



## ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE RANHURAS LONGITUDINAIS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS INTERNOS

Higuel Parga de Paiva Norões

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Átila Pantaleão Silva Freire  
Juliana Braga Rodrigues  
Loureiro

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICACÃO DE RANHURAS  
LONGITUDINAIS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS INTERNOS

Higuel Parga de Paiva Norões

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

---

Prof<sup>a</sup>. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

---

Prof. Luca Roberto Augusto Moriconi, D.Sc.

---

Prof. Hamidreza Anbarlooei, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
DEZEMBRO DE 2018

Norões, Hígel Parga de Paiva

Estudo Experimental da Aplicação de Ranhuras Longitudinais em escoamentos Turbulentos Internos/Hígel Parga de Paiva Norões. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVII, 92 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Átila Pantaleão Silva Freire

Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 83 – 87.

1. Ranhura Longitudinal.
2. Escoamento Interno.
3. Redução de Arrasto. I. Freire, Átila Pantaleão Silva *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

*“The purpose of life is finding  
the largest burden that you can  
bear and bearing it.”  
— Jordan B. Peterson*

## Agradecimentos

Aos mestres Átila, Juliana, Daniel e Aibe, meu obrigado por serem professores extremamente comprometidos com a excelência. É uma alegria ter absorvido tanto conhecimento nestes anos com vocês. Continuarei espalhando a semente plantada por uma universidade pública de altíssimo nível, contribuindo para uma sociedade com qualidade técnica em engenharia.

Ao colega Cristian, obrigado por ter me acompanhado nas medições no canal. Resolver os constantes e diversos problemas que surgiam durante a caminhada se tornaram mais fáceis do teu lado.

Aos amigos Leonardo, Yasmin, Gustavo, Jamerson, Laert e Daniel Rodrigues, obrigado pelo apoio, troca de experiências, empréstimo de material e conversas durante esses anos. Sem vocês nada disso seria possível.

Aos amigos Alexandre, Thiago, Vinícius e Fabrício, obrigado pelo trabalho duro. Janete e Juju, obrigado pela simpatia, sorrisos e café.

Aos amigos do início do mestrado Lígia, Pedro, Felipe, Milena e Gabriel, obrigado por serem pessoas que fazem o que falam e lutam por seus ideais.

Obrigado a toda comunidade do NIDF por me acolher desde o início do mestrado. O convívio com pessoas de excelência foi de extrema importância para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Por ajudarem na fabricação das ranhuras, agradeço Gabriel, Mylena, Patrick e Ivana do Laboratório de Nano e Microfluídica e de Microsistemas (LabMEMS) e ao Laboratório de Tecnologia Mecânica (LMT) da COPPE/UFRJ.

À minha família, obrigado não só pelo apoio durante minha vida, mas também por ter gerado exemplos que levo para sempre.

Aos meus amigos Rafael e Thiago, obrigado por me apoiarem e depositarem toda confiança que utilizei para concluir o mestrado.

Obrigado ao Departamento de Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 - Programa PROEX 803/2018.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE RANHURAS LONGITUDINAIS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS INTERNOS

Higuel Parga de Paiva Norões

Dezembro/2018

Orientadores: Átila Pantaleão Silva Freire  
Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Programa: Engenharia Mecânica

Técnicas de redução de arrasto são empregadas na diminuição do consumo energético de diversos sistemas de transporte na engenharia. Dentre elas, destacam-se as ranhuras longitudinais, já que são do tipo passivo e de fácil fabricação quando comparadas com outras técnicas.

Na literatura, mostra-se que as ranhuras longitudinais atuam modificando a estrutura da camada limite turbulenta de escoamentos tanto internos quanto externos. A alteração na dinâmica do escoamento próximo à parede faz com que a tensão de cisalhamento apresente reduções de até 10%, o que se reflete diretamente na diminuição do consumo energético do sistema.

O experimento construído e analisado neste trabalho consiste em comparar o escoamento interno de um canal retangular de parede lisas e um canal com ranhuras longitudinais. As ranhuras possuem dimensões ótimas pré-estabelecidas pela literatura. Foram utilizadas técnicas de medição de variação de pressão, velocimetria por imagem de partículas e velocimetria *laser Doppler*.

Os resultados mostram valores de redução de arrasto acima de 20%, consistentes entre técnicas de medição independentes. A obtenção deste resultado sem precedentes na literatura mostra que o uso de ranhuras longitudinais pode e deve ser estudado mais aprofundadamente para que sejam aplicadas com sucesso na indústria.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE APPLICATION OF RIBLETS TO INTERNAL TURBULENT FLOWS

Higuel Parga de Paiva Norões

December/2018

Advisors: Átila Pantaleão Silva Freire

Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Department: Mechanical Engineering

Drag reduction techniques are used for energy consumption reduction in various engineering transport systems. Among them, longitudinal riblets stand out since they are passive and of relative easy fabrication when compared to other techniques.

It is shown on literature that longitudinal riblets act on modifying turbulent boundary layer of both internal and external flows. Change on flow dynamics near the wall leads to a decrease of up to 10% in shear stress, which directly reflects system's energy consumption reduction.

The built and analysed experiment of this work consists in comparing the internal flow of a smooth wall rectangular channel and a longitudinal riblets covered channel. Riblets dimensions are optimal as pre-established by literature. Measurements techniques of pressure variation, particle image velocimetry and laser Doppler anemometry.

Results show drag reductions of up to 20%, consistent between independent measurement techniques. The achievement of this unprecedented outcome shows the use of longitudinal riblets can and must be studied in-depth for successful application in industry.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Natureza do problema . . . . .	1
1.2 Técnicas de redução do arrasto . . . . .	2
1.3 Objetivos deste trabalho . . . . .	3
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Ranhuras longitudinais . . . . .	5
2.2 A camada limite turbulenta . . . . .	7
2.3 Mecanismos de redução de arrasto . . . . .	9
2.4 Eficiência das ranhuras . . . . .	14
<b>3 Metodologia Experimental</b>	<b>17</b>
3.1 Formulação do Problema . . . . .	17
3.2 Escoamento sobre dois planos . . . . .	18
3.3 Aparato experimental . . . . .	19
3.3.1 Canal fechado retangular . . . . .	20
3.3.2 Determinação da geometria das ranhuras longitudinais . . . . .	23
3.3.3 Fabricação das superfícies com ranhuras longitudinais . . . . .	25
3.3.4 Sensores e acessórios do canal . . . . .	29
3.4 Pressão . . . . .	34
3.5 Velocimetria por Imagem de Partícula (VIP) . . . . .	38
3.5.1 Descrição da técnica de VIP . . . . .	38
3.5.2 Procedimento utilizado na VIP . . . . .	41
3.6 Velocimetria Laser Doppler (VLD) . . . . .	44



3.6.1	Descrição da técnica de VLD . . . . .	44
3.6.2	Procedimento utilizado na VLD . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>52</b>
4.1	Controle dimensional do canal . . . . .	52
4.2	Dados de Pressão . . . . .	53
4.3	Análise global do escoamento através da VIP . . . . .	55
4.4	Análise local do escoamento através da VLD . . . . .	61
4.4.1	Velocidade de atrito . . . . .	65
4.5	Comparação entre as técnicas de pressão e VLD . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>80</b>
5.1	Discussão . . . . .	81
5.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	81
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>83</b>

# Lista de Figuras

1.1	Geração de ondas sobre um casco de embarcação devido ao arrasto de forma. . . . .	2
1.2	Divisão das técnicas de redução de arrasto . . . . .	4
2.1	Tipos de ranhuras . . . . .	6
2.2	Perfil de velocidades médias de um escoamento turbulento sobre uma placa plana lisa. . . . .	8
2.3	Retrato esquemático de escoamento sobre placa plana semi-infinita . . . . .	10
2.4	Exemplos de perfis médios de velocidade para escoamentos laminares e turbulentos em canal ou tubulação. . . . .	10
2.5	Estruturas de traço do campo de velocidade em uma placa lisa. Escoamento da esquerda para a direita. . . . .	11
2.6	Modelo conceitual da sequência do evento de explosão. . . . .	12
2.7	Escoamento viscoso longitudinal e transversal em uma superfície com ranhuras. . . . .	13
2.8	Escamas de tubarão . . . . .	14
2.9	Estrutura geral da curva de redução de arrasto . . . . .	16
3.1	Comparação entre perfil de velocidades contra lei de potência. . . . .	19
3.2	Esquemático do circuito fechado de circulação de água, equipado com o canal fechado retangular, no qual o escoamento foi analisado. . . . .	20
3.3	Foto do canal d'água retangular que foi utilizado nos experimentos. . . . .	21
3.4	Esquemático e dimensões principais do canal liso. . . . .	22
3.5	Esquemático e dimensões principais do canal com degrau. . . . .	22
3.6	Variação da espessura de ranhuras do tipo lâmina. . . . .	24
3.7	Escoamento totalmente desenvolvido entre dois planos paralelos. . . . .	24
3.8	Variação de $s^+$ em função de $Re_{Dh}$ para diferentes valores dimensionais de largura das ranhuras. . . . .	25
3.9	Máquina de gravamento e corte a laser $CO_2$ . . . . .	26
3.10	Comparação entre placas de acrílico antes e depois da fabricação das ranhuras . . . . .	27

3.11	Reconstrução da superfície 3D da ranhura fabricada. . . . .	28
3.12	Configuração e dimensões finais da ranhura utilizada nos experimentos. . . . .	28
3.13	Ranhuras fabricadas sobre placa de acrílico preta, comparação com lapiseira. . . . .	29
3.14	Vista lateral do canal com placa com ranhuras longitudinais montada em seu interior. . . . .	30
3.15	Representação esquemática da transição entre a superfície lisa e com ranhuras. . . . .	30
3.16	Elementos de estabilização do escoamento no canal. . . . .	31
3.17	Tanque Superior com capacidade de 500 litros. . . . .	32
3.18	Inversor e medidor de vazão . . . . .	33
3.19	Posicionamento das tomadas de pressão no canal. . . . .	35
3.20	Sistema de tomada de pressão: agulhas, árvore e manômetro. . . . .	36
3.21	Variáveis de referência para balanço de forças em canal. . . . .	36
3.22	Exemplo de queda de pressão $\Delta P$ entre duas tomadas de pressão distantes de $L$ uma da outra. . . . .	38
3.23	Diferença entre baixa, média e alta densidade de partículas. . . . .	39
3.24	Par de frames de imagens de exposição única (defasados no tempo) para o método de correlação-cruzada. . . . .	40
3.25	Composição dos picos da função de correlação-cruzada. . . . .	40
3.26	Arranjo experimental da técnica de VIP em um túnel de vento. . . . .	41
3.27	Posicionamento do sistema de VIP em relação ao canal retangular. . . . .	42
3.28	Tamanho médio das partículas. . . . .	43
3.29	Procedimento de calibração das imagens para a técnica de VIP. . . . .	43
3.30	Esquema representativo dos componentes principais de um sistema VLD. . . . .	45
3.31	Parâmetros geométricos das franjas de interferência. . . . .	46
3.32	Parâmetros geométricos da frequência Doppler recebida pelo detector. . . . .	46
3.33	Configuração esquemática do sistema <i>backscatter</i> onde sonda e receptor são integrados. . . . .	48
3.34	Dimensões aproximadas do volume de controle da técnica de VLD. . . . .	48
3.35	Vistas frontal e superior do esquema de montagem e posicionamento do sistema de VLD utilizando no canal. . . . .	49
3.36	Sistema do VLD montado e em operação. . . . .	50
3.37	Equipamentos e componentes utilizados nas medições do perfil de velocidade na técnica de VLD. . . . .	50
4.1	Pontos de queda de pressão em todos os Reynolds ensaiados no canal liso. . . . .	53

4.2	Pontos de queda de pressão em todos os Reynolds ensaiados no canal com ranhuras. . . . .	54
4.3	Comparação entre fator de atrito de Darcy ( $f$ ) entre o canal liso e canal com ranhuras. . . . .	54
4.4	Comparação entre tensão de cisalhamento teórica e a tensão obtida experimentalmente no canal liso. . . . .	55
4.5	Redução de arrasto (RA) do canal com ranhuras quando comparado ao canal liso. . . . .	56
4.6	Campo de velocidades do canal liso obtido a partir da técnica de VIP. . . . .	57
4.7	Campo de velocidades do canal com ranhuras obtido a partir da técnica de VIP. . . . .	58
4.8	Caracterização do escoamento via técnica de VIP para o canal liso. . . . .	59
4.9	Caracterização do escoamento via técnica de VIP para o canal com ranhuras. . . . .	60
4.10	Comparação do escoamento via técnica de VIP para o canal liso e com ranhuras. . . . .	62
4.11	Velocidade média do canal liso através da técnica VLD. . . . .	63
4.12	Velocidade média do canal com ranhuras através da técnica VLD. . . . .	64
4.13	Incerteza das medições de velocidade média no canal liso e com ranhuras. . . . .	64
4.14	Histograma do <i>software</i> de aquisição da técnica VLD onde é possível perceber valores negativos de velocidade média no escoamento. . . . .	65
4.15	Perfil de velocidades próximo à subcamada viscosa para o canal liso. . . . .	67
4.16	Perfil de velocidades próximo à subcamada viscosa para o canal com ranhuras. . . . .	68
4.17	Validação dos dados obtidos na técnica de VLD pela comparação das velocidades de atrito teórica e experimental (via subcamada viscosa e turbulenta) do canal liso. . . . .	69
4.18	Perfil de velocidade média em coordenadas internas para o canal liso. . . . .	71
4.19	Perfil de velocidade média em coordenadas internas para o canal com ranhuras. . . . .	72
4.20	Colpasamento do perfil de velocidade média em coordenadas internas em cada Reynolds para o canal liso. . . . .	73
4.21	Colpasamento do perfil de velocidade média em coordenadas internas em cada Reynolds para o canal com ranhuras. . . . .	73
4.22	Comparação entre os perfis de velocidade média em coordenadas internas do canal liso e com ranhuras a $Re = 41.800$ aproximadamente. . . . .	74
4.23	Comparação entre os perfis de velocidade média em coordenadas internas do canal liso e com ranhuras a $Re = 56.800$ aproximadamente. . . . .	75

4.24	Intensidade turbulenta para o todos os Reynolds medidos no canal liso e com ranhuras. . . . .	75
4.25	Assimetria (ou momento de terceira ordem) para o todos os Reynolds medidos no canal liso e com ranhuras. . . . .	76
4.26	Achatamento (ou momento de quarta ordem) para o todos os Reynolds medidos no canal liso e com ranhuras. . . . .	77
4.27	Comparação da redução de arrasto (RA) das técnicas de pressão e de VLD. . . . .	78

# Lista de Tabelas

4.1	Dimensões do canal liso e canal com ranhuras para controle dimensional.	52
4.2	Condições experimentais do ensaios com a técnica de VIP. . . . .	56
4.3	Condições experimentais do ensaios com a técnica de VLD. . . . .	61
4.4	Resultados das constantes da Lei Logarítmica e atrito para o canal liso.	77
4.5	Resultados das constantes da Lei Logarítmica e atrito para o canal com ranhuras. . . . .	78

# Lista de Símbolos

$A$	área transversal da seção de testes, p. 22
$Cf$	coeficiente de atrito, p. 54
$Dh$	diâmetro hidráulico da seção de testes, p. 24
$E$	voltagem de saída do manômetro, p. 35
$Fu$	achatamento ou momento de quarta ordem, p. 72
$G$	gradiente de pressão, p. 37
<i>Incerteza</i>	incerteza das velocidades médias, p. 64
$L$	comprimento característico, p. 33
$L$	distância longitudinal entre duas tomadas de pressão no canal, p. 37
$N$	número de amostras (partículas) observadas no escoamento durante o período de medição, p. 64
$P$	pressão do manômetro, p. 35
$P_C$	pressão conhecida da coluna, p. 35
$P_M$	pressão indicada pelo manômetro, p. 35
$RA$	fator de redução de atrito, p. 56
$Re_{4h}$	número de Reynolds médio do escoamento com base no dobro da altura $2h$ do canal, p. 34
$Re_{Dh}$	número de Reynolds médio do escoamento com base no diâmetro hidráulico $Dh$ do canal, p. 24
$Re_h$	número de Reynolds médio do escoamento com base na meia-altura $h$ do canal, p. 22

$Su$	assimetria ou momento de terceira ordem, p. 71
$Tu$	intensidade turbulenta, p. 64
$U$	velocidade média do escoamento na seção de testes, p. 23
$\Delta P$	queda de pressão entre duas tomadas de pressão no canal, p. 37
$\Delta u^+$	defeito de velocidade de liso para rugoso proposto por Clauser, p. 70
$\bar{Q}$	Vazão média do escoamento na seção de testes, p. 23
$\bar{Q}$	vazão média, p. 22
$\delta^+$	rugosidade adimensional tipo d, p. 70
$\epsilon$	rugosidade absoluta, p. 52
$\nu$	viscosidade cinemática do fluido, p. 5
$\rho$	densidade de massa do fluido, p. 5
$\sigma_u$	desvio-padrão da velocidade longitudinal, p. 64
$\tau_w$	tensão de cisalhamento na parede, p. 5
$f$	fator de atrito de Darcy, p. 24
$h$	meia-altura da seção de testes, p. 22
$h_f$	perda de carga entre duas tomadas de pressão no canal, p. 37
$k$	energia cinética turbulenta, p. 59
$k^+$	rugosidade adimensional tipo k, p. 70
$s$	largura de uma ranhura longitudinal, p. 5
$s^+$	largura adimensional de uma ranhura longitudinal, p. 5
$u^+$	velocidade adimensional na direção longitudinal ao escoamento, p. 7
$u_\tau$	velocidade de atrito, p. 5
$w$	largura da seção de testes, p. 22
$y^+$	altura adimensional com referência na parede, p. 7



# Lista de Abreviaturas

AFQ	Anemometria de Fio Quente, p. 1
BLADE	Boundary Layer Device, p. 1
BSA	Burst Spectrum Analyzer, p. 1
CMD	Charge Coupled Device, p. 1
CMOS	Complementary Metaloxide Semiconductor, p. 1
CNC	Comando Numérico Computadorizado, p. 1
DNS	Direct Numeric Simulation, p. 1
GPA	Gradiente de Pressão Adverso, p. 1
LDA	Laser Doppler Anemometry, p. 1
LEBU	Large Eddy Breakup Device, p. 1
LabMEMS	Laboratório de Nano e Microfluidica e de Microsistemas, p. 1
NIDF	Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos, p. 1
OLD	Outer Layer Device, p. 1
PIV	Particle Image Velocimetry, p. 1
PTV	Particle Tracking Velocimetry, p. 1
RA	Redução de Arrasto, p. 1
TAPPM	Tandem Arranged Parallel Plate Manipulator, p. 1
VC	Volume de Controle, p. 1
VIP	Velocimetria Imagem de Partículas, p. 1
VLD	Velocimetria Laser Doppler, p. 1

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Natureza do problema

Quando há o escoamento de um fluido sobre uma superfície sólida, percebe-se uma força de resistência na direção do escoamento. Denominada de força de arrasto, ela ocorre em várias aplicações de engenharia, incluindo o transporte marítimo, terrestre e aéreo. O arrasto provocado pelo escoamento de fluidos pode ser o principal responsável pelo consumo energético em certos sistemas de transporte. Em escoamentos internos, o arrasto provocado pelo atrito superficial constitui-se normalmente no efeito dominante. Por esta razão, o seu estudo é fundamental para que se desenvolvam formas de diminuí-lo, reduzindo, assim, o consumo de combustível.

Diferentes técnicas de redução do arrasto foram propostas nos últimos anos. Os objetivos iniciais eram principalmente a redução do custo de combustíveis pois, para uma mesma velocidade de deslocamento, o corpo que se desloca utilizaria uma potência propulsora menor, reduzindo assim o consumo. Com o passar dos anos, a crescente preocupação com o aquecimento global também incentivou a redução da emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. Como a emissão de carbono ocorre pela queima de combustível pelo sistema propulsivo do meio de transporte, os veículos terrestres, aéreos ou marítimos com maior eficiência energética levam a uma redução da emissão de carbono. Logo, as técnicas de redução do arrasto possuem tanto um apelo econômico quanto ambiental.

O arrasto em escoamentos externos pode ser geralmente dividido nos componentes de *atrito* e de *pressão*. Em problemas que envolvam superfícies livres a formação de ondas também possui efeito significativo. Assim, os dois grupos adimensionais mais relevantes para a formulação descrição de forças de resistência são os números de Reynolds ( $R_e = UL/\nu$ ) e de Froude ( $F_r = \sqrt{U/gL}$ ).

Em navios cargueiros, os efeitos viscosos (arrasto por atrito) pode corresponder até 80% da resistência ao avanço total da embarcação. Esta parcela é grande devido



Figura 1.1: Geração de ondas sobre um casco de embarcação devido ao arrasto de forma.

às extensas regiões do corpo central dos cascos, composto basicamente por placas que podem ser localmente aproximadas por placas planas. Já a parcela resultante do campo de pressão e da formação de ondas é a responsável pelos 20% restantes, Figura 1.1.

Na aviação civil ou comercial, o arrasto de atrito chega a valores de até 40-50% do arrasto total [1]. Nos escoamentos internos em tubulações e dutos, o arrasto devido a efeitos viscosos dominam, chegando ao valor de 100% para escoamentos completamente desenvolvidos em tubulações.

A busca por técnicas de redução do arrasto em escoamentos sempre foi um tema de interesse para a mecânica dos fluidos.

## 1.2 Técnicas de redução do arrasto

As técnicas existentes para a redução do arrasto de pressão são basicamente direcionadas para a otimização da forma e o controle da separação. A ideia central é atrasar a separação - que é o descolamento da camada limite. Já as técnicas de redução do arrasto de atrito viscoso buscam o controle do escoamento próximo à parede, principalmente na tentativa de modificar o campo de velocidade no interior da camada limite.

Podemos separar as técnicas em dois grandes grupos, os métodos ativos e passivos. Os ativos incluem introdução de micro-bolhas, injeção ou sucção de fluido na parede e adição de polímeros (conhecidos como "agentes de redução de arrasto"). Este último método tem recebido atenção especial e trabalhos mostram reduções de até 80% [2] no arrasto. Porém, estes métodos possuem um custo associado à introdução do agente redutor. Por exemplo, para a injeção de micro-bolhas, deve ser utilizado um compressor de ar que, assim, precisa ser incluído no balanço de energia do sistema. O mesmo ocorre na injeção ou sucção de fluido na parede. Na adição

de polímeros, a maior parte dos custos recai sobre a compra do agente polimérico.

De forma a evitar estes custos, foram desenvolvidos também os métodos passivos, que possuem como conceito fundamental a manipulação da camada limite pela transferência de energia que resulta da interação dinâmica natural do fluido sobre um corpo sólido. Para alterar as estruturas turbulentas próximas à parede, são utilizados manipuladores que podem ser classificados como externos ou internos [3].

Os manipuladores externos incluem os dispositivos de camada externa (OLDs do inglês *Outer Layer Devices*), dispositivos de camada limite (BLADEs do inglês *boundary layer devices*), dispositivos de quebra de grande turbilhão (LEBU do inglês *large eddy breakup devices*) e o manipuladores de placas paralelas arranjadas em tandem (TAPPMs do inglês *tandem arrayed parallel plate manipulators*).

Os manipuladores internos principais são: parede complacentes, paredes oscilantes, sulcos e ranhuras longitudinais. Este último tem sido estudado e aplicado com sucesso na aviação comercial, em pás de turbinas eólicas e em cascos de veleiros de competição em regatas de alto desempenho. A equipe estadunidense de vela venceu a medalha de ouro olímpica e a famosa regata *America's Cup* de 1987 ao utilizar ranhuras em formato de V no casco de suas embarcações. Estas ranhuras foram desenvolvidas pelo *Langley Research Center* da NASA e, devido ao ótimo resultado, ranhuras foram banidas destas competições nos anos seguintes. [4]

A Figura 1.2 mostra de forma organizada a divisão das técnicas de redução mencionadas.

### 1.3 Objetivos deste trabalho

Devido às naturais vantagens apresentadas pelos métodos passivos - principalmente relacionados ao baixo custo de implementação - e também devido à relativa facilidade de fabricação, serão analisados experimentalmente nesta dissertação os efeitos da utilização de ranhuras longitudinais para a redução do arrasto de atrito.

Especificamente, o objetivo presente é projetar, construir e montar um aparato experimental – sobre o qual são introduzidas ranhuras longitudinais em um escoamento interno – e analisar os seus efeitos sobre a dinâmica do escoamento. Busca-se compreender os efeitos que as ranhuras exercem sobre o campo de velocidade através de técnicas experimentais de velocimetria e também analisar os efeitos sobre a distribuição longitudinal de pressão global do escoamento.

As ranhuras longitudinais serão fabricadas com geometria e configuração ótimas para atingir a redução de arrasto quando comparados com uma superfície lisa de referência.

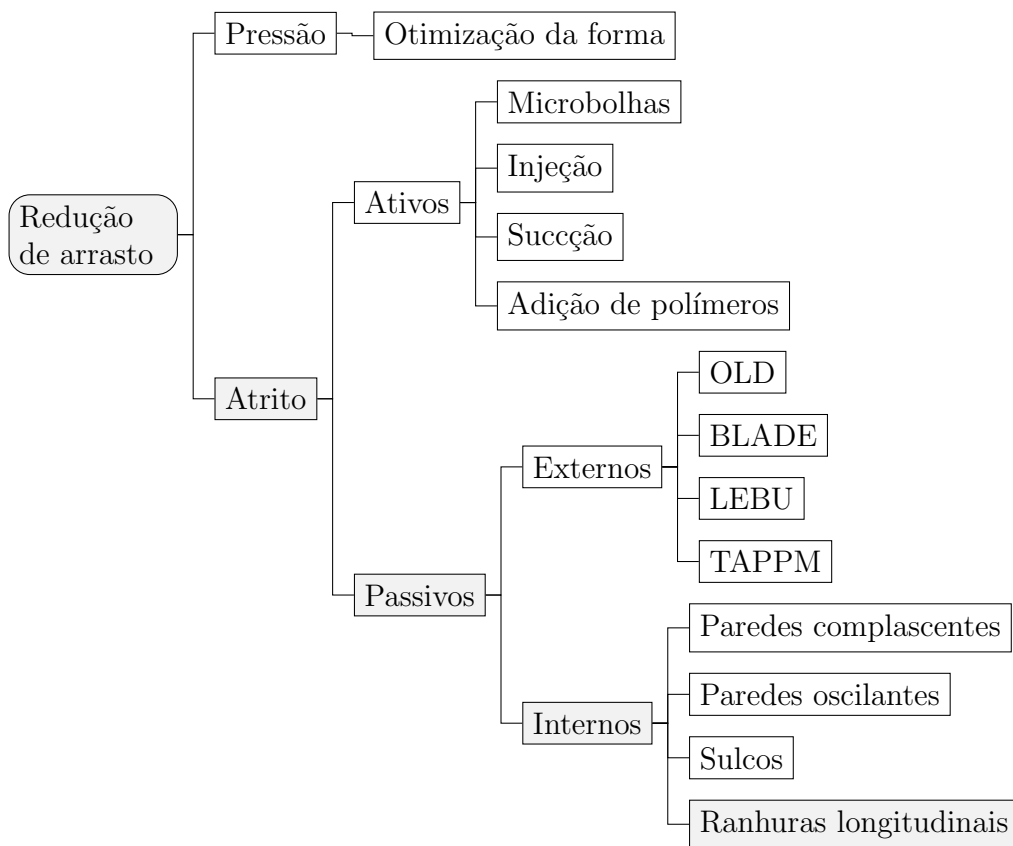


Figura 1.2: Divisão das técnicas de redução de arrasto.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Ranhuras longitudinais

As ranhuras longitudinais são sulcos ou estrias sobre uma superfície que se prolongam na direção paralela ao escoamento principal. Estas ranhuras podem possuir diferentes geometrias (quando observadas de uma seção transversal) como pode ser visto na Figura 2.1 e a definição da geometria é objeto de estudo de muitos trabalhos.

Uma breve revisão bibliográfica será realizada nesta seção, mostrando os principais trabalhos com ranhuras longitudinais e analisando os tipos de geometria utilizados e os níveis de redução de arrasto obtidos. Serão apresentadas as principais teorias que tentam explicar a mecânica da redução de arrasto por ranhuras longitudinais, apresentando-se também resultados experimentais que buscam confirmar ou não tais teorias.

Um parâmetro importante de caracterização das ranhuras é o espaçamento ( $s$ ) entre elas. Ele pode ser definido como o espaçamento entre picos ou vales adjacentes, e normalmente é relatado na forma adimensional em unidade de parede, conforme a Equação 2.1.

$$s^+ = \frac{su_\tau}{\nu} \quad (2.1)$$

onde  $s$  é a largura (dimensional) da ranhura,  $u_\tau$  é a velocidade de atrito definida pela Equação 2.2 e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.2)$$

Este parâmetro é utilizado na forma adimensional para que seja mantida a semelhança dinâmica entre experimentos e, assim, facilitar a comparação dos resultados. A forma adimensional utiliza os parâmetros  $\tau_w$  que é a tensão de cisalhamento na parede e  $\rho$  que é a densidade de massa do fluido.

Modelo	Descrição
	Triangular simétrico
	Retangular
	Triangular espaçado
	Ângulo reto
	Curvatura pico
	Curvatura vale
	Curvatura pico e vale
	Pico com entalhe
	Ranhura em V espaçada
	Triangular assimétrico
	Ranhura em V oblíqua

Figura 2.1: Tipos de ranhuras (adaptado de Abdulbari *et. al.* 2015a [3])

## 2.2 A camada limite turbulenta

O que torna a turbulência um assunto complexo são suas características de não-linearidade e o espectro contínuo de escalas relevantes. Em particular, a dissipação de energia ocorre a diminutas escalas, as escalas de *Kolmogorov*, que são as escalas características que precisam ser capturadas para que a dissipação viscosa ocorra. No escoamento atmosférico, por exemplo, essas escalas estão na ordem de 1 milímetro.

No tratamento matemático de um escoamento no regime turbulento, as variáveis nas equações de movimento podem ser decompostas em parcelas médias e flutuantes. Por exemplo, para a velocidade longitudinal instantânea ( $u$ ) em dado ponto do escoamento, podemos escrever a Equação 2.3, onde  $\bar{u}$  é o valor da média temporal e  $u'$  é o valor flutuante definido como  $u' = u - \bar{u}$ .

Para um número amostral de  $N$  observações de velocidades instantâneas  $u_i$ , podemos avaliar a velocidade média pela Equação 2.4.

Para recuperar a informação das flutuações, define-se a intensidade turbulenta como o desvio-padrão  $\sigma_u$  da flutuação  $u'$  dado pela Equação 2.5.

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.3)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N u_i \quad (2.4)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (u_i - \bar{u})^2} \quad (2.5)$$

O mesmo conceito se aplica às outras componentes da velocidade, no caso a vertical  $v$  e a transversal  $w$ .

Em um escoamento, o perfil de velocidades da camada limite turbulenta (Figura 2.2), diferentemente da laminar, possui uma estrutura subdividida em três regiões principais - as camadas viscosa, turbulenta (que engloba a subcamada logarítmica) e de esteira. Estas camadas são caracterizadas normalmente pelos perfis de velocidade das mesmas, indicados pelos parâmetros adimensionais de velocidade  $u^+$  e a distância da parede  $y^+$ , definidos respectivamente pelas Equações 2.6 e 2.7.

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (2.6)$$

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (2.7)$$

onde  $u_\tau$ , a velocidade de atrito, foi definida na Equação 2.2.

A região da esteira, em uma primeira ordem de aproximação, é caracterizada



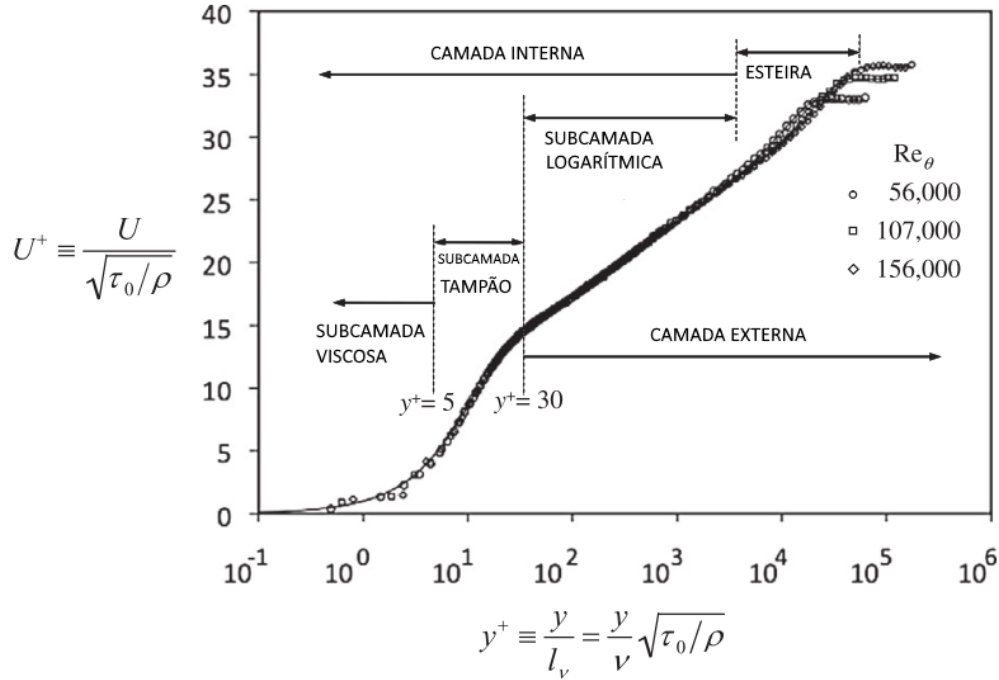


Figura 2.2: Perfil de velocidades médias de um escoamento turbulento sobre uma placa plana lisa. Resultados experimentais plotados em coordenadas adimensionais normalizadas pelas variáveis internas (adaptado de Kundu *et. al.* [6]).

por um escoamento não viscoso que lembra os escoamentos cisalhantes livres. Desta forma, esta região é chamada de *Lei da Esteira*.

A primeira subcamada, mais próxima à parede, é uma região onde os termos viscosos prevalecem (*subcamada laminar* ou *viscosa*). A *subcamada laminar* possui espessura de até  $y^+ = 11$  e é descrita pela relação  $u^+ = y^+$ .

Acima desta, existe uma região em que prevalecem os termos turbulentos (*subcamada turbulenta*). A *subcamada turbulenta* ou *logarítmica* começa a partir de  $y^+$  entre 30-50 e vai até a região inercial da camada externa. Nela, prevalece um comportamento logarítmico do perfil de velocidades. Desta forma, é comumente chamada de *Lei Logarítmica*.

A região entre estas duas subcamadas pode ser chamada de *camada tampão* ou de *transição* [5]. Nela, há uma alternância entre o domínio dos termos viscosos e turbulentos.

A subcamada logarítmica é descrita pela lei logarítmica fornecida pela Equação 2.8. Esta equação possui um caráter universal, aplicável a uma grande variedade de escoamentos turbulentos cisalhantes próximos a paredes lisas.

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y u_\tau}{\nu} + B \quad (2.8)$$

onde, a partir de resultados experimentais, mostra-se que uma boa aproximação das constantes é  $\kappa = 0,41$  e  $B = 5,0$ .

Contudo, os valores de  $\kappa$  e  $B$ , podem apresentar alto grau de dispersão na literatura. O trabalho de ZANOON *et. al.* [7] compilou dados que estão na faixa de  $\kappa = [0,33; 0,45]$  e  $B = [3,5; 6,2]$ ; parte da dispersão observada pode ser resultado de uso impróprio dos instrumentos de medição ou devido a medições feitas em escoamentos a baixos números de Reynolds ( $Re_\tau \leq 10^3$ ). Assim, ela pode ser resultante de efeitos provocados pela variação do número de Reynolds.

## 2.3 Mecanismos de redução de arrasto

Primeiramente é importante notar que a redução de arrasto por ranhuras longitudinais só é observada em escoamentos turbulentos. De fato, os trabalhos numéricos com escoamento laminar sobre superfícies com ranhuras longitudinais de LAUNDER & LI [8] e de CHOI *et. al.* [9] mostram que não há aumento de arrasto quando comparado com o caso liso. LAUNDER & LI [8] fazem uma analogia com o problema de transferência de calor e argumentam que, assim como trocadores de calor com estrias retas, há um aumento considerável da área de contato com o fluido. Este aumento de área aumenta o balanço total de tensão cisalhante na parede, apesar de, segundo CHOI [9], a taxa de cisalhamento na parede ser menor na maioria das regiões do perímetro da ranhura, quando comparados com uma placa lisa.

Um escoamento turbulento é identificado por três importantes características: ele é imprevisível (não há predição determinística de sua evolução), ele possui alta mistura (mais do que um processo puramente difusivo molecular) e ele possui um grande número de escalas características [10]. O processo de transição de um escoamento laminar para o turbulento sobre uma placa plana pode ser visto esquematicamente na Figura 2.3. A turbulência cresce com o número de Reynolds (número adimensional que representa a razão entre forças inerciais e viscosas), e existe um número crítico de transição de laminar para turbulento para diferentes tipos de escoamento.

As camadas limite laminar e turbulenta diferem em vários sentidos. Um perfil de velocidade média de um escoamento completamente turbulento possui um formato mais achatado que um perfil laminar, possuindo então uma tensão de cisalhamento na parede  $\tau_w = \mu(dU/dy)$  muito maior [6], como pode ser visto na Figura 2.4.

Apesar da concepção comum de que o escoamento turbulento é caótico, ele é caracterizado por estruturas organizadas ditas coerentes. Em uma região próxima à parede, com  $y^+ < 70$  (não correspondendo à 1% da espessura da camada limite em termos dimensionais), observam-se a presença de traços de turbulência com baixas velocidades e espaçamento regular, como pode ser visto na Figura 2.5 obtida experimentalmente. Estes traços oscilam e quebram em movimentos violentos conhecidos

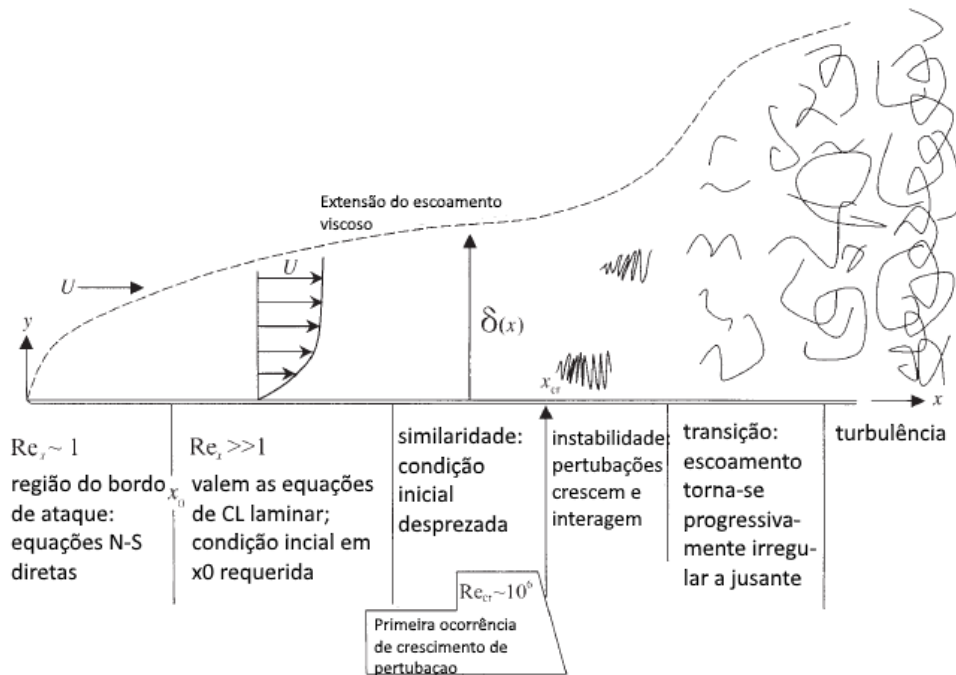


Figura 2.3: Retrato esquemático de escoamento sobre placa plana semi-infinita. Valores crescentes de  $x$  representam maiores números de Reynolds (adaptado de Kundu *et. al.* [6])

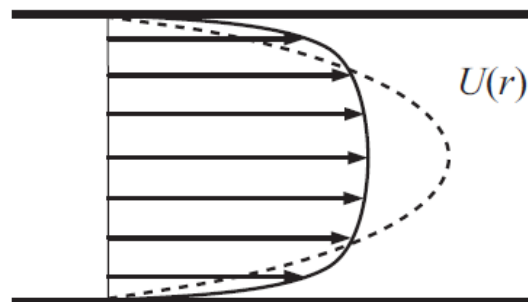


Figura 2.4: Exemplos de perfis médios de velocidade para escoamentos laminares (curva tracejada) e turbulentos (curva sólida) em um canal ou tubulação. O perfil turbulento apresenta maiores velocidades de fluido próximo à parede, levando a uma maior tensão de cisalhamento na camada limite turbulenta (adaptado de Kundu *et. al.* [6])

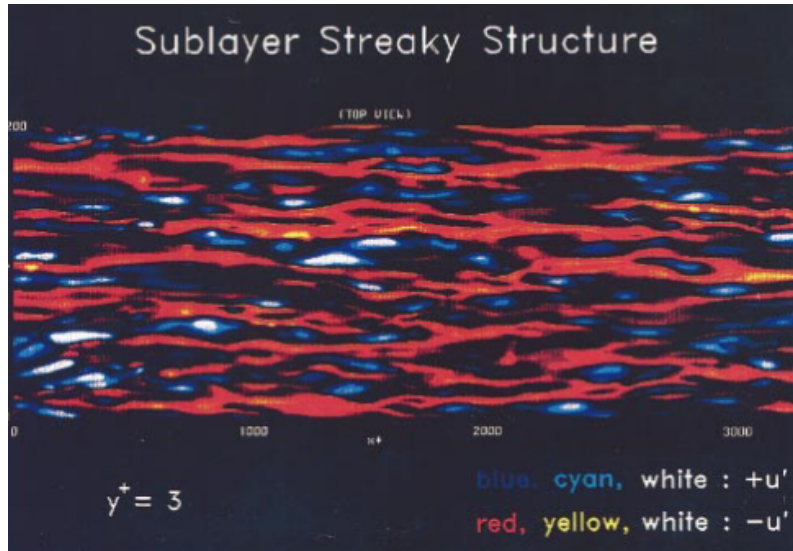


Figura 2.5: Estruturas de traço do campo de velocidade em uma placa lisa. escoamento da esquerda para a direita. Onde  $u'$  é a parcela flutuante da velocidade na direção longitudinal (retirado de Bechert *et. al.* 2000b [11])

como explosões. Estas explosões correspondem a 70% da produção de turbulência [10].

CHOI [12] propôs um modelo conceitual a partir de observações experimentais de como ocorre o processo de explosão, como observado na Figura 2.6. No primeiro estágio, filamentos de vórtices são deformados pelo grande campo de velocidade criado entre os pares de vórtices longitudinais que trazem fluidos com maior quantidade de movimento na direção da parede. Então, estes vórtices deformados progridem em instabilidades conhecidas como grampos de cabelo, por um mecanismo de auto-indução. Estas estruturas são, então, a partir de uma combinação do campo de velocidades de auto-indução e a camada cisalhante, ejetadas da parede na direção jusante.

Estes movimentos, de ejeção em alta velocidade de fluido a baixa velocidade que se encontra próximo à parede e a entrada na camada limite de fluido a alta velocidade proveniente do escoamento externo, produzem a turbulência e contribuem para o aumento do tensor tensão e consequentemente  $\tau_w$  na parede [10].

Estas estruturas turbulentas, principalmente os vórtices na direção longitudinal do escoamento, induzem uma forte flutuação de velocidade na direção transversal. Segundo CHOI [12], o movimento transversal é devido aos pares de vórtices associados às explosões próximas à parede. Logo, as ranhuras longitudinais tem como mecanismo fundamental a restrição deste movimento transversal, resultando em explosões prematuras e fracas. Com explosões menos intensas, reduz-se também o atrito turbulento na parede, já que este tem como sua maior fonte de produção estas explosões. Em seu extenso trabalho experimental em túnel de vento, CHOI

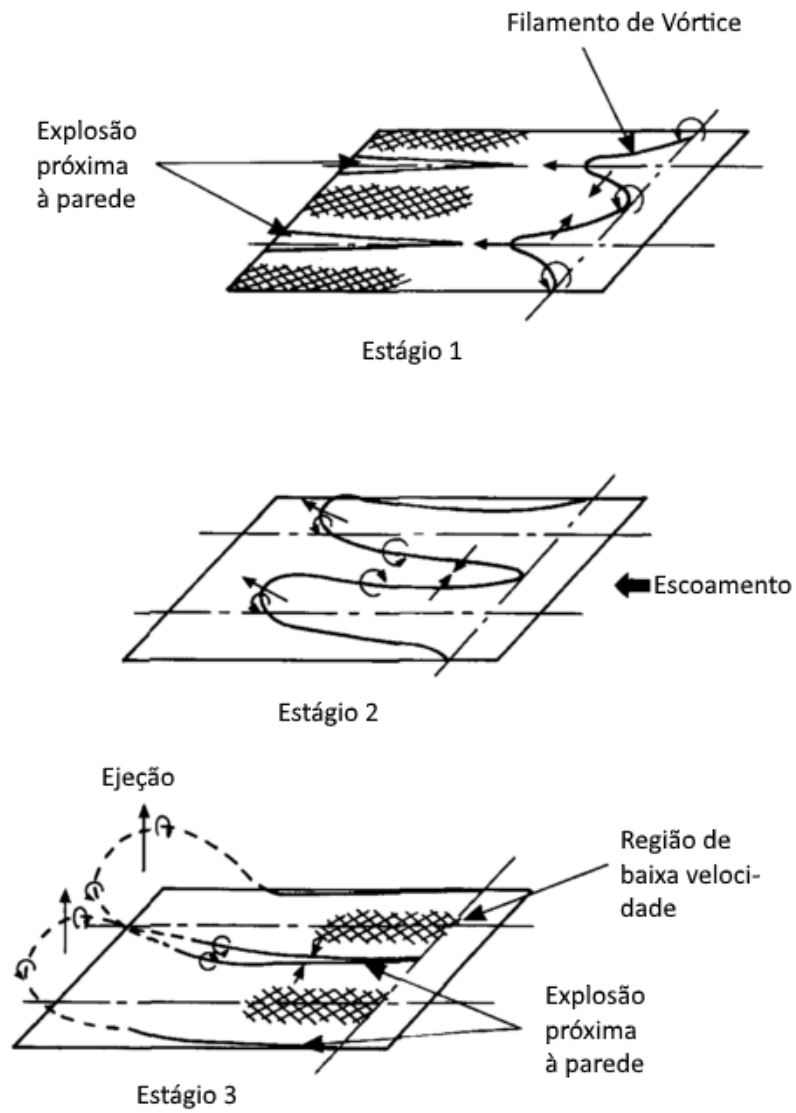


Figura 2.6: Modelo conceitual da sequência do evento de explosão. (adaptado de Choi 1989a [12])

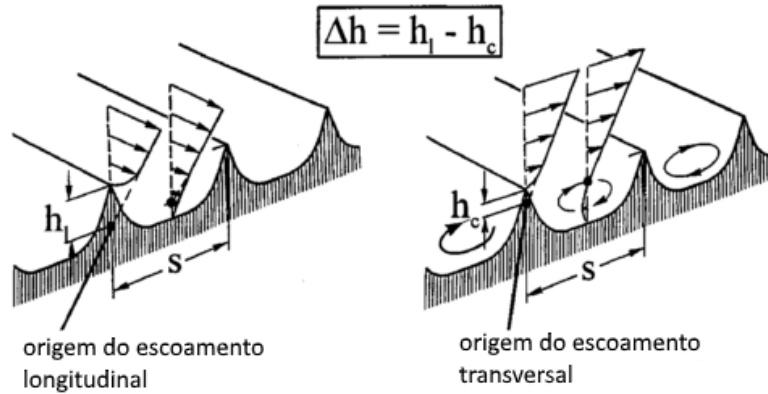


Figura 2.7: Escoamento viscoso longitudinal e transversal em uma superfície com ranhuras. (adaptado de Bechert *et. al.* 2000b [11])

conseguiu demonstrar que, de fato, o espaçamento ótimo entre ranhuras é justamente a metade da distância média entre vórtices longitudinais no evento de explosão. Notou-se também um aumento de frequência de explosões (mas com menor intensidade e duração) e um maior período de inatividade da turbulência (que é intrinsecamente intermitente) dentro do vale da ranhura, caracterizando um escoamento laminar, com as explosões ocorrendo acima dos picos das ranhuras. De fato, é notada também o aumento da subcamada viscosa, assim como ocorre nos fenômenos de redução de arrasto pelo uso de polímeros. E as medidas utilizando anemometria de fio-quente mostrou que a intensidade turbulenta diminui consideravelmente próximo à parede.

HOU *et. al.* [13] mostrou experimentalmente que há uma redução considerável das parcelas flutuantes da velocidade transversal na presença das ranhuras longitudinais. Este fenômeno está relacionado a uma atenuação dos vórtices longitudinais e também das intensidade turbulenta acima das ranhuras, observados experimentalmente com auxílio de um sistema 3D-PTV.

BECHERT *et. al.* [11] complementa a explicação de CHOI ao introduzir o conceito de diferença de altura de protusão. Em teoria desenvolvida juntamente com LUCHINI *et. al.* [14], são analisadas analítica e numericamente as origens do perfil de velocidades do escoamento longitudinal - perfil de  $u(y)$  - assim como o transversal (perfil de  $w(y)$ ). Assim como pode ser visto na Figura 2.7, pode-se notar que a origem do escoamento transversal está muito mais próxima do pico da ranhura do que a origem do escoamento longitudinal. Isto faz com que ocorra maior resistência ao movimento transversal, e conseqüentemente das flutuações transversais  $w'$ , geradas pelos vórtices longitudinais. Logo, estes eventos turbulentos são deslocados para longe da parede, o que explica o espessamento da subcamada laminar. Por sua vez, esse espessamento incorre em uma menor tensão cisalhante na parede e conseqüente redução do arrasto.

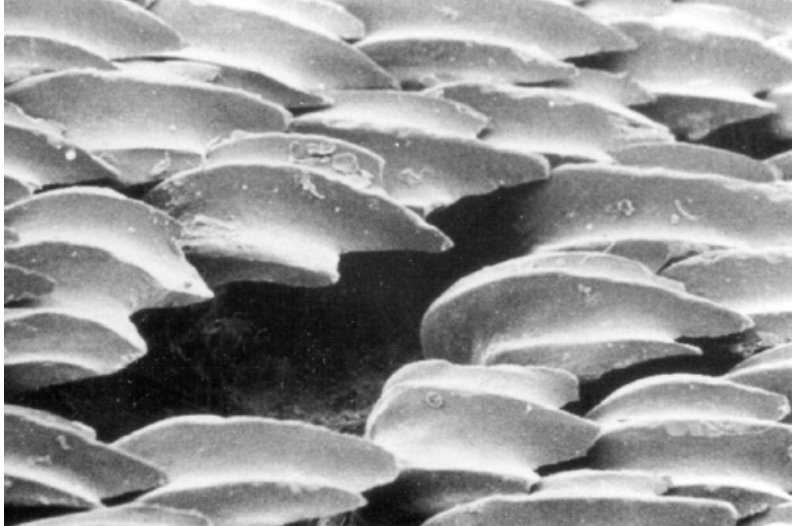


Figura 2.8: Escamas de tubarão (retirado de Bechert *et. al.* 2000c [11])

## 2.4 Eficiência das ranhuras

As ranhuras longitudinais são estudadas de forma geral desde a década de 60, mas com estudos pioneiros mais aprofundados realizados por WALSH *et. al.* no *NASA Langley Research Center*, EUA ([15], [16], [17], [18], [19] e [20]). Nestes trabalhos, realizados em um túnel de vento e utilizando ranhuras de diferentes geometrias, WALSH obteve com as ranhuras triangulares simétricas e curvatura vale (ou parabólicas) reduções de arrasto de até 8%. Dentre as contribuições de WALSH, destaca-se o fato de que, após uma busca sistemática pela geometria ótima, constatou-se que as ranhuras triangulares simétricas são as que apresentam os maiores valores de redução de arrasto. Além disso, observou-se também que o espaçamento adimensional  $s^+$  ótimo entre ranhuras está na faixa de 10 a 15 com uma razão de aspecto  $h/s = 1$ , onde  $h$  é a altura da ranhura. WALSH também contribuiu demonstrando que não há uma forte influência da geometria do pico nem do vale na redução de arrasto, principalmente no caso das ranhuras parabólicas. Outro resultado interessante é que, mantendo as placas horizontais, inclinações em relação ao eixo vertical de até  $15^\circ$  da ranhura em relação ao escoamento não afeta o desempenho de redução de arrasto de forma apreciável.

Outro autor importante é BECHERT, que realizou diversos experimentos em canal retangular utilizando óleo como fluido. Seu trabalho tem como inspiração as escamas de tubarão, que possuem estruturas parecidas com ranhuras longitudinais, como pode ser visto na Figura 2.8. A utilização de um fluido de viscosidade maior (óleo de bebê) permitiu a fabricação de ranhuras e réplicas de escama de tubarão em dimensões maiores, facilitando assim a análise experimental.

Em seu primeiro grande trabalho ([21]), BECHERT mostrou que as escamas de tubarão possuem uma relação entre  $s$  e  $U$  (velocidade de cruzeiro do tubarão) que

fornece um  $s^+$  próximos do ótimo. Com ranhuras longitudinais com geometria parabólica (curvatura no vale), BECHERT conseguiu replicar os resultados de Walsh, obtendo reduções de arrasto de até 7% com  $s^+ = 10$ .

Realizando um estudo completo de diversas geometrias, BECHERT concluiu que a geometria ótima era do tipo "lâmina", que seria a retangular porém com espaçamento muito pequeno entre uma ranhura e outra - formando assim lâminas de pequena espessura entre as estrias. Nesta configuração com  $s^+ = 16$ ,  $h/s = 0,5$  e um razão entre a espessura da lâmina ( $t$ ) e o espaçamento  $t/s = 0,02$ , BECHERT obteve a maior redução de arrasto experimental em placas planas sem gradiente de pressão encontrada na revisão bibliográfica, com um valor de 9,9% [22].

Em trabalhos subsequentes ([11] e [23]), BECHERT testou uma configuração com lâminas de comprimento finito e intercaladas, replicando o arranjo das ranhuras encontradas em escamas de tubarão. Porém os resultados demonstraram que não foi possível obter resultados melhores que a configuração original de ranhuras estendendo-se por todo o comprimento da superfície.

Uma curva típica de redução do arrasto contra o espaçamento  $s^+$  adimensional entre ranhuras pode ser observada no modelo representativo da Figura 2.9. Segundo BECHERT *et. al.* [22] na curva percebe-se que existe inicialmente uma região linear para valores baixos de  $s^+$ , que corresponde ao limite de escoamento viscoso. Com o aumento de  $s^+$  - que pode ser entendido como o aumento do espaçamento real  $s$ , o aumento da velocidade do escoamento ou a diminuição da viscosidade do fluido - aumenta-se também a diferença de alturas de protusão  $\Delta h = h_l - h_c$ , onde  $h_l$  é a distância vertical entre o pico da ranhura e a origem do escoamento longitudinal e  $h_c$  é a distância vertical entre o pico da ranhura e a origem do escoamento transversal (ou cruzado), como mostrado na Figura 2.7. Para uma interação viscosa, espera-se de fato este comportamento linear. O aumento de espessura da subcamada laminar é igual a esta diferença  $\Delta h$  [22]. Com valores maiores do número de Reynolds, e de forma equivalente maior  $s^+$ , o escoamento deixa de ser do tipo Couette e a maior área "molhada" das ranhuras modifica este comportamento linear inicial, levando a um comportamento de escoamento sobre superfícies rugosas.

O trabalho numérico via *DNS* (Simulação Numérica Direta) de GARCÍA-MAYORAL & JIMÉNEZ [24] possuiu como objetivo compreender a estrutura da camada limite próxima à parede na região de "quebra" do regime linear, que é justamente o ponto ótimo onde a redução de arrasto atinge um máximo. Segundo eles, não foi observado o que teorias anteriores previram - que a partir de um  $s^+$  ótimo haveriam formações de vórtices longitudinais no interior da ranhura, levando a um aumento do cisalhamento na parede. O observado foi a formação de instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz com vórtices na direção transversal. Porém estas estruturas nunca foram observadas experimentalmente.



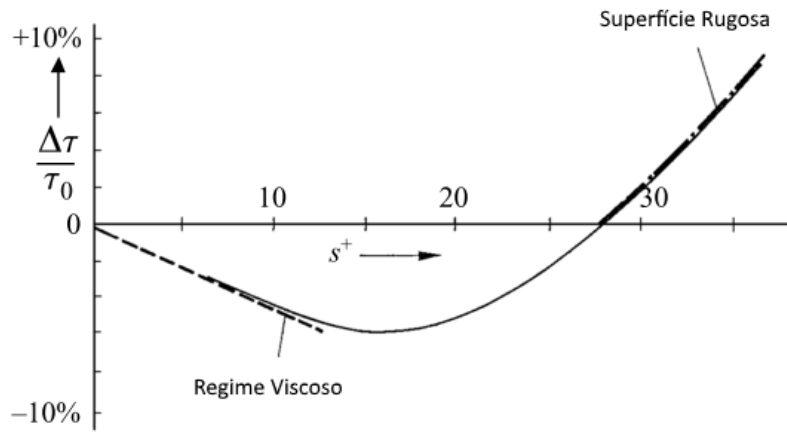


Figura 2.9: Estrutura geral da curva de redução de arrasto (adaptado de Bechert *et. al.* 1997a [22])

Portanto, existe um ponto de mínimo na curva da Figura 2.9, e segundo a maioria dos trabalhos revisados este valor encontra-se aproximadamente na faixa de  $s^+$  entre [10;20]. Logo este será o valor alvo para a fabricação das placas com ranhuras longitudinais deste trabalho.

# Capítulo 3

## Metodologia Experimental

### 3.1 Formulação do Problema

Como apresentado na seção 1.1, a redução do arrasto de atrito promove diversos benefícios em variados problemas de engenharia. Reduzir arrasto significa diminuir o consumo energético de um sistema, seja ele um processo mecânico (por exemplo, o transporte aquaviário) ou térmico (como o escoamento em tubulações para resfriamento ou geração de calor).

Logo, utilizando superfícies com ranhuras longitudinais, como justificado na Seção 1.3, busca-se determinar quais serão seus efeitos no arrasto de atrito. Espera-se que elas promovam uma redução do mesmo, assim como relatado na literatura e revisado na seção 2.4.

Sabe-se que a redução de arrasto é observada para valores ótimos de  $s^+$  (Equação 2.1), que relaciona sua geometria e o escoamento na qual ela se encontra. Então, o primeiro passo deste trabalho é tentar reproduzir este fenômeno, alcançando uma redução de arrasto em acordo com o que é descrito na literatura.

Contudo, apesar de ser possível atingir reduções com valores superiores a 10%, não existe ainda concordância na literatura sobre os mecanismos que levam a esta redução.

Então, o segundo passo deste trabalho é aplicar técnicas capazes de permitir investigações locais do escoamento, a fim de compreender principalmente o que ocorre com as características quantitativas da turbulência do escoamento na presença de ranhuras longitudinais. Através de técnicas relativamente simples, poderão ser analisados os efeitos da introdução das ranhuras na dinâmica das estruturas coerentes da turbulência. A partir dessa caracterização, pode-se discutir com maior embasamento o que leva à redução observada na utilização de ranhuras, caso esta redução ocorra.

Para investigar este problema, serão comparados os escoamentos internos em

um canal retangular formado por paredes lisas e outro preenchido por paredes com ranhuras longitudinais. A seção dedicada à metodologia tratará com mais detalhe o experimento realizado.

## 3.2 Escoamento sobre dois planos

Podemos determinar teoricamente a tensão de cisalhamento num escoamento sobre dois planos a partir da equação integral de quantidade de movimento para uma camada limite incompressível. A partir da definição da espessura de deslocamento e de quantidade de movimento da camada limite ( $\delta_1$  e  $\delta_2$  respectivamente), podemos escrever a Equação 3.1.

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{d}{dx}(U^2\delta_2) + \delta_1 U \frac{dU}{dx} \quad (3.1)$$

onde  $U$  é a velocidade do escoamento livre (fora da camada limite).

Pode se considerar uma distribuição de velocidades seguindo a lei de potência de  $\frac{1}{n}$  dentro do canal, na forma da Equação 3.2.

$$\frac{u}{U_{max}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/n} \quad (3.2)$$

onde  $\delta$  denota a espessura da camada limite. No caso deste trabalho considera-se esta altura como metade do canal e  $U = U_{max}$  que é a velocidade máxima ocorrendo à meia-altura do canal. Considerando que a espessura de quantidade de movimento  $\delta_2$  seja dada pela Equação 3.3, podemos escrever uma expressão geral para a tensão de cisalhamento local, dada pela Equação 3.4 [25].

$$\frac{\delta_2}{\delta} = \frac{n}{(1+n)(2+n)} \quad (3.3)$$

$$\tau_w = 0,0128 \rho U_{max}^2 \left(\frac{U_{max} \delta_2}{\nu}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad (3.4)$$

Partindo dos dados obtidos na literatura [26], considera-se que, aproximadamente,  $n = 7$  e que  $\bar{u}/U_{max} = 0,9$  para o canal liso. Esses dados foram confirmados pelas medições de LDA, como mostra a Figura 3.1. Com isso consegue-se obter teoricamente a tensão de cisalhamento para um canal retangular conhecendo-se sua geometria, a vazão do fluido e as condições termodinâmicas do mesmo.

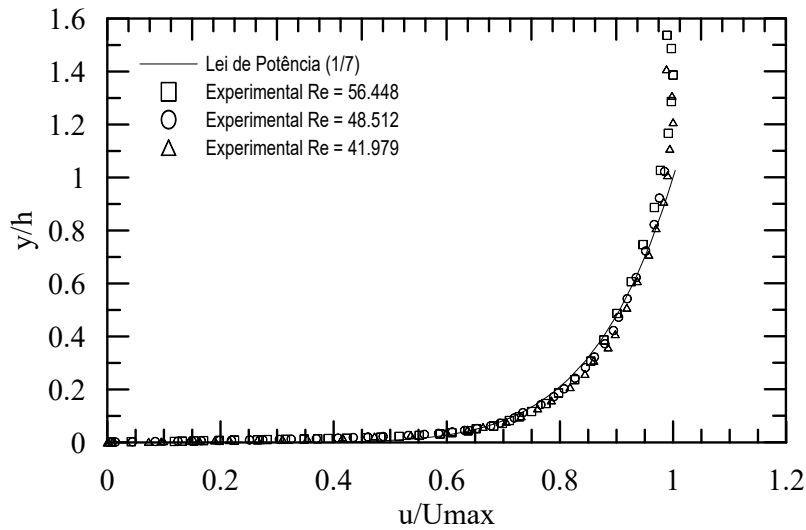


Figura 3.1: Comparação entre o perfil de velocidades e a lei de potência para o canal liso.

### 3.3 Aparato experimental

Para realização dos teste será utilizado um aparato experimental existente nas instalações do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos (NIDF) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

Este aparato consiste basicamente em um canal fechado retangular, que opera sob um circuito fechado de circulação de água. Este circuito está representado esquematicamente na Figura 3.2, onde temos os seguintes elementos e suas respectivas funções:

- 1 - **Canal fechado retangular** Elemento principal do experimento, é nele que o escoamento será estudado. A Seção 3.3.1 é dedicada à sua caracterização.
- 2 - **Tanque Superior** Reservatório elevado contendo água que escoo através de tubulação conectada ao canal fechado retangular por meio de energia potencial gravitacional.
- 3 - **Tanque inferior** Reservatório que comporta a água que sai do canal fechado retangular.
- 4 - **Bomba de elevação** Equipamento responsável por elevar a água até o tanque superior através da conversão de energia cinética em energia potencial gravitacional novamente.

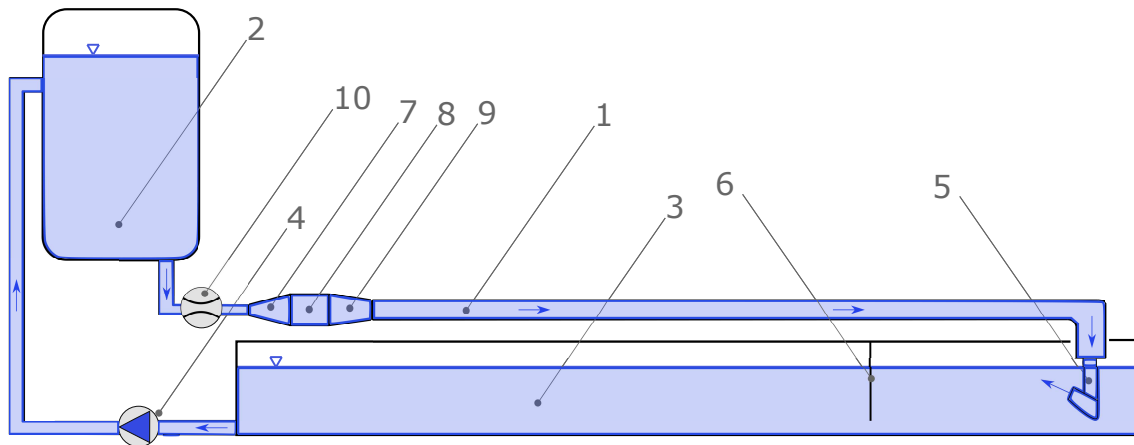


Figura 3.2: Esquemático do circuito fechado de circulação de água, equipado com o canal fechado retangular, no qual o escoamento foi analisado.

- 5 - Descarga submersa** Tubulação que direciona a água provinda do canal fechado retangular na direção da superfície livre no interior do tanque inferior de modo a direcionar eventuais bolhas de ar presentes no escoamento para cima.
- 6 - Antepara de separação de bolhas** Parede instalada no interior do tanque inferior com objetivo de impedir que eventuais bolhas no escoamento sejam carregadas de volta ao Tanque Superior.
- 7 - Expansão** Elemento que realiza transição geométrica da tubulação de 4 polegadas que vem do tanque superior em um formato retangular nas dimensões da colmeia.
- 8 - Colméia** Duto retangular composto de diversos elementos cilíndricos no interior, responsáveis por alinhar o escoamento, reduzindo recirculações e garantindo assim a uniformidade do escoamento.
- 9 - Contração** Elemento que reduz a seção transversal proveniente da colmeia para o canal fechado retangular (150 por 20 mm). Também possui o papel de ajudar na uniformização do escoamento.
- 10 - Medidor de vazão** Sensor responsável por fornecer dados da vazão instantânea que passa pelo circuito fechado.

### 3.3.1 Canal fechado retangular

Este aparato experimental consiste em um canal fechado de paredes transparentes feitas de acrílico, utilizando água como fluido, como mostra a Figura 3.3.

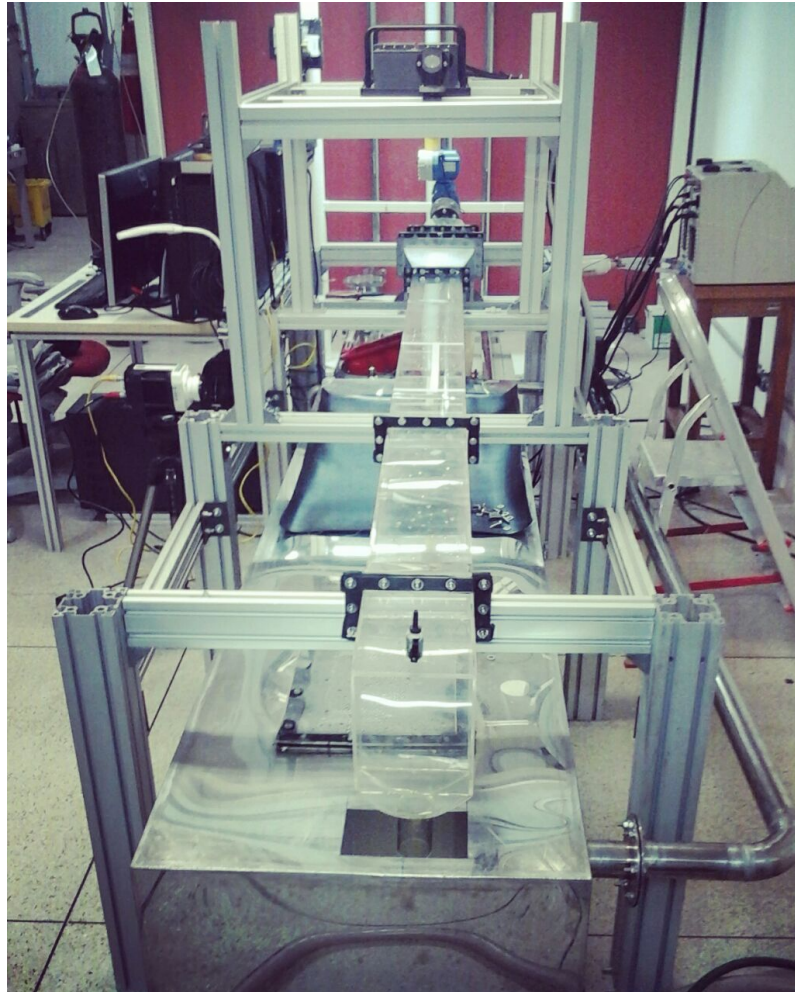


Figura 3.3: Foto do canal d'água retangular que foi utilizado nos experimentos.

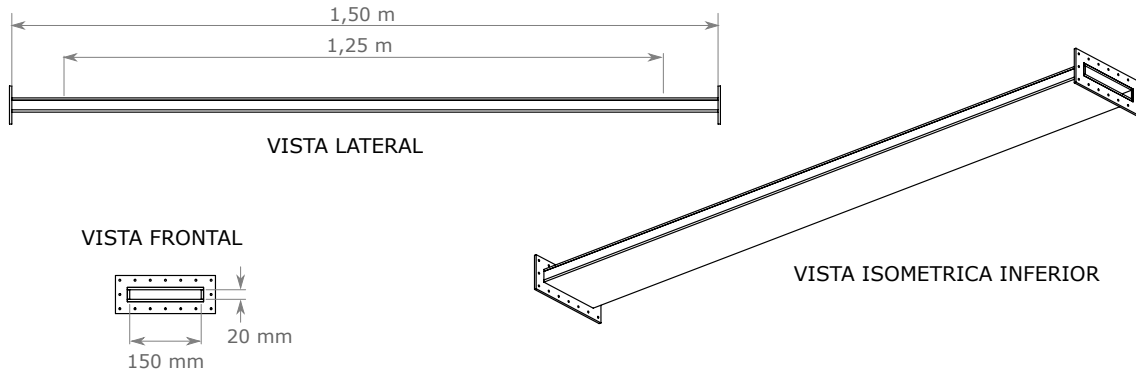


Figura 3.4: Esquemático e dimensões principais do canal liso.

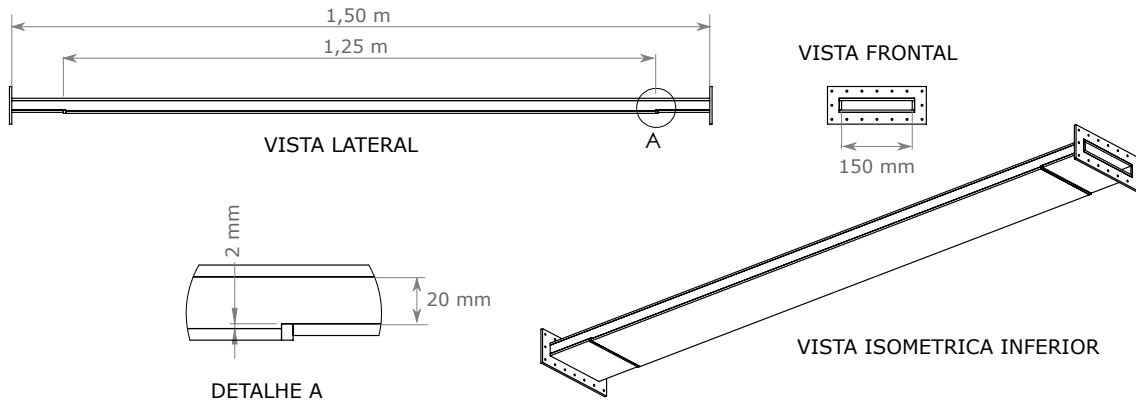


Figura 3.5: Esquemático e dimensões principais do canal com degrau.

Foram construídos dois canais diferentes: um simples com paredes lisas de acrílico e outro com um degrau para receber as superfícies com ranhuras longitudinais. A seção transversal do canal, que é a mesma para o canal liso e o canal com degrau, possui dimensões internas de 150 mm de largura por 20 mm de altura (identificados por  $w$  e  $2h$ , respectivamente).

O comprimento da área de testes, onde a pressão foi medida e as técnicas de velocimetria foram aplicadas, possui comprimento de aproximadamente 1,25 metros. Estas dimensões principais podem ser vistas para o liso e com degrau, respectivamente, nas Figuras 3.4 e 3.5.

Como o efeito de redução de arrasto é ocasionado devido a mudanças estruturais do escoamento turbulento, esta faixa de Reynolds garante que o canal está trabalhando no regime correto. Segundo ORSZAG [27], o número de Reynolds crítico até o qual o escoamento de Poiseuille entre dois planos é estável e laminar é de aproximadamente  $Re_c = 5.772$ , baseado na meia-altura do canal. Esta solução é feita ao realizar aproximações das equações de Orr-Sommerfeld usando expansões polinomiais de Chebyshev.

O número de Reynolds na seção de testes com base na meia-altura  $h$  do canal ( $Re_h$ ) varia entre 10.000 a 20.000 (ver Figura 3.7 para definições geométricas do canal). Este valor é calculado a partir de uma velocidade média através da vazão

média  $\bar{Q}$ , definida pela Equação 3.5 onde  $w$  é a largura do canal. Com a vazão obtida pelo medidor de vazão utilizado nos experimentos, calcula-se o  $Re_{2h}$  como pode ser visto na Equação 3.6 (onde  $A$  é a área transversal da seção de testes).

$$\bar{Q} = \int_0^{2h} u(y) w dy \quad (3.5)$$

$$Re_h = \frac{(\bar{Q}/A) h}{\nu} \quad (3.6)$$

Logo, sob o ponto de vista teórico, o canal deve apresentar escoamento turbulento nas suas condições de operação.

### 3.3.2 Determinação da geometria das ranhuras longitudinais

Sendo o parâmetro  $s^+$  a largura adimensional da ranhura um valor independente do formato da geometria da ranhura, é necessário definir qual será a melhor topologia. No trabalho de BECHERT *et. al.* em que foram testadas ranhuras do tipo triangular, semi-circular, lâmina e trapezoidal [22], foi observado que o melhor desempenho foi obtido pelas ranhuras do tipo lâmina. Isto ocorre, segundo o autor, porque esta geometria favorece a maior razão  $\Delta h/s$  dentre todas geometrias. Esta razão é diretamente proporcional ao regime linear na curva de redução (Figura 2.9), logo um maior  $\Delta h/s$  leva, a princípio, a um melhor desempenho. Porém, devido a efeitos de *sloshing* dentro da ranhura, existe um valor limite  $(\Delta h/s)_{max}$ , principalmente quando a altura da ranhura é alta. Para a configuração do tipo lâmina, um alto  $\Delta h/s$  é obtido com ranhuras de relativamente baixa altura, sendo a razão entre espaçamento transversal e altura ótima de  $h/s = 0,5$ .

Além disso, sabe-se que quanto menor for a espessura da lâmina, maior será a redução do arrasto. Isto pode ser observado na Figura 3.6, onde o desempenho de redução de arrasto melhora com menores valores da razão entre a espessura da lâmina ( $t$ ) e o espaçamento entre ranhuras ( $s$ ).

Reescrevendo a definição do espaçamento transversal das ranhuras em coordenadas internas (Equação 3.7), nota-se que falta definir a velocidade de atrito  $u_\tau$ .

$$s^+ = \frac{su_\tau}{\nu} \quad (3.7)$$

A velocidade de atrito é definida segundo a Equação 3.8.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.8)$$

onde  $\tau_w$  é a tensão na parede e  $\rho$  é a densidade do fluido.



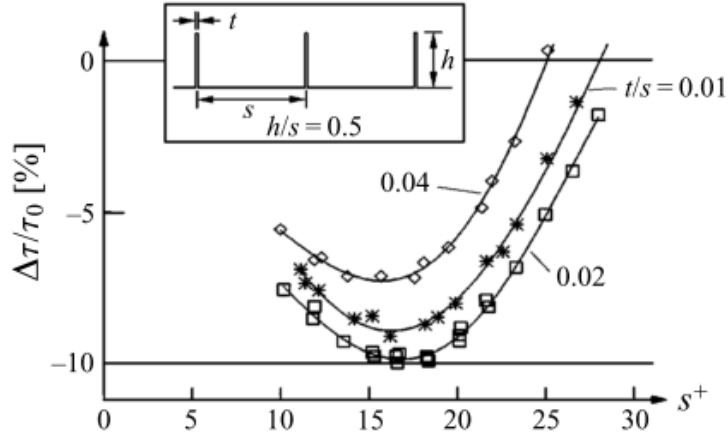


Figura 3.6: Variação da espessura de ranhuras do tipo lâmina. (adaptado de Bechert *et. al.* 1997a [22])

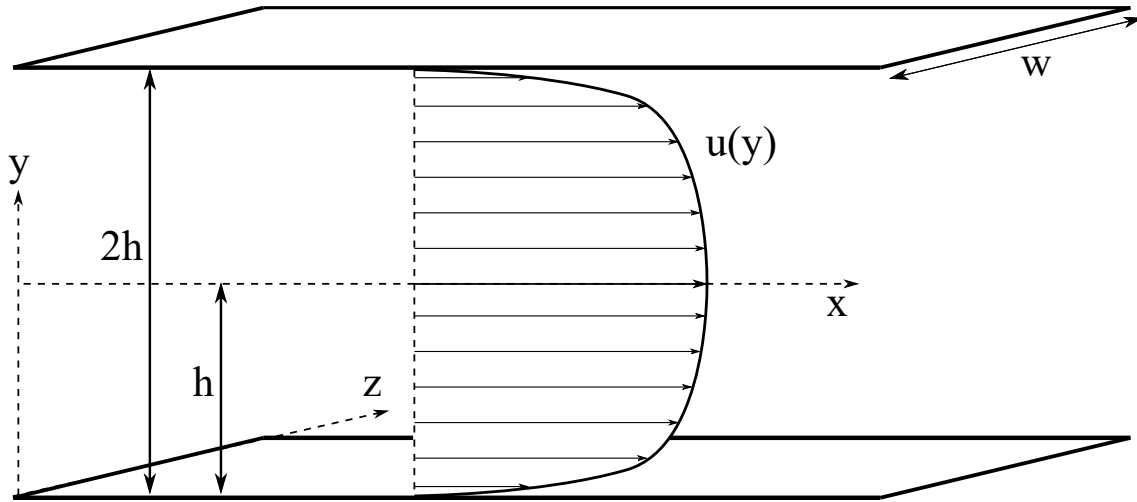


Figura 3.7: Escoamento totalmente desenvolvido entre dois planos paralelos.

Antes da fabricação das superfícies com ranhuras, não se conhecia de antemão o valor experimental da tensão na parede. Logo, deve ser realizada uma estimativa desta tensão  $\tau_w$ .

A velocidade média  $U$  na seção de testes pode ser calculada pela Equação 3.9.

$$U = \frac{\bar{Q}}{A} \quad (3.9)$$

onde  $\bar{Q}$  é a vazão média do canal.

Utilizando como referência a Figura 3.7, podemos também obter  $U$  através da Equação 3.10.

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h u(y) dy \quad (3.10)$$

Estimando-se a vazão média  $\bar{Q}$  do canal (através de experimentos realizados

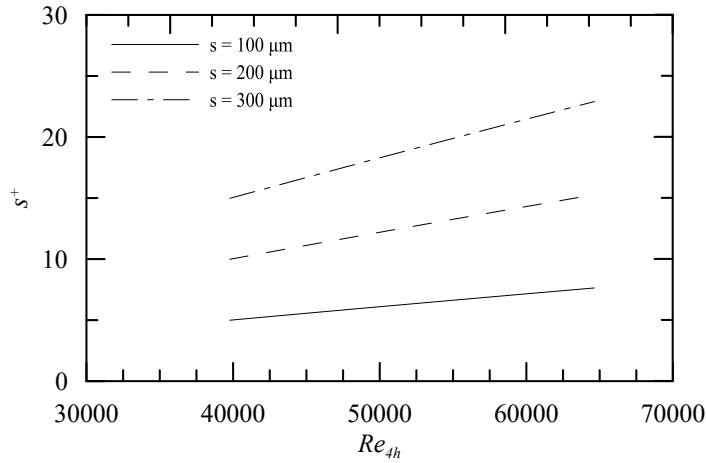


Figura 3.8: Variação de  $s^+$  em função de  $Re_{4h}$  para diferentes valores dimensionais de largura das ranhuras.

anteriormente em outro projeto), obtém-se a velocidade média do canal através da Equação 3.9. O cálculo do número de Reynolds com  $4h$  como comprimento característico, dado pela Equação 3.18.

A obtenção da tensão na parede para cada  $Re_{4h}$  se dá através da Equação 3.4. Com isso, pode-se recuperar o valor da velocidade de atrito  $u_\tau$  através da Equação 2.2, e, em seguida, o valor de largura adimensional  $s^+$  para uma dada largura  $s$ , através da Equação 3.7.

Utilizou-se como referência para os cálculos iniciais, água a  $25^\circ\text{C}$ , com viscosidade cinemática equivalente de  $0,894 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  e densidade de  $995,958 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Além disso, medições do canal liso construído, mostram que a seção transversal interna do mesmo possui largura  $w = 151 \pm 0,5 \text{ mm}$  e altura  $2h = 20 \pm 0,2 \text{ mm}$ . Estes valores influenciarão a área da seção transversal e conseqüentemente o  $Re_{4h}$ , que depende do valor de velocidade média  $U$  do canal.

Dadas as vazões típicas do canal fechado retangular, sabe-se que o canal opera na faixa de Reynolds entre  $Re_{4h} \in [30 \cdot 10^3; 60 \cdot 10^3]$ . Graficamente, podemos então visualizar a faixa de  $s^+$  para uma dada largura  $s$  em vários  $Re_{4h}$ , como pode ser visto na Figura 3.8.

Com o auxílio deste gráfico, determina-se então que larguras  $s \in [100, 300] \mu\text{m}$  fornecem o valor ótimo da largura adimensional aproximada por  $s^+ \in [5, 20]$ , como foi mostrado na Figura 2.9.

### 3.3.3 Fabricação das superfícies com ranhuras longitudinais

Para a fabricação das placas com ranhuras longitudinais, foi utilizado uma máquina de *engravamento* e corte a laser  $\text{CO}_2$  modelo *Gravograph LS100* (Figura 3.9) do Laboratório de Nano e Microfluídica e de Microsistemas (LabMEMS COPPE/UFRJ).



Figura 3.9: Máquina de gravamento e corte a laser  $CO_2$  modelo *Gravograph LS100*.

Inicialmente foram feitas tentativas de se fabricar as ranhuras através de usinagem numérica com uma máquina do tipo *CNC* microfresadora. Contudo, devido às dimensões diminutas de largura ótima das ranhuras (em torno de  $200\ \mu m$ ), os esforços estruturais nas fresas faziam com as mesmas falhassem, ora com danos parciais, ora com completa destruição das mesmas. Foram testados diversas velocidades de avanço e rotações consideradas ótimas, além de microfresas com número de *dentes* distintos. Mesmo assim, a fabricação mostrou-se complexa e cara, levando, assim, à opção de fabricar com laser.

O gravamento foi realizado em placas de acrílico na cor preta de  $2\text{mm}$  de espessura. No total, foram utilizadas 4 placas (devido às dimensões da máquina de gravamento) para que a região de  $1,25\text{m}$  da seção de testes do canal fosse preenchida, como visto na Figura 3.5. Ao todo foram construídas 2 placas de  $400 \times 150\ \text{mm}$ , uma placa de  $300 \times 150\ \text{mm}$  e outra última placa menor de  $150 \times 150\ \text{mm}$ , totalizando a área de interesse de  $1250 \times 150\ \text{mm}$ .

A potência do raio laser e a velocidade de avanço do cabeçote do laser foram ajustados de forma que a ranhura possuísse a melhor configuração geométrica possível. Devido à transferência de calor do laser ao acrílico, o espaçamento entre ranhuras adjacentes teve que ser aumentado para que as deformações térmicas não prejudicassem a sua topologia. Desta forma, a geometria do tipo lâmina, considerada ótima, não foi atingida.

A Figura 3.10 mostra uma vista superior da placa, com placa lisa antes e depois de sofrer o engrave, 3.10a e 3.10b respectivamente. Estas imagens foram obtidas com a utilização de um microscópio digital *Hirox KH-8700* equipado com conjunto de lentes com magnificação máxima de  $2500\times$ , modelo *Hirox MXG-2500 REZ*. Pode-se notar que a placa lisa possui uma superfície bastante regular e com poucas falhas.

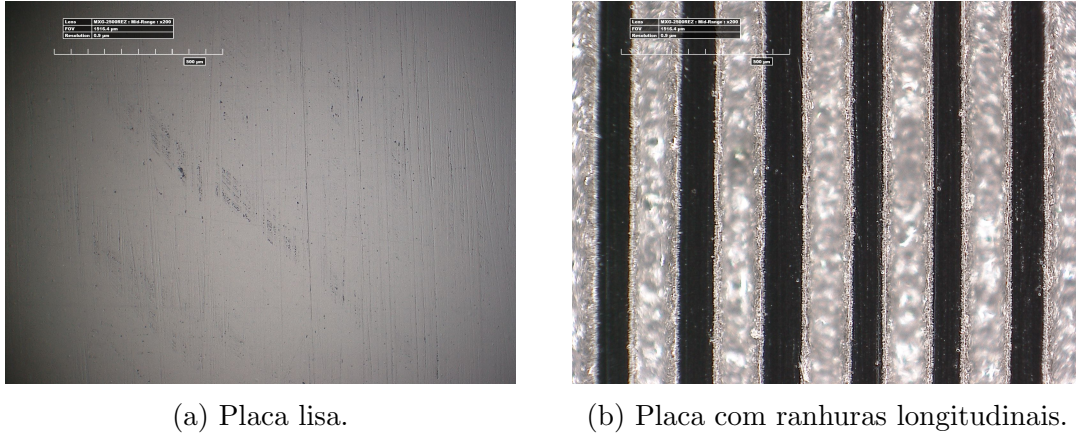


Figura 3.10: Comparação entre placas de acrílico antes e depois da fabricação das ranhuras através do laser. Magnificação de 200x, FOV de  $1516,4 \mu m$  e resolução de  $0,9 \mu m$ .

O programa de controle digital das imagens do microscópio permite que, a partir de um controle automático do foco, seja reconstruído uma superfície 3D da geometria das ranhuras. A imagem mostrada na Figura 3.11 indica que a topologia tem um formato similar a de uma curva gaussiana. De fato, o laser, por ser um feixe de radiação eletromagnética monocromática, pode ser aproximado como um feixe de Gauss. Logo, o perfil de intensidade da potência do laser faz com que a ranhura apresente este formato.

Na Figura 3.11 pode ser visto que foi realizado um corte transversal na reconstrução tridimensional da superfície. A curva de interseção deste plano transversal com a superfície foi esboçado na Figura 3.12. Utilizando medições das ranhuras em três locais distintos (região à montante, meio e jusante) de cada uma das três placas, forneceram valores médios e desvios padrões para largura ( $s$ ), altura ( $h$ ), espaçamento entre ranhuras ( $w_r$ ) e rugosidade ( $\epsilon$ ). As ranhuras são longitudinais, ou seja, na figura, a direção do escoamento é normal à página.

As placas foram mantidas fixas na máquina enquanto o engrave era realizado. Contudo, as vibrações e folgas inerentes ao sistema de movimentação das partes mecânicas do cabeçote do laser causam uma não-uniformidade de espaçamento entre ranhuras, como pode ser percebido na Figura 3.10b.

Segundo o CHOI [12], os resultados sugerem que as estruturas turbulentas próximas à parede respondem a uma mudança da condição de superfície de liso para ranhura em 400 unidades de parede. Utilizando então a velocidade média mínima do canal e reescrevendo e aplicando nas equações de estimativa de  $\tau_w$ , obtém-se uma distância longitudinal média de  $5,6 \text{ mm}$  para que o escoamento perceba a presença das ranhuras. Como a seção de testes possui  $1,25 \text{ m}$  de comprimento, a distância mínima proposta por CHOI [12] é obtida com bastante folga.

A Figura 3.13 mostra o resultado final da fabricação das ranhuras sobre a placa

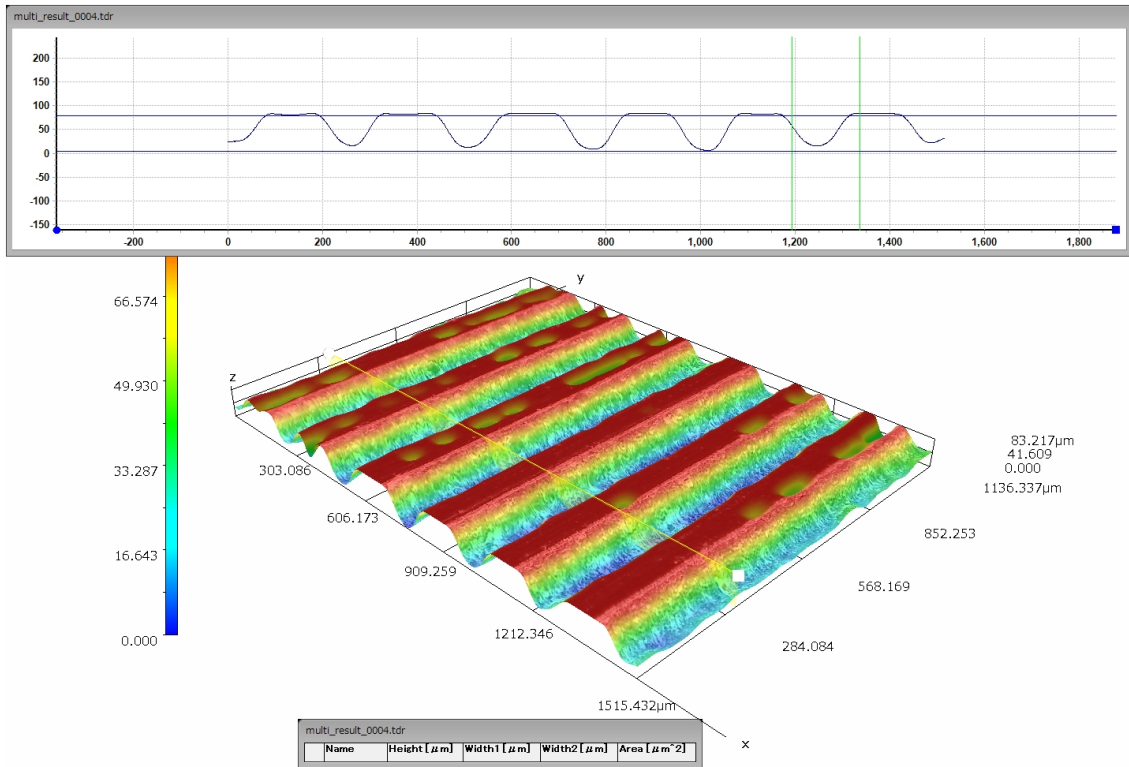


Figura 3.11: Reconstrução da superfície 3D da ranhura fabricada.

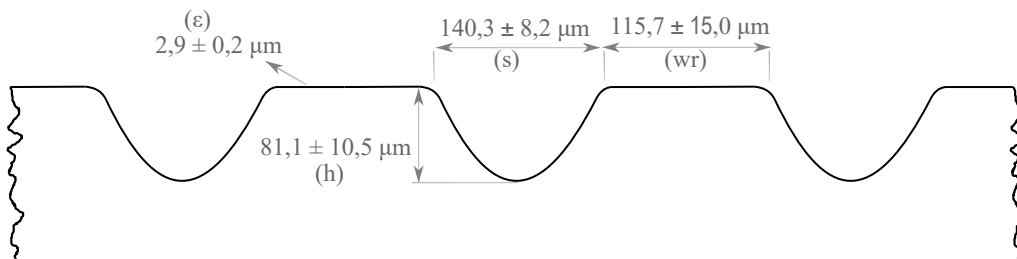


Figura 3.12: Configuração e dimensões finais da ranhura utilizada nos experimentos. Valores médios e desvios padrões para largura (s), altura (h), espaçamento entre ranhuras (wr) e rugosidade ( $\epsilon$ ). A direção do escoamento é normal à página.

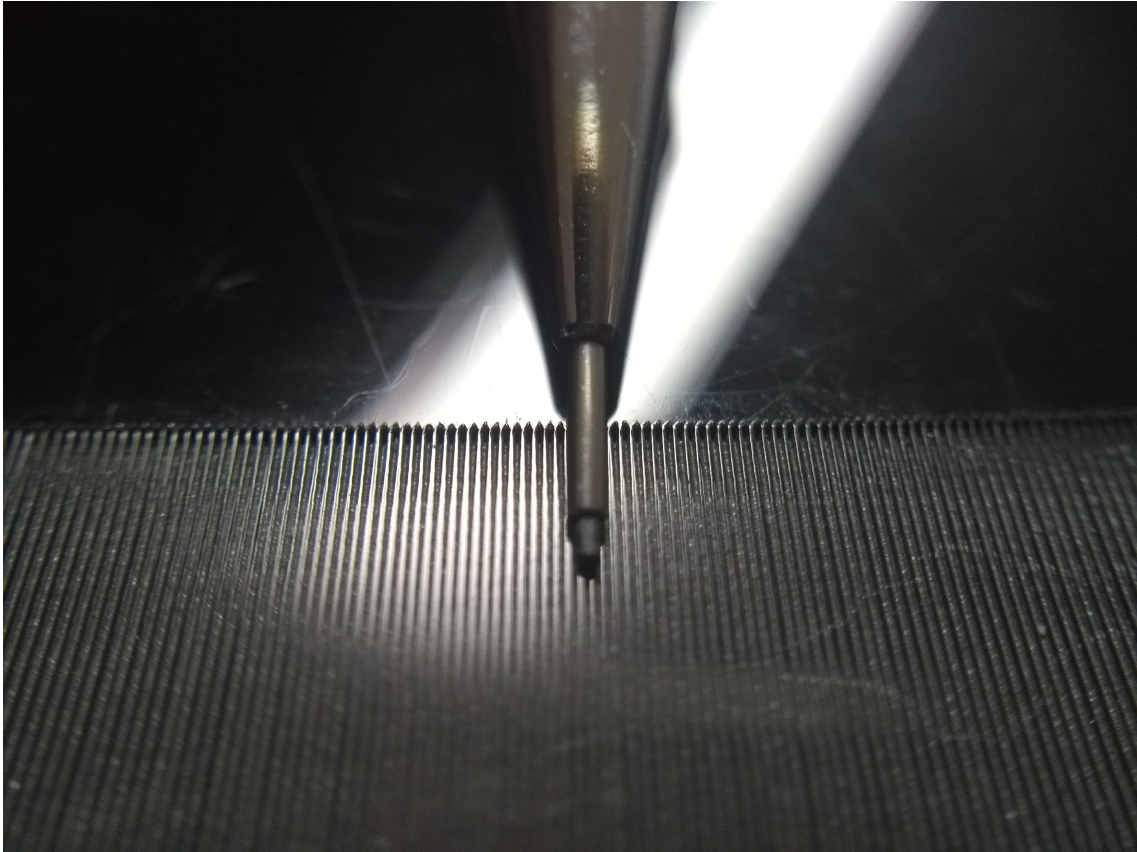


Figura 3.13: Ranhuras fabricadas sobre placa de acrílico preta, comparação com lapiseira com grafite tamanho 0.5.

de acrílico na cor preta. Para facilitar a compreensão do tamanho das ranhuras, foi posicionado junto à placa uma lapiseira com grafite tamanho 0.5.

As placas fabricadas foram montadas no interior no canal retangular com degrau. A Figura 3.14 mostra a montagem das placas no interior do canal. Cada placa tem 2 mm de espessura e foi colada ao fundo do canal utilizando cola do tipo S-330 (*Metacrilato de Metila*). Foram tomados cuidados para minimizar o degrau criado entre duas placas adjacentes.

A transição do escoamento entre as placa lisa e rugosa foi obtida sem nenhum degrau entre a superfície lise e o plano das cristas das ranhuras, como pode ser visto esquematicamente na Figura 3.15.

### 3.3.4 Sensores e acessórios do canal

A seção de teste do canal foi projetada de forma a permitir um escoamento paralelo, de velocidade constante e com o menor grau de perturbações devido a geometria retangular possível. Diversos elementos compõem o canal de forma a garantir que o escoamento atenda a estes requisitos.

Para realizar a transição entre a tubulação circular que vem do reservatório de

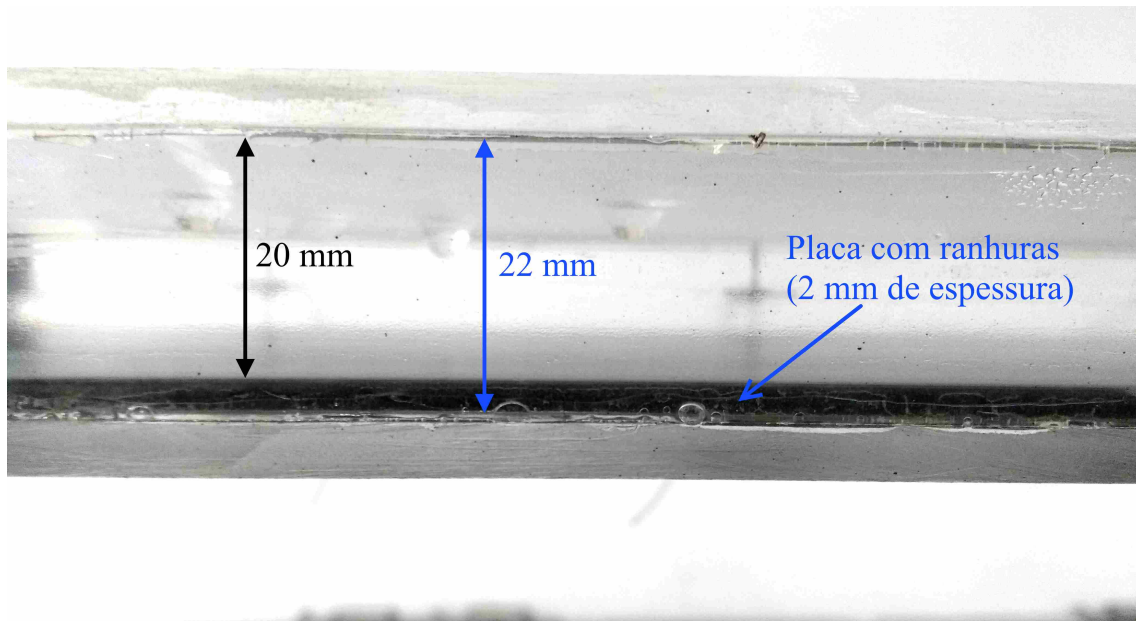


Figura 3.14: Vista lateral do canal com placa com ranhuras longitudinais montada em seu interior. Escoamento da esquerda para a direita.

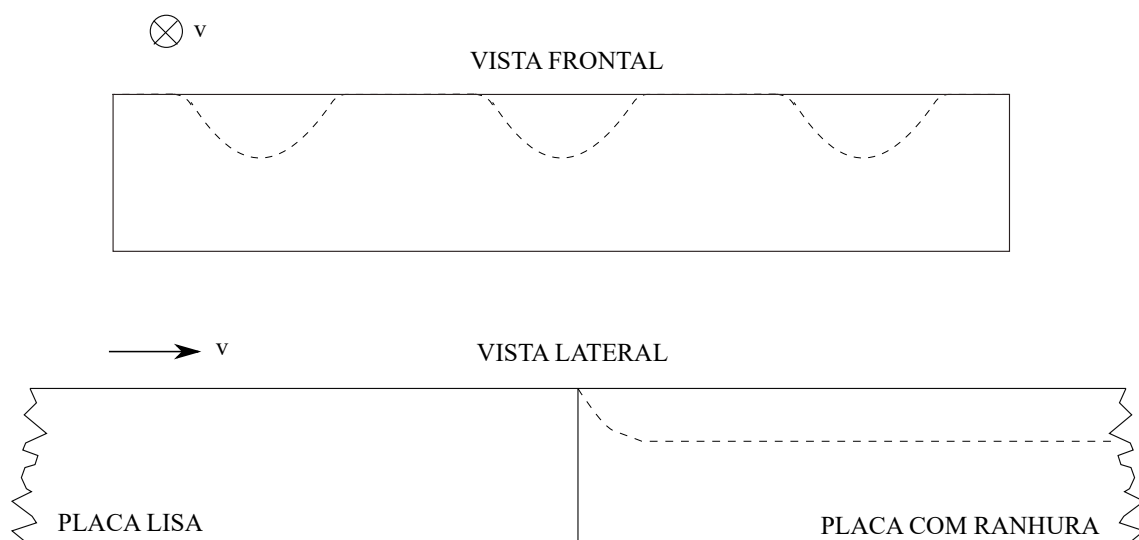


Figura 3.15: Representação esquemática da transição entre a superfície lisa e com ranhuras. Velocidade do escoamento representada por vetor  $v$ . Figura fora de escala.

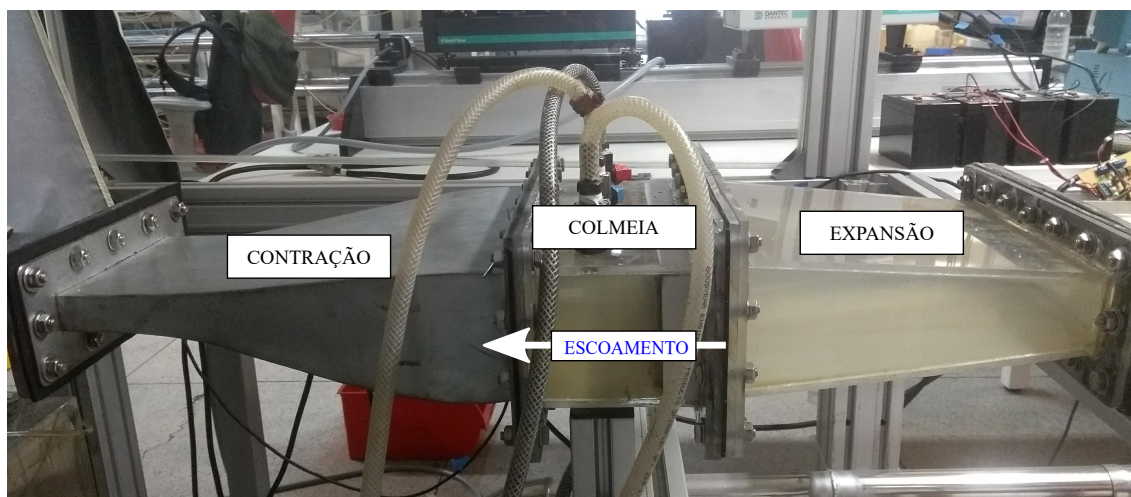


Figura 3.16: Elementos de estabilização do escoamento no canal. Sentido do escoamento da direita para esquerda.

água e o canal retangular, é utilizado uma *expansão*. Esta expansão tem o papel de servir como uma câmara de estabilização para reduzir a velocidade do fluido antes de entrar na colméia, convertendo a energia cinética em energia de pressão. A *colméia* é feita de canudos de plástico gerando uma porosidade que garante um escoamento espaçado, uniforme e estável. Uma *contração* de aço inoxidável que acelera o escoamento após passagem pela colméia, reduzindo a turbulência e não uniformidades para a final entrada no canal retangular e posterior seção de teste. Alguns destes elementos podem ser visualizados na Figura 3.16.

O canal é composto por um ciclo fechado alimentado por um reservatório com capacidade para 500 litros (tanque superior) localizado a 3 metros de altura acima da entrada do canal, ver Figura 3.17. Este reservatório consegue manter pressão equivalente à atmosférica. Por ação da gravidade o fluido é escoado por uma tubulação de aço inoxidável de 4 polegadas até a entrada do canal. O nível do tanque superior é mantido constante em todas as medições, para qualquer valor de vazão desejado. O nível correspondia a aproximadamente 90% de sua capacidade total.

Após a água escoar pelo canal retangular, existe um reservatório que armazena o fluido antes de ser bombeado de volta ao tanque superior. A bomba trifásica utilizada é do tipo centrífuga *DANCOR CAM-W16* de 2 CV de potência e com altura manométrica total máxima de 25 mca.

O controle de rotação da bomba foi realizado com um inversor de frequência modelo *Schneider Electric ATV312HU15M2* (Figura 3.18a).

Foram utilizados pontos de purga de ar em algumas regiões do circuito para que houvesse a retirada eventual de bolhas de ar presentes no escoamento. Estas purgas ficam localizadas na região superior do canal devido à tendência do ar de se deslocar numa trajetória vertical para cima. Após a retirada completa de qualquer ar presente





Figura 3.17: Tanque Superior com capacidade de 500 litros.



(a) Inversor.



(b) Medidor de vazão.

Figura 3.18: Inversor utilizado no controle da potência entregue pela bomba centrífuga (a). Medidor de vazão do circuito fechado (b).

no escoamento, as purgas são fechadas e as medições se iniciam. Na Figura 3.16 é possível identificar as purgas localizadas na peça que compõe a colméia.

O controle de temperatura da água foi feito a partir de termômetro submerso no tanque inferior (ver Figura 3.2). O termohigrômetro utilizado é de modelo *Siberius HTC-2*. A temperatura indicada pelo termômetro ( $t_i$ ) deve ser corrigida através da curva calibração do mesmo, fornecendo a temperatura corrigida ( $t_c$ ), seguindo Equação 3.11.

$$t_c = a_1 t_i + a_0 \quad (3.11)$$

A temperatura foi utilizada para o cálculo da densidade ( $\rho$ ) e viscosidade cinemática ( $\nu$ ) da água, através de polinômios interpoladores fornecidos pela ISO [28] e por HUBER *et. al.* [29], respectivamente. Para a densidade, o ajuste é feita com um polinômio de grau 4 mais um parâmetro  $dW$  de erro na determinação da massa específica da água devido à aproximação da equação e às impurezas. Para a viscosidade, o polinômio tem grau 2. Os coeficientes destes polinômios são inseridos nas Equações 3.12 e 3.13 respectivamente.

$$\rho = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + dW \quad (3.12)$$

$$\nu = b_0 + b_1T + b_2T^2 \quad (3.13)$$

Os valores de vazão serão determinados por um medidor de vazão eletromagnético com saída de pulsos *Endress+Hauser PROMAG 10D50* montado a montante da expansão (Figura 3.18b). A vazão é utilizada para o cálculo da velocidade média do canal através da Equação 3.9.

Os certificados de calibração do termômetro e medidor de vazão, contendo os coeficientes de calibração, encontram-se no Apêndice A.

### 3.4 Pressão

As medições de pressão foram realizadas com um manômetro diferencial modelo *Endress+Hauser Deltabar M* com faixa de medição de 0 – 10 *mbar*. Este sensor passou por um processo de calibração que consiste em duas etapas. Na primeira são comparados os valores de pressão indicados pelo manômetro, e uma pressão conhecida de uma coluna d'água. Através do método dos mínimos quadrados, são calculados os coeficientes do polinômio de terceiro grau que corresponde à Equação 3.14, onde  $P_C$  é a pressão conhecida da coluna e  $P_M$  é a pressão indicada pelo manômetro.

$$P_C = a_0P_M^3 + a_1P_M^2 + a_2P_M + a_3 \quad (3.14)$$

A segunda etapa – a calibração eletrônica – promove a correspondência entre os valores de saída em tensão dados pelo manômetro e o valor de pressão. Novamente através de um ajuste por mínimos quadrados, é calculada a reta que melhor representa a relação entre a tensão  $E$  [V] e a pressão  $P$  [*mbar*], já que elas são linearmente correspondentes, como mostra a Equação 3.15.

$$P = aE + b \quad (3.15)$$

Pontos de tomada de pressão foram instalados na parede lateral do canal. Esses pontos são compostos por 8 agulhas de 0,7 *mm* de diâmetro externo, montadas de tal forma que o furo em contato com o escoamento dentro do canal estivesse faceando a parede lateral, de modo a não interferir no escoamento. A primeira agulha localiza-se a 460 *mm* da entrada do canal retangular após a contração. O espaçamento médio entre agulhas é de  $120 \pm 0,9$  *mm*. As agulhas foram posicionadas exatamente à meia-altura do canal. A Figura 3.19 mostra esquematicamente como as agulhas foram posicionadas no canal.

O manômetro possui uma entrada para alta e outra para baixa pressão. Logo,

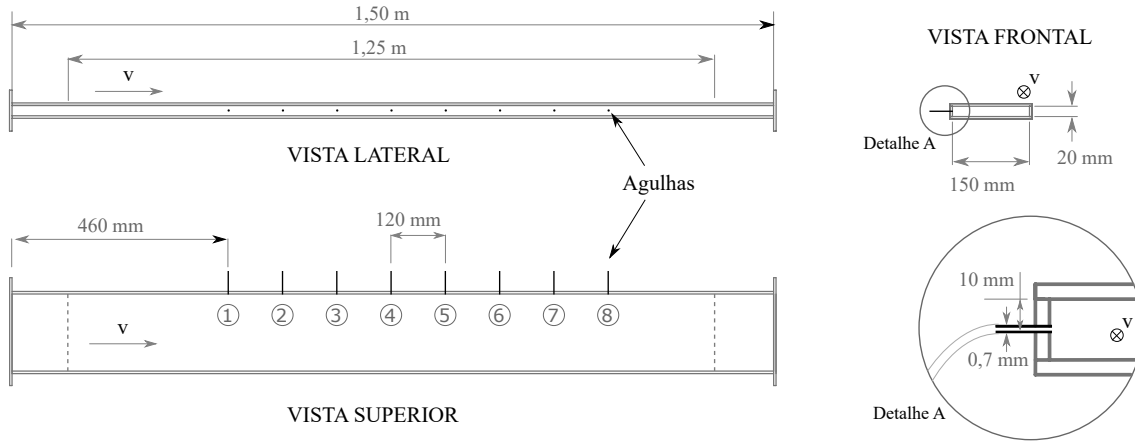


Figura 3.19: Posicionamento das tomadas de pressão no canal. Vetor  $v$  mostra o sentido do escoamento no interior do canal. Figura fora de escala.

um sistema de controle por válvulas, nomeado de *árvore*, foi montado para fornecer diferentes combinações de pares de tomada de pressão, sendo uma agulha para alta pressão e outra para baixa. Por exemplo, o par 2-7 é a medida da diferença de pressão entre as tomadas 2 (alta) e 7 (baixa), já que no canal há queda de pressão. Este sistema pode ser visualizado na Figura 3.20.

Para cada número de Reynolds do escoamento no canal, ou seja, para cada combinação de condição de vazão e temperatura, foram feitas as seguintes medidas:

- combinações de pares de tomada de pressão, fornecendo um  $\Delta P$  e a distância  $L$  entre as tomadas;
- 3 medições independentes de quedas de pressão obtidas em cada par, fornecendo uma queda de pressão média  $\Delta P$ ;
- 1 medida de vazão  $Q$  em cada par;
- 1 medida de temperatura  $T$  em cada par;

A cada rodada experimental, possuímos, então, várias temperaturas e vazões medidas. Realizando a média aritmética das temperaturas, obtém-se uma temperatura média que será utilizada para obter a densidade e a viscosidade média da água naquela condição, como visto nas Equações 3.12 e 3.13. A média aritmética das vazões fornece uma velocidade média no canal, como apresentado na Equação 3.9. Logo, consegue-se obter o número de Reynolds através da Equação 3.18.

Utilizando a Figura 3.21 como referência, sabemos que o balanço de forças na tubulação é dado pela Equação 3.16, onde  $P_1$  é a pressão na entrada e  $P_2$  na saída. A tensão na parede da tubulação é  $\tau_w$ .

A razão de aspecto do canal é de  $w / 2h > 7$ , que segundo DEAN [30], faz com que o escoamento no plano central do canal não seja perturbado devido a efeitos tri-

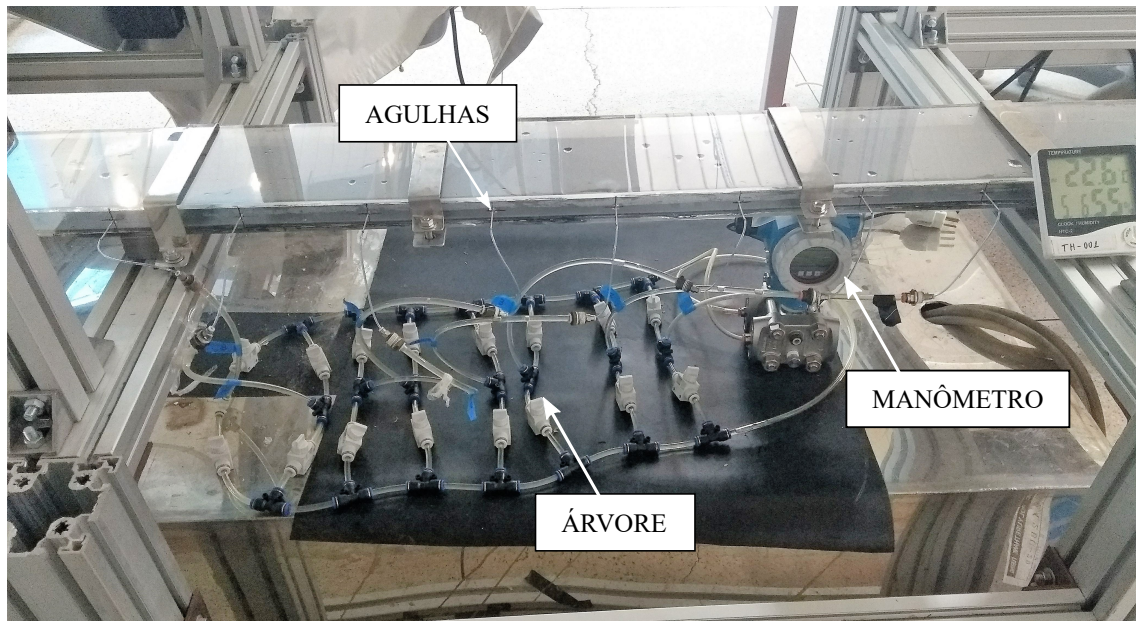


Figura 3.20: Sistema de tomada de pressão: agulhas, árvore e manômetro. Escoamento da direita para a esquerda.

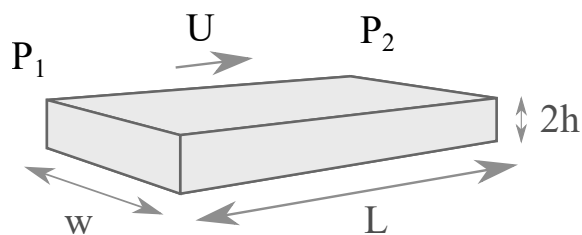


Figura 3.21: Variáveis de referência para balanço de forças em canal.

dimensionais. Se fizermos o balanço dem forças para o canal retangular, chegamos à Equação ??.

$$(P_1 - P_2) 2h w = \tau_w 2(w + 2h) L \quad (3.16)$$

Considerando um escoamento plano de Poiseuille, onde a largura do canal é muito maior que a altura, temos que  $wh/(w + 2h) \rightarrow h$  quando  $w \gg 2h$ . Logo, a tensão na parede do escoamento de Poiseuille pode ser dada por:

$$\tau_w = h \frac{-dP}{dx} \quad (3.17)$$

Todos os resultados apresentados neste trabalho considerarão Reynolds em função de  $4h$ , ou seja, o dobro da altura  $2h$  do canal dado pela Equação 3.18, a não ser quando previamente especificado.

$$Re_{4h} = \frac{U 4h}{\nu} \quad (3.18)$$

Os resultados de tensão de cisalhamento via medições de pressão foram calculado

através da Equação 3.17.

Os resultados de pressão serão apresentados em termos do *fator de atrito de Darcy* ( $f$ ), do engenheiro francês Henry Darcy (1803–1858), cujo experimento de escoamento em tubulações em 1857 estabeleceram os primeiros resultados sobre os efeitos da rugosidade.

Aplicando a continuidade de massa, energia e momento linear a um volume de controle em um escoamento viscoso de uma tubulação com diferença de pressão, obtém-se a relação da tensão de cisalhamento nas paredes internas e a perda de carga  $h_f$ . Da definição de  $f$ , podemos escrever a Equação 3.19, que relaciona a queda de pressão  $\Delta P$  com a distância entre os pontos de medida de pressão  $L$  e o fator de atrito  $f$ .

O comprimento característico equivalente ao diâmetro  $D$  para o canal retangular é o dobro de sua altura, ou  $4h$ . Então reescreve-se a relação de queda de pressão e distância entre tomadas para o presente caso.

$$\Delta P = \left[ \frac{\rho U^2}{2(4h)} f \right] L \quad (3.19)$$

No escoamento totalmente desenvolvido dentro do canal, o perfil de velocidade é constante (não varia longitudinalmente em  $x$ ), a tensão na parede é constante e a *pressão cai linearmente com  $x$* , segundo WHITE [31]. Logo, se plotarmos  $\Delta P$  contra  $L$ , devemos observar um relação linear entre estes dois parâmetros. De fato, como pode ser observado na Figura 3.22, os pontos de queda de pressão seguem um comportamento linear.

Calculando a inclinação da reta da curva da Figura 3.22, obtém-se  $G = dP/L$ , e percebemos que a mesma é justamente a parcela em colchetes da Equação 3.19. Logo, podemos correlacionar o fator de atrito com a média global de queda de pressão através da Equação 3.20.

$$f = \frac{2(4h)}{\rho U^2} \cdot G \quad (3.20)$$

Obtido o fator de atrito,  $f$ , pode-se recompor a tensão de cisalhamento  $\tau_w$  nas paredes internas do canal a partir da Equação 3.21. Porém, os resultados serão mostrados somente em função de  $f = f(Re_{4h})$ , comparando o canal liso e o canal com ranhuras longitudinais.

$$f = \frac{8 \tau_w}{\rho U^2} \quad (3.21)$$

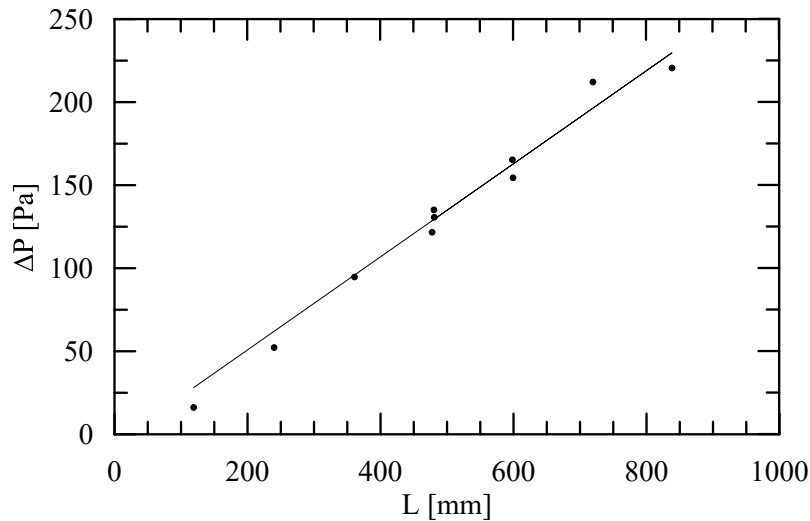


Figura 3.22: Exemplo de queda de pressão  $\Delta P$  entre duas tomadas de pressão distantes de  $L$  uma da outra.

## 3.5 Velocimetria por Imagem de Partícula (VIP)

### 3.5.1 Descrição da técnica de VIP

A Velocimetria por Imagem de Partícula (comumente conhecida como PIV do inglês *Particle Image Velocimetry*) é uma técnica onde são analisadas as translações de partículas presentes no escoamento que estão iluminadas por um plano luminoso. Das translações e tempo de obtenção das imagens, obtém-se os vetores velocidade do escoamento.

A técnica de VIP consiste primeiramente na adição de partículas traçadoras ao escoamento. Estas partículas devem estar distribuídas de forma homogênea e uma densidade média é necessária para garantir imagens de alta qualidade. Quando a densidade for muito baixa, utiliza-se a técnica PTV (do inglês *particle tracking velocimetry*), onde uma partícula individual é identificada e analisada. Se a densidade de partículas for muito alta, não será possível diferenciá-las. No VIP tradicional, com uma densidade média de partículas consegue-se identificar uma partícula individual. Contudo, é difícil identificar visualmente o par de imagens das partículas transladando. As partículas devem ser pequenas e com massa específica próximas ao fluido em que se encontram dispersas a ponto de conseguir acompanhar a velocidade do escoamento sem nenhum atraso de velocidade devido a efeitos de gravidade ou de deslisamento. As diferentes densidades podem ser vistas na Figura 3.23.

As partículas são iluminadas por um plano laser que pode ser de Nd-YAG pulsátil de duas cavidades. Os pulsos são emitidos por pelo menos duas vezes dentro de um pequeno intervalo de tempo. Este intervalo de tempo deve ser suficientemente

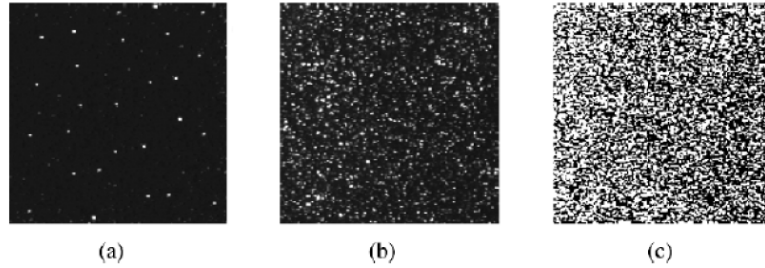


Figura 3.23: Diferença entre baixa, média e alta densidade de partículas (a, b e c respectivamente). (retirado de Raffel *et. al.* 2007 [32])

longo para permitir a translação das partículas com uma boa resolução, mas suficientemente pequeno para evitar que as partículas com velocidade fora do plano saiam do plano de iluminação. Os pulsos de emissão do laser atualmente podem ter frequências que vão de 5 Hz a 5 kHz. O sincronismo do laser é feito no controle do “flash lamp” e no “q-switch”, que são o tempo de emissão do laser e o parâmetro de alteração da característica ressonante da cavidade óptica do laser (permitindo o mesmo operar no ponto de maior energia e fornecendo assim a maior intensidade luminosa), respectivamente. Um conjunto de lentes permite que o feixe cilíndrico do laser seja convertido num plano, com ajuste de seu tamanho e cintura. O “q-switch” irá indicar uma ordem de intervalo de tempo de pulsação na ordem de 5-10 ns.

A luz refletida pelas partículas é registrada por uma câmera de alta velocidade em uma sequência de exposições (*frames*). Partículas maiores refletem melhor a luz, e isso vai de encontro ao requerimento de elas sejam pequenas de forma a serem solidárias ao escoamento. Deve-se chegar numa relação em que elas acompanhem o escoamento ao mesmo tempo que reflitam bem a luz do plano do laser.

O deslocamento das partículas entre os pulsos de luz é determinado através dos registros das imagens. As imagens podem ser capturadas por câmeras do tipo CCD (*charge coupled device*) que chegam a 100 registros por minuto. Também existem os sensores CMOS (*complementary metaloxide semiconductor*) que atingem frequências de aquisição na ordem do kHz. Estas câmeras devem possuir uma profundidade de campo a fim de focar o plano do laser. Este parâmetro é controlado pela abertura da lente.

O pós-processamento é complexo e requer uso de algoritmos sofisticados. São separadas as janelas de interrogação nas imagens. Estas devem conter de 10 a 20 partículas, e cada partícula deve percorrer aproximadamente 1/4 da janela em cada intervalo de tempo entre duas exposições. Cada janela de interrogação pode possuir de 8x8 pixels até 256x256 pixels, por exemplo. As partículas devem ocupar aproximadamente de 2 a 4 pixels de forma a evitar possíveis ruídos na imagem. Os algoritmos, então, identificam para qual posição um grupo de partículas transladou. Com a translação e o intervalo entre exposições, calcula-se, assim, o vetor velocidade.



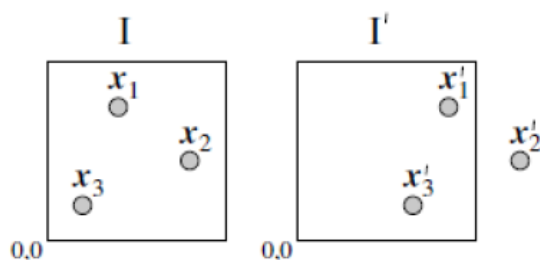


Figura 3.24: Par de frames de imagens de exposição única (defasados no tempo) para o método de correlação-cruzada. (retirado de Raffel *et. al.* 2007 [32])

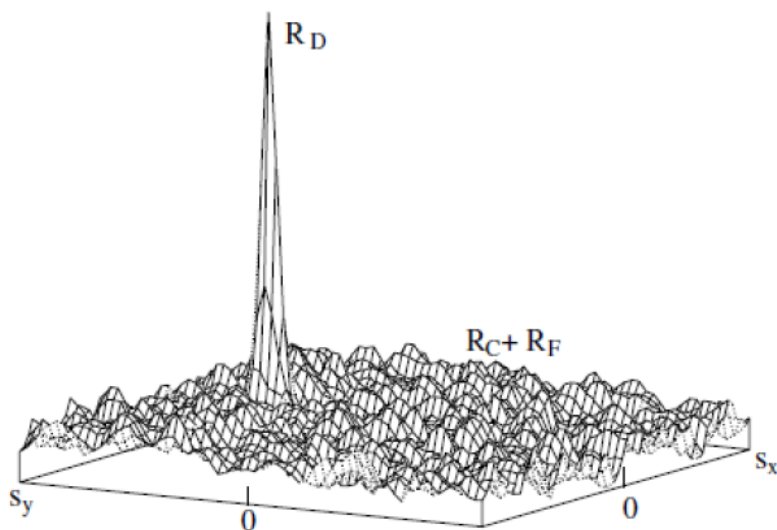


Figura 3.25: Composição dos picos da função de correlação-cruzada. (retirado de Raffel *et. al.* 2007 [32])

Os métodos utilizados são o de auto-correlação e o de correlação-cruzada, sendo o último o mais utilizado porque no primeiro existe ambiguidade direcional.

No caso da correlação-cruzada duas imagens de dois intervalos de tempo diferentes de exposição única são analisadas e comparadas (Figura 3.24). A função de correlação é feita a partir do deslocamento da janela de interrogação nas componentes do plano da imagem. Um gráfico desta função de correlação é apresentado na Figura 3.25. O pico determina o deslocamento devido à translação de um grupo de partículas dentro da janela de interrogação.

O sistema e os equipamentos do VIP estão esboçados na Figura 3.26.

A técnica de VIP é indicada para uma análise global do escoamento. Diferentemente da técnica de anemometria a fio-quente (AFQ) ou velocimetria laser Doppler (VLD), no VIP conseguimos, por exemplo, visualizar vórtices no escoamento. Além, é claro, da geometria de esteiras atrás de corpos rombudos e de pontos de separação da camada limite.

Com a utilização da densidade correta de partículas no escoamento, é possível

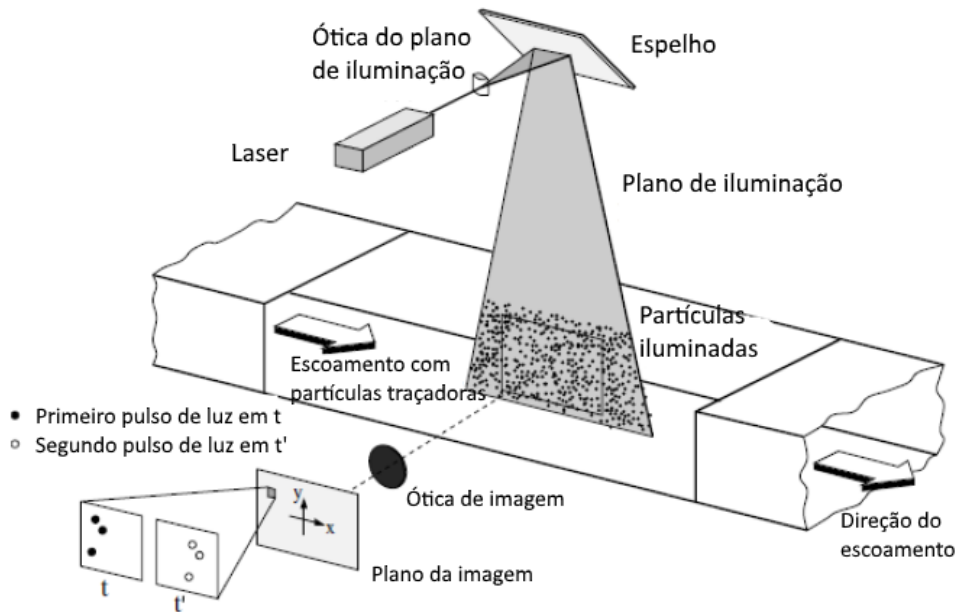


Figura 3.26: Arranjo experimental da técnica de VIP em um túnel de vento. (adaptado de Raffel *et. al.* 2007 [32])

obter uma boa resolução espacial. Porém, a resolução temporal é ruim quando comparada com a alta resolução da técnica de AFQ e a boa resolução temporal do VLD.

Assim como a AFQ, existe a necessidade de calibração para o VIP, de forma a relacionar a distância física pelos deslocamentos das partículas em termos de pixels obtidas nas imagens.

### 3.5.2 Procedimento utilizado na VIP

O sistema de VIP utilizado neste experimento é proprietário da DANTEC Systems. O modelo do laser utilizado é o *Litron Lasers NANOL 135-15*, do tipo Nd:YAG com comprimentos de onda  $532 \text{ nm}$  e energia máxima de  $800 \text{ mJ}$ . A unidade de processamento do laser é *Litron Lasers LPU-550*.

A câmera utilizada para captação das imagens é uma *SpeedSense M310* juntamente com uma lente macro *Nikon AF Micro-Nikkor* de  $105 \text{ mm}$  de distância focal e abertura máxima  $f/2.8D$ .

As partículas traçadoras utilizadas são esferas ocas de vidro revestidas com prata, aumentando assim seu índice de refração, melhorando o contraste das imagens. Elas possuem diâmetro médio de  $17 \mu\text{m}$  e densidade média muito próxima à densidade da água. As partículas foram adicionadas ao tanque superior gradativamente, até que a densidade de partículas nas imagens fosse próxima do ótimo, como mostrada na Figura 3.23.

As imagens das partículas refletidas pelo plano do laser e obtidas pela câmera

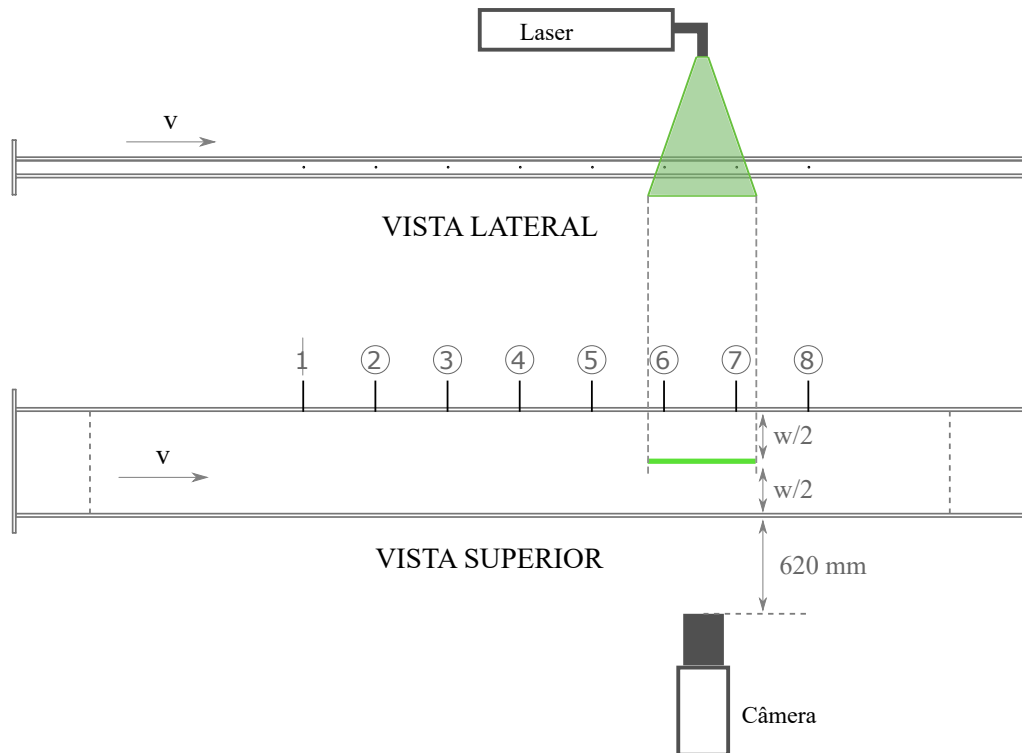


Figura 3.27: Posicionamento do sistema de VIP em relação ao canal retangular.

estão posicionadas entre as agulhas 6 e 7, assim como mostra a Figura 3.27. O plano do laser foi posicionado exatamente no plano vertical de simetria do canal, equidistante e paralelo às paredes laterais do canal. A distância da lente da câmera até o canal também está indicada no esboço.

Para evitar qualquer interferência de entrada de luz parasita proveniente da iluminação artificial e natural do laboratório, um tecido cobriu tanto o plano do laser dentro do canal como a câmera.

O tamanho médio das partículas obtido foi de aproximadamente  $2,0 \text{ pixels}$ , como pode ser visto na Figura 3.28.

A câmera e o laser foram conectados a uma *Timer Box* para que houvesse a sincronia dos tempos de emissão do laser e aquisição de imagens. Este controle do tempo foi realizado com a ajuda do programa *DynamicStudio v. 2015a*.

Foram testados diversos tempos entre pulsos do laser, em uma faixa de  $[200; 600] \mu s$ , e o valor final que apresentou os melhores resultados foi o de  $417 \mu s$ . A abertura da lente que resultou na imagem mais nítida dos pixels das partículas foi de  $f\# = 22$ .

A calibração do sistema foi feita com uma régua posicionada na parede superior do canal, na região externa ao mesmo, como pode ser visto na Figura 3.29.

Foram capturados 1000 pares de imagens (exposições A e B) a uma frequência de aquisição de 15 Hz.

As imagens obtidas pela câmera a princípio não fornecem informações diretas

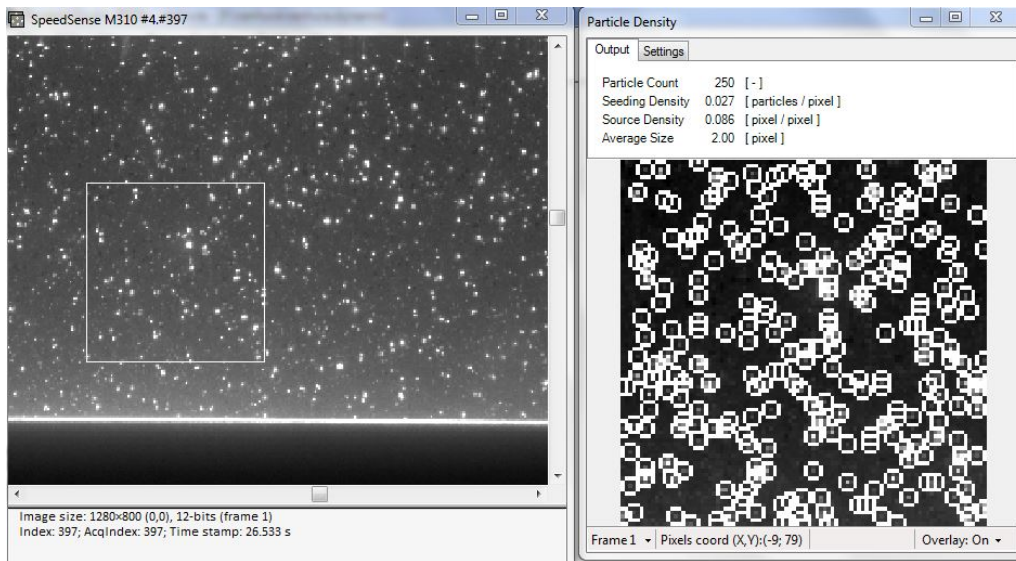


Figura 3.28: Tamanho médio das partículas.



Figura 3.29: Procedimento de calibração das imagens para a técnica de VIP.

suficientes para o cálculo dos vetores de velocidade pois nelas há ruído proveniente de diversos fatores. Então, antes do procedimento de correlação, são aplicados filtros às imagens.

Primeiramente calcula-se a média de todas as imagens, fornecendo assim uma matriz que contém os pixels que se repetem por todas elas (ou seja, o ruído constante através do intervalo de medição). A partir disto, subtrai-se a matriz de pixels de cada imagem por essa matriz média, dessa forma eliminando o ruído e fornecendo, assim, uma melhor definição das partículas sobre o fundo. Além disso, as imagens contém elementos do aparato experimental que não são importantes na obtenção do campo vetorial de velocidades (como a parede de acrílico do canal). Logo, é criado uma máscara para gerar imagens que contém somente as partículas.

O procedimento de cálculo dos vetores foi realizado utilizando a técnica de correlação adaptativa. Ao contrário da correlação cruzada simples, este método possui melhor desempenho para escoamento com grande gradiente de velocidade, que é o caso do escoamento próximo à parede do canal.

Na correlação adaptativa calcula-se o vetor velocidade em uma janela de interrogação inicial, diminui-se a o tamanho da janela calculando novamente o vetor com base nos valores obtidos na janela inicial e assim sucessivamente até uma janela final com tamanho menor ainda. Podem ser usadas validações locais para gerar um número de vetores espúrios. Para compensar a perda de resolução do campo vetorial no processamento, é feito um *overlap* da janela de interrogação inicial.

O tamanho máximo da janela de interrogação é de  $16 \times 16$  pixels, e o mínimo de  $8 \times 8$ .

## 3.6 Velocimetria Laser Doppler (VLD)

### 3.6.1 Descrição da técnica de VLD

A técnica de Velocimetria Laser Doppler (VLD), como o nome sugere, utiliza o efeito Doppler para medir a velocidade de um escoamento. Esta medição é realizada em um ponto formado pela interseção de dois raios laser que se cruzam. Com a inserção de partículas traçadoras no escoamento, os raios laser são refletidos e detectados pelo sistema, gerando assim um sinal que será tratado.

Esta técnica, diferentemente da Anemometria de Fio-Quente, não é intrusiva, ou seja, não perturba o escoamento sobre o qual a medida está sendo realizada. Ela não requer calibração visto que sua resposta ao estímulo (velocidade do fluido) é linear e, ainda, não depende de parâmetros físicos como pressão e temperatura por se basear em ondas eletromagnéticas. É possível resolver o sentido da componente de velocidade medida e sua resolução espacial e temporal é alta. Normalmente

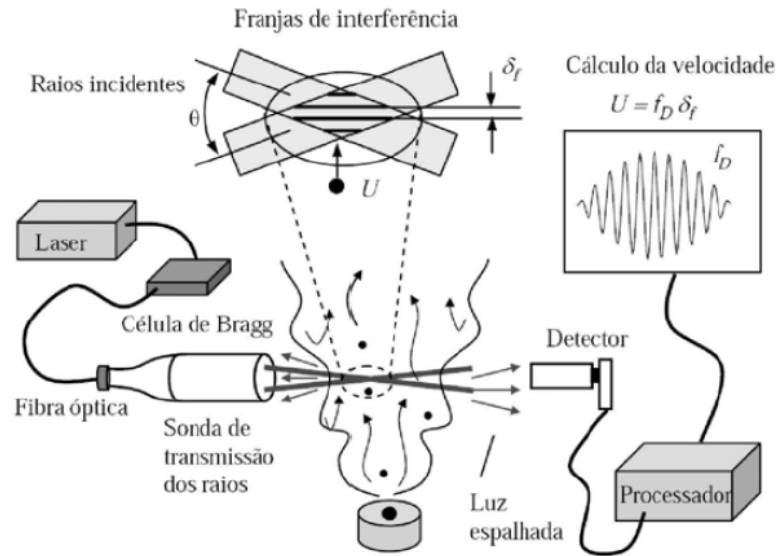


Figura 3.30: Esquema representativo dos componentes principais de um sistema VLD. (retirado de Loureiro 2006 [33])

o volume de controle (VC) de medição possui ordem de micrômetros e a taxa de aquisição do sinal na ordem de centenas de kHz.

O sistema é composto por (mostrado esquematicamente na Figura 3.30):

- Uma fonte laser.
- Componentes ópticos de transmissão do laser até o VC.
- Componentes ópticos de detecção da luz espalhada pelas partículas.
- Um processador de sinal.
- Um sistema de tratamento de dados.

Para explicar o funcionamento da técnica de forma simples, utiliza-se o modelo de franjas proposto por Rudd em 1969.

Uma fonte de luz coerente (formadas por ondas da mesma frequência e direção que mantêm uma relação de fase constante entre si) é utilizada para gerar dois raios que se cruzam, dando origem a franjas de interferência. A configuração das franjas é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas.

A distância entre duas franjas ( $\delta_f$ ) depende somente do ângulo de cruzamento dos raios ( $\theta$ ) e do comprimento de onda do laser ( $\lambda$ ), como mostrado na Figura 2 e calculado utilizando a Equação 3.22. Já a frequência vista pelo detector ( $f_D$ ) depende da projeção do vetor velocidade na direção perpendicular às franjas ( $U_X = U \cos(\gamma)$ ), como pode ser visto na Figura 3 e calculado pela Equação 3.23. Esta última equação mostra a relação linear entre a frequência Doppler e a componente de velocidade medida.

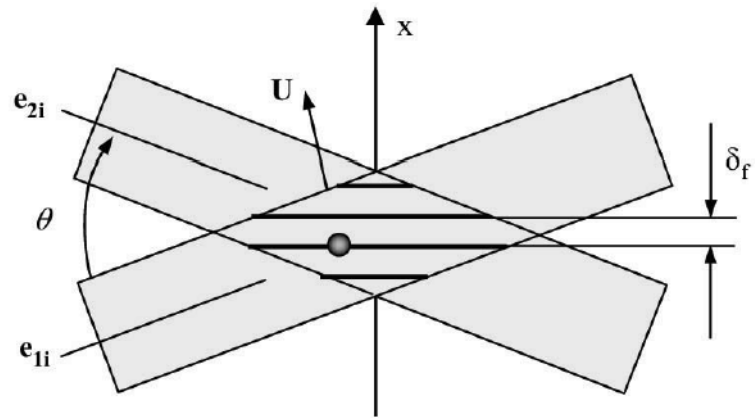


Figura 3.31: Parâmetros geométricos das franjas de interferência. (retirado de Loureiro 2006 [33])

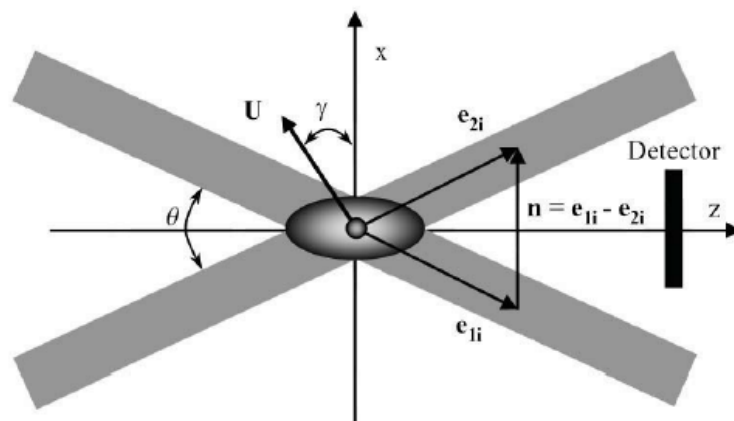


Figura 3.32: Parâmetros geométricos da frequência Doppler recebida pelo detector. (retirado de Loureiro 2006 [33])

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2\text{sen}(\frac{\theta}{2})} \quad (3.22)$$

$$f_D = \frac{U_x}{\delta_f} \quad (3.23)$$

É importante que as medições com o sistema laser-Doppler sejam realizadas com o volume de controle alinhado com a cintura dos raios porque é nesta região dos feixes que as frentes de ondas eletromagnéticas podem ser consideradas planas. Assim a teoria a ser utilizada e os cálculos a serem realizados são simplificados. Se a interseção ocorrer fora da cintura dos raios, as frentes de onda terão certa curvatura, resultando em um espaçamento variável das franjas. Conseqüentemente, a frequência Doppler medida também será dependente da posição da partícula no volume de controle e não mais será linearmente proporcional a velocidade do escoamento.

O modelo de franjas apresentado anteriormente peca por não conseguir diferenciar o sentido do vetor velocidade. Com isso, os sistemas LDA são equipados com células de Bragg que tem o papel de produzir ondas acústicas que originam um desvio de frequência em um dos raios. Esse desvio faz com que as franjas de interferência se tornem transientes e assim permitindo a sensibilidade direcional. Ajusta-se a direção do movimento das franjas no sentido oposto ao do escoamento principal. A partícula que caminhe na direção contrária ao movimento das franjas irá espalhar luz que irão produzir sinais de frequência inferior ao desvio aplicado, e vice-versa.

A configuração mostrada na Figura 3.30 é conhecida como *forward-scatter*, onde o detector é posicionado à frente do volume de controle. Porém, outra configuração foi utilizada nos experimentos, sendo ela conhecida como *backscatter*, mostrada na Figura 3.33.

Na configuração *backscatter* o detector é posicionado no mesmo lado da sonda de transmissão dos feixes. Esta configuração possui duas principais vantagens: uma maior facilidade de alinhamento e acesso a locais restritos do escoamento. Apesar disso, a desvantagem desta configuração são as baixas taxas de sinal-ruído já que há uma maior parcela de luz refletida pelas partículas à frente do volume de controle, no sentido de propagação dos feixes.

### 3.6.2 Procedimento utilizado na VLD

Nas aquisições deste experimento foi utilizado um sistema com a configuração de *backscatter*. Este sistema foi escolhido pois a parede do fundo do canal possuía cor preto fosco, não permitindo a passagem do feixe de laser e conseqüentemente sua utilização com o sistema *forward-scatter*. E como mencionado anteriormente,



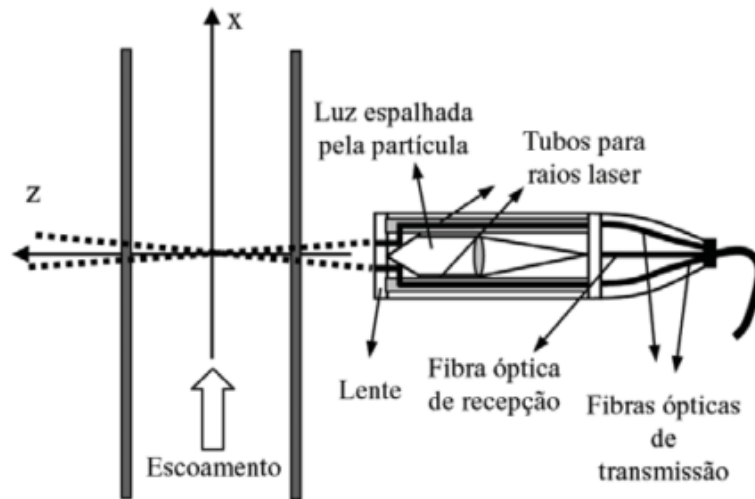


Figura 3.33: Configuração esquemática do sistema *backscatter* onde sonda e receptor são integrados. (retirado de Loureiro 2006 [33])

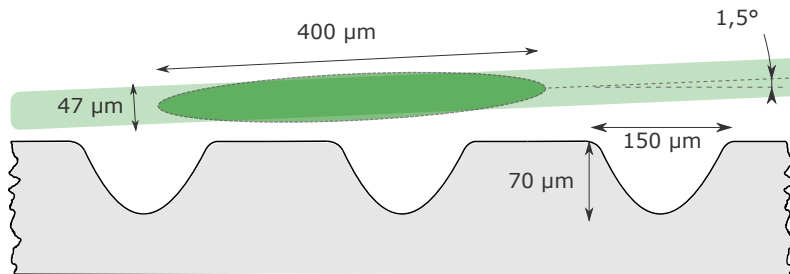


Figura 3.34: Vista frontal (plano YZ) das dimensões aproximadas do volume de controle da técnica de VLD. O volume de controle pode ser aproximado como um elipsoide escaleno de eixos  $dx = 48 \mu m$ ,  $dy = 47 \mu m$  e  $dz = 399 \mu m$ .

essa configuração permitiu um alinhamento muito mais rápido e eficiente, apesar de apresentar menores taxas de sinal-ruído.

O sistema utilizado na técnica de VLD é o fabricado pela empresa *DANTEC Systems*. Ele é composto por um sistema integrado de receptor e transmissor *FiberFlow* e *DopplerLite*. O comprimento de onda de laser é de  $514,5 \text{ nm}$ .

A distância focal entre a lente e o volume de controle é de  $310 \text{ mm}$ . O diâmetro médio do raio laser é de  $2,2 \text{ mm}$ , e a sonda foi acoplada a um expansor com razão de 1,950 para diminuir o tamanho do volume de controle.

O volume de controle possui as dimensões aproximadas como pode ser visto na Figura 3.34. De forma a conseguir a menor quantidade de reflexão da parede possível, a sonda foi montada com um pequeno ângulo de  $1,5^\circ$ .

De forma a garantir uma movimentação precisa da sonda verticalmente, a mesma foi montada sobre um sistema de posicionamento fino, composto por um posicionador vertical e outro transversal de modelo *SIGMA KOKI SGSP46-500*, gerenciados por um controlador de estágio *SHOT-204MS*. Para atingir a precisão do ângulo in-

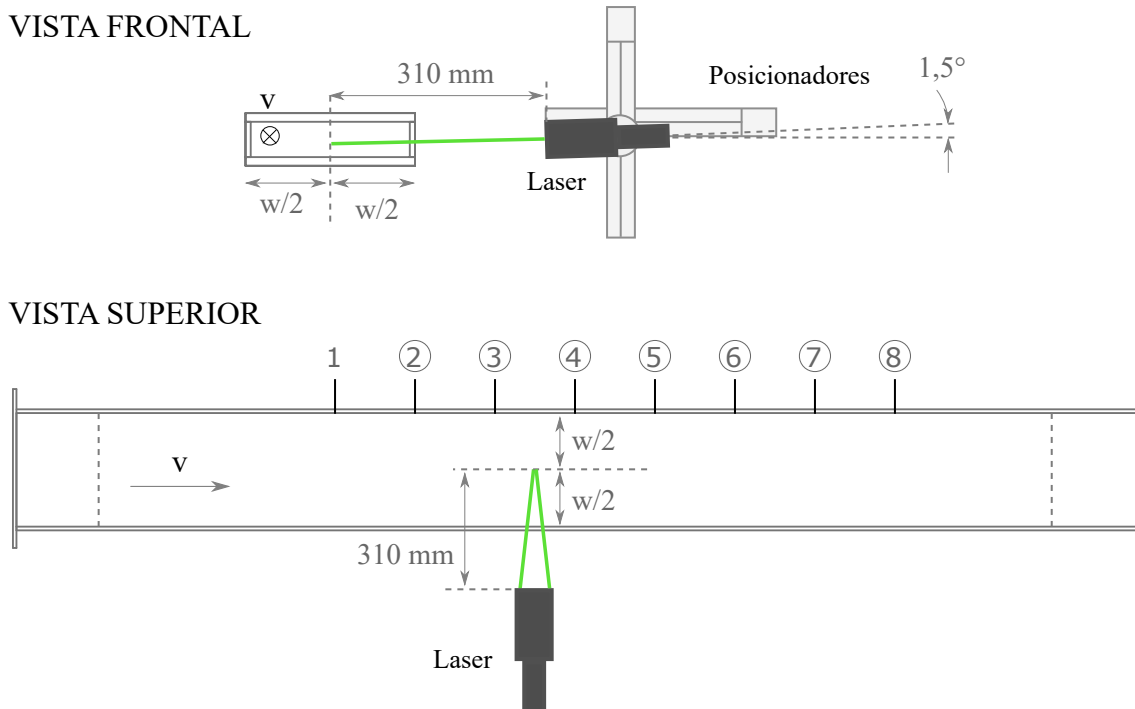


Figura 3.35: Vistas frontal e superior do esquema de montagem e posicionamento do sistema de VLD utilizado no canal. Figura fora de escala.

dicado na Figura 3.34, a sonda foi montada em um regulador angular como pode ser visto na Figura 3.36.

A Figura 3.35 mostra a representação esquemática do sistema de VLD utilizado no canal.

O monitoramento dos resultados obtidos foi feito de forma automática e instantânea pela unidade de processamento *BSA* (do inglês *Burst Spectrum Analyzer*) juntamente com o pacote de programa *BSA Flow*. De vários parâmetros que podem ser controlados neste sistema, os principais foram a sensibilidade do fotodetector (que deve ser minimizada para não capturar sinal com ruído e não queimar o sensor) e o ganho de sinal do espectro. A sensibilidade foi mantida na faixa entre 800 e 1000 [V] e o ganho entre 20 e 30 *dB*. A potência do laser foi modificada conforme a posição do volume de controle em relação à parede e aos outros parâmetros, mas sempre na faixa entre 30 e 60 *mW*.

Os equipamentos utilizados nesta bancada podem ser vistos na Figura 3.37.

Foram obtidos perfis de velocidade para 3 números de Reynolds diferentes, porém semelhantes entre o canal liso e o canal com ranhuras. Estes perfis de velocidades se encontram entre as agulhas 3 e 4. Não foi possível colocar em posição longitudinal semelhante ao que foi feito no VIP devido à quantidade de cola na junção entre a parede lateral e o fundo do canal liso. Como a técnica de VLD possui uma resolução espacial mais fina que a VIP, qualquer resíduo de cola fazia com que o raio de laser refletisse e/ou refratasse, aumentando, assim, o nível de ruído.

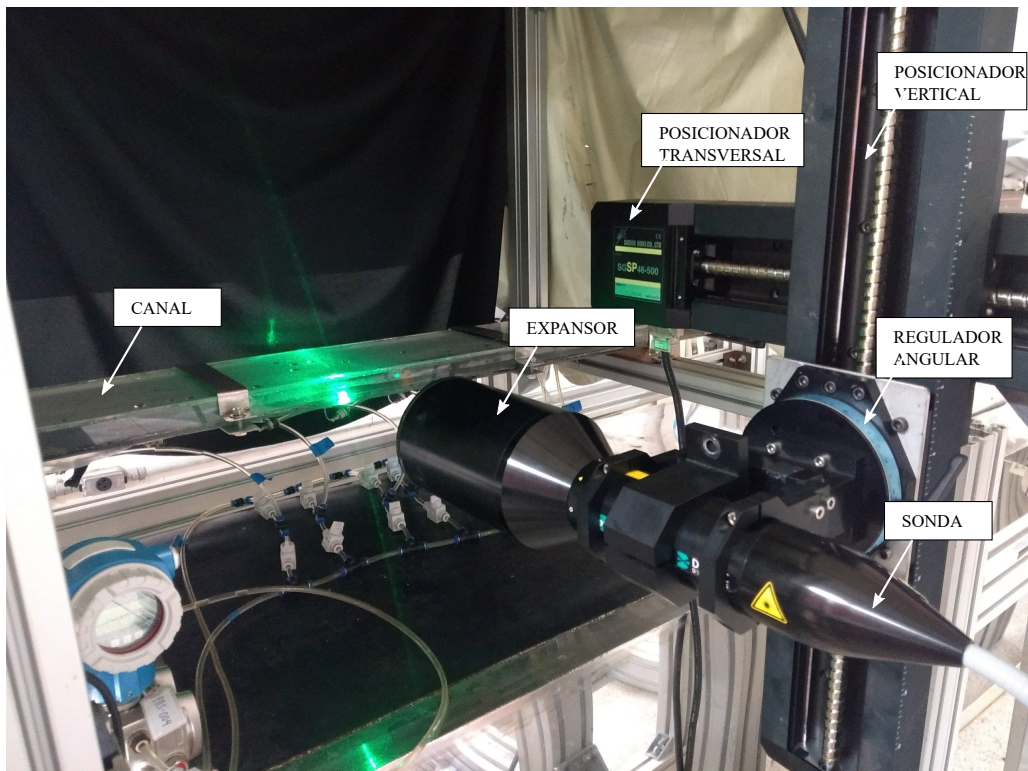


Figura 3.36: Sistema do VLD montado e em operação. Podem ser observados os posicionadores (vertical e transversal), o regulador angular em que a sonda está montada e o expansor acoplado à lente.

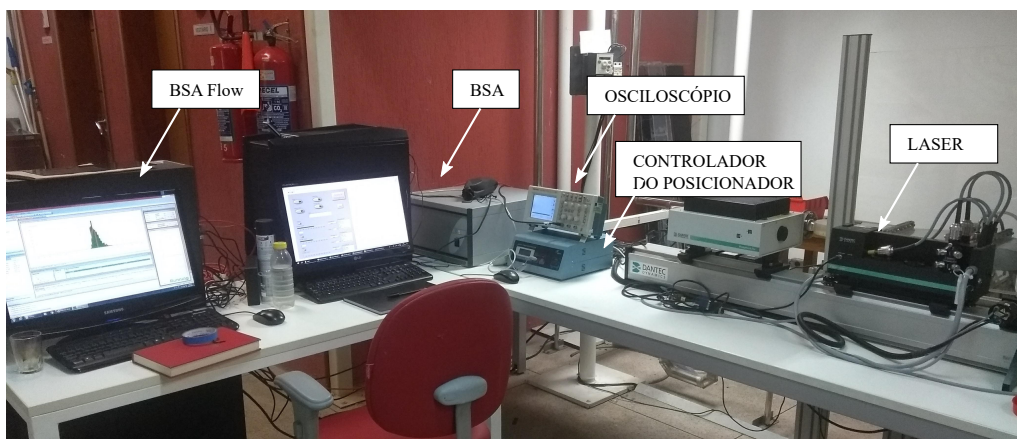


Figura 3.37: Equipamentos e componentes utilizados nas medições do perfil de velocidade na técnica de VLD.

Contudo, esta posição longitudinal não é ideal, já que está muito próxima da entrada do canal. De fato, LIEN *et. al.* [34] mostrou que o escoamento bidimensional em canais retangulares só atinge um estado completamente desenvolvido (ou seja, quando as camadas limites inferior e superior se encontram e o escoamento inteiro age sobre forças viscosas) a partir de  $150 \times 2h$ . Este comprimento de entrada representaria no presente caso, contudo, um canal com mais de 3  $m$  de comprimento.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Controle dimensional do canal

De forma a garantir que a construção dos canais liso e com ranhuras atenda às dimensões especificadas na Seção 3.3.1, foi realizado uma sequência de medições das suas dimensões em pontos de interesse. Usando o posicionamento das agulhas ímpares, a altura externa do canal (já construído) foi medida com um paquímetro digital com décimo de milímetro de precisão. Para a largura externa do canal, foi utilizado uma régua graduada convencional com precisão de  $0,5 \text{ mm}$ . Como ambas medidas foram externas, para determinar as medidas da seção transversal interna do canal ( $2h \times w$ ), foram descontadas as espessuras das placas de acrílico de  $5 \text{ mm}$ .

A Tabela 4.1 mostra os valores medidos e a média e desvio padrão de cada canal. Para todos os cálculos subsequentes, principalmente o cálculo da velocidade média do canal - que leva em consideração a área da seção transversal do mesmo - foram utilizadas as medidas médias obtidas. Logo, as diferenças absolutas de dinâmica do escoamento são evitadas ao se apresentar os dados em função do número de Reynolds, que leva em consideração a velocidade média e altura dos canais.

	Posição (agulha)	1	3	5	7	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
Liso	2h	19,81	19,88	20,26	20,05	20,00	0,20
	w	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	0
Ranhura	2h	21,18	21,21	21,06	21,80	21,31	0,33
	w	149,5	149,0	149,5	149,5	149,4	0,3

Tabela 4.1: Dimensões do canal liso e canal com ranhuras para controle dimensional. Todas as dimensões em milímetros.

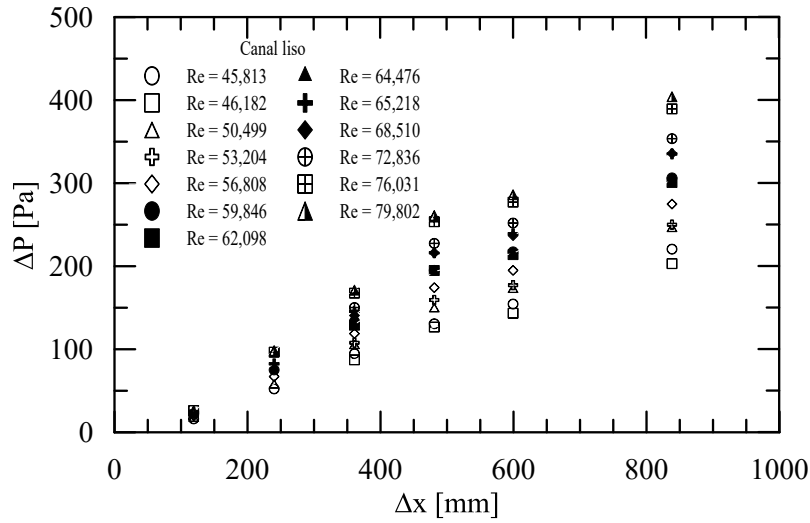


Figura 4.1: Pontos de queda de pressão em função da distância entre agulhas para todos os Reynolds ensaiados no canal liso.

## 4.2 Dados de Pressão

A partir das medidas de queda de pressão entre as tomadas de pressão, obtém-se os gráficos com os pontos obtidos para o canal liso e com ranhuras, Figuras 4.1 e 4.2 respectivamente.

Os dados de queda de pressão são analisados através de um ajuste polinomial de mínimos quadrados para uma reta de coeficiente linear nulo, que resultará em  $G = dP/dx$  que é o coeficiente angular da mesma. Utiliza-se, então, a Equação 3.20 para determinar o fator de atrito de Darcy em cada condição de Reynolds.

Calculando o fator de atrito para o canal com ranhuras, pode ser observada a diferença entre este e aquele valor que seria obtido para um canal liso, como mostrado no gráfico da Figura 4.3.

Foi também realizado um ajuste de uma função de potência para o valor experimental de  $Cf$  para o canal liso e com ranhuras,  $Cf_L$  e  $Cf_R$  respectivamente. Estas equações obtidas são utilizadas para o cálculo de redução de arrasto (RA).

De forma a validar os dados obtidos pela queda de pressão, será realizada uma verificação a partir da equação integral de quantidade de movimento para uma camada limite incompressível como mostrado na seção 3.2.

Partindo dos dados obtidos pelo LDA, considera-se que  $n = 7$  e que  $\bar{u}/U_{max} = 0,88$  para o canal liso. O resultado obtido da comparação entre a tensão de cisalhamento obtida teoricamente pela Equação 3.4 e a tensão experimental do canal liso dada pela Equação 3.17 é mostrado no gráfico da Figura 4.4.

Para comparar numericamente a redução do atrito no interior dos canais liso e com ranhuras, define-se uma expressão de para a redução do arrasto, mostrada

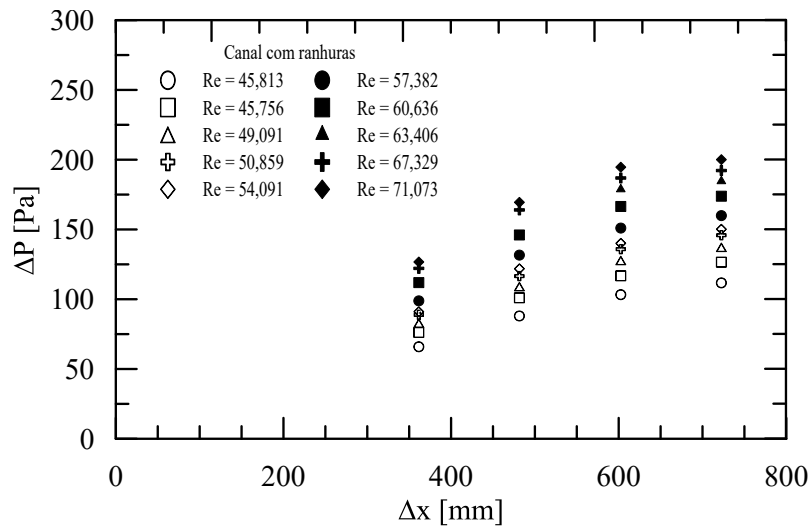


Figura 4.2: Pontos de queda de pressão em função da distância entre agulhas para todos os Reynolds ensaiados no canal com ranhuras.

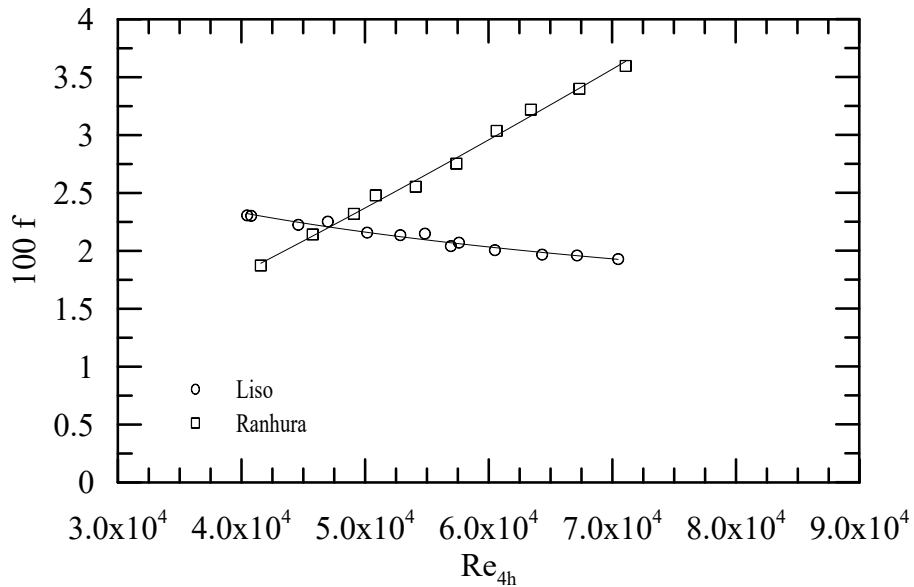


Figura 4.3: Comparação entre fator de atrito de Darcy ( $f$ ) entre o canal liso e com ranhuras (Valores de  $f$  multiplicados por 100 para melhor clareza).

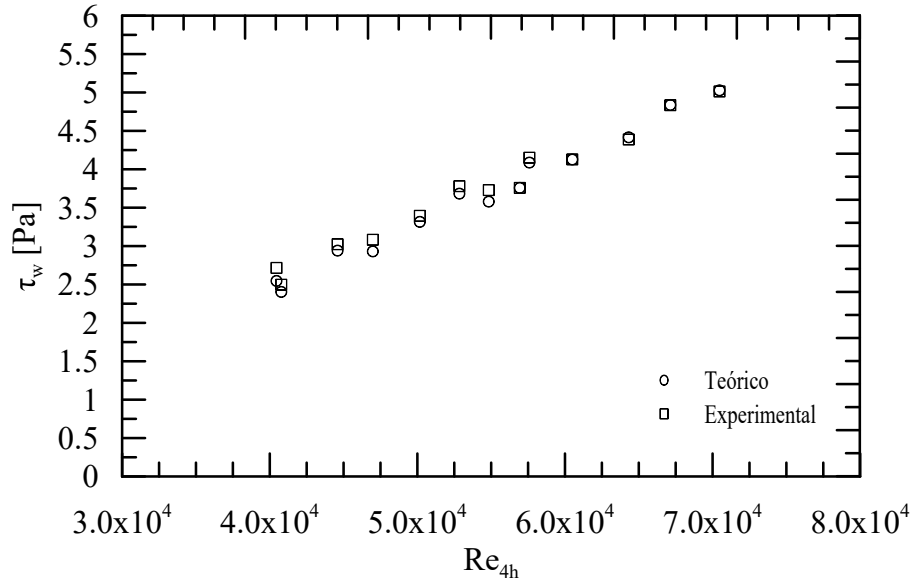


Figura 4.4: Comparação entre tensão de cisalhamento teórica e a tensão obtida experimentalmente no canal liso.

na Equação 4.1. Valores negativos acontecem quando o atrito para o canal com ranhuras é menor que canal liso.

$$RA = \frac{f_R - f_L}{f_L} \quad (4.1)$$

O gráfico de  $RA$  é exibido contra  $s^+$ , que é calculado a partir da combinação das Equações 3.7, 3.8 e 4.2, gerando a seguinte Equação 4.3.

$$\tau_w = \frac{f\rho U^2}{8} \quad (4.2)$$

$$s^+ = U \frac{s}{\nu} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (4.3)$$

Como pode ser observado, houve uma redução máxima de arrasto para o menor número de Reynolds, onde foi alcançado uma redução de 21,1%. Com o aumento de Reynolds, há um aumento de  $RA$ , o que representa um aumento no arrasto das ranhuras quando comparado com o caso liso.

### 4.3 Análise global do escoamento através da VIP

Foram obtidos campos de velocidade para 3 números de Reynolds diferentes na técnica de VIP (baseado no dobro da altura  $4h$ ). Os valores resumidos de Reynolds e velocidade média do escoamento  $U$  tanto para o canal liso e o canal com ranhuras



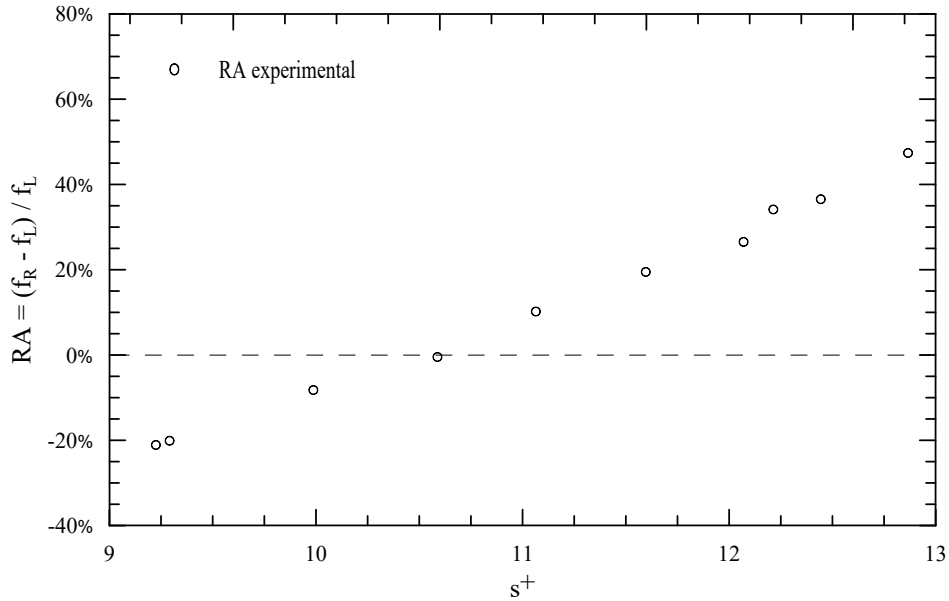


Figura 4.5: Redução de arrasto (RA) do canal com ranhuras quando comparado ao canal liso.

Canal liso			
U [m/s]	0,995	1,204	1,407
Re	58.092	70.275	82.129
Canal com ranhuras			
U [m/s]	1,044	1,182	1,275
Re	48.866	55.099	59.289

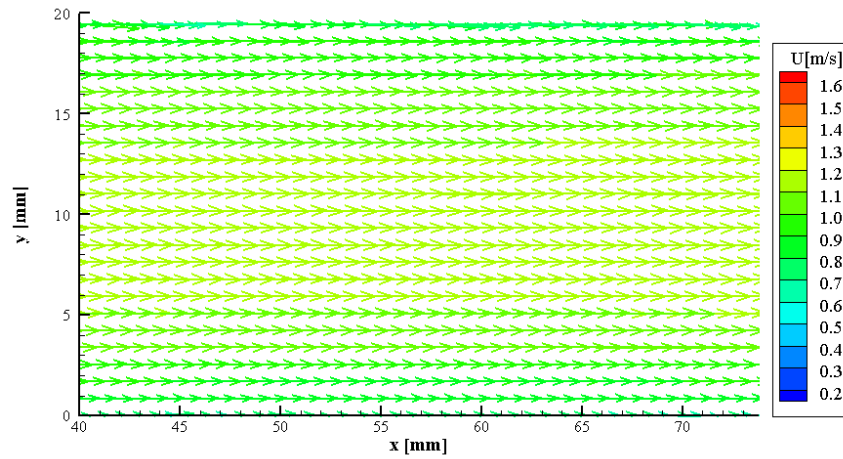
Tabela 4.2: Condições experimentais do ensaios com a técnica de VIP.

podem ser vistos na Tabela 4.2.

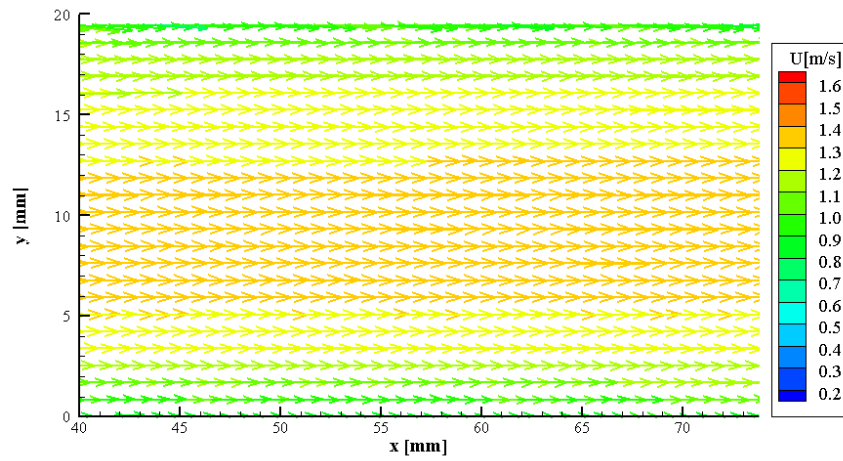
As Figuras 4.6 e 4.7 mostram, respectivamente, o campo vetorial de velocidades médias no canal liso e com ranhuras.

Definindo posições longitudinais fixas, definem-se perfis típicos do escoamento considerado totalmente desenvolvido nos canais. A Figura 4.8 mostra quatro curvas de interesse para o canal liso.

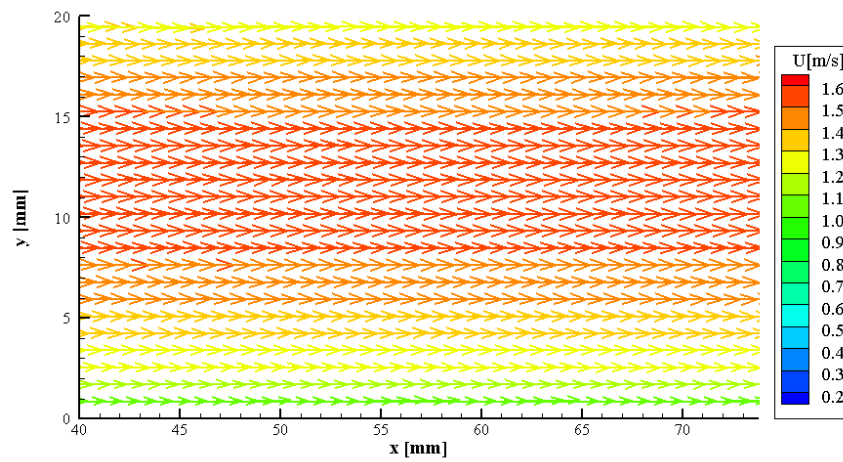
Em sentido horário começando pelo gráfico superior da esquerda, define-se o perfil de velocidade média, a intensidade turbulenta relativa longitudinal, a intensidade turbulenta relativa transversal e energia cinética turbulenta. A velocidade média é calculada a partir da Equação 2.4, as intensidades turbulentas pela Equação 2.5 e a energia cinética turbulenta é definida - de forma aproximada - pela Equação 4.4. Esta é uma aproximação para  $k$  pois não está sendo levada em consideração a contribuição da parcela transversal  $w'$  do campo de velocidades. Logo, este valor de energia cinética turbulenta apresentado possui um valor menor do que o real.



(a)  $Re = 58.092$

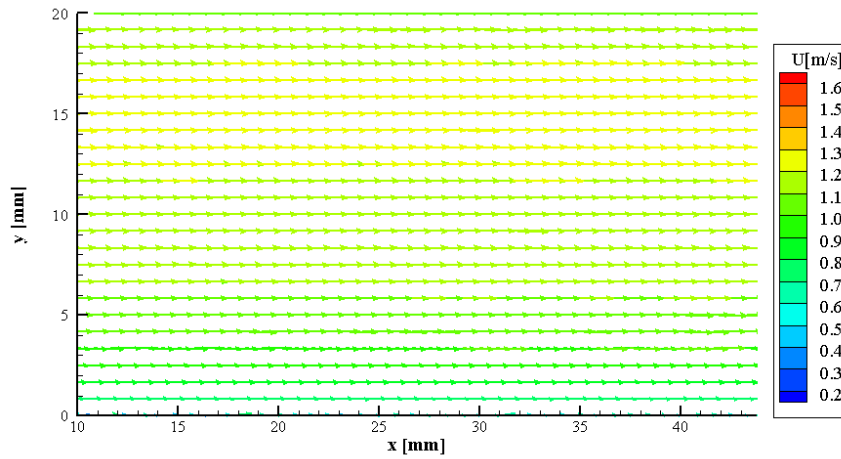


(b)  $Re = 70.275$

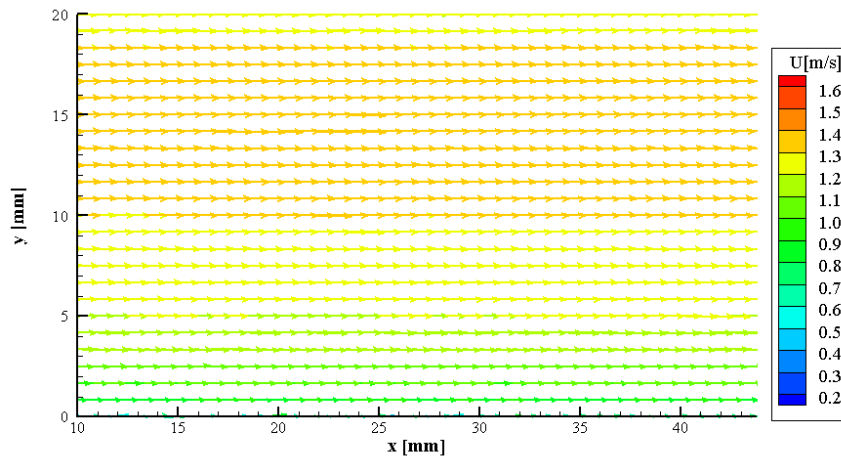


(c)  $Re = 82.129$

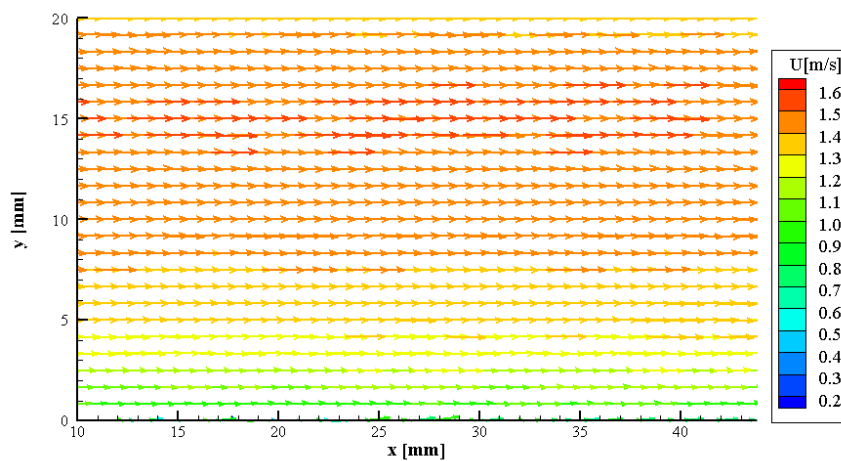
Figura 4.6: Campo de velocidades do canal liso obtido a partir da técnica de VIP. Eixo  $y$  representa dimensão vertical, onde  $y = 0 \text{ mm}$  é o fundo do canal e  $y = 20 \text{ mm}$  é o topo do canal. Eixo  $x$  é a direção longitudinal do escoamento.



(a)  $Re = 48.866$



(b)  $Re = 55.099$



(c)  $Re = 59.289$

Figura 4.7: Campo de velocidades do canal com ranhuras obtido a partir da técnica de VIP. Eixo  $y$  representa dimensão vertical, onde  $y = 0 \text{ mm}$  é o fundo do canal e  $y = 20 \text{ mm}$  é o topo do canal. No caso do canal com ranhuras, somente o fundo está coberto com ranhuras longitudinais. Eixo  $x$  é a direção longitudinal do escoamento.

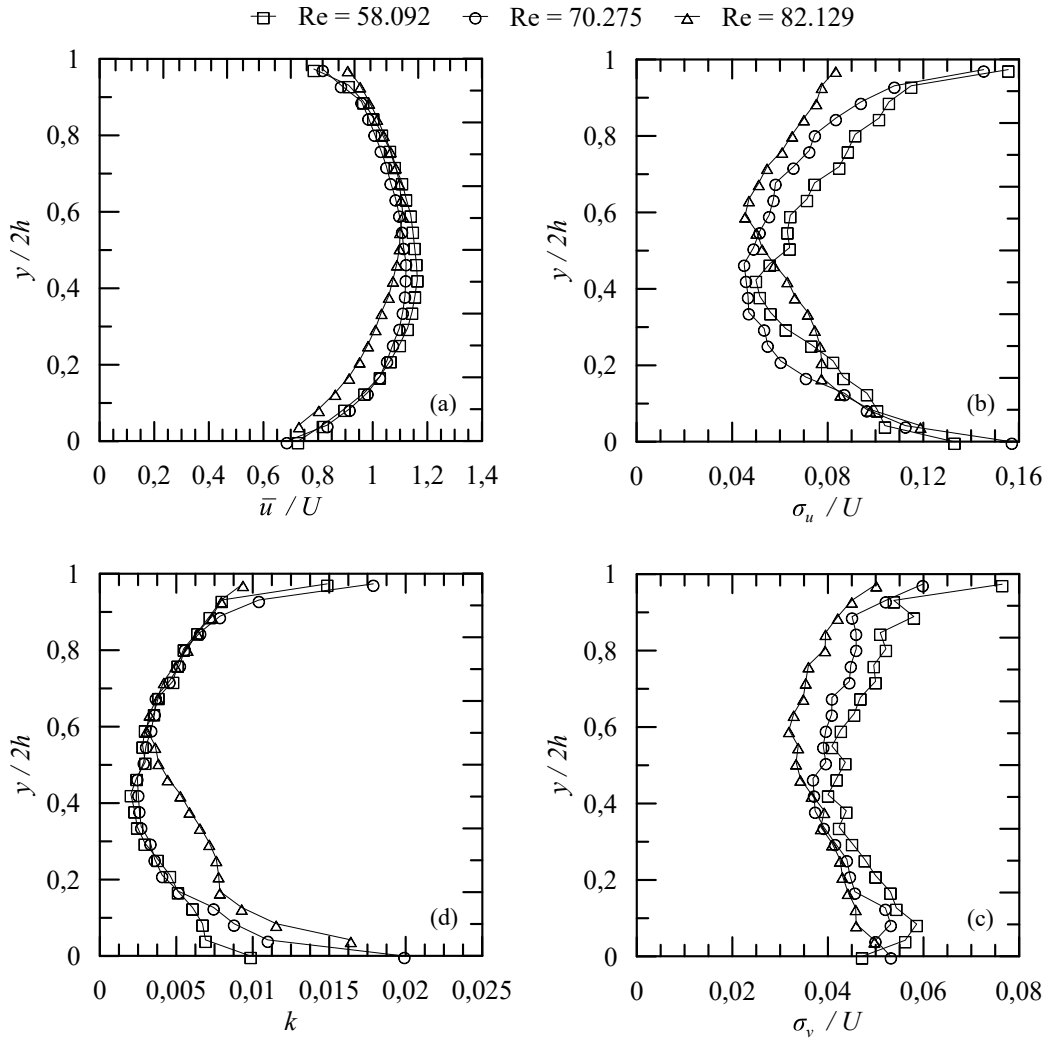


Figura 4.8: Caracterização do escoamento via técnica de VIP para o canal liso. Velocidade média (a), intensidade turbulenta relativa longitudinal (b), intensidade turbulenta relativa transversal (c) e energia cinética turbulenta (d).

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (4.4)$$

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram, respectivamente, os valores estatísticos médios obtidos para o canal liso e com ranhuras. Como pode ser observado para o canal com ranhuras, quanto maior o número de Reynolds, mais dispersos são os valores relativos às flutuações de velocidade e com isso as intensidades e energia cinética turbulentas.

É importante salientar que o canal liso apresenta valores de número de Reynolds maiores que o canal com ranhuras pois, apesar das velocidades médias serem próximas, à época das medições no canal liso houve variação significativa na temperatura ambiente. As variações de temperatura (em torno de  $30^\circ\text{C}$ , enquanto que

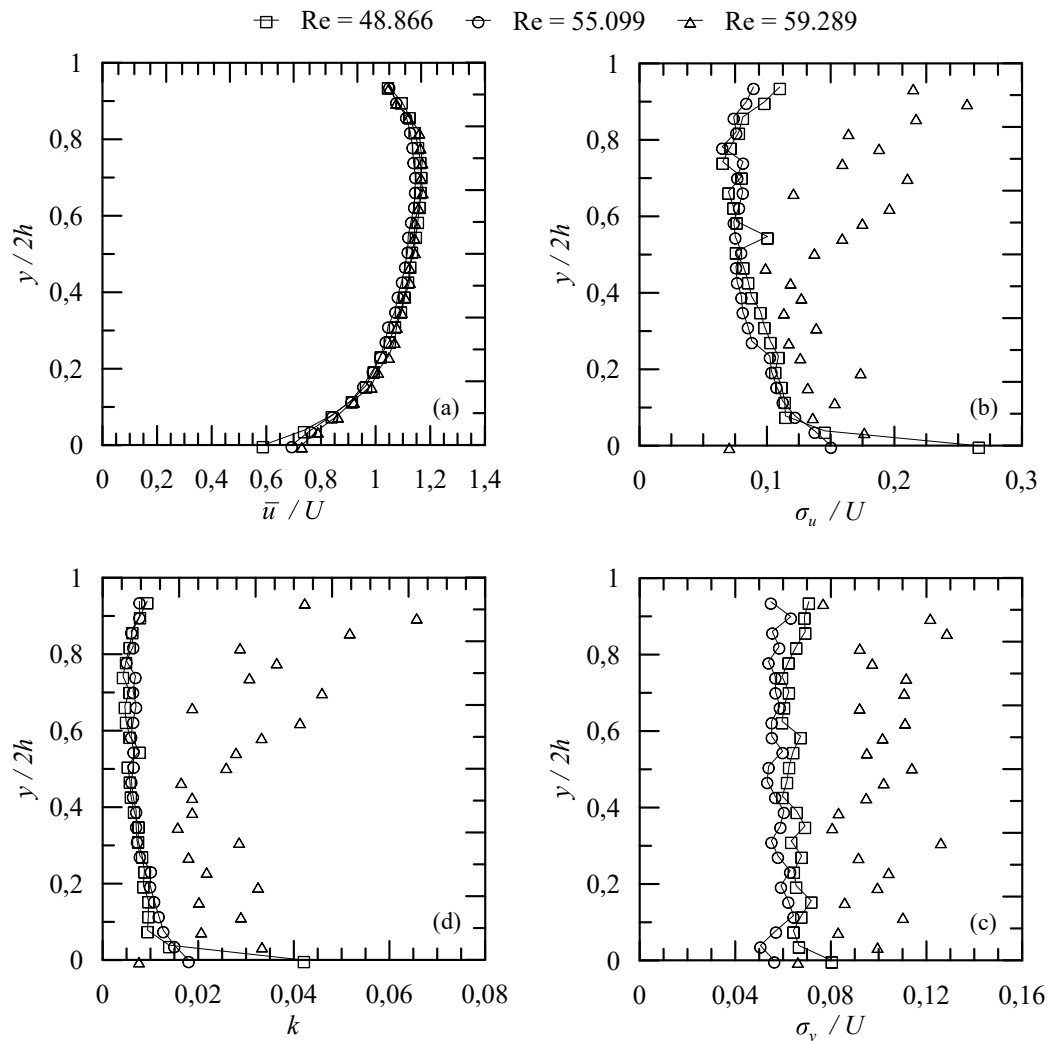


Figura 4.9: Caracterização do escoamento via técnica de VIP para o canal com ranhuras. Velocidade média (a), intensidade turbulenta relativa longitudinal (b), intensidade turbulenta relativa transversal (c) e energia cinética turbulenta (d).

Canal liso			
U [m/s]	0,916	1,082	1,192
Re	41.979	48.512	56.448
Canal com ranhuras			
U [m/s]	0,827	1,031	1,115
Re	41.606	52.204	57.146

Tabela 4.3: Condições experimentais do ensaios com a técnica de VLD.

para as medições feitas no canal com ranhuras a temperatura média era de  $25^{\circ}C$ ) acarretaram em viscosidades cinemáticas mais baixas e conseqüentemente Reynolds mais elevados.

Com isso, somente o menor Reynolds do canal liso (58.092) e o maior Reynolds do canal com ranhuras (59.289) são suficientemente próximos para se considerar semelhança dinâmica entre eles. Então, estes serão os casos que serão comparados.

A Figura 4.10 mostra a comparação dos escoamentos no canal liso e com ranhuras.

Como pode ser observado, para a velocidade média, existe uma assimetria do perfil do canal com ranhuras, com a velocidade máxima ocorrendo a um  $y / 2h > 0,5$ . De fato, esta assimetria ocorre em todos os Reynolds para o canal com ranhuras, gráfico (a) da Figura 4.9, enquanto que o perfil de velocidade média apresenta forma mais simétrica para o canal liso, gráfico (a) da Figura 4.8.

Além disso, é possível notar que as intensidades turbulentas relativas do canal com ranhuras é maior do que o canal liso, gráficos (b) e (c) das Figuras 4.8 e 4.9. Mesmo que os valores destas intensidades apresentam uma dispersão grande para o caso com ranhuras, é possível notar a tendência de concentração de maior turbulência nas regiões da subcamada turbulenta.

## 4.4 Análise local do escoamento através da VLD

Foram obtidos perfis de velocidade para 3 números de Reynolds diferentes na técnica de VLD (baseado no dobro da altura  $4h$ ). Os valores resumidos de Reynolds e velocidade média do escoamento  $U$  tanto para o canal liso e o canal com ranhuras podem ser vistos na Tabela 4.3.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os perfis de velocidade média para o canal liso e com ranhuras, respectivamente. Pode-se notar nas subfiguras (a) que a medição não contempla toda a extensão em altura do canal, ou seja, do fundo até o topo do mesmo. O ponto de maior elevação corresponde a aproximadamente 80% da altura do canal. Isto se dá porque, devido a angulação do laser (como visto na Figura 3.36) e a presença de cola entre as chapas lateral e de topo do canal, o feixe incidente foi

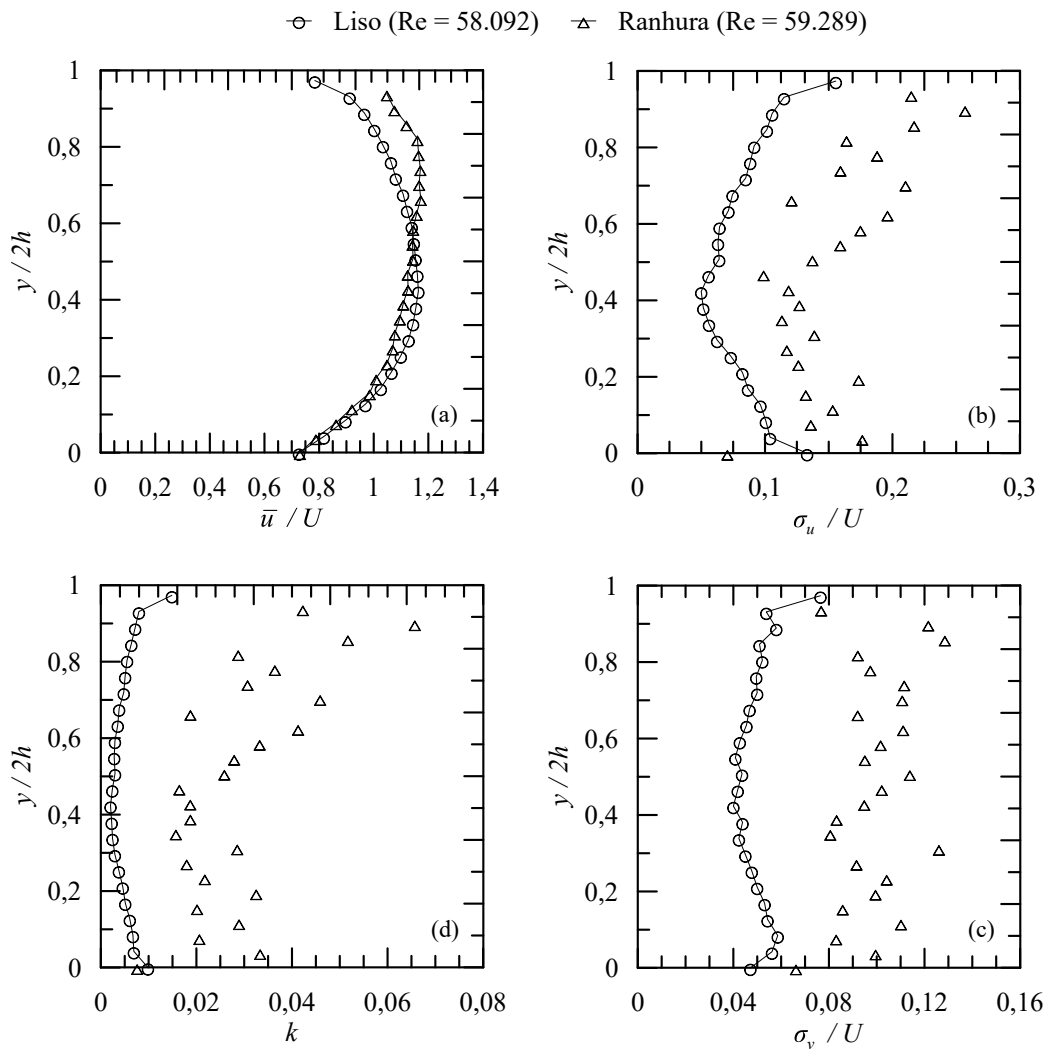


Figura 4.10: Comparação do escoamento via técnica de VIP para o canal liso e com ranhuras. Velocidade média (a), intensidade turbulenta relativa longitudinal (b), intensidade turbulenta relativa transversal (c) e energia cinética turbulenta (d).

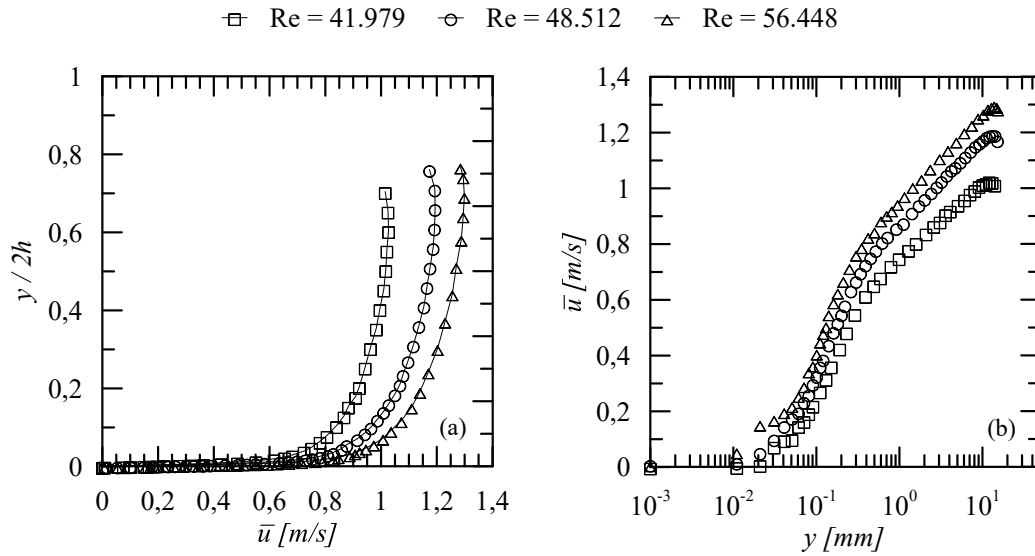


Figura 4.11: Velocidade média do canal liso através da técnica VLD.

dispersado de tal forma que impossibilitou a medição no local.

As medições da velocidade do escoamento próxima à parede são mais complexas de serem obtidas principalmente devido à reflexão do feixe de laser no fundo. Esta dificuldade aumenta no caso do canal com ranhuras, onde o fundo não é transparente. De forma a analisar quantitativamente a introdução deste e de outros erros, calcula-se a incerteza associada à velocidade média obtida.

A Equação 4.5 descreve o desvio-padrão  $\sigma_u$  da parcela flutuante da velocidade longitudinal do escoamento (como visto na Equação 2.3), onde  $T$  é o tempo de observação de medição.

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt} \quad (4.5)$$

A intensidade turbulenta  $Tu$  é dada pela Equação 4.6

$$Tu = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (4.6)$$

Logo, podemos definir a incerteza das medições de velocidade média ao considerar a mesma como uma distribuição normal e com um intervalo de confiança de  $\bar{u}$  para uma probabilidade de 99%, dada pela Equação 4.7 a seguir.

$$Incerteza = 2,7 \frac{Tu}{\sqrt{N}} \quad (4.7)$$

Onde  $N$  é o número de amostras (partículas) observadas no escoamento durante o período de medição.



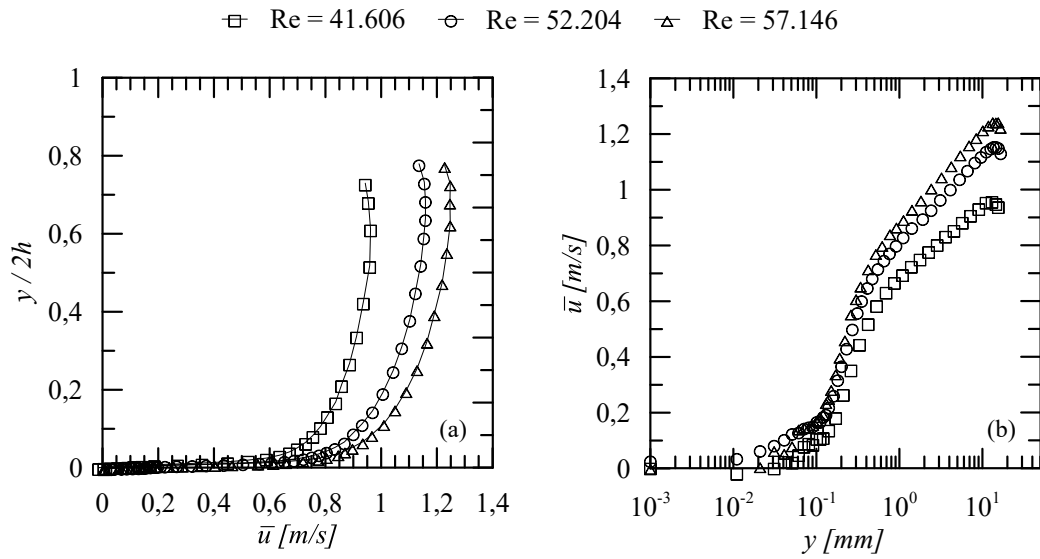


Figura 4.12: Velocidade média do canal com ranhuras através da técnica VLD.

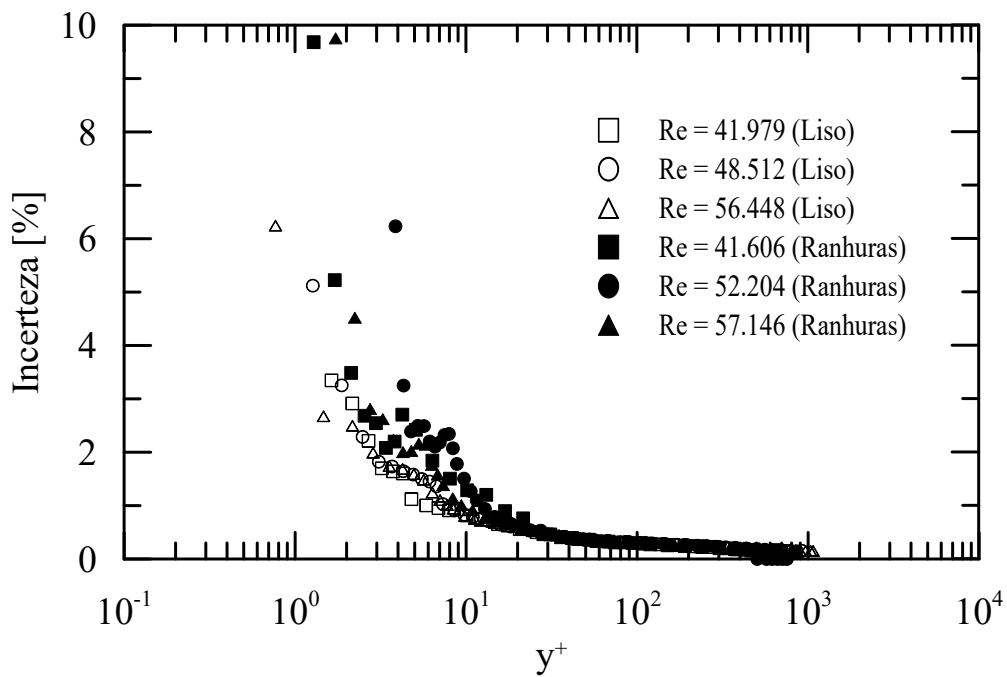


Figura 4.13: Incerteza das medições de velocidade média no canal liso e com ranhuras.

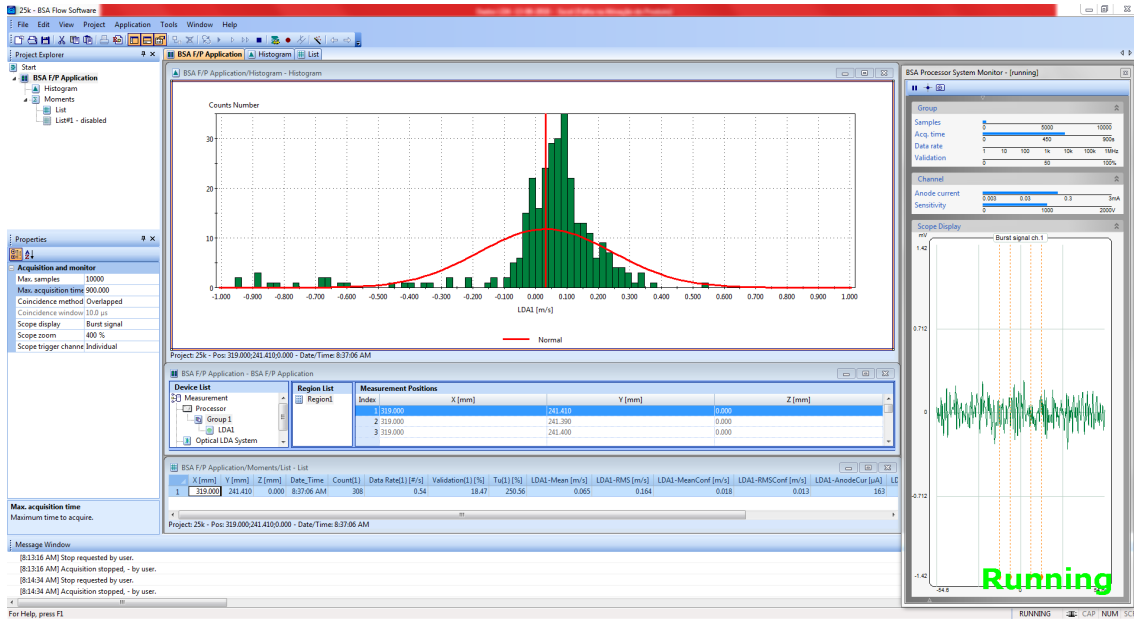


Figura 4.14: Histograma do *software* de aquisição da técnica VLD onde é possível perceber valores negativos de velocidade média no escoamento.

Observando a Figura 3.34, nota-se que o volume de controle foi posicionado de tal forma que alguma parcela do mesmo encontra-se dentro do vale da ranhura. Foi possível observar que, nas regiões próximas à parede, foram capturadas partículas que possuíam velocidade média longitudinal negativa (como pode ser visto no histograma da Figura 4.14). Este resultado só foi possível devido à utilização da técnica em *backscatter*.

As figuras 4.18 e 4.19 mostram respectivamente os gráficos de  $u^+$  contra  $y^+$  e as curvas da Lei Logarítmica.

## 4.4.1 Velocidade de atrito

### Subcamada Viscosa

Para o cálculo da velocidade de atrito através da região linear da subcamada viscosa, primeiramente foi definido a origem da parede. Respeitando a condição de não escorregamento, a parede é a altura em que a velocidade média do escoamento é nula. Logo, foi realizada uma regressão dos mínimos quadrados com os valores reais dimensionais coletados pela técnica de VLD para traçar a região linear da subcamada viscosa próximo à parede. Recuperando a altura em que  $\bar{u} = 0$ , obtemos a origem na parede.

A partir daí, sabendo que a velocidade de atrito é dada pela Equação 3.8 e que, dada a definição da tensão de cisalhamento na parede pela Equação 4.8, podemos recuperar a velocidade de atrito como mostrado na Equação 4.9. Esta técnica para o cálculo da velocidade de atrito necessita de um bom número de pontos dentro da

subcamada viscosa. Uma boa prática é que o  $y^+$  máximo seja inferior a  $5 \nu/u_\tau$ , o que foi obedecido para todas as medições realizadas.

$$\tau_w = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.8)$$

$$u_\tau = \sqrt{\nu \frac{du}{dy}} \quad (4.9)$$

O valor da velocidade de atrito  $u_\tau$  foi também analisado através da região da Subcamada Viscosa (Equação 4.10), onde podemos chegar à Equação 4.11. Este método foi realizado somente como conferência da coerência dos valores obtidos pela inclinação  $du/dy$  como realizado na Equação 4.9.

$$u^+ = y^+ \quad (4.10)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\bar{u} \nu}{y}} \quad (4.11)$$

As Figuras 4.15 e 4.16 a seguir mostram as regiões viscosas onde vale o perfil linear de velocidades em coordenadas dimensionais. Os valores de velocidade de atrito calculadas estão apresentadas na Tabela 4.4.

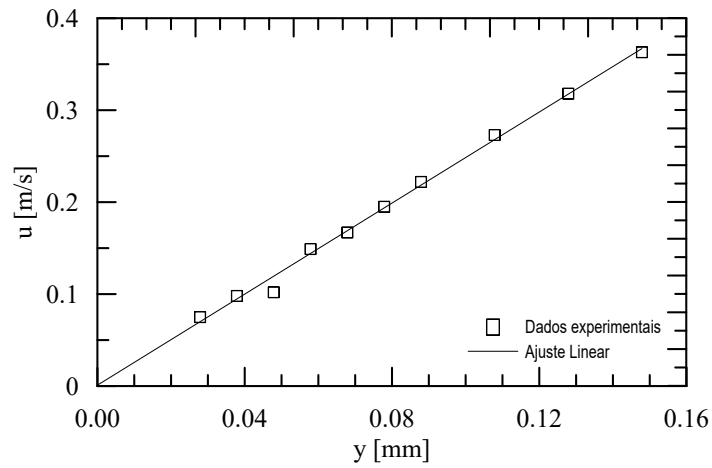
### Subcamada Turbulenta

Para o cálculo da velocidade de atrito através da subcamada turbulenta, foi realizado o Método do Gradiente Reduzido Generalizado de LADSON *et. al.* [35]. Neste método de otimização, determinou-se que a função objetivo é a minimização do resíduo, que foi definido como a soma do quadrado do erro entre a equação logarítmica ajustada aos dados experimentais e os pontos medidos. O domínio de interesse é a subcamada turbulenta, onde vale a lei logarítmica que descreve o perfil de velocidades próximo à parede. Na otimização, as variáveis de interesse são a própria velocidade de atrito e a constante linear B da Equação 2.8.

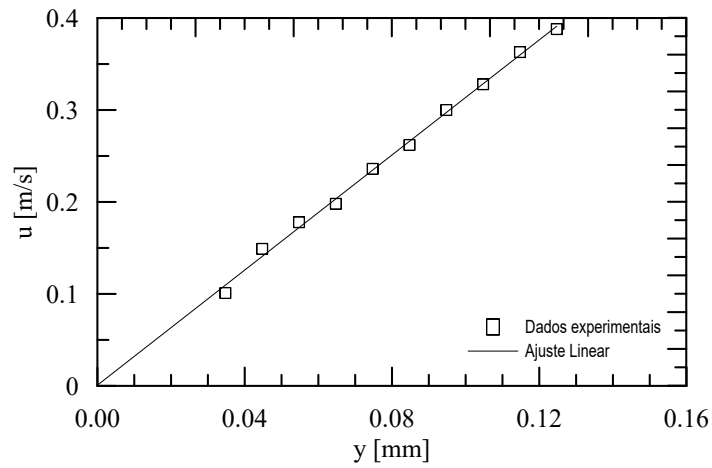
As Figuras 4.19 e 4.18 mostram as equações logarítmicas ajustadas no perfil de velocidades através do método de otimização.

### Validação Teórica

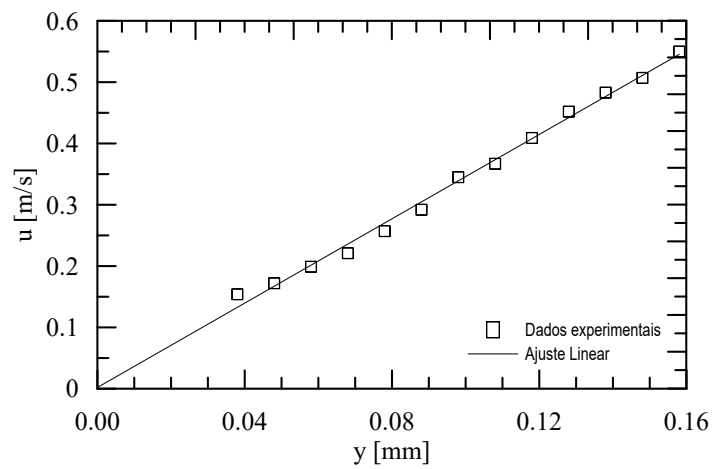
De forma a garantir que os métodos descritos acima para determinar a velocidade de atrito estejam de acordo com um desenvolvimento puramente analítico, utiliza-se a Equação 3.4 usada na validação dos dados de pressão. Através de procedimento semelhante ao descrito na Seção 4.2, com o fator  $n = 7$  da lei de potência do perfil de



(a)  $Re = 41.979$

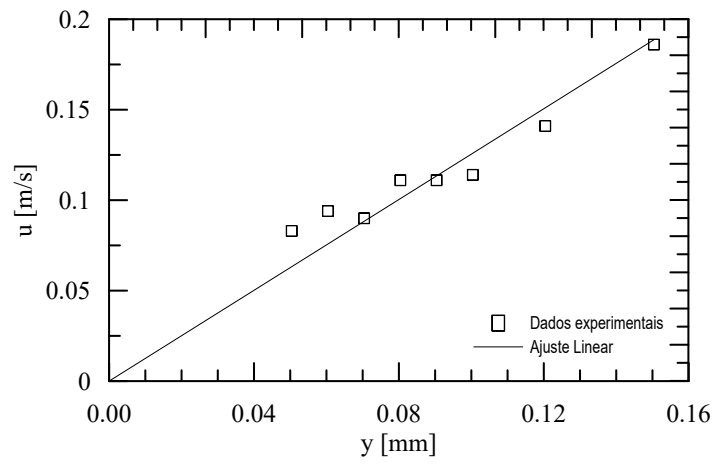


(b)  $Re = 48.512$

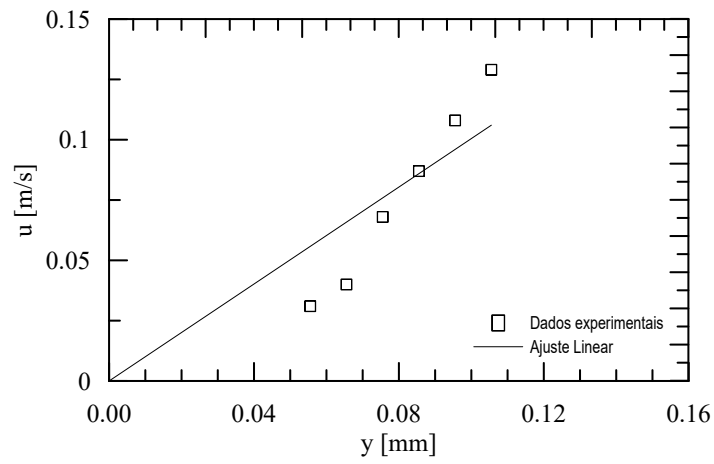


(c)  $Re = 56.448$

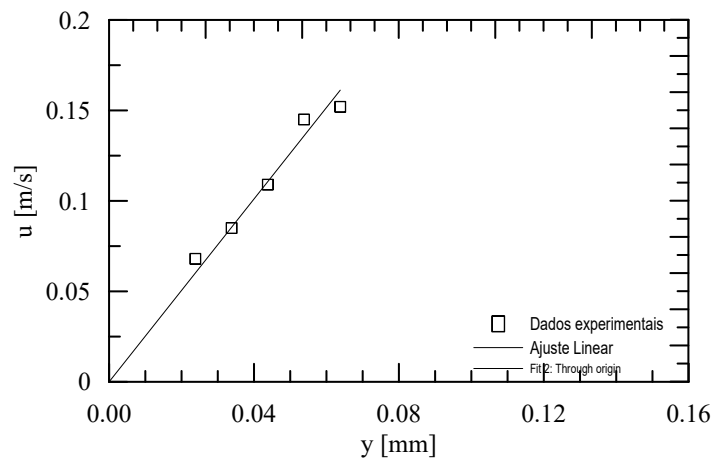
Figura 4.15: Perfil de velocidades próximo à subcamada viscosa para o canal liso, mostrando ajuste linear para cálculo da velocidade atrito para cada Reynolds medido.



(a)  $Re = 41.606$



(b)  $Re = 52.204$



(c)  $Re = 57.146$

Figura 4.16: Perfil de velocidades próximo à subcamada viscosa para o canal com ranhuras, mostrando ajuste linear para cálculo da velocidade atrito para cada Reynolds medido.

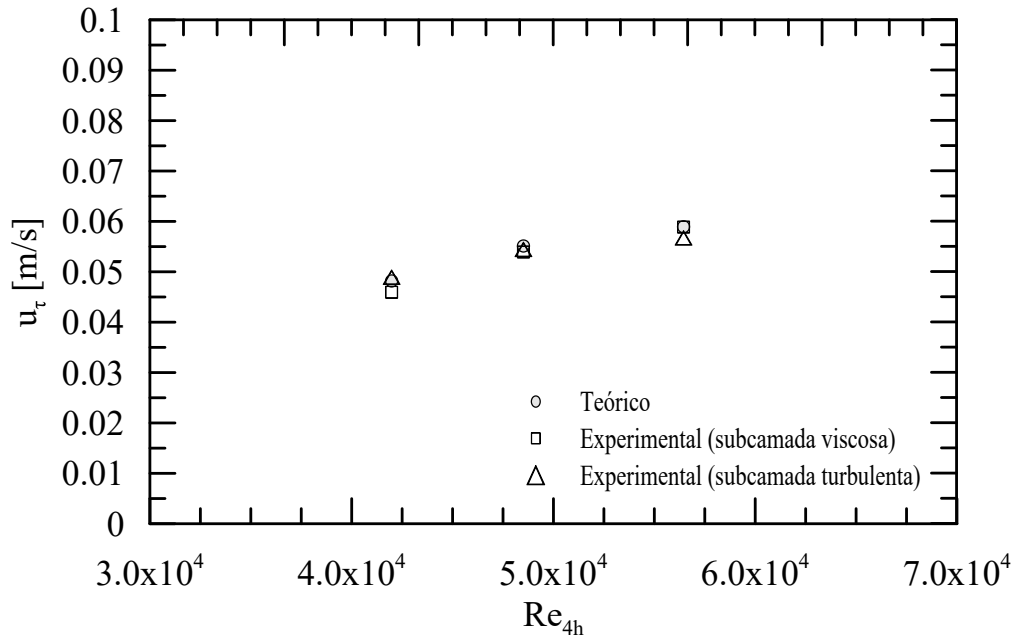


Figura 4.17: Validação dos dados obtidos na técnica de VLD pela comparação das velocidades de atrito teórica e experimental (via subcamada viscosa e turbulenta) do canal liso.

velocidade e  $u/U_{max}$  para cada caso, podemos determinar a tensão de cisalhamento na parede do canal liso.

Com esta tensão na parede, podemos determinar a velocidade de atrito através de sua própria definição, dada pela Equação 3.8. O comparativo foi realizando para o canal liso, já que as expressões analíticas tem como hipóteses fundamentais o escoamento sobre uma superfície lisa.

A Figura 4.17 mostra os pontos de velocidades de atrito teórica e experimental (via subcamada viscosa e turbulenta) do canal liso em função do número de Reynolds.

O cálculo da velocidade de atrito teórica permite analisar, assim como mencionado, a altura aproximada da subcamada viscosa. Utilizando a altura de referência de  $5 \nu/u_\tau$ , para o canal liso vemos que a altura da subcamada viscosa é de aproximadamente  $90 \mu m$  no Reynolds mais baixo ( $Re_{4h} = 41.800$ ) e de  $70 \mu m$  no Reynolds mais alto ( $Re_{4h} = 56.800$ ). Ou seja, a princípio a altura das ranhuras longitudinais (Figura 3.12) *perfura* por completo a subcamada viscosa original do escoamento sobre a superfície lisa.

No caso do canal liso, podemos perceber que a curva da lei logarítmica ajustada possui inclinação concordante com a lei logarítmica universal (que utiliza os valores de  $\kappa = 0,41$  e  $B = 5,0$ . Além disso, assim como citado por ZANOUN *et. al.* [7],

se confirma a tendência de concordância dos resultados quanto maior o número de Reynolds. Para o canal com ranhuras, não se aplica a lei logarítmica universal, e foi exibida somente a lei logarítmica ajustada.

Podemos notar nas Figuras 4.20 e 4.21 que, exibindo os perfis de velocidade em coordenadas internas para diferentes Reynolds, as curvas concordam muito bem à Lei logarítmica. Isto pode não ser uma surpresa dado que a velocidade de atrito utilizada para a escala do gráfico é derivada do ajuste dos dados à própria Lei logarítmica, mesmo que com constantes  $\kappa$  e  $B$  calculados.

O cálculo destes parâmetros foi apontado por WEI *et. al.* [36] como mais apropriado que o uso do método de Clauser por não assumir *a priori* que existe uma lei logarítmica universal para o perfil de velocidades. As diferenças sutis devido à diferença do número de Reynolds e superfície de escoamento devem ser levadas em consideração.

Quando se compara o perfil de velocidades em coordenadas internas do escoamento de uma superfície rugosa em relação à lisa a mesmo números de Reynolds, normalmente o que se observa é a translação vertical para baixo da rugosa. Isto ocorre principalmente na região da subcamada logarítmica, onde o caso rugoso assume valores menores de  $u^+$  a mesmo  $y^+$ .

SCHLICHTING [25] mostrou que esse chamado defeito de velocidade pode ser modelado através do parâmetro  $B$  da Equação 2.8. Desta forma, aplica-se um modelo onde  $B$  não é mais uma constante, mas sim função da rugosidade adimensional  $k^+ = ku_\tau/\nu$ .

Já CLAUSER [37] propôs um método robusto que é utilizado até hoje onde a inclinação da região logarítmica do caso rugoso tem a mesma inclinação do caso liso. No caso, é aplicado um defeito de velocidade  $\Delta u^+$  como pode ser visto na Equação 4.12, onde o defeito é expresso na Equação 4.13 ou 4.14, caso o elemento rugoso seja do tipo  $K$  ou  $D$  respectivamente.

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ - \Delta u^+ \quad (4.12)$$

$$\Delta u^+ = \frac{1}{k} \ln k^+ + C_1 \quad (4.13)$$

$$\Delta u^+ = \frac{1}{k} \ln \delta^+ + C_2 \quad (4.14)$$

Como pode ser observado na Figura 4.22 e 4.23, que compara o canal liso com o canal com ranhuras para dois Reynolds distintos, percebe-se uma inclinação da região logarítmica parecida. Contudo, a translação do caso com ranhuras é para cima ao invés de provocar uma defeito de velocidade na forma de diminuição da mesma. Ou seja, o termo  $\Delta u^+$  da Equação 4.12 assume valores negativos. Como

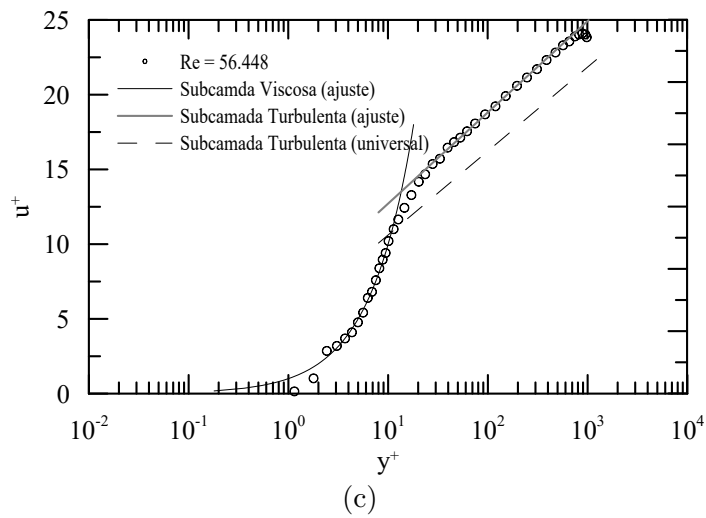
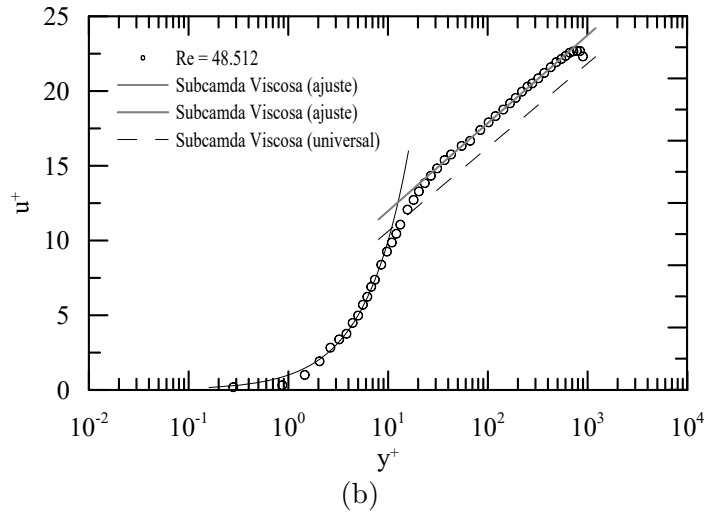
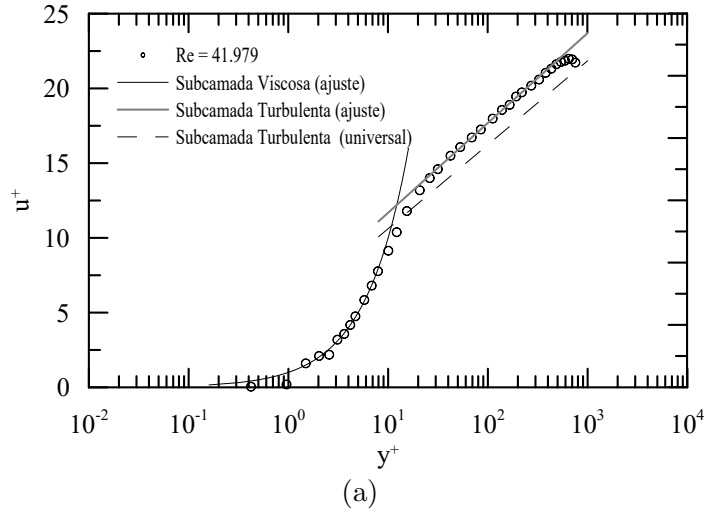


Figura 4.18: Perfil de velocidade média em coordenadas internas para o canal liso. (a)  $Re = 41.979$ , (b)  $Re = 48.512$  e (c)  $Re = 56.448$ .



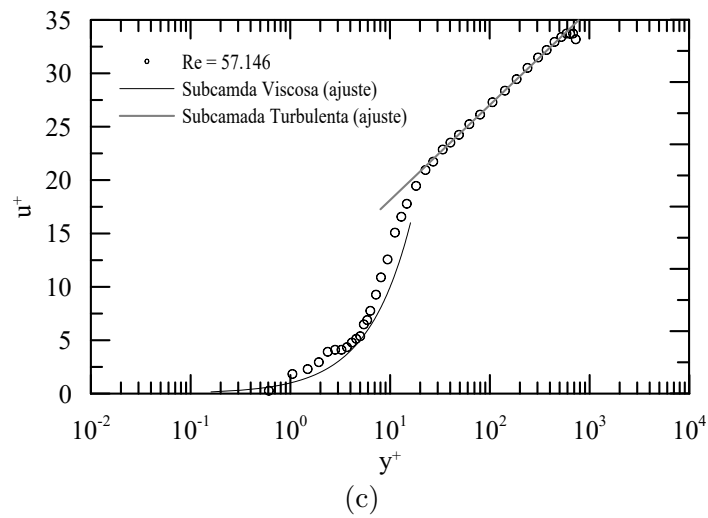
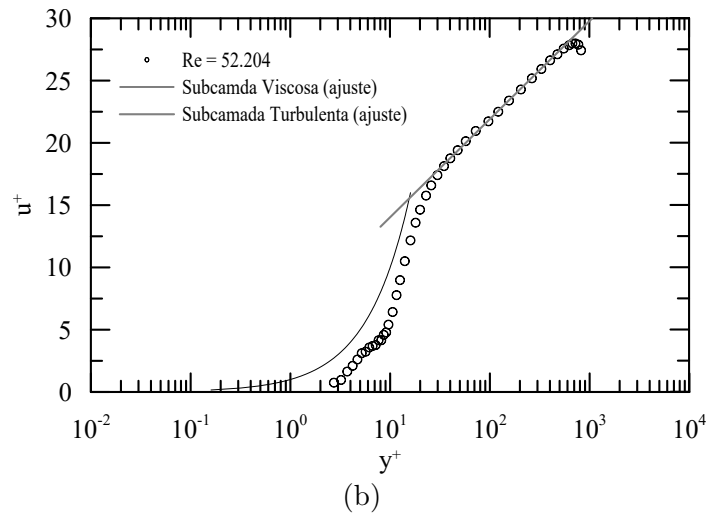
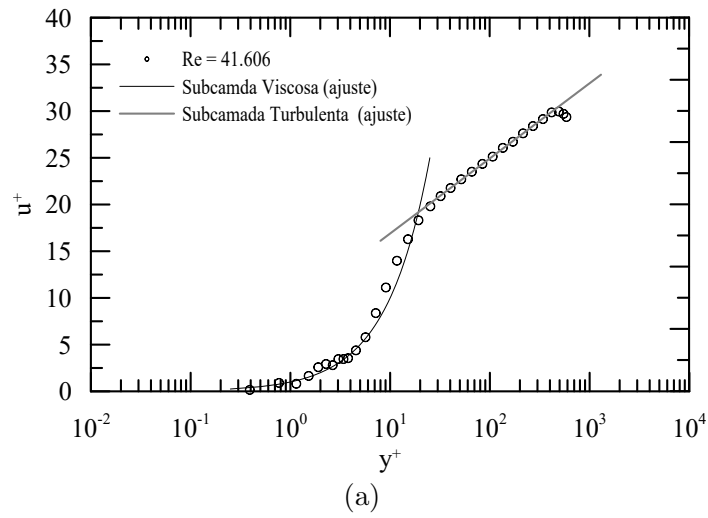


Figura 4.19: Perfil de velocidade média em coordenadas internas para o canal com ranhuras. (a)  $Re = 41.606$ , (b)  $Re = 52.204$  e (c)  $Re = 57.146$

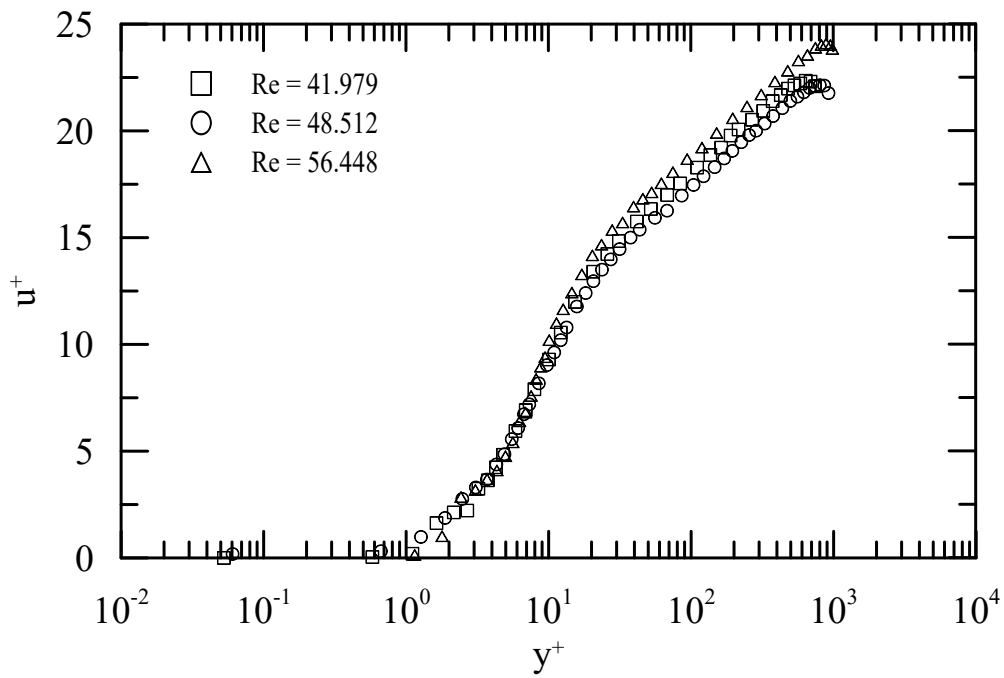


Figura 4.20: Concordância do perfil de velocidade média em coordenadas internas em cada Reynolds para o canal liso.

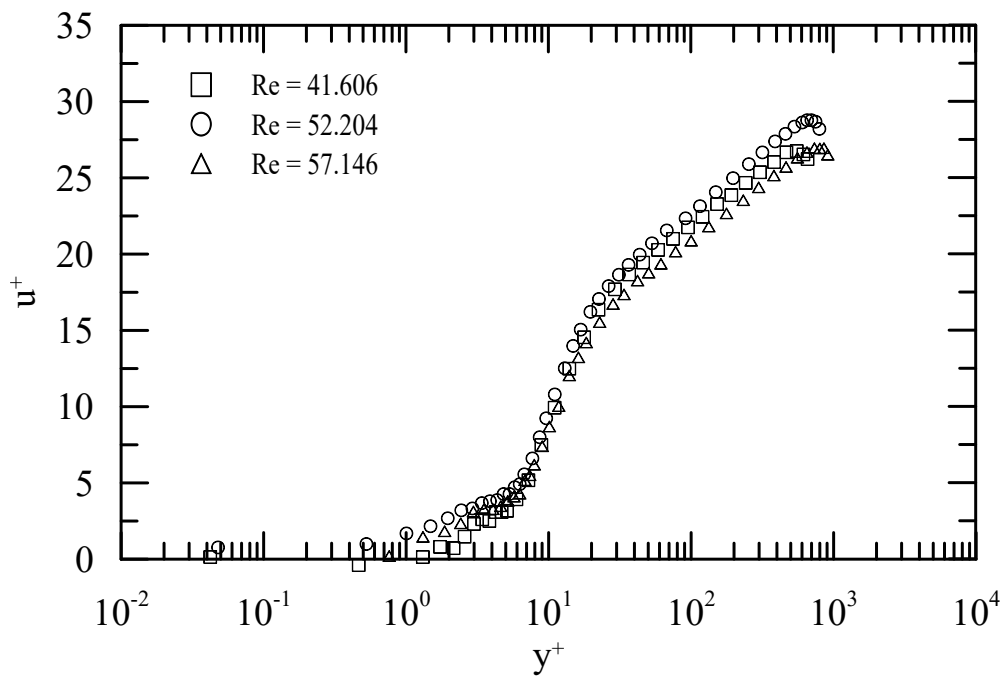


Figura 4.21: Concordância do perfil de velocidade média em coordenadas internas em cada Reynolds para o canal com ranhuras.

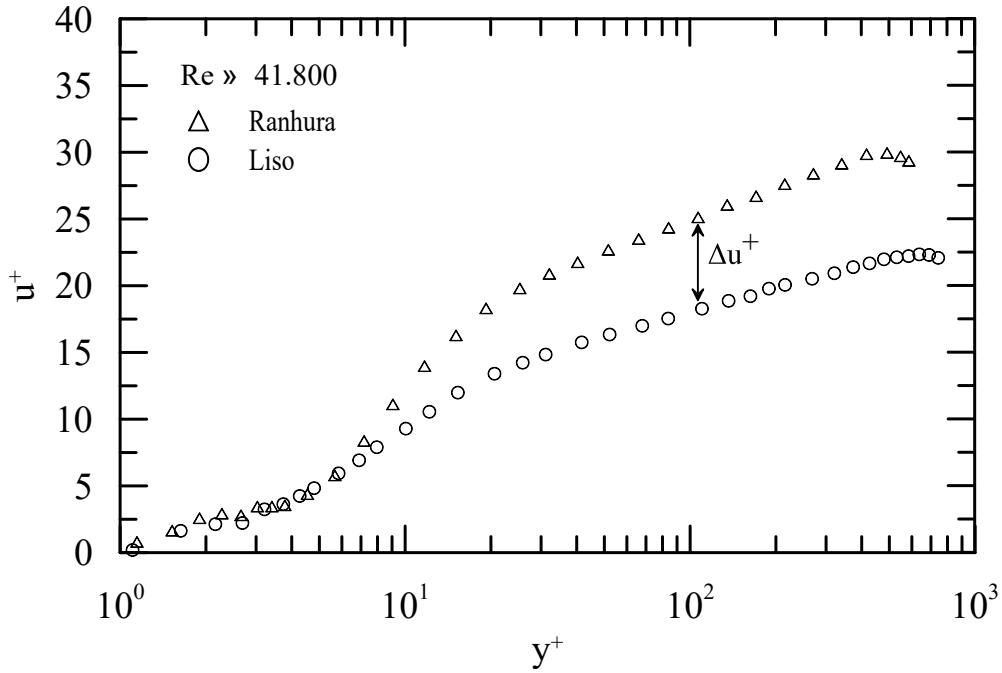


Figura 4.22: Comparação entre os perfis de velocidade média em coordenadas internas do canal liso e com ranhuras a  $Re = 41.800$  aproximadamente.

o defeito é função da diferença entre os coeficientes de atrito, na forma  $\delta u^+ = \sqrt{2/Cf_{LISO}} - \sqrt{2/Cf_{RUGOSO}}$ , nota-se que, de fato, o caso do canal com ranhuras apresenta menor coeficiente de atrito que o canal liso.

A intensidade turbulenta  $Tu$  é apresentada na Figura 4.24. Assume-se uma turbulência isotrópica, onde as flutuações de velocidade não possuem direção preferencial. Essa simplificação é tão mais precisa quanto mais afastado da parede e nos turbilhões de pequena escala, onde a isotropia local de Kolmogorov é aceita [26].

Podemos notar que a intensidade turbulenta diminui conforme afasta-se da parede. Além disso, o canal com ranhuras apresenta valores maiores de intensidade turbulenta para todos os Reynolds principalmente na região de  $y^+$  menor que 10. Ou seja, pode-se inferir que há um espessamento da subcamada viscosa no canal com ranhuras, pois há um deslocamento das flutuações para longe da parede assim como visto na literatura e comentado na Seção 2.3.

O momento de terceira ordem, ou assimetria, é apresentado na Figura 4.25. A assimetria é definida pela Equação 4.15, e ela representa o quanto a distribuição dos dados de velocidade instantânea estão simétricos em relação à média. Uma distribuição normal satisfaz a  $Su = 0$ .

$$Su = \frac{\overline{u^3}}{\overline{u^2}^{2/3}} \quad (4.15)$$

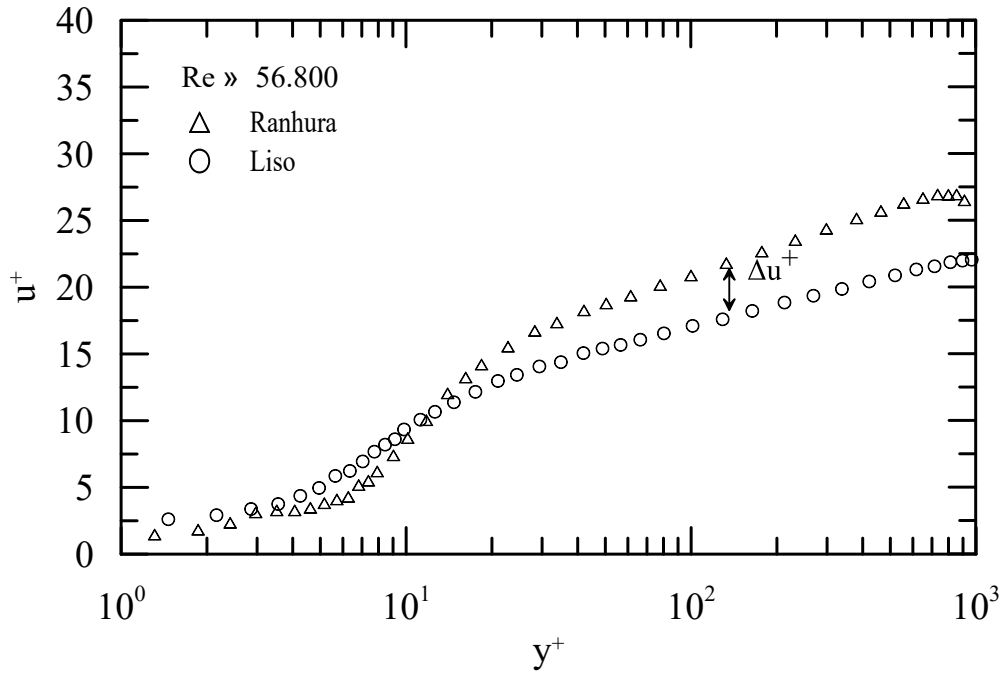


Figura 4.23: Comparação entre os perfis de velocidade média em coordenadas internas do canal liso e com ranhuras a  $Re = 56.800$  aproximadamente.

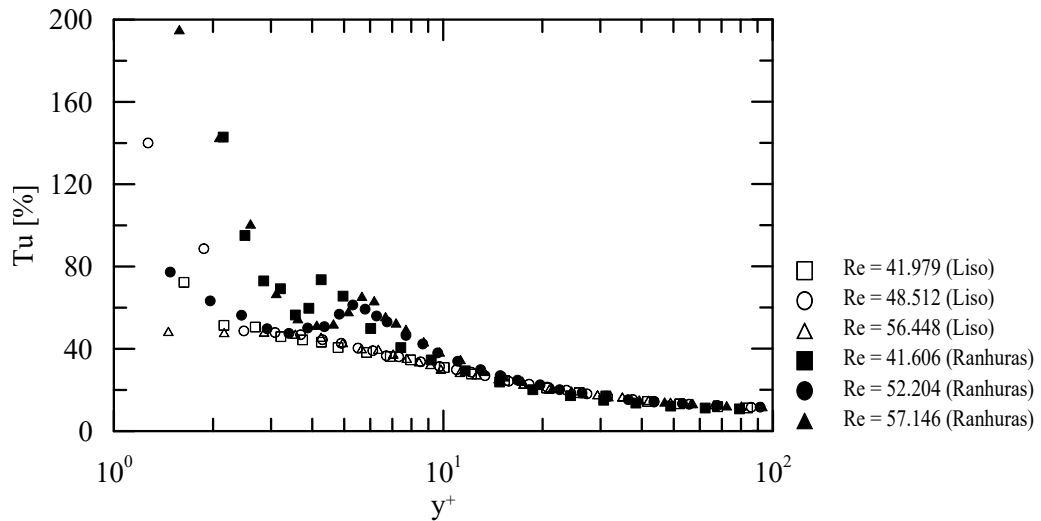


Figura 4.24: Intensidade turbulenta para o todos os Reynolds medidos no canal liso (ponto branco) e com ranhuras (pontos pretos).

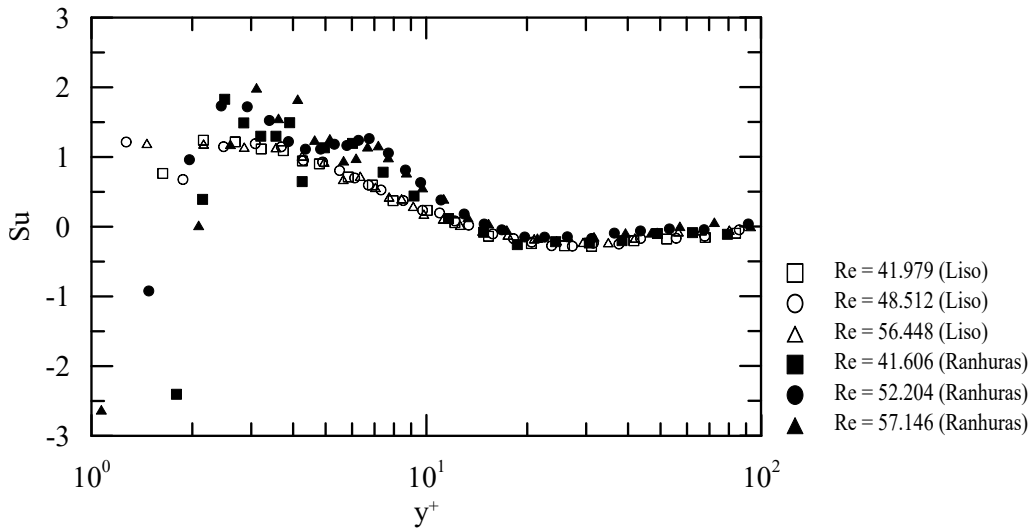


Figura 4.25: Assimetria (ou momento de terceira ordem) para todos os Reynolds medidos no canal liso (pontos brancos) e com ranhuras (pontos pretos).

Nota-se que o canal com ranhuras apresenta valores de assimetria maior que o canal liso em toda faixa de  $y^+$  até 10. Isso mostra que de fato as ranhuras estão limitando as flutuações turbulentas principalmente na direção transversal  $w'$ , o que faz com que as flutuações de velocidade sejam pequenas muito próximo da parede, deslocando assim os eventos turbulentos de explosão para longe da parede. De fato, valores de assimetria positivos mostram que naquele ponto há o recebimento de porções mais velozes de fluido providas da região externa, eventos conhecidos como *sweep motions*.

Longe da parede, os valores de assimetria entre canal liso e com ranhuras quase não diferem, mostrando que o efeito da introdução das ranhuras se limita à alteração da subcamada viscosa.

O momento de quarta ordem, ou achatamento, é apresentado na Figura 4.26. O achatamento é definido pela Equação 4.16, e ele representa quão maior é a ocorrência de valores instantâneos de velocidade que estão afastados em relação à média. Uma distribuição normal satisfaz a  $Fu = 3$ .

$$Fu = \frac{\overline{u'^4}}{\overline{u'^2}^2} \quad (4.16)$$

Um alto valor de achatamento apresentado para o canal com ranhuras na região de  $y^+$  menor que 10 é principalmente devido à ocorrência das velocidades médias negativas apresentadas na Figura 4.14.

As Tabelas 4.4 e 4.5 mostram os resultados obtidos para as constantes da lei logarítmica nos Reynolds ensaiados para o canal liso e com ranhuras, respectivamente.

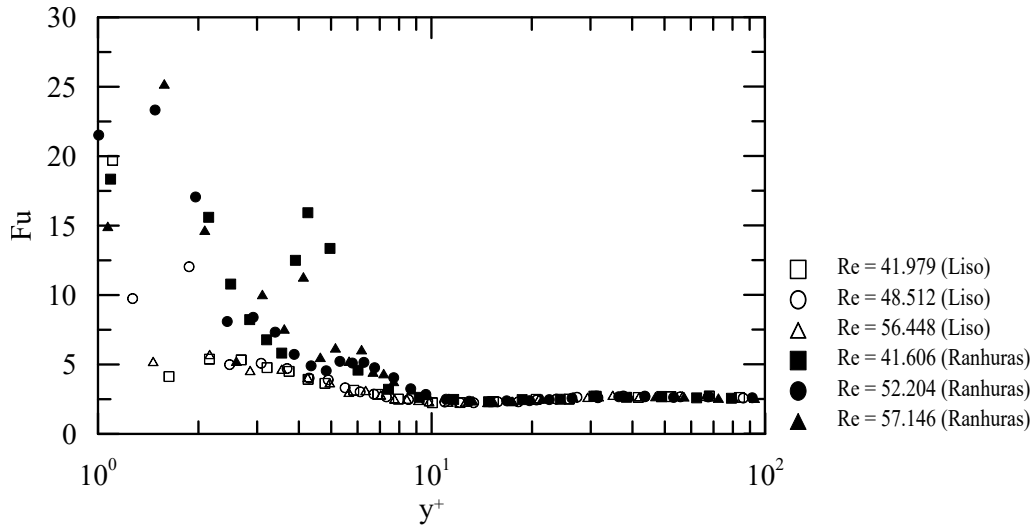


Figura 4.26: Achatamento (ou momento de quarta ordem) para o todos os Reynolds medidos no canal liso (ponto brancos) e com ranhuras (pontos pretos).

$U$ [m/s]	0,916	1,082	1,192
$u_\tau$ [m/s]	0,046	0,054	0,059
Re	41979	48512	56448
$Re_\tau$	2106	2419	2788
$\kappa$	0,38	0,39	0,38
B	5,7	6,1	6,6
$\tau_w$ [Pa]	2,17	2,76	2,89
100 Cf	0,520	0,473	0,409

Tabela 4.4: Resultados das constantes da Lei Logarítmica e atrito para o canal liso.

Para o caso com ranhuras, são apresentados também os valores de  $s^+$  obtidos através da determinação da velocidade de atrito.

Calculando e comparando a redução de arrasto para  $Re_{4h} = 41.800$  e  $Re_{4h} = 56.800$  entre o canal liso e ranhura, obtemos um valor de  $-52,3\%$  e  $-55,9\%$ , respectivamente. É importante lembrar que estes valores são baseados na tensão de cisalhamento da parede inferior ao canal, onde houve a troca de placas lisas para placas com ranhuras. Ou seja, não é uma redução de arrasto global no canal assim como os dados obtidos pela queda de pressão.

## 4.5 Comparação entre as técnicas de pressão e VLD

De forma a ajudar na compreensão da independência dos resultados obtidos pela técnica de VLD e por medição da pressão, podemos comparar os valores de redução

U [m/s]	0.827	1.031	1.115
$u_\tau$ [m/s]	0,036	0,041	0,043
Re	41606	52204	57146
$Re_\tau$	1808	2097	2196
$\kappa$	0,29	0,29	0,32
B	8,9	6,2	6,4
$\tau w$ [Pa]	1,03	1,71	1,27
100 Cf	0,301	0,323	0,206
s+	6,3	7,2	7,6

Tabela 4.5: Resultados das constantes da Lei Logarítmica e atrito para o canal com ranhuras.

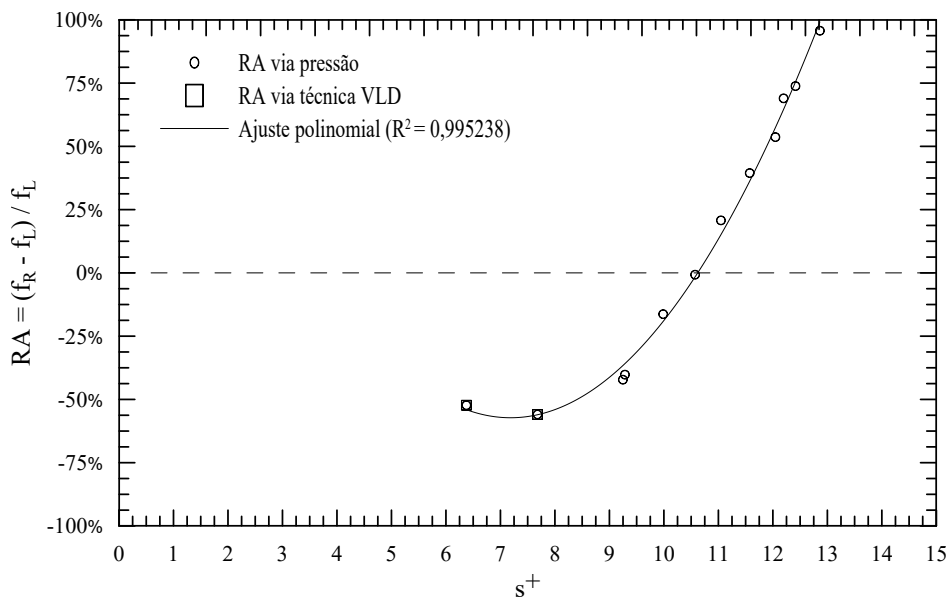


Figura 4.27: Comparação da redução de arrasto (RA) das técnicas de pressão e de VLD. Valores de RA para pressão estão dobrados para representar redução de arrasto local. Ajuste polinomial de segundo grau.

de arrasto obtidos por ambos. Para isso, utilizaremos como referência o valor de largura adimensional  $s^+$ .

O gráfico da Figura 4.27 compila os dados obtidos pela medição de pressão apresentados na Figura 4.5 em conjunto com o valor de redução de arrasto calculado para os Reynolds de 41.800 e 56.800 mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Um ajuste polinomial de segundo grau foi realizado de forma a comparar com o perfil parabólico reportado pela literatura.

A medição de pressão compreende uma redução global do arrasto no escoamento interno e a medição via VLD é uma medição local de comparação entre as placas lisas e com ranhuras. Logo, devemos realizar um tratamento dos dados para uma comparação entre as mesmas. Para isto, os valores de arrasto de pressão foram dobrados para representar a redução local entre placas lisas e com ranhuras no

canal. Ou seja, considera-se que a redução obtida pela pressão é menor do que seria obtido caso o canal fosse coberto por ranhuras nas paredes inferior e superior. Realizar esta alteração tem como premissa que: o arrasto nas paredes laterais do canal e que a interação entre os campos de velocidade das paredes inferior e superior são desprezíveis.

A comparação mostra que os valores de redução de arrasto concordam com a curva parabólica apresentada pelo gráfico reportado por [22], mostrado na Figura 2.9. Os resultados obtidos por este trabalho parecem estar localizados na região próxima e posterior ao ponto de redução de arrasto máxima.



# Capítulo 5

## Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a utilização de ranhuras longitudinais podem ser implementadas de forma a obter uma redução de arrasto.

Foram utilizadas as técnicas de medição de pressão, VIP e VLD para um canal retangular fechado liso e outro em que a superfície inferior do mesmo era composto pelas ranhuras longitudinais.

A redução de arrasto observada utilizando a técnica por queda de pressão mostra que valores de até 21% podem ser obtidos para valores de  $s^+$  de aproximadamente 9.

A técnica de VIP permitiu uma análise global do escoamento, principalmente da distribuição do perfil de velocidades médias. Foi possível verificar que há um tendência de maior concentração de intensidade turbulenta na região da subcamada turbulenta para o canal com ranhuras.

Já a técnica de VLD confirmou a redução de arrasto mostrada pela técnica de pressão e permitiu uma análise local da redução de arrasto, comparando somente a parede inferior do canal retangular utilizado, que continha ou placas lisas ou placas com ranhuras. Neste caso, foram obtidos valores de redução locais de até 56% para valores de  $s^+$  de aproximadamente 8. Estes valores são resultados que não foram observados na pesquisa bibliográfica deste trabalho. Eles se aproximam somente da técnica amplamente utilizada de adição de polímeros. Porém, a vantagem clara da utilização de ranhuras é de ser um método passivo, onde não há gasto de energia no sistema devido a técnica de redução.

Quando comparados com os resultados obtidos por FROHNAPFEL *et. al.* [38], feitas em um canal retangular de dimensões e razão de aspecto semelhante a este trabalho, as reduções de arrasto mostraram-se parecida. Porém, os autores observaram que as reduções de arrasto máximas foram obtidas numa região de baixa largura adimensional da ranhura  $s^+$ .

O perfil parabólico apresentado na Figura 4.27 concorda muito bem com a Figura 2.9 reportada na literatura, mostrando como a curva atinge um valor máximo de

redução em um  $s^+$  ótimo. De fato, se calcularmos o valor de redução máxima através da análise de mínimo local da equação do segundo grau ajustada aos dados, encontramos a mesma em  $s^+ = 7,2$ , o que foi observado na literatura.

Comparando os dados obtidos com o trabalho numérico através de simulações diretas (DNS) de EL SAMINI *et. al.* [39], nota-se uma correspondência de reduções de arrasto na ordem de 15% para  $s^+ \approx 10$ . Uma comparação completa com os dados para outra faixa de Reynolds para outros trabalhos de DNS não é possíveis devido à limitação da faixa de  $s^+$  do presente trabalho.

## 5.1 Discussão

A comparação entre as técnicas de pressão de VLD mostram que há concordância entre os diferentes resultados obtidos pelas mesmas. A tendência geral de redução de arrasto é observada pela região parabólica de  $s^+$  variando de 6 a 13, assim como visto na Figura 2.9. Em menores números de Reynolds podem ser obtidos mais pontos com reduções de arrasto.

Os valores de redução obtidos são acentuadamente superiores aos reportados na literatura. A validação dos dados de pressão e VLD por meio de uma análise teórica analítica mostra que os valores de queda de pressão e velocidade de atrito medidos estão de acordo com o esperado. A geometria das ranhuras pode possuir uma parcela importante na redução de arrasto, já que a mesma não foi encontrada na literatura.

Outro fator importante a ser observado é que a espessura da subcamada linear viscosa medida através da técnica de VLD para o canal liso é aproximadamente a altura da própria ranhura. Ou seja, a região linear do perfil de velocidades observado no canal com ranhuras, que certamente é maior que a espessura do caso liso, mostra uma concordância com o que é reportado como mecanismo de redução de arrasto por ranhuras.

Como observado por FROHNAPFEL *et. al.* [38], as restrições cinemáticas impostas pela axissimetria local nas ranhuras forçam a turbulência próxima à parede atingir um estado de uma componente (a longitudinal). Quando a turbulência atinge esse estado limite, deve ser suprimida através da subcamada viscosa, causando assim, seu espessamento devido à menor troca de quantidade de movimento.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A assimetria do perfil de velocidades observada na técnica de VIP e VLD mostram que o resultado pode apresentar diferenças caso todo o canal seja preenchido por ranhuras longitudinais.

Esta assimetria devido a inclusão de um canal que possui placas lisas na parede superior e com ranhuras na parede inferior influencia também as reduções de arrasto calculadas para a técnica de medição da queda de pressão. Mesmo assim, pode-se inferir que as reduções num canal completamente coberto por ranhuras deve apresentar maiores reduções. Logo, um trabalho futuro em que se construa um canal preenchido por ranhuras podem resultar em reduções de arrasto maiores.

Além disso, uma análise numa faixa maior de Reynolds torna-se fundamental para compreender o que ocorre para menores valores de largura adimensional da ranhura, onde, pelos dados obtidos, há probabilidade de haver mais pontos com redução de arrasto.

Uma contribuição importante para a análise da aplicação das ranhuras a escoamentos internos seria a observação das estruturas turbulentas dos escoamentos através de técnicas mais sofisticadas de VIP. A assimetria imposta pelas ranhuras deve ser confirmada através de observações dos vórtices longitudinais, que afetarão a dinâmica e tamanho da subcamada viscosa do perfil de velocidades.

# Referências Bibliográficas

- [1] VISWANATH, P. R. “Aircraft viscous drag reduction using riblets”, *Progress in Aerospace Sciences*, v. 38, n. 6-7, pp. 571–600, 2002. ISSN: 03760421. doi: 10.1016/S0376-0421(02)00048-9.
- [2] ABDULBARI, H. A., YUNUS, R. M., ABDURAHMAN, N. H., et al. “Going against the flow—A review of non-additive means of drag reduction”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 19, n. 1, pp. 27–36, 2013. ISSN: 1226086X. doi: 10.1016/j.jiec.2012.07.023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.023>>.
- [3] ABDULBARI, H. A., MAHAMMED, H. D., HASSAN, Z. B. Y. “Bio-Inspired Passive Drag Reduction Techniques: A Review”, *ChemBioEng Reviews*, , n. 3, pp. 185–203, 2015. ISSN: 21969744. doi: 10.1002/cben.201400033.
- [4] NASA. “NASA RIBLETS FOR STARS & STRIPES”. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Riblets.html>>.
- [5] SILVA FREIRE, A. P. *Teoria de Camada Limite*. Programa de Engenharia Mecânica COPPE/UFRJ, .
- [6] KUNDU, P. K., COHEN, I. M., DOWLING, D. R. *Fluid Mechanics*. 5th ed. Oxford, Elsevier Inc., 2012. ISBN: 9780123821003. doi: 10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C. Disponível em: <[http://doi.wiley.com/10.1002/1521-3773\(20010316\)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C](http://doi.wiley.com/10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C)>.
- [7] ZANOUN, E. S., DURST, F., NAGIB, H. “Evaluating the law of the wall in two-dimensional fully developed turbulent channel flows”, *Physics of Fluids*, v. 15, n. 10, pp. 3079–3089, 2003. ISSN: 10706631. doi: 10.1063/1.1608010.
- [8] LAUNDER, B. E., LI, S. “A numerical study of riblet effects on laminar flow through a plane channel”, *Applied Scientific Research*, v. 46, n. 3, pp. 271–279, 1989. ISSN: 00036994. doi: 10.1007/BF00404824.

- [9] CHOI, H., MOIN, P., KIM, J. “On the effect of riblets in fully developed laminar channel flows”, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, v. 3, n. 8, pp. 1892, 1991. ISSN: 08998213. doi: 10.1063/1.857918. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pofa/3/8/10.1063/1.857918>>.
- [10] SILVA FREIRE, A. P. *Introdução a Turbulencia*. Programa de Engenharia Mecânica COPPE/UFRJ, .
- [11] BECHERT, D. W., BRUSE, M., HAGE, W. “Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin”, *Experiments in Fluids*, v. 28, n. 5, pp. 403–412, 2000. ISSN: 0723-4864. doi: 10.1007/s003480050400.
- [12] CHOI, K.-S. “Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets”, *Journal of fluid mechanics*, v. 208, n. April 2006, pp. 417–458, 1989. ISSN: 0022-1120. doi: 10.1017/S0022112089002892. Disponível em: <[http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_{\\_}S0022112089002892](http://www.journals.cambridge.org/abstract_{_}S0022112089002892)>.
- [13] HOU, J., VAJDI HOKMABAD, B., GHAEMI, S. “Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 85, pp. 229–239, 2017. ISSN: 08941777. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.03.006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177717300730>>.
- [14] LUCHINI, P., MANZO, F., POZZI, A. “Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross-flow”, *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, v. 228, n. 1991, pp. 87–109, 1991. ISSN: 1750-6859. doi: 10.1017/S0022112091002641. Disponível em: <[http://journals.cambridge.org/abstract\\_{\\_}S0022112091002641{%}5Cnhttp://journals.cambridge.org/download.php?file=/FLM/FLM228/S0022112091002641a.pdf{%}&code=bf08419be25de850ec9cdaa4de02bcf5](http://journals.cambridge.org/abstract_{_}S0022112091002641{%}5Cnhttp://journals.cambridge.org/download.php?file=/FLM/FLM228/S0022112091002641a.pdf{%}&code=bf08419be25de850ec9cdaa4de02bcf5) [Accessed 30/4/16]>.
- [15] WALSH, M. J. “Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets”, *AIAA 20th Aerospace Sciences Meeting, January 11-14*, pp. 1–8, 1982.
- [16] WALSH, M. J. “Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique”, *Aiaa Journal*, v. 21, n. 4, pp. 485–486, 1983. ISSN: 0001-1452. doi: 10.2514/3.60126.
- [17] WALSH, M. J., LINDEMANN, A. M. “AI AA-84-0347 Turbulent Drag Reduction AIAA 22nd Aerospace Sciences Meeting”, 1984.

- [18] WALSH, M. J., ANDERS, J. B., HEFNER, J. N. “Combined riblet and lebu drag reduction system”, *United states patent 4706910*, 1987.
- [19] WALSH, M. J., ANDERS, J. B. “Riblet/LEBU research at NASA Langley”, *Applied Scientific Research*, v. 46, n. 3, pp. 255–262, 1989. ISSN: 00036994. doi: 10.1007/BF00404822.
- [20] WALSH, M. J. “Effect of Detailed Surface Geometry on Riblet Drag Reduction Performance”, *Journal of Aircraft*, v. 27, n. 6, pp. 572–573, 1990. ISSN: 0021-8669. doi: 10.2514/3.25323.
- [21] BECHERT, D. W., HOPPE, G., REIF, W.-E. “On Drag Reduction of the Shark Skin”, *Aiaa Journal*, 1985. doi: 10.2514/6.1985-546.
- [22] BECHERT, D. W., BRUSE, M., HAGE, W., et al. “Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 338, n. 1997, pp. 59–87, 1997. ISSN: 00221120. doi: 10.1017/S0022112096004673.
- [23] BECHERT, D. W., BRUSE, M., HAGE, W., et al. “Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application.” *Die Naturwissenschaften*, v. 87, n. 4, pp. 157–171, 2000. ISSN: 0028-1042. doi: 10.1007/s001140050696.
- [24] GARCÍA-MAYORAL, R., JIMÉNEZ, J. “Drag reduction by riblets.” *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, v. 369, n. 1940, pp. 1412–27, 2011. ISSN: 1364-503X. doi: 10.1098/rsta.2010.0359. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/369/1940/1412>>.
- [25] SCHLICHTING, H. *Boundary layer theory*. Springer, 1979. ISBN: 007124493X. doi: 10.1119/1.1971812.
- [26] BRASIL, W. M. “Camadas Limite Turbulentas Sujeitas a uma Variação Singular de Propriedades na Superfície”. 2004.
- [27] ORSZAG, S. A. “Accurate solution of the Orr-Sommerfeld stability equation”, *Journal of F*, v. 50, pp. 689–703, 1971.
- [28] ISO/TR20461. *Determination of uncertainty for volume measurements made using the gravimetric method*. Relatório técnico, 2000.
- [29] HUBER, M. L., PERKINS, R. A., LAESECKE, A., et al. “New international formulation for the viscosity of H<sub>2</sub>O”, *Journal of Physical and Chemical*

*Reference Data*, v. 38, n. 2, pp. 101–125, 2009. ISSN: 00472689. doi: 10.1063/1.3088050.

- [30] DEAN, R. “Reynolds Number Dependence of Skin Friction and Other Bulk Flow Variables in Two-Dimensional Rectangular Duct Flow”, *Journal of Fluids Engineering*, v. 100, n. 2, pp. 215–223, 1978. ISSN: 0098-2202. doi: 10.1115/1.3448633. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.3448633>>.
- [31] WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. 2011. ISBN: 9780073529349 (hbk.)\r0073529346 (hbk.)\r9780077422417 (pbk & DVD.)\r0077422414 (pbk. & DVD)\r9780077419080 (DVD)\r0077419081 (DVD).
- [32] RAFFEL, M., WILLERT, C. E., WERELEY, S. T., et al. *Particle Image Velocimetry*, v. 79. 2007. ISBN: 9783540723073. doi: 10.1007/978-3-540-72308-0. Disponível em: <[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title{#}0{%}5Cnhttp://books.google.com/books?hl=en&lr={&}id=jbDl2-yHbooC{&}oi=fnd{&}pg=PR7{&}dq=Particle+Image+Velocimetry{&}ots=T1sq0sf5mU{&}sig=gEvGBErY1oPK-uQr{-}\\_BQgYjnsSpM{%}5Cnhttp://books.google.com/books](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title{#}0{%}5Cnhttp://books.google.com/books?hl=en&lr={&}id=jbDl2-yHbooC{&}oi=fnd{&}pg=PR7{&}dq=Particle+Image+Velocimetry{&}ots=T1sq0sf5mU{&}sig=gEvGBErY1oPK-uQr{-}_BQgYjnsSpM{%}5Cnhttp://books.google.com/books)>.
- [33] LOUREIRO, J. B. R., PINHO, F. T. “Turbulência, Volume 5, Tomo 1”. In: Silva Freire, A. P., Ilha, A., Colaço, M. J. (Eds.), *Turbulência, Volume 5, Tomo 1*, ABCM, cap. 5 - Fundam, p. 466, Rio de Janeiro, 2006. ISBN: 9788585769246.
- [34] LIEN, K., MONTY, J., CHONG, M., et al. “The entrance length for fully developed turbulent channel flow”, *15th Australasian Fluid Mechanics Conference (Sydney, Australia)*, , n. December, pp. 1–4, 2004. Disponível em: <<http://www.aeromech.usyd.edu.au/15afmc/proceedings/papers/AFMC00093.pdf>>.
- [35] LASDON, L. S. “Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method”, *Office of Naval Research*, , n. October, 1973.
- [36] WEI, T., SCHMIDT, R., MCMURTRY, P. “Comment on the Clauser chart method for determining the friction velocity”, *Experiments in Fluids*, v. 38, n. 5, pp. 695–699, 2005. ISSN: 07234864. doi: 10.1007/s00348-005-0934-3.

- [37] CLAUSER, F. H. “The Turbulent Boundary Layer”, *Advances in Applied Mechanics*, v. 4, n. C, pp. 1–51, 1956. ISSN: 00652156. doi: 10.1016/S0065-2156(08)70370-3.
- [38] FROHNAPFEL, B., JOVANOVIĆ, J., DELGADO, A. “Experimental investigations of turbulent drag reduction by surface-embedded grooves”, *Fluid Mechanics*, v. 590, pp. 107–116, 2007. doi: 10.1017/S0022112007008221.
- [39] EL-SAMNI, O. A., CHUN, H. H., YOON, H. S. “Drag reduction of turbulent flow over thin rectangular riblets”, *International Journal of Engineering Science*, v. 45, n. 2-8, pp. 436–454, 2007. ISSN: 00207225. doi: 10.1016/j.ijengsci.2007.03.002.



# Anexo A - Certificados de calibração

## Calibração de vazão com ajuste

60004700-3505995

3007762702

Número da ordem de compra

BR-3005326130-10 / Endress+Hauser Flowtec

Nº da ordem/Fabricante

10P40-EROA1AA0B4AA

Código da ordem

PROMAG 10 P 1 1/2"

Transmissor/Sensor

K2007492000

Nº de série

-

Nº de identificação

FCP-8.C

Plataforma de calibração

6.28319 l/s ( $\pm 100\%$ )

Faixa máxima calibrada

Interface de serviço

Saída calibrada

0.7636

Fator de calibração

0

Ponto zero

26.8 °C

Temperatura da água

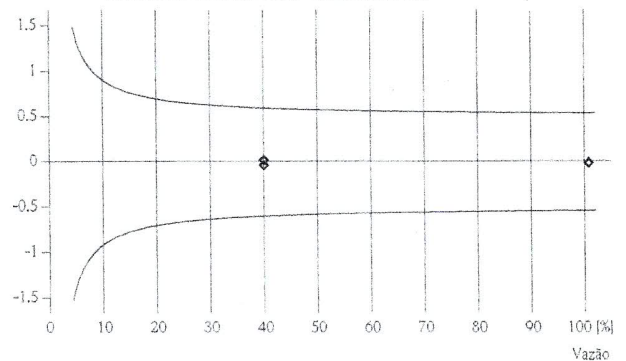
Vazão [%]	Vazão [l/s]	Duração [s]	V alvo [l]	V medição [l]	$\Delta$ d.l.* [%]	Saída** [mA]
39.8	2.5009	60.1	150.219	150.252	0.02	10.37
39.8	2.5016	60.1	150.241	150.190	-0.03	10.37
100.8	6.3303	60.1	380.212	380.157	-0.01	20.12
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

\*d.l.: de leitura

\*\*Valor calculado (4 - 20 mA)

% de erro de leitura medido

Limite de tolerância:  $\pm 0.5\%$  d.l.\*  $\pm$  Estabilidade zero



Para informações detalhadas sobre as especificações de saída deste dispositivo em teste, veja as Informações Técnicas, capítulo Características de performance.

É garantida a rastreabilidade dos instrumentos utilizados na calibração ao padrão nacional.

A Endress+Hauser Flowtec possui laboratórios acreditados que operam de acordo com a norma ISO/IEC 17025 em Reinach (Suíça), Cernay (França), Greenwood (EUA), Aurangabad (Índia) e Suzhou (China).

*J. Westmoreland*

27.02.2015

Data de calibração

Endress+Hauser Flowtec (Brasil) Fluxômetros Ltda  
Estrada Municipal Antonio Sesti, 600 A - Recreio Costa Verde  
13254-085 Itatiba - SP, Brazil

J. Westmoreland  
Operador

Certificado de acordo com  
ISO 9001

MVZ-033

## Certificado de Calibração Interna do NIDF

Número do certificado

**NIDF-048/2017**

### *Identificação do Instrumento ou da Medida Materializada*

**Item:** Termômetro do termohigrômetro, indicação da temperatura externa (OUT), com sensor externo do TH-002.

**Fabricante:** Siberius

**Modelo/Tipo:** HTC-2

**Número de Série:** 00158

**Código de Identificação/ TAG/NIDF:** TH-001

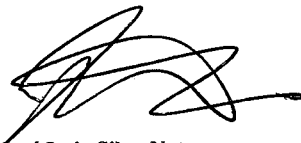
### *Informações Gerenciais*

**Data da Calibração:** 19/05/2017

**Laboratório Responsável:** Laboratório de Instrumentação Aplicada a Petróleo – LIAP

**Local de Realização:** Núcleo Interdisciplinar de Mecânica dos Fluidos - NIDF  
CT2 – Bloco, 1º piso.

**Data de emissão:** 25/05/2017



**Prof. José Luiz Silva Neto**  
**Laboratório de Instrumentação Aplicada ao Petróleo – LIAP**  
**LIAP/NIDF/Coppe/UFRJ**

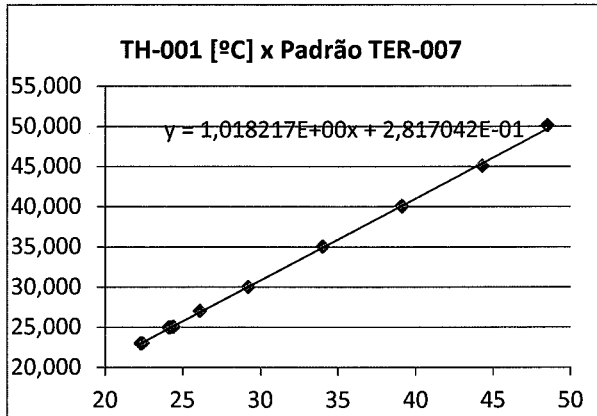
O presente certificado de calibração atende aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 e é válido apenas para o item acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral; reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo NIDF.

**Resultados e Declaração da Incerteza de Medição**

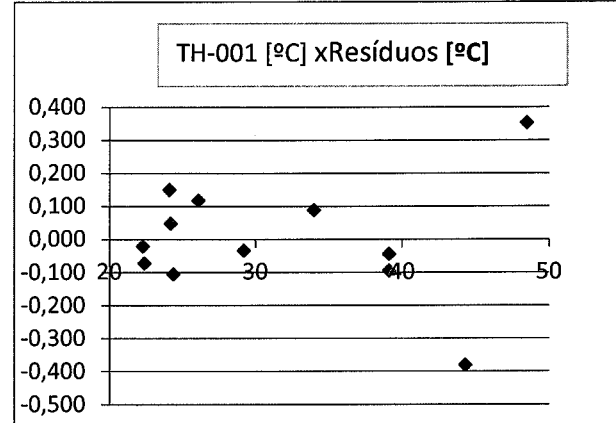
Todos os resultados de medições estão na planilha de cálculo, arquivo < TH-001 CC NIDF-048-2017 x TER-007 banho Julabo\_2017\_05\_19\_REV. 2017\_05\_24.xlsx>, arquivado junto com este certificado.

Os resultados da calibração estão contidos nos Gráficos 1 e 2 e na Tabela 2, onde a incerteza expandida da medição ( $U$ ) é declarada como a incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência  $k$ , com o número de graus de liberdade efetivos  $\nu_{eff}$ , o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza expandida da medição foi determinada de acordo com a Terceira Edição Brasileira do “Guia para Expressão da Incerteza de Medição” (ISO GUM).

**Gráfico 1 – Resultados da calibração**



**Gráfico 2 - Resíduo do ajuste de curva**



**TABELA 2 – Planilha de incerteza na faixa de calibração de 23°C até 50°C.**

	$U$ °C	$k$	Contribuição relativa
$t_i$	0,05	1,7321	10,8%
$\delta C_r$	0,407	2,1489	71,2%
$\delta A_r$	0,05	1,7321	10,8%
$\delta t_b$	0,01	1,7321	2,2%
$\delta t_r$	0,023	1,7321	5,0%

Incerteza expandida
0,39 °C

Fator de abrangência
2,001

Curva de calibração para faixa de de 23°C até 50°C.

$$t_c = (a_1 \cdot t_i + a_0)$$

Onde:

- $t_c$  temperatura corrigida do termômetro [°C]
- $t_i$  temperatura indicada no termômetro a calibrar [°C]
- $a_0 = 0,2817042$  °C
- $a_1 = 1,018217$

**Observação:**

A calibração descrita neste certificado de calibração é a primeira documentada.

Cecília Mageski Madeira Santos  
Valter Yoshihiko Aibe  
Técnicos executores

Valter Yoshihiko Aibe  
Signatário autorizado

### Características do Item

Mensurando: Temperatura  
Faixa de medição: de -30°C até 300°C  
Resolução: 0,1 °C

### Informações Pertinentes à Calibração

Os resultados da calibração são rastreados ao Sistema Internacional de Unidades (SI), por intermédio dos padrões metrológicos nacionais. As medições realizadas estão referenciadas aos padrões relacionados na Tabela 1.

**TABELA 1 - Instrumentos padrões utilizados na calibração:**

Descrição	Identificação	Certificado
Termômetro padrão	TER-007	NIDF-044/2017

O termômetro TER-007 faz parte do controle do banho térmico:

Marca: Julabo Modelo: F25 ME-V2.1

### Procedimento de Medição

O método de calibração foi por comparação de medições com o termômetro padrão.

O padrão foi TER-007, termômetro de controle de temperatura do banho térmico BT-001.

O banho térmico utilizado para calibrar os termômetros foi BT-001. Que apresenta uma grande estabilidade e uniformidade da temperatura no tempo e no espaço.

O controle de temperatura do banho térmico é 0,01°C, igual à resolução do TER-007.

O termohigrômetro calibrado tem duas indicações de temperatura. Uma interna (IN) e outra externa (OUT).

Utiliza um sensor externa que é composto de um conector ao corpo do termohigrômetro, um fio e um sensor de temperatura na outra ponta.

Foi utilizado um tubo fino de latão extremidade inferior lacrado, onde foi inserido o sensor externo do termohigrômetro TH-002.

O tubo de latão com sensor externo foi inserido no banho térmico, com tampa de isopor para diminuir a troca de calor com ambiente.

A faixa de calibração foi de 23°C até 50°C.

Modelo matemático

$$t_c = (a_1 \cdot t_i + a_0) + \delta C_r + \delta A_t + \delta t_b + \delta t_r$$

Onde:

- $t_c$  temperatura corrigida do termopar;
- $a_1$  e  $a_0$  parâmetros da curva de correção da indicação do termômetro a calibrar;
- $t_i$  temperatura indicada no termômetro a calibrar;
- $\delta C_r$  erro devido à falta de ajuste de curva de calibração;
- $\delta A_t$  erro devido a fatores aleatórios (estabilidade / retilidade / reprodutividade) do termômetro a calibrar;
- $\delta t_b$  erro na medição da temperatura de referência devido à estabilidade e homogeneidade da temperatura no banho. Estimado através das indicações dos dois sensores Pt100 do termômetro padrão;
- $\delta t_r$  erro na medição da temperatura de referência devido à incerteza dos sensores Pt100 do termômetro padrão.