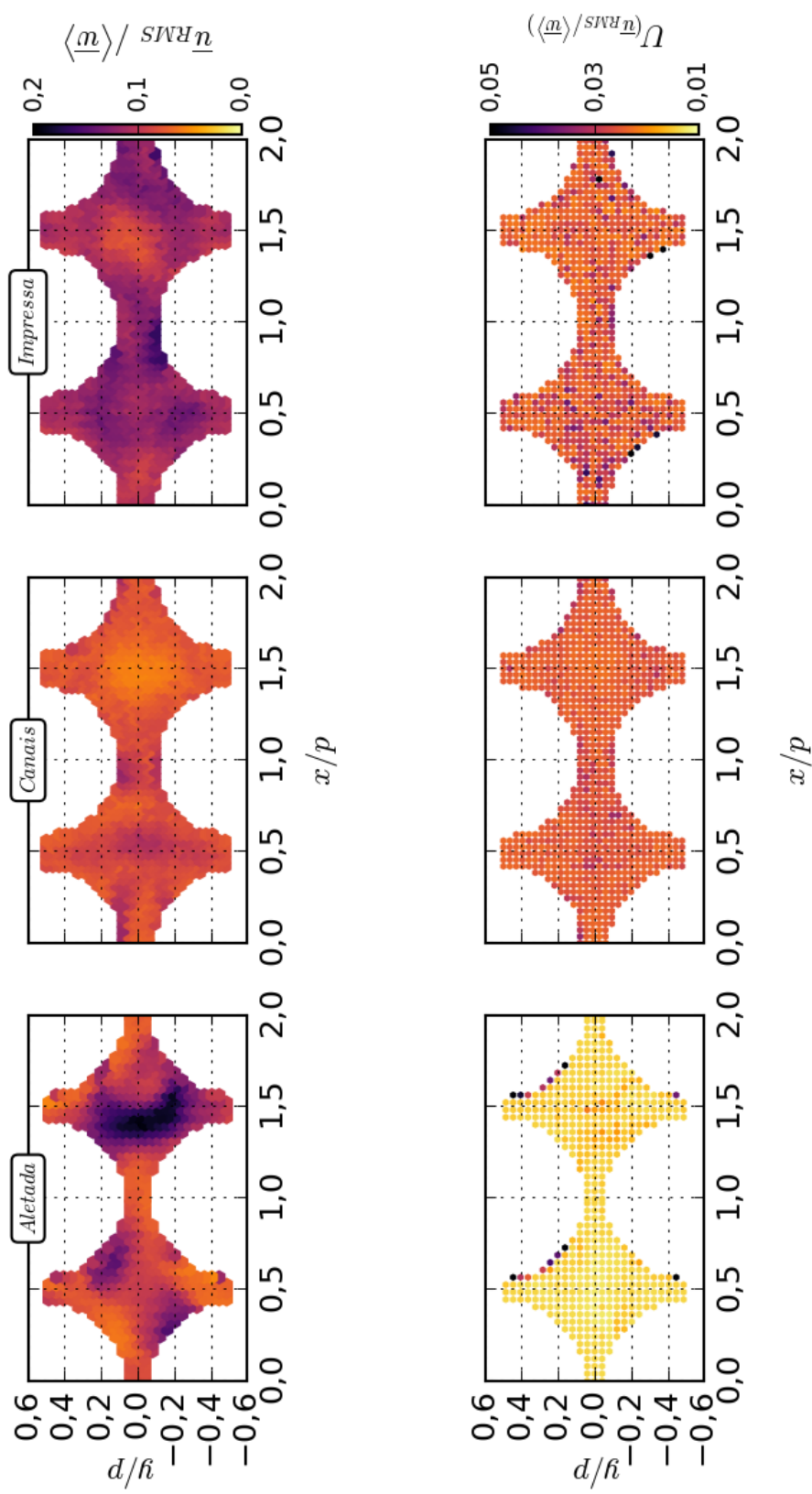
As Figs. 4.65, 4.66, 4.67 e 4.68 representam a componente normalizada \bar{u}_{rms} e Figs. 4.69, 4.70, 4.71 e 4.72 as componentes \bar{v}_{rms} ambas com as suas respectivas incertezas expandidas normalizadas.

Figura 4.65 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à $1,22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



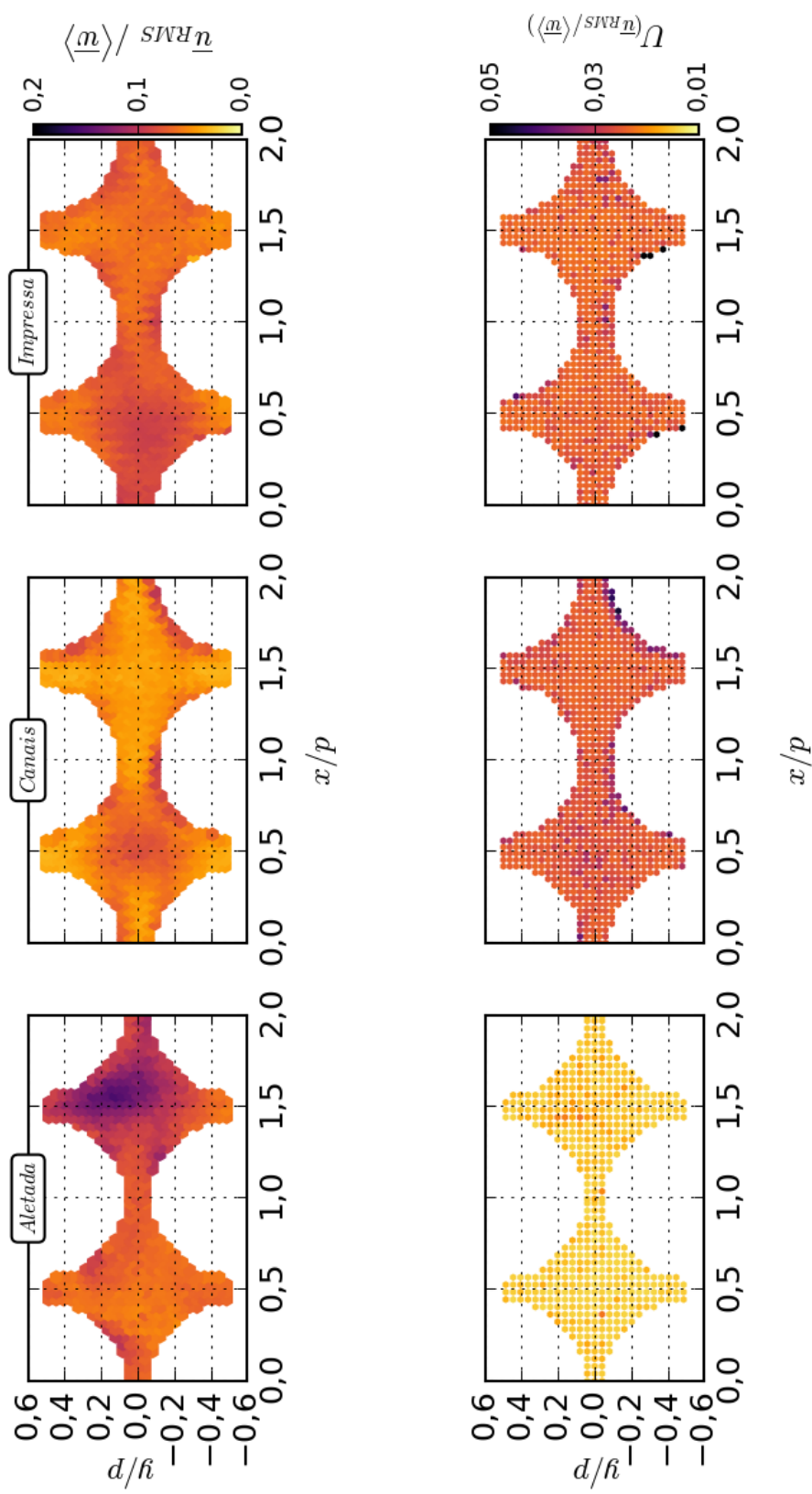
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.66 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à $2,44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



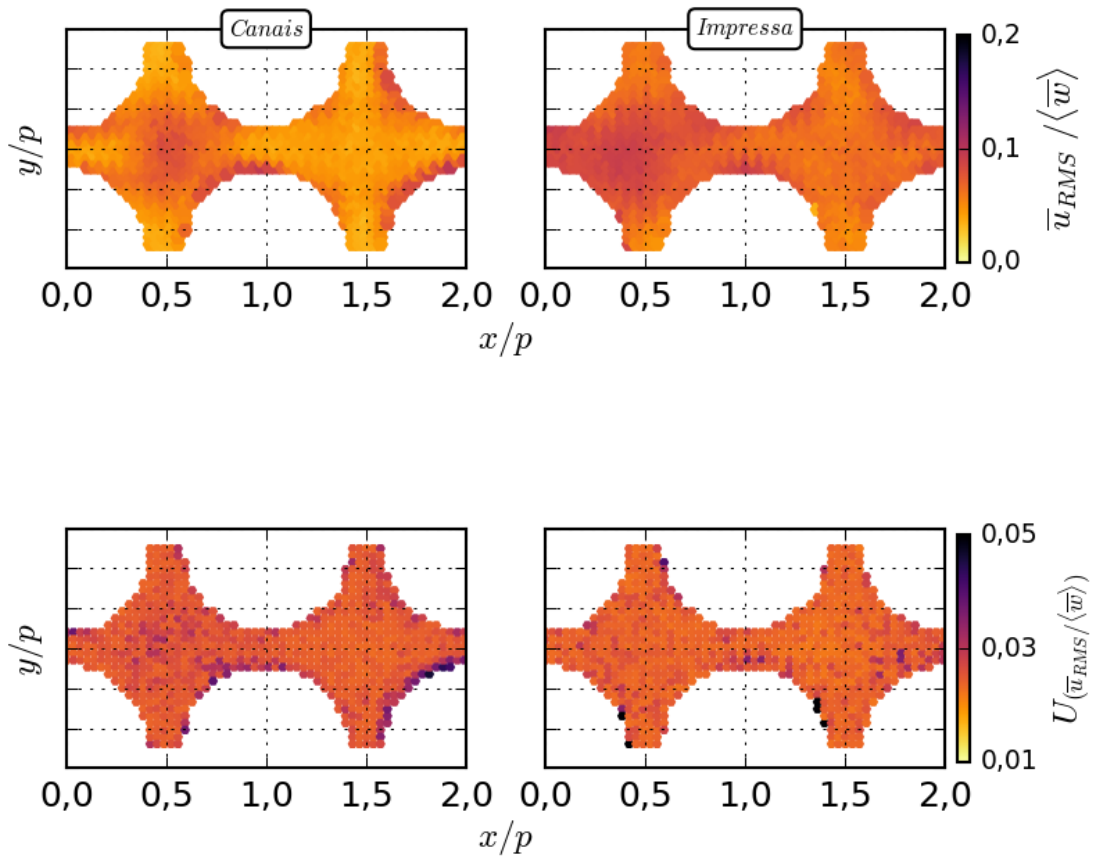
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.67 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à $7,33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



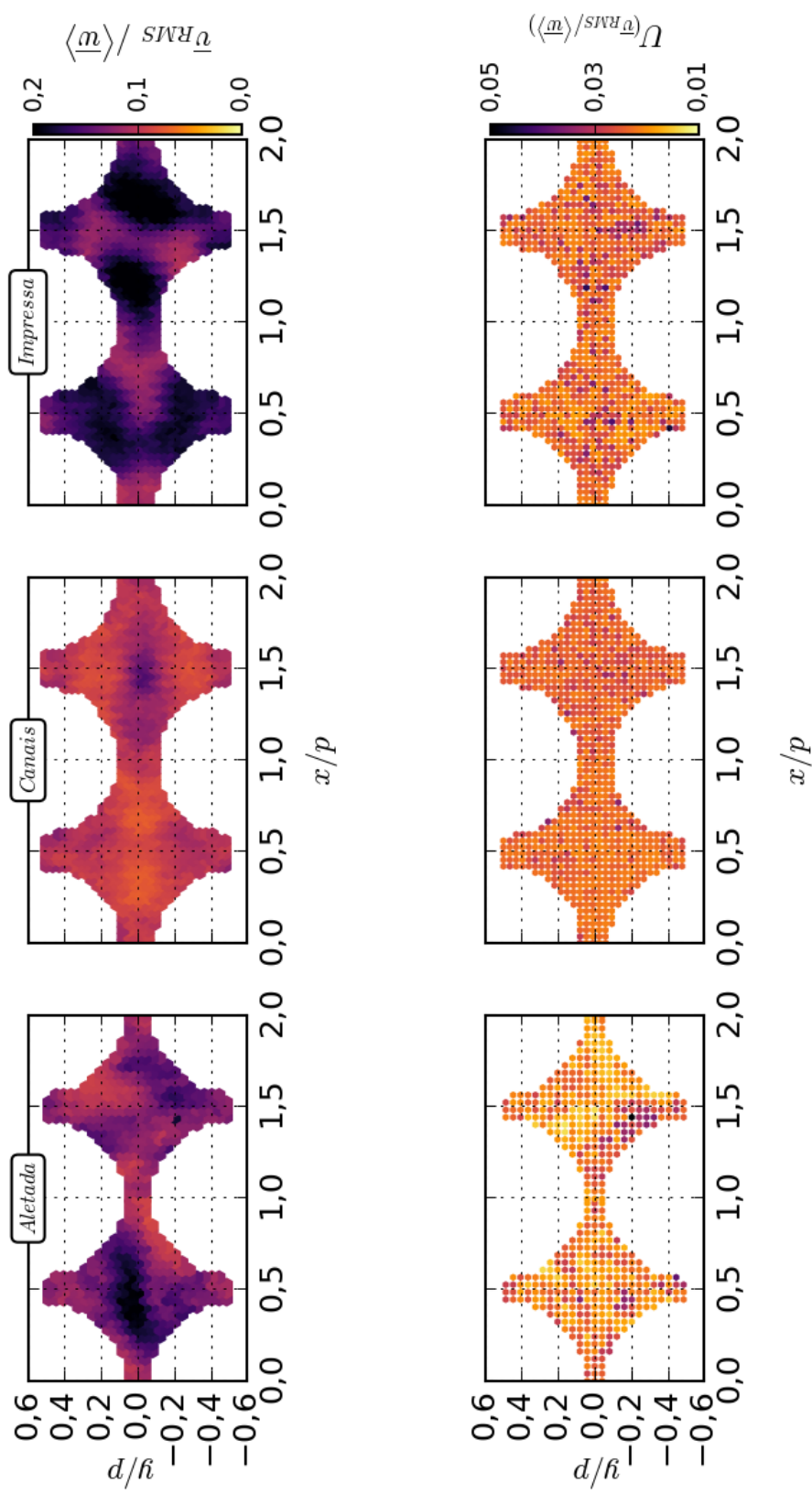
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.68 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{u}) obtida à $18,73Dh$ a jusante das grades espaçadoras de canais e impressa.



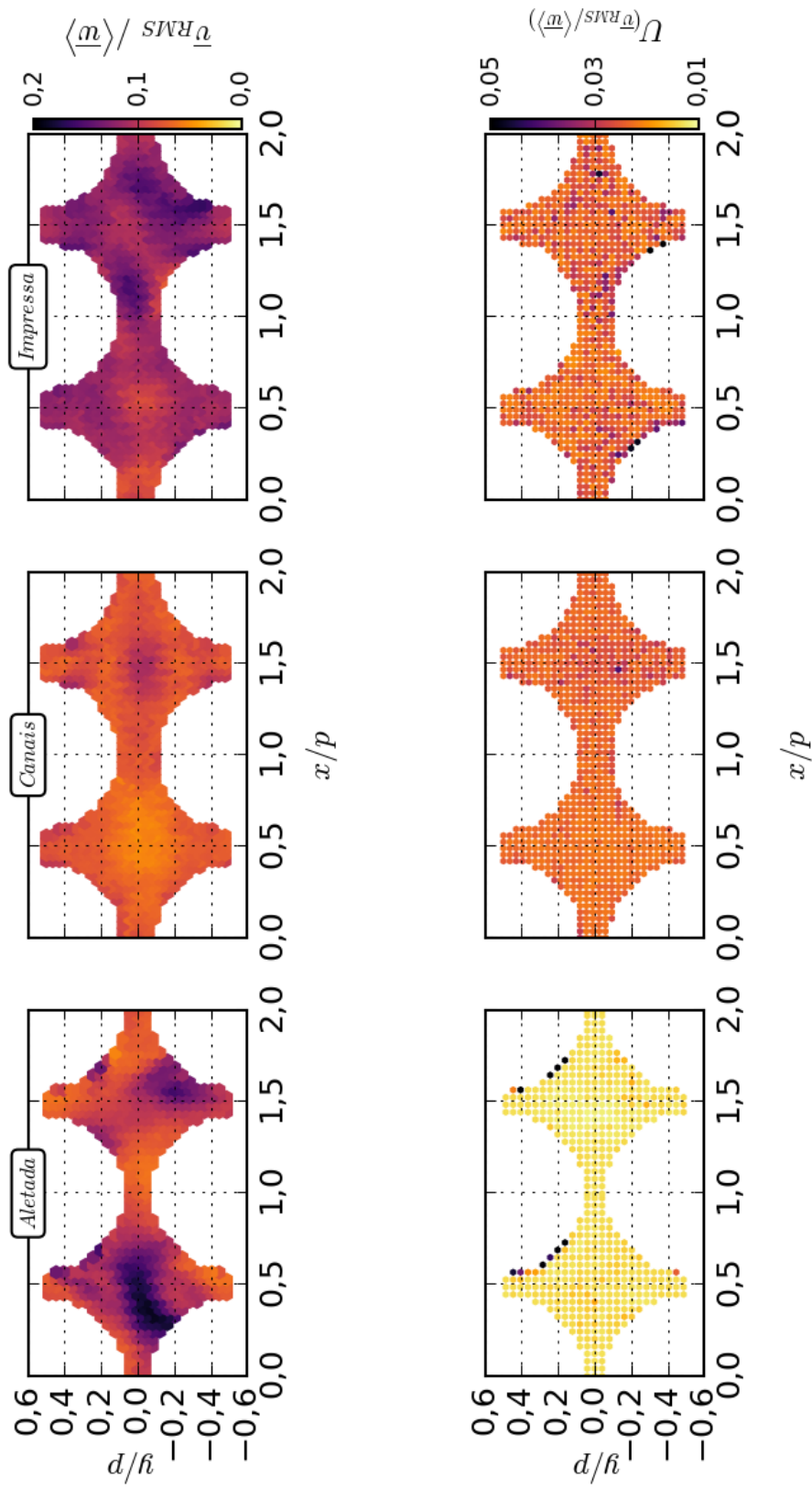
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.69 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à $1,22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



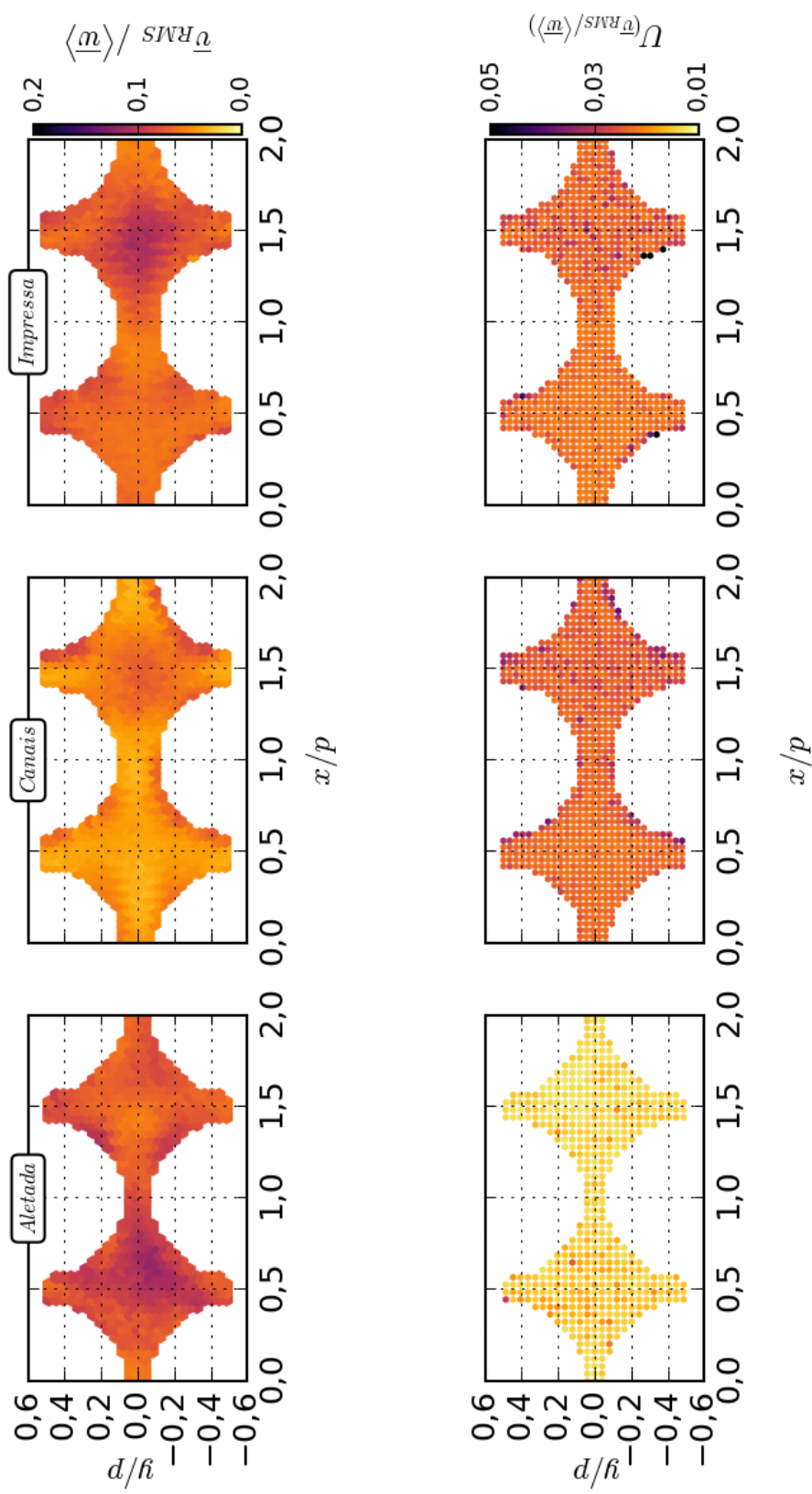
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.70 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à $2,44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



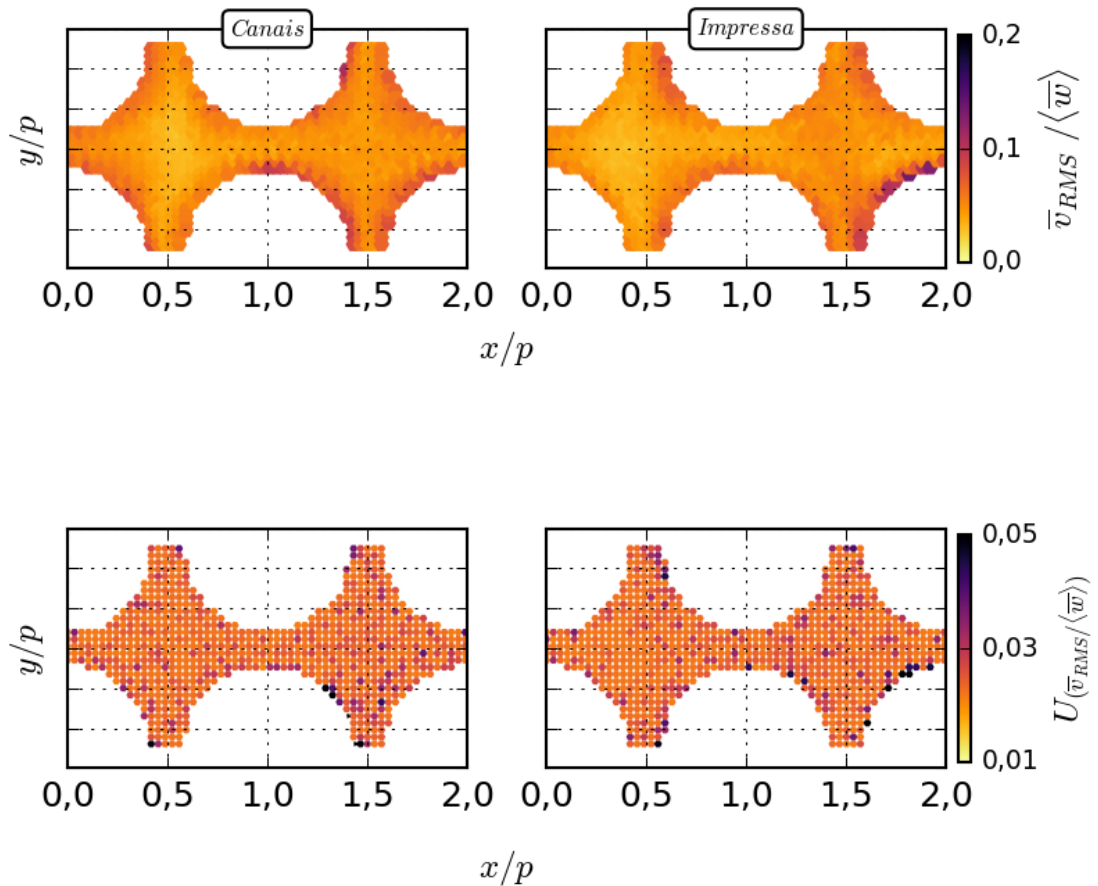
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.71 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à $7,33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.72 – Campo de RMS da componente de velocidade lateral (\bar{v}) obtida à $18,73Dh$ a jusante das grades espaçadoras de canais e impressa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

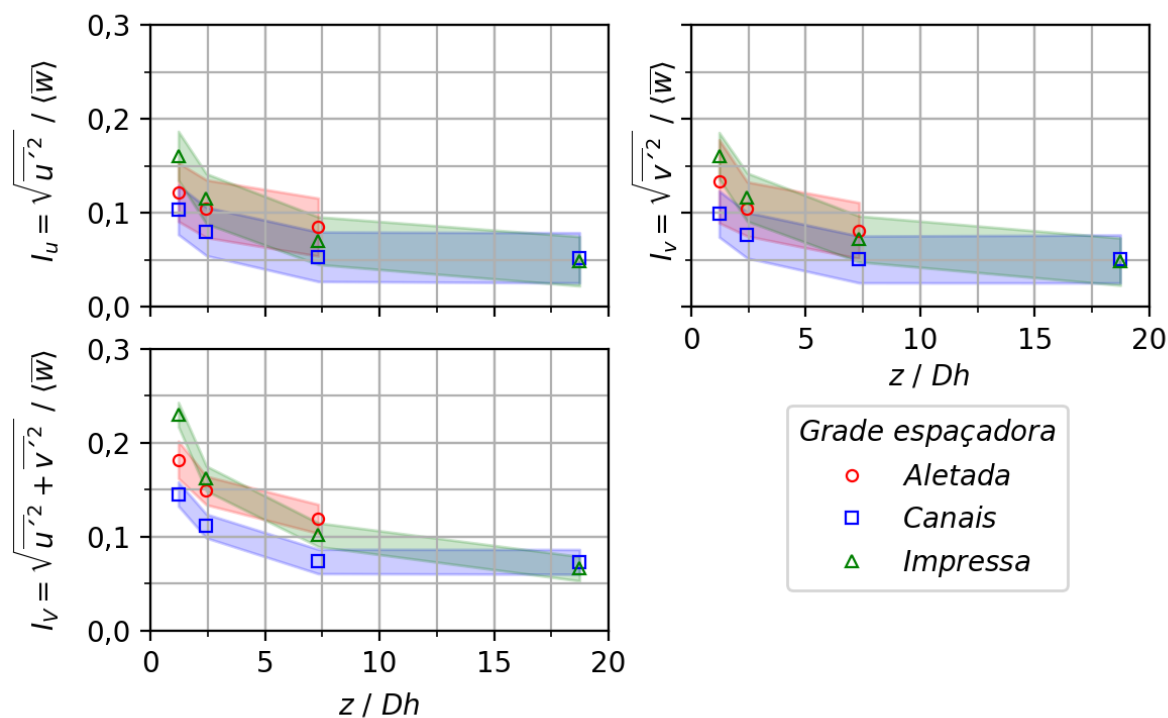
Esses resultados de campo completo, ao contrário daqueles apresentados para apenas um eixo, fornecem informações mais completas. A partir dessas medidas de campo completo pode ser comprovado que as componentes de flutuação de velocidades laterais \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} são em média 1,5 vez maiores para a grade impressa em comparação com a grade de canais e 1,1 vez maiores para a grade aletada. No entanto, para a grade aletada, o amortecimento de \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} com o afastamento em relação à grade é mais suave em comparação com as outras duas grades. A magnitude das componentes \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} decaem 1,5 vez para a grade aletada enquanto que para a grade de canais e impressa decaem 2,0 e

2,3 vezes respectivamente.

De maneira geral, as incertezas expandidas normalizadas de \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} avaliadas para as grades Canais e Impressa apresentaram valores semelhantes entre si, porém maiores em comparação com a grade aletada. De maneira específica, a incerteza expandida normalizada de \bar{v}_{rms} da grade aletada apresentou valor próximo ao das outras duas na região mais próxima da grade.

Uma maneira de resumir e expressar a forma como as componentes de flutuação de velocidade se comportam com o afastamento em relação à grade espaçadora é através da medida da intensidade de turbulência. Na Fig. 4.73 é apresentado o resultado da intensidade de turbulência para as três grades espaçadoras.

Figura 4.73 – Intensidade de Turbulência I obtida a jusante das três grades avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

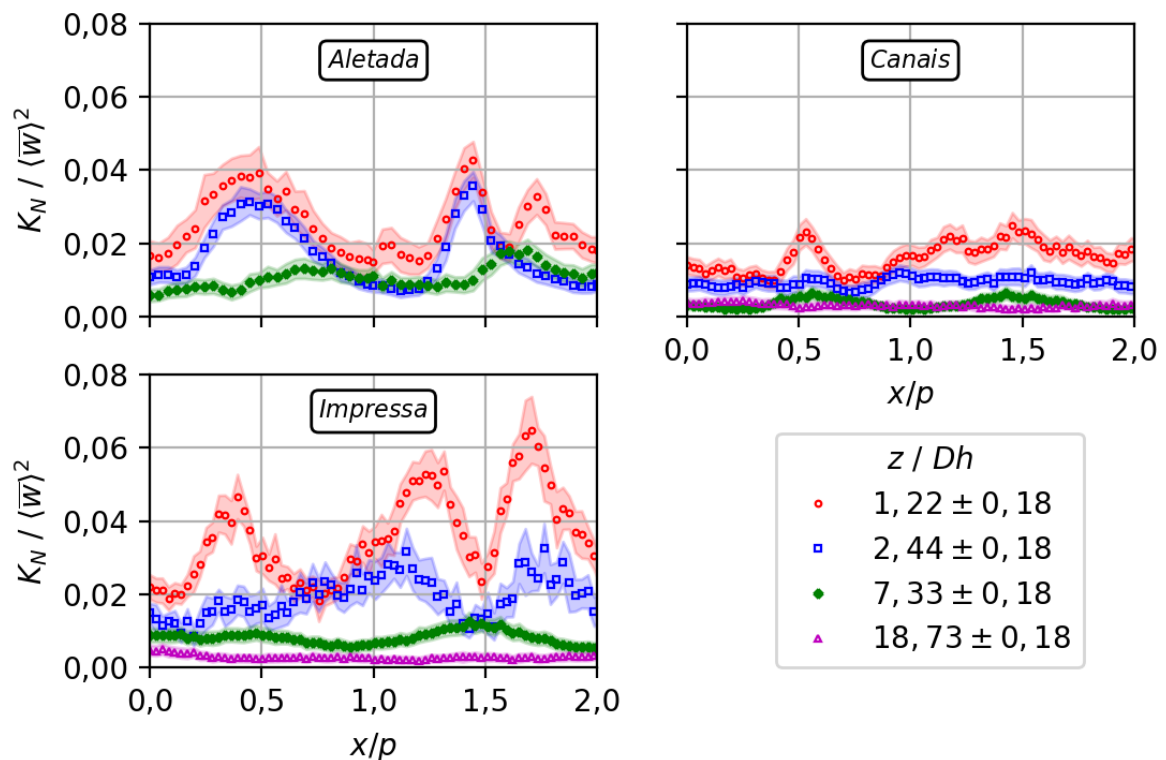
As mesmas observações realizadas para as medidas de campo para as componentes \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} são evidenciadas na Fig. 4.73. No entanto, a apresentação das médias de \bar{u}_{rms} e \bar{v}_{rms} em cada plano fornece esse decaimento a jusante das grades. Inclusive é possível notar que a grade impressa proporciona uma intensidade 1,6 vez maior em relação à grade de canais e cerca de 1,3 vez maior comparada com a grade aletada na posição mais próxima da grade. A variação da intensidade de turbulência observada entre a posição $z = 1,22Dh$ e $z = 2,44Dh$, reduz de maneira mais acentuada comparado com as demais. Mas atinge a

posição $z = 18,73Dh$ com a mesma intensidade da grade Canais.

4.8 Resultado da Energia Cinética de Turbulência avaliada a jusante das três grades

A energia cinética de turbulência k_N normalizada por $\langle \bar{w} \rangle$ (velocidade média do escoamento quadrática) foi avaliada para as três grades e pode ser vista na Fig. 4.74.

Figura 4.74 – Energia Cinética de Turbulência k obtida a jusante das três grades avaliadas



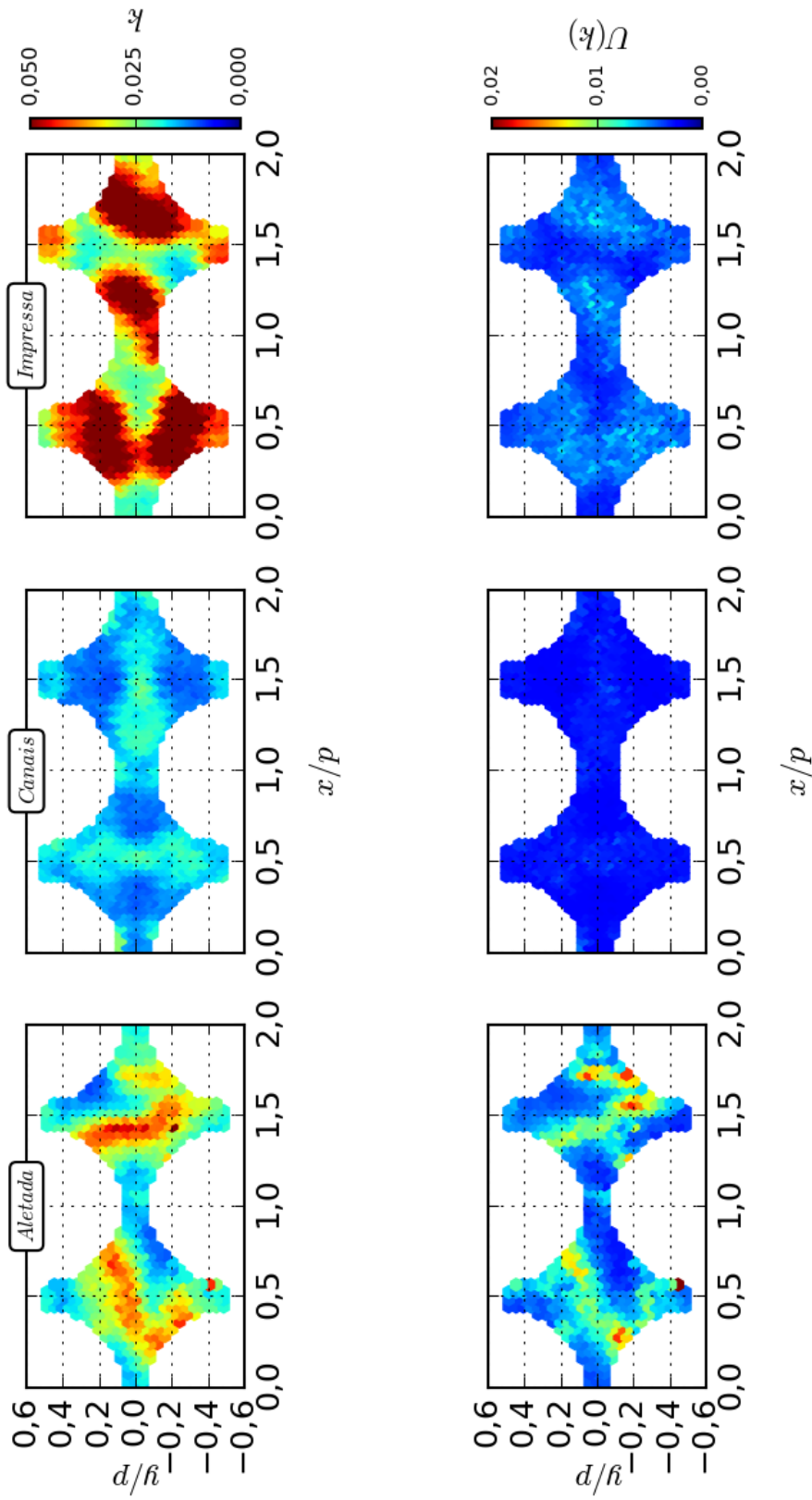
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas medidas também foram realizadas para o eixo central $y/p = 0$ para quatro alturas normalizadas pelo diâmetro hidráulico Dh compreendido na faixa de $1,22 \leq Dh \leq 18,73$.

Percebe-se que k_N possui intensidade maior nas posições mais próximas das grades e decai ao se afastar a jusante dela. A grade que apresenta uma maior magnitude de energia cinética de turbulência é a impressa e a de menor é a grade comercial de canais.

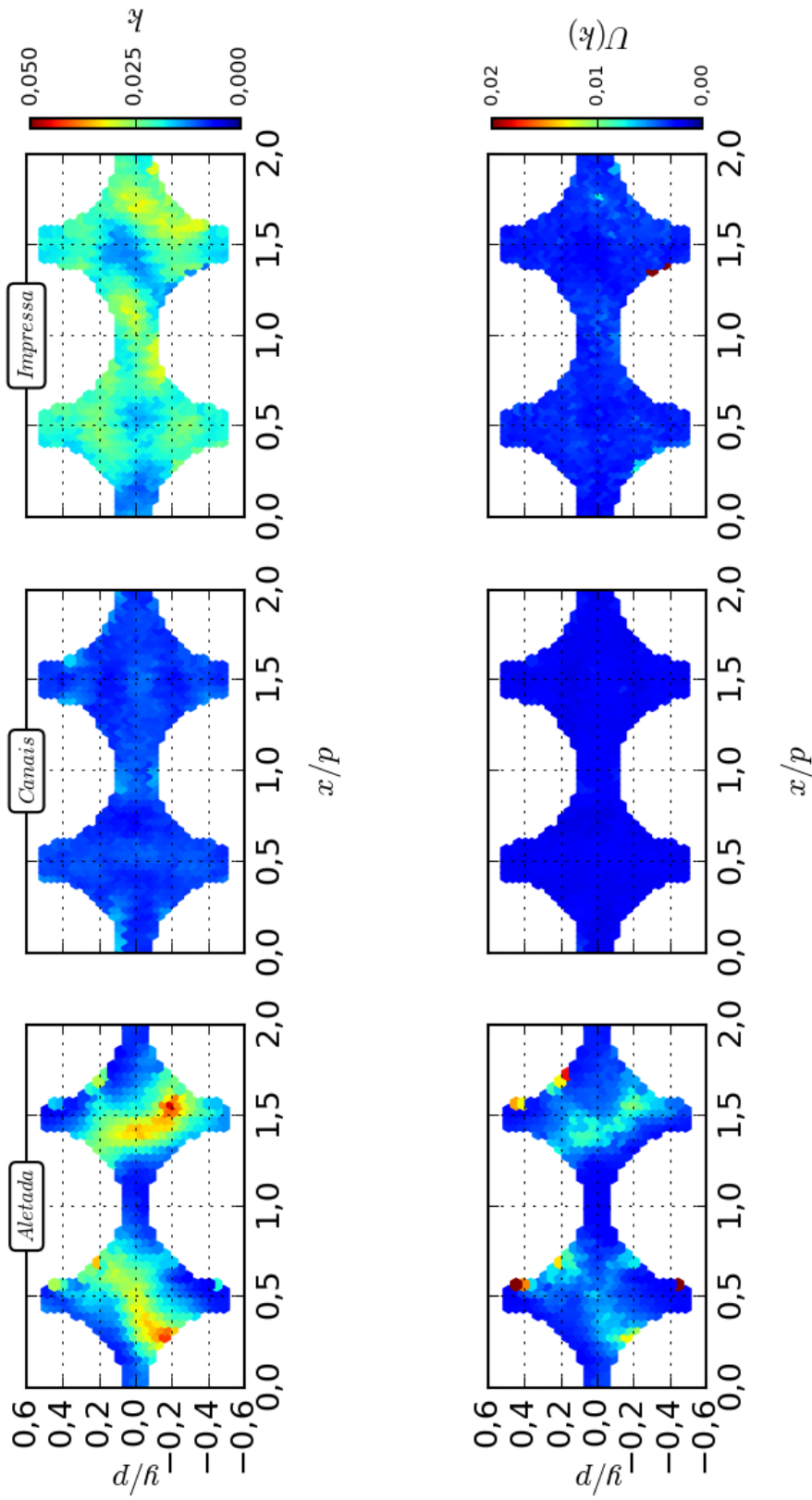
Resultados de k_N também foram obtidos para três alturas ($1,22Dh$, $2,44Dh$ e $7,33Dh$) a jusante das três grades avaliadas e podem ser vistos nas Figs. 4.75, 4.76 e 4.77.

Figura 4.75 – Energia Cinética de Turbulência k obtida à $1,22Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



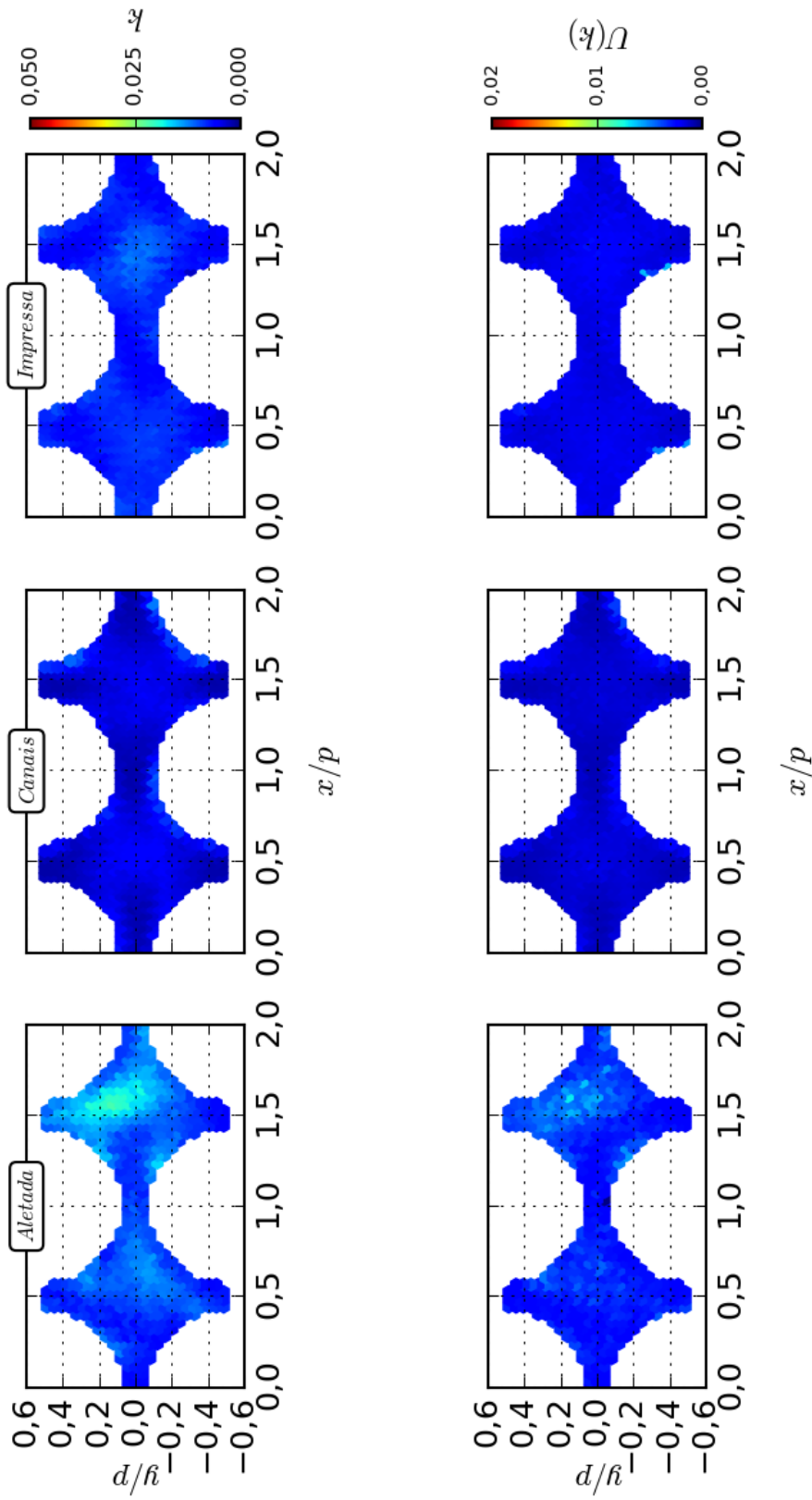
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.76 – Energia Cinética de Turbulência k obtida à $2,44Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.77 – Energia Cinética de Turbulência k obtida à $7,33Dh$ a jusante das grades espaçadoras.



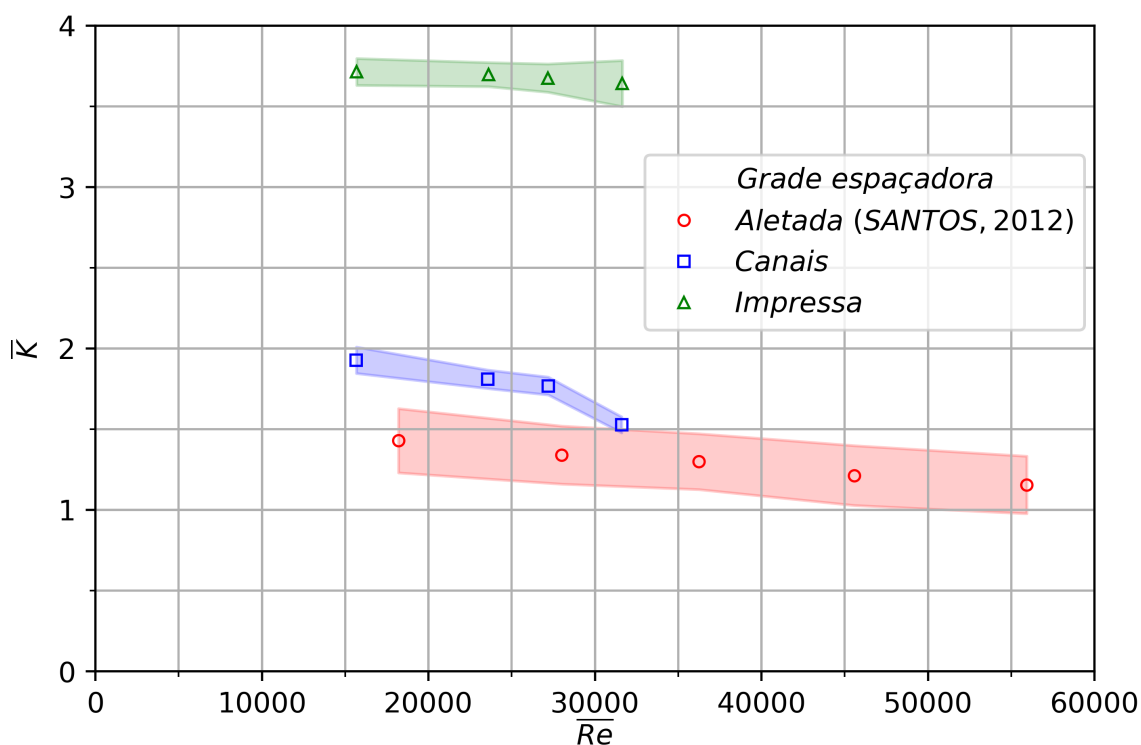
Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que a magnitude da energia cinética de turbulência da grade impressa é significativamente maior do que as demais, no entanto rapidamente decai, chegando a praticamente zero ao final da terceira altura normalizada ($7,33Dh$). A grade aletada ainda preserva resquícios dessa energia em $7,33Dh$, porém, bastante atenuada, conforme pode ser notado na Fig.4.77.

4.9 Resultado da avaliação da perda de pressão ΔP obtida para as três grades espaçadoras.

Todas as seções anteriores desse capítulo apresentaram basicamente os resultados relacionados com os efeitos de turbulência provocados no escoamento devido à presença das grades espaçadoras. No entanto, as grades provocam perdas de pressão no escoamento de água. Por essa razão é necessário avaliar os efeitos associados com a perda de pressão localizada dessas grades espaçadoras. Na Fig. 4.78 são apresentados os resultados dos coeficientes de perda de pressão médio obtidos para as três grades avaliadas.

Figura 4.78 – Comparação do coeficiente de perda de pressão médio \bar{K} obtido para as três grades espaçadoras testadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que o coeficiente de perda de pressão médio obtido para grade impressa foi maior do que os obtidos para as grades comerciais.

Após uma avaliação prévia dos parâmetros relacionados com o movimento secundário para as três grades espaçadoras, percebeu-se que SF da grade aletada é superior ao das outras duas grades avaliadas como foi verificado nos resultados apresentados na Fig. 4.63. E ao mesmo tempo, conforme foi observado na Fig. 4.78, a perda de pressão pela grade aletada é menor do que o valor obtido para as demais grades avaliadas.

Portanto sob o ponto de vista termo-hidráulico, a grade espaçadora comercial aletada é superior à grade comercial de canais e também com relação à grade impressa avaliada.

No entanto, poderíamos avaliar a grade impressa com algum material que fosse tão liso ou mais delgado quanto os materiais das grades comerciais avaliadas. Pois, o aumento da perda de carga na grade impressa é devido principalmente à maior espessura, e também à rugosidade relativa.

5 Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental das características termo-hidráulicas do escoamento de água através de grades espaçadoras comerciais presentes em ECN representativos de reatores *PWR*. Essa investigação foi uma continuação dos trabalhos de Santos (2012) e Castro (2016).

Os experimentos foram conduzidos em duas seções de testes, ST1 e ST2, ambas compostas por feixes de 5x5 varetas. Na ST1 foi avaliada uma grade espaçadora comercial do tipo aletada e na ST2 uma do tipo de canais. Foram avaliados os fenômenos de turbulência e perda de pressão no escoamento de água principalmente a jusante das grades comerciais. Os principais instrumentos de medição utilizados foram um *LDV-2D* e quatro transdutores diferenciais de pressão. As principais conclusões obtidas para os testes realizados na ST1 e ST2 foram:

- As medidas dos perfis de velocidades obtidas através do topo da ST1 permitiram uma melhor caracterização do escoamento em relação às medidas realizadas pela lateral ST1.
- Os resultados apresentados para faixa de Re compreendidas entre 18×10^3 e 54×10^3 mostraram mudanças no comportamento do escoamento de água para as três alturas a jusante da grade aletada. Quanto maior a diferença entre os Re observados, maior também será a diferença no comportamento do escoamento relacionado. A maior diferença observada foi entre $Re = 54 \times 10^3$ e $Re = 18 \times 10^3$, a menor entre $Re = 54 \times 10^3$ e $Re = 36 \times 10^3$. As grandezas avaliadas que apresentaram essas diferenças foram: Perfis de velocidades laterais obtidas pela lateral e topo da ST1; Tensores de Re (termos normais); e Energia Cinética de Turbulência.
- Em relação à incerteza expandida normalizada para as medidas de múltiplos Re , temos que, a incerteza do vetor velocidade resultante (\vec{V}) no plano aumenta com o aumento de Re . Para todos os tensores de Re avaliados percebeu-se que os valores de incerteza tenderam a ser maiores nas posições mais próximas da grade. Esse mesmo comportamento foi observado para a energia cinética de turbulência. Uma justificativa para esse maior valor de incerteza nas proximidades da grade podem estar associadas a reflexões provenientes da própria grade.
- A componente de velocidade lateral foi medida a partir de duas posições distintas em relação a ST1 (lateral e topo) e serviu de validação da estrutura de topo que permite o acesso óptico dos feixes do *LDV*. A componente de velocidade (v) medida pelo topo se mostrou concordante com a componente obtida pela lateral. Esse método

também foi aplicado nas medidas a jusante da grade comercial de canais presente na ST2, onde as componentes de velocidades laterais obtidas pelo topo e lateral foram comparadas e também apresentaram resultados concordantes.

- Foram realizadas comparações entre os perfis de velocidades a jusante das grades comerciais. A magnitude dos perfis de velocidades laterais da grade aletada foram maiores do que a das componentes obtidas para a grade de canais. No entanto o amortecimento dos perfis de velocidades laterais foi uma característica em comum observada para ambas as grades. A componente de velocidade axial dessas grades comerciais tenderam à uma estabilização ligeiramente acima da velocidade média do escoamento na altura mais afastada.
- Medidas dos perfis de velocidades foram obtidos a montante da grade de canais e comparadas com a altura mais afastada da grade. Os resultados revelaram que o movimento lateral a montante é 40% maior do que o observado na altura mais afastada a jusante. Provavelmente a causa dessa diferença está no fato das medidas terem sido realizadas próximas da região de entrada do escoamento. A componente axial medida tanto a jusante quanto a montante também apresentou magnitude acima da velocidade média do escoamento. No entanto, as medidas a jusante possuem magnitude ligeiramente menor do que a montante.
- Os resultados mostram que os perfis de velocidades e efeitos de turbulência reduzem a intensidade com o afastamento da grade. Foram observadas de maneira semi-quantitativas as mudanças de direção desses perfis de velocidades o que evidencia os fenômenos de mistura cruzada e por rotação no escoamento. Esses efeitos de misturas também apresentaram amortecimento com o afastamento a jusante de ambas as grades. O escoamento após as grades aletada e de canais mostra características distintas. Sendo que na altura mais próxima da grade aletada foi possível notar vórtices secundários no interior dos subcanais, porém esses se dissiparam ao se afastar da grade. Percebeu-se que nas posições mais afastadas da grade aletada, os movimentos cruzados foram predominantes. No entanto os movimentos cruzados observados na grade de canais foi predominante para todas as alturas avaliadas.

A metodologia desenvolvida nos experimentos realizados nas grades comerciais foi aplicada no protótipo de grade espaçadora fabricada por impressão $3D$, cujo principal objetivo foi o de verificar a viabilidade do uso dessa técnica de prototipagem no desenvolvimento tecnológico de grades espaçadoras. A estrutura da ST2 foi utilizada para realização dos testes para a grade impressa. Então foram realizadas comparações dos fenômenos de turbulência, perdas de pressão em função do número de Re e também o padrão de mistura e sua extensão em função de características geométricas e comparada com as outras duas grades espaçadoras comerciais. Para todos os parâmetros avaliados foram

descritas e quantificadas as fontes de incertezas dos resultados experimentais. As principais conclusões obtidas dessas comparações foram:

- A partir dos resultados obtidos para esse protótipo comprovou-se que é viável a utilização do uso de prototipagem no desenvolvimento de novos elementos combustíveis nucleares. Pois as características de fabricação da grade corresponderam às expectativas, provocando um efeito desejável no escoamento a jusante da grade impressa.
- Foram realizadas comparações dos fenômenos de turbulência, perda de pressão e efeitos de misturas (cruzada e por rotação) em função das características geométricas dessas três grades testadas. Percebeu-se que a magnitude da velocidade resultante obtida no plano para a grade aletada foi maior do que para a grade impressa. No entanto o coeficiente de perda de pressão médio (\overline{K}) da grade impressa foi superior ao das grades comerciais devido à rugosidade relativa do material.
- Além do coeficiente de perda de pressão médio (\overline{K}), a energia cinética de turbulência (k), o desvio quadrático médio (u_{rms} e v_{rms}) e a Intensidade de turbulência (I) da grade impressa também apresentaram valores superiores aos obtidos para as grades comerciais. Porém, para as medidas realizadas na altura mais distante das grades, essas grandezas tenderam a um valor em comum.
- Portanto sob o ponto de vista termo-hidráulico, a grade espaçadora comercial aletada é superior à grade comercial de canais e também com relação à grade impressa avaliada.
- Por fim, foi gerado um banco de dados experimental que poderá ser utilizado nos procedimentos de verificação e validação de simulações numéricas realizadas com os códigos de *CFD*, como por exemplo o *Ansys CFX* ou códigos abertos como por exemplo o *OpenFOAM*. Também podem ser utilizados em códigos de subcanais, como o Pantera (VELOSO, 1985) ou COBRA-IV (WHEELER et al., 1976). A sua utilização será possível, pois os resultados experimentais apresentaram uma boa concordância experimental entre si.

5.1 Trabalhos futuros

Nessa seção, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros conforme apresentado na lista a seguir:

1. Fabricar uma grade impressa cujo material escolhido seja tão liso ou delgado quanto aos materiais das grades comerciais avaliadas, para que seja possível realizar uma

comparação mais apropriada em relação aos efeitos de perda de pressão apresentados na seção 4.9. A técnica de molde para fabricação de grade utilizando impressora 3D apresentado na seção 3.1.3 se mostrou uma opção promissora.

2. Realizar uma verificação e validação numérica através de simulações de *CFD* tendo como base os resultados obtidos da grade impressa.
3. Utilizar esses dados para alimentar códigos de subcanais.
4. Fabricar um protótipo de grade de aletas.
5. Avaliar os efeitos sob o ponto de vista neutrônico da grade impressa avaliada e estabelecer uma comparação com os resultados apresentados nesse trabalho. Esse procedimento pode ser realizado utilizando a metodologia de acoplamento entre cálculos neutrônicos e termohidráulicos desenvolvidos na tese de [Silva \(2016\)](#).
6. Realizar experimentos com varetas e grades pintadas para reduzir ruídos no sinal de aquisição do *LDV* e também verificar se esse é de fato o fator responsável pelo registro de maior incerteza nas proximidades da grade.
7. Realizar experimentos com múltiplos *Re* para as grades comercial de canais e impressa.

Referências

- 5167-1, I. Iso 5167-1. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. *ISO, Geneva, Switzerland*, 1991. Citado na página 56.
- ANSYS, C. *19.2"ANSYS CFX 19.2 Documentation*. [S.l.]: ANSYS, 2019. Citado na página 29.
- BIEDER, U.; COSTA, D. Analysis of the iaea benchmark on heat transfer in a 4×4 rod bundle with mixing grid. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 115, p. 352–366, 2018. Citado na página 41.
- CAPONE, L.; BENHAMADOUCHE, S.; HASSAN, Y. A. Source terms modeling for spacer grids with mixing vanes for cfd simulations in nuclear reactors. *Computers & Fluids*, Elsevier, v. 126, p. 141–152, 2016. Citado na página 43.
- CARAGHIAUR, D.; ANGLART, H.; FRID, W. Experimental investigation of turbulent flow through spacer grids in fuel rod bundles. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 239, n. 10, p. 2013–2021, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 35, 37, 38 e 43.
- CASTRO, H. F. P. de. *Investigação experimental do escoamento de água após grade espaçadora de elemento combustível para reatores nucleares do tipo PWR*. Dissertação (Mestrado) — Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2016. Citado 8 vezes nas páginas 38, 44, 47, 63, 66, 133, 135 e 172.
- CHANG, S.-K.; KIM, S.; SONG, C.-H. Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids: Oecd/nea-kaeri cfd benchmark exercise test. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 279, p. 19–36, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 31, 40, 62, 78, 83 e 103.
- CHEN, D. et al. Thermal–hydraulic performance of a 5×5 rod bundle with spacer grid in a nuclear reactor. *Applied thermal engineering*, Elsevier, v. 103, p. 1416–1426, 2016. Citado na página 43.
- CHEN, X. et al. Validation of cfd analysis for rod bundle flow test with vaned spacer grids. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 109, p. 370–379, 2017. Citado na página 43.
- CHENG, S.; CHEN, H.; ZHANG, X. Cfd analysis of flow field in a 5×5 rod bundle with multi-grid. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 99, p. 464–470, 2017. Citado na página 43.
- CHUN, T.-H.; OH, D.-S. A pressure drop model for spacer grids with and without flow mixing vanes. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Taylor & Francis, v. 35, n. 7, p. 508–510, 1998. Citado na página 56.
- CHUNG, M. K. Turbulent flow through spacer grids in rod bundles. *Journal of Fluids Engineering*, v. 120, p. 787, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 81.
- CONNER, M.; KAROUTAS, Z.; XU, Y. Westinghouse cfd modeling and results for epr nector cfd round robin exercise of pwr rod bundle testing. In: *16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), Chicago, Illinois, US*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 39.

- CONNER, M. E. et al. Hydraulic benchmark data for pwr mixing vane grid. 2011. Citado na página 62.
- DANTEC, D. *BSA Flow Software Version 4.10 Installation & User's Guide*. [S.l.]: Dantec Dynamics A/S., Skovlunde, Denmark, 2006. Citado na página 58.
- DOMINGUEZ-ONTIVEROS, E.; ESTRADA-PEREZ, C.; HASSAN, Y. Experimental turbulence analysis of fuel bundle with spacer grids. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *18th International Conference on Nuclear Engineering*. [S.l.], 2010. p. 913–922. Citado na página 38.
- DOMINGUEZ-ONTIVEROS, E. E.; HASSAN, Y. A. Non-intrusive experimental investigation of flow behavior inside a 5×5 rod bundle with spacer grids using piv and mir. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 239, n. 5, p. 888–898, 2009. Citado na página 38.
- ELETRONUCLEAR. 2020. Nossas Atividades - Angra 1 e Angra 2. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 04 de Agosto de 2020. Citado na página 34.
- FOX, R. W. et al. *Introdução à mecânica dos fluidos*. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2013. ISBN 9788521617570. Citado na página 82.
- GJORESKI, H.; GAMS, M. Activity/posture recognition using wearable sensors placed on different body locations. *Proceedings of (738) Signal and Image Processing and Applications, Crete, Greece*, v. 2224, p. 716724, 2011. Citado na página 87.
- GUM, I. Guide to the expression of uncertainty in measurement, (1995), with supplement 1, evaluation of measurement data, jcgM 101: 2008. *Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 85, 86 e 90.
- HAN, B.; YANG, B.-W.; ZHA, Y. Numerical study on the effect of grid mixing span in 2×1 spacer grid. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 339, p. 11–20, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 43.
- HARVEY, A. H.; GALLAGHER, J. S.; SENEGERS, J. L. Revised formulation for the refractive index of water and steam as a function of wavelength, temperature and density. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, American Institute of Physics for the National Institute of Standards and . . . , v. 27, n. 4, p. 761–774, 1998. Citado na página 61.
- HOSOKAWA, S. et al. Measurements of turbulent flows in a 2×2 rod bundle. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 249, p. 2–13, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 38, 43 e 83.
- IAEA. *Nuclear Power Reactors in the World*. 2. ed. [S.l.]: International Atomic Energy Agency - Vienna, 2019. Citado na página 28.
- IKEDA, K. Cfd application to advanced design for high efficiency spacer grid. *Nuclear Engineering and Design*, v. 279, p. 73–82, 2014. Citado na página 29.
- IN, W. K.; OH, D. S.; CHUN, T. H. Empirical and computational pressure drop correlations for pressurized water reactor fuel spacer grids. *Nuclear technology*, Taylor & Francis, v. 139, n. 1, p. 72–79, 2002. Citado na página 56.

- IN, W. K.; SHIN, C. H.; LEE, C. Y. Convective heat transfer experiment of rod bundle flow with twist-vane spacer grid. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 295, p. 173–181, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 41.
- IN, W. K. et al. Experimental observation and cfd prediction of flow mixing in a rod bundle with mixing-vane spacer grid. In: *10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Naples, Italy*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 15–18. Citado 3 vezes nas páginas 40, 43 e 62.
- ISO, I.; OIML, B. Guide to the expression of uncertainty in measurement. *Geneva, Switzerland*, 1995. Citado na página 44.
- ITTC. Uncertainty analysis: Laser doppler velocimetry calibration. *ITTC–Recommended Procedures and Guidelines*, p. 14, 2008. Citado na página 86.
- KAROUTAS, Z.; GU, Z.; SHOLIN, B. 3-d flow analyses for design of nuclear fuel spacer. In: *Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics NURETH-7*, New York, v. 1, p. 3153–3174, 1995. Citado na página 41.
- KONČAR, B.; KOŠMRLJ, S. Simulation of turbulent flow in matis-h rod bundle with split-type mixing vanes. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 327, p. 112–126, 2018. Citado na página 43.
- KUMARA, W. et al. Comparison of particle image velocimetry and laser doppler anemometry measurement methods applied to the oil–water flow in horizontal pipe. *Flow measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 105–117, 2010. Citado na página 42.
- LAMARSH, J. R.; BARATTA, A. J. *Introduction to nuclear engineering*. [S.l.]: Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2001. v. 3. Citado na página 34.
- LEMO, N. A. *Mecânica analítica*. [S.l.]: editora livraria da física, 2007. Citado na página 87.
- LI, X. et al. Experimental investigation of fluid mixing inside a rod bundle using laser induced fluorescence. *Progress in Nuclear Energy*, Elsevier, v. 110, p. 90–102, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 43.
- MAO, H. et al. Modeling of spacer grid mixing effects through mixing vane crossflow model in subchannel analysis. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 320, p. 141–152, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 43.
- NAGAYOSHI, T.; NISHIDA, K. Spacer effect model for subchannel analysis: Turbulence intensity enhancement due to spacer. *Journal of nuclear science and technology*, Taylor & Francis, v. 35, n. 6, p. 399–405, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 43.
- NAVARRO, M. Procedimento para calibração dos transmissores de pressão do circuito água-ar (caa). *Nota interna CNEN/CDTN*, 2011. Citado na página 56.
- NAVARRO, M. Procedimento para calibração das linhas de medição de temperatura do circuito água-ar (caa). *Nota interna CNEN/CDTN*, 2012. Citado na página 57.
- NAVARRO, M. A.; SANTOS, A. A. Numerical evaluation of flow through a 5x5 pwr rod bundle: effect of the vane arrangement in a spacer grid. In: *International Nuclear Atlantic Conference, Rio de Janeiro, Brazil*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 41.

NAVARRO, M. A.; SANTOS, A. A. Evaluation of a numeric procedure for flow simulation of a 5×5 pwr rod bundle with a mixing vane spacer. *Progress in Nuclear Energy*, Elsevier, v. 53, n. 8, p. 1190–1196, 2011. Citado na página 35.

NGUYEN, T. et al. Stereoscopic piv measurements of near-wall flow in a tightly packed rod bundle with wire spacers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 92, p. 420–435, 2018. Citado na página 62.

NGUYEN, T.; HASSAN, Y. Stereoscopic particle image velocimetry measurements of flow in a rod bundle with a spacer grid and mixing vanes at a low reynolds number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 67, p. 202–219, 09 2017. Citado na página 36.

POWELL, C. et al. Piv/ptv measurements of lateral velocity components in a 5×5 pwr bundle with mixing vanes. *Transactions*, American Nuclear Society, v. 119, n. 1, p. 979–982, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 43.

QU, W. et al. High-fidelity piv measurement of cross flow in 5×5 rod bundle with mixing vane grids. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 344, p. 131–143, 2019. Citado na página 43.

QU, W. et al. Piv measurement of turbulent flow downstream of mixing vane spacer grid in 5×5 rod bundle. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 132, p. 277–287, 2019. Citado na página 43.

ROWE, D.; JOHNSON, B.; KNUDSEN, J. Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 407–419, 1974. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 43.

SANTOS, A. A. C. dos. *Investigação numérica e experimental do escoamento de água em feixe de varetas representativo de elementos combustíveis nucleares de reatores do tipo PWR*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Citado 9 vezes nas páginas 32, 33, 37, 47, 50, 56, 60, 82 e 172.

SANTOS, A. A. C. dos et al. Convergence study and uncertainty quantification of average and statistical piv measurements in a matched refractive index 5×5 rod bundle with mixing vane spacer grid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 102, p. 215–231, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 41, 43 e 91.

SILVA, V. V. A. *Acoplamento neutrônico e termo-hidráulico usando os códigos milonga e OpenFOAM: uma abordagem com software livre*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Citado na página 175.

TODREAS, N. E.; KAZIMI, M. S. *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. [S.l.]: CRC press, 2011. Citado na página 29.

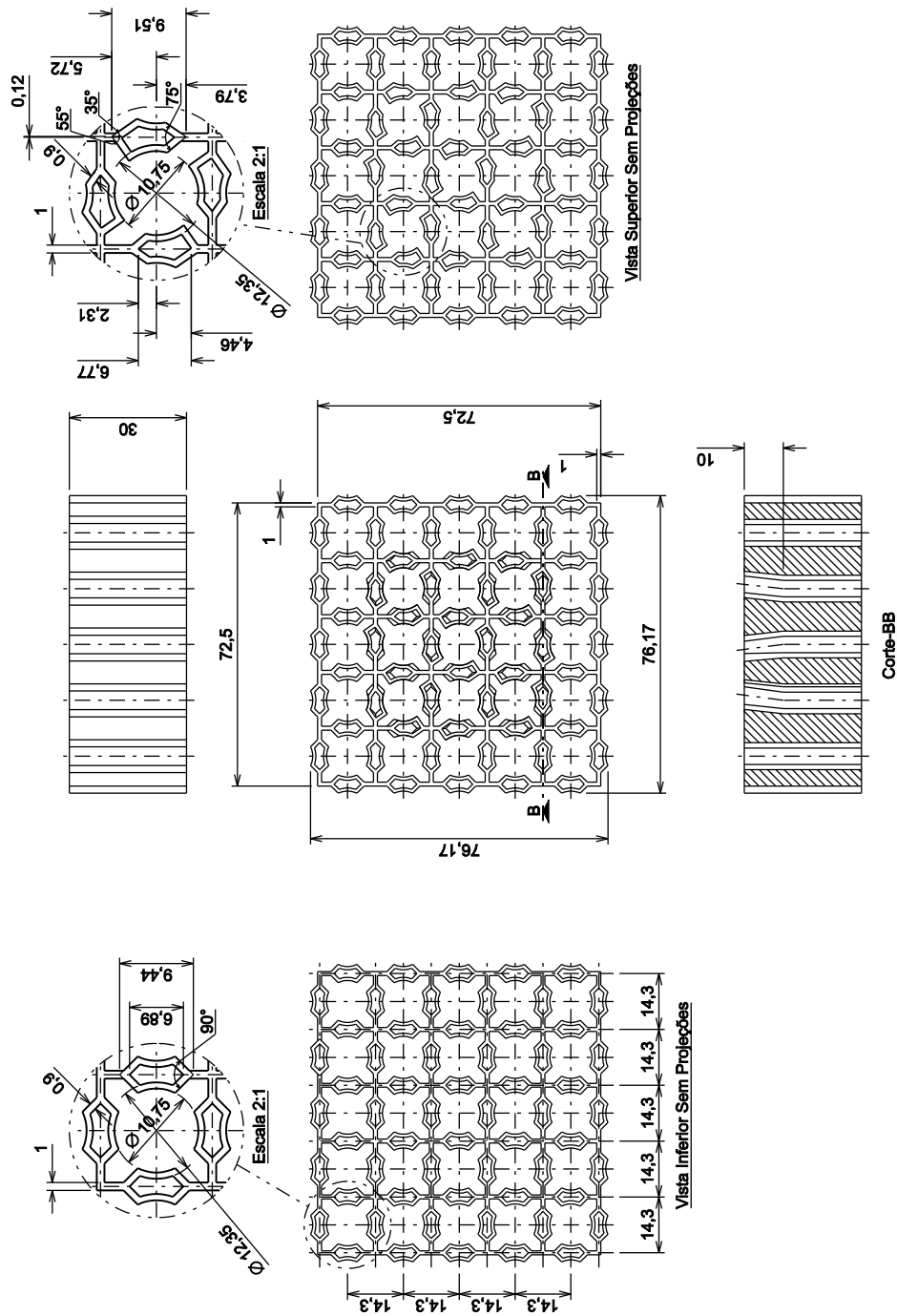
TONG, L.; WEISMAN, J. *Thermal analysis of pressurized water reactors (3er ed.)*-american nuclear society. 1996. Citado na página 29.

- VELOSO, M. Pantera-1p: Programa para análise termo-hidráulica do núcleo de reatores a água. *NT DETR. PD-201/85, NUCLEBRÁS/CDTN, Belo Horizonte*, 1985. Citado na página 174.
- WAITE, B. M.; PRASSER, H.-M.; PODOWSKI, M. Z. Computational and experimental analysis of gas/liquid two-phase flow in rod bundles with mixing-vane spacer grids. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 360, p. 110499, 2020. Citado na página 41.
- WANG, Y. et al. Cfd simulation of flow and heat transfer characteristics in a 5×5 fuel rod bundles with spacer grids of advanced pwr. *Nuclear Engineering and Technology*, Elsevier, 2020. Citado na página 43.
- WEICHSELBAUM, N. A. et al. Surrogate spacer grid design for fluid–structure interactions studies in fuel bundles. In: *16th international topical meeting on nuclear reactor thermal hydraulics, Chicago, IL*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 36.
- WHEELER, C. et al. *COBRA-IV-I: An interim version of COBRA for thermal-hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements and cores*. [S.l.], 1976. Citado na página 174.
- XIONG, J. et al. Piv measurement of cross flow in a rod bundle assisted by telecentric optics and matched index of refraction. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 120, p. 540–545, 2018. Citado na página 43.
- XIONG, J. et al. Laser doppler measurement and cfd validation in 3×3 bundle flow. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 270, p. 396–403, 2014. Citado na página 43.
- YLÖNEN, A. T. *High-resolution flow structure measurements in a rod bundle*. Tese (Doutorado) — ETH Zurich, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 31, 40, 41, 43 e 52.
- ZHANG, Z. *LDA application methods: laser Doppler anemometry for fluid dynamics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

Anexos

ANEXO A – Projetos da Grade Impressa.

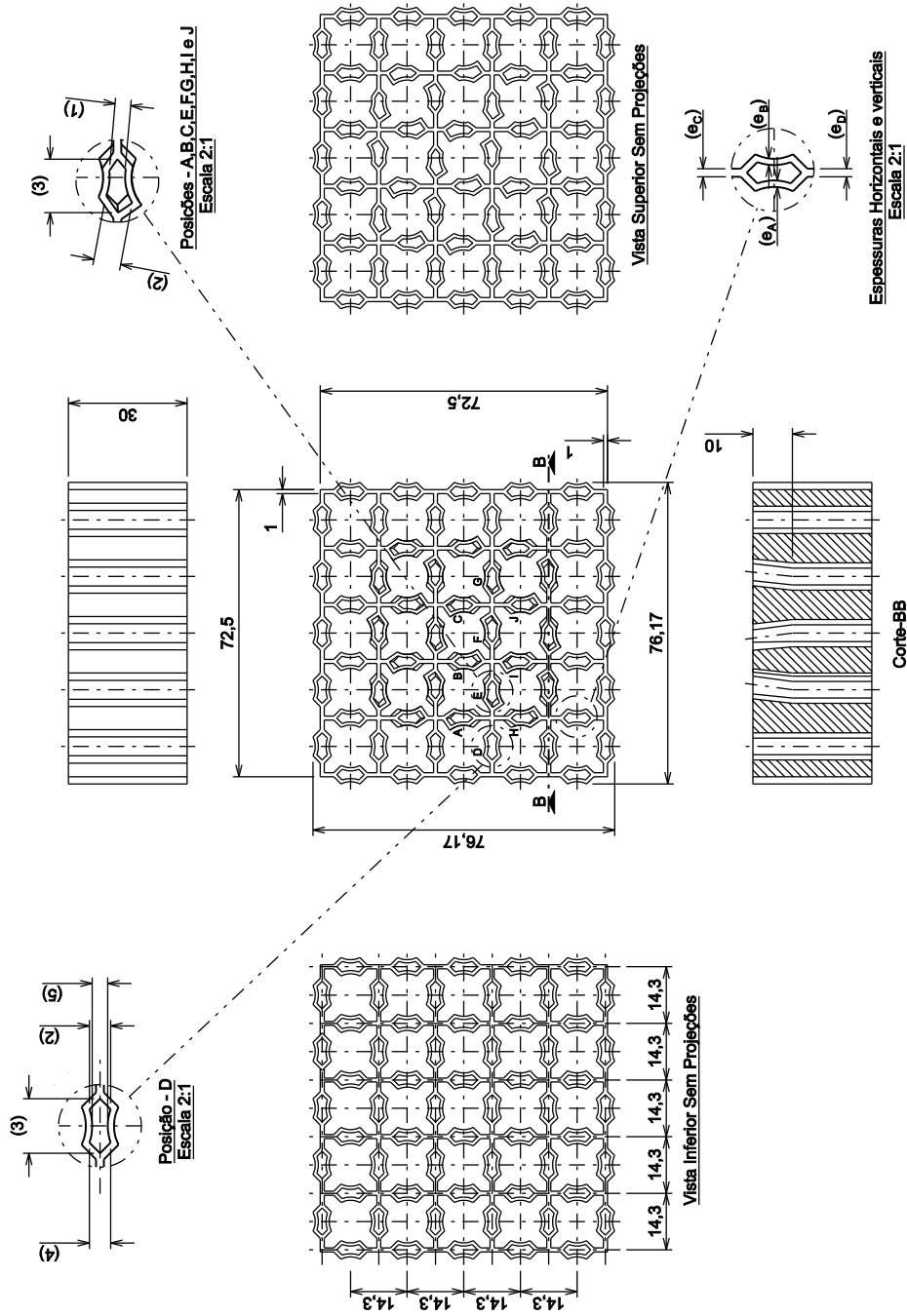
Figura A.1 – Desenho da grade impressa utilizado antes da fabricação.



Fonte: Elaborado por Edson Ribeiro ¹.

¹ Técnico e projetista no CDTN/CNEN.

Figura A.2 – Desenho da grade impressa contendo detalhes da região de medição após fabricação.



Fonte: Elaborado por Edson Ribeiro ².

² Técnico e projetista no CDTN/CNEN.

ANEXO B – Resultados dos perfis de velocidades normalizados $u/\langle\bar{w}\rangle$, $v/\langle\bar{w}\rangle$ e suas respectivas incertezas expandidas normalizadas $U_{(u/\langle\bar{w}\rangle)}$ e $U_{(v/\langle\bar{w}\rangle)}$ pra três alturas a jusante da Grade Impressa.

Tabela B.1 – Resultados para a altura de $z = 1,22Dh$ a jusante da grade impressa apresentados na Fig. 4.44.

	$p = 14,3mm$	$\langle\bar{w}\rangle = 1,96m/s$	$Dh = 12,28mm$	
x/p	$u/\langle\bar{w}\rangle(z = 1,22Dh)$	$v/\langle\bar{w}\rangle(z = 1,22Dh)$	$U_{(u/\langle\bar{w}\rangle)}$	$U_{(v/\langle\bar{w}\rangle)}$
0,0000	-0,0528	0,0084	0,0140	0,0127
0,0280	-0,0573	-0,0003	0,0194	0,0138
0,0559	-0,0395	0,0017	0,0126	0,0138
0,0839	-0,0312	-0,0033	0,0133	0,0168
0,1119	-0,0314	0,0015	0,0136	0,0197
0,1399	-0,0253	-0,0150	0,0160	0,0193
0,1678	-0,0172	-0,0183	0,0134	0,0209
0,1958	-0,0121	-0,0275	0,0130	0,0233
0,2238	-0,0149	-0,0299	0,0132	0,0124
0,2517	-0,0151	-0,0149	0,0146	0,0122
0,2797	-0,0193	-0,0260	0,0149	0,0141
0,3077	-0,0130	-0,0276	0,0191	0,0148
0,3357	-0,0116	-0,0362	0,0137	0,0133
0,3636	-0,0229	-0,0238	0,0132	0,0239
0,3916	-0,0076	-0,0337	0,0207	0,0170
0,4196	-0,0012	-0,0241	0,0242	0,0235
0,4476	-0,0042	-0,0244	0,0142	0,0192
0,4755	0,0334	-0,0026	0,0166	0,0173
0,5035	0,0326	-0,0078	0,0298	0,0160
0,5315	0,0642	-0,0036	0,0153	0,0128
0,5594	0,0857	-0,0262	0,0129	0,0173
0,5874	0,1048	-0,0245	0,0247	0,0105

Continua na página seguinte

Tabela B.1 – continuação da página anterior

0,6154	0,1094	-0,0456	0,0161	0,0110
0,6434	0,1311	-0,0445	0,0237	0,0111
0,6713	0,1335	-0,0516	0,0293	0,0110
0,6993	0,1607	-0,0616	0,0242	0,0133
0,7273	0,1637	-0,0470	0,0194	0,0146
0,7552	0,1746	-0,0485	0,0161	0,0121
0,7832	0,1922	-0,0459	0,0159	0,0098
0,8112	0,1986	-0,0290	0,0133	0,0112
0,8392	0,2159	-0,0246	0,0140	0,0123
0,8671	0,2368	-0,0017	0,0182	0,0092
0,8951	0,2468	0,0030	0,0193	0,0207
0,9231	0,2707	0,0109	0,0186	0,0134
0,9510	0,2916	0,0055	0,0235	0,0192
0,9790	0,3015	0,0132	0,0225	0,0176
1,0070	0,2994	0,0057	0,0271	0,0133
1,0350	0,2849	-0,0065	0,0269	0,0142
1,0629	0,2972	-0,0098	0,0210	0,0258
1,0909	0,2720	-0,0097	0,0402	0,0090
1,1189	0,2481	0,0150	0,0295	0,0181
1,1469	0,2378	0,0077	0,0153	0,0299
1,1748	0,2240	0,0011	0,0207	0,0189
1,2028	0,1900	0,0015	0,0250	0,0146
1,2308	0,1822	0,0183	0,0150	0,0190
1,2587	0,1583	0,0176	0,0139	0,0334
1,2867	0,1451	-0,0077	0,0165	0,0209
1,3147	0,1014	0,0262	0,0163	0,0234
1,3427	0,1003	0,0184	0,0150	0,0128
1,3706	0,0840	0,0359	0,0176	0,0216
1,3986	0,0596	0,0138	0,0259	0,0118
1,4266	0,0410	-0,0004	0,0135	0,0323
1,4545	0,0447	0,0150	0,0178	0,0118
1,4825	0,0283	0,0037	0,0166	0,0135
1,5105	0,0106	-0,0270	0,0188	0,0219
1,5385	0,0109	-0,0337	0,0158	0,0225
1,5664	0,0026	-0,0513	0,0190	0,0157
1,5944	-0,0297	-0,0682	0,0221	0,0306
1,6224	-0,0489	-0,0539	0,0196	0,0300

Continua na página seguinte

Tabela B.1 – continuação da página anterior

1,6503	-0,0463	-0,0614	0,0212	0,0287
1,6783	-0,0687	-0,0593	0,0346	0,0308
1,7063	-0,0790	-0,0789	0,0173	0,0153
1,7343	-0,0661	-0,0649	0,0207	0,0370
1,7622	-0,0623	-0,0488	0,0176	0,0264
1,7902	-0,0927	-0,0512	0,0305	0,0233
1,8182	-0,1195	-0,0770	0,0493	0,0313
1,8462	-0,1060	-0,0506	0,0161	0,0270
1,8741	-0,0968	-0,0466	0,0430	0,0179
1,9021	-0,0828	-0,0280	0,0408	0,0231
1,9301	-0,1184	-0,0290	0,0242	0,0158
1,9580	-0,1327	-0,0112	0,0309	0,0531
1,9860	-0,1374	0,0039	0,0216	0,0396
2,0140	-0,1286	0,0102	0,0153	0,0207

Tabela B.2 – Resultados para a altura de $z = 2,44Dh$ a jusante da grade impressa apresentados na Fig. 4.44.

	$p = 14,3mm$	$\langle\bar{w}\rangle = 1,96m/s$	$Dh = 12,28mm$	
x/p	$u/\langle\bar{w}\rangle(z = 2,44Dh)$	$v/\langle\bar{w}\rangle(z = 2,44Dh)$	$U_{(u/\langle\bar{w}\rangle)}$	$U_{(v/\langle\bar{w}\rangle)}$
0,0000	-0,0454	0,0097	0,0281	0,0241
0,0280	-0,0330	0,0032	0,0193	0,0152
0,0559	-0,0408	-0,0043	0,0305	0,0194
0,0839	-0,0398	0,0093	0,0150	0,0157
0,1119	-0,0397	0,0084	0,0326	0,0219
0,1399	-0,0401	-0,0016	0,0176	0,0201
0,1678	-0,0081	-0,0167	0,0234	0,0140
0,1958	-0,0079	-0,0212	0,0261	0,0186
0,2238	-0,0004	-0,0063	0,0285	0,0177
0,2517	-0,0046	-0,0209	0,0331	0,0272
0,2797	-0,0101	-0,0112	0,0245	0,0135
0,3077	-0,0009	0,0031	0,0320	0,0203
0,3357	0,0127	-0,0256	0,0272	0,0485
0,3636	0,0005	-0,0150	0,0232	0,0193
0,3916	0,0188	0,0083	0,0136	0,0226
0,4196	0,0053	-0,0163	0,0249	0,0187
0,4476	-0,0004	-0,0086	0,0322	0,0303
0,4755	0,0420	-0,0109	0,0292	0,0212

Continua na página seguinte

Tabela B.2 – continuação da página anterior

0,5035	0,0598	-0,0183	0,0168	0,0150
0,5315	0,1041	-0,0229	0,0317	0,0197
0,5594	0,0977	-0,0203	0,0321	0,0204
0,5874	0,1429	-0,0062	0,0499	0,0115
0,6154	0,1457	-0,0234	0,0440	0,0220
0,6434	0,1489	-0,0088	0,0144	0,0224
0,6713	0,1651	-0,0126	0,0324	0,0294
0,6993	0,1748	-0,0379	0,0243	0,0258
0,7273	0,2125	-0,0216	0,0214	0,0208
0,7552	0,2363	0,0010	0,0296	0,0207
0,7832	0,2424	-0,0106	0,0246	0,0144
0,8112	0,2212	0,0019	0,0298	0,0136
0,8392	0,2532	-0,0167	0,0187	0,0138
0,8671	0,2494	-0,0277	0,0179	0,0206
0,8951	0,2324	0,0094	0,0161	0,0133
0,9231	0,2474	0,0125	0,0157	0,0204
0,9510	0,2288	-0,0083	0,0206	0,0198
0,9790	0,2327	-0,0114	0,0146	0,0221
1,0070	0,2340	0,0202	0,0191	0,0301
1,0350	0,2241	-0,0224	0,0244	0,0224
1,0629	0,2175	-0,0228	0,0172	0,0234
1,0909	0,1813	-0,0046	0,0222	0,0178
1,1189	0,1965	-0,0199	0,0173	0,0131
1,1469	0,2125	-0,0057	0,0209	0,0188
1,1748	0,1870	-0,0047	0,0327	0,0109
1,2028	0,1809	-0,0182	0,0313	0,0266
1,2308	0,1686	0,0034	0,0398	0,0157
1,2587	0,1237	0,0006	0,0302	0,0202
1,2867	0,1297	0,0282	0,0143	0,0219
1,3147	0,0935	0,0052	0,0421	0,0246
1,3427	0,0984	0,0181	0,0157	0,0115
1,3706	0,0862	0,0092	0,0146	0,0368
1,3986	0,0769	0,0121	0,0178	0,0197
1,4266	0,0639	-0,0278	0,0260	0,0311
1,4545	0,0285	0,0332	0,0147	0,0481
1,4825	0,0265	-0,0122	0,0229	0,0171
1,5105	0,0442	0,0016	0,0327	0,0162

Continua na página seguinte

Tabela B.2 – continuação da página anterior

1,5385	0,0007	-0,0454	0,0304	0,0232
1,5664	-0,0166	-0,0366	0,0155	0,0375
1,5944	-0,0099	-0,0341	0,0194	0,0224
1,6224	-0,0599	-0,0198	0,0164	0,0370
1,6503	-0,0637	-0,0408	0,0326	0,0306
1,6783	-0,0672	-0,0572	0,0182	0,0215
1,7063	-0,0622	-0,0253	0,0235	0,0244
1,7343	-0,0854	-0,0234	0,0223	0,0257
1,7622	-0,0795	-0,0144	0,0637	0,0518
1,7902	-0,0770	-0,0188	0,0570	0,0586
1,8182	-0,0898	-0,0131	0,0356	0,0583
1,8462	-0,0924	-0,0250	0,0339	0,0204
1,8741	-0,0741	-0,0353	0,0225	0,0181
1,9021	-0,1118	-0,0324	0,0191	0,0224
1,9301	-0,1234	-0,0177	0,0191	0,0291
1,9580	-0,0956	-0,0249	0,0139	0,0249
1,9860	-0,1034	-0,0263	0,0179	0,0153
2,0140	-0,1291	-0,0153	0,0235	0,0171

Tabela B.3 – Resultados para a altura de $z = 7,33Dh$ a jusante da grade impressa apresentados na Fig. 4.44.

	$p = 14,3mm$	$\langle\bar{w}\rangle = 1,96m/s$	$Dh = 12,28mm$	
x/p	$u/\langle\bar{w}\rangle(z = 7,33Dh)$	$v/\langle\bar{w}\rangle(z = 7,33Dh)$	$U_{(u/\langle\bar{w}\rangle)}$	$U_{(v/\langle\bar{w}\rangle)}$
0,0000	-0,0206	0,0077	0,0134	0,0123
0,0280	-0,0220	0,0055	0,0127	0,0138
0,0559	-0,0138	0,0007	0,0126	0,0131
0,0839	-0,0210	0,0006	0,0129	0,0132
0,1119	-0,0152	-0,0037	0,0127	0,0120
0,1399	-0,0103	-0,0017	0,0126	0,0126
0,1678	-0,0076	-0,0087	0,0133	0,0124
0,1958	-0,0015	-0,0050	0,0137	0,0118
0,2238	0,0013	-0,0019	0,0148	0,0125
0,2517	0,0087	0,0001	0,0147	0,0117
0,2797	0,0165	0,0044	0,0155	0,0120
0,3077	0,0251	0,0029	0,0134	0,0117
0,3357	0,0374	0,0010	0,0142	0,0117
0,3636	0,0505	-0,0011	0,0132	0,0117

Continua na página seguinte

Tabela B.3 – continuação da página anterior

0,3916	0,0530	-0,0040	0,0154	0,0113
0,4196	0,0680	-0,0061	0,0136	0,0112
0,4476	0,0685	-0,0075	0,0136	0,0115
0,4755	0,0760	-0,0113	0,0164	0,0110
0,5035	0,0842	-0,0120	0,0135	0,0114
0,5315	0,0914	-0,0121	0,0136	0,0109
0,5594	0,0956	-0,0163	0,0139	0,0114
0,5874	0,0942	-0,0152	0,0129	0,0111
0,6154	0,0998	-0,0165	0,0130	0,0107
0,6434	0,1007	-0,0196	0,0136	0,0111
0,6713	0,1067	-0,0268	0,0130	0,0107
0,6993	0,1078	-0,0267	0,0128	0,0111
0,7273	0,1145	-0,0281	0,0134	0,0111
0,7552	0,1133	-0,0268	0,0139	0,0117
0,7832	0,1206	-0,0258	0,0149	0,0109
0,8112	0,1282	-0,0293	0,0132	0,0108
0,8392	0,1363	-0,0243	0,0138	0,0110
0,8671	0,1436	-0,0204	0,0132	0,0107
0,8951	0,1544	-0,0111	0,0133	0,0106
0,9231	0,1651	-0,0056	0,0156	0,0103
0,9510	0,1620	-0,0029	0,0137	0,0105
0,9790	0,1699	0,0002	0,0139	0,0103
1,0070	0,1675	0,0074	0,0127	0,0103
1,0350	0,1684	0,0107	0,0148	0,0101
1,0629	0,1670	0,0151	0,0131	0,0103
1,0909	0,1592	0,0187	0,0131	0,0108
1,1189	0,1599	0,0187	0,0145	0,0125
1,1469	0,1515	0,0261	0,0125	0,0113
1,1748	0,1466	0,0202	0,0123	0,0101
1,2028	0,1356	0,0247	0,0129	0,0101
1,2308	0,1313	0,0275	0,0126	0,0150
1,2587	0,1195	0,0157	0,0125	0,0121
1,2867	0,1111	0,0145	0,0126	0,0122
1,3147	0,1013	0,0089	0,0124	0,0106
1,3427	0,0931	0,0081	0,0126	0,0115
1,3706	0,0799	0,0057	0,0126	0,0116
1,3986	0,0652	-0,0003	0,0135	0,0112

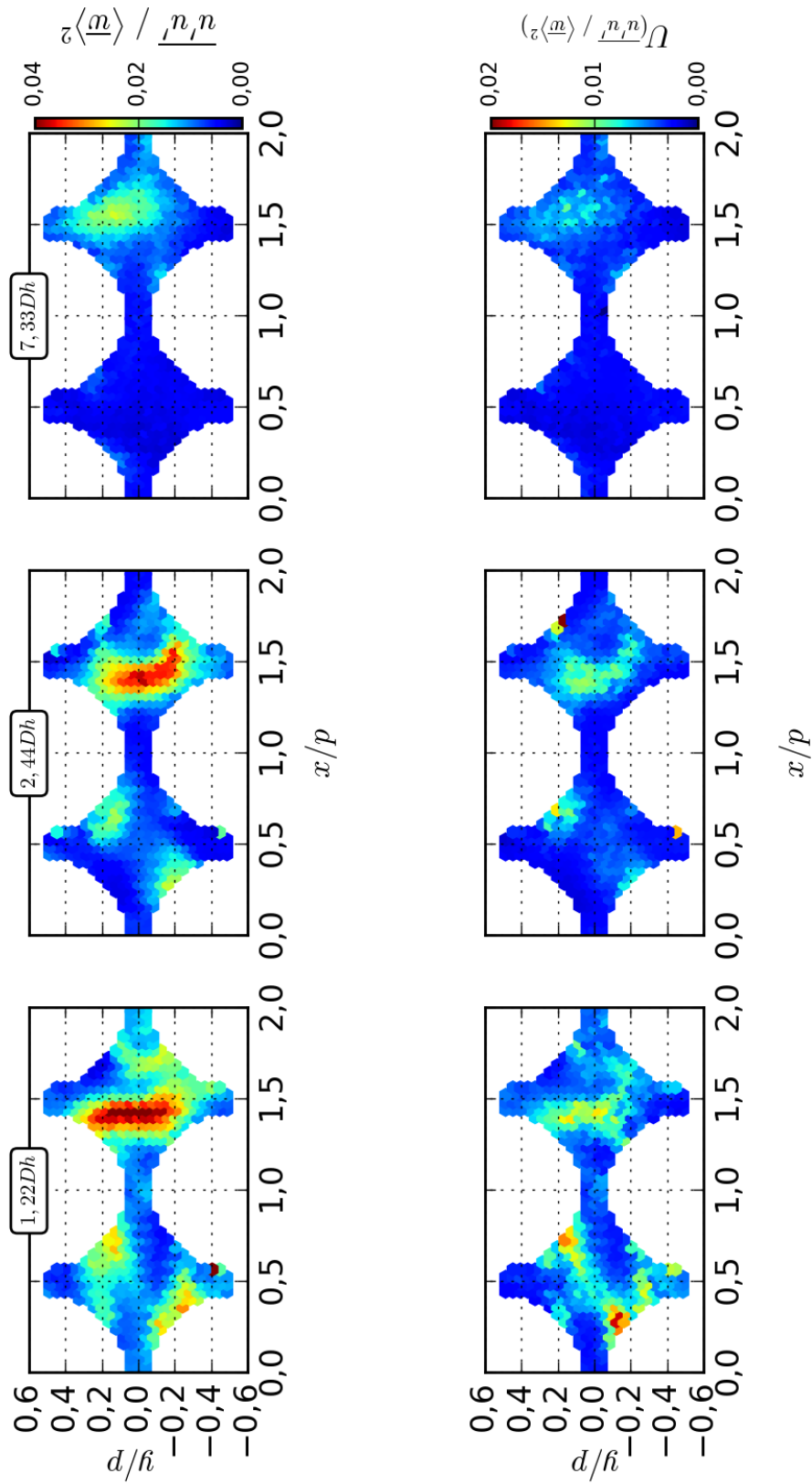
Continua na página seguinte

Tabela B.3 – continuação da página anterior

1,4266	0,0583	-0,0119	0,0135	0,0125
1,4545	0,0474	-0,0168	0,0129	0,0143
1,4825	0,0337	-0,0101	0,0139	0,0144
1,5105	0,0248	-0,0296	0,0146	0,0156
1,5385	0,0119	-0,0382	0,0139	0,0132
1,5664	0,0026	-0,0347	0,0130	0,0128
1,5944	-0,0062	-0,0466	0,0136	0,0149
1,6224	-0,0143	-0,0498	0,0135	0,0139
1,6503	-0,0167	-0,0514	0,0141	0,0132
1,6783	-0,0264	-0,0536	0,0144	0,0143
1,7063	-0,0286	-0,0558	0,0141	0,0131
1,7343	-0,0281	-0,0524	0,0133	0,0144
1,7622	-0,0334	-0,0484	0,0133	0,0126
1,7902	-0,0290	-0,0486	0,0135	0,0126
1,8182	-0,0355	-0,0431	0,0163	0,0136
1,8462	-0,0258	-0,0302	0,0141	0,0125
1,8741	-0,0234	-0,0167	0,0152	0,0129
1,9021	-0,0247	-0,0050	0,0130	0,0124
1,9301	-0,0261	-0,0016	0,0128	0,0138
1,9580	-0,0257	0,0038	0,0125	0,0126
1,9860	-0,0258	0,0119	0,0134	0,0126
2,0140	-0,0213	0,0179	0,0134	0,0129

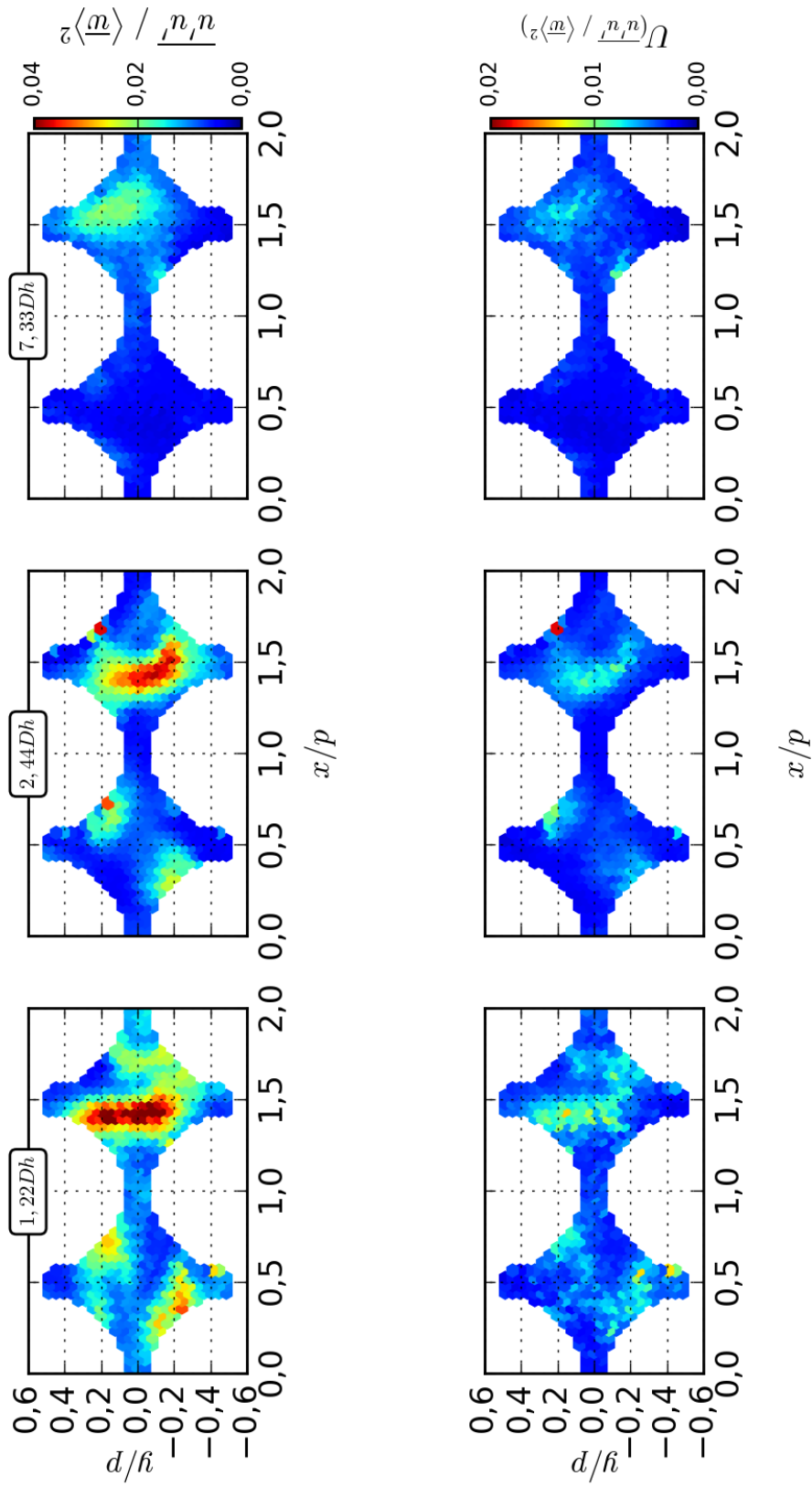
ANEXO C – Campo tensorial referente aos
 $Re = 27x10^3$ e $Re = 36x10^3$ da grade
aletada.

Figura C.1 – Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por $(\langle \bar{w} \rangle^2)$ para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 27 \times 10^3$.



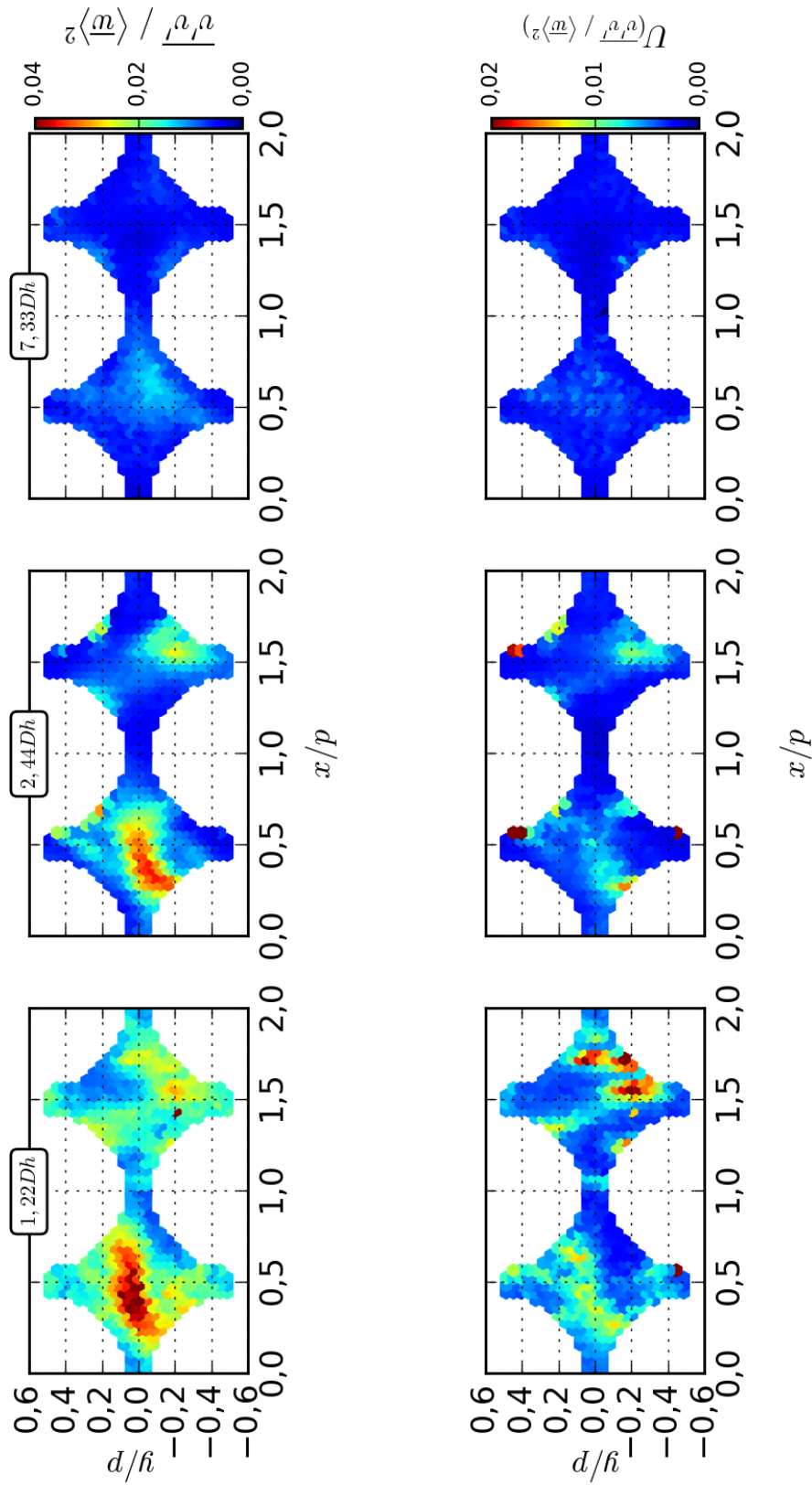
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.2 – Tensor de Reynolds ($u'u'$) normalizado por $(\langle \bar{w} \rangle^2)$ para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 36 \times 10^3$.



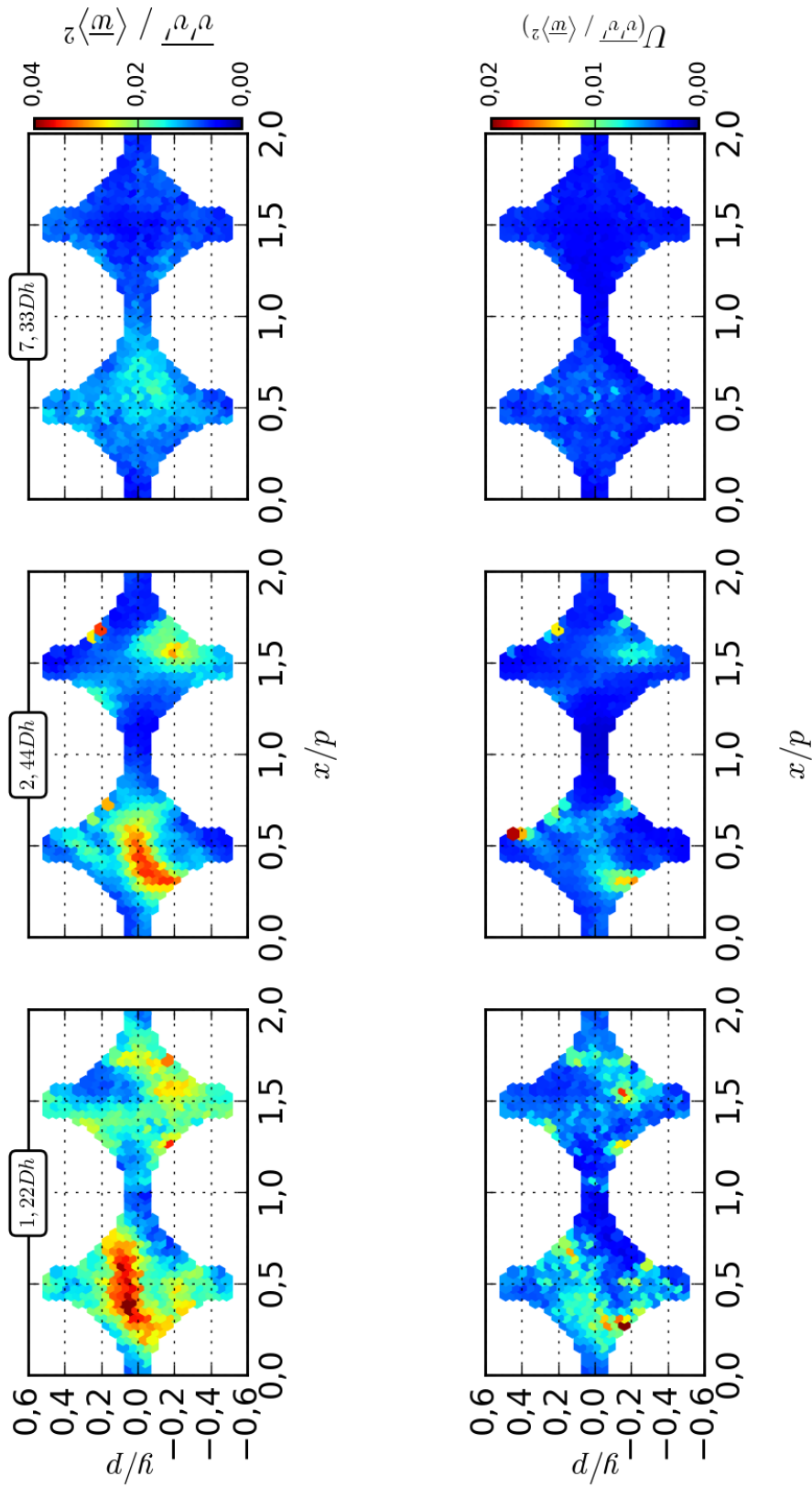
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.3 – Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 27 \times 10^3$.



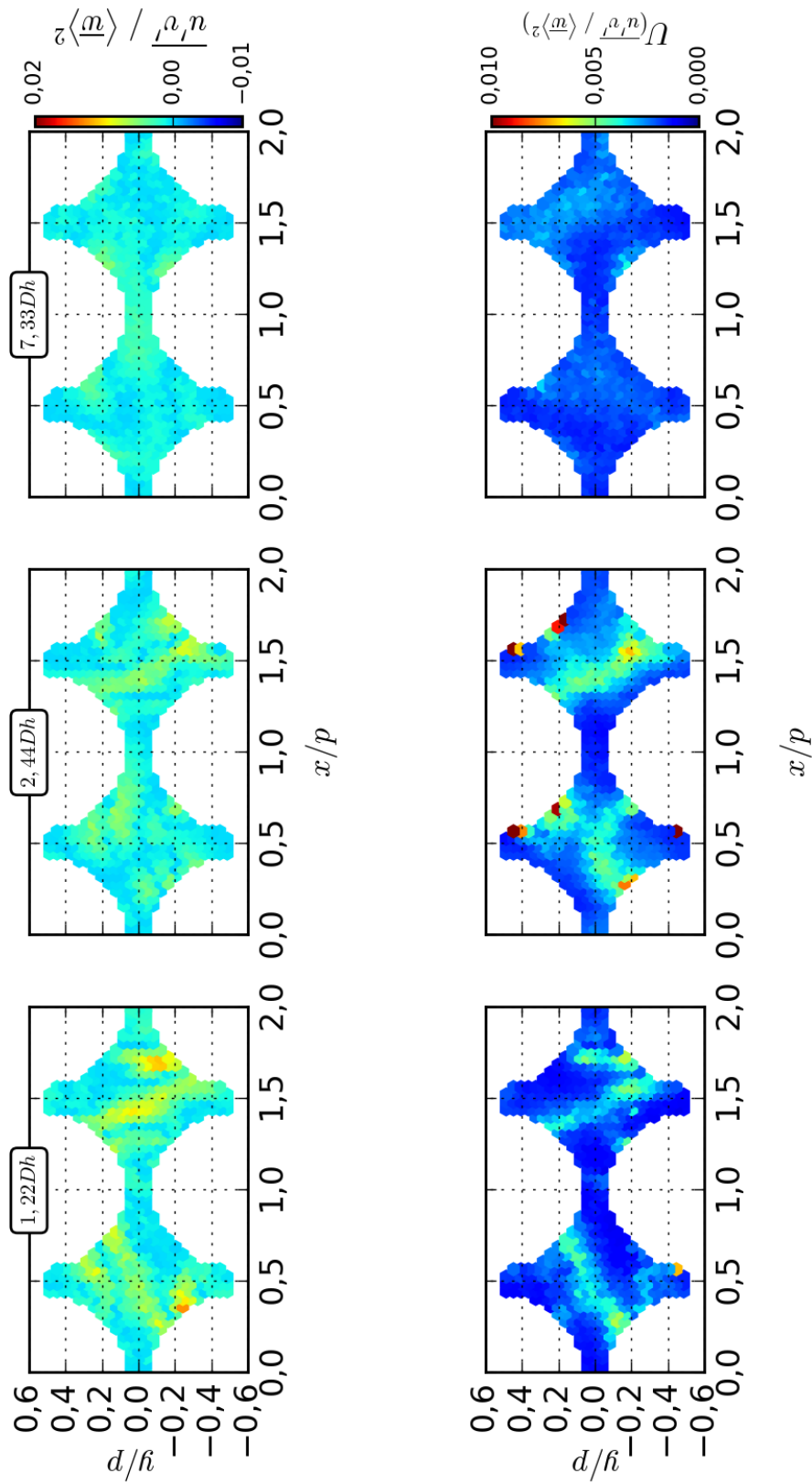
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.4 – Tensor de Reynolds ($v'v'$) normalizado por ($\langle \bar{w} \rangle^2$) para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 36 \times 10^3$.



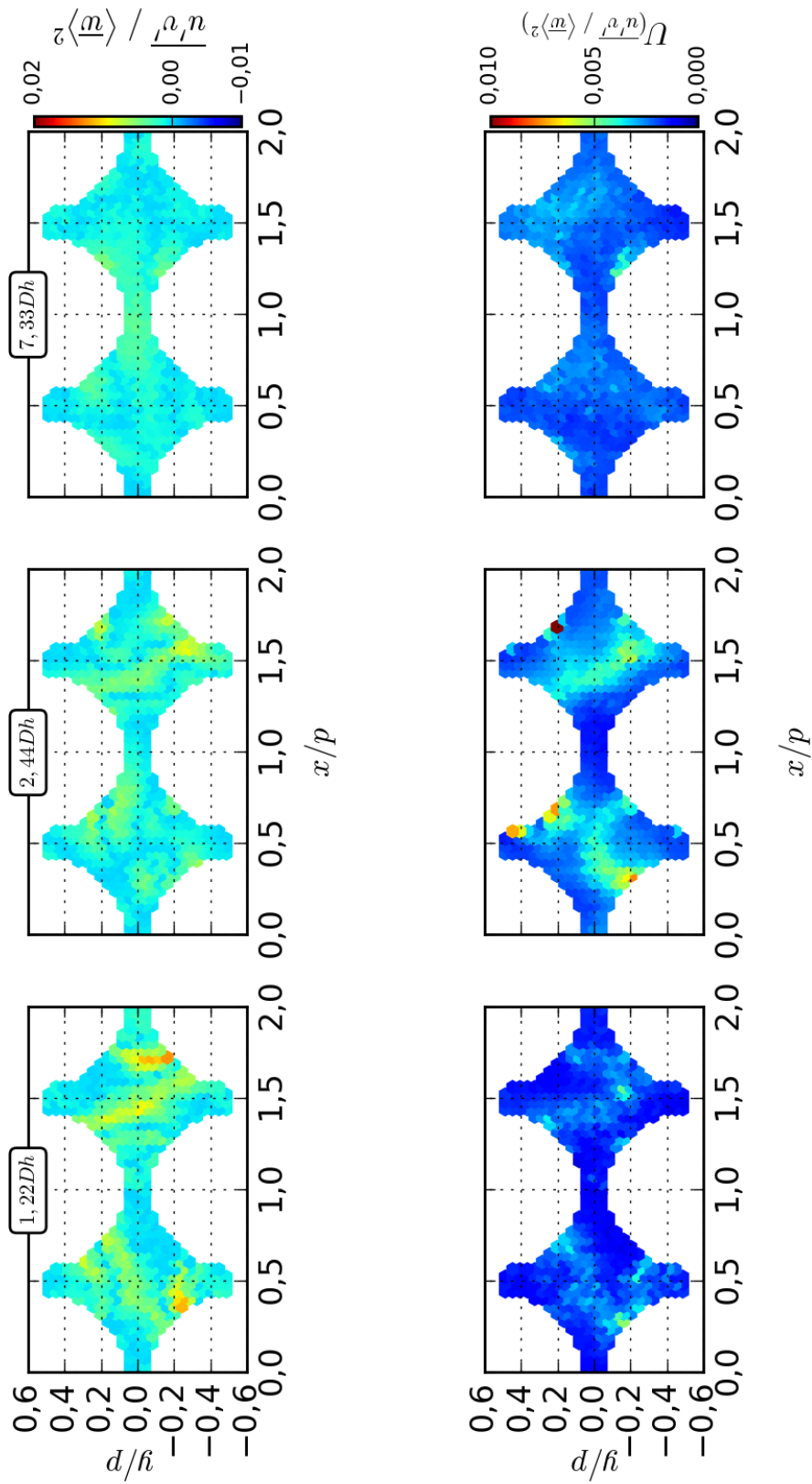
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.5 – Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por $(\langle \bar{w} \rangle^2)$ para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 27 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.6 – Tensor de Reynolds ($u'v'$) normalizado por $(\langle \bar{w} \rangle^2)$ para três alturas a jusante da grade aletada para $Re = 36 \times 10^3$.



Fonte: Elaborado pelo autor.