

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Fabiola Tocchini de*
Figueiredo..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *31 / 07 / 2012*
Eugenio Spang
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Fabiola Tocchini de Figueiredo

**Caracterização do escoamento no Limite de
Mobilização de um Leito Granular Cisalhado
por um Fluido**

Campinas, 2012.

Fabiola Tocchini de Figueiredo

Caracterização do Escoamento no Limite de Mobilização de um Leito Granular Cisalhado por um Fluido

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmicas e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa
Co-orientador: Dr. Erick de Moraes Franklin

Campinas

2012

i

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Figueiredo, Fabíola Tocchini de

F469c Caracterização do escoamento no limite de mobilização de um leito granular cisalhado por um fluido / Fabíola Tocchini de Figueiredo. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Eugênio Spanó Rosa

Coorientador: Erick de Moraes Franklin.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Camada limite turbulenta. 2. Transporte de sedimento. 3. Leito fixo. I. Rosa, Eugênio Spanó, 1958-. II. Franklin, Erick de Moraes. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: Characterization of a turbulent liquid flow by the bed-load transport of granular matter

Palavras-chave em Inglês: Bed-load, Sediment transport, Fixed bed

Área de concentração: Térmicas e Fluidos

Titulação: Mestra em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Sérgio Nascimento Bordalo, Átila Pantaleão da Silva Freire

Data da defesa: 31-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

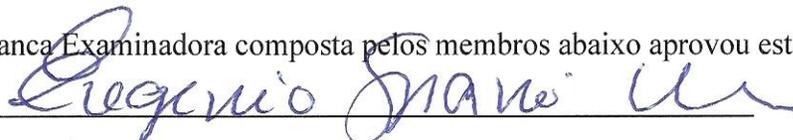
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

Caracterização do Escoamento no Limite de Mobilização de um Leito Granular Cisalhado por um Fluido

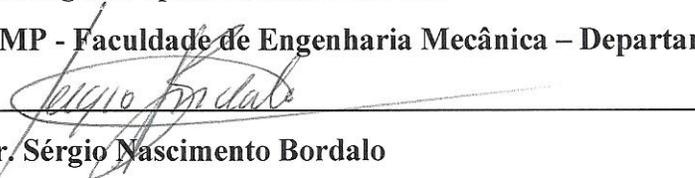
Autor: Fabíola Tocchini de Figueiredo
Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa
Co-orientador: Dr. Erick de Moraes Franklin

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa, Presidente

UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Energia



Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo

UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia de

Petróleo



Prof. Dr. Átila Pantaleão da Silva Freire

UFRJ – Departamento de Engenharia Mecânica

Campinas, 31 de Julho de 2012.

Dedicatória

Aos meus pais, Celso e Shirlene, e ao meu irmão, Fellipe, que desde a graduação fazem o possível e impossível para que eu busque o caminho do sucesso pessoal e profissional e que, apesar da distância, estiveram presentes em todos os dias de minha trajetória.

Agradecimentos

A Deus, pela saúde e determinação para superar todos os obstáculos.

Ao Prof. Eugênio Spanó Rosa, da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, pela orientação e oportunidade de crescimento profissional. Agradeço também pelas palavras de apoio e confiança e os conselhos, desde o início do mestrado.

Ao Prof. Erick de Moraes Franklin, do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, da Universidade Estadual de Itajubá – UNIFEI, pela co-orientação e por todo conhecimento transmitido. Agradeço também pela amizade e apoio profissional.

A todos os docentes e funcionários do Departamento de Energia, da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, que contribuíram para meu crescimento profissional. Aos técnicos Alcimar e Adriano por todo apoio prestado durante a realização dos ensaios experimentais.

Ao Guilherme, aluno da graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, pela construção do dispositivo experimental, por ajudar durante toda a aquisição de dados do trabalho e pela amizade.

Aos meus pais, Celso e Shirlene, e meu irmão, Fellipe, pela compreensão durante meus períodos de ausência e pelo esforço em sempre estarem presentes mesmo com a distância. Agradeço também por sempre me incentivarem a crescer e apoiarem durante essa trajetória de estudos.

Ao meu namorado, André, pelo companheirismo, apoio emocional e incentivo desde a graduação. Agradeço também por passar tranquilidade e sempre acreditar que as coisas são possíveis, se tentarmos.

Aos amigos Laís, Juliana, Taina, Simone, Fernanda, Fernando, Marco Antonio, Ismael, Christiano, Luis Eduardo, Wilson, Thiago, Danilo, André, Fábio, pelo apoio e incentivo durante o mestrado. Em especial a amiga Ana Lúcia, pelas palavras de apoio e por acompanhar a evolução do trabalho sempre me incentivando.

As primas, Giovanna e Tatiana, por serem minha inspiração na carreira acadêmica e me apoiarem durante estes anos de estudos.

A Petrobras pela bolsa de estudos e apoio recebido através do projeto de pesquisa 'Transporte de Areia em Oleodutos e Gasodutos' – contrato FUNCAMP 4182.

“Não basta dar os passos que nos devem levar um dia ao objetivo, cada passo deve ser ele próprio um objetivo em si mesmo, ao mesmo tempo em que nos leva para diante.”

Johann Goethe

Resumo

O transporte de grãos por um fluido em escoamento é frequentemente encontrado na natureza e na indústria. Está presente, por exemplo, na erosão das margens de rios, na migração de dunas no deserto e no transporte de areia em dutos. O mecanismo de transporte se dá através da transferência da quantidade de movimento do fluido para os grãos. Quando a força exercida pelo fluido no leito granular é capaz de mover alguns grãos, mas é relativamente pequena comparada ao peso dos grãos, o escoamento não é capaz de transportar os grãos como suspensão. Forma-se uma camada móvel de grãos em contato com a parte fixa do leito, conhecida como leito móvel (em inglês, *'bed-load'*). Se o fluido é um líquido, a espessura desta camada móvel é de apenas alguns diâmetros de grão. A transferência de quantidade de movimento do fluido para os grãos altera o campo de escoamento tornando o perfil de velocidades diferente do caso de leito fixo. Este trabalho está interessado em entender as mudanças que acontecem no escoamento de um líquido turbulento devido à presença de um leito granular móvel, este fenômeno é conhecido como *'feed-back effect'*. Os experimentos foram realizados em um canal horizontal de seção retangular e o equipamento de medida PIV (em inglês, *'Particle Image Velocimetry'*) foi usado para medir o escoamento turbulento de água sobre leitos granulares fixos e móveis. Os perfis de velocidade sobre leito granular fixo e móvel foram medidos para dois diferentes tamanhos de grãos, $160\ \mu\text{m}$ e $360\ \mu\text{m}$, para a mesma vazão, em condições próximas ao limite de mobilidade dos grãos. Esta é a primeira vez que esta perturbação é experimentalmente medida no caso de escoamento turbulento de líquidos em regime hidraulicamente liso.

Palavras Chave: Camada limite turbulenta; Escoamento turbulento; Leito móvel; Limite de mobilidade; Transporte de sedimentos.

Abstract

The transport of granular matter by a fluid flow is frequently found in nature and in industry. It is present for example, in the erosion of river banks, in the displacement of desert dunes and on the transport of sand in hydrocarbon pipelines. The entraining mechanism is the momentum transfer from the fluid flow to the grains. When the forces exerted by the fluid flow on the granular bed are able to move some grains, but are relatively small compared to the grains weight, the flow is not able to transport grains as a suspension. Instead a mobile layer of grains, known as bed-load, takes place. If the fluid is a liquid, the bed-load thickness is only a few grains diameters. The momentum transfer from the fluid to the mobile layer alters the fluid flow itself, i. e., the fluid flow is different from that if the bed were static. In this work we are interested in quantifying the changes (perturbation) caused by a mobile layer of grains (granular transport as bed-load) on a turbulent liquid flow. The experiments were performed on a horizontal closed-conduit channel of rectangular cross section and a PIV (Particle Image Velocimetry) device was used to measure the turbulent water flow over fixed and mobile granular beds. The turbulent fully-developed velocity profiles over fixed and mobile granular beds were measured for two different diameter of grains, $160\ \mu\text{m}$ and $360\ \mu\text{m}$, for roughly the same water flow rates, in conditions near the threshold of the bed-load. The spatial resolution of the measurements allows the experimental quantification of this perturbation and comparison with bed-load theories. The mean flow profiles were obtained, so that the effects of bed-load on the shear stress could be determined. This is the first time that this perturbation is experimentally measured in the case of turbulent flows of liquids.

Key words: Bed-load; Feed-back effect; Sediment transport; Turbulent boundary-layer; Turbulent flow.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da profundidade em um escoamento turbulento (Yalin, 1977)	6
Figura 2 – Disposição em um escoamento das leis das camadas interna (em inglês, <i>inner layer</i>), intermediária (em inglês, <i>overlap layer</i>) e externa (em inglês, <i>outer layer</i>) para um escoamento turbulento (White, 1999)	9
Figura 3 – Perfis de velocidade em tubos rugosos obtidos experimentalmente, mostrando o deslocamento para baixo da camada logarítmica em consequência da alteração da rugosidade da superfície para um escoamento em leito fixo. (White, 1991)	15
Figura 4 – Arraste de sedimentos mostrado como função do número de Reynolds na escala do grão (Re^*) e do número de Shields crítico (θ_c) (Raudkivi, 1998).....	22
Figura 6 – Distribuição da velocidade do vento para um escoamento sobre leito fixo (linha pontilhada) e leito móvel (linha contínua). Escala semi-logarítmica. Bagnold (1921).....	33
Figura 7 – Esquema do dispositivo experimental	40
Figura 8 – Foto do dispositivo experimental	40
Figura 9 – Inversor de frequência.....	41
Figura 10 – Medidor eletromagnético de vazão.....	41
Figura 11 - Seção divergente/colméia/convergente.....	42
Figura 12 – Agitador eletromagnético de partículas: peneiras de diversos diâmetros + vibrador	46
Figura 13 – a) Placas introduzidas no canal que formam o leito rugoso fixo; b) Detalhe mostrando a junção das placas que formam o leito rugoso fixo.....	47
Figura 14 – Detalhe da seção de testes onde existe a transição de leito rugoso fixo (esferas de vidro coladas sobre a placa de PVC) para leito rugoso móvel (esferas de vidro “soltas”).....	49
Figura 15 – Seção de teste com o leito rugoso móvel (esferas de vidro “soltas”)	49

Figura 16 – Equipamento utilizado para alisar o leito	50
Figura 17 - a) Disposição dos equipamentos constituintes do PIV; b) Foto do equipamento PIV.	51
Figura 18 – Laser Nd:YAG utilizado para gerar os pulsos de luz	52
Figura 19 – Disposição do conjunto de lentes do laser. [Fonte: LaVision (2009b)]	53
Figura 20 – Câmera ImagerProX4M	53
Figura 21 - Arranjo dos estágios de translação (LaVision, 2009c)	55
Figura 22 - Disposição do laser e da câmera em relação a seção de testes	56
Figura 23 - Câmara escura em torno da seção de testes para realizar os ensaios com o PIV	57
Figura 24 – a) Par de imagens obtido através do equipamento PIV durante o escoamento em leito fixo para uma vazão de 5 m ³ /h com granulometria de 360 μm; b) detalhe mostrando a partícula em movimento relativamente a reta de referência.	59
Figura 25 – Esquema para a determinação das constantes A e C da equação (3.5)	63
Figura 26 – Diagrama esquematizando as etapas percorridas para a obtenção dos resultados	65
Figura 27 – Seção de testes com leito liso	66
Figura 28 – Planos de simetria inicialmente pretendidos nos testes preliminares	67
Figura 29 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas externas para a vazão de, aproximadamente, 7,5 m ³ /h nas posições de 0 mm e -26,7 mm	68
Figura 30 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas externas para a vazão de, aproximadamente, 10 m ³ /h nas posições de 0 mm e -26,7 mm	68
Figura 31 – Perfil de velocidades médio (símbolo *) e perfil de velocidade pela equação de lei da potência (linha contínua) para a vazão de 7,5 m ³ /h e posição 0 mm.	70
Figura 32 - Perfil de velocidades médio (símbolo *) e perfil de velocidade pela equação de lei da potência (linha contínua) para a vazão de 10 m ³ /h e posição 0 mm.	70

Figura 33 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas internas para a vazão de, aproximadamente, 7,5 m ³ /h nas posições de 0 mm e -26,7 mm.....	71
Figura 34 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas internas para a vazão de, aproximadamente, 10 m ³ /h nas posições de 0 mm e -26,7 mm.....	71
Figura 35 – Imagens obtidas pelo software Davis para o escoamento sobre leito fixo com uma vazão de 5 m ³ /h: a) Campo vetorial de velocidades instantâneas; b) Campo vetorial de velocidade média.....	77
Figura 36 – Parâmetros envolvidos na determinação da origem do leito de partículas.....	78
Figura 37 – Perfil de velocidades médias obtido para a vazão de 5,3 m ³ /h para a granulometria de 360 μm sem a utilização de filtros para os vetores.....	79
Figura 38 – Perfil de velocidades médias obtido para a vazão de 5,3 m ³ /h para a granulometria de 360 μm com a utilização de filtros para os vetores e a ferramenta <i>ymin</i> e <i>ymax</i>	79
Figura 39 – Perfis de velocidade média para dois Δy diferentes, 0,0 mm e 0,1 mm	81
Figura 40 - Indicação da distância <i>yfixo1</i> no perfil de velocidades média adimensional (vazão de 5 m ³ /h para escoamento em leito fixo com a granulometria de 160 μm)	83
Figura 41 - Indicação da distância <i>yfixo2</i> no perfil de velocidades média adimensional (vazão de 5 m ³ /h para escoamento em leito fixo com a granulometria de 360 μm)	83
Figura 42 - Posicionamento do parâmetro <i>ymove1</i> no perfil de velocidades médio adimensional (vazão de 5 m ³ /h em escoamento leito móvel – ensaio C - com granulometria de 160 μm)	85
Figura 43 - Posicionamento do parâmetro <i>ymove2</i> no perfil de velocidades médio adimensional (vazão de 5 m ³ /h em escoamento leito móvel – ensaio E - com granulometria de 360 μm)	85
Figura 44 - Perfis das velocidades médias longitudinais adimensionais das vazões ensaiadas em leito fixo com granulometria média 160 μm	95
Figura 45 - Perfis adimensionais de velocidade média para escoamento sobre uma parede rugosa (parede inferior do canal) com granulometria média de 160 μm. Reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).....	97

Figura 46 - Perfis adimensionais de velocidade média para escoamento sobre uma parede rugosa (parede inferior do canal), em azul, e uma parede lisa (parede superior do canal), para a granulometria média de $160 \mu m$. Reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).....	98
Figura 47 – Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 160 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal) comparando com os resultados obtidos pela correlação de Blasius.	101
Figura 48 - Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 160 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal). A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo.....	101
Figura 49 – Variação dos fatores de atrito de Blasius e experimental, para o leito granular com $d_{50} = 160 \mu m$ (parede inferior) e parede lisa (parede superior), com o número de Reynolds hidráulico do escoamento.....	105
Figura 50 – Perfis das velocidades médias longitudinais adimensionais das vazões ensaiadas em leito fixo com granulometria de $d_{50} = 360 \mu m$	106
Figura 51 - Perfis das velocidades médias obtidos para as diferentes vazões para escoamento uma parede rugosa (parede inferior do canal) com granulometria de $360 \mu m$. A reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).	108
Figura 52 – Perfis das velocidades médias adimensionais obtidas para as diferentes vazões ensaiadas sobre uma parede rugosa com granulometria média de $360 \mu m$ (parede inferior do canal), em azul, e uma parede lisa (parede superior do canal), em vermelho. A reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).....	108
Figura 53 – Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal) comparando com os resultados obtidos pela correlação de Blasius.	110
Figura 54 – Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal). A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo.....	110
Figura 55 – Variação dos fatores de atrito de Blasius e experimental, para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ e sobre parede lisa (parede superior) em função do número de Reynolds	114

Figura 56 - Perfis de velocidades médias adimensionais obtidos no ensaio com leito rugoso móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ para os ensaios: a) ensaio A; b) ensaio B; c) ensaio C; d) ensaio D.	119
Figura 57 - Perfis de velocidade média adimensional obtidos para o ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) 5,5 m ³ /h; b) 6 m ³ /h.	122
Figura 58 - Perfis de velocidade média adimensional obtidos para o ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) 6,5 m ³ /h; b) 7 m ³ /h; c) 7,5 m ³ /h.	123
Figura 59 - Perfis das velocidades médias adimensionais para leito rugoso fixo (em azul) e móvel (em vermelho) com $d_{50} = 160 \mu m$ para os ensaios a) A; b) B; c) C; d) D.	125
Figura 60 - Perfis das velocidades médias adimensionais obtidos através do ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel para $d_{50} = 160 \mu m$. Vazões representativas de cada ensaio: a) 5,5 m ³ /h; b) 6 m ³ /h.	127
Figura 61 - Perfis das velocidades médias adimensionais obtidos através do ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel para $d_{50} = 160 \mu m$. Vazões representativas de cada ensaio: a) 6,5 m ³ /h; b) 7 m ³ /h; c) 7,5 m ³ /h.	128
Figura 62 - Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre leitos fixo e móvel, ambos com $d_{50} = 160 \mu m$, comparando com os resultados obtidos pela correlação de Blasius.	131
Figura 63 – Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo e sobre leito móvel, ambos com $d_{50} = 160 \mu m$. A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso.	131
Figura 64 - Distribuição dos valores e a linha de tendência de y_0 com o número de Reynolds para os ensaios A, B, C e D na granulometrias 160 μm	135
Figura 65 - Perfis de velocidade média adimensional obtidos do ensaio em leito rugoso móvel com $d_{50} = 360 \mu m$. a) corresponde ao ensaio E; b) ensaio F; c) ensaio G.	136
Figura 66 - Perfis de velocidades médias adimensionais obtidos do ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) 5,5 m ³ /h; b) 6 m ³ /h; c) 6,5 m ³ /h.	139
Figura 67 - Perfis de velocidades médias adimensionais obtidos do ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) 7 m ³ /h; b) 7,5 m ³ /h.	140
Figura 68 - Perfis das velocidades médias adimensionais para os ensaios a) E; b) F; c) G sobre o leito rugoso móvel de $d_{50} = 360 \mu m$	141

Figura 69 - Perfis das velocidades médias para ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu m$. Vazões representativas de cada ensaio: a) $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $6 \text{ m}^3/\text{h}$; c) $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$	143
Figura 70 - Perfis das velocidades médias adimensionais obtidos através do ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel de $d_{50} = 360 \mu m$. Vazões representativas de cada ensaio: a) $7 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$	144
Figura 71 - Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo e sobre leito móvel, ambos com $d_{50} = 360 \mu m$	146
Figura 72 - Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo e sobre leito móvel, ambos com $d_{50} = 360 \mu m$. A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo.....	146
Figura 73 - Distribuição dos valores e a linha de tendência de y_0 com o número de Reynolds para os ensaios E, F e G na granulometrias $360 \mu m$	150
Figura 74 - Distribuição dos valores e a linha de tendência de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre leito móvel nas granulometrias $160 \mu m$ e $360 \mu m$	151
Figura 75 - Distribuição dos valores e a linha de tendência da constante B com o número de Reynolds para escoamento sobre leito móvel nas granulometrias $160 \mu m$ e $360 \mu m$. A linha em $B = 5,5$ é uma referência para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso.....	151
Figura 76 - Arranjo experimental para PIV em túnel de vento [Fonte: Raffel et al. (2007)].....	164
Figura 77 - Luz espalhada por uma partícula de óleo na água de diâmetro de a) $1 \mu m$ e b) $10 \mu m$ [Fonte: Raffel et al. (2007)].....	167
Figura 78 – Técnica de quadro único (em inglês, <i>single frame</i>) [Fonte: Raffel et al. (2007)].....	171
Figura 79 – Técnica de quadros múltiplos (em inglês, <i>multiple frame</i>) onde os círculos não preenchidos representam as posições nos quadros anteriores [Fonte: Raffel et al. (2007)].....	171
Figura 80 – Geometria típica de um sensor CCD [Fonte: Raffel et al. (2007)].....	172
Figura 81 – Esquema de tempo em gravação de duplo quadro (em inglês, <i>double frame</i>) [Fonte: LaVision (2009a)]	173

Figura 82 – Análise de gravação em duplo quadro (em inglês, double frame)/exposição simples no método de inter-correlações digitais [Fonte: Raffel et al. (2007)] 175

Figura 83 – Modelo de processamento de sinal digital linear descrevendo a relação funcional entre duas sucessivas gravações de quadros de imagens de partículas [Fonte: Raffel et al. (2007)] 176

Figura 84 – Exemplo de formação do plano de correlação por inter-correlações diretas: um modelo de 4 x 4 pixel é correlacionada com uma amostra maior de 8 x 8 pixel para produzir um plano de 5 x 5 pixel de correlação [Fonte: Raffel et al. (2007)]..... 177

Figura 85 – A função de correlação cruzada RII(direita) computada a partir de dados reais por um pequeno modelo I (32x32 pixel) com um modelo maior I' (64x64 pixel). O deslocamento médio das partículas nas imagens é, aproximadamente, 12 pixels para a direita. [Fonte: Raffel et al. (2007)]..... 177

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Os regimes de escoamento em função de d^+ e os resultados apresentados para as constantes B , da equação (2.19) (Schlichting et al., 2000).	13
Tabela 2 - Dados gerais (Q_{real} , V , V_{max} e Re_h) relativos ao escoamento para os planos de simetria de 0 mm e -26,7 mm	69
Tabela 3 - Parâmetros y^+ , B e B_{sup} para os planos de simetria de 0 mm e -26,7 mm.....	72
Tabela 4 – Valores do fator de atrito de Darcy obtidos experimentalmente, para a parede inferior e superior, e calculados através da equação de Blasius	73
Tabela 5 - Q_{real} (m ³ /h), Símbolo, U (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$	88
Tabela 6 - Q_{real} (m ³ /h), Símbolo, U (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$	88
Tabela 7 – Q_{real} (m ³ /h), Símbolo, U (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ para os ensaios A, B, C e D.....	89
Tabela 8 - Q_{med} (m ³ /h), Q_{real} (m ³ /h), Símbolo, U (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ para os ensaios E, F e G	90
Tabela 9 – y_{min} , y_{max} e Δy para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$	91
Tabela 10 – Faixa de valores de y^+ adotada, para a parede superior (y^+_{sup}) e inferior (y^+), para o perfil de velocidades adimensionais quando se analisa o escoamento em leito rugoso fixo para as duas granulometrias	93
Tabela 11 – Valores de U_{max} e a correspondente posição em yH para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$	96
Tabela 12 – Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$), u^* e B , e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup}	99

Tabela 13 - Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior (leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$) e parede superior (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala do grão (Re^*) e número de Shields (θ) 103

Tabela 14 - Valores para os coeficientes de atrito obtidos experimentalmente para a parede rugosa f_{exp} (parede inferior) com $d_{50} = 160 \mu m$, parede lisa f_{exp_sup} (parede superior) e através de Blasius f (equação (2.25)). Porcentagem de erro destes coeficientes de atrito em comparação com o obtido por Blasius (Erroexp e Erroexp _sup) 104

Tabela 15 - Valores de U_{max} e a correspondente posição em yH para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ 107

Tabela 16 - Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (parede rugosa fixa com $d_{50} = 360 \mu m$), u^* e B, e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup} 109

Tabela 17 - Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior y_0 (parede rugosa fixa com $d_{50} = 360 \mu m$) e parede superior y_0_{sup} (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala (Re^*) do grão e número de Shields (θ)..... 112

Tabela 18 – Valores para os coeficientes de atrito obtidos experimentalmente para o leito rugoso f_{exp} com $d_{50} = 360 \mu m$, parede lisa f_{exp_sup} (parede superior) e através de Blasius f (equação (2.25)). Porcentagem de erro destes coeficientes de atrito em comparação com o obtido por Blasius (Erroexp e Erroexp _sup) 113

Tabela 19 - y_{min} , y_{max} e Δy para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$

115

Tabela 20 - Faixa de valores de y^+ adotada, para a parede superior (y^+_{sup}) e inferior (y^+), para o perfil de velocidades adimensionais quando se analisa o escoamento em leito rugoso móvel 117

Tabela 21 - Valores de U_{max} e a correspondente posição em yH para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ 121

Tabela 22 - Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$), u^* e B, e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup} 130

Tabela 23 – Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior y_0 (leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$) e parede superior $y_0 \text{ sup}$ (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala do grão (Re^*) e número de Shields (θ)..... 133

Tabela 24 - Valores de U_{max} e a correspondente posição em yH para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ 137

Tabela 25 - Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$), u^* e B, e parede superior (parede lisa), $u^* \text{ sup}$ e B_{sup} 145

Tabela 26 - Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior (leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$) e parede superior (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala (Re^*) do grão e número de Shields (θ)..... 148

Lista de Abreviaturas e Siglas

Abreviações

Siglas

CCD	, do inglês <i>Charge Coupled Device</i>
CID	, do inglês <i>Charge Injection Device</i>
CMOS	, do inglês <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
DNS	, do inglês <i>Direct Numerical Simulation</i>
FFT	, do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>
LIF	, do inglês <i>Laser Induced Fluorescence</i>
Nd:YAG	Laser de yttrium-aluminum-garnet
PDA	, do inglês <i>Particle Dynamics Analyser</i>
PIV	, do inglês <i>Particle Image Velocimetry</i>
PTU	, do inglês <i>Programmable Timing Unit</i>
PTV	, do inglês <i>Particle Tracking Velocimetry</i>
PVC	Policloreto de Vinilo
RANS	, do inglês <i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i>
RMS	, do inglês <i>Root Mean Square</i>

Lista de Símbolos

Letras Latinas

A	seção transversal do canal	[m ²]
b	largura do canal	[m]
C	constante (0.022) (Rasmussen et al., 1996)	
C_f	fator de atrito de Fanning	
d	diâmetro do grão	[μ m]
d_{50}	diâmetro médio das partículas	[μ m]
d^+	parâmetro adimensional	
D	diâmetro do tubo	[m]
D_h	diâmetro hidráulico	[m]
D^*	diâmetro da partícula adimensional	
f	comprimento focal	[mm]
f	fator de atrito de Darcy	
f_{exp}	fator de atrito para a parede rugosa (parede inferior)	
f_{exp_sup}	fator de atrito para a parede lisa (parede superior)	
g	aceleração gravitacional	[m/s]
h	altura do canal	[m]
H	altura interna do canal (onde ocorre o escoamento)	[m]
L	comprimento de entrada	[m]
l_v	comprimento característico	[m]
P	perímetro molhado	[m]
Q	fluxo de partículas por unidade de largura	[n ^o /m ²]
Q_{real}	vazões calculadas no software Matlab	[m ³ /h]
Q_{med}	vazões lidas no medidor eletromagnético	[m ³ /h]
r	eixo central de referência em um tubo	
R	raio do tubo	[m]
Re_h	número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico	

Re^*	número de Reynolds na escala do grão	
T	período médio	[s]
u	valor instantâneo de qualquer propriedade	
$u(r)$	velocidade média local ao longo de um tubo	[m/s]
\bar{u}	valor médio de qualquer propriedade	
u'	flutuação de qualquer propriedade	
u^*	velocidade de atrito	[m/s]
u^+	parâmetro adimensionalizado a partir de escalas internas	
U	velocidade na borda da camada limite ($y=\delta$)	[m/s]
U_{max}	velocidade máxima de escoamento	[m/s]
U_s	velocidade de sedimentação de Stokes	[m/s]
U_0	velocidade de referência	[m/s]
\bar{U}	velocidade média do escoamento	[m/s]
W_b	taxa de escoamento	[kg/s]
x	eixo de referência horizontal	[m]
y	eixo de referência vertical	[m]
Y_{fixo1}	distância do leito ao primeiro ponto válido (leito fixo - $160 \mu m$)	[m]
Y_{fixo2}	distância do leito ao primeiro ponto válido (leito fixo - $360 \mu m$)	[m]
Y_{max}	altura máxima para ajuste do canal	[m]
Y_{min}	altura mínima para ajuste do canal	[m]
Y_{movel1}	distância do leito ao primeiro ponto válido (leito móvel - $360 \mu m$)	[m]
Y_{movel2}	distância do leito ao primeiro ponto válido (leito móvel - $360 \mu m$)	[m]
y^+	parâmetro adimensionalizado a partir de escalas internas	
y_0	altura na qual a velocidade de escoamento é nula	[m]
y_k	altura do foco para leito fixo	[m]
y_k'	altura do foco para leito móvel	[m]
y_k''	rugosidade aparente do leito móvel	[m]

Letras Gregas

β	constante para escoamento turbulento	
δ	comprimento característico da região interna	[mm]
θ	número de Shields	
θ_c	número de Shields crítico	
κ	constante de Kármán	
λ	comprimento de onda	[nm]
μ	viscosidade dinâmica	[N.s/m ²]
ν	viscosidade cinemática do fluido	[kg/(m.s)]
ρ	massa específica	[kg/m ³]
ρ_f	massa específica do fluido de trabalho	[kg/m ³]
ρ_p	massa específica das partículas sólidas	[kg/m ³]
τ	tensão de cisalhamento no leito	[N/m ²]
τ_c	tensão de cisalhamento no limite de mobilidade da partícula	[N/m ²]
τ_{turb}	tensão de Reynolds	[N/m ²]
τ_{visc}	tensão de cisalhamento viscosa	[N/m ²]
τ_w	tensão de cisalhamento na parede	[N/m ²]
ϕ	concentração de partículas para posição qualquer	
ϕ_0	concentração de partículas para posição inicial	

Sobrescritos

*	adimensional
—	média

Subscritos

max.	máximo
min.	mínimo

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 <i>Escoamento turbulento em dutos</i>	3
2.2 <i>Transporte de grãos por leito móvel (bed-load)</i>	19
2.3 <i>Compactação do leito (armouring)</i>	29
2.4 <i>Efeito do transporte de grãos por leito móvel sobre o escoamento de um fluido (feed-back effect)</i> ..	30
2.4.1 Fluido: gás.....	30
2.4.2 Fluido: água	36
3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	39
3.1 <i>Montagem Experimental</i>	39
3.1.1 Caracterização dos grãos	44
3.1.2 Preparação da seção de testes	46
3.2 <i>PIV</i>	50
3.2.1 Fonte de luz	52
3.2.2 Conjunto de lentes.....	52
3.2.3 Câmera.....	53
3.2.4 Sincronizador	54
3.2.5 Traçadores	54
3.2.6 Outros componentes	55
3.2.7 Preparação do equipamento PIV	57
3.2.8 Análise de imagens	60
3.2.8.1 Filtros vetoriais	61
3.2.8.2 Pós-processamento das imagens	62
3.3 <i>Procedimento Experimental</i>	66
3.3.1 Testes preliminares.....	66
3.3.2 Preparação dos ensaios para operar com leitos fixo e móvel	74
3.3.3 Procedimento para aquisição das imagens	76
3.3.4 Tratamento dos pares de imagens	76

3.3.5	Determinação da distância de referência no leito granular	77
3.3.5.1	Leito fixo	79
3.3.5.2	Leito móvel	84
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	87
4.1	<i>Introdução</i>	87
4.2	<i>Escoamento sobre leito fixo</i>	91
4.2.1	Resultados para leito fixo - <i>d</i>50 = 160 µm	94
4.2.2	Resultados para leito fixo - <i>d</i>50 = 360 µm	105
4.3	<i>Escoamento sobre leito móvel</i>	114
4.3.1	Resultados para <i>d</i>50 = 160 µm	118
4.3.2	Resultados para <i>d</i>50 = 360 µm	135
4.3.3	Comparação entre as duas granulometrias	150
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
6.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	156

1. INTRODUÇÃO

O transporte de partículas sólidas por um fluido em escoamento é frequentemente encontrado na natureza e na indústria. Está presente, por exemplo, na erosão das margens de rios, na formação e migração de dunas no deserto e no transporte de areia em oleodutos e gasodutos. O estudo proposto tem sua motivação relacionada à indústria petrolífera: durante a extração e o transporte de petróleo, é comum a presença de areia e de fragmentos rochosos junto ao óleo transportado. Quando os dutos possuem trechos horizontais (ou de pequena inclinação), os grãos podem se depositar na superfície inferior dos dutos. A formação de um leito granular durante um escoamento depende de diversos fatores como, por exemplo: densidade das partículas e do fluido de escoamento, velocidade do escoamento, etc. A posterior movimentação deste leito depende de variáveis inerentes ao próprio escoamento e também de características próprias do leito, tais como deformação da superfície do leito, difusão de partículas sólidas, compactação da superfície, etc. Isto significa que o movimento da fase líquida e da fase sólida são interdependentes e um não pode ser estudado sem levar em conta a presença do outro (Yalin, 1977).

Para estudar o limite de mobilidade dos grãos considere, dentre os possíveis escoamentos que envolvem duas fases líquido/sólido, um escoamento horizontal de líquido em um canal de seção retangular sobre um leito de partículas. O leito depositado na superfície inferior do canal é constituído de esferas de vidro de diâmetros similares. Para que ocorra o transporte destes grãos por um fluido em escoamento é necessário que a tensão de cisalhamento do líquido que age na superfície do leito ultrapasse um valor limite de mobilização dos grãos. Se for menor que este limite, os grãos permanecem fixos e não há movimento. Quando a tensão exercida pelo escoamento de fluido no leito granular é capaz de mover alguns grãos, mas é relativamente pequena comparada ao seu peso, forma-se uma camada móvel de grãos que permanece em contato com uma parte imóvel do leito (em inglês, '*bed-load*'). Logo, quando a tensão de cisalhamento ultrapassa o valor limite de mobilização dos grãos, há transporte de grãos por leito móvel (Bagnold, 1941).

Portanto, a existência do '*bed-load*' depende do balanço de duas forças: força de arrasto, de natureza hidrodinâmica, proporcional a τd^2 , onde τ é a tensão de cisalhamento do leito e d é o

diâmetro médio da partícula; força de resistência, relacionada ao peso dos grãos, proporcional a $(\rho_f - \rho_p)gd^3$, onde ρ_f é a densidade do fluido, ρ_p é a densidade das partículas e g é a aceleração gravitacional. Estas forças podem ser combinadas, dando origem a um parâmetro adimensional relevante para o estudo: número de Shields θ .

Cada grão que se move recebe quantidade de movimento do escoamento de líquido que, posteriormente, é dissipada para o líquido que preenche o espaço intersticial entre os grãos, através do mecanismo de drenagem e do atrito entre os grãos. Após a drenagem, parte da energia do líquido intersticial é dissipada em pequena escala. A ordem de magnitude destes mecanismos de dissipação é incerta, pois, no caso dos líquidos a espessura desta camada móvel é da ordem de apenas alguns diâmetros do grão em questão (Bagnold, 1941; Yalin, 1977; Raudkivi, 1998).

Propõe-se um estudo experimental da perturbação causada pela presença de um leito granular móvel no escoamento de um fluido com relação a um leito granular fixo. Investigando a literatura, esta é a primeira vez que esta perturbação é quantificada experimentalmente no caso de escoamento turbulento de líquidos.

O objetivo deste trabalho é o estudo e medição de fenômenos envolvendo o transporte de grãos por um líquido em escoamento horizontal turbulento. Com a utilização da técnica de medição PIV é possível obter os perfis de velocidade instantâneos para crescentes vazões de água durante o escoamento sobre leito fixo e leito móvel. A determinação da faixa de vazões correspondentes ao limite de mobilidade dos grãos também é parte integrante dos objetivos do trabalho. A partir dos perfis de velocidade obtidos será possível estudar os fenômenos que dizem respeito aos mecanismos de transporte de grãos por leito móvel.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos experimentais envolvendo o efeito de transporte de grãos em um escoamento de ar e água são mais frequentes. Porém, estudos que abordam o efeito do transporte de grãos por leito móvel sobre o escoamento de um líquido (*feed-back effect*) são menos encontrados. Para melhor entender este fenômeno e validar os dados experimentais, a revisão bibliográfica está dividida em três partes: a primeira se refere a escoamentos turbulentos em dutos, a segunda ao transporte de grãos por leito móvel (em inglês, *bed-load*) e a terceira ao efeito que este transporte de grãos por leito móvel causa no escoamento de fluido (em inglês, *feed-back effect*).

2.1 Escoamento turbulento em dutos

Em um escoamento em regime laminar não há flutuações aleatórias de velocidade e assim é possível resolver as equações de continuidade e da quantidade de movimento de uma maneira mais simplificada do que quando se analisa o escoamento turbulento. A transição de regime laminar para turbulento apresenta características de transição para o caos. Em regime turbulento aparecem flutuações aleatórias e nos dias de hoje, ainda não é viável lidar com estas flutuações instantâneas variáveis (o método DNS, em inglês *Direct Numerical Simulation* é uma simulação computacional onde as equações de Navier-Stokes são resolvidas numericamente sem a utilização de modelos de turbulência, no entanto, este método é muito caro até para números de Reynolds baixos) (Orszag, 1970). Isto porque, na prática, não é possível obter uma solução analítica e a obtenção de uma solução direta, através de análise numérica, demandaria malhas muito refinadas e passos de tempo muito curtos, resultando apenas no tratamento de problemas mais simples. Para resolver numericamente problemas de um escoamento completamente turbulento, cujas variáveis (por exemplo, velocidade e pressão) são funções do espaço e do tempo, deve-se utilizar as equações de Navier Stokes.

Uma das possíveis abordagens para o problema de escoamentos turbulentos é a decomposição dos campos de velocidades e pressões em médias e flutuações, com a obtenção de

equações para o campo médio (Equações Médias de Reynolds) e equações para os campos de flutuações. Este cálculo é apropriado para turbulência estacionária, isto é, as propriedades médias não variam com o tempo. Assim, um valor médio \bar{u} pode ser estimado considerando que o período médio T de aquisição é muito maior que o período de flutuações que apresenta o escoamento:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt. \quad (2.1)$$

Assim, a flutuação u' é definida como o desvio do valor instantâneo u em relação ao valor médio \bar{u} :

$$u' = u - \bar{u}. \quad (2.2)$$

Logo, por definição, a flutuação possui valor médio nulo (equação (2.3)). Uma forma de evitar este resultado é a utilização de uma média do quadrado da flutuação, ou a sua raiz quadrada, que possuem um valor não nulo (equação (2.4)).

$$\bar{u'} = \frac{1}{T} \int_0^T (u - \bar{u}) \, dt = \bar{u} - \bar{u} = 0. \quad (2.3)$$

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 \, dt \neq 0. \quad (2.4)$$

Na busca de uma solução para os problemas envolvendo escoamentos turbulentos, surgem os modelos de turbulência, baseados na média de Reynolds. Nesta metodologia realiza-se uma média temporal ou estatística, chamada média de Reynolds, sobre as equações originalmente transientes. Assim, as equações adquirem um caráter estacionário, na qual as variáveis resolvidas não são mais campos instantâneos, mas campos médios. Veja a equação (2.5) e a equação (2.6)

que apresentam as equações médias de Reynolds (em inglês, RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes) no plano xy .

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) - \rho \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}. \quad (2.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \rho \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}. \quad (2.6)$$

Sendo x e y , respectivamente, os eixos de referência na horizontal e na vertical (uma vez que o canal de escoamento é horizontal), ρ a massa específica e μ a viscosidade dinâmica do fluido. No caso de escoamentos desenvolvidos bi-dimensionais em regime permanente, é possível a realização da média espacial, gerando apenas um perfil de velocidades, que é capaz de representar o comportamento do escoamento turbulento.

Considerando um escoamento hidraulicamente desenvolvido com a direção principal paralela à direção x , os termos difusivos: segundo termo do lado direito das equações (2.5), relativo à difusão viscosa, e o quarto termo do lado direito da equação (2.5), relativo à difusão turbulenta podem ser combinados (equação(2.7)). Note que o termo de difusão turbulenta ($\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}$) tem origem nos termos convectivos da equação (segundo e terceiro termos do lado esquerdo da equação (2.5)).

$$\mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \rho \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) = \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{visc} + \tau_{turb}) = \frac{\partial}{\partial y} (\tau). \quad (2.7)$$

A primeira parcela indica a tensão de cisalhamento viscosa, τ_{visc} , que é associada à viscosidade do fluido e ao gradiente da velocidade média na seção transversal, enquanto a segunda parcela refere-se às flutuações de velocidade no escoamento turbulento, τ_{turb} , sendo denominada tensão de Reynolds. As parcelas combinadas definem uma tensão de cisalhamento total τ .

A Figura 1 apresenta a distribuição da tensão de cisalhamento em um tubo de acordo com a distância da parede para um escoamento totalmente desenvolvido. A tensão de cisalhamento total τ , neste caso, varia linearmente com a distância da parede y , atingindo o seu valor máximo na parede do tubo, τ_w . No escoamento no centro de um tubo ($y = h$), tem-se $\tau = 0$. Importante salientar que a Figura 1 é apenas uma representação da distribuição de tensão de cisalhamento sendo construída em uma escala que facilita a visualização do comportamento das tensões.

A presença de um leito de partículas faz com que exista uma altura y_0 na qual a velocidade média de escoamento é nula. O parâmetro y_0 é, então, utilizado para expressar a rugosidade presente no tubo.

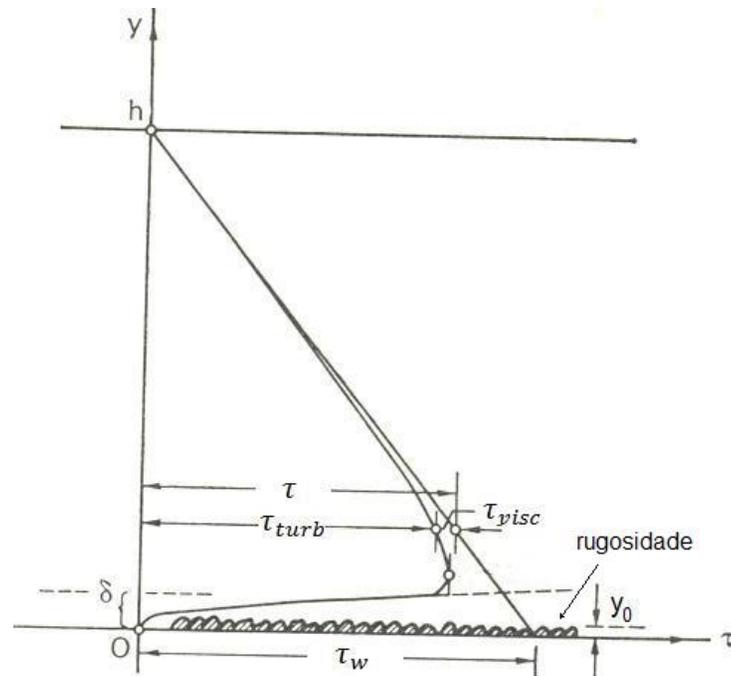


Figura 1 – Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da profundidade em um escoamento turbulento (Yalin, 1977)

Assumindo que $\delta > y_0$, onde δ é a região onde os efeitos viscosos predominam e y_0 é a altura na qual a velocidade média de escoamento é zero se o perfil logarítmico for válido até aquela região. Da Figura 1 tem-se que: quando o valor de y é maior que a região onde os efeitos viscosos predominam, $\delta < y < h$, então a tensão de cisalhamento total τ é praticamente a tensão

de Reynolds τ_{turb} ($\tau \approx \tau_{turb}$) enquanto $\tau_{visc} \approx 0$. Esta região abrange as camadas intermediária e externa (em inglês, respectivamente, *overlap layer* e *outer layer*). Quando o valor de y é menor do que δ , $y_0 < y < \delta$, então a tensão de cisalhamento total é praticamente a tensão de cisalhamento viscosa τ_{visc} ($\tau \approx \tau_{visc}$) enquanto $\tau_{turb} \approx 0$. Esta região é referida como subcamada viscosa (em inglês, *viscous sublayer*). Existe uma região, chamada camada de amortecimento (em inglês, *buffer layer*), que faz ligação entre a subcamada viscosa e a região intermediária em que ambas as tensões têm a mesma ordem de grandeza, $\tau_{visc} \approx \tau_{turb}$.

Para um escoamento em regime hidraulicamente rugoso, a forma geométrica das partículas sólidas que constituem o leito influencia o perfil de velocidades do líquido escoando acima do leito. Jimenez (2004) traz um estudo detalhando a forma e o espaçamento da rugosidade em canais. Neste trabalho a partícula sólida será considerada na forma esférica, tal qual o estudo de Nikuradse (1933), e a rugosidade do leito será definida pelo diâmetro d da partícula. Com esta suposição, o perfil de velocidades nas proximidades da parede é dependente das variáveis: $U = U(y, \rho, \mu, \tau_w, d)$ (Panton, 1984) sendo ρ e μ , respectivamente, massa específica e viscosidade dinâmica do fluido, τ_w é a tensão na parede do tubo, d é diâmetro da partícula e y é a distância entre um ponto qualquer no fluido e um ponto referencial no leito (será definido na secção 3.3.5).

Da análise dimensional (Panton, 1984), a massa específica do fluido ρ e a tensão de cisalhamento na parede τ_w foram combinados para produzir a velocidade de atrito u^* :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \quad (2.8)$$

A análise dimensional ainda prevê três variáveis adimensionais:

$$u^+ = \frac{u}{u^*}. \quad (2.9)$$

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu}. \quad (2.10)$$

$$d^+ = \frac{d}{l_v} = \frac{d}{\nu/u^*} = \frac{d \cdot u^*}{\nu} = \frac{\rho \cdot u^* \cdot d}{\mu}, \quad (2.11)$$

onde u^* representa a velocidade característica do fluido na escala do grão (é uma velocidade característica muito próxima à parede), ν é a viscosidade cinemática do fluido ($\nu = \mu/\rho$), l_v é o comprimento característico da subcamada viscosa (conhecido como comprimento viscoso) e d é o comprimento do elemento rugoso (diâmetro do grão). O parâmetro adimensional apresentado, d^+ , também pode ser relacionado ao número de Reynolds na escala do grão (ou número de Reynolds da partícula), Re^* , como será mostrado na seção 2.2.

A Figura 2 exibe as regiões predominantes no perfil de velocidades, $y^+ \times u^+$, de um escoamento turbulento: a região interna (em inglês, *inner layer*) que abrange a subcamada viscosa (em inglês, *viscous sublayer*), $y^+ \lesssim 5$, onde $\tau_{visc} \gg \tau_{turb}$ e a camada de amortecimento (em inglês, *buffer layer*), $5 \lesssim y^+ \lesssim 30$, onde $\tau_{visc} \cong \tau_{turb}$; a região intermediária (em inglês, *overlap layer* ou *log layer*), $35 \lesssim y^+ \lesssim 350$, onde $\tau_{turb} \gg \tau_{visc}$; a região externa (em inglês, *outer layer*), $y^+ \gtrsim 350$, onde $\tau_{turb} \gg \tau_{visc}$. A natureza do escoamento e, portanto, do perfil de velocidade é totalmente diferente nestas três camadas (White, 1991).

A curva com a distribuição dos dados, Figura 2, apresenta um comportamento curvo na região próxima da parede, se tornando reta quando atinge o valor de $y^+ > 30$. Esta linha reta é a lei logarítmica da região intermediária. Quando o escoamento se distancia da parede, os dados desviam da lei logarítmica. O início deste desvio marca o fim da camada intermediária (*overlap layer*) (Panton, 1984).

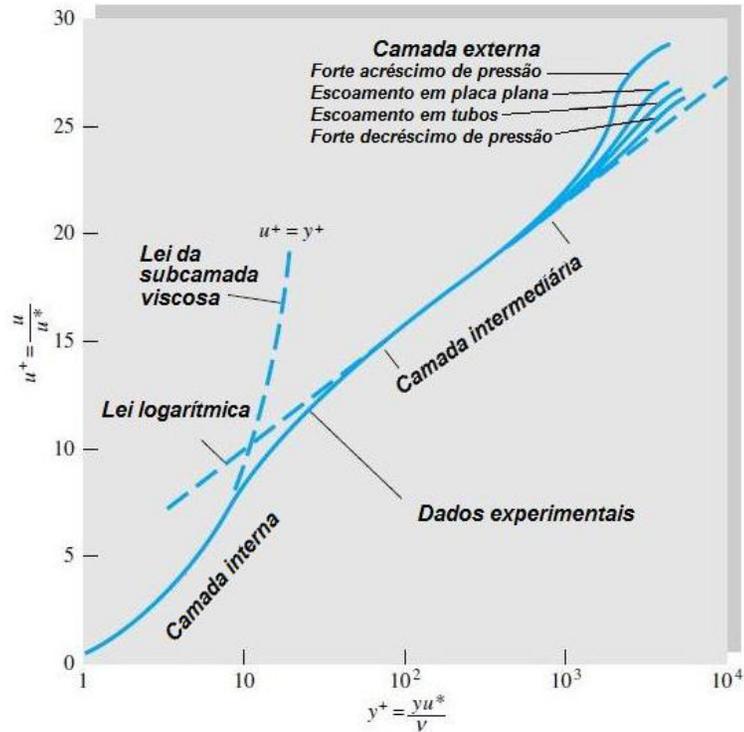


Figura 2 – Disposição em um escoamento das leis das camadas interna (em inglês, *inner layer*), intermediária (em inglês, *overlap layer*) e externa (em inglês, *outer layer*) para um escoamento turbulento (White, 1999)

A região muito próxima da parede, $y^+ \lesssim 5$, subcamada viscosa, é dominada pela viscosidade molecular ($\tau \approx \tau_{visc}$) e assim o perfil de velocidades é dependente da tensão de cisalhamento viscosa, de propriedades do fluido e da distância da parede (Tennekes e Lumley, 1972):

$$y^+ \lesssim 5: \quad \tau_w = \frac{\mu u}{y} \quad \text{ou} \quad \frac{u}{u^*} = f\left(\frac{yu^*}{\nu}\right), \quad (2.12)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido e u^* é a velocidade de atrito.

Usando as escalas da região interna do escoamento pode-se normalizar as variáveis em termos de $u^+ = \frac{u}{u^*}$ e $y^+ = \frac{yu^*}{\nu}$:

$$u^+ = y^+. \quad (2.13)$$

A região que faz a ligação entre a subcamada viscosa e a camada intermediária, $5 \lesssim y^+ \lesssim 30$, é a chamada de camada de amortecimento. Nesta região o perfil de velocidades não é linear e não é logarítmico, mas uma curva suave aparece para fazer ligação entre as duas regiões. Para evitar que fosse necessário a utilização de diferentes formulações para cada uma destas regiões, Spalding (1961) propôs uma fórmula que pode ser utilizada desde a parede até $100 < y^+ < 200$, dada por:

$$y^+ = u^+ + e^{-kB} \left[e^{ku^+} - 1 - ku^+ - \frac{(ku^+)^2}{2} - \frac{(ku^+)^3}{6} \right], \quad (2.14)$$

onde κ (constante de Kármán, Kármán (1930)) e B é uma constante para o escoamento turbulento. Os valores sugeridos para estas constantes são os mesmos fornecidos para a expressão logarítmica de velocidade (equação (2.17)).

Na camada externa de um escoamento de fluido turbulento, $y^+ \gtrsim 350$, os efeitos moleculares praticamente não contribuem para a tensão de cisalhamento e, assim, as características do escoamento são independentes da viscosidade do fluido ($\tau_{turb} \gg \tau_{visc}$). A equação que predomina nesta região, em inglês *velocity defect-law*, pode ser escrita como:

$$\frac{U-U_0}{u^*} = g\left(\frac{y}{\delta}, Re\right), \quad (2.15)$$

onde δ é o comprimento característico da região externa, que também é dependente do problema analisado, podendo adotar, por exemplo, valores referentes a altura do canal, diâmetro do duto ou espessura da camada limite, U é a velocidade na borda da camada externa ($y = \delta$) e U_0 é a velocidade de referência que depende do problema analisado, podendo ser a velocidade do canal, a velocidade média do perfil ou a velocidade à montante de uma placa, por exemplo.

Assim, o termo $U - U_0$, da equação (2.15), representa o retardo no escoamento devido a presença das paredes e em dada posição x do escoamento, o formato $g\left(\frac{y}{\delta}\right)$ depende do número de Reynolds.

A camada intermediária (em inglês, *overlap layer* ou *log layer*) está localizada entre a camada interna e a camada externa, $35 \lesssim y^+ \lesssim 350$, e assim os efeitos das camadas co-existem nesta região, porém $\tau_{visc} \ll \tau_{turb}$. Uma das características desta região é que ela está longe o bastante da parede para que os efeitos viscosos sejam desprezíveis mas próxima o suficiente para que a tensão possa ser aproximada para um valor constante e igual ao valor da parede. Referindo-se à Figura 1, a camada intermediária está localizada aproximadamente na inflexão do perfil $\tau \times h$. O perfil de velocidades é dado pela lei logarítmica:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yu^*}{\nu}\right) + B, \quad (2.16)$$

onde κ (constante de Kármán, Kármán (1930)) e B são constantes para o escoamento turbulento. Esta expressão para a distribuição logarítmica de velocidade pode ser reescrita em termos de u^+ (equação (2.9)) e y^+ (equação (2.10)):

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B. \quad (2.17)$$

Para regime hidraulicamente liso, Nikuradse (1933) (para tubos lisos) sugere o uso de $\kappa = 0,40$ e $B = 5,5$, Coles (1968) sugere $\kappa = 0,41$ e $B = 5,0$ e Davidson (2004) sugere $\kappa = 0,41$ e $B = 5,5$. Neste trabalho, foram adotados os valores mais recentes, fornecidos por Davidson (2004).

O escoamento turbulento pode ser dividido em três regimes, que variam de acordo com a razão entre o tamanho do elemento rugoso e o comprimento viscoso, dado pela equação (2.11): hidraulicamente liso, região de transição e completamente rugoso. Enquanto os elementos rugosos estão completamente dentro da subcamada viscosa ($d^+ < 5$ ou $y_0 \ll \delta$, de acordo com a Figura 1), não há diferenças apresentadas com relação a uma superfície lisa, caracterizando o

regime hidraulicamente liso (Schlichting et al., 2000). No entanto, se os elementos de rugosidade começam a se projetar, ultrapassando a subcamada viscosa ($d^+ > 5$ ou $y_0 > \delta$), então a rugosidade começa a influenciar o escoamento. E a partir do momento que os elementos rugosos começam a ultrapassar a camada intermediária ($d^+ \gtrsim 70$), preenchendo a região próxima da parede, os efeitos da viscosidade desaparecem. Assim, está estabelecido o regime conhecido como completamente rugoso, que tem como principal característica a independência com o número de Reynolds (Schlichting et al., 2000).

Nikuradse (1933) simulou a rugosidade colando grãos de areia (esféricos e uniformes) nas paredes interna de tubos e mediu a diferença de pressão e a vazão, correlacionando estes parâmetros. No escoamento turbulento, pequenas rugosidades vão quebrar a região correspondente a subcamada viscosa e aumentar a tensão de cisalhamento na parede. Assim, a relação funcional para o perfil de velocidades é dada por (White, 1991):

$$u^+ = f(y^+, d^+). \quad (2.18)$$

Para escoamento turbulento com presença de rugosidade, o perfil logarítmico pode ser observado na camada intermediária do escoamento, porém seu comportamento sofre influências do parâmetro d^+ :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B(d^+). \quad (2.19)$$

A constante de Kármán (κ) não muda com a rugosidade e B não é somente função de d^+ , como também varia com o tipo de rugosidade (formato geométrico, distribuição na superfície, material, tipo de deposição, etc.). O parâmetro adimensional d^+ possibilita determinar o tipo de escoamento de acordo com a Tabela 1 (Schlichting et al., 2000).

Tabela 1 – Os regimes de escoamento em função de d^+ e os resultados apresentados para as constantes B, da equação (2.19) (Schlichting et al., 2000).

Hidraulicamente liso	Transição da rugosidade	Hidraulicamente rugoso
$d^+ \leq 5$	$5 < d^+ < 70$	$d^+ \geq 70$
$B = 5,5$	$B = 5,0 - \frac{1}{\kappa} \ln (1 + 0,3 d^+)$	$B = 8,0 - \frac{1}{\kappa} \ln d^+$
$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + 5,5$ (2.20)		$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y^+}{d^+} \right) + 8,0$ (2.21)

Interessante notar que na aproximação obtida para B para a região de transição, quando $d^+ \rightarrow 0$, coincide com o escoamento em regime hidraulicamente liso e quando $d^+ \gg 1$, coincide com o perfil de escoamento em regime hidraulicamente rugoso.

A expressão para a distribuição logarítmica de velocidade, equação (2.17), pode ser reescrita em termos da altura em que a velocidade de escoamento apresenta valor nulo, y_0 , (isto se o perfil logarítmico valer até à parede, como é o caso para o regime hidraulicamente rugoso). Desta forma, obtém-se uma expressão para o perfil de velocidades para um escoamento em regime rugoso:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \quad \text{onde} \quad y_0 = \frac{v}{u^*} e^{-B\kappa}. \quad (2.22)$$

Medidas realizadas por Nikuradse (1933) mostraram que a variação do tamanho dos elementos rugosos do canal, d^+ , para uma mesma velocidade de atrito, u^* , altera o valor da constante B da equação (2.19) (conforme esta rugosidade começa a se projetar e a modificar no perfil de velocidades) e força o deslocamento do perfil logarítmico na abscissa, como mostra a Figura 3. Apesar desta alteração da constante B, a inclinação da lei logarítmica permanece a mesma, $1/\kappa$, e os perfis se apresentam paralelos. Na Figura 3, os diâmetros dos grãos presentes no leito D_1 , D_2 e D_3 são distintos (com $D_1 < D_2 < D_3$), deslocando paralelamente o perfil logarítmico.

Bagnold (1941) mostrou, com gráficos da velocidade do vento em função da altura na escala semi-logarítmica, que os pontos se distribuem linearmente e, ao continuar esta linha até encontrar o eixo na velocidade zero defini-se uma altura acima do leito, y_k . A linha seccionada da Figura 3 indica o prolongamento da lei logarítmica até atingir o eixo na qual a velocidade de escoamento é nula e a linha pontilhada indica a região correspondente a camada interna do perfil de velocidade. No diâmetro D_3 , da Figura 3, há uma indicação da altura y_k referente ao encontro do perfil logarítmico de velocidade com o eixo de velocidade nula ($u^+ = 0$). Para o caso de escoamento em leito fixo, este ponto também pode ser chamado de foco e recebe este nome por ser o mesmo para diferentes velocidades de atrito, quando a análise se dá para um mesmo diâmetro de grão presente no escoamento em leito fixo. O foco aparece quando a análise é dimensional, caso contrário, não seria observado. Importante ressaltar que, o termo foco introduzido neste momento facilitará a compreensão do comportamento obtido para um escoamento em leito móvel, descrito na seção 2.2.

Bagnold (1941) encontrou que a altura do foco está associada com o tamanho das irregularidades que constituem a rugosidade de maneiras diferentes para o escoamento em leito fixo e leito móvel (ver seção 2.2). Então, para um escoamento em leito fixo com grãos dispostos regularmente, a altura do foco y_k coincide com a altura na qual a velocidade é nula y_0 e é aproximadamente igual a 1/30 do diâmetro dos grãos ($d/30$), para um escoamento em regime hidraulicamente rugoso. Assim, para este tipo de escoamento (leito fixo), pode-se dizer que $y_k = y_0 = d/30$. Exemplificando: se um escoamento com uma determinada velocidade de atrito u^* , encontrar uma alteração do tamanho do diâmetro dos grãos do leito de 3 cm para 3 mm, então o foco y_k ou a altura na qual a velocidade de escoamento é nula y_0 será alterada de, respectivamente, 0,1 cm para 0,01 cm, após uma vazão de transição. Isto significa que, na região de 0,1 cm o escoamento para o primeiro diâmetro era estacionário e com a alteração para a nova granulometria não é mais, apresentando movimento (Bagnold, 1941).

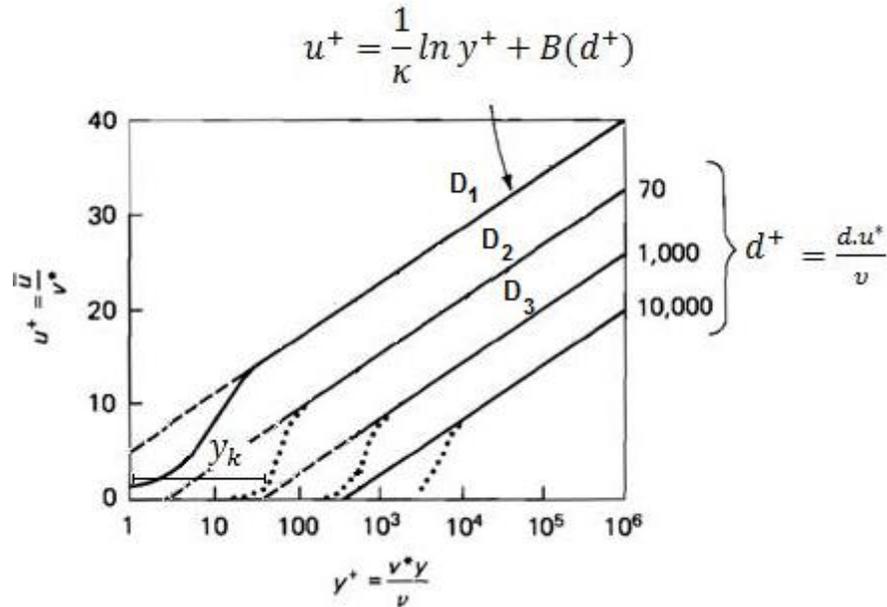


Figura 3 – Perfis de velocidade em tubos rugosos obtidos experimentalmente, mostrando o deslocamento para baixo da camada logarítmica em consequência da alteração da rugosidade da superfície para um escoamento em leito fixo. (White, 1991)

Hanjalic et al. (1972) estudaram o comportamento de um escoamento assimétrico completamente desenvolvido de ar entre duas placas paralelas. Para desenvolver a assimetria presente nos perfis de velocidade, foi necessária a introdução de rugosidade (de seção quadrada e espaçamento controlado) em uma das placas. Os autores demonstraram que a distribuição de velocidades entre as placas apresentavam três regiões distintas: a região próxima a parede lisa, a região próxima a parede rugosa e a região central, cuja interação entre as regiões das duas paredes é bem evidente. Também estudaram que a distribuição de velocidade média entre placas paralelas, lisa e rugosa, é influenciada pelo número de Reynolds (baseado na máxima velocidade de escoamento e metade da distância entre as placas) com exceção da região próxima a parede lisa.

Jiménez (2004) revisou a teoria de escoamentos sobre paredes rugosas e chegou à conclusão que em regime hidraulicamente rugoso dois parâmetros adimensionais devem ser conhecidos:

d^+ , que é o número de Reynolds particular e δ/y_0 , que é a razão entre a região onde os efeitos viscosos predominam e a altura rugosa (aquela na qual a velocidade média de escoamento é zero).

O primeiro parâmetro quantifica a extensão de efeito da rugosidade na camada de amortecimento (em inglês, *buffer layer*) e o segundo parâmetro citado mede o efeito direto da rugosidade na camada logarítmica, onde estão concentrados a maior produção de energia e o cisalhamento médio. Conforme a altura y_0 dos elementos rugosos aumenta, existe interferência destes elementos na camada de amortecimento, destruindo esta camada quando $d^+ \gtrsim 50 - 100$. O principal efeito é alterar a constante B da equação (2.17) mas a rugosidade também pode modificar todo o escoamento se y_0 não for desprezível comparando com δ . Jiménez (2004) sugere que se os efeitos diretos dos elementos rugosos se estenderem de $2 y_0$ a $3 y_0$, então δ/y_0 deve ser maior que 40 para que a rugosidade afete menos da metade da espessura da região onde os efeitos viscosos predominam (δ). Jiménez (2004) conclui que as estruturas turbulentas não são ainda bem entendidas e para melhorar os resultados são necessários mais estudos com valores suficientemente altos de d^+ e δ/y_0 , para que não existam efeitos transicionais no escoamento.

A partir da classificação do regime de escoamento, é possível calcular o fator de atrito. Para desenvolver uma expressão para o fator de atrito de Darcy para um escoamento turbulento em regime hidraulicamente liso, utiliza-se a velocidade média local ao longo do tubo $u(r)$ para reescrever a equação da lei logarítmica (equação (2.16)):

$$\frac{u(r)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{(R-r)u^*}{\nu} \right) + B, \quad (2.23)$$

onde r é o eixo de referência que coincide com o raio do tubo, R .

Da equação (2.23), Prandtl (1933) obteve uma expressão implícita para o fator de atrito (Darcy) para escoamento em regime hidraulicamente liso (Schlichting et al., 2000).

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2,0 \log \left(Re_h f^{1/2} \right) - 0,8. \quad (2.24)$$

Em regime hidraulicamente liso, a subcamada laminar não é afetada pela rugosidade e, neste caso, o fator de atrito f é função apenas do número de Reynolds. O número de Reynolds será baseado no diâmetro hidráulico (D_h) para tubos, Re_h .

Como alternativa mais simples para o cálculo do fator de atrito para o regime hidraulicamente liso com $Re \leq 10^5$, tem-se a equação de Blasius:

$$f = \frac{0,316}{Re_h^{0,25}}. \quad (2.25)$$

Sabe-se que os fatores de atrito de Darcy e de Fanning obedecem a relação $f = 4C_f$. Assim, o fator de atrito de Fanning, para escoamento turbulento em tubos lisos, é dado por:

$$C_f = \frac{0,079}{Re_h^{0,25}}. \quad (2.26)$$

A velocidade de atrito u_* , a partir da correlação de Blasius, é dada por:

$$u_* = \left(\frac{C_f}{2}\right)^{0,5} \bar{U} \quad (2.27)$$

Para o regime de escoamento hidraulicamente rugoso, além de a lei logarítmica sofrer um deslocamento em relação ao regime hidraulicamente liso, a espessura da subcamada viscosa é pequena comparada com a altura da rugosidade das paredes do tubo. Assim, o escoamento não é dependente do número de Reynolds e é dominado pela rugosidade existente. Logo, a expressão (2.24) não se torna apropriada para este tipo de análise. A partir de desenvolvimentos matemáticos encontrados na literatura (White, 1999), o coeficiente de atrito do regime hidraulicamente rugoso é dado por:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2,0 \log \frac{d/D_h}{3,7}. \quad (2.28)$$

Colebrook (1938) combinou as relações obtidas para escoamento em regime hidraulicamente liso (equação (2.24)) e hidraulicamente rugoso (equação (2.28)) obtendo a seguinte interpolação:

$$\frac{1}{f^{0,5}} = -2,0 \cdot \log \left(\frac{d/D_h}{3,7} + \frac{2,51}{Re_h \cdot f^{0,5}} \right). \quad (2.29)$$

A utilização dessa expressão é adequada para os regimes de escoamento hidraulicamente liso e hidraulicamente rugoso. Na região de transição entre estes dois regimes não se tem dados exatos do comportamento do coeficiente de atrito mas a equação de Colebrook é normalmente utilizada como aproximação nesta região. Quando se utiliza a equação (2.29) para o regime hidraulicamente liso, a expressão agregada para o regime hidraulicamente rugoso é anulada, uma vez que a rugosidade não afeta o escoamento, ou seja, $y_0 \rightarrow 0$. Quando se utiliza a mesma expressão para o regime hidraulicamente rugoso, tem-se por definição a independência com número de Reynolds, ou seja, $Re_h \rightarrow \infty$. Desta forma, o termo agregado relativo ao regime de escoamento hidraulicamente liso é anulado.

A expressão de Colebrook (1938), equação (2.29), foi utilizada por Moody (1944) para a construção do Diagrama de Moody para atrito em tubos. Com o Diagrama de Moody e a expressão obtida por Colebrook (1938) é possível utilizar uma ampla faixa de valores para o número de Reynolds e a rugosidade relativa y_0/D_h , se tornando uma ferramenta padrão no cálculo do fator de atrito. No entanto, existe a dificuldade por ser uma equação implícita e requerer um cálculo iterativo para a obtenção dos resultados.

Haaland (1983) fornece uma formula explícita alternativa à utilização de Colebrook (1938):

$$\frac{1}{f^{0,5}} = -1,8 \cdot \log \left(\left(\frac{y_0/D_h}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re_h} \right). \quad (2.30)$$

2.2 Transporte de grãos por leito móvel (*bed-load*)

O transporte de partículas sólidas por um fluido em escoamento é frequentemente encontrado na natureza e na indústria. Está presente, por exemplo, na erosão das margens de rios, no deslocamento de dunas no deserto e no transporte de areia em oleodutos e gasodutos.

Quando a tensão exercida pelo escoamento de fluido no leito granular é capaz de mover alguns grãos, mas é relativamente pequena comparada ao seu peso, o escoamento não é capaz de transportar os grãos na forma de suspensão. Assim, forma-se uma camada móvel de grãos (conhecida em inglês como *bed-load*), na qual os grãos permanecem em contato com a parte fixa do leito. Cada grão que se move recebe quantidade de movimento do escoamento de fluido que, posteriormente, é dissipada para o fluido intersticial através do mecanismo de drenagem e também através do atrito entre os grãos. Para o caso em que o fluido é gás, também pode ocorrer dissipação de quantidade de movimento através de choques entre os grãos. A ordem de magnitude destes mecanismos de dissipação é da ordem de espessura da camada móvel: no caso dos líquidos, de apenas alguns diâmetros do grão em questão (Bagnold, 1941; Yalin, 1977; Raudkivi, 1998) e no caso dos gases, como o ar, muitas vezes maior que o diâmetro dos grãos.

A existência do '*bed-load*' depende do balanço de duas forças: uma força de arrasto e uma força de resistência. A primeira é de natureza hidrodinâmica, que é proporcional a τd^2 , onde τ é a tensão de cisalhamento no leito e d , como dito, é o diâmetro médio da partícula em questão. A segunda força está relacionada ao peso do grão, sendo proporcional a $(\rho_p - \rho_f)gd^3$, onde ρ_f é a densidade do fluido de trabalho, ρ_p é a densidade das partículas sólidas e g é a aceleração gravitacional. O número de Shields θ será utilizado para analisar a relação entre essas forças, onde o numerador se refere à força de arrasto (natureza hidrodinâmica) e o denominador à força de resistência (relacionado ao peso do grão):

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_p - \rho_f)gd} \quad (2.31)$$

Com o número de Shields é possível determinar se é a força de arrasto ou a força de resistência que tem maior ação sobre o grão e assim, se a partícula tem maior tendência a se deslocar ou a se manter estática. Quanto maior o seu valor, maior será a tendência do grão depositado em um leito de se movimentar. A ordem de grandeza do número de Shields para leito móvel é $0,01 \lesssim \theta \lesssim 1$.

O número de Reynolds do fluido na escala do grão, Re^* , é um termo adimensional igualmente importante na análise da existência de ‘*bed-load*’ pois relaciona o termo de inércia do fluido com o termo de viscosidade do fluido na escala do grão:

$$Re^* = \frac{\rho u^* d}{\mu} \quad (2.32)$$

Onde u^* representa a velocidade característica do fluido na escala do grão (velocidade de atrito), d é o comprimento característico na escala do grão (diâmetro do grão) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Pode-se associar o número de Reynolds Re e o número de Reynolds da partícula Re^* com a teoria do descolamento da camada limite ao redor de corpos submersos. Este descolamento da camada limite além de gerar um maior desprendimento de vórtices, também cria uma assimetria da distribuição de pressão ao redor da partícula. Deste modo, a partícula fica sujeita a um gradiente de pressão, capaz de gerar o arrasto da partícula pelo fluido. Assim, para número de Reynolds muito baixo, $Re \leq 1$ (conhecido como escoamento de Stokes), não há separação do escoamento para uma partícula (aproximando o formato da partícula para uma esfera); a esteira é laminar e o arrasto de atrito corresponde a $\frac{2}{3}$ do arrasto total, restando $\frac{1}{3}$ do arrasto de pressão. Quando o número de Reynolds é aumentado ($1 \leq Re \leq 1000$), o coeficiente de arrasto cai continuamente, uma esteira turbulenta desenvolve-se e cresce na parte de trás da esfera, conforme o ponto de separação se move da traseira em direção à frente da esfera. Essa esteira que possui pressão relativamente baixa causa um arrasto de pressão (Fox et. al, 2006).

De acordo com Raudkivi (1998), a turbulência tem um importante efeito no arraste de sedimentos através da imposição de flutuações de pressão na superfície do leito pois a esteira

turbulenta de baixa pressão que ocupa toda a parte de trás da esfera gera uma diferença de pressão entre as partes frontal e posterior das partículas. Assim, uma partícula presente no leito pode se mover devido aos vórtices que estão passando, pelo arraste (força de impulso) criado, ou pela diminuição da pressão local (pressão hidrostática), para $10^3 \leq Re \leq 10^5$.

Portanto, de maneira geral um baixo valor do número de Reynolds da partícula, Re^* , caracteriza um escoamento com baixa ocorrência de desprendimento de vórtices e baixa inércia, podendo associar estas condições às obtidas para um escoamento em regime hidraulicamente liso. Da mesma maneira, quando o número de Reynolds da partícula é alto, pode-se associar a condição de alta inércia e alta ocorrência de desprendimento de vórtices com o regime de escoamento hidraulicamente rugoso.

Assim, algumas características do transporte granular podem ser obtidas através da determinação dos parâmetros adimensionais apresentados: θ e Re^* . O número de Shields, θ , pode mostrar se o transporte de areia por leito móvel (em inglês, '*bed-load*') ocorre e qual a intensidade dele, forte ou fraco, e o número de Reynolds particular, Re^* , determina se o escoamento de fluido é inercial ou viscoso na escala do grão. Mas ainda assim, os parâmetros calculados separadamente não são capazes de garantir que o movimento dos grãos está ocorrendo de fato.

Por décadas foram feitas tentativas para estimar o limite crítico de mobilidade dos grãos em leito móvel com contribuições notáveis de Shields (1936). O limite crítico de mobilidade dos grãos é expresso pelo número de Shields crítico, θ_c , e corresponde ao valor a partir do qual os grãos presentes em um leito de partículas começam a se movimentar. Abaixo deste limite os grãos apresentam estado de repouso durante um escoamento. Durante o escoamento, o termo '*bed-load*' é utilizado para expressar a camada móvel de grãos que permanece em contato com a parte fixa do leito granular. No trabalho de Shields (1936) é possível encontrar uma relação entre o valor do número de Shields crítico e o número de Reynolds na escala do grão, $\theta_c = f(Re^*)$, como mostra a Figura 4.

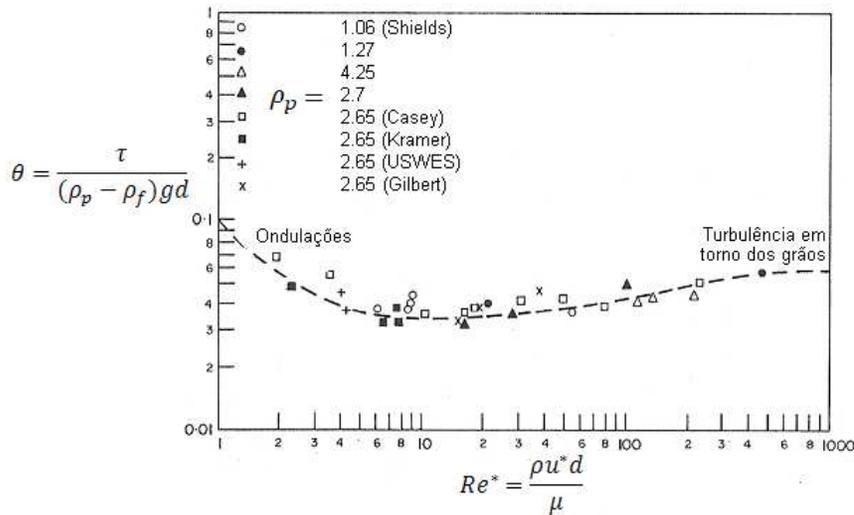


Figura 4 – Arraste de sedimentos mostrado como função do número de Reynolds na escala do grão (Re^*) e do número de Shields crítico (θ_c) (Raudkivi, 1998)

Os dados originais de diversos autores são mostrados na curva da Figura 4 com uma considerável dispersão dos dados, mas ainda assim é possível observar uma tendência. Shields (1936) obteve uma faixa de valores que mais tarde foi aproximada por uma única curva, curva de Shields, por Hunter Ross (Raudkivi, 1998). A curva de Shields se tornou um padrão para estimar o número de Shields crítico atingido durante a ocorrência de transporte de grãos por leito móvel, $O(0,01) < \theta < O(1)$ e, desde então, muitos resultados têm sido adicionados à curva através da realização de experimentos. Bagnold (1980) assumiu valor limite de $\theta_c = 0,04$, enquanto Barry et al. (2004) assumiu valor de $\theta_c = 0,047$, para regime hidraulicamente liso ($Re^* \approx 4$).

No trabalho de Buffington e Montgomery (1997) foram compiladas oito décadas de dados relativos a determinação do limite de mobilidade dos grãos. Estes dados foram separados de acordo com a definição de início de movimento, escolha do tipo de superfície ou tamanho dos grãos, rugosidade relativa e regime de escoamento, proporcionando uma análise sistemática da literatura disponível para mobilidade dos grãos. As quatro metodologias empregadas para a determinação do limite do mobilidade são listadas: [1] Extrapolação das taxas de transporte por ‘*bed-load*’ para valores próximos de zero, ou seja, valores em que o transporte por ‘*bed-load*’ seja quase desprezível (Shields, 1936; Day, 1980; Parker e Klingeman, 1982). [2] Observações visuais do início do movimento dos grãos (Gilbert, 1914; Kramer, 1935; Yalin e Karahan, 1979).

Este método é considerado subjetivo pois depende da definição de quantos grãos móveis são necessários para delimitar o limite de mobilidade dos grãos. De acordo com Paintal (1971) sempre existirá a probabilidade dos grãos de movimentarem desde que fluido esteja em escoamento. [3] Desenvolvimento de limites de mobilidade teóricos baseados no balanço de forças necessário para mover os grãos: a força da água no grão deve exceder a força necessária para rotacionar o grão (momento em torno do ponto de contato), de modo que os grãos se movam da posição inicial (White, 1940; Wiberg e Smith, 1987; Jiang e Haff, 1993). [4] Desenvolvimentos de relações baseadas em grãos de tamanho grande (assumindo o tamanho de grão 100 vezes maior do que aquele que estaria presente no leito para um escoamento em regime hidraulicamente liso), de maneira que seja possível estabelecer o número de Shields crítico para um dado tamanho de grão (Andrews, 1983; Carling, 1983; Komar, 1987).

Buffington e Montgomery (1997) construíram um diagrama de Shields a partir de dados que representam o início da mobilidade dos grãos e a partir da análise revelaram que grande parte da dispersão obtida na curva de Shields é devido a erros sistemáticos que os pesquisadores deviam estar cientes ao escolher e comparar o número de Shields crítico com a literatura. Estes dados dispersos refletem aos fatores que devem ser levados em consideração durante a análise do limite de mobilidade dos grãos como as propriedades do material do leito (classificação dos grãos, formato, etc.), método de medida da tensão de cisalhamento, técnica de amostragem utilizada para caracterizar a distribuição do tamanho dos grãos e diferenças na definição de mobilidade de grãos. Afirmaram também que não há um valor determinado de número de Shields crítico para escoamento turbulento e rugoso, mas existe uma escala de valores que diferem entre os métodos investigados. Por fim, Buffington e Montgomery (1997) enfatizam que nenhum dos quatro métodos investigativos pode ser considerado superior, pois cada método é apropriado para aplicações particulares e, assim, se deve focar mais a análise do limite de mobilidade dos grãos para a obtenção de valores para aplicações particulares e menos na obtenção de valores universais.

Soulsby e Whitehouse (1997) fazem uma extensão do trabalho de Shields (1936) através do desenvolvimento de uma fórmula analítica simples para ajustar a curva de Shields e aplicam uma correção para melhor ajustar a curva aos dados obtidos para granulometria fina.

Shields (1936) obteve $\theta_c = f(Re^*)$, no entanto u^* (da equação (2.8)) e d aparecem nas expressões adimensionais θ_c e Re^* , tornando difícil a obtenção de aplicações práticas através de sua curva. Arranjando matematicamente os parâmetros, é possível eliminar a dependência de u^* e, assim, criar uma expressão para o diâmetro do grão adimensional D_* (Soulsby e Whitehouse, 1997). Para facilitar o cálculo, a expressão que relaciona θ_c e D_* é explícita:

$$D_* = \left(\frac{Re^{*2}}{\theta_c} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{g(\rho_f/\rho) - 1}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} d. \quad (2.33)$$

A partir do diâmetro adimensional é possível classificar: partículas finas, $D_* < 1,2$; areia, $1,2 < D_* < 40$; cascalho, $D_* > 40$. Dados de alguns experimentos são mostrados na Figura 5 na forma de $\theta_c = f(D_*)$. Os dados apresentaram uma grande dispersão devido aos critérios usados pelos pesquisadores para determinar o limite de mobilidade dos grãos. Mas ainda assim, é possível observar uma tendência nos valores apresentados. Duas curvas são propostas, Shields e Soulsby, como um bom ajuste para os dados apresentados (Soulsby e Whitehouse, 1997).

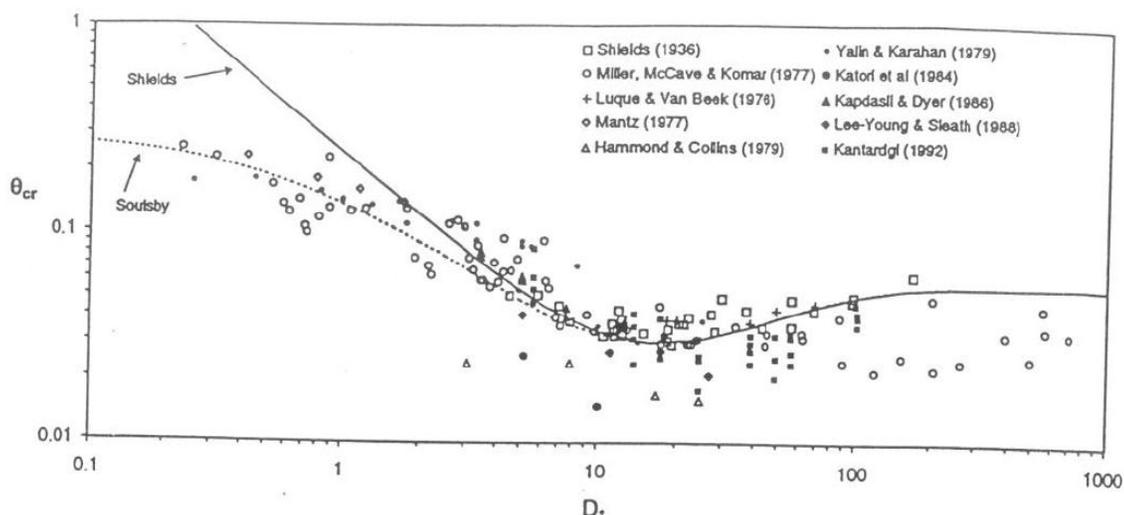


Figura 5 – Dados obtidos por diversos pesquisados e as curvas de Shields e de Soulsby para o limite de mobilidade de grãos

Pode-se observar, da Figura 5, que as assíntotas da ‘curva de Shields’ sugerem que para grãos de tamanho pequeno θ_c é independente de d e para grãos de tamanho grande θ_c é independente de v e assim, $\theta_c \rightarrow constante = 0,055$. A curva se ajusta bem as partículas de tamanho intermediário, mas fica acima dos dados obtidos com partículas de tamanho grande ($D_* > 100$) e tamanho pequeno ($D_* < 1$). Assim, através da análise das forças de atrito e normal exercidas sobre o grão do leito, Soulsby e Whitehouse (1997) desenvolveram uma expressão que melhor ajusta a curva à região de menor diâmetro adimensional, ‘curva de Soulsby’. Interessante ressaltar que modificações na curva de Shields já haviam sido propostas por Miller et al. (1977) e Grass (1970).

Os parâmetros adimensionais, número de Shields e número de Reynolds na escala do grão, também deveriam ser capazes de determinar a vazão de grãos. No entanto, não é exatamente isto que ocorre, uma vez que existem várias formulações para o escoamento com transporte de areia por leito móvel e há uma grande dificuldade em se determinar a vazão de fluido, pois depende do estado do leito granular. (Gomez e Church, 1989; Nakato, 1990; Martin, 2003).

A taxa de transporte, que dá a quantidade de material transportado pelo escoamento, é uma característica importante no movimento de duas fases. Então, é natural que a determinação de uma expressão seja procurada por muitos pesquisadores. Como consequência, uma grande quantidade de fórmulas foram propostas por vários autores desde Du Boys (1879).

Para estudar o transporte de grãos por leito móvel, Bagnold (1941) utilizou grãos de areia de tamanho uniforme para compor o leito em um escoamento de ar. Os mesmos grãos também foram utilizados em um sistema que despejava uma pequena quantidade sobre o leito durante os ensaios. Bagnold (1941) observou que quando o escoamento está na velocidade crítica, o movimento dos grãos continua indefinidamente. Esta velocidade crítica é a velocidade limite na qual um distúrbio inicial dos grãos torna o movimento contínuo e é importante para o mecanismo de movimento da areia. Bagnold (1941) nomeou esta velocidade crítica como velocidade limite de impacto (em inglês, ‘*impact threshold*’). Já com uma velocidade de escoamento abaixo da crítica, a energia que faz com que os grãos se movam vem do impacto dos grãos com o leito e do escoamento de ar. No entanto, esta energia não é suficiente para que os grãos sejam movidos

continuamente. Este conceito não é aplicado para escoamento com água pois não foi identificada a ocorrência do fenômeno de saltação causados pelo impacto de grãos descendentes.

Bagnold (1941) também inseriu o conceito de velocidade limite do fluido (em inglês, '*fluid threshold*') para caracterizar o início do transporte de areia causado pelo próprio escoamento de fluido. Este limite não possui um valor definido e depende da exposição dos grãos individuais no escoamento, ou seja, depende da compactidade do leito.

Estes conceitos (*impact threshold* e *fluid threshold*) foram ilustrados por Bagnold (1941) utilizando curvas obtidas (gráfico diâmetro dos grãos *versus* velocidade de atrito limite) para um escoamento de ar e água.

Bagnold (1941) também determinou a vazão de grãos através da pesagem dos grãos que foram arrastados durante o escoamento. A medida da velocidade do ar foi feita simultaneamente para correlacionar a vazão ao gradiente de velocidade. Sabendo que do total de grãos em movimento no ar, aproximadamente, $\frac{3}{4}$ se movem em saltação e $\frac{1}{4}$ se move em contato com a superfície (conhecido também como reptação, e não observado quando o fluido é líquido). Concluiu que o movimento dos grãos é proporcional a força do vento que age sobre eles e que, existe uma tendência de deposição dos grãos na superfície sempre que grãos maiores são pegos e transportados para uma área com grãos mais finos e uniformes.

Em Yalin (1977) pode-se encontrar exemplos de fórmulas para quantificar o transporte de grãos durante um escoamento como as expressões de Einstein (1942), Meyer-Peter et al. (1948), Bagnold (1956), Yalin (1963), Chang et al. (1967).

Raudkivi (1998) classifica o transporte de sedimentos em '*bed-load*', saltação e suspensão e associa cada descrição à razão entre velocidade de queda das partículas e a velocidade de atrito. Também apresenta inúmeras relações para transporte de sedimentos agrupadas de acordo com sua derivação. As primeiras relações desenvolvidas para o transporte por leito móvel foram baseadas na tensão de cisalhamento. Segue-se, então, apresentando relações baseadas em argumentos probabilísticos, fórmulas baseadas em argumentos energéticos (como a de Bagnold (1956)) e, por fim, otimizações computacionais de dados observados usando parâmetros adimensionais variados. Os modelos analíticos para transporte por suspensão podem ser divididos em: difusão, energia, estatístico e numérico. Os modelos de difusão possuem maior aceitação prática e geralmente fazem parte de modelos numéricos e matemáticos.

Martin (2003) utilizou um conjunto de medidas para testar diferentes fórmulas disponíveis para o transporte em ‘*bed-load*’. Estas medidas foram obtidas no rio Vedder, British Columbia – Canadá durante um período de 10 anos, entre 1981 e 1990 (Martin e Church, 1995).

O foco do estudo foi comparar os resultados obtidos ao se utilizar a fórmula original proposta por Bagnold (1980) com diversas versões revisadas desta fórmula que são apresentadas em Martin e Church (2000). As versões revisadas da fórmula de Bagnold foram calibradas usando um banco de dados mais amplo do que o utilizado originalmente para construir a fórmula. Além disso, as fórmulas de Meyer-Peter e Muller (Meyer-Peter e Muller, 1948) também foram avaliadas. Para contrastar com as fórmulas de Bagnold e de Meyer-Peter e Muller (MPM), utilizou-se também uma correlação mais simples (em inglês, *stream power correlation*) desenvolvida a partir de dados encontrados em Gomez e Church (1989). Apesar de o estudo mostrar os resultados obtidos para diversas formulações, não sugere o uso de apenas uma fórmula.

Para o transporte de sedimentos, a correlação mais simples mostrou resultados melhores em comparação às outras fórmulas. Este resultado se torna surpreendente pois as fórmulas de Bagnold e de MPM foram originadas de uma extensa base de investigações e incluem as condições do limite de transporte.

No trabalho de Martin (2003) foi obtida a diferença relativa nas taxas de transporte total. Assim, todas as fórmulas se mostraram adequadas para prever a deposição total ao longo do rio Vedder, apresentando resultados dentro da ordem de grandeza do campo de valores. Porém, a correlação mais simples apresentou padrões mais realistas que as demais fórmulas. Já para obter estimativa do total transporte de sedimentos no rio Vedder, as taxas transporte em ‘*bed-load*’ devem ser somadas ao valor médio anual de sedimentos suspensos. Assim, o transporte por ‘*bed-load*’ é caracterizado como uma porcentagem do sedimento total. Os valores obtidos pela fórmula de Bagnold, MPM e uma das fórmulas obtidas através das revisões da fórmula de Bagnold se mostraram mais razoáveis do que a correlação mais simples.

Em Charru et al. (2004) foi realizada uma análise utilizando leito granular cisalhado por escoamento em regime laminar. Foi estudado o comportamento de um leito plano de partículas cisalhado por um escoamento de Couette, sem formação de rugas. O trabalho foi dividido em dois objetivos, o primeiro foi reexaminar o limite de mobilidade das partículas e, acima deste

limite, determinar a distribuição de velocidades e a densidade de partículas que se movem. O segundo objetivo foi propor dois modelos: um para o processo de erosão e deposição e outro a respeito da evolução da taxa de fluxo de partículas.

A primeira evidência da evolução lenta das partículas no leito foi dada pelo decréscimo da altura da superfície do leito. A razão para esse decréscimo pode ser atribuída ao rearranjo da microestrutura do leito. O rearranjo é responsável pelo ‘*bed armouring*’ e afeta o limite de mobilidade das partículas e a taxa de transporte. De acordo com Charru et al. (2004), depois de parar o escoamento por um tempo e iniciá-lo novamente, o limite de mobilidade da partícula é maior que o observado inicialmente desde que o valor de saturação da compactação (*armouring*) não seja alcançado. O ‘*bed armouring*’ é um fenômeno conhecido (Chin et al., 1994 e Raudkivi, 1998), e através de Charru et al. (2004) mostrou-se que pode ocorrer com partículas de tamanho uniforme. Veja seção 2.3 para mais detalhes deste fenômeno.

Sabendo que o fluxo de partículas envolve a velocidade das partículas e a concentração, Mouilleron et al. (2009) obtiveram $\frac{Q}{U_s d} = 10,2 \theta^3$, onde Q é o fluxo de partículas por unidade de largura, U_s é a velocidade de sedimentação de Stokes, d é o diâmetro da partícula e θ é número de Shields a partir da concentração de partículas ($\phi = 1/2 \phi_0$), onde ϕ e ϕ_0 correspondem à concentração de partículas para duas posições diferentes dentro da camada móvel de um escoamento viscoso. Este resultado é similar aos obtidos por Leighton e Acrivos (1986) e Bagnold (1956). Apesar de os modelos fornecerem a mesma escala de valores, o primeiro modelo possui um coeficiente de 7,5, ao invés de 10,2, e o segundo modelo apresenta um fluxo que diverge logaritmicamente com a altura devido ao decréscimo da concentração ($u \sim y$, $\phi \sim y^{-2}$). O resultado deste modelo fornece valores favoráveis, porém o modelo fornecido por Charru et al. (2004) proporciona uma melhor previsão para a faixa de $\theta < 0,5$.

Yang et al. (2007) utilizaram a velocimetria por imagens de partículas (em inglês, *Particle Image Velocimetry*, PIV) para a aquisição de dados referentes a um leito de areia móvel em um túnel de vento, adaptando o equipamento para utilizar os grãos como traçadores e medir, então, suas velocidades durante o escoamento. Foi medida a variação da velocidade média dos grãos em saltação para diferentes granulometrias, em diferentes alturas e sujeita a diferentes velocidades do vento. Os resultados sugerem que as velocidades horizontal e vertical da partícula se ajustam a

uma distribuição Gaussiana. O desvio padrão da velocidade horizontal é menos de 10% da média enquanto para a velocidade vertical é muito maior. Isto porque as velocidades negativas (partículas descendentes) compensam as velocidades positivas (partículas ascendentes) na média das velocidades verticais. Mas ainda assim, os desvios padrão da velocidade vertical e horizontal aumentam com a altura.

Yang et al. (2007) determinaram também que a velocidade média da partícula varia com a velocidade do vento, tamanho da partícula e posicionamento (altura) acima do leito. A velocidade horizontal média é resultado da aceleração do vento e aumenta com o aumento da velocidade de atrito e a altura e decresce com o aumento do tamanho do grão. Concluíram que quanto maior a velocidade do vento, mais fácil para as partículas finas serem aceleradas devido a maior a quantidade de movimento que a partícula vai extrair do escoamento.

A ordem de grandeza da velocidade vertical é muito menor do que da velocidade horizontal (Dong et al., 2004), pois a velocidade vertical é uma média dos movimentos ascendentes e descendentes das partículas. O movimento médio na direção vertical da nuvem de saltação é para cima (velocidade vertical média é positiva), embora esta velocidade para cima diminua com a altura. Assim, a determinação da velocidade vertical de uma partícula e os fatores que a influenciam é uma tarefa complexa que ainda requer estudos.

Além das dificuldades para a determinação de alguns parâmetros do escoamento (como o número de Shields, θ , e número de Reynolds, Re^*) o estudo do efeito de transporte de grãos no escoamento de fluido (em inglês, *feed-back effect*) tem grande importância e foi estudado por diversos pesquisadores (veja seção 2.4).

2.3 Compactação do leito (*armouring*)

O efeito de compactação do leito, em inglês '*armouring*', é um fenômeno que ocorre na microestrutura do leito afetando a mobilidade dos grãos e a taxa de transporte. De maneira geral, o grau de compactação do leito possui uma dependência com o tempo de exposição das esferas ao escoamento, ou seja, com o aumento da vazão de escoamento alguns grãos da superfície do leito que estão mais exposto se movimentam (rolam, sem saltar) até encontrar lacunas no leito onde podem se

depositar. Nestas lacunas, os grãos acabam por ficar aprisionados (em inglês, *'trapping effect'*) e o leito se torna mais compacto. O efeito *'armouring'* cessa quando a compacidade máxima do leito é atingida (Charru et al., 2004 e Figueiredo et al., 2011). Assim, no início do escoamento o leito não está com sua compacidade máxima e irá se compactar ao longo do tempo, tornando o *'armouring'* um efeito transiente.

Caso a vazão utilizada seja baixa, este efeito pode ser tal que interrompa completamente o movimento dos grãos. Porém, se o tempo for suficientemente grande e a vazão elevada o bastante, o leito atingirá sua compacidade máxima e, assim, a densidade de grãos móveis (número de grãos móveis por unidade de área) não deve mais diminuir. As partículas sólidas estarão em movimento e logo o efeito do *'armouring'* cessará. A determinação do tempo característico para que este efeito ocorra foi realizada por Charru et al. (2004) para escoamentos laminares de água. Note que quando se utiliza o ar como fluido de escoamento o fenômeno de *'armouring'* não é observado pois os choques entre os grãos promovem a ejeção, além de descompactar a parte superior do leito. A seção 2.4.1 apresenta mais detalhes para o escoamento de ar sobre um leito móvel.

2.4 Efeito do transporte de grãos por leito móvel sobre o escoamento de um fluido (*feed-back effect*)

São poucos os trabalhos experimentais que tratam da influência do *'bed-load'* no escoamento de um líquido. Por outro lado, estudos do efeito do transporte de grãos por leito móvel no escoamento de ar é mais freqüente. Para melhor entender este fenômeno e suportar os dados experimentais apresentados neste trabalho, serão apresentadas nesta seção as principais diferenças do efeito *'feed-back'* em escoamentos de ar e líquidos.

2.4.1 Fluido: gás

O trabalho pioneiro de Bagnold (Bagnold, 1941) mostrou que o transporte por um leito móvel influencia o escoamento do fluido. Baseado em resultados experimentais obtidos em túnel de

vento e nos testes em campo (no deserto do Sahara), Bagnold mostrou que os grãos executam vôos balísticos (grãos em saltação), que alteram a distribuição da velocidade do vento.

Para o transporte de grãos no ar, a razão entre as densidades do meio granular (quartzo) e do fluido (ar) atinge valor alto, próximo de 2000, implicando que o escoamento não tenha quantidade de movimento suficiente para deslocar os grãos diretamente. Assim, o transporte total de grãos em escoamento no ar consiste de, basicamente, uma combinação entre os grãos rastejantes (em inglês, '*reptation*'), em saltação e em suspensão. Os grãos rastejantes e os grãos ejetados do leito derivam do bombardeio de grãos em saltação. Estes grãos, ao serem atingidos efetuam vôos balísticos com comprimento de escala muitas vezes maior do que o diâmetro do grão, assim a espessura da camada móvel é muitas vezes maior do que o diâmetro médio dos grãos. Este comportamento é observado apenas para os grãos em saltação, os grãos em reptação, como o próprio nome diz, não são ejetados. Durante o vôo balístico, os grãos adquirem quantidade de movimento do escoamento de ar (são acelerados), e quando caem e atingem a parte fixa do leito granular, a quantidade de movimento é transferida: uma parte é responsável pela ejeção de outros grãos, outra parte é dissipada no próprio choque e outra parte permanece com o próprio grão caso ele continue em saltação. Já quando o transporte de grãos se dá na água, esta razão de densidades entre o meio granular e o fluido (água) atinge valores próximos da unidade e os fenômenos envolvidos no transporte de grãos são diferentes.

Bagnold (1941) interpretou que a transferência de quantidade de movimento para os grãos saltantes é função do arraste que o fluido em escoamento causa nos grãos. Quando um escoamento gradual de ar ou água é imposto em um leito plano de grãos, em certo momento existe o deslocamento destes grãos pela força que o fluido exerce sobre eles. A movimentação dos grãos causa alterações na distribuição de velocidade próxima ao leito granular tanto para escoamento com ar ou água. Para chegar nesta conclusão, Bagnold (1941) examinou as mudanças ocorridas no vento ao se utilizar um leito móvel e comparou a nova distribuição de velocidades com um leito de mesma granulometria porém impedido de mover, leito fixo. Para leito fixo, Bagnold (1941) obteve perfil de camada limite turbulenta logarítmica em regime hidraulicamente rugoso, correspondendo aos obtidos por Nikuradse (1933) (equação (2.19)). Nikuradse (1933) também estudou como a distribuição de velocidades em tubos rugosos pode ser dependente do número de Reynolds e da rugosidade relativa.

Como dito anteriormente, quando são mostradas uma série de medidas de velocidade em função da altura em gráficos dimensionais para um escoamento de ar sobre leito fixo, obtém-se um foco, O, com velocidade nula e cuja altura é y_k . Com as medidas para leito móvel, o novo foco, O', é deslocado para uma altura y_k' e uma determinada velocidade não-nula, veja Figura 6. Atribui-se o deslocamento do foco em relação: a altura, às ondulações formadas na superfície; a velocidade, ao início do movimento da areia no escoamento. Outra forma de interpretação é que esta altura é um comprimento característico da transferência de quantidade de movimento entre fluido e grãos. Se estender o perfil logarítmico obtido por Bagnold (1941) até atingir velocidade nula será encontrada uma determinada altura, y_k'' que corresponde àquela obtida se o escoamento fosse realizado sobre leito fixo ($y = y_0$). Assim, é possível obter com a altura y_k'' a rugosidade aparente do leito, $y_k'' \geq d/30$.

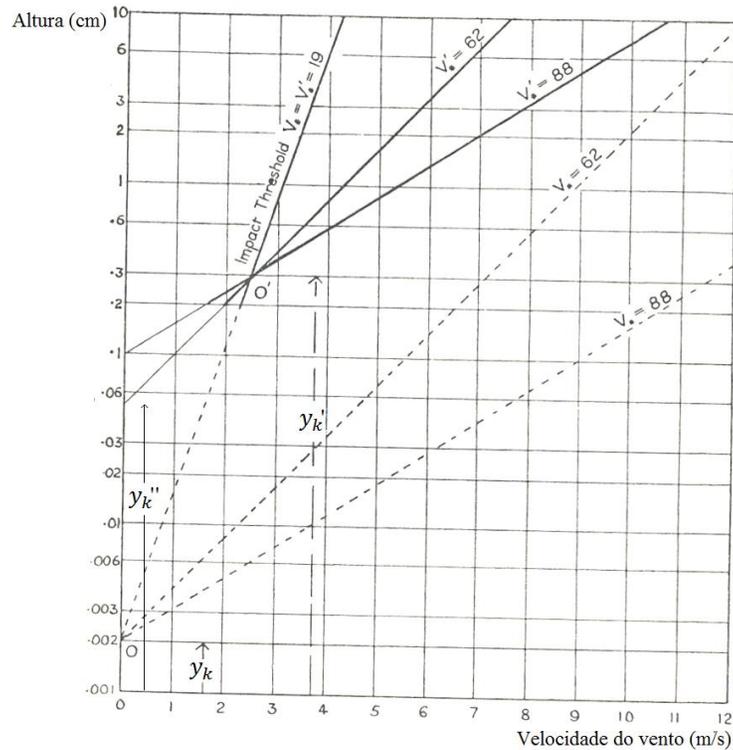


Figura 6 – Distribuição da velocidade do vento para um escoamento sobre leito fixo (linha pontilhada) e leito móvel (linha contínua). Escala semi-logarítmica. Bagnold (1921)

Bagnold (1941) também mostrou a existência de duas regiões distintas para leito móvel: uma região próxima do leito granular fixo, onde a saltação dos grãos está fortemente presente, e uma região acima da camada de saltação. Na região próxima ao leito granular fixo, a distribuição de velocidades sofre uma mudança drástica e não é mais logarítmica. Quando as curvas estão nas tradicionais escalas log-normal, o perfil de velocidades apresenta uma descontinuidade nesta região, cuja altura corresponde ao caminho médio do grão. Bagnold (1941) argumentou que esta descontinuidade é uma evidência experimental da transferência de quantidade de movimento do escoamento de fluido para os grãos móveis, e é uma região onde a saltação está presente.

Na região acima da saltação, o perfil logarítmico de velocidade é restabelecido com um diferente valor de y_0 : no caso de leito fixo, se o perfil logarítmico é estendido para baixo, irá cruzar o foco em $y = y_k = y_0$ e $u = 0$ e no caso de leito móvel, o foco é localizado pela intersecção de perfis logarítmicos, para diferentes velocidades e mesma granulometria, e as linhas

(indicadas na Figura 6) correspondem ao gradiente de velocidade onde os grãos iniciam o movimento (em inglês, ‘*impact threshold*’) e o valor $y_k'' > y_0$.

Depois do trabalho pioneiro de Bagnold (Bagnold (1936); Bagnold (1941)), muitos outros trabalhos experimentais foram realizados com o intuito de se medir e analisar parâmetros relacionados com escoamentos que utilizem como fluido de trabalho o ar.

Muitos pesquisadores estudaram ou estão estudando o comportamento de um leito de partículas sob a influência de um escoamento de um fluido. Para obter os dados de análise, muitas técnicas de medição de velocidade das partículas foram aplicadas: métodos de fotografia em alta velocidade, análise da dinâmica de partículas (em inglês, ‘*Particle Dynamics Analyzer*’, PDA) e velocimetria por imagens de partículas (em inglês, ‘*Particle Image Velocimetry*’, PIV), por exemplo. Cada técnica apresenta suas vantagens e desvantagens e foram utilizadas para ajudar a no entendimento dos fenômenos envolvidos.

Rasmussen et al. (1996) estudou a influência que a inclinação da seção de testes do túnel de vento, tamanho de grão e velocidade de atrito causam no leito rugoso. Utilizou como critério de análise a constante C, da expressão proposta por Owen (1964), para mostrar que existe dependência desta constante com a velocidade de atrito e o tamanho do grão e existe independência com o ângulo de inclinação do túnel de vento. A expressão que Owen (1964) propõe é dada por:

$$y_0 = \frac{C \cdot u^{*2}}{2g} \quad (2.34)$$

onde y_0 é a altura da rugosidade, u^* é a velocidade de atrito, g é a aceleração da gravidade e C é uma constante (0,022). Experimentos realizados mais tarde (Tabler, 1980; Rasmussen e Mikkelsen, 1991) encontraram diferentes valores para esta constante. Rasmussen et al. (1996) afirmam que a constante C varia entre valores muito baixos à valores limitantes para altas velocidades de atrito. Para dois diferentes diâmetros de areia de tamanho uniforme, $125 \mu m$ e $544 \mu m$, o valor limite de C decresce, respectivamente, de 0,06 para 0,03, para velocidade de

atrito de 1 m/s. Assim, foi encontrado que o valor limite de C decresce, aproximadamente, com $d^{1/2}$, onde d é o diâmetro da partícula.

Correlacionando as velocidades de atrito com o efeito da inclinação do canal, foi obtido que o valor limite de C não depende do ângulo de inclinação, mesmo que a inclinação afete a trajetória da partícula. Finalmente, Rasmussen et al. (1996) conclui que C é independente do ângulo de inclinação porque a altura da rugosidade y_0 e, conseqüentemente a constante C , está diretamente relacionada à quantidade de movimento extraída do ar pelas partículas (isto é, tensão de cisalhamento) e não com a forma de extração (isto é, formato da trajetória das partículas).

Bauer et al. (2004) realizaram uma série de experimentos em túnel de vento utilizando uma ampla faixa de vazões com leito de grãos finos e espessos. A comparação dos resultados entre os casos de leito com saltação e o caso sem transporte mostrou a influência do transporte de sedimentos no perfil de velocidade do vento. Além disso, os resultados coletados foram comparados com seis diferentes parametrizações do perfil de velocidade e do comprimento rugoso encontrados na literatura. Por fim, encontraram que a melhor estimativa para a velocidade de cisalhamento durante a saltação é fornecida pela lei logarítmica através de dados do perfil próximo a parede.

Através do anemômetro de fio quente, Zhang et al. (2007) obtiveram os perfis de velocidade do vento e através da velocimetria por seguimento de partículas em movimento (em inglês, '*Particle Tracking Velocimetry*', PTV) obtiveram a distribuição espacial das velocidades instantâneas das partículas em saltação para dois tipos diferentes de areia (areia de praia Pohang da Coreia do Sul – $d = 200 - 300 \mu m$ - e areia do deserto Taklimakan da China – $d = 100 - 125 \mu m$). Também foi examinada a influência que os grãos em saltação realizam no perfil de velocidades. Depois de realizar as medidas dos perfis de velocidades com grãos móveis, as mesmas medições foram realizadas para o leito fixo, sem transporte de areia. Os resultados revelaram que os perfis de velocidades para o leito fixo apresentam formato logarítmico em toda a região, incluindo na camada interna ('*inner layer*'). De acordo com Zhang et al. (2007), no teste com a presença de grãos móveis existe uma densa camada de areia saltante próxima a superfície do leito onde a concentração de partículas é alta e a influência dos grãos saltantes em modificar campo de velocidades é significativa. Assim, os perfis de velocidade apresentam uma tendência

logarítmica na região central e desviam do perfil logarítmico nas camadas internas e externas. As velocidades apresentadas na camada externa são constantes, refletindo o fato que a velocidade do vento não se altera, nesta região, com a presença de grãos móveis. Na camada interna, os perfis de velocidades sofrem deslocamentos devido a concentração de grãos móveis. Estes resultados são consistentes com os apresentados anteriormente por Bauer (2004).

2.4.2 Fluido: água

Após uma introdução das pesquisas desenvolvidas utilizando o fluido ar no escoamento, esta seção tem a intenção de focar nos trabalhos desenvolvidos com o fluido água.

Para obter uma melhor compreensão da dinâmica da camada móvel de um leito granular cisalhado por um escoamento viscoso, Mouilleron et al. (2009) mediram experimentalmente o perfil de velocidade do fluido com a técnica PIV enquanto os grãos foram identificados através da técnica PTV. Foram encontrados perfis parabólicos $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} > 0$, evidenciando a transferência de quantidade de movimento do fluido para os grãos. Não foi verificado se este perfil parabólico é válido dentro do leito móvel para escoamentos turbulentos.

Para medir as velocidades do fluido e do grão dentro da camada móvel Mouilleron et al. (2009) combinaram os índices de refração de maneira que se tornassem praticamente idênticos, assim foi possível medir apenas a fase líquida, com a fase de grãos não exibida. Pela primeira vez foi medido o escoamento dentro da camada móvel de um leito granular e os resultados obtidos foram utilizados na comparação com os modelos fornecidos por Bagnold (1956) e Leighton e Acrivos (1986). O primeiro modelo se baseia em experimentos realizados com partículas cisalhadas por um escoamento de Couette anular e o segundo modelo assume que as partículas sem inércia seguem o escoamento de fluido com mesma velocidade. Nenhum dos dois modelos forneceu boas previsões para o trabalho de Mouilleron et al. (2009) e assim, o modelo de Bagnold (1956) foi simplificado e adaptado para atender as necessidades do problema. A modificação do modelo assume que haja uma concentração de partículas uniformes e que a velocidade da partícula sofra correções que dizem respeito ao número de Shields crítico, a curvatura do perfil de velocidades e aos efeitos de inércia. Mesmo com as incertezas da

modelagem, as estimativas mostraram que a velocidade da partícula será considerada igual à velocidade do fluido, sem considerável velocidade de deslizamento. Esta afirmação é consistente com as observações relatadas para $\theta < 0,5$. Para valores fora desta faixa, o modelo apresenta discrepâncias que podem ser atribuídas a velocidade de deslizamento entre fluido e partícula.

O trabalho de Carbonneau e Bergeron (2000) apresentam medida quantitativa dos efeitos causados pelo ‘*bed-load*’ em escoamentos de líquidos turbulentos. Carbonneau e Bergeron (2000) realizaram experimentos em um canal aberto com inclinação variável, na qual foram impostos diferentes condições de escoamento de água e taxas de escoamento por leito móvel. Foi utilizado apenas um tipo de grão (partículas de $d = 7,4 \text{ mm}$) e variadas taxas de escoamento de água e taxas de injeções de grãos, obtendo velocidades de atrito na faixa de $0,031 \text{ m/s} \leq u^* \leq 0,119 \text{ m/s}$ e taxas de escoamento em leito móvel na faixa de $0,04 \text{ kg/s} \leq W_b \leq 0,4 \text{ kg/s}$. Os perfis de velocidade instantânea foram medidos sobre a superfície do canal na ausência e presença de rugosidade com o equipamento ADV (em inglês, ‘*Acoustic Doppler Velocimeter*’) e foram analisados em termos de escoamento médio e flutuações. Para uma superfície sem rugosidade, o efeito de adição de partículas no escoamento causa um aumento de turbulência e uma redução da velocidade média, principalmente na região próxima ao leito. Este resultado concorda com a teoria que o leito móvel age como uma fonte adicional de rugosidade, extraindo quantidade de movimento do escoamento.

Embora o trabalho de Carbonneau e Bergeron (2000) apresente medidas quantitativas, as comparações entre os escoamentos com e sem leito móvel não devem ser realizadas diretamente pois a altura de referência do escoamento não é a mesma para os dois casos. Uma altura de referência deveria ser encontrada para que os perfis de velocidades fossem deslocados antes de realizar as comparações. Nas comparações, alguns resultados mostraram que o escoamento médio foi acelerado na presença de leito móvel. Para explicar, os autores fizeram uma análise entre escoamento médio e flutuações para os dois casos. No entanto, o equipamento ADV foi operado em uma frequência de aquisição de 25 Hz, que é muito baixa para detectar pequenas escalas de turbulência e validar qualquer análise deste tipo.

Em Wang et al. (2011) é apresentado um estudo semelhante ao proposto neste trabalho: medição experimental do escoamento de água sobre um leito de grãos móveis utilizando a técnica

de medição PIV e duas granulometrias diferentes ($d = 2 \text{ mm}$ e $d = 2,5 \text{ mm}$). As imagens capturadas foram utilizadas para obter os perfis de velocidade, analisar o movimento do leito e explorar o fator de atrito do escoamento. Porém, os experimentos foram realizados em canal aberto com regime tendendo ao hidraulicamente rugoso ($41 \leq Re^* \leq 100$) e permitindo a formação de dunas. Também apresentam características técnicas distintas ao deste trabalho como, por exemplo, em Wang et al. (2011) a resolução espacial do PIV é $1,4 \text{ mm} \times 1,4 \text{ mm}$ (neste trabalho: $0,14 \text{ mm} \times 0,14 \text{ mm}$) e número de imagens obtidos foi de 30 (neste trabalho: 500) e, por fim, não isolaram o efeito do transporte de grãos no escoamento (*'feed-back effect'*).

Embora em Wang et al. (2011) se analise o movimento dos grãos, aplicando a lei logarítmica para leito plano e para leito com dunas, este procedimento não é correto. Em um leito com formação de dunas, o perfil de velocidades não está localmente em equilíbrio e trabalhos que tratam apenas do fator de forma mostram que em muitos casos a lei logarítmica pode não existir. Assim como ocorreu em Carbonneau e Bergeron (2000) não definiram uma altura de referência que é importante para determinar parâmetros do escoamento (como, por exemplo, velocidade de atrito, constante B , fator de atrito). Ainda assim, baseado na fórmula de Schultz-Grunow ($c_f = 0,370(\log_{10} Re)^{-2,854}$), desenvolveram uma equação para expressar o fator de atrito do escoamento em termos do número de Reynolds e da razão entre profundidade do escoamento (h) e altura rugosa (d_{50} , ou diâmetro das partículas do leito):

$$f = 0,143 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{-0,205} (\log_{10} Re)^{-0,205}. \quad (2.35)$$

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Esta seção descreve a montagem do dispositivo experimental e os testes experimentais envolvidos no transporte de grãos em escoamento turbulento de água, que foram realizados no Laboratório 2PFG do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

3.1 Montagem Experimental

Um aparato experimental foi construído para estudar os efeitos da mobilidade de grãos em um escoamento turbulento. Para caracterizar esta perturbação, o escoamento de água sobre leito granular fixo e móvel foi medido em condições próximas do limite de mobilidade dos grãos. A Figura 7 exibe uma representação do dispositivo experimental, com a localização de cada componente do circuito fechado de água, e a Figura 8 exibe uma foto do dispositivo experimental tirada no Laboratório 2PFG. Para a medição do campo de escoamento foi utilizado o equipamento PIV, que consiste basicamente de um laser, uma câmera e um sincronizador. Partindo desta visão geral do dispositivo experimental esta seção apresenta, detalhadamente, os constituintes do sistema e suas características de operação.

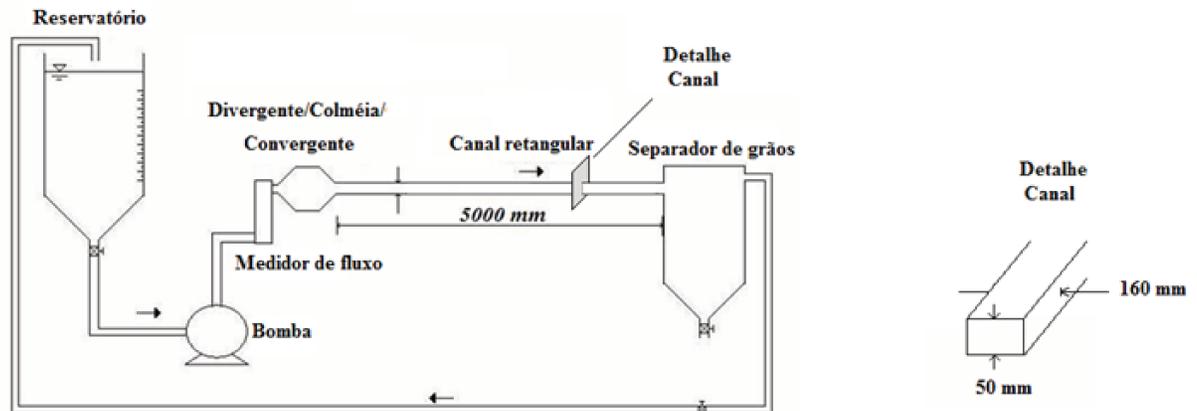


Figura 7 – Esquema do dispositivo experimental



Figura 8 – Foto do dispositivo experimental

A água foi utilizada como fluido de trabalho para a realização dos ensaios. Os valores da massa específica (ρ) e da viscosidade dinâmica (μ) a uma temperatura de, aproximadamente, 20°C são 1000 kg/m³ e 1,0 10⁻³ N.s/m², respectivamente (Fox et al. (2006)).

O aparato experimental impõe uma vazão controlada de água que, em circuito fechado, passa pelos grãos que estão depositados no fundo do canal. Na seção de testes foram analisados os comportamentos de um leito granular fixo e móvel submetidos a diferentes vazões de escoamento. Um reservatório com capacidade de 1000 litros garantiu o constante fornecimento de água. A água que vem do reservatório foi bombeada através de toda a extensão do canal por meio de uma bomba de cavidade progressiva, fabricada pela empresa Bombas GEREMIA, modelo 2HF-50, com capacidade de 0,5 litros/ciclo e máxima pressão de 12 kgf/cm². Um controle de rotação por inversor de frequência, fabricado pela empresa TECMOT, modelo Delta VFD-B, com alcance de frequência de 0,1 a 400 hertz conectado a bomba gerou a vazão necessária para cada teste. Este inversor possui duas fontes de frequência selecionável (principal/auxiliar), 16 passos de controle de velocidade e 15 passos pré-programados de velocidade para controle de processo, o que possibilita o controle em uma ampla faixa de vazões. A Figura 9 mostra o inversor de frequência utilizado no experimento.



Figura 9 – Inversor de frequência



Figura 10 – Medidor eletromagnético de vazão

As vazões adotadas nos ensaios para leito granular fixo e móvel variaram entre 5 m³/h e 7,5 m³/h e correspondem as velocidades médias na seção transversal do canal (\bar{V}) entre 0,17 m/s e 0,24 m/s.

A vazão volumétrica foi monitorada por um medidor de vazão eletromagnético, fabricado pela empresa KROHNE, modelo Optiflux 2010 C, com capacidade de vazão de 20 m³/h e uma incerteza de 0,5%, colocado próximo a saída da bomba. A Figura 10 exibe o medidor eletromagnético de vazão utilizado no trabalho. Ainda para se obter um maior controle da vazão no canal uma válvula *by pass*, que tem também a função de dispositivo de segurança, possibilita um ajuste fino da vazão. Uma mangueira flexível, que faz a conexão da saída da bomba com a entrada do canal, assegura que eventuais vibrações causadas pelo funcionamento da bomba não sejam transmitidas ao canal. Na seqüência, o fluxo de água entra numa seção divergente-colméia-convergente cuja finalidade é homogeneizar o escoamento, quebrar os turbilhões de grande escala, acelerando o processo de dissipação de tais turbilhões. Esta seção, veja Figura 11, consiste de um difusor, uma seção de área constante que contém esferas de vidro com 3 mm e um convergente, unidos por flanges.

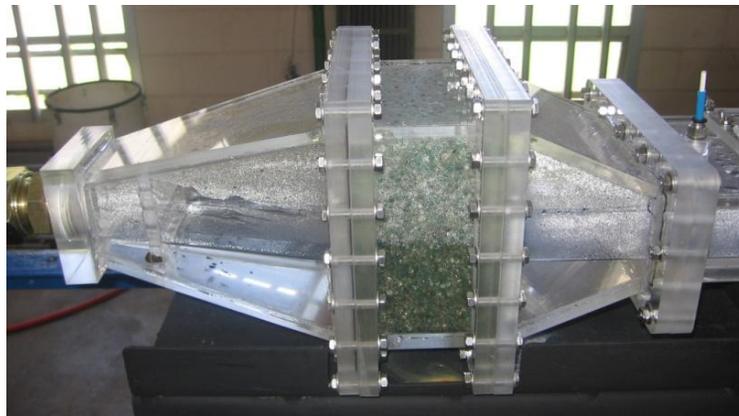


Figura 11 - Seção divergente/colméia/convergente

A seção de testes consiste de um canal de seção transversal retangular (160 mm de largura e 50 mm de altura) confeccionado em acrílico transparente com uma extensão total de 5 m dividida em 5 seções de 1 metro cada uma. Todas as seções possuem duas janelas de acesso cada, com exceção da quarta seção, que é totalmente fechada. As janelas de acesso possibilitam a

introdução de grãos. As três primeiras seções do canal constituem o comprimento de entrada e a partir da quarta seção encontra-se a seção efetiva de testes, onde é posicionado o equipamento PIV para a medição do escoamento.

Para estimar a região de entrada, a partir da qual o perfil de velocidade terá comportamento completamente desenvolvido, para escoamento turbulento em tubos (número de Reynolds maior que 4000) tem-se que o comprimento de entrada L e o diâmetro do tubo D são uma função do número de Reynolds,

$$\frac{L}{D} = 4,4 Re^{1/6}. \quad (3.1)$$

Quando o estudo do escoamento turbulento envolve geometrias não circulares, como é o caso do trabalho, as correlações devem se basear pela introdução do diâmetro hidráulico, definido como:

$$D_h = \frac{4A}{P}, \quad (3.2)$$

onde A é a área de seção transversal e P é o perímetro molhado, dado pelo comprimento de parede em contato com o fluido escoando em qualquer seção transversal (Fox et al., 2006). Para uma seção retangular de largura b e altura h , tem-se $A = bh$ e $P = 2(b + h)$. Na linha de centro do canal, isto é, no plano equidistante das laterais, considera-se que o escoamento comporta-se como se ocorresse em um canal bidimensional entre duas placas planas e paralelas. Assim, considera-se que $b/h \rightarrow \infty$ (ou $h/b \ll 1$) e, então, $D_h = 2h$. A altura h utilizada nos cálculos é a distância do leito granular ao topo da parede, onde de fato ocorreu o escoamento de fluido e é determinada a partir da identificação do campo real de escoamento. A seção 3.3.5 explica, detalhadamente, como foi realizada a delimitação da interface entre parede granular e escoamento. Para referência temos que $h \approx 44 \text{ mm}$.

Assim, para determinar o comprimento de entrada defini-se o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico como:

$$Re_h = \frac{\bar{v}2h}{\nu}, \quad (3.3)$$

sendo ν a viscosidade cinemática do fluido em escoamento e \bar{V} a velocidade média de escoamento. A granulometria de 106 μm a 212 μm apresenta número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico (D_h) na faixa de $1,6 \cdot 10^4 < Re_h < 2,8 \cdot 10^4$ obtendo, de acordo com a equação (3.1), um intervalo de comprimento de entrada de $22,1 < L/D < 24,2$. A granulometria de 300 μm a 425 μm apresenta $1,6 \cdot 10^4 < Re_h < 2,7 \cdot 10^4$ e $22,1 < L/D < 24,1$. Como ambas as granulometrias apresentaram praticamente a mesma relação L/D , então, em termos de distância é necessário no canal um comprimento de entrada de, aproximadamente, 2 m para que se obtenha um perfil de velocidades com comportamento completamente desenvolvido. Na construção do dispositivo experimental, as três primeiras seções correspondem ao comprimento de entrada, com um comprimento de 40 diâmetros hidráulicos, ou seja, 3 m, satisfazendo a condição proposta.

No fim do canal está localizado um separador de grãos, com dimensões de 300 mm x 300 mm x 500 mm, que tem a finalidade de separar os grãos da água que eventualmente estejam sendo transportados do canal. Este separador é um vaso de decantação que possui uma purga em sua parte inferior e a separação destes grãos ocorre devido à forte desaceleração do fluxo. À jusante do separador de grãos encontra-se a tubulação de retorno da água ao reservatório, que permite a recirculação de água e o estabelecimento de um circuito fechado no canal.

3.1.1 Caracterização dos grãos

A preparação para a realização dos ensaios inicia-se com a determinação da granulometria que se deseja trabalhar e o peneiramento. Determinou-se que as partículas que deveriam constituir os grãos do leito rugoso devem ser esferas de vidro com densidade de 2500 kg/m³ e que duas faixas de granulometria devem ser utilizadas. As esferas de vidro foram adquiridas da

empresa Microesferas e vieram armazenadas em um pacote de 20 kg com uma ampla faixa de diâmetro. Assim, a determinação da granulometria das esferas é influenciada pelo processo de peneiramento, que consiste na separação das esferas através de uma superfície perfurada. Para que ocorra esta separação, deve-se impor uma vibração que cause o deslocamento das partículas sobre a superfície de peneiramento. Neste trabalho utilizou-se o agitador eletromagnético, Figura 12, da marca BERTEL, para a separação e seleção das partículas da granulometria desejada, fazendo do peneiramento um processo automatizado. Este agitador possui um reostato para a regulagem da intensidade, isto é, amplitude das vibrações e um temporizador eletrônico para desligar o agitador automaticamente em até 30 minutos, com escala de minuto a minuto. A capacidade do agitador é de seis peneiras, como pode ser observado na Figura 12. As peneiras utilizadas neste trabalho possuem um diâmetro de abertura de: $106 \mu m$, $212 \mu m$, $300 \mu m$, $425 \mu m$, $500 \mu m$ e $600 \mu m$ e elas são dispostas de forma que a de maior diâmetro se localiza na região superior e a de menor diâmetro na região inferior.

Ao recolher os grãos que foram bloqueados no sistema de peneiras, não é possível obter um valor exato para o diâmetro do grão, o que se obtém é um valor médio, baseado no diâmetro de abertura das peneiras em que o grão ficou retido e o último por onde ele passou. Assim, obteve-se uma faixa de diâmetro para as partículas entre $106 \mu m$ e $212 \mu m$ e outra entre $300 \mu m$ e $425 \mu m$. No trabalho, foi considerado que o diâmetro médio desta faixa de diâmetros é de, respectivamente, $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$.



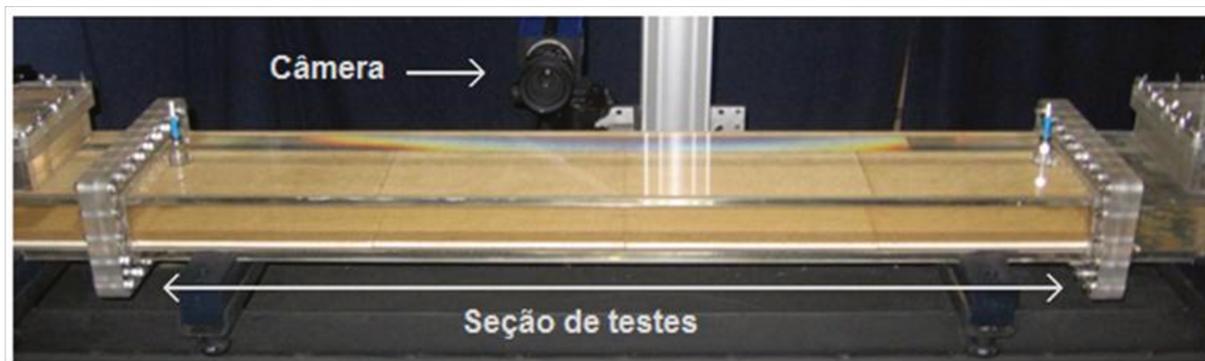
Figura 12 – Agitador eletromagnético de partículas: peneiras de diversos diâmetros + vibrador

3.1.2 Preparação da seção de testes

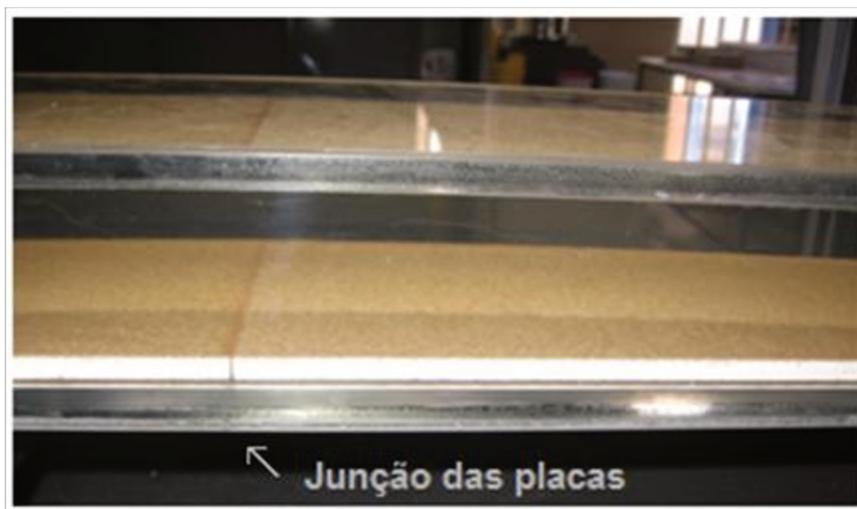
Foram realizados ensaios com escoamento em regime permanente em duas situações: escoamento sobre leito rugoso fixo e escoamento sobre leito rugoso móvel. Para cada uma destas situações foi observado o comportamento do escoamento com diferentes granulometrias. Inicialmente, utilizaram-se esferas de vidro de diâmetro médio de $160 \mu m$ e posteriormente, esferas de vidro de $360 \mu m$.

Para a realização do ensaio sobre leito rugoso fixo foram cortadas placas de PVC com 250 mm de comprimento, 155 mm de largura e 5 mm de altura, as quais foram jateadas e sobre sua superfície foram coladas com silicone as esferas de vidro da granulometria escolhida. Após a colagem das esferas, a altura média das placas ficou em torno de 7 mm. As placas foram introduzidas no canal, através das janelas de acesso, uma ao lado da outra cobrindo toda a

extensão que vai desde o início do canal até o fim da seção de testes. A Figura 13 a) e a Figura 13 b) exibem, respectivamente, a seção de testes em sua totalidade e em detalhe com as placas introduzidas.



a)



b)

Figura 13 – a) Placas introduzidas no canal que formam o leito rugoso fixo; b) Detalhe mostrando a junção das placas que formam o leito rugoso fixo

Para a realização do ensaio sobre leito rugoso móvel, as mesmas placas que constituíam o leito rugoso fixo foram inseridas desde o início do canal até o início da seção de testes. Na seção

de testes, ao invés das placas, uma camada solta de esferas de vidro foi depositada sobre o acrílico com granulometria equivalente à das placas à sua montante, de forma a se obter um leito rugoso móvel (Figura 14). Foi fabricado um alisador cuja função principal é fazer com que o leito fique na altura correspondente às placas, aproximadamente 7 mm, e que a camada superficial de esferas esteja lisa e com ausência de rugas antes do início dos testes (Figura 15). Um material polimérico foi escolhido para fabricar o alisador, pois garante a não ocorrência de reações químicas com a água, com as partículas traçadoras ou com o acrílico constituinte do canal, além de ter características como flexibilidade, fácil manipulação e de não riscar o canal. Para melhorar a estabilidade e o manuseio, um peso metálico foi colocado na região alisadora, como pode ser observado na Figura 16.

É importante salientar que a existência de uma camada solta de esferas não indica necessariamente que esta camada apresente movimento e esteja móvel. O aumento gradual da vazão sobre uma camada de esferas soltas pode levar ao início do movimento das mesmas, porém a determinação da exata vazão que começará a mover os grãos é afetada por diversos fatores. Em escoamento de líquidos, por exemplo, o efeito ‘*armouring*’ causa o aumento da compactação do leito com o tempo e influencia diretamente a vazão de limite de mobilização do grão (Charru et al., 2004). As influências deste efeito no escoamento poderão ser vistas na seção 4.3, que trata dos resultados obtidos para escoamento com leito granular móvel.

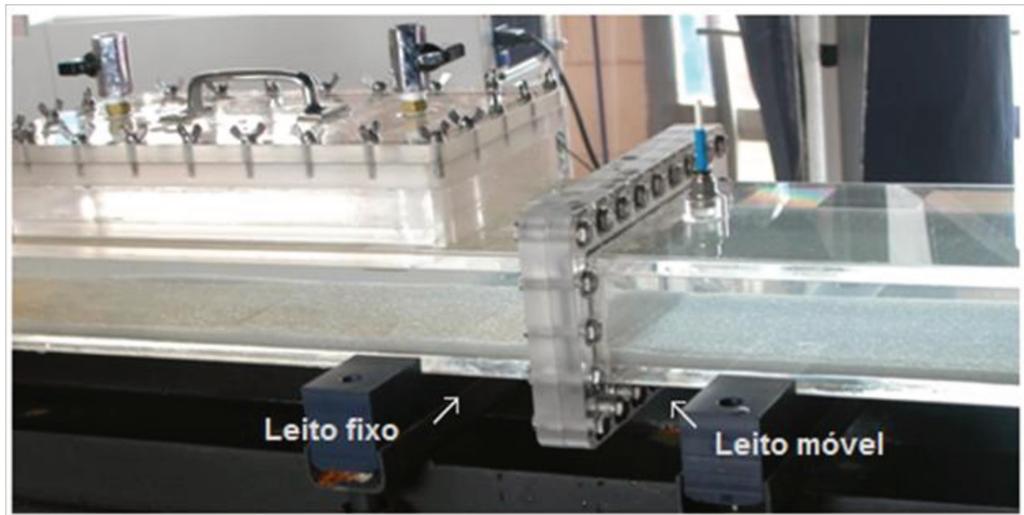


Figura 14 – Detalhe da seção de testes onde existe a transição de leito rugoso fixo (esferas de vidro coladas sobre a placa de PVC) para leito rugoso móvel (esferas de vidro “soltas”)



Figura 15 – Seção de teste com o leito rugoso móvel (esferas de vidro “soltas”)



Figura 16 – Equipamento utilizado para alisar o leito

Nestes ensaios, deve-se tomar cuidado quanto à posição em que serão capturadas as imagens na seção de testes, pois as junções entre as placas do leito poderiam causar perturbações suplementares no escoamento assim como alguns erros de medidas.

3.2 PIV

Os principais equipamentos de um equipamento de PIV estão destacados na Figura 17 a) e uma foto do equipamento é exibida na Figura 17 b). A seguir será realizada uma breve descrição de cada um dos componentes. Uma descrição mais detalhada sobre a técnica de PIV pode ser vista no ANEXO I.

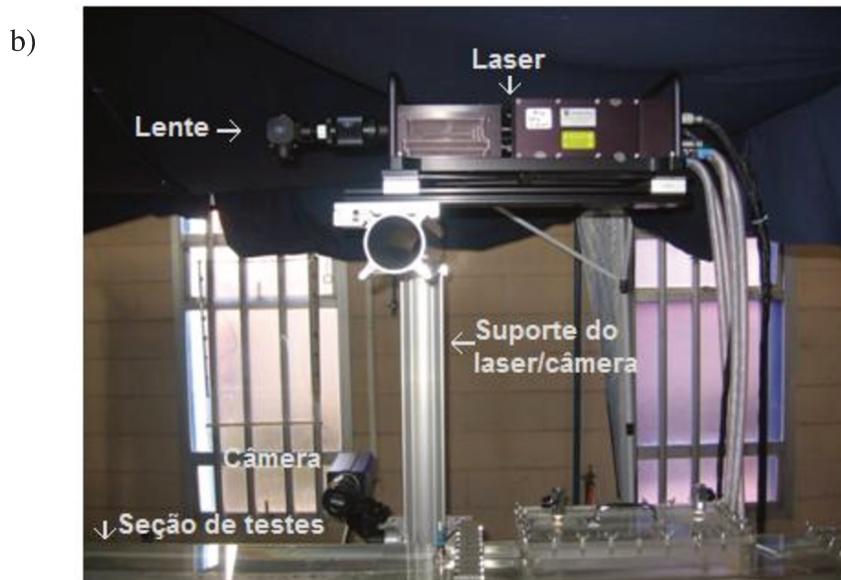
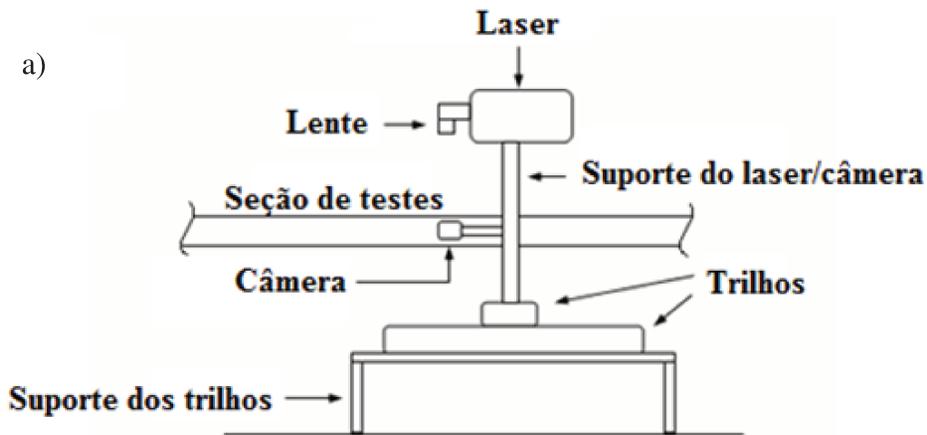


Figura 17 - a) Disposição dos equipamentos constituintes do PIV; b) Foto do equipamento PIV.

O sistema de medição PIV consiste basicamente de uma câmera, um laser de alta potência, um sincronizador e um software gerenciador. Neste trabalho, foi utilizado um sistema PIV (laser + câmera sincronizados) de baixa frequência fornecido pela empresa LaVision Inc. A câmera CCD capta os reflexos gerados pelos pulsos de luz do laser nas partículas traçadoras, enquanto o sincronizador tem a função de sincronizar esta emissão de pulsos e a captação de imagens pela

câmera. O sistema PIV utilizado é capaz de adquirir pares de imagens com frequência máxima de 4 Hz, com a precisão desejada. Os resultados da captura das imagens podem ser visualizados no software gerenciador.

A seguir será apresentada uma breve descrição de algumas informações e características técnicas relevantes do PIV. Mais detalhes podem ser vistos no ANEXO I.

3.2.1 Fonte de luz

Para a realização dos experimentos deste trabalho foram utilizados dois lasers independentes capazes de gerar pulsos em intervalos suficientemente próximos. A Figura 18 mostra equipamento utilizado: um laser do tipo Nd:YAG Q-Switched de dupla cavidade da marca Quantel, que emite em um comprimento de onda de $\lambda = 532$ nm, de luz verde, com energia de 2 x 130 mJ, por pares de pulso, com uma frequência máxima de pulso de 15 Hz.

Buscando equilíbrio na potência do laser, que em excesso gera reflexos e saturação na imagem, e quando escassa não é suficiente para fazer a distinção entre os elementos no escoamento, fixa-se uma faixa de trabalho entre 65% e 75% da potência máxima.



Figura 18 – Laser Nd:YAG utilizado para gerar os pulsos de luz

3.2.2 Conjunto de lentes

Com a utilização da fonte de luz do tipo laser é esperado que o plano de laser gerado tenha uma pequena espessura. O ajuste da espessura da luz do laser pode variar entre 0,5 mm e 2,5 mm e é realizado ao girar o anel de foco que separa as duas lentes esféricas que são previamente

montadas em um arranjo fixo. A alteração da distância de separação entre as lentes altera o comprimento focal do plano de laser, isto é, para uma separação curta tem-se, aproximadamente, $f = 2000$ mm e para uma separação longa tem-se, aproximadamente, $f = 300$ mm, como pode ser observado na Figura 19.

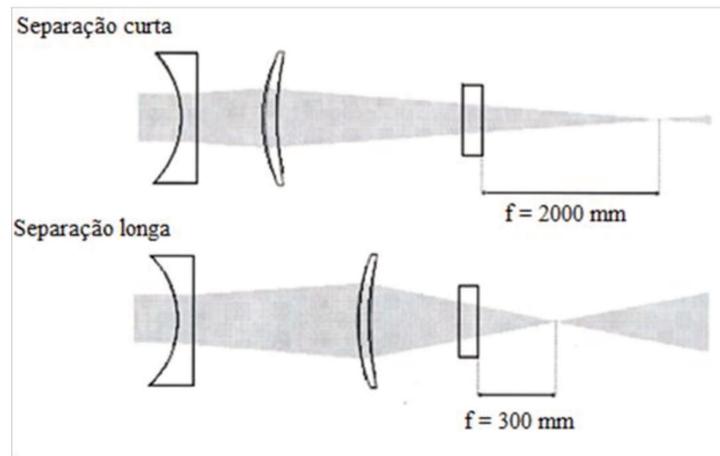


Figura 19 – Disposição do conjunto de lentes do laser. [Fonte: LaVision (2009b)]

3.2.3 Câmera

O modelo de câmera utilizado foi ImagerProX4M, 2112 pixels x 2072 pixels (mas o que é efetivamente gravado para o campo PIV é um pouco menor, 2048 pixels x 2048 pixels), com saída digital de 14 bit, 14 *frames*/segundo, com um sensor de imagens CCD, veja Figura 20.



Figura 20 – Câmera ImagerProX4M

Um conjunto de lentes Nikon Micro Nikkor com distância focal de 60 mm é utilizado junto com a câmera. Nos testes realizados neste trabalho, foi escolhida aquisição por quadro duplo (em inglês, *'double frame'*), isto é, os disparos dos pulsos de laser geram um par de imagens que, posteriormente, originam o campo de deslocamento provável das partículas no escoamento. Ver ANEXO I para maiores detalhes.

A distância da câmera até o experimento deve ser tal que na imagem obtida seja registrado todo o campo de interesse. Após estes preparativos, deve-se regular o foco da câmera de modo que haja sempre um bom contraste e uma boa visualização dos traçadores.

3.2.4 Sincronizador

O sistema de sincronização PTU (em inglês, *'Programmable Timing Unit'*) – Versão 9 da empresa LaVision é utilizado para a geração de padrões de pulsos sincronizados (câmera e laser) com alta precisão no tempo. O intervalo entre os pulsos é programável através do software Davis de acordo com a aplicação, com os hardwares conectados (laser, câmera, etc), com a velocidade de escoamento, com o tamanho da área de interrogação e com as configurações de usuário desejadas. O sistema PTU possui 16 canais de saída e 3 canais de entrada e resolução de 10 ns.

3.2.5 Traçadores

Na descrição realizada no ANEXO I foi exposta a necessidade de se utilizar partículas traçadoras passivas, ou seja, partículas que acompanham o escoamento sem perturbá-lo. Além disso, existe a necessidade de partículas que tenham as propriedades óticas adequadas à iluminação pelo plano laser e cujos reflexos sejam captados pela câmera. Foram utilizadas as impurezas presentes na água como traçadores para o sistema de medição PIV e quando estas impurezas não eram suficientes para a obtenção de boas imagens, adicionavam-se traçadores compostos de micro-esferas ocas de vidro (diâmetro de, aproximadamente, 10 μm e S.G. de 1.05), que garantiu a melhoria da qualidade das imagens, desde que em quantidade adequada.

3.2.6 Outros componentes

O sistema de medição PIV inclui dispositivos que auxiliam e tornam a medição do campo de velocidades uma tarefa mais simples.

O PIV foi montado sobre um suporte de aço que garantiu o alinhamento e o nivelamento do dispositivo em relação à seção de testes. Alguns elementos mecânicos foram utilizados para auxiliar a regulagem do posicionamento da câmera e do laser: os trilhos de translação e o suporte do laser e da câmera. Os trilhos de translação têm a função de regular o deslocamento da câmera e do laser nas direções transversal e longitudinal no canal e garantem um alto nível de reprodutibilidade na seção de interesse. A disposição dos trilhos de translação utilizada no trabalho pode ser observada na Figura 21.

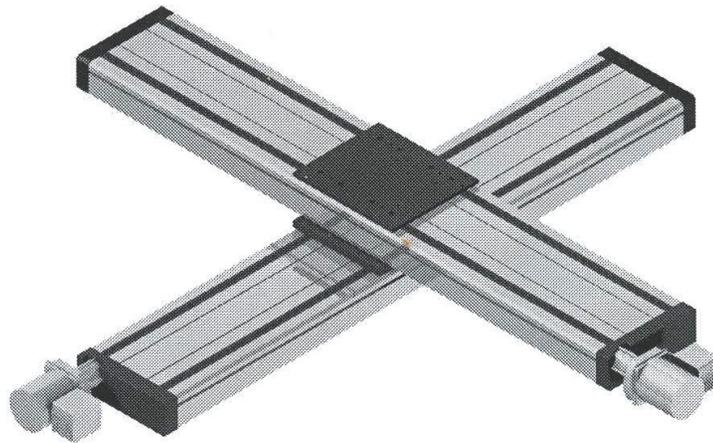


Figura 21 - Arranjo dos estágios de translação (LaVision, 2009c)

Este tipo de arranjo permite que a movimentação se dê em 2 eixos (2-D), através de um motor elétrico e, assim, tanto o laser quanto a câmera podem se movimentar simultaneamente nas direções transversal e longitudinal. O suporte do laser e da câmera consiste em um único elemento que faz com que o posicionamento da câmera seja dependente do posicionamento do laser e, para garantir que o alinhamento do laser em relação à seção de testes seja sempre mantido existem reguladores manuais de posição no suporte.

A Figura 22 esquematiza a disposição do laser e da câmera em relação a seção de testes e também mostra que existe uma dependência entre os movimentos longitudinal e transversal. O movimento nos trilhos de translação pode ser realizado em um total de 500 mm com um passo de, no mínimo, 5 mm e é diretamente controlado através do *Software Davis*. É possível realizar também o deslocamento no terceiro eixo de forma manual, sem a utilização de mecanismo automático para a movimentação.

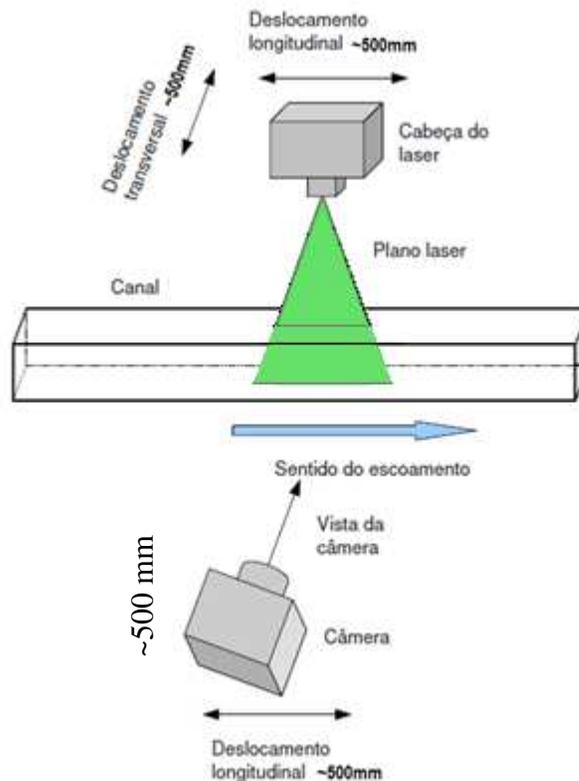


Figura 22 - Disposição do laser e da câmera em relação a seção de testes

O *software Davis*, além de controlar o mecanismo de translação e comandar o sincronizador, a câmera e o laser, também desempenha um papel importante para o processamento das imagens. Garante que as imagens vinculadas, como por exemplo, um par de imagens do PIV sejam salvas automaticamente, de modo que sua apresentação dentro do próprio software se dê em forma de arquivo único, facilitando a manipulação de dados e a organização. Também disponibiliza a escolha do número de imagens que se deseja em cada ensaio.

Existem ainda elementos de auxílio que são conectados ao laser para garantir a sua refrigeração, como é o caso da unidade de resfriamento do laser.

3.2.7 Preparação do equipamento PIV

Uma estrutura semelhante a uma barraca de praia revestida com um tecido escuro (veja Figura 23), constituída de fibras sintéticas Thermex T resistentes ao fogo, foi utilizada como câmara escura com as funções de: (i) assegurar a obtenção de imagens com bom contraste entre as partículas traçadoras e o fluido em escoamento e (ii) proteger o ambiente externo da luz laser quando em operação. A câmara é posicionada na seção de testes, enquanto o comprimento de entrada do canal e o laboratório permanecem iluminados. Na seção de testes, as partículas traçadoras são as únicas que devem apresentar brilho durante o disparo dos pulsos de laser; o restante do canal deve permanecer sem luz. Isto é fundamental para a obtenção de imagens com boa qualidade pela câmera, uma vez que o PIV é baseado em correlações de tons de cinza entre as imagens obtidas.



Figura 23 - Câmara escura em torno da seção de testes para realizar os ensaios com o PIV

A primeira etapa que antecede a realização dos testes é o alinhamento do laser com a seção de testes. Para isto, o conjunto laser/câmera é movido nos trilhos de translação até a posição

desejada. Uma vez na região de testes, deve-se ajustar a espessura do laser e alinhar este feixe com as direções longitudinal e transversal. Estes cuidados são importantes, pois na realização dos ensaios o laser sempre deverá ficar posicionado no plano central da seção de testes e a câmera deverá estar perpendicular ao laser e alinhada longitudinalmente, de forma que a visualização da seção de testes seja completa e nítida. É importante destacar a importância deste alinhamento entre laser e canal, pois as medições do trabalho são sensíveis a quaisquer desvios deste plano em relação ao escoamento, uma vez que a espessura do plano de luz gerado pelo laser é muito pequena, da ordem de 1 mm. Em caso de desvios, as medidas serão realizadas em um plano que não é longitudinal em relação ao escoamento, prejudicando os resultados.

Também como preparação do equipamento PIV, tem-se: a adição de traçadores pois em excesso podem provocar a saturação das imagens; a potência do laser, como dito anteriormente, deve ser regulada conforme o número de partículas visualizadas no campo e com o intuito de melhorar a qualidade das imagens deve ser ajustada adequadamente. A Figura 24 a) exibe um par de imagens instantâneas obtido pelo equipamento de medição PIV durante o escoamento em leito fixo com granulometria média de $360 \mu\text{m}$ com uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e a Figura 24 b) exibe o detalhe indicado do mesmo par de imagens.

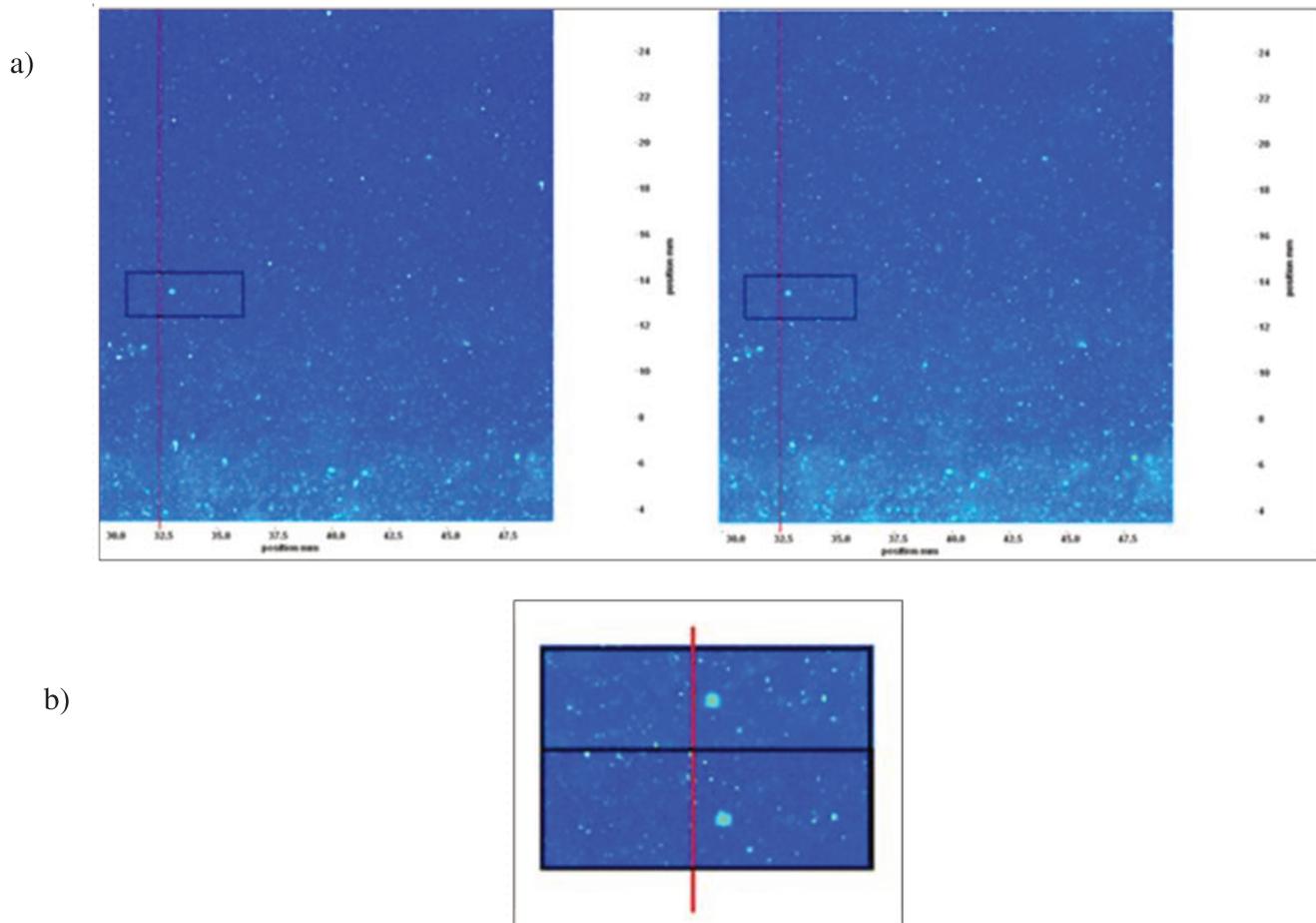


Figura 24 – a) Par de imagens obtido através do equipamento PIV durante o escoamento em leito fixo para uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ com granulometria de $360 \mu\text{m}$; b) detalhe mostrando a partícula em movimento relativamente a reta de referência.

A regulagem do intervalo de tempo entre a captura de duas imagens consecutivas é importante, pois delimita o deslocamento de cada partícula entre uma imagem e outra, possibilitando o cálculo adequado das velocidades instantâneas. Um intervalo de tempo grande pode fazer com que os traçadores ultrapassem as zonas de interrogação gerando assim uma associação errônea do provável deslocamento deste grupo de traçadores e, conseqüentemente, um vetor falso de velocidade. Um intervalo de tempo pequeno pode diminuir a precisão para a obtenção dos vetores de velocidades. Durante o processamento das imagens, o tamanho das zonas de interrogação que o software *Davis* utiliza para o cálculo do campo de velocidades deve ser

adequado ao intervalo de tempo utilizado. Em princípio, quanto menor a zona de interrogação, maior o refinamento e, conseqüentemente, melhor a definição do campo de velocidades. Porém, deve-se ter cuidado para não reduzir muito a área de interrogação, de modo que a redução seja muito pequena em relação ao intervalo de tempo utilizado, ou chegar à ordem de precisão da imagem, ou seja, do pixel, o que acarreta em erros nos cálculos das inter-correlações.

Para a obtenção dos campos vetoriais instantâneos de velocidade foi utilizada uma malha com resolução de 8 x 8 pixels com 50% de *overlap*. Com uma zona de interrogação de 8 x 8 pixels, foi possível regular o intervalo de tempo para se obter um vetor de deslocamento de 5 pixels. Na prática, as imagens capturadas e transmitidas ao software *Davis* possuem um campo de 80 mm x 80 mm para testes realizados com leito fixo (note que na direção transversal, apenas 50 mm correspondem à altura do canal), e 70 mm x 70 mm para os testes realizados com leito móvel (novamente, apenas 50 mm na direção transversal correspondem à altura do canal).

Dada a área de interrogação utilizada, de 8 x 8 pixels, e a resolução da câmera, de 2048 pixels, tem-se 256 zonas de interrogação de 0,28 mm x 0,28 mm. Como os cálculos utilizam 50% de *overlap*, o número de zonas de interrogação aumentam para 512 e a resolução final se torna 0,14 mm x 0,14 mm.

3.2.8 Análise de imagens

Depois de concluídas as etapas de captura dos pares de imagens e de processamento para a obtenção dos campos vetoriais instantâneos de velocidade, a atenção se concentra nas características dos vetores que compõem o campo, tais como magnitude e direção. A aplicação de filtros é determinante como procedimento para se obter resultados mais coerentes e que caracterizem fielmente o escoamento, sendo este procedimento também realizado pelo software *Davis*. Para a determinação dos valores que serão utilizados nos filtros deve-se realizar uma análise dos vetores que possuem comportamento discrepante com relação a seus vizinhos e observar seus valores dimensionais. O software *Davis* também permite que espaços vazios obtidos nos campos de escoamento sejam preenchidos através de interpolação.

3.2.8.1 Filtros vetoriais

O software *Davis* permite a escolha do tipo de filtro que se deseja utilizar e também o valor que se deseja aplicar. Estes filtros podem ser escolhidos, em *pixel* ou em m/s, e devem ser aplicados baseados nos valores obtidos do campo vetorial de velocidades instantâneas.

A partir da velocidade de escoamento e da área de interrogação desejada para o processamento dos dados determina-se o intervalo de tempo entre os pares de imagens. Este intervalo de tempo possui correspondência com o valor de deslocamento das partículas traçadoras no escoamento. No trabalho, cada vazão foi ajustada de modo que este intervalo de tempo correspondesse a um deslocamento máximo das partículas traçadoras de, aproximadamente, 5 pixels. Assim, o filtro aplicado baseado na dimensão do vetor garante o escoamento dentro da faixa de aceitação (5 pixels). Para determinar quais são os vetores que estão na faixa admissível para os eixos x e y, o software *Davis* permite estabelecer um valor central e a variação em torno deste valor. No trabalho, foi determinado que é permissível vetores no eixo x com magnitude de 3 pixels e variação em torno deste valor de 3 pixels, para mais ou para menos, e no eixo y, é permissível magnitude de 0 pixel e uma variação de 2 pixels em torno deste valor.

A partir dos campos vetoriais instantâneos de velocidade é possível analisar o comportamento do escoamento e observar a existência de vetores espúrios. Para interceder, a alternativa encontrada é aplicar um filtro mediano, que remove e substitui iterativamente os valores que estão discrepantes em relação à vizinhança ou que não se apresentem dentro da faixa desejada. Foi determinado no trabalho que os vetores que possuem sua magnitude 1,6 vezes superior em relação à mediana daqueles que o circundam devem ser eliminados. E para vetores que se apresentem com magnitude até 5 vezes maior em relação à mediana daqueles que o circundam, devem ser interpolados e re-inseridos.

Outra ferramenta capaz de auxiliar na eliminação de vetores originados de reflexos é a implementação, no software *Matlab*, de um código computacional com função de filtro na etapa de pós-processamento. A utilização deste código se dá no momento de obtenção do perfil de velocidades média, coluna 4 da Figura 26. Com este filtro foram eliminados os vetores de velocidade média no sentido de y (V (m/s)) que tivessem tamanho maior que 0,01 m/s.

3.2.8.2 Pós-processamento das imagens

Cada ensaio experimental possui 500 pares de imagens que são analisados individualmente e após o processamento são convertidos em campos de velocidades instantâneos, conforme representação da primeira e segunda coluna na Figura 26. O pós-processamento das imagens pelo software *Davis* consiste na realização do tratamento estatístico para a obtenção do campo médio de velocidade, a partir dos campos instantâneos de velocidade. A Figura 26 mostra na terceira coluna o campo médio de velocidade obtido através da média temporal.

Como o objetivo do trabalho é avaliar a perturbação causada no líquido devido ao movimento de esferas do leito rugoso foi necessário desenvolver mais uma etapa de processamento. Um código numérico foi escrito em ambiente *Matlab* com o intuito de realizar parte deste pós-processamento: obtenção da média espacial do campo de velocidades. O perfil de velocidades médio espacial, quarta coluna da Figura 26, pode ser obtido a partir do campo de velocidades médio temporal, terceira coluna da Figura 26, fornecido pelo software *Davis* (uma matriz de quatro colunas que representam valores das velocidades (u e v) em suas respectivas coordenadas (x e y)), uma vez que o escoamento é totalmente desenvolvido.

A região logarítmica de cada um dos perfis de velocidade também é obtida através do pós-processamento em *Matlab*, veja quinta coluna da Figura 26. Sabendo que a região logarítmica abrange a camada intermediária (*overlap layer*) do escoamento, deve-se inserir no código numérico desenvolvido no software *Matlab*, para cada uma das vazões trabalhadas, a faixa de y^+ dos resultados experimentais que melhor representa a lei logarítmica. A escolha adequada destes valores deve ser cuidadosa, uma vez que a faixa escolhida será utilizada na determinação de outros resultados, como por exemplo, a constante B da equação (2.17), a rugosidade aparente do leito, y_0 , e a velocidade de atrito, u^* .

Para facilitar a manipulação das variáveis no código numérico desenvolvido, a equação (2.22) foi reescrita como:

$$u = \frac{u^*}{k} \ln(y) - \frac{u^*}{k} \ln(y_0), \quad (3.4)$$

onde, para um dado escoamento, pode-se identificar as constantes $A = \frac{u^*}{\kappa}$ e $C = \frac{u^*}{\kappa} \ln(y_0)$. Assim, tem-se a equação:

$$u = A \ln(y) - C. \quad (3.5)$$

Quando em escala semi-logarítmica, a inclinação da equação (3.5) é proporcional a u^* e a intersecção entre a equação (3.5) e o eixo $u = 0$ fornece o valor de y_0 (de acordo com a Figura 25). Os dados experimentais foram, então, ajustados de acordo com a equação (3.4) e o valor de B foi obtido a partir equação (2.22):

$$B = -\frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{u^* y_0}{\nu}\right). \quad (3.6)$$

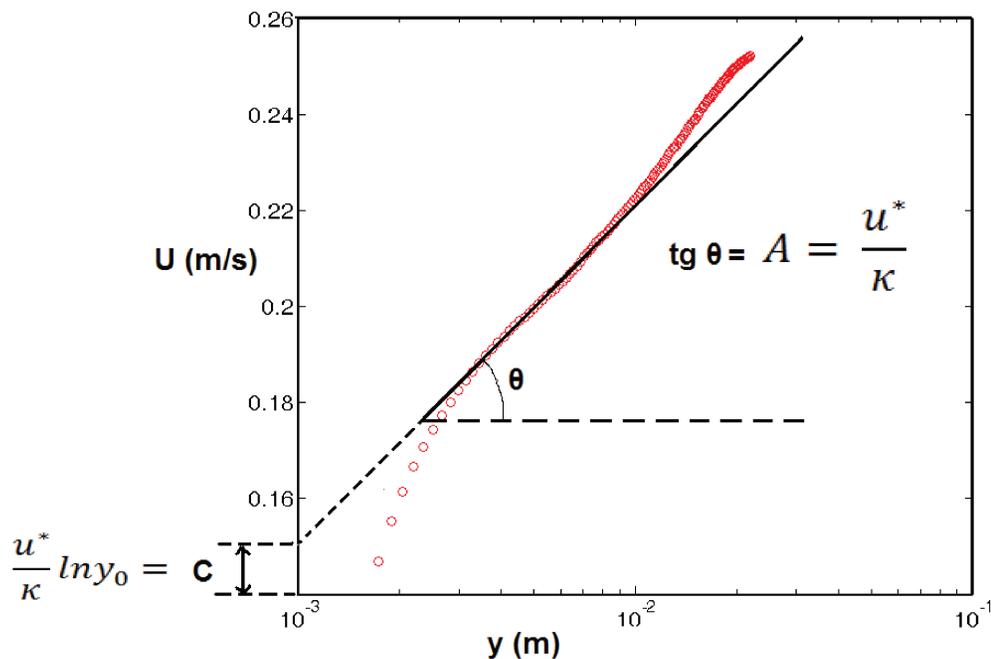


Figura 25 – Esquema para a determinação das constantes A e C da equação (3.5)

Os valores de Re^* foram computados e verificou-se que para todas as vazões de escoamento o regime de escoamento obtido foi hidraulicamente liso (ou início da transição). Dado este regime e sendo escoamento sobre leito fixo, os parâmetros foram obtidos através do ajuste dos perfis de velocidade até a obtenção de $B = 5,5$. Este parâmetro é conhecido para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso, tornando-se uma referência. Assim, para a determinação da constante B , da rugosidade aparente do leito, y_0 , e da velocidade de atrito, u^* , é necessário um processamento iterativo: o programa exige, dentre outros parâmetros de entrada (y_{min} , y_{max} , Δy , que serão explicados na seção 3.3.5), que a região pertencente a lei logarítmica seja estabelecida. Para isto é necessário que um valor de entrada para y^+ ou u^+ seja inserido, porém sabe-se que estes parâmetros são dependentes da velocidade de atrito u^* e até o momento a velocidade de atrito u^* também é uma incógnita. Assim, este impasse é solucionado calculando a velocidade de atrito a partir de um ‘chute inicial’ fornecido pela equação (2.27) de Blasius. O valor obtido é substituído nos procedimentos descritos anteriormente até a determinação da constante $B = 5,5$ (leito fixo em regime hidraulicamente liso).

Rotinas de cálculos desenvolvidos no *software Matlab* viabilizaram ajustes e a construção de gráficos e tabelas permitindo a comparação dos comportamentos obtidos em leito granular móvel e fixo, como perfis de velocidade média linear e logarítmica e coeficientes de atrito.

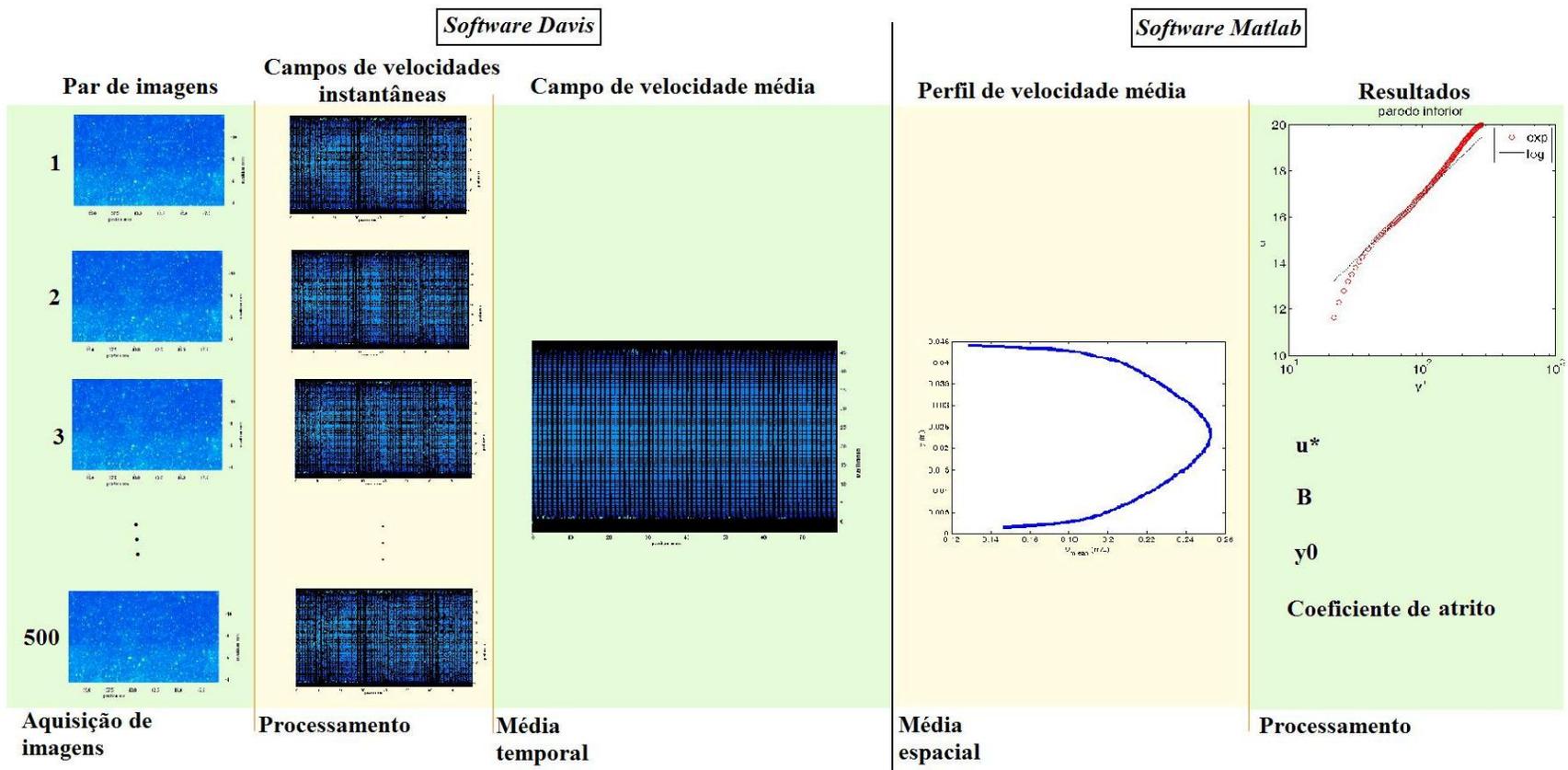


Figura 26 – Diagrama esquematizando as etapas percorridas para a obtenção dos resultados

3.3 Procedimento Experimental

Os procedimentos utilizados para a captura, processamento e o pós-processamento das imagens para os leitos ensaiados, fixo e móvel, estão descritos nesta seção.

3.3.1 Testes preliminares

Os testes preliminares têm como objetivo garantir que os procedimentos experimentais estão corretos assegurando que os resultados sejam válidos. Nesta etapa do trabalho foi analisado um escoamento sobre uma parede lisa: a região inferior do canal foi mantida livre de material granular, ou seja, o escoamento se deu sobre o próprio acrílico constituinte do canal, como pode ser observado na Figura 27.



Figura 27 – Seção de testes com leito liso

Neste leito liso, foram ensaiadas vazões de 7,5 m³/h e 10 m³/h em regime permanente e para cada uma destas vazões foram capturados 300 pares de imagens em cinco diferentes planos: plano central, referenciado como 0 mm; duas posições deslocando para o sentido positivo a partir da referencia, 26,7 mm e 53,4 mm; duas posições deslocando para o sentido negativo a partir da referencia, -26,7 mm e -53,4 mm. Veja a representação esquemática na Figura 28. O novo posicionamento da câmera em relação à seção de testes pode ter contribuído para a obtenção de reflexos da parede do canal. Os perfis de velocidade média para as posições 26,7 mm, 53,4 mm e

-53,4 mm apresentaram resultados distorcidos e assim somente foram analisados os resultados para duas medidas, 0 mm e -26,7 mm.

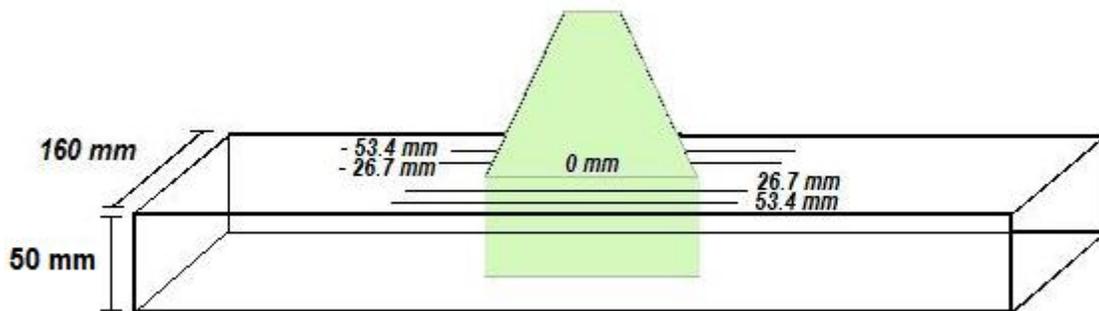


Figura 28 – Planos de simetria inicialmente pretendidos nos testes preliminares

Sabendo que é a partir do perfil de velocidade média do escoamento que se obtém a velocidade média do escoamento \bar{U} e, conseqüentemente, a vazão real de escoamento (este procedimento é descrito na seção 3.3.2), são exibidos na Figura 29 e na Figura 30 os perfis de velocidade média adimensionalizados a partir de escalas externas (no eixo y: altura interna do canal H , onde de fato ocorre o escoamento; no eixo x: a velocidade máxima de escoamento U_{max}) para as vazões de 7,5 m³/h e 10 m³/h, respectivamente, obtidas para a posição referenciada como 0 mm (linha contínua) e -26,7 mm (linha tracejada).

Calculando as vazões reais (obtidas a partir da integração do perfil de velocidades multiplicada pela largura do canal), foi obtido para a vazão proposta de 7,5 m³/h, vazões médias de 7,9 m³/h e 7,5 m³/h para, respectivamente, as posições de 0 mm e -26,7 mm. Já para a vazão proposta de 10 m³/h, foram obtidas vazões médias de 10,6 m³/h e 10 m³/h para, respectivamente, as posições de 0 mm e -26,7 mm.

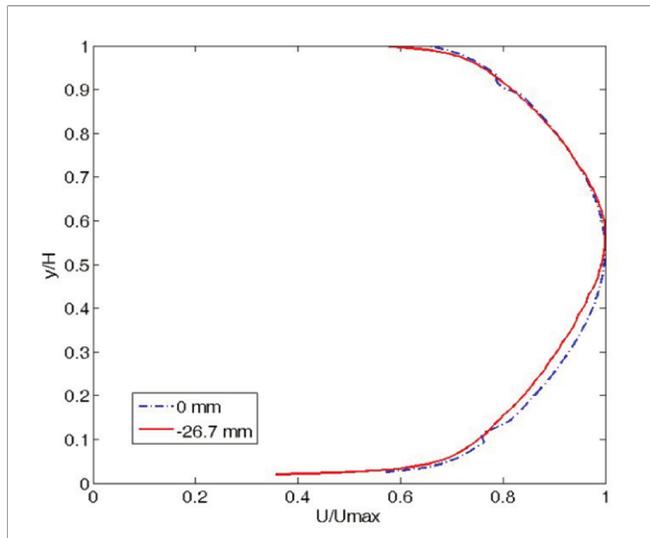


Figura 29 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas externas para a vazão de, aproximadamente, 7,5 m³/h nas posições de 0 mm e -26,7 mm

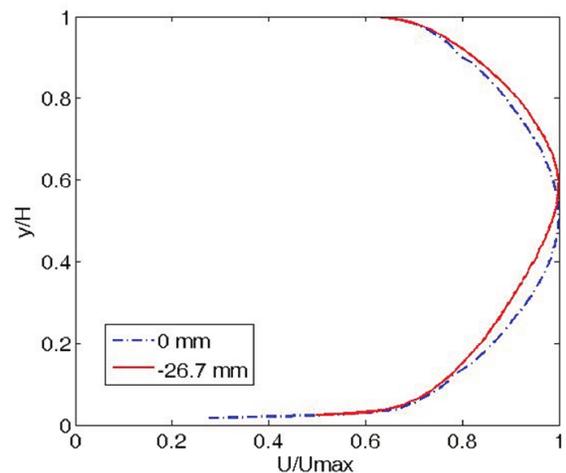


Figura 30 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas externas para a vazão de, aproximadamente, 10 m³/h nas posições de 0 mm e -26,7 mm

O comportamento dos perfis de velocidade se mostrou distinto para cada vazão: na Figura 29, vazão de 7,5 m³/h, os perfis mostrados para as posições 0 mm e -26,7 mm se mostraram praticamente coincidentes, enquanto os perfis obtidos para as mesmas posições com vazão de 10 m³/h, Figura 30, isto não foi verificado. Mesmo que cada posição apresente diferença na vazão real, a assimetria do perfil de velocidade para a posição -26,7 mm não era esperada. A origem deste comportamento distinto se deve, provavelmente, a combinação de alguns fatores: mudança de foco devido a alteração do plano de medida, mudança da calibração do PIV para estes ensaios e até mesmo problemas com reflexos parasitas na seção de testes durante a aquisição das imagens.

Pode-se observar ainda que os perfis de velocidade para o plano de medida 0 mm apresentam distorções nas regiões $0,1 < y/H < 0,2$ e $0,85 < y/H < 0,95$ para as duas vazões. Isto pode ter ocorrido devido ao reflexo da parede de acrílico durante a aquisição das imagens. Optou-se por deixar os dados brutos, sem omissão e/ou aproximação dos resultados, para mostrar que o reflexo

nesta região do canal pode aparecer até mesmo para ensaios realizados sem a presença de leito rugoso.

As diferenças encontradas na vazão são refletidas na velocidade média de escoamento \bar{U} , na velocidade máxima de escoamento U_{max} e no número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico Re_h , como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Dados gerais (Q_{real} , V , V_{max} e Re_h) relativos ao escoamento para os planos de simetria de 0 mm e -26,7 mm

$Q_{medidor}$ (m ³ /h)	Plano de medida	\bar{U} (m/s)	U_{max} (m/s)	Re_h
7,5	0 mm	0,28	0,32	$2,73 \cdot 10^4$
	-26,7 mm	0,26	0,31	$2,59 \cdot 10^4$
10	0 mm	0,37	0,42	$3,67 \cdot 10^4$
	-26,7mm	0,35	0,40	$3,49 \cdot 10^4$

A diferença obtida entre os planos de medida para a velocidade média e para a velocidade máxima se refletiram na assimetria apresentada na Figura 29 e na Figura 30. Esta diferença de 0,01 m/s para 7,5 m³/h e 0,02 m/s para 10 m³/h entre os planos de medida podem ter ocorrido devido a problemas com reflexo e/ou erros sistemáticos durante a captura das imagens.

O perfil de velocidade para escoamento turbulento em um tubo liso pode ser representado pela equação de lei de potência:

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(1 - \frac{(25-y)}{25}\right)^{1/n}, \quad (3.7)$$

onde o expoente n , varia com o número de Reynolds e o número 25 representa a medida em milímetros da metade da altura do canal (50 mm). A partir da equação (3.7), foi determinado iterativamente que o valor do expoente n que melhor expressa os perfis de velocidade para as vazões de 7,5 m³/h e 10 m³/h é 6. A Figura 31 e a Figura 32 mostram, respectivamente, o

comportamento da equação (3.7), linha contínua, comparativamente ao perfil de velocidade médio, símbolo *, para a vazão de 7,5 m³/h e 10 m³/h para a posição 0 mm.

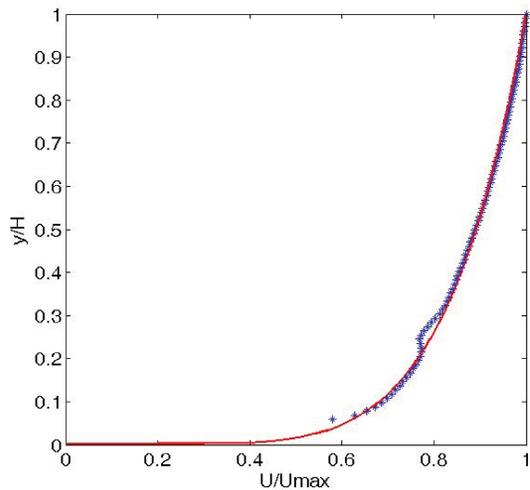


Figura 31 – Perfil de velocidades médio (símbolo *) e perfil de velocidade pela equação de lei da potência (linha contínua) para a vazão de 7,5 m³/h e posição 0 mm.

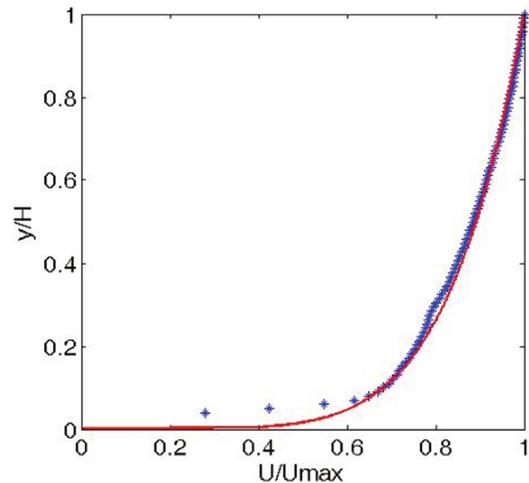


Figura 32 - Perfil de velocidades médio (símbolo *) e perfil de velocidade pela equação de lei da potência (linha contínua) para a vazão de 10 m³/h e posição 0 mm.

Dos perfis de velocidade obtidos pela equação de lei da potência, Figura 31 e Figura 32, observa-se que o expoente $n = 6$ se ajustou ao perfil de velocidades. Isto era esperado conforme os dados obtidos por Kraus (1978) que sugerem a variação do expoente n da lei de potência com o número de Reynolds, quando $Re > 2 \cdot 10^4$, para escoamentos desenvolvidos em tubos lisos conforme mostrado pela equação (3.8). Para uma faixa de número de Reynolds de $3,7 \cdot 10^4 < Re_h < 2,8 \cdot 10^4$, que corresponde as vazões utilizadas neste teste preliminar (7,5 m³/h e 10 m³/h), foi obtido $6,3 < n < 6,5$.

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re. \quad (3.8)$$

Ainda pode-se observar na Figura 31 e na Figura 32 a existência de distorções na região inferior do perfil de velocidades para as duas vazões. Estas distorções são as mesmas observadas na Figura 29 e na Figura 30 e são geradas pelo reflexo da parede de acrílico durante a aquisição das imagens pelo PIV. Apesar da lei da potência se afastar dos pontos experimentais obtidos nesta região, os demais resultados se aproximam da lei da potência como dito.

Os perfis de velocidade média adimensionalizados a partir de escalas internas (a velocidade média é normalizada pela velocidade de cisalhamento, $u^+ = u/u_*$, e a distância é normalizada pelo comprimento viscoso, $y^+ = yu_*/\nu$), obtidos para as posições de 0 mm e -26,7 mm, são mostrados na Figura 33 para a vazão de 7,5 m³/h e na Figura 34 para a vazão de 10 m³/h. Em ambas figuras a linha contínua representa a lei logarítmica, expressa pela equação (2.16) do capítulo 2.

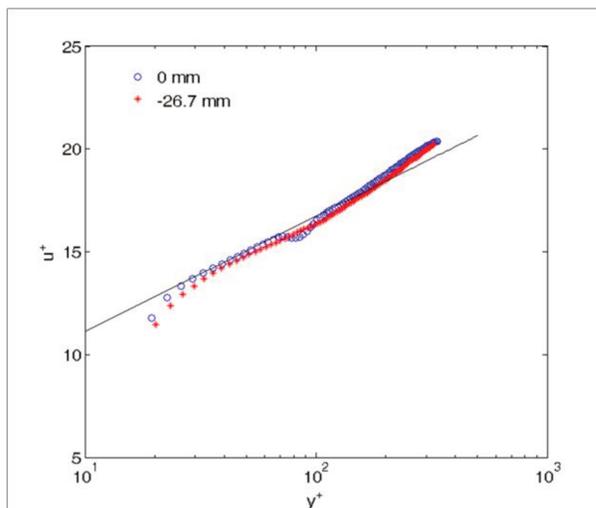


Figura 33 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas internas para a vazão de, aproximadamente, 7,5 m³/h nas posições de 0 mm e -26,7 mm

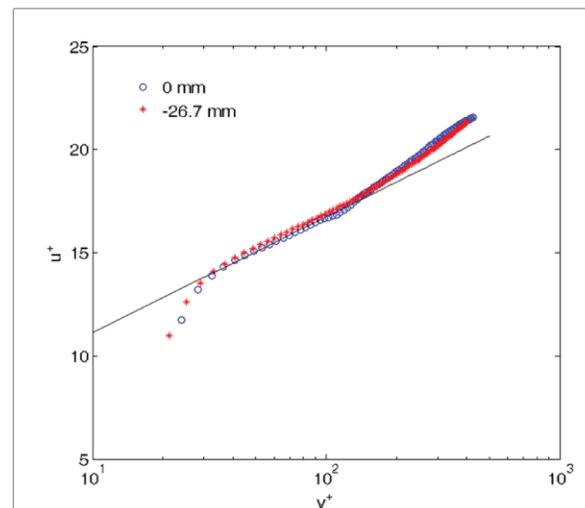


Figura 34 – Perfil de velocidade média adimensionalizado por escalas internas para a vazão de, aproximadamente, 10 m³/h nas posições de 0 mm e -26,7 mm

Os perfis logarítmicos obtidos para as vazões próximas de 7,5 m³/h (Figura 33) e 10 m³/h (Figura 34) se ajustaram bem a reta representada pela lei logarítmica. O distanciamento de alguns pontos das curvas, aproximadamente os três pontos iniciais, podem ter sido gerados a partir da perda de precisão na região mais próxima às paredes com o uso de baixas velocidades e também

devido ao reflexo do acrílico do canal. O ajuste do perfil logarítmico é importante para a obtenção do valor da constante B , da equação (2.17). Para o trabalho, este ajuste foi realizado analisando individualmente caso por caso e determinando qual região do perfil de velocidades que melhor representava a região logarítmica. A Tabela 3 mostra que o ajuste da curva logarítmica nos quatro casos propostos (posições 0 mm e -26,7 mm para as vazões de 7,5 m³/h e 10 m³/h) foi realizado para uma mesma região, $30 < y^+ < 150$, para parede inferior enquanto para parede superior a região foi alterada para a vazão de 10 m³/h, $50 < y^+ < 150$. Tanto para a parede de cima quanto para a parede de baixo os valores da constante B , da equação (2.17), se apresentaram aproximados ao valor obtido por Davidson (2004) ($B = 5,5$ e $\kappa = 0,41$). Os procedimentos para a obtenção destes dados estão mostrados na seção 3.3.5.

Tabela 3 - Parâmetros y^+ , B e B_{sup} para os planos de simetria de 0 mm e -26,7 mm

Q_{med} (m ³ /h)	Plano de medida	y^+	y_{sup}^+	B	B_{sup}
7,5	0 mm	$30 < y^+ < 15$	$30 < y^+ < 150$	5,3	5,6
	-26,7 mm	0		5,2	5,3
10	0 mm	$30 < y^+ < 15$	$50 < y^+ < 150$	5,5	5,1
	-26,7 mm	0		5,7	5,4

Sabendo que o teste preliminar está no regime hidraulicamente liso, é possível realizar a análise do fator de atrito através da equação de Blasius, equação (2.25). O fator de atrito experimental também pode ser obtido, equação (3.9), uma vez que através do perfil de velocidade se obtém a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento:

$$f = 8 \frac{u^{*2}}{\bar{u}^2} \quad (3.9)$$

Os resultados obtidos experimentalmente, para a parede superior e inferior do canal, e através da equação de Blasius são mostrados na Tabela 4. A diferença entre os valores calculados através de Blasius e obtidos experimentalmente também são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores do fator de atrito de Darcy obtidos experimentalmente, para a parede inferior e superior, e calculados através da equação de Blasius

Q_{med} (m ³ /h)	Plano de medida (mm)	Experimental				Blasius		Diferença entre Blasius e Experimental (%)			
		u^* (m/s)	u^*_{sup} (m/s)	f	f_{sup}	u^* (m/s)	f	u^* (m/s)	u^*_{sup} (m/s)	f	f_{sup}
7,5	0	0,0155	0,0156	0,0245	0,0248	0,0155	0,0246	0	0	0	1
	-26,7	0,0147	0,0153	0,0256	0,0277	0,0145	0,0249	1	5	2	11
10	0	0,0195	0,0199	0,0222	0,0231	0,0198	0,0228	1	1	3	1
	-26,7	0,0184	0,0197	0,0221	0,0253	0,0188	0,0231	2	4	5	9

O escoamento com vazão de 7,5 m³/h na posição de -26,7 mm obteve a maior diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os calculados através de Blasius, 11% para a parede superior e 2% para a parede inferior, para o coeficiente de atrito e para a velocidade de atrito, 1% para a parede inferior e 5% para a parede superior. As demais medidas mostraram que tanto a parede inferior quanto a parede superior obtiveram resultados próximos aos valores calculados através de Blasius, apresentando diferença menor que 9%. Assim, os melhores resultados são os obtidos com 0 mm, uma vez que para a posição de -26,7 mm houve uma maior assimetria entre os perfis de velocidade (que, por sua vez, podem ter origem em reflexo parasita). A obtenção de resultados aproximados aos valores obtidos pela literatura garante a validação do canal e possibilita o estudo de casos até então desconhecidos, como é o tema do trabalho.

3.3.2 Preparação dos ensaios para operar com leitos fixo e móvel

Para a realização do ensaio sobre leito rugoso fixo, placas de PVC com esferas de vidro coladas sobre sua superfície foram introduzidas no canal uma ao lado da outra cobrindo toda a extensão que vai desde o início do canal até o fim da seção de testes, veja seção 3.1.2.

Para a realização do ensaio sobre leito rugoso móvel, as mesmas placas que constituíam o leito rugoso fixo foram inseridas desde o início do canal até o início da seção de testes. Na seção de testes, ao invés de placas, foi colocada uma camada de esferas de vidro “soltas” de granulometria equivalente a das placas.

Para os ensaios em leito fixo variou-se a vazão de água de 2,5 m³/h até 10 m³/h, acrescentando-se de 0,5 m³/h. Para cada vazão, foram capturados 500 pares de imagens através do software Davis. O principal intuito da captura de pares de imagens para uma ampla faixa de vazão no teste com leito rugoso fixo é a obtenção de um banco de dados capaz de servir como base de comparação para a avaliação dos efeitos que um leito móvel de grãos tem sobre o escoamento do líquido.

A determinação do início da captura das imagens para o ensaio sobre leito rugoso móvel depende do limite de mobilização dos grãos, sendo necessária a aplicação de uma crescente vazão de água no escoamento até ser possível a observação visual do início do movimento dos grãos. O início do movimento dos grãos no leito foi observado a partir da utilização da vazão de 5 m³/h. A vazão máxima que será imposta no ensaio é determinada a partir da formação de dunas na superfície do leito móvel.

Para escoamentos longe do limite de mobilidade onde os efeitos da compactação das partículas (em inglês, ‘*armouring*’) são menos sentidos, espera-se que haja repetibilidade dos ensaios. Entretanto, quando se trabalha no limite de mobilidade do leito, os efeitos do ‘*armouring*’ influenciam significativamente nos resultados, como será visto. Assim, as diferentes evoluções do leito, isto é, diferentes tipos de ‘*armouring*’ para cada ensaio particular afetam seriamente a repetibilidade.

Para garantir que o efeito da acomodação das partículas seja levado em consideração, os ensaios com leito rugoso móvel para a granulometria de 160 μm foram repetidos quatro vezes,

nomeados A, B, C e D e para a granulometria de $360 \mu m$, três vezes, nomeados E, F e G. As vazões (calculadas no pós-processamento no software *Matlab*) para as granulometrias médias de $160 \mu m$ e $360 \mu m$ para escoamento sobre leito fixo estão na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente, e para escoamento sobre leito móvel na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente. Os resultados para leito fixo estão na seção 4.2 e para leito móvel na seção 4.3.

Importante ressaltar que as vazões lidas diretamente no medidor eletromagnético de vazão e às aquelas calculadas no *Matlab* apresentam uma discordância de valores entre si que é motivada, provavelmente, pelo tempo de resposta apresentado pelo equipamento medidor eletromagnético de vazão. No momento de captura dos 500 pares de imagens para cada vazão do leito granular fixo, o medidor eletromagnético de vazão não estava dentro do período de estabilidade prevista e assim, os valores apresentaram um desvio. Para obter os valores das vazões pelo software *Matlab* foi necessário realizar a integração de cada perfil de velocidade médio na extensão da largura do canal (160 mm), ou seja, de parede a parede. Esta forma de cálculo apesar de simplificada, pois não leva em consideração a influência que a presença das paredes verticais causa no escoamento, reduzindo a velocidade naquela região, apresenta bons resultados.

A determinação de qual dado utilizar no trabalho, sabendo da existência de valores distintos entre as vazões obtidas pelo medidor eletromagnético e a obtida no pós-processamento, se baseia na confiabilidade. As vazões fornecidas pelo pós-processamento, apesar de serem calculadas adotando a hipótese de que a parede não causa influência no perfil de velocidades, descrevem o escoamento no canal de forma mais realista do que a vazão lida no medidor de fluxo. Assim, as vazões e dados que serão apresentados no trabalho serão sempre baseados nos resultados obtidos do processamento das imagens do PIV, como é o caso das velocidades médias apresentadas nas tabelas da seção 4.1. Estas velocidades foram obtidas a partir da integração do perfil de velocidade dividida pela altura do canal onde ocorre o escoamento, que só será determinada após a delimitação da correta interface leito/escoamento (para leito fixo, por exemplo, não foi utilizada a altura de 43 mm, já descontando os 7 mm da espessura das placas de PVC, pois não houve um controle rígido no processo de colagem das esferas na superfície do leito). Veja a seção 3.3.5 para mais detalhes do procedimento.

Os resultados do trabalho foram obtidos no plano central do canal e, neste plano, considera-se o perfil de velocidades tal qual um canal entre placas paralelas infinitas. Assim, para caracterizá-lo é necessária apenas a velocidade média \bar{U} obtida pelo PIV.

3.3.3 Procedimento para aquisição das imagens

A definição da quantidade de imagens que devem ser capturadas para se obter um adequado campo vetorial de velocidade média deve se basear em princípios estatísticos. Para escoamentos turbulentos em dutos, as grandezas médias convergem com um número de imagens maior que 50, mas os momentos de ordem 2 necessitam em geral de um número de imagens maior que 400 (Yang et al., 2007). Para o trabalho, foram capturados 500 pares de imagens para cada vazão estudada, seja leito granular fixo ou móvel. Além disso, existem outros cuidados (citados anteriormente na seção 3.1) que são necessários para que o perfil de velocidades medido represente de maneira fiel o escoamento: fixação da potência do laser em uma faixa adequada, entre 65% e 75%; quantidade de partículas traçadoras deve estar em um nível suficiente para não provocarem saturações indesejadas nas imagens; regulagem do intervalo de captura das imagens para cada vazão estudada, ajustada entre valores na faixa de 500 μs a 2500 μs .

3.3.4 Tratamento dos pares de imagens

As inter-correlações realizadas entre os pares de imagens são executadas pelo software *Davis*, através de correlações entre tons de cinza. Nesta técnica as regiões com presença de partículas aparecem como regiões brancas e as regiões em que as partículas estão ausentes aparecem como regiões negras. O resultado destas inter-correlações é o campo de deslocamentos mais prováveis do conjunto de partículas que irão fornecer um campo de velocidades instantâneas. A Figura 35 a) exibe o campo vetorial de velocidades instantâneas e a Figura 35 b) exibe o campo vetorial de velocidade média obtido no pós-processamento pelo software *Davis*,

para um escoamento de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ sobre leito fixo com granulometria média de $360 \mu\text{m}$. A Figura 35 a) corresponde ao campo de velocidades instantâneas do par de imagens exibido na Figura 24.

a)

b)

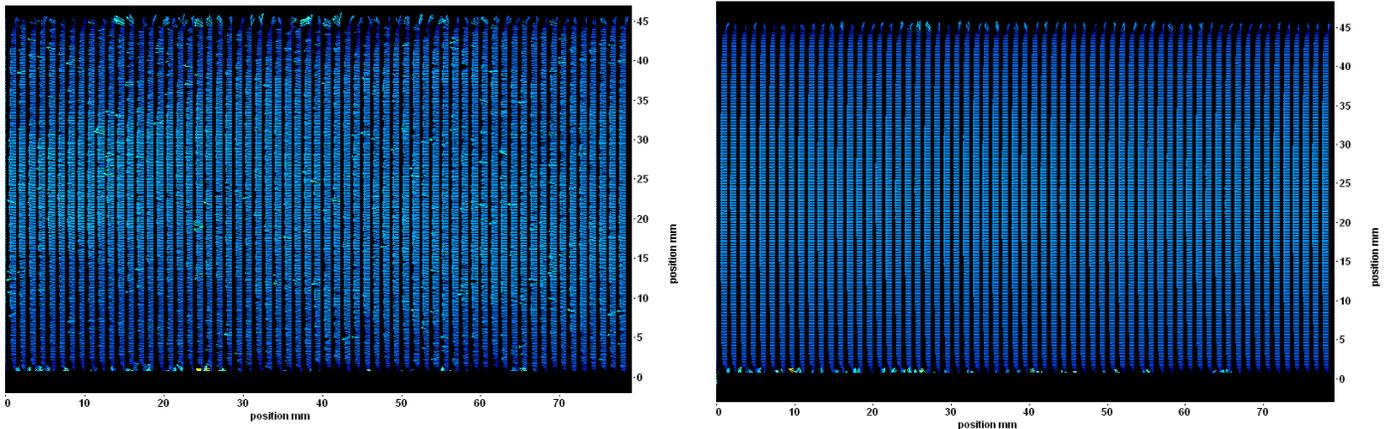


Figura 35 – Imagens obtidas pelo software Davis para o escoamento sobre leito fixo com uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$: a) Campo vetorial de velocidades instantâneas; b) Campo vetorial de velocidade média.

O software *Davis* é capaz de realizar tratamentos estatísticos e a escolha dos parâmetros a serem analisados depende dos resultados que se deseja obter. Neste trabalho, a partir do pós-processamento dos campos vetoriais de velocidade instantânea no software Davis, foi obtido o campo vetorial de velocidade média. A Figura 26 esquematiza as etapas percorridas para a obtenção dos resultados.

3.3.5 Determinação da distância de referência no leito granular

Nesta seção serão descritos os procedimentos para a determinação da posição correta da interface entre leito granular e fluido, definida como a origem do eixo y ($y = 0$), veja Figura 36. É nesta altura de referência ($y = 0$) que o perfil de velocidades médio temporal e espacial se encontra posicionado adequadamente em relação ao leito de partículas. Segundo a Figura 36, Δy

é a distância deslocada na coordenada vertical para ajustar a posição $y = 0$ adequadamente. No entanto, diversas dificuldades são encontradas para delimitar essa região.

Durante os ensaios, o software *Davis* possibilita a inserção de uma referência que será designada como a origem referencial de medidas ($x = 0$ e $y = 0$), veja Figura 36. Porém esta origem foi marcada sem precisão, através da visualização a olho nas imagens capturadas pelo PIV, e quaisquer desvios para cima ou para baixo na determinação desta referência podem alterar a distância dos vetores de velocidade em relação à parede.

No caso de leito rugoso, não há garantia que a referência $y = 0$ marcada no *Davis* coincida com o ajuste que será feito, posteriormente, no *Matlab*, uma vez que as esferas de vidro refletem a luz de laser em muitas direções, atrapalhando a identificação da altura de referência através da visualização direta das imagens e ainda pode-se afirmar que a colagem destas esferas não obedeceu a um controle rígido de altura (alguns grãos podem ter sido colados nas placas mais acima que outros, veja Figura 36). Assim, este procedimento não pode ser feito diretamente através das imagens obtidas do escoamento.

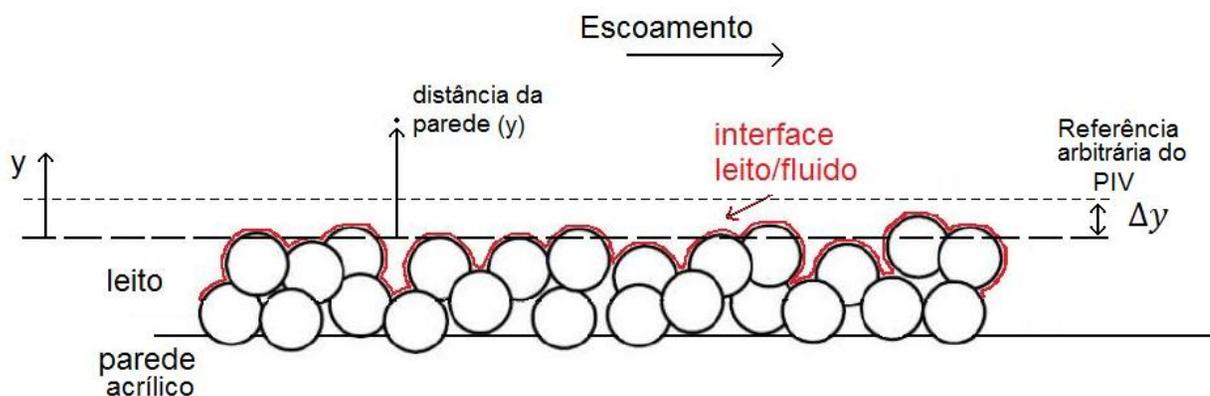


Figura 36 – Parâmetros envolvidos na determinação da origem do leito de partículas

Os procedimentos utilizados para a determinação da referência exata para o escoamento sobre leito fixo e móvel estão detalhados nas seções seguintes.

3.3.5.1 Leito fixo

O primeiro procedimento adotado para a delimitação da interface entre leito rugoso e escoamento é traçar o perfil de velocidades ($\bar{U} \times y$), que é a média espaço-temporal do campo de velocidades, para a vazão mais baixa ensaiada (para as duas granulometrias utilizou-se a vazão de, aproximadamente, 5 m³/h). Interessante ressaltar que para obter este perfil de velocidades não foi utilizado nenhum tipo de filtro e/ou procedimentos de ajustes, uma vez que a curva obtida deve conter todo o campo gerado pelo PIV. A Figura 37 mostra todo o campo gerado pelo PIV e indica os pontos que serão descartados.

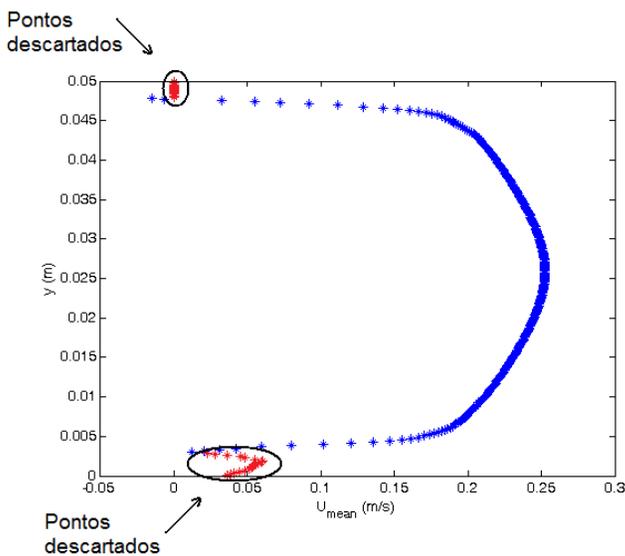


Figura 37 – Perfil de velocidades médias obtido para a vazão de 5,3 m³/h para a granulometria de 360 µm sem a utilização de filtros para os vetores.

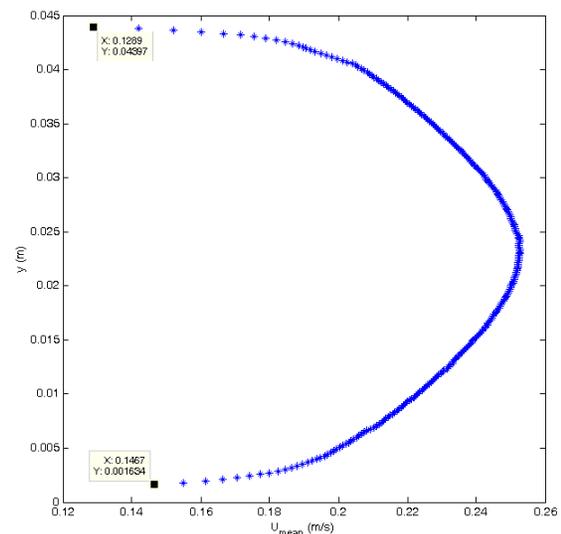


Figura 38 – Perfil de velocidades médias obtido para a vazão de 5,3 m³/h para a granulometria de 360 µm com a utilização de filtros para os vetores e a ferramenta

y_{min} e y_{max}

No perfil de velocidades da Figura 37 é possível observar todos os pontos oriundos das correlações efetuadas pelo programa *Davis*. Nele estão inclusos, além dos pontos que serão de fato utilizados para os cálculos, pontos referentes aos reflexos do canal e das esferas, que são considerados erros de medida. Estes pontos podem estar situados na região de interface entre leito granular e escoamento mas não é possível identificá-los e assim determinar a correta posição do leito.

Para determinar o deslocamento Δ_y que estabelece a origem do eixo y ($y = 0$) adota-se a hipótese que o primeiro ponto válido é aquele não nulo e não negativo, acima do leito. Na região inferior e superior da Figura 37 existem alguns pontos que não possuem velocidade nula e nem velocidade negativa, porém estão fora do padrão geral de comportamento do perfil de velocidades, logo devem ser descartados. Estes pontos serão eliminados, posteriormente, utilizando filtros e/ou ajuste do campo de escoamento, como mostra a Figura 38.

O ajuste da altura mínima (y_{min}) e da altura máxima (y_{max}) do campo do escoamento é uma ferramenta capaz de auxiliar na obtenção do perfil de velocidades. Através do ajuste destes parâmetros durante o pós-processamento das imagens, no código numérico desenvolvido para o trabalho no software *Matlab*, é possível que sejam exibidas apenas informações consideradas válidas do escoamento, retirando do campo de visão, por exemplo, vetores falsos que os filtros não eliminaram. Os valores obtidos para altura mínima (y_{min}) e para a altura máxima (y_{max}) para as duas diferentes granulometrias (diâmetro médio de $160 \mu m$ e $360 \mu m$) utilizadas no escoamento em leito rugoso fixo e móvel são mostrados, respectivamente, na Tabela 9 e na Tabela 19 do capítulo 4.

O perfil de velocidades médias ($\bar{U} \times y$) está livre de vetores indesejados, porém não se tem conhecimento se o perfil está deslocado para cima ou para baixo com relação ao referencial $y = 0$. Para auxiliar, então, a determinação da distância que primeiro ponto válido está localizado com relação ao leito de partículas foi criado, no código numérico desenvolvido no software *Matlab*, um parâmetro denominado Δ_y . O ajuste de Δ_y deve ser realizado observando o perfil de velocidades médias normalizado por escalas internas ($y^+ \times u^+$), dado pela equação ($u^+ =$

$\frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B$) (2.17) e é determinado posicionando o perfil de velocidades para cima ou para

baixo até que a constante B, da equação (2.17), alcance o valor de 5,5. Este valor da constante B é conhecido na literatura (Davidson, 2004) para escoamento em leito liso e será adotado no trabalho pois para as granulometrias utilizadas para o leito rugoso fixo foi observado o regime hidraulicamente liso ($d^+ \leq 5$).

O ajuste do Δ_y garante o deslocamento de todo o campo de dados para cima ou para baixo e, conseqüentemente, o deslocamento do perfil logarítmico para cima ou para baixo e, assim, uma determinação mais coerente, de acordo com as ferramentas e conhecimentos disponíveis neste trabalho, para o ajuste da referência. Lembrando que, quando o deslocamento do campo de interesse da coordenada y é para cima, Δ_y assume valor positivo, e quando o deslocamento é para baixo, Δ_y assume valor negativo.

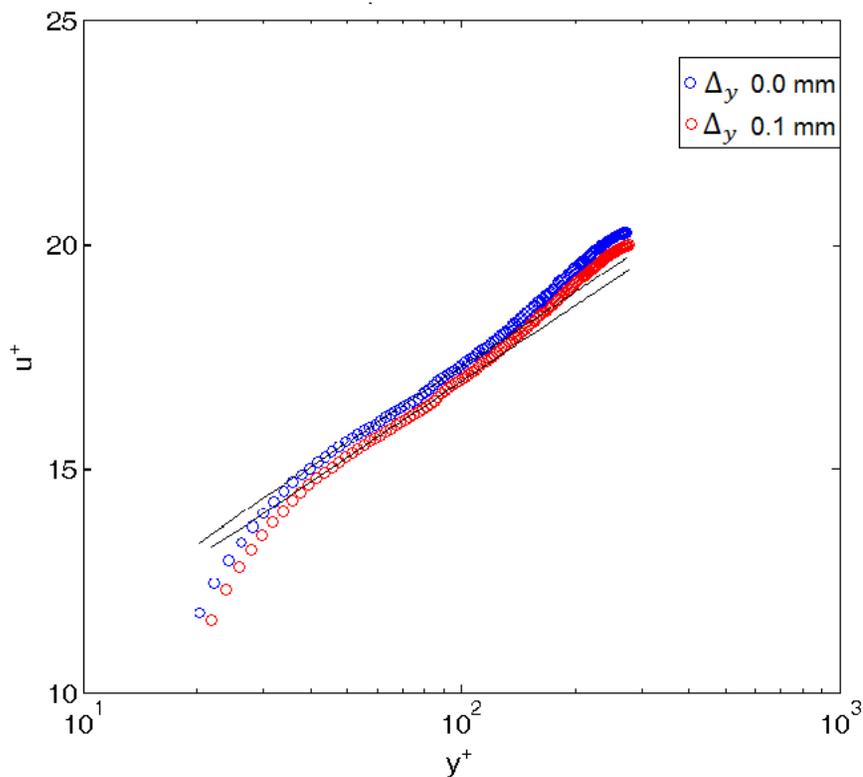


Figura 39 – Perfis de velocidade média para dois Δ_y diferentes, 0,0 mm e 0,1 mm

A Figura 39 mostra dois perfis de velocidade média adimensionalizados com a utilização de dois Δ_y diferentes, 0,0 mm e 0,1 mm. Pode-se observar que com o aumento de Δ_y , o perfil de

velocidade adimensionalizado, $y^+ \times u^+$, se desloca para baixo. Interessante exemplificar que $\Delta_y = 0,0$ mm obteve $B = 6,1$, enquanto $\Delta_y = 0,1$ mm obteve $B = 5,7$. Assim, no trabalho foi utilizado $\Delta_y = 0,1$ mm para a granulometria de $360 \mu m$ e para a granulometria de $160 \mu m$, $\Delta_y = 0,6$ mm, como mostra a Tabela 9 do capítulo 4.

Conjuntamente com o ajuste dos valores de Δ_y , deve-se também ajustar a faixa de valores de y^+ que melhor expressa o perfil logarítmico para a obtenção da constante $B = 5,5$. O código numérico foi programado de forma que fosse possível escolher a região válida para utilizar a lei logarítmica e, assim, ajustar os pontos experimentais obtidos para esta região. O ajuste da faixa de valores de y^+ que corresponde ao perfil logarítmico, tipicamente $50 < y^+ < 150$, deve ser realizado observando o perfil de velocidades adimensional, $y^+ x u^+$. A faixa de valores de y^+ utilizada em cada vazão ensaiada de cada uma das diferentes granulometrias para o escoamento em leito rugoso fixo pode ser encontrada na Tabela 10, na seção 4.2.

Após os ajustes através de Δy e da faixa de valores de y^+ , o perfil de velocidades está posicionado de forma que o valor da constante B esteja próximo de $5,5$. Mas antes de realizar o procedimento para a obtenção do perfil de velocidades para as demais vazões do escoamento, deve-se determinar a distância entre $y = 0$ e o primeiro ponto válido do escoamento, no perfil de velocidades (\bar{U} (m/s) versus y (m)). Para isto, deve-se manter Δy e y_{max} , e fazer com que y_{min} atinja um valor tal que não se exclua vetores do perfil de velocidades (por exemplo, -5 mm). O filtro utilizado no programa *Matlab* para eliminar vetores de velocidades espúrios também deve ser retirado, de forma que o perfil esteja completo. Com o perfil de velocidade desta forma, deve-se determinar o primeiro ponto válido, aquele que tenha comportamento não nulo e não negativo para a componente de velocidade média \bar{U} e a altura y . Esta distância será chamada de y_{fixo1} para a granulometria de $160 \mu m$ e y_{fixo2} para a granulometria de $360 \mu m$ e será importante para o ajuste da interface para o leito móvel. A sua determinação é simples, basta observar diretamente o perfil e extrair o valor. Deste modo, para a granulometria de $160 \mu m$ foi obtido um valor médio de $y_{fixo1} = 0,1$ mm (Figura 40) e para a granulometria de $360 \mu m$, um valor médio de $y_{fixo2} = 0,5$ mm (Figura 41).

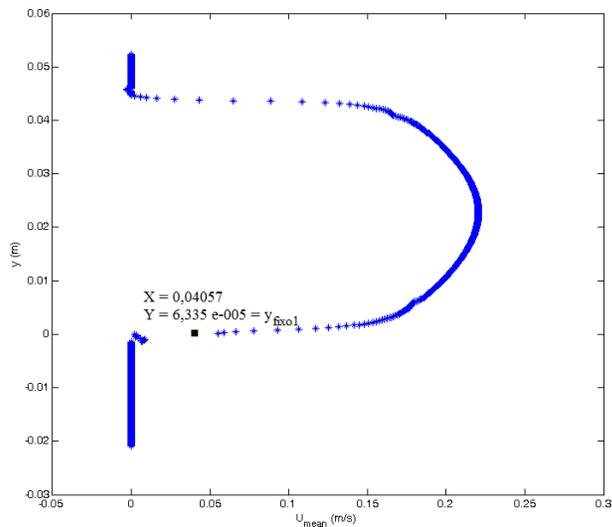


Figura 40 - Indicação da distância y_{fixo1} no perfil de velocidades média adimensional (vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ para escoamento em leito fixo com a granulometria de $160 \mu\text{m}$)

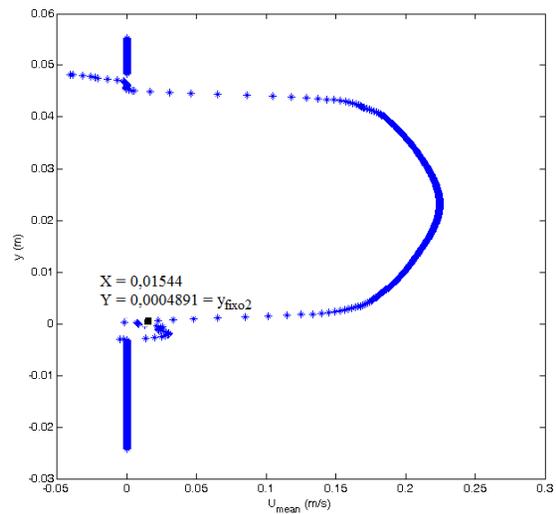


Figura 41 - Indicação da distância y_{fixo2} no perfil de velocidades média adimensional (vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ para escoamento em leito fixo com a granulometria de $360 \mu\text{m}$)

O posicionamento adequado do perfil de velocidades, relativo à menor vazão, está terminado. A próxima etapa é determinar o posicionamento do perfil para as demais vazões ensaiadas: como o leito é igual para as demais vazões do leito fixo, ou seja, não existe mudança na altura do leito e as posições do equipamento PIV/câmera se mantiveram as mesmas desde o início da captura das imagens, deve-se aplicar os valores de Δy , y_{min} e y_{max} obtidos para a menor vazão para todas as outras. A aplicação do mesmo valor destes parâmetros para todas as vazões significa que o primeiro ponto considerado válido no escoamento está na mesma posição para as demais vazões. Porém, ainda assim é necessário que seja feito o ajuste da faixa de y^+ , que melhor expresse a região logarítmica do escoamento, para cada vazão individualmente de forma que se garanta a obtenção do valor da constante B de, aproximadamente, 5,5. Como dito, na Tabela 10 da seção 4.2 encontra-se a faixa de y^+ adotada para todas as vazões do escoamento sobre leito rugoso fixo. A faixa de validade de y^+ para a lei logarítmica deve ser a mesma para os

casos em leito fixo. Isto ocorreu para a granulometria de $360 \mu m$, mas não foi observado para a granulometria de $160 \mu m$. A faixa de y^+ teve de ser variada para o segundo caso devido a problemas com reflexos parasitas.

3.3.5.2 Leito móvel

A determinação da interface para o leito móvel é uma tarefa difícil, uma vez que além de existirem reflexos do leito e os grãos estarem dispostos de maneira irregular no leito, há também a movimentação de alguns grãos durante o escoamento. Assim, os procedimentos para a determinação da interface foram baseados nas posições y_{fixo1} e y_{fixo2} obtidas para leito fixo.

Sabe-se que para escoamento sobre tubos lisos, Davidson (2004) sugere o uso de $\kappa = 0,41$ e $B = 5,5$, mas para leito móvel estes valores ainda não são conhecidos. Assim, algumas hipóteses tiveram que ser adotadas uma vez que o valor da constante B, da equação (2.17), para o caso de escoamento em leito móvel não é encontrada na literatura.

A determinação da altura do primeiro ponto válido com relação ao leito de partículas, para o leito fixo, foi realizada através do ajuste do parâmetro Δy até que fosse encontrado $B = 5,5$, de acordo com a literatura. Neste caso, leito granular móvel, os perfis de velocidade são desconhecidos e a definição da altura de referência não pode ser feita através do ajuste da lei logarítmica (equação (2.17)), uma vez que a constante B é desconhecida.

Adota-se a hipótese que a distância entre o primeiro ponto válido e o leito móvel (y_{movel1} para $d_{50} = 160 \mu m$ e y_{movel2} para $d_{50} = 360 \mu m$) é igual a distância do primeiro ponto válido para leito fixo (y_{fixo1} para $d_{50} = 160 \mu m$ e y_{fixo2} para $d_{50} = 360 \mu m$). Essa hipótese é baseada no fato que: (i) o leito granular é composto pelos mesmos grãos; (ii) os testes foram realizados próximos ao limite de mobilidade dos grãos; (iii) os ajustes e posições do laser/câmera são os mesmos, logo os problemas relacionados a reflexos são semelhantes nos casos para leito fixo e móvel; (iv) a área de interrogação e a posição do laser são as mesmas para todos os testes com grãos de mesma granulometria. Deste modo, eliminando-se as regiões próximas do leito onde os reflexos parasitas são intensos, a posição esperada para o primeiro vetor válido deve ser aproximadamente a mesma.

No perfil de velocidades ($\bar{U} \times y$), (perfil sem o uso de filtros e ajustes) para uma determinada vazão, observa-se qual o valor obtido para a distância entre $y = 0$ e o primeiro ponto válido, y_{movel1} , não nulo e não negativo: se este valor de y_{movel1} for diferente do valor de y_{fixo1} , então se deve ajustar Δy . O ajuste de Δy deve ser feito até que o valor de y_{movel1} seja igual ao y_{fixo1} . Os valores de Δy para escoamento em leito móvel para as granulometrias de $360 \mu m$ e $160 \mu m$ estão na Tabela 19. Exemplificando: para escoamento de, aproximadamente, $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e granulometria de $160 \mu m$, em leito fixo (Figura 40) tem-se o primeiro ponto válido em: $y = 0,1 \text{ mm}$ e o primeiro ponto válido para leito móvel (Figura 42) em: $y = 0,1 \text{ mm}$. Satisfazendo a condição proposta, $y_{fixo1} \cong y_{movel1} \cong 0,1 \text{ mm}$; para escoamento de, aproximadamente, $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e granulometria de $360 \mu m$, em leito fixo (Figura 41) o primeiro ponto válido está em: $y = 0,5 \text{ mm}$ e em leito móvel (Figura 43) está em: $y = 0,5 \text{ mm}$. Satisfazendo a condição proposta, $y_{fixo2} \cong y_{movel2} \cong 0,5 \text{ mm}$.

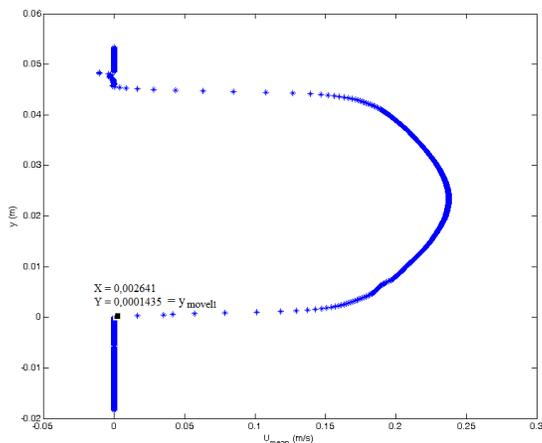


Figura 42 - Posicionamento do parâmetro y_{movel1} no perfil de velocidades médio adimensional (vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ em escoamento leito móvel – ensaio C - com granulometria de $160 \mu m$)

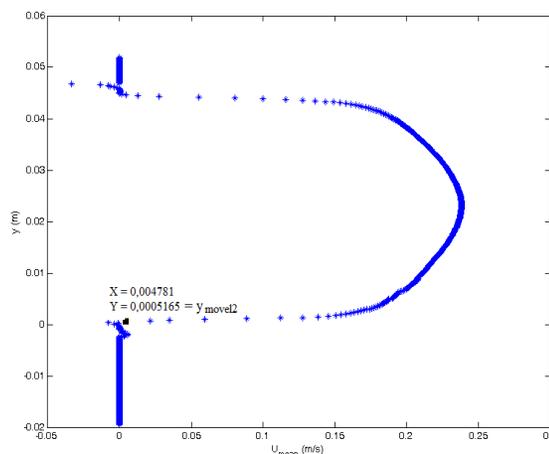


Figura 43 - Posicionamento do parâmetro y_{movel2} no perfil de velocidades médio adimensional (vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ em escoamento leito móvel – ensaio E - com granulometria de $360 \mu m$)

Após a determinação do primeiro ponto válido do escoamento sobre leito móvel, devem-se ajustar as alturas y_{min} e y_{max} conjuntamente com a utilização de filtros para eliminação de vetores que não correspondem ao perfil de velocidades (veja Tabela 19 para observar os valores de y_{min} e y_{max} para leito móvel) e com o estabelecimento da faixa adequada de valores de y^+ , para o ajuste do perfil logarítmico (veja Tabela 20 da seção 4.3). O ajuste da faixa de y^+ irá gerar um valor para a constante B, que até então era desconhecido. A seção 4.3 também fornece os valores da constante B para escoamento em leito móvel para a granulometria de $360 \mu m$, Tabela 22, e para a granulometria de $160 \mu m$, a Tabela 25.

Para a determinação da correta distância da parede para as demais vazões, é necessário repetir o procedimento descrito anteriormente e avaliar o comportamento individualmente.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir da técnica de medição PIV para escoamento sobre dois diferentes leitos, fixo e móvel. Para cada um destes leitos foram ensaiadas duas diferentes granulometrias a fim de se realizar uma comparação do comportamento entre os diferentes casos.

Neste capítulo serão mostrados os perfis de velocidade média normalizados pela escala interna (velocidade de cisalhamento e comprimento viscoso) e externa (velocidade máxima de escoamento e altura do canal), para o leito granular fixo e leito granular móvel. Por fim, faz-se um estudo a respeito da influência do transporte de grãos em um escoamento horizontal turbulento de água através da análise da velocidade de atrito u^* , da constante B (da equação (2.17)), da rugosidade aparente y_0 , do número de Shields e do número de Reynolds da partícula.

4.1 Introdução

Para o escoamento sobre leito fixo foram ensaiadas vazões de 2,5 m³/h até 10 m³/h, crescendo-se de 0,5 m³/h em cada ensaio, para as duas granulometrias analisadas. Para o escoamento sobre leito móvel, a vazão mínima utilizada é a correspondente ao limite de mobilidade dos grãos, ou seja, a partir da qual se observa o início do movimento dos grãos no leito (para as duas granulometrias, em torno de 5 m³/h) e a vazão máxima é a que se observaria o início da formação de rugas no leito granular durante o intervalo de tempo dos testes.

É importante ressaltar que as vazões para leito fixo foram ensaiadas uma única vez. Já as vazões para leito granular móvel foram ensaiadas mais de uma vez a fim de garantir que os efeitos da compactação do leito (*'armouring'*) fossem levados em consideração.

Os ensaios com leito rugoso fixo utilizaram duas granulometrias diferentes: uma faixa de diâmetro entre 106 μm e 212 μm ($d_{50} = 160 \mu m$) e uma faixa de diâmetro entre 300 μm e 425 μm ($d_{50} = 360 \mu m$), conforme exposto na seção 3.3.2. As placas com as partículas foram inseridas em toda a extensão do canal e a Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam as vazões (Q_{real} –

obtidas do pós-processamento no *software Matlab*) aplicadas para $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$, respectivamente. Os procedimentos para a obtenção da vazão estão descritos na seção 3.3.2. As tabelas também apresentam os símbolos utilizados para identificar cada vazão, as velocidades médias \bar{U} calculadas na seção da linha de centro do canal a partir do perfil de velocidade médio e os números de Reynolds baseados no diâmetro hidráulico Re_h .

Tabela 5 - Q_{real} (m³/h), Símbolo, \bar{U} (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$

	Q_{real} (m ³ /h)	Símbolo	\bar{U} (m/s)	Re_h
Fixo	4,9	o	0,19	1,72 10 ⁴
	5,4	+	0,22	1,92 10 ⁴
	5,9	.	0,24	2,10 10 ⁴
	6,7	x	0,27	2,37 10 ⁴
	7,0	□	0,28	2,47 10 ⁴
	7,6	*	0,31	2,70 10 ⁴

Tabela 6 - Q_{real} (m³/h), Símbolo, \bar{U} (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$

	Q_{real} (m ³ /h)	Símbolo	\bar{U} (m/s)	Re_h
Fixo	5,0	o	0,20	1,82 10 ⁴
	5,6	+	0,23	2,04 10 ⁴
	6,1	.	0,25	2,23 10 ⁴
	6,8	x	0,27	2,45 10 ⁴
	7,3	□	0,29	2,64 10 ⁴

Para o ensaio sobre leito rugoso móvel foi utilizada a mesma disposição das placas no interior do canal, com alteração apenas na seção de testes, cujas placas foram retiradas e no lugar foram colocadas esferas de vidro soltas da mesma granulometria das placas ($d_{50} = 160 \mu m$ ou $d_{50} = 360 \mu m$). Isto assegura que o comprimento de entrada tenha a mesma granulometria do leito rugoso móvel. Foram realizados diferentes ensaios, nomeados A, B, C e D para a granulometria $d_{50} = 160 \mu m$ e E, F e G para a granulometria $d_{50} = 360 \mu m$. A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam, respectivamente, para $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$ as vazões reais (Q_{real}) e os símbolos utilizados para a identificação, as velocidades médias do escoamento (\bar{U}) e o número de Reynolds (Re_h) baseado no diâmetro hidráulico para o escoamento sobre leito móvel.

Tabela 7 – Q_{real} (m³/h), Símbolo, \bar{U} (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ para os ensaios A, B, C e

D

	Q_{real} (m ³ /h)	Símbolo	\bar{U} (m/s)	Re_h
Ensaio A	5,2	o	0,20	$1,85 \cdot 10^4$
	5,8	+	0,23	$2,05 \cdot 10^4$
	6,3	.	0,25	$2,24 \cdot 10^4$
	6,9	X	0,27	$2,46 \cdot 10^4$
	7,5	□	0,29	$2,66 \cdot 10^4$
Ensaio B	5,3	o	0,21	$1,88 \cdot 10^4$
	5,8	+	0,23	$2,09 \cdot 10^4$
	6,3	.	0,25	$2,26 \cdot 10^4$
Ensaio C	5,2	o	0,21	$1,86 \cdot 10^4$
	5,7	+	0,23	$2,03 \cdot 10^4$
	6,2	.	0,25	$2,23 \cdot 10^4$
Ensaio D	5,3	o	0,21	$1,86 \cdot 10^4$
	5,8	+	0,22	$2,02 \cdot 10^4$
	6,3	.	0,25	$2,33 \cdot 10^4$

Tabela 8 - Q_{med} (m³/h), Q_{real} (m³/h), Símbolo, \bar{U} (m/s) e Re_h para o escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ para os ensaios E, F e G

	Q_{real} (m ³ /h)	Símbolo	\bar{U} (m/s)	Re_h
Ensaio E	5,3	o	0,21	1,90 10 ⁴
	5,8	+	0,23	2,07 10 ⁴
	6,1	.	0,25	2,20 10 ⁴
	6,8	X	0,27	2,45 10 ⁴
Ensaio F	5,3	o	0,21	1,91 10 ⁴
	5,9	+	0,24	2,13 10 ⁴
	6,3	.	0,25	2,27 10 ⁴
	6,7	X	0,27	2,44 10 ⁴
	7,3	□	0,29	2,64 10 ⁴
Ensaio G	5,4	o	0,21	1,91 10 ⁴
	5,9	+	0,23	2,11 10 ⁴
	6,4	.	0,26	2,32 10 ⁴
	6,8	X	0,27	2,47 10 ⁴

Apesar de todos os ensaios terem sido realizados sob mesmas condições experimentais (temperatura e pressão locais, fluido de trabalho, granulometria das esferas depositadas no fundo do canal), o ensaio A atingiu vazões mais altas, 6,9 m³/h e 7,5 m³/h, que os ensaios B, C e D (cuja vazão máxima está em torno de 6,3 m³/h), como mostra a Tabela 7. O mesmo pode-se afirmar para o ensaio F, que atingiu a vazão máxima de 7,3 m³/h, com relação aos ensaios E e G (com vazão máxima em torno de 6,8 m³/h), como mostra a Tabela 8.

Esta diferença entre as faixas de vazão para os ensaios nas duas granulometrias indica apenas que houve uma maior vazão enviada pelo conjunto reservatório, bomba, colméia, etc. Existem muitas variáveis ligadas a imposição de dada vazão de líquido no canal como a regulagem do inversor de frequência, a bomba que por vezes desprende pedaços de ferrugem entupindo parcialmente a seção colméia e o medidor de vazão que possui um tempo característico de resposta grande.

4.2 Escoamento sobre leito fixo

A partir do pós-processamento dos 500 pares de imagens foram gerados 500 campos vetoriais de velocidades instantâneas e, por fim, um campo vetorial de velocidade média para cada vazão (ambos procedimentos através do software *Davis*). Realizando a média espacial em cada campo vetorial (no software *Matlab*) obtém-se um perfil de velocidade média. Veja o esquema apresentado na Figura 26 na seção 3.2.8.

Para garantir um perfil de velocidades médio coerente (sem a presença de resultados gerados a partir de reflexos parasitas, por exemplo) e bem posicionado (adequado com relação a interface entre leito granular e escoamento), deve-se realizar o ajuste dos parâmetros: altura mínima (y_{min}); altura máxima (y_{max}); deslocamento Δ_y . A seção 3.3.5 explica detalhadamente o procedimento e os critérios adotados para o ajuste destes parâmetros. A Tabela 9 fornece os valores obtidos para as duas granulometrias, $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$, no escoamento sobre leito rugoso fixo.

Tabela 9 – y_{min} , y_{max} e Δ_y para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$

Granulometria média	y_{min} (m)	y_{max} (m)	Δ_y (mm)
160 μm	0	0,0442	0,6
360 μm	0	0,0452	0,1

A altura y_{min} foi fixada para as duas granulometrias enquanto o parâmetro y_{max} era ajustado. Desta forma, foi possível eliminar vetores espúrios posicionados na região superior (parede de cima do canal) e inferior (leito granular). O parâmetro Δ_y , como explicado na seção 3.3.5, é a distância que deve ser deslocada ao longo da coordenada vertical para ajustar a referência $y = 0$ adequadamente. As duas granulometrias apresentaram valores distintos uma vez que o ajuste de Δ_y é particular para cada leito granular (novo posicionamento e ajuste da câmera e do laser).

Além dos parâmetros apresentados, deve-se selecionar a correta faixa de y^+ para se fazer o ajuste dos dados experimentais na região intermediária da camada limite turbulenta, como descrito na seção 3.3.5, para adequar a região caracterizada como logarítmica à região intermediária do escoamento e assim obter o perfil de velocidades médio corretamente. O ajuste da região de abrangência da lei logarítmica, através da faixa de y^+ , e a determinação de Δ_y são realizados simultaneamente no software *Matlab*, garantindo que o escoamento sobre leito fixo apresente o valor da constante B em torno de 5,5 (equação (2.16)). Sabe-se a priori que o leito fixo está no regime hidraulicamente liso, portanto $B = 5,5$. A obtenção deste valor é uma maneira de comprovar que a interface entre o leito rugoso fixo e o escoamento ($y = 0$) foi ajustada adequadamente e que o perfil logarítmico de velocidades apresenta comportamento de acordo com a literatura (Davidson, 2004).

A Tabela 10 identifica o intervalo de y^+ utilizado em cada vazão para o escoamento sobre leito fixo (y^+) e sobre a parede superior do canal, parede lisa (y^{sup}). A apresentação dos resultados para a parede superior do canal tem o intuito de demonstrar que o comportamento do escoamento sobre parede lisa se aproxima do esperado e assim, concorda com os resultados apresentados pela literatura, assegurando que os procedimentos experimentais empregados estão corretos. Os parâmetros, velocidade de atrito u_* e constante B, são determinados a partir de um ajuste de mínimos quadrados, utilizando o intervalo de y^+ mostrado na tabela.

Tabela 10 – Faixa de valores de y^+ adotada, para a parede superior (y^{+sup}) e inferior (y^+), para o perfil de velocidades adimensionais quando se analisa o escoamento em leito rugoso fixo para as duas granulometrias

Q_{real} (m ³ /h)	$d_{50} = 160 \mu m$		Q_{real} (m ³ /h)	$d_{50} = 360 \mu m$	
	y^+	y^{+sup}		y^+	y^{+sup}
4,9	$30 < y^+ < 120$	$30 < y^+ < 120$	5,0	$40 < y^+ < 100$	$70 < y^+ < 150$
5,4	$25 < y^+ < 160$	$20 < y^+ < 110$	5,6	$40 < y^+ < 100$	$70 < y^+ < 150$
5,9	$30 < y^+ < 140$	$30 < y^+ < 120$	6,1	$40 < y^+ < 100$	$70 < y^+ < 150$
6,7	$30 < y^+ < 160$	$70 < y^+ < 115$	6,7	$40 < y^+ < 100$	$70 < y^+ < 150$
7,0	$20 < y^+ < 200$	$20 < y^+ < 200$	7,3	$40 < y^+ < 100$	$70 < y^+ < 150$
7,6	$30 < y^+ < 150$	$20 < y^+ < 200$			

Da Tabela 10, $d_{50} = 360 \mu m$ apresenta uma faixa de y^+ similar para todas as vazões ensaiadas, tanto para a parede inferior (rugosa) quanto para a parede superior (lisa). Já $d_{50} = 160 \mu m$ não apresenta um padrão para as faixas de y^+ . A escolha da região de y^+ se baseou na observação individual de cada perfil logarítmico de velocidade ($u^+ \times y^+$) e o ajuste adequado dos dados experimentais na região intermediária.

Um dos motivos atribuídos à diferença na faixa de y^+ entre cada vazão da granulometria média de $160 \mu m$ é a presença de regiões com excesso de reflexo e, conseqüentemente, vetores falsos. Assim, a escolha da faixa de y^+ foi baseada na tentativa de compensar as regiões com presença de vetores espúrios com regiões de vetores válidos, de maneira que o perfil logarítmico, dado pela equação (2.16), fosse capaz de expressar corretamente a região de interesse (camada intermediária). Estes reflexos podem ser vistos nos dados brutos (imagens do campo de escoamento) do PIV. Mesmo que este artifício tenha sido utilizado, de maneira geral, a faixa de y^+ utilizada se apresenta dentro do esperado pela literatura (White, 1991).

Com o ajuste dos parâmetros y_{min} , y_{max} , Δy , y^+ e y^{+sup} é possível obter os perfis de velocidade média adequadamente e, conseqüentemente, os valores para a velocidade de atrito e

para a constante B, que serão apresentados nas seções 4.2.1 e 4.2.2 para, respectivamente, $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$.

4.2.1 Resultados para leito fixo - $d_{50} = 160 \mu m$

Os perfis de velocidade média obtidos para cada vazão são gráficos que representam a distribuição da velocidade longitudinal do escoamento ao longo da altura do canal, $\bar{U} \times y$. Apesar de expressarem satisfatoriamente o comportamento obtido no canal, quando a análise se estende para a comparação entre diferentes valores de vazão se torna mais adequado a utilização da forma adimensional dos parâmetros. Assim, alguns perfis de velocidade média apresentados neste trabalho foram normalizados pela velocidade máxima atingida no escoamento, U_{max} , e pela distância entre o leito granular e o limite superior do canal, H . Esta distância representa a altura onde efetivamente ocorre o escoamento e é determinada a partir dos procedimentos descritos na seção 3.3.5.

Se os perfis de velocidade adimensionalizados por escalas externas fossem representados pelos pontos experimentais e não por uma linha contínua, como foi realizado, haveria confusão na representação dos dados uma vez que existem mais de 500 pontos experimentais no perfil. Lembrando que as imagens capturadas possuem um campo de 80 mm x 80 mm (para os testes realizados com leito fixo) dividido em 512 zonas de interrogação com 0,14 mm x 0,14 mm de resolução.

A Figura 44 apresenta os perfis de velocidade média adimensionalizados, a partir de escalas externas, para as vazões impostas sobre um leito fixo $d_{50} = 160 \mu m$. Cada curva mostrada na Figura 44 apresenta uma cor distinta para diferenciar as diferentes vazões, como mostra a legenda. A linha de simetria indica a localização da posição central da altura do canal.

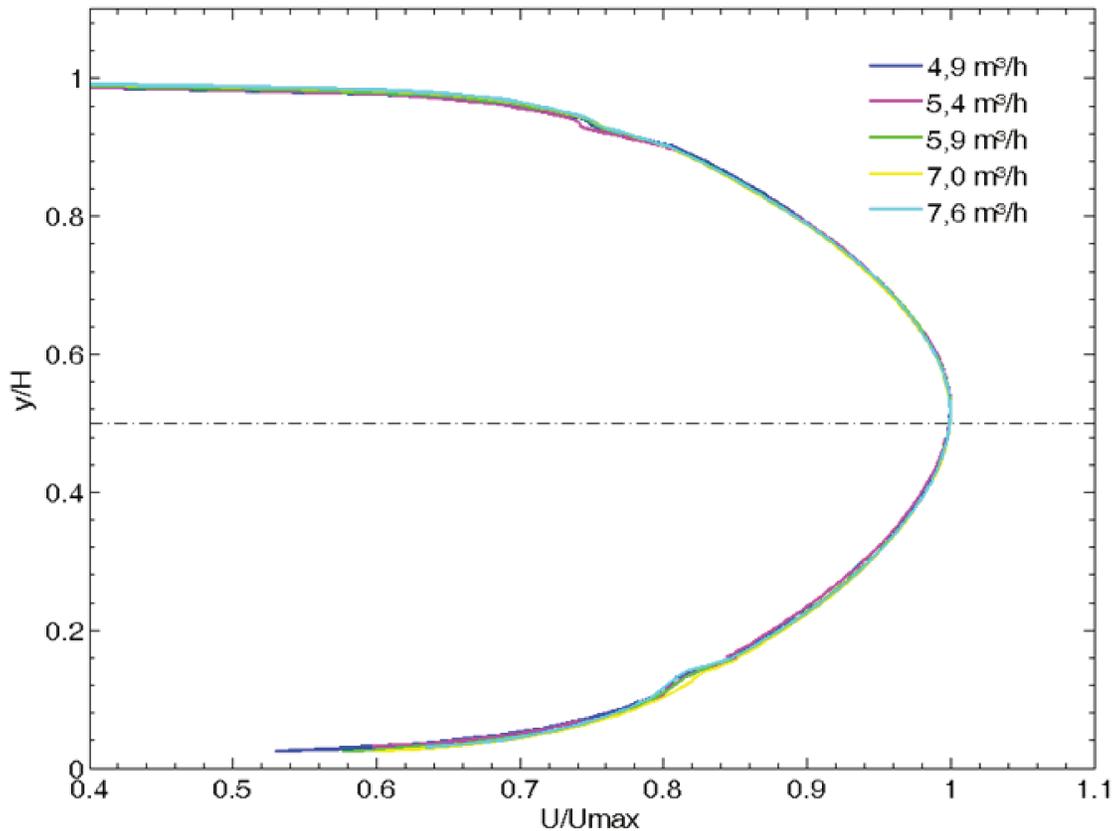


Figura 44 - Perfis das velocidades médias longitudinais adimensionais das vazões ensaiadas em leito fixo com granulometria média $160 \mu m$

Uma vez que as curvas estão normalizadas a partir de escalas externas (H , altura na qual ocorre efetivamente o escoamento e U_{max} , velocidade máxima obtida no escoamento para determinada vazão), os perfis de velocidades médias na Figura 44 se apresentam coincidentes para todas as vazões ensaiadas, com exceção da vazão de $6,7 \text{ m}^3/\text{h}$. Atribuí-se à presença de reflexos do canal e/ou do leito de partículas o comportamento apresentado pela vazão de $6,7 \text{ m}^3/\text{h}$, que não se apresentou coincidente com as demais vazões. Interessante notar que o desvio do perfil de velocidade obtido para esta vazão se apresenta mais acentuado na parte inferior do canal, reforçando que o reflexo gerado pela presença de leito de partículas no canal é um forte motivo para a ocorrência deste comportamento.

Para quantificar que os perfis de velocidades estão deslocados levemente acima da linha de centro, a Tabela 11 mostra a velocidade máxima, U_{max} , que cada uma das vazões ensaiadas

atingiu e as respectivas posições, na coordenada y/H , que estas velocidades máximas foram encontradas, para o ensaio em leito fixo com granulometria média de $160 \mu m$.

Tabela 11 – Valores de U_{max} e a correspondente posição em y/H para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$

Q_{real} (m ³ /h)	U_{max} (m/s)	y/H para U_{max}
4,9	0,22	0,52
5,4	0,24	0,51
5,9	0,27	0,52
6,7	0,31	0,52
7,0	0,31	0,51
7,6	0,34	0,52

A partir da Tabela 11 é possível ver que a velocidade máxima para todas as vazões oscilou entre as posições $y/H = 0,51$ e $y/H = 0,52$, comprovando a superposição e identificando uma leve assimetria dos perfis de velocidade. Os resultados (Tabela 13) mostram que o escoamento está no regime hidraulicamente liso, mas próximo da faixa de transição, assim a rugosidade começa afetar o escoamento, mesmo que levemente, gerando esta assimetria. Para um escoamento em regime hidraulicamente liso, a assimetria não seria verificada.

Em escoamento em canais abertos rugosos, a forma da camada externa não é afetada pela rugosidade da superfície (mas sua posição y é alterada) e a camada interna por ser muito delgada pode ser ou não interrompida pela própria rugosidade da superfície. Este comportamento é distinto do que ocorre em tubos: embora a camada externa seja menos afetada do que a camada interna, o fluido no centro se acelera na presença de rugosidade. Assim, é interessante realizar a análise da região compreendida entre as camadas interna e externa, onde o perfil de velocidade pode ser descrito na forma logarítmica. O perfil de velocidade para escoamento turbulento no interior de um tubo é normalmente representado em um gráfico semi-logarítmico ($\frac{\bar{U}}{u^*}$ versus $\log\left(\frac{yu^*}{\nu}\right)$), onde a velocidade média é normalizada pela velocidade de cisalhamento, $u^+ = u/u^*$, e

a distância é normalizada pelo comprimento viscoso, $y^+ = yu^*/\nu$. Os parâmetros adimensionais u^+ e y^+ surgem da análise dimensional, equações (2.9) e (2.10), considerando razoável a hipótese que a velocidade nas proximidades da parede pode ser determinada por propriedades do fluido (ν), do escoamento (\bar{U} , u^*) e pela distância a partir da parede (y).

A Figura 45 apresenta os perfis de velocidade média adimensionalizados, a partir de escalas internas, para o escoamento turbulento sobre uma parede rugosa fixa com $d_{50} = 160 \mu m$ (parede inferior do canal) e a Figura 46 apresenta os perfis de velocidade sobre uma parede lisa (parede superior do canal) conjuntamente com os perfis sobre uma parede rugosa fixa (parede inferior). Ambas as figuras apresentam também a lei logarítmica (equação (2.17)), representada pela reta. Cada vazão é representada com um símbolo distinto, como mostram as legendas, para facilitar a visualização.

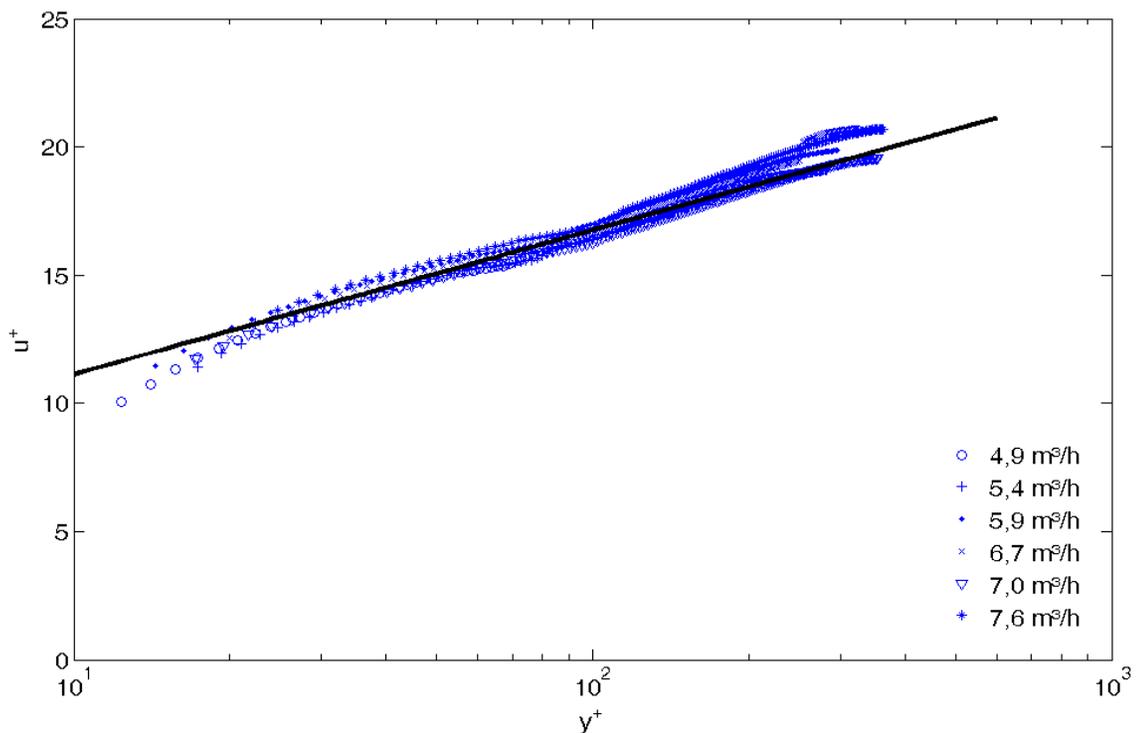


Figura 45 - Perfis adimensionais de velocidade média para escoamento sobre uma parede rugosa (parede inferior do canal) com granulometria média de $160 \mu m$. Reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).

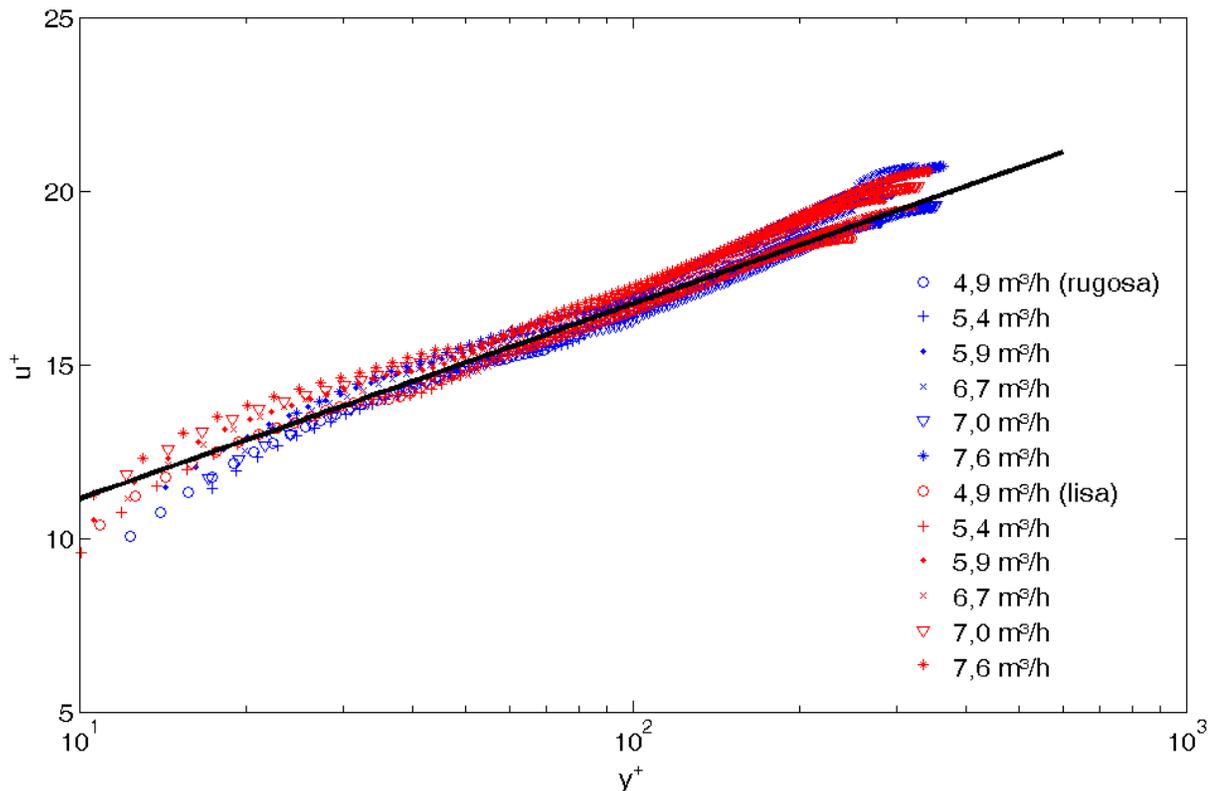


Figura 46 - Perfis adimensionais de velocidade média para escoamento sobre uma parede rugosa (parede inferior do canal), em azul, e uma parede lisa (parede superior do canal), em vermelho, para a granulometria média de $160 \mu\text{m}$. Reto contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).

Os perfis de velocidade para escoamento sobre leito rugoso fixo exibidos na Figura 45 estão praticamente superpostos, indicando que o aumento da vazão não alterou significativamente o comportamento dos perfis de velocidade. Observa-se também a aproximação dos resultados para leito fixo com a lei logarítmica. A Figura 46 mostra que os perfis de velocidade para a parede rugosa fixa não sofreram influência da rugosidade imposta no canal, uma vez que estão coincidindo com os perfis de velocidades obtidos para a parede lisa do canal. Este comportamento, de superposição, indica o pouco efeito causado no escoamento (visto através dos perfis de velocidade) pela introdução de um leito rugoso com esta granulometria. Neste caso, também houve aproximação dos resultados para escoamento sobre parede lisa com a lei

logarítmica. Lembrando que os perfis de velocidades foram ajustados individualmente (o ajuste para a parede rugosa foi através da obtenção da constante $B = 5,5$) e a Figura 45 e a Figura 46 apresentam esta superposição dos resultados, mostrando uma pequena dispersão em torno da lei logarítmica.

Uma das maneiras de avaliação do comportamento dos perfis de velocidade é quantificando alguns parâmetros do escoamento. Os resultados foram obtidos no pós-processamento das imagens no software *Matlab*. A Tabela 12 exibe os valores obtidos para a velocidade de atrito u^* e a constante B , para a parede lisa (parede superior) e a parede rugosa (parede inferior) com granulometria média de $160 \mu m$. Como explicado na seção 3.3.5, para obtenção da constante B é necessário uma série de ajustes (da referência $y = 0$ que corresponde a interface entre leito granular e líquido e do perfil logarítmico de velocidades à região intermediária do escoamento) e para a obtenção de u^* , os dados experimentais foram ajustados com a equação (3.4).

Tabela 12 – Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$), u^* e B , e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup}

Q_{real} (m ³ /h)	u^* (m/s)	u^*_{sup} (m/s)	B	B_{sup}
4,9	0,0116	0,0118	5,3	5,3
5,4	0,0129	0,0129	5,2	5,4
5,9	0,0135	0,0136	5,8	5,8
6,7	0,0148	0,0157	5,6	5,3
7,0	0,0161	0,0156	5,2	5,9
7,6	0,0166	0,0167	5,9	6,2

Das informações da Tabela 12, é possível afirmar que a velocidade de atrito, u^* , aumenta com o aumento da vazão, como esperado, caracterizando que existe um aumento da tensão de cisalhamento na parede, τ_w , com o aumento da vazão. Já a constante B praticamente não se alterou com a vazão, apresentando valores em torno de 5,5 (escoamento sobre leito fixo e em

regime hidraulicamente liso, de acordo com a Tabela 13). Estes resultados mostram que o escoamento sobre leito rugoso fixo em regime hidraulicamente liso (próximo ao regime de transição), com esta granulometria, apresenta um comportamento semelhante ao obtido para uma parede lisa (conforme já observado na Figura 46). Neste regime, diferente do que ocorre para hidraulicamente rugoso, os elementos rugosos estão completamente dentro da subcamada viscosa ($Re^* < 5$ ou $y_0 \ll \delta$, de acordo com a Figura 1) e não há diferenças apresentadas com relação a uma superfície lisa. Se os elementos de rugosidade começam a se projetar, ultrapassando a subcamada viscosa ($Re^* > 5$ ou $y_0 > \delta$), então a rugosidade começa a influenciar o escoamento: no caso de regime hidraulicamente rugoso ($Re^* > 70$), os efeitos da viscosidade desaparecem na região próxima a parede e os elementos rugosos ultrapassam a camada intermediária. Para este regime existe independência com o número de Reynolds.

Assim, a diferença máxima obtida entre as paredes inferior e superior para a velocidade de atrito não ultrapassa 5% e para a constante B, 10%, de acordo com os valores apresentados na Tabela 12. Isto reforça o fato que os perfis de velocidade média para a parede lisa e rugosa fixa, com a granulometria média de $160 \mu m$, apresentam comportamentos similares quando submetidos à vazão variando entre $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$, aproximadamente.

Partindo do princípio que y_0 (altura na qual a velocidade média é nula se o perfil logarítmico for válido até a região da parede) é derivado da velocidade de atrito u^* e da constante B (de acordo com a equação (2.22)), a atenção será concentrada no comportamento destes parâmetros com a variação do número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico (Figura 47 e Figura 48, respectivamente, para u^* e B). A Figura 47 apresenta os resultados obtidos pela correlação de Blasius (equação (2.27)).

A Figura 47 apresenta o comportamento u^* com o número de Reynolds na forma dimensional, uma vez que a apresentação na forma adimensional $\frac{u^*}{\bar{u}}$ se assemelharia ao comportamento mostrado na Figura 49, gráfico de f versus Re_h ($\frac{u^*}{\bar{u}} = \frac{1}{2}\sqrt{f}$).

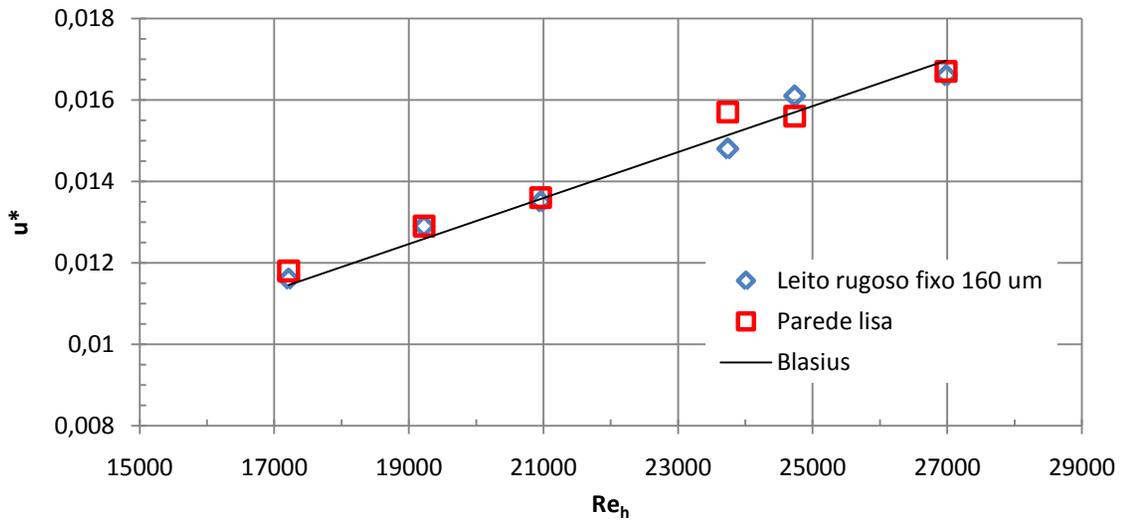


Figura 47 – Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 160 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal) comparando com os resultados obtidos pela correlação de Blasius.

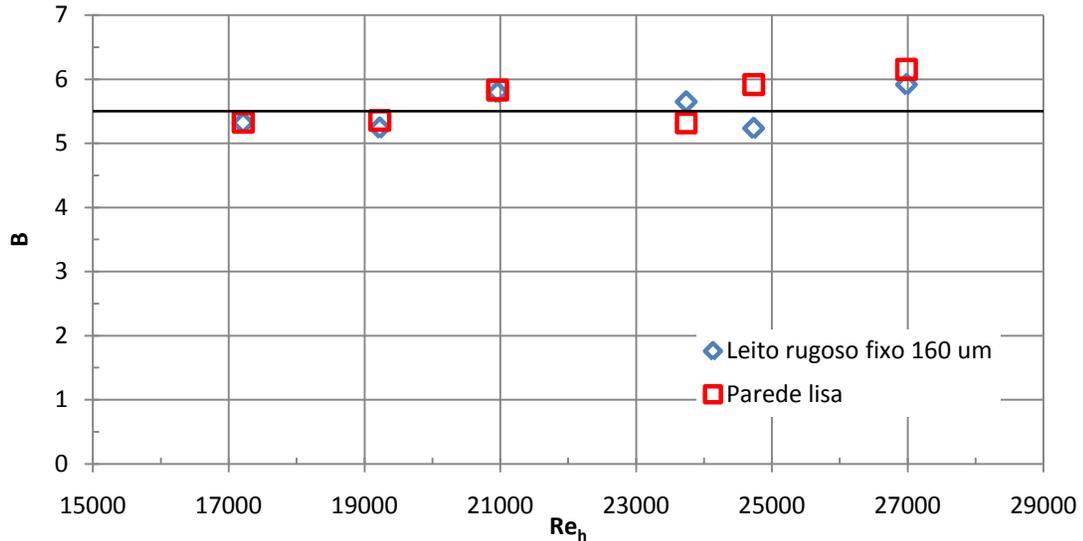


Figura 48 - Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 160 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal). A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo.

O comportamento apresentado, na Figura 47, para a velocidade de atrito u^* com o aumento do número de Reynolds para um escoamento sobre leito fixo é similar ao comportamento apresentado para escoamento sobre uma parede lisa (parede superior). Os valores de u^* se apresentam praticamente coincidentes, com exceção das vazões 6,7 m³/h e 7 m³/h, que apresentam pequena divergência (diferença não é superior a 5%).

A velocidade de atrito também apresentou valores aproximados aos resultados obtidos por Blasius (equação (2.27)): para leito liso, as diferenças máximas obtidas entre os resultados experimentais e os obtidos por Blasius foi de 0,0006 m/s para mais e 0,0002 m/s para menos e, para leito fixo, as diferenças máximas foram 0,0004 m/s para mais e 0,0003 m/s para menos. Assim, o espalhamento dos resultados em torno dos valores obtidos por Blasius não foi superior a 4 % (0,0006 m/s) para o leito liso e 3 % (0,0004 m/s) para leito fixo, mostrando que o uso desta correlação é adequado para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso.

Como esperado, o comportamento da constante B (da equação (2.17)) com o número de Reynolds (Figura 48) está em torno de 5,5, uma vez que o regime de escoamento é hidraulicamente liso: para leito liso, as diferenças máximas obtidas entre os resultados experimentais e a literatura, $B = 5,5$, foram de 0,7 para mais e 0,2 para menos, sendo o espalhamento não superior a 13 %. Para leito fixo, as diferenças máximas foram de 0,4 para mais e 0,3 para menos, mostrando espalhamento não superior a 8 %. A reta em $B = 5,5$ na Figura 48 é apenas uma representação da constante B para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso, de acordo com a literatura (Davidson, 2004). A obtenção da constante em torno deste valor foi um dos critérios utilizados para ajustar adequadamente a interface entre leito granular fixo e escoamento.

A Tabela 13 apresenta informações a respeito da rugosidade aparente da parede inferior (rugosa) y_0 , da parede lisa (lisa) $y_{0\ sup}$, do número de Reynolds na escala do grão Re^* e do número de Shields θ . Os dois últimos parâmetros são importantes para caracterizar o escoamento (hidraulicamente liso, rugoso ou na transição) e as condições de mobilidade do leito.

Tabela 13 - Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior (leito fixo com $d_{50} = 160 \mu m$) e parede superior (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala do grão (Re^*) e número de Shields (θ)

Q_{real} (m ³ /h)	y_0	y_0 (μm)	$y_{0\ sup}$	$y_{0\ sup}$ (μm)	Re^*	θ
4,9	d/16	10	d/17	9,4	2	0,06
5,4	d/18	8,9	d/18	8,9	2	0,07
5,9	d/23	7,0	d/24	6,7	2	0,08
6,7	d/24	6,7	d/22	7,3	2	0,09
7,0	d/22	7,3	d/28	5,7	3	0,11
7,6	d/30	5,3	d/33	4,8	3	0,12

Com os valores de u^* e B ajustados é possível determinar o valor de Re^* e assim, determinar o regime de escoamento obtido. Da Tabela 13, Re^* oscila entre 2 e 3 indicando, de acordo com a Tabela 1, um regime hidraulicamente liso ($Re^* \leq 5$). Dado este regime, a referência do escoamento $y = 0$ (interface entre escoamento e leito de partículas) foi ajustada, de modo que o perfil logarítmico tenha $B = 5,5$. A Figura 46 mostra que os perfis de velocidade para a parede lisa e rugosa estão quase superpostos e isto pode ser explicado, então, pelo fato que a camada limite de ambas paredes está no regime hidraulicamente liso, mesmo que exista uma diferença na rugosidade das superfícies.

Da literatura, para um escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente rugoso, tem-se que a altura onde a velocidade é nula y_0 é, aproximadamente, 1/30 do diâmetro do grão, ou seja, $y_0 = d/30$. Quando em regime hidraulicamente liso (ou início da transição de hidraulicamente liso para rugoso), espera-se y_0 com um valor distinto, uma vez que apresenta como característica ausência de efeito dos elementos rugosos. O comportamento observado foi: y_0 apresenta uma tendência a decrescer com o aumento da vazão. Para o regime hidraulicamente liso, a sub-camada laminar persiste e y_0 faz escala com o comprimento viscoso: razão entre a viscosidade cinemática e a velocidade de atrito (ν/u^*), como na equação (2.22). Assim, se existe

um aumento da vazão, que aumenta a velocidade de atrito, existe a diminuição da sub-camada laminar e, proporcionalmente, de y_0 .

O número de Shields θ calculado para escoamento sobre leito fixo fornece um indicativo se as partículas de um leito estariam em movimento ou não se o leito estivesse solto. Mesmo que os resultados não se ajustem perfeitamente à curva de Shields crítico apresentado na Figura 4, pode-se afirmar que o escoamento estaria no limite de mobilidade. A mobilidade das partículas de um leito depende de diversos fatores que dificultam a determinação de uma curva de Shields exata (Soulsby e Whitehouse, 1997) e assim na curva apresentada há grande dispersão de valores, sendo apenas um indicativo da ordem de grandeza de θ .

Os fatores de atrito experimental, equação (3.9), para as paredes inferior (rugosa) e superior (lisa), e o fator de atrito de Blasius (equação (2.25)) são mostrados na Tabela 14. Esta tabela também fornece a porcentagem de erro dos fatores de atrito experimentais em comparação com o obtido por Blasius. A Figura 49 apresenta o comportamento destes fatores de atrito, experimental e Blasius, em função do número de Reynolds.

Tabela 14 - Valores para os coeficientes de atrito obtidos experimentalmente para a parede rugosa f_{exp} (parede inferior) com $d_{50} = 160 \mu m$, parede lisa f_{exp_sup} (parede superior) e através de Blasius f (equação (2.25)). Porcentagem de erro destes coeficientes de atrito em comparação com o obtido por Blasius ($Erro_{exp}$ e $Erro_{exp_sup}$)

Re_h	f	f_{exp}	f_{exp_sup}	$Erro_{exp}$	$Erro_{exp_sup}$
$1,72 \cdot 10^4$	0,028	0,028	0,029	-3%	-7%
$1,92 \cdot 10^4$	0,027	0,028	0,028	-5%	-5%
$2,16 \cdot 10^4$	0,026	0,026	0,026	1%	0%
$2,3 \cdot 10^4$	0,025	0,024	0,027	5%	-7%
$2,4 \cdot 10^4$	0,025	0,026	0,025	-5%	1%
$2,70 \cdot 10^4$	0,025	0,024	0,024	4%	3%

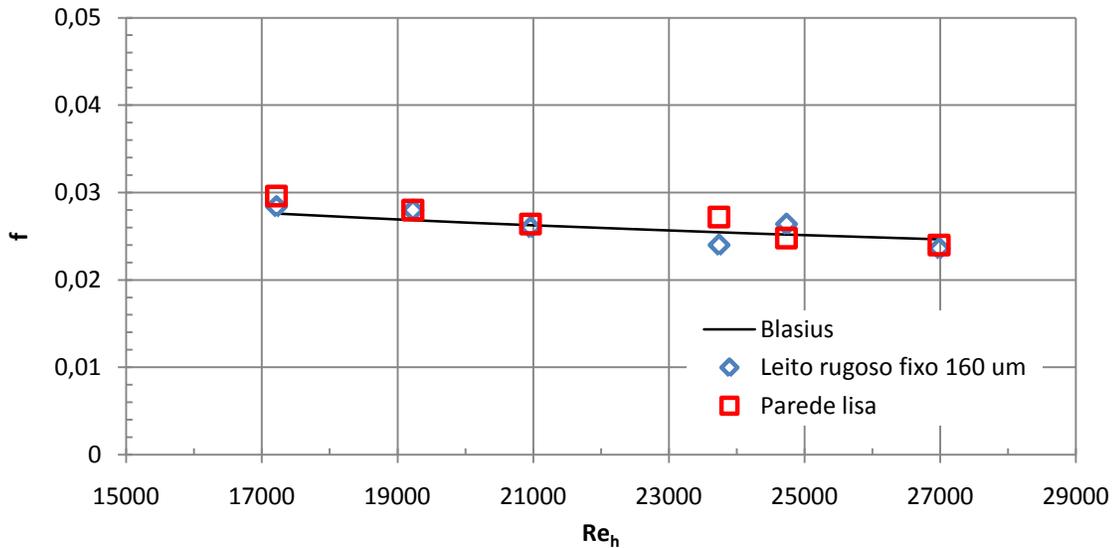


Figura 49 – Variação dos fatores de atrito de Blasius e experimental, para o leito granular com $d_{50} = 160 \mu m$ (parede inferior) e parede lisa (parede superior), com o número de Reynolds hidráulico do escoamento.

A partir da Tabela 14, observa-se que a diferença máxima apresentada entre o fator de atrito calculado pela correlação de Blasius e o fator de atrito experimental não ultrapassa 6 % para a parede rugosa e 7 % para a parede lisa. Estes valores se devem a baixa diferença apresentada entre a velocidade de atrito calculada por Blasius e obtida experimentalmente: 3 % para a parede rugosa e 4 % para a parede lisa, uma vez que $f \sim u^{*2}$, equação (2.27). A concordância dos dados experimentais com a correlação de Blasius, como mostrado na Figura 49, é um indicativo que o regime de escoamento é hidraulicamente liso e também que os procedimentos de medida estão corretos.

4.2.2 Resultados para leito fixo - $d_{50} = 360 \mu m$

O leito granular fixo com granulometria média de $360 \mu m$ será estudado nesta seção. Os perfis de velocidade das diferentes vazões ensaiadas e resultados relevantes, como a velocidade

de atrito u^* , a constante B da equação (2.17), número de Reynolds na escala do grão Re^* e número de Shields θ , serão apresentados.

A Figura 50 apresenta o perfil de velocidades médias adimensionalizados, a partir de escalas externas, para as vazões impostas sobre um leito fixo com granulometria de $d_{50} = 360 \mu m$. Cada vazão utilizada é indicada com uma cor distinta como mostra a legenda.

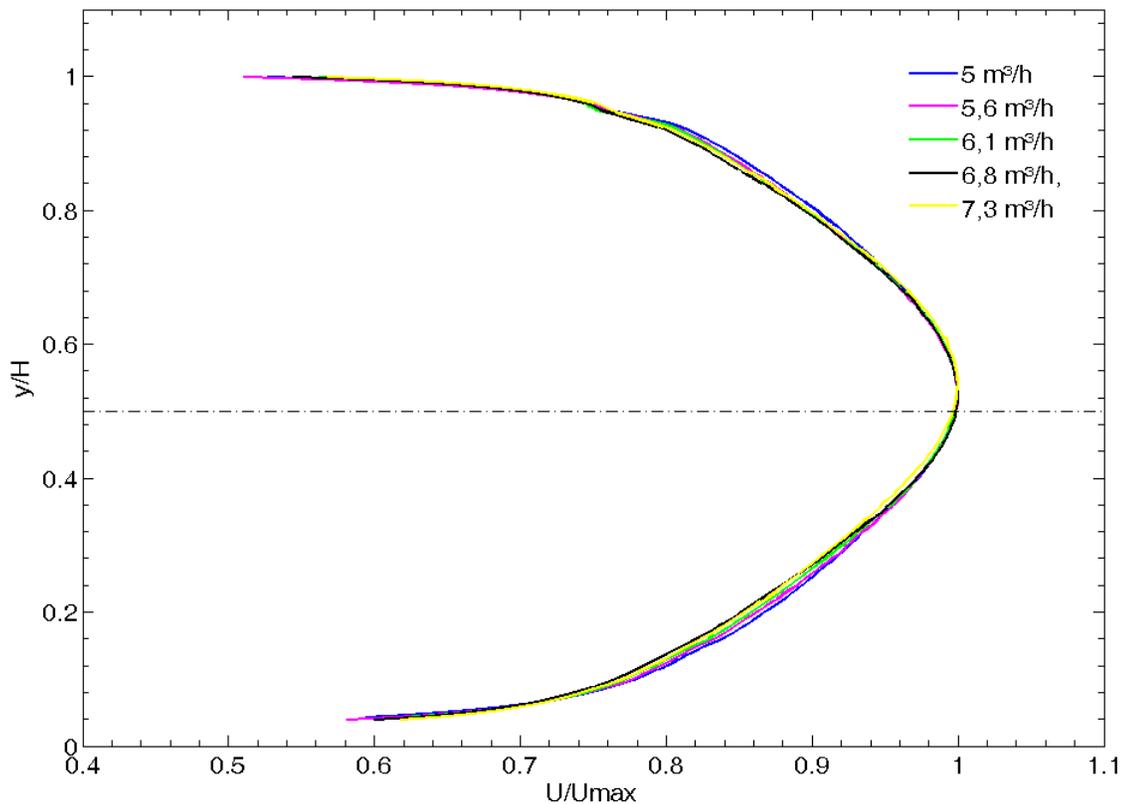


Figura 50 – Perfis das velocidades médias longitudinais adimensionais das vazões ensaiadas em leito fixo com granulometria de $d_{50} = 360 \mu m$

Assim como ocorreu para $d_{50} = 160 \mu m$, os perfis de velocidade obtidos para as diferentes vazões de escoamento para leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ estão coincidentes e apresentam uma leve assimetria no escoamento: o perfil de velocidades está deslocado para a parte superior do

canal. A Tabela 15 apresenta os valores das velocidades máximas (U_{max}) e as respectivas posições nas coordenadas y/H .

Tabela 15 - Valores de U_{max} e a correspondente posição em y/H para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$

Q_{real} (m ³ /h)	U_{max} (m/s)	y/H para U_{max}
5	0,22	0,54
5,6	0,25	0,53
6,1	0,28	0,53
6,7	0,30	0,53
7,3	0,33	0,54

Para esta granulometria os valores de velocidade máxima (Tabela 15) se localizam em $y/H = 0,53$ ou $y/H = 0,54$, confirmando a superposição dos perfis de velocidade. Mesmo que no regime hidraulicamente liso, para esta granulometria a assimetria é mais evidente, uma vez que o escoamento está no início do regime de transição e a rugosidade começa a afetar levemente o escoamento. A assimetria para o leito de $160 \mu m$ é menor, pois o escoamento está na fronteira do regime de transição.

A Figura 51 apresenta os perfis de velocidades médias y^+ versus u^+ obtidos para o escoamento turbulento sobre uma parede rugosa fixa de $d_{50} = 360 \mu m$ (parede inferior do canal) e a Figura 52 mostra uma comparação entre o perfil de velocidade obtido para o leito rugoso fixo e a parede superior do canal (parede lisa do canal) nas diferentes vazões ensaiadas. Ambas as figuras apresentam a lei logarítmica (equação (2.17)), representada pela reta, e as legendas indicam os símbolos correspondentes às vazões ensaiadas.

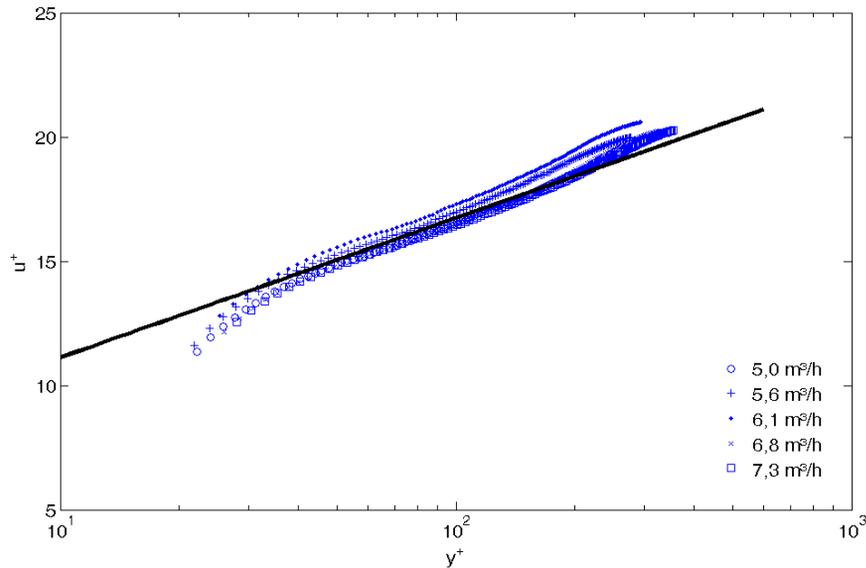


Figura 51 - Perfis das velocidades médias obtidos para as diferentes vazões para escoamento uma parede rugosa (parede inferior do canal) com granulometria de $360 \mu m$. A reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).

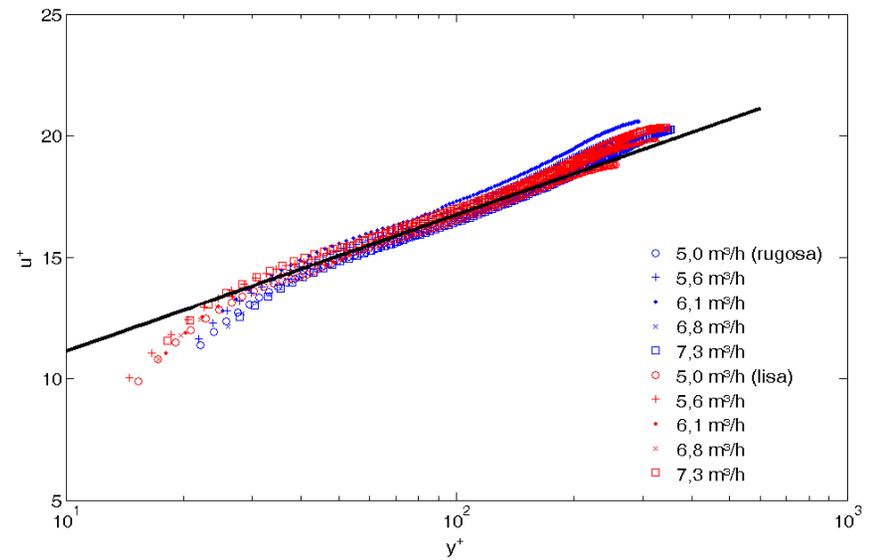


Figura 52 – Perfis das velocidades médias adimensionais obtidas para as diferentes vazões ensaiadas sobre uma parede rugosa com granulometria média de $360 \mu m$ (parede inferior do canal), em azul, e uma parede lisa (parede superior do canal), em vermelho. A reta contínua representa a lei logarítmica dada pela equação (2.17).

O comportamento observado nos perfis de velocidades (Figura 51 e Figura 52) para $d_{50} = 360 \mu m$ é similar ao comportamento obtido para $d_{50} = 160 \mu m$. Os perfis para cada vazão, Figura 51, também apresentam uma curva que obedecem a lei logarítmica, equação (2.17), e se mostraram praticamente coincidentes. Além disso, observando os perfis de velocidades adimensionais obtidos para a parede lisa do canal (Figura 52) pode-se concluir que a parede inferior, parede rugosa, também não foi afetada pela presença das partículas no leito, uma vez que, as curvas obtidas para a parede superior, lisa, e inferior, rugosa, estão sobrepostas.

A Tabela 16 exhibe os parâmetros velocidade de atrito u^* e a constante B, da equação (2.17) (veja seção 3.3.5 para detalhes). Os valores exibidos se referem à parede rugosa (parede inferior), u^* e B, e parede lisa (parede superior), u^*_{sup} e B_{sup} .

Tabela 16 - Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (parede rugosa fixa com $d_{50} = 360 \mu m$), u^* e B, e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup} .

Q_{real} (m ³ /h)	u^*	u^*_{sup}	B	B_{sup}
5	0,0117	0,0119	5,3	5,3
5,6	0,0126	0,0129	5,7	5,8
6,1	0,0134	0,0140	6,0	5,5
6,7	0,0150	0,0153	5,2	5,4
7,3	0,0161	0,0161	5,2	5,8

Assim como ocorreu para $d_{50} = 160 \mu m$, é possível afirmar que a velocidade de atrito, u^* , aumenta com o aumento da vazão e que o valor da constante B para as vazões de escoamento ensaiadas oscila em torno de 5,5, para a parede rugosa e lisa. Isto ocorre uma vez que o regime de escoamento é hidraulicamente liso, como será visto mais adiante no texto (Tabela 26). A partir da Tabela 16 é possível comprovar que a parede lisa apresentou comportamento muito semelhante à parede rugosa, uma vez que os resultados estão bem próximos. A diferença máxima obtida para a velocidade de atrito u^* não ultrapassa 5% e para a constante B, 10%.

O comportamento da velocidade de atrito u^* e da constante B (equação (2.22)) com o número de Reynolds do escoamento é apresentado na Figura 53 e na Figura 54, respectivamente.

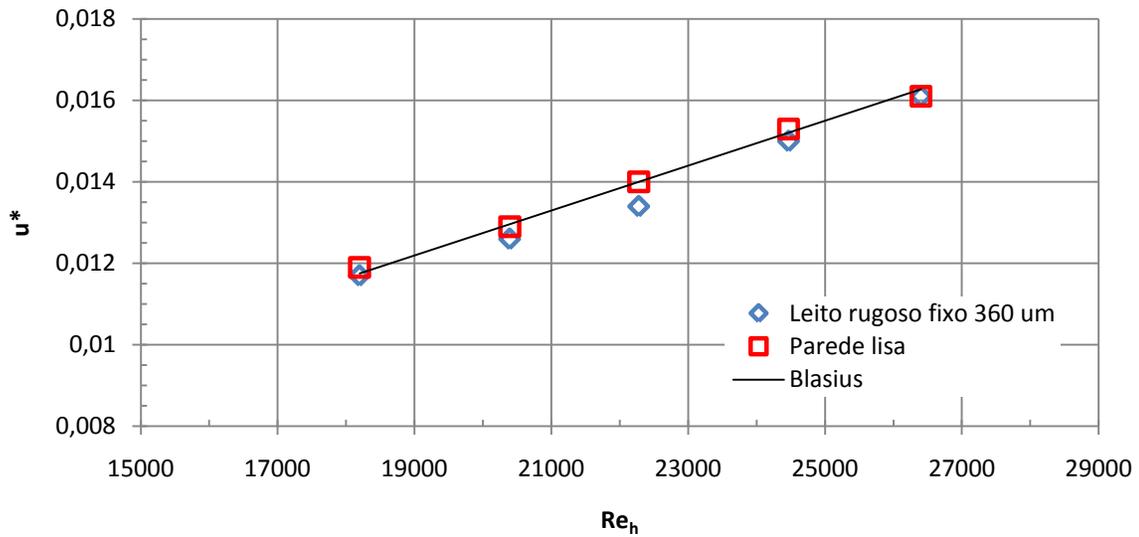


Figura 53 – Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal) comparando com os resultados obtidos pela correlação de Blasius.

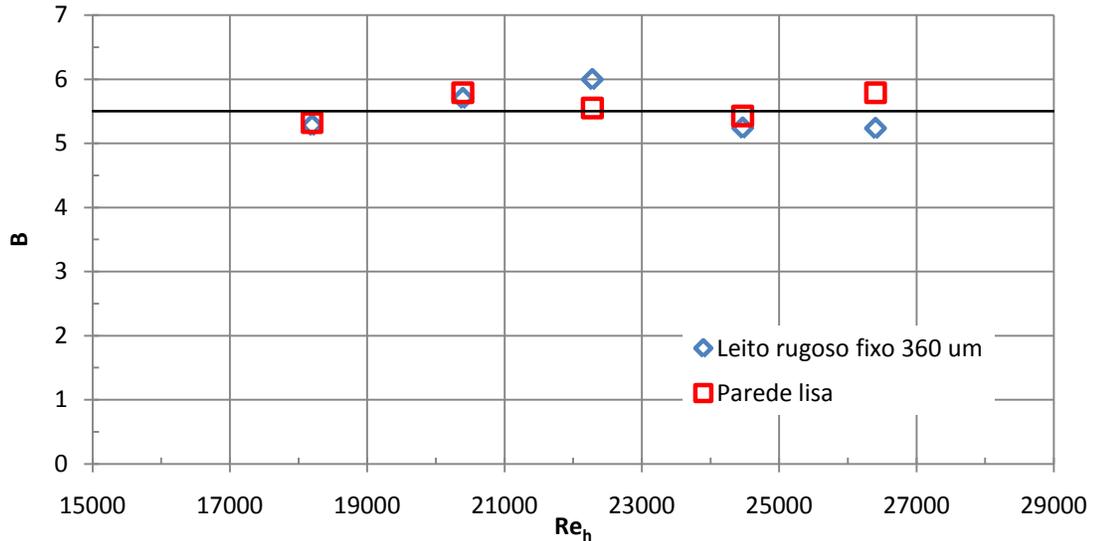


Figura 54 – Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ e sobre uma parede lisa (parede superior do canal). A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo.

O comportamento da velocidade de atrito u^* com o número de Reynolds para um escoamento sobre leito fixo é similar ao comportamento apresentado para escoamento sobre uma parede lisa e é igualmente similar aos resultados obtidos através da correlação de Blasius (equação (2.27)). Veja Figura 53. Os resultados para escoamento sobre parede lisa se mostraram praticamente coincidentes com os obtidos por Blasius, a diferença máxima obtida para a velocidade de atrito foi de 0,0002 m/s para mais e para menos, mostrando espalhamento de resultados não superior a 2 %. Enquanto que para parede rugosa os dados ficaram ligeiramente inferiores a Blasius para todas as vazões: a diferença máxima obtida foi de 0,0006 m/s. Embora isto tenha acontecido, a diferença apresentada não se apresentou superior a 5%. Estes resultados estão na faixa dos apresentados para a $d_{50} = 160 \mu m$: diferença com relação a Blasius menor que 5 %. Então, o uso da correlação de Blasius também é considerado adequado para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso para esta granulometria.

A constante B, equação (2.17), apresentou tendência em torno do valor de 5,5 com o aumento do número de Reynolds, de acordo com a Figura 54: para leito liso, a diferença máxima obtida foi de 0,5 (9%) para mais e 0,3 para, e para leito fixo, a diferença máxima obtida foi de 0,3 (6%) para mais e 0,2 para menos. Estes resultados mostram que a constante B se aproxima de 5,5 e isto era esperado, uma vez que o regime de trabalho é hidraulicamente liso. A reta em $B = 5,5$ é apenas uma referencia para a visualização da constante para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso. O espalhamento dos resultados é semelhante aos obtidos para $d_{50} = 160 \mu m$, com diferença inferior a 15%.

Valores para o comprimento rugoso da parede inferior (rugosa) y_0 , da parede lisa (lisa) $y_{0\ sup}$, do número de Reynolds na escala do grão Re^* e do número de Shields θ são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior y_0 (parede rugosa fixa com $d_{50} = 360 \mu m$) e parede superior $y_{0\ sup}$ (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala (Re^*) do grão e número de Shields (θ)

Q_{real} (m ³ /h)	y_0	y_0 (μm)	$y_{0\ sup}$	$y_{0\ sup}$ (μm)	Re^*	θ
5	d/37	9,7	d/38	9,5	4	0,03
5,6	d/47	7,7	d/50	7,2	5	0,03
6,1	d/57	6,3	d/50	7,2	5	0,03
6,7	d/47	7,7	d/51	7,1	5	0,04
7,3	d/50	7,2	d/63	5,7	6	0,05

Para escoamento sobre leito rugoso fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ (Tabela 17), tem-se $4 \leq Re^* \leq 6$ indicando, de acordo com a Tabela 1, um regime hidraulicamente liso ($Re^* \leq 5$) ou no início da transição de regime hidraulicamente liso para hidraulicamente rugoso ($5 < Re^* < 70$). Para estes regimes de escoamento, o início do aparecimento da rugosidade é mais evidente. Assim, a assimetria apresentada nos perfis de velocidade para esta granulometria (Figura 50) é mais evidente do que a apresentada para a granulometria de $160 \mu m$. Mas pela proximidade com o regime hidraulicamente liso, existe superposição dos perfis de velocidade adimensionais para escoamento sobre parede rugosa com $d_{50} = 360 \mu m$ e parede lisa (Figura 52).

A Tabela 17 também mostra que a rugosidade aparente y_0 para o regime hidraulicamente liso ou transição para rugoso apresenta tendência a decrescer com o aumento da vazão, uma vez que este parâmetro faz escala com o comprimento viscoso, razão entre viscosidade cinemática e velocidade de atrito (V/u^*), equação (2.22). Assim, com o aumento da vazão, aumenta-se a velocidade de atrito e, conseqüentemente, ocorre diminuição de y_0 .

O comprimento rugoso y_0 para $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$ são, aproximadamente, iguais. Para uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $7 \text{ m}^3/\text{h}$, tem-se, respectivamente, $y_0 = 10 \mu m$ e $y_0 = 7,3 \mu m$

para $d_{50} = 160 \mu m$ e $y_0 = 9,7 \mu m$ e $y_0 = 7,2 \mu m$ para $d_{50} = 360 \mu m$. Confirmando que para regime hidraulicamente liso, uma variaç o no tamanho dos gr os n o influencia y_0 .

O fator de atrito experimental (equa o (3.9)), para a parede rugosa e para a parede lisa (superior), juntamente com o fator de atrito de Blasius (equa o (2.25)) est o mostrados na Tabela 18. Esta tabela tamb m fornece a porcentagem de erro dos fatores de atrito experimentais em compara o com o obtido por Blasius. A Figura 61 apresenta o comportamento destes fatores de atrito em fun o do n mero de Reynolds.

Da Tabela 18, comparando o fator de atrito experimental (equa o (3.9)) e o calculado pela correla o de Blasius (equa o (2.25)), observa-se que n o ultrapassa 10 % para o leito fixo e 3 % para a parede lisa. A Figura 55 ilustra o comportamento similar dos valores obtidos experimentalmente e os calculados por Blasius. Ainda a diferen a entre a velocidade de atrito calculada por Blasius (equa o(2.27)) e a experimental n o ultrapassa 5 % para a parede rugosa e 2 % para a parede lisa, uma vez que $f \sim u^{*2}$. Assim, o escoamento sobre leito rugoso fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ apresenta concord ncia entre os dados experimentais e a correla o de Blasius, indicando que o regime de escoamento   hidraulicamente liso e que os procedimentos de medida est o corretos.

Tabela 18 – Valores para os coeficientes de atrito obtidos experimentalmente para o leito rugoso f_{exp} com $d_{50} = 360 \mu m$, parede lisa f_{exp_sup} (parede superior) e atrav s de Blasius f (equa o (2.25)). Porcentagem de erro destes coeficientes de atrito em compara o com o obtido por Blasius ($Erro_{exp}$ e $Erro_{exp_sup}$)

Re_h	f	f_{exp}	f_{exp_sup}	$Erro_{exp}$	$Erro_{exp_sup}$
$1,77 \cdot 10^4$	0,027	0,027	0,028	1%	-2%
$1,99 \cdot 10^4$	0,027	0,025	0,026	6%	2%
$2,16 \cdot 10^4$	0,026	0,024	0,026	9%	1%
$2,39 \cdot 10^4$	0,025	0,025	0,026	3%	-1%
$2,58 \cdot 10^4$	0,025	0,024	0,024	3%	3%

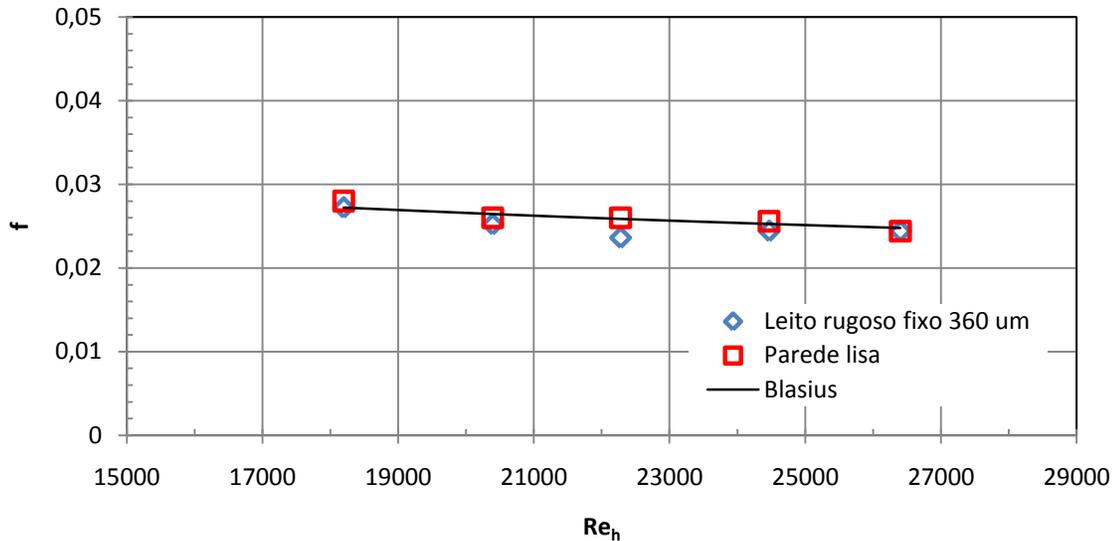


Figura 55 – Variação dos fatores de atrito de Blasius e experimental, para escoamento sobre leito fixo com $d_{50} = 360 \mu m$ e sobre parede lisa (parede superior) em função do número de Reynolds

4.3 Escoamento sobre leito móvel

Esta seção apresenta os resultados experimentais para leito móvel com as granulometrias médias de $160 \mu m$ e $360 \mu m$. Inicialmente, serão apresentados dados relevantes das duas granulometrias para os ajustes dos perfis de velocidade e, posteriormente, serão apresentados os perfis de velocidades para leito móvel.

Para a obtenção do perfil de velocidades é necessário o ajuste das alturas mínima (y_{min}) e máxima (y_{max}) conjuntamente com a distância Δy . Para a determinação destes parâmetros foram assumidas algumas hipóteses e os procedimentos estão descritos na seção 3.3.5. A determinação correta destes parâmetros garante que o perfil de velocidades esteja posicionado de acordo com uma referência conhecida do escoamento, no caso, a interface entre leito granular e escoamento. A Tabela 19 fornece para as duas diferentes granulometrias ($d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$) os

ajustes da altura mínima (y_{min}), altura máxima (y_{max}) e de Δ_y utilizados no escoamento em leito rugoso móvel.

Tabela 19 - y_{min} , y_{max} e Δ_y para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$

	Granulometria na faixa de 106 μm a 212 μm				Granulometria na faixa de 300 μm a 425 μm				
	Q_{real} (m ³ /h)	y_{min} (mm)	y_{max} (m)	Δ_y (mm)	Q_{real} (m ³ /h)	y_{min} (mm)	y_{max} (m)	Δ_y (mm)	
Ensaio A	5,2	0	0,0453	-4,7	Ensaio E	5,3	0,9	0,0448	0,9
	5,8	0	0,0454	-4,6		5,8	0,9	0,0449	1,4
	6,3	0	0,0453	-4,5		6,1	0,9	0,0446	1,0
	6,9	0	0,0455	-4,5		6,8	0,9	0,0451	1,3
	7,5	0	0,0455	-4,6					
Ensaio B	5,3	0	0,0455	-4,6	Ensaio F	5,3	0,9	0,0448	1,2
	5,8	0	0,0455	-4,6		5,9	0,9	0,0452	1,5
	6,3	0	0,0454	-4,6		6,3	0,9	0,0448	1,0
						6,7	0,9	0,0454	1,5
						7,3	0,9	0,0455	1,8
Ensaio C	5,2	0	0,0448	-5	Ensaio G	5,4	0,5	0,0446	1,3
	5,7	0	0,0447	-5,1		5,9	0,5	0,0453	1,7
	6,2	0	0,0450	-4,9		6,4	0,9	0,0451	1,5
						6,8	0,9	0,0455	1,7
Ensaio D	5,3	0	0,0450	-4,8					
	5,8	0	0,0451	-4,8					
	6,3	0	0,0456	-4,35					

Na Tabela 19, os valores de y_{min} para $d_{50} = 160 \mu m$ e $d_{50} = 360 \mu m$ não foram alterados, permanecendo nulo para a primeira granulometria e 0,9 mm para a segunda (com exceção das vazões de 5,2 m³/h e 5,7 m³/h – ensaio G). Os ajustes dos perfis de velocidades foram realizados, então, através de y_{max} e de Δ_y .

Quando o deslocamento de Δ_y no campo de interesse é para baixo com relação à referência da coordenada y , obtém-se um valor negativo deste parâmetro e quando o deslocamento é para cima, obtém-se valor positivo. Esta diferença, positivo/negativo, no deslocamento do campo de interesse para as duas granulometrias ($d_{50} = 160 \mu m$ foram obtidos valores de Δ_y negativos enquanto para $d_{50} = 360 \mu m$, positivos) deve-se a marcação realizada durante a aquisição de imagens para determinar a interface entre leito granular e escoamento. Como dito na seção 3.3.5, esta primeira marcação foi realizada a olho, sem exatidão, e foi necessária para obter os perfis de velocidades.

Diferente do procedimento realizado para leito fixo, o ajuste da região logarítmica, através de y^+ , não foi realizado em conjunto: primeiro foi ajustado Δ_y , para garantir que a distância da parede ao primeiro ponto válido estivesse adequada e, posteriormente, foi ajustada a faixa de y^+ . Os detalhes dos procedimentos estão na seção 3.3.5. Estes ajustes garantem a determinação de diversos parâmetros para o leito móvel, como a constante B do perfil logarítmico expresso pela equação (2.17). A faixa de valores de y^+ utilizada em cada vazão, para a parede inferior do canal (parede rugosa, y^+) e a parede superior do canal (parede lisa, $y^{+ superior}$), durante o escoamento em leito rugoso móvel para as duas diferentes granulometrias pode ser observada na Tabela 20.

Tabela 20 - Faixa de valores de y^+ adotada, para a parede superior (y^{+sup}) e inferior (y^+), para o perfil de velocidades adimensionais quando se analisa o escoamento em leito rugoso móvel

	Granulometria na faixa de 106 μm a 212 μm			Granulometria na faixa de 300 μm a 425 μm			
	Q_{real} (m ³ /h)	y^+	y^{+sup}	Q_{real} (m ³ /h)	y^+	y^{+sup}	
Ensaio A	5,2	20< y^+ <140	30< y^+ <100	Ensaio E	5,3	50< y^+ <140	30< y^+ <110
	5,8	20< y^+ <120	60< y^+ <150		5,8	30< y^+ <150	30< y^+ <110
	6,3	25< y^+ <75	60< y^+ <150		6,1	30< y^+ <150	30< y^+ <150
	6,9	25< y^+ <70	60< y^+ <150		6,8	50< y^+ <110	30< y^+ <110
	7,5	30< y^+ <180	50< y^+ <150				
Ensaio B	5,3	25< y^+ <150	50< y^+ <150	Ensaio F	5,3	30< y^+ <160	30< y^+ <90
	5,8	30< y^+ <160	30< y^+ <120		5,9	40< y^+ <200	30< y^+ <90
	6,3	30< y^+ <160	50< y^+ <150		6,3	30< y^+ <160	30< y^+ <90
					6,7	35< y^+ <85	30< y^+ <90
					7,3	35< y^+ <90	30< y^+ <130
Ensaio C	5,2	30< y^+ <160	50< y^+ <150	Ensaio G	5,4	30< y^+ <130	30< y^+ <110
	5,7	30< y^+ <160	30< y^+ <120		5,9	30< y^+ <160	30< y^+ <110
	6,2	30< y^+ <160	30< y^+ <100		6,4	30< y^+ <160	30< y^+ <110
					6,8	30< y^+ <80	30< y^+ <110
Ensaio D	5,3	30< y^+ <160	50< y^+ <150				
	5,8	30< y^+ <160	50< y^+ <150				
	6,3	30< y^+ <160	50< y^+ <150				

De acordo com a Tabela 20, para as duas granulometrias, a faixa de valores de y^+ obtida para a parede superior, parede lisa, se mostrou similar quando analisada dentro de um mesmo ensaio. Diversos fatores podem contribuir para que a faixa de valores de y^+ se torne similar dentro de um mesmo ensaio e distinta quando comparada com outros ensaios como, por exemplo, o ajuste da altura mínima (y_{min}), altura máxima (y_{max}) e de Δ_y em cada caso e até mesmo a existência de reflexo do leito e da parede acrílica do canal. Apesar de existir alguma similaridade na faixa de y^+ para cada ensaio, a obtenção é realizada individualmente para cada vazão.

Da Tabela 20, as faixas de y^+ obtidas para a parede inferior, parede rugosa, não obedeceram um padrão, principalmente, para $d_{50} = 360 \mu m$. Como já comentado, a obtenção da faixa de y^+ que melhor representa a região logarítmica pode ter sido influenciada pela presença de reflexo do leito de partículas ou até mesmo pela acomodação das partículas no leito (*'armouring'*) e seu ajuste foi realizado, de maneira que, os dados experimentais representassem a região intermediária da camada limite turbulenta de maneira coerente com a literatura (White, 1991). Assim, sabendo que a faixa de y^+ é obtida a partir da análise do comportamento individual do perfil de velocidade de cada vazão, é esperado que não sejam idênticas, mas bem próximas.

4.3.1 Resultados para $d_{50} = 160 \mu m$

Nesta seção serão apresentados os resultados para o leito rugoso móvel com $d_{50} = 160 \mu m$.

A obtenção dos perfis de velocidades médias é importante para uma análise preliminar do comportamento do leito rugoso móvel. Assim, a Figura 56 a), b), c) e d) apresenta, respectivamente, os perfis de velocidades médias adimensionalizados a partir de escalas externas para os ensaios A, B, C e D com um leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$. Todas imagens da Figura 56 apresentam linha de simetria e cada vazão utilizada é indicada com uma cor como mostra a legenda. Sabendo que as imagens capturadas possuem um campo de 70 mm x 70 mm (para os testes realizados com leito móvel) dividido em 512 zonas de interrogação com 0,14 mm x 0,14 mm de resolução, os perfis de velocidades adimensionalizados por escalas externas são representados por linhas contínuas e não por símbolos. Os mais de 500 pontos experimentais gerados pela resolução causariam confusão na representação dos perfis.

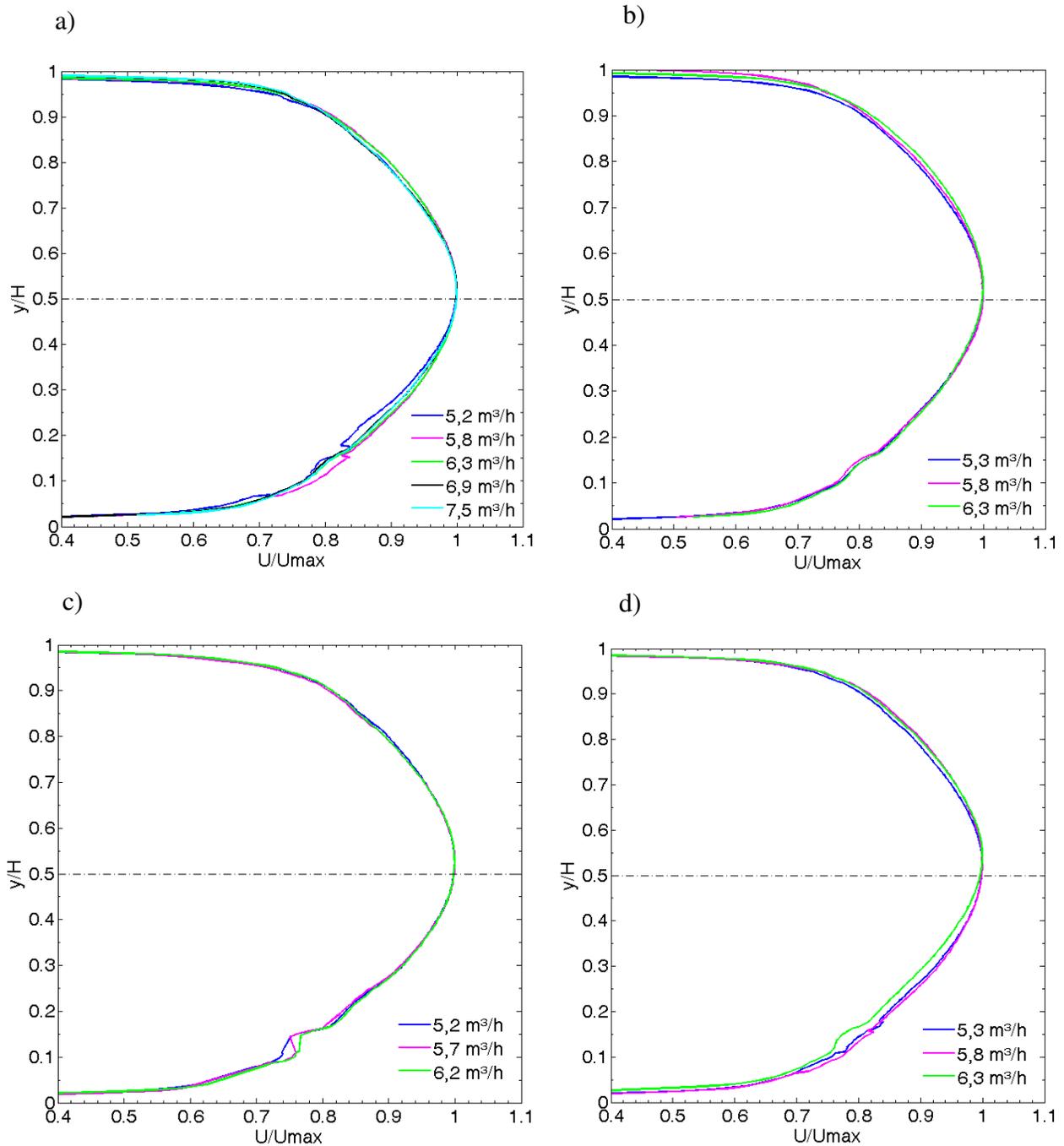


Figura 56 - Perfis de velocidades médias adimensionais obtidos no ensaio com leito rugoso móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ para os ensaios: a) ensaio A; b) ensaio B; c) ensaio C; d) ensaio D.

O comportamento observado na Figura 56 para leito móvel utilizando uma granulometria média de $160 \mu m$, foi que o aumento da vazão não altera significativamente o perfil de

velocidades dentro de um mesmo ensaio, apenas apresenta apenas uma leve assimetria, como será visto na Tabela 21. Dos ensaios realizados observa-se que variando a vazão de, aproximadamente, 5 m³/h para, aproximadamente, 6,5 m³/h, não foram observadas alterações entre os perfis de velocidades apresentados. Deste modo, assim como ocorreu com o escoamento sobre leito fixo, os perfis de velocidades adimensionalizados, a partir de escalas externas, apresentam uma superposição para as diferentes vazões ensaiadas.

Nos perfis de velocidades da Figura 56 pode ser observada a existência de uma leve distorção nas regiões $0,1 < y/H < 0,2$ e $0,8 < y/H < 0,95$. Apesar de alguns ensaios apresentarem esta distorção mais acentuada no perfil de velocidades, como é o caso do ensaio C (Figura 56 c)), a sua existência deve-se: a presença de reflexo das partículas do leito e/ou do canal de acrílico durante a aquisição das imagens. Este reflexo influenciou o perfil de velocidades somente nas regiões indicadas, não sendo necessário descartar todo o campo de velocidades. Como será mostrado nas seções seguintes, os resultados obtidos a partir dos perfis de velocidades, que apresentam esta distorção, não foram fortemente afetados pela presença deste reflexo.

A linha de simetria presente na Figura 56 e os valores obtidos para as velocidades máximas (U_{max}) e as respectivas posições, na coordenada y/H , presentes na Tabela 21 evidenciam, novamente (como para o caso do escoamento sobre leito rugoso fixo), a existência de leve assimetria no perfil de velocidades.

Tabela 21 - Valores de U_{max} e a correspondente posição em y/H para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$

	Q_{real} (m ³ /h)	U_{max} (m/s)	y/H para U_{max}
Ensaio A	5,2	0,24	0,53
	5,8	0,26	0,53
	6,3	0,28	0,51
	6,9	0,31	0,53
	7,5	0,33	0,50
Ensaio B	5,3	0,24	0,52
	5,8	0,26	0,52
	6,3	0,28	0,53
Ensaio C	5,2	0,24	0,53
	5,7	0,26	0,53
	6,2	0,28	0,52
Ensaio D	5,3	0,24	0,53
	5,8	0,26	0,52
	6,3	0,28	0,55

Para todas as vazões, y/H para a velocidade máxima está em torno de 0.53. Isto mostra a existência de assimetria no perfil de velocidades e também a aproximação obtida entre as diferentes vazões.

Considerando que o perfil simétrico teria sua velocidade máxima em $y/H = 0,50$, a diferença entre um perfil simétrico e assimétrico ($y/H = 0,53$) seria de, aproximadamente, $y/H = 0,03$. Sabendo que H (altura onde ocorre de fato o escoamento dentro do canal) tem valor de, aproximadamente, 43 mm, a diferença entre os perfis é da ordem de 1,3 mm. Este valor representa, para um leito com grãos de $160 \mu m$, 8 partículas. Logo, a assimetria observada no perfil de velocidades equivale a 8 grãos de d_{50} ($160 \mu m$) e para um escoamento em leito móvel, esta diferença pode ter sido gerada por uma pequena diferença na altura inicial do leito solto ou

mesmo pela movimentação dos grãos no leito durante o escoamento. Lembrando que o PIV tem resolução de 0,14 mm x 0,14 mm, este valor está na faixa de resolução de captura do equipamento.

O aumento da vazão dentro de um mesmo ensaio leva ao aumento da assimetria do perfil, porém como observado na Figura 56 para a granulometria de $d_{50} = 160 \mu\text{m}$, não foi observado este comportamento. Esta granulometria provavelmente sofreu efeito da acomodação dos grãos no leito (em inglês, 'armouring') durante o escoamento. Alguns resultados, que serão mostrados no desenvolvimento do trabalho, poderão justificar esta afirmação.

Outra maneira de visualizar o comportamento dos perfis de velocidade média é compará-los para uma mesma vazão, para o ensaio com leito fixo e os ensaios com leito móvel. Desta forma, é possível observar os efeitos do transporte no escoamento sobre leito fixo. A Figura 57 e a Figura 58 apresentam os perfis de velocidade média adimensionalizados a partir de escalas internas para as vazões: a) 5,5 m³/h; b) 6 m³/h e a) 6,5 m³/h; b) 7 m³/h; c) 7,5 m³/h, respectivamente.

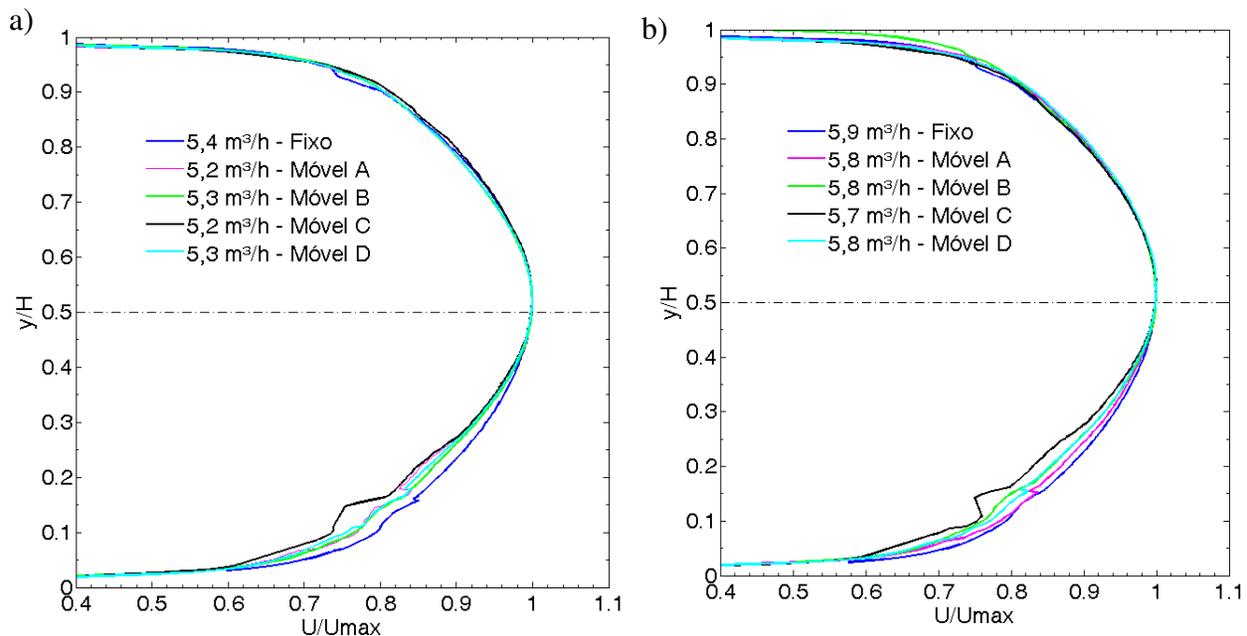


Figura 57 - Perfis de velocidade média adimensional obtidos para o ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 160 \mu\text{m}$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) 5,5 m³/h; b) 6 m³/h.

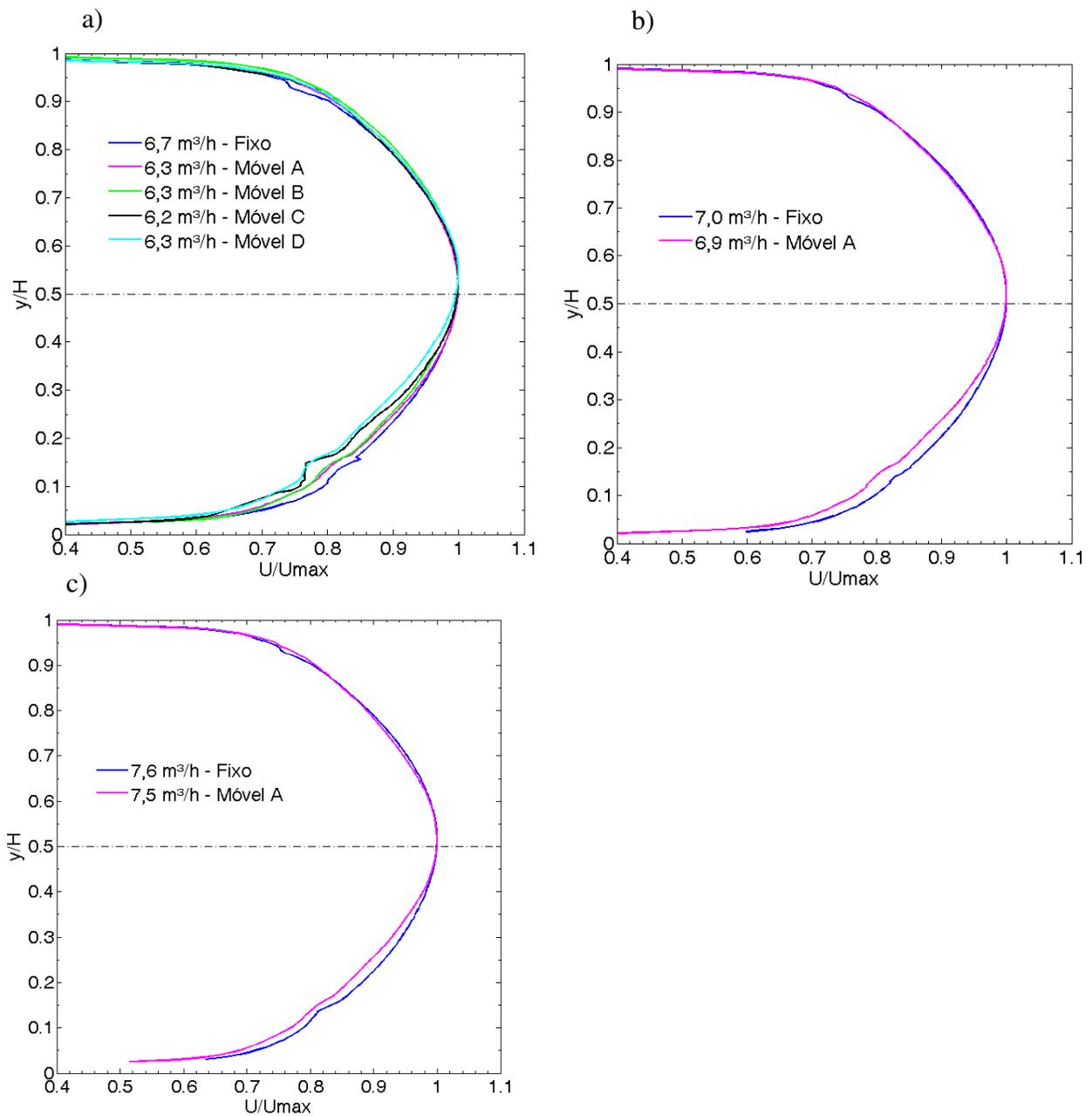


Figura 58 - Perfis de velocidade média adimensional obtidos para o ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) 6,5 m³/h; b) 7 m³/h; c) 7,5 m³/h.

Sabendo que o limite de mobilidade dos grãos é próximo da vazão de 5,5 m³/h, é esperado que nesta vazão o perfil de velocidades para leito granular móvel não tenha seu comportamento muito diferente do perfil de velocidades para leito granular fixo. Nesta condição, é esperado que a densidade de grãos móveis (razão entre grãos móveis e estáticos) seja muito baixa, causando pouco efeito no perfil de velocidades. A Figura 57 a) e b) mostra, respectivamente, os perfis de velocidades obtidos para as vazões de, aproximadamente, 5,5 m³/h e 6 m³/h. Nota-se que os perfis de velocidade estão quase superpostos, indicando o efeito desprezível da vazão de água na mobilidade dos grãos. Em geral, os perfis não estão completamente superpostos devido diferenças mínimas de vazão entre os escoamentos. Quando aumenta-se a vazão para 6,5 m³/h, 7 m³/h e 7,5 m³/h (Figura 58 itens c), d) e e), respectivamente) o esperado é que os perfis de velocidade para os ensaios em leito móvel se deslocassem sutilmente com relação ao ensaio em leito fixo, porém como a granulometria analisada é muito pequena, sua influência no perfil de velocidades é quase imperceptível e assim não se observa grandes alterações.

Os perfis de velocidade mostram, novamente, a existência de distorções nas regiões $0,1 < y/H < 0,2$ e $0,8 < y/H < 0,95$. Como já comentado, estas torções tiveram origem na saturação das imagens geradas pelo PIV a partir de reflexos indesejados do canal.

A Figura 59 mostra o perfil de velocidade média adimensional $y^+ x u^+$ sobre leito rugoso fixo (em azul) e móvel (em vermelho) com $d_{50} = 160 \mu m$. Figura 59 apresenta os resultados para os ensaios: a) A, b) B, c) C e d) D. A Tabela 7 e a Tabela 8 fornecem a correspondência entre as vazões de escoamento e os símbolos empregados nos gráficos.

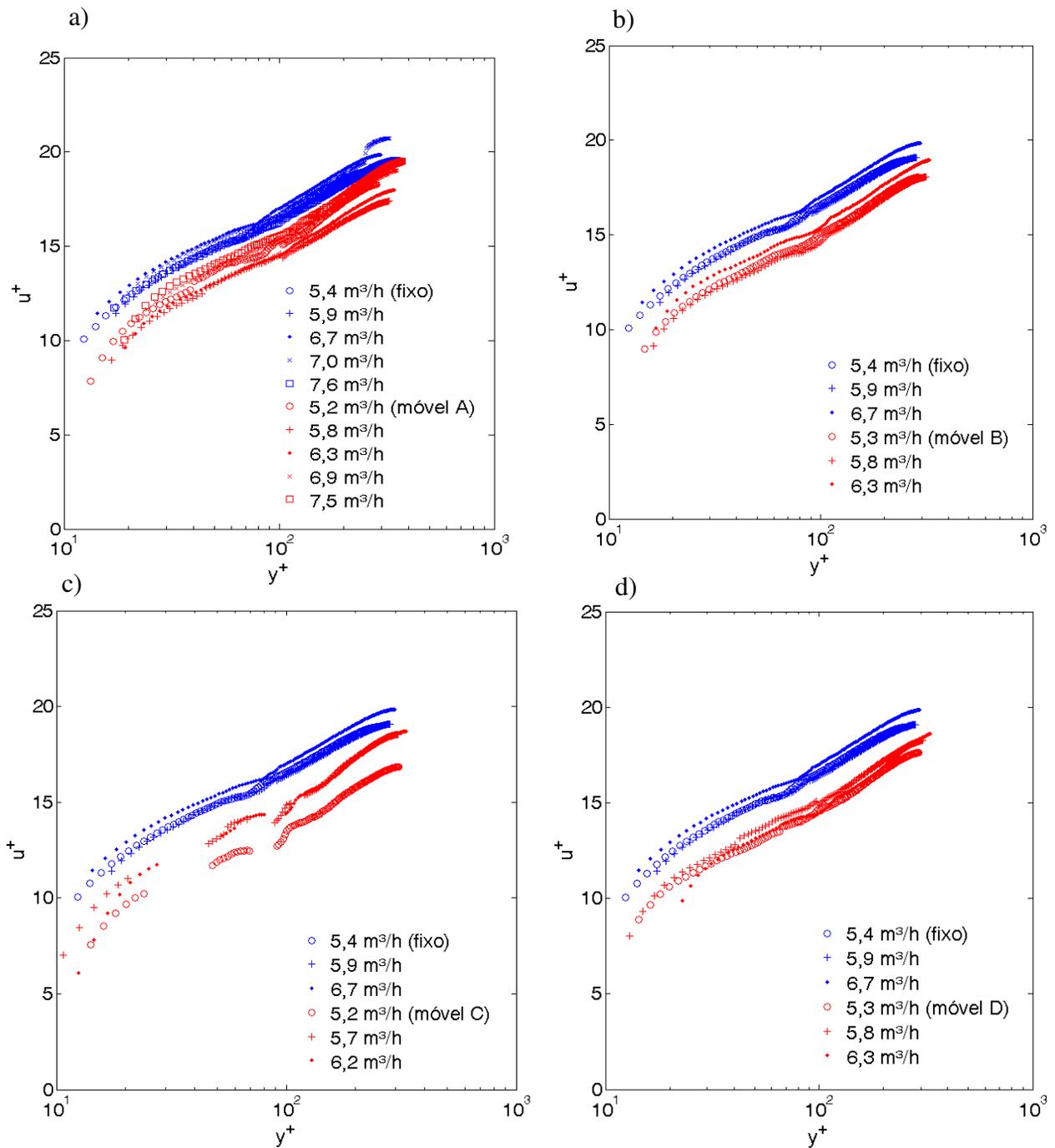


Figura 59 - Perfis das velocidades médias adimensionais para leito rugoso fixo (em azul) e móvel (em vermelho) com $d_{50} = 160 \mu m$ para os ensaios a) A; b) B; c) C; d) D.

Da Figura 59 é possível observar com mais precisão os efeitos da mobilidade dos grãos no escoamento, pois as diferenças entre leito móvel e fixo nas sub-camadas mais próximas às paredes se tornam mais acentuadas com a normalização nas escalas internas. Comparando os perfis sobre leito granular móvel e fixo, Figura 59, observa-se que os perfis são similares: apresentam uma região logarítmica acima do leito. No entanto, os perfis de velocidade (representados por $y^+ \times u^+$) para leito granular móvel estão localizados em posições transversais mais altas (para uma mesma velocidade adimensional u^+ , será obtido um valor maior de y^+ para leito móvel). A localização dos perfis para leito móvel abaixo dos perfis para leito fixo, na Figura 59, é reflexo da transposição das coordenadas na representação. Esta disposição dos perfis de velocidade para leito móvel corresponde a valores menores para a constante B, quando comparados com aos perfis para leito fixo. Os valores para a constante B e para as velocidades de atrito u^* , para $d_{50} = 160 \mu m$, estão na Tabela 22.

Conforme a velocidade de escoamento aumenta, a densidade de grãos móveis também aumenta, desacelerando o fluido da camada inferior do escoamento. Pela conservação da massa, a camada superior do escoamento é acelerada causando um aumento na assimetria do perfil de velocidades. Se o escoamento de fluido está próximo ao limite de mobilidade dos grãos, a transferência de quantidade de movimento na camada inferior é menor, então, a desaceleração perto do leito e a aceleração na região central é pouco notada, assim a velocidade de atrito é quase a mesma que no caso de leito fixo. Já para vazões altas, o perfil de velocidades para leito móvel se afasta do perfil de velocidades para leito fixo e este comportamento pode ser observado nos ensaios da Figura 59. Devido a utilização de filtro de vetores e, conseqüentemente, a eliminação de regiões de saturação geradas a partir do reflexo, o perfil logarítmico do ensaio C (Figura 59) possui duas grandes falhas, se tornando segmentado. Apesar da existência destas regiões, seu comportamento é similar aos dos demais ensaios.

Assim, para um escoamento próximo ao limite de mobilidade dos grãos, a transferência de quantidade de movimento que ocorre na camada inferior do escoamento é menor, então a desaceleração perto do leito e a aceleração nas regiões acima são menos acentuadas. Desta forma, o perfil de velocidade para leito móvel em vazões mais baixas se aproxima do perfil de velocidade para leito fixo. Este comportamento é melhor visualizado ao comparar os perfis de

velocidade para leito fixo e leito móvel em função de cada vazão, como mostram a Figura 60 e a Figura 61. Assim, a Figura 60 e a Figura 61 apresentam os perfis de velocidade para as vazões: a) 5,5 m³/h; b) 6 m³/h e a) 6,5 m³/h; b) 7 m³/h; c) 7,5 m³/h, respectivamente.

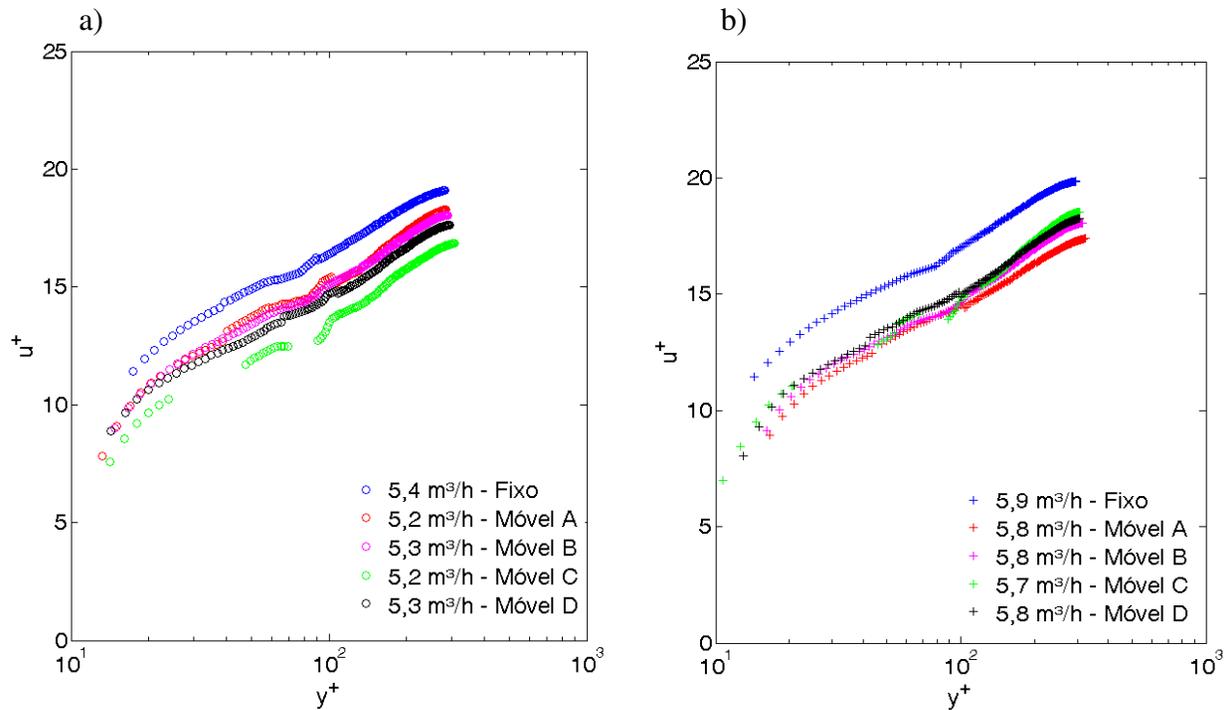


Figura 60 - Perfis das velocidades médias adimensionais obtidos através do ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel para $d_{50} = 160 \mu m$. Vazões representativas de cada ensaio: a) 5,5 m³/h; b) 6 m³/h.

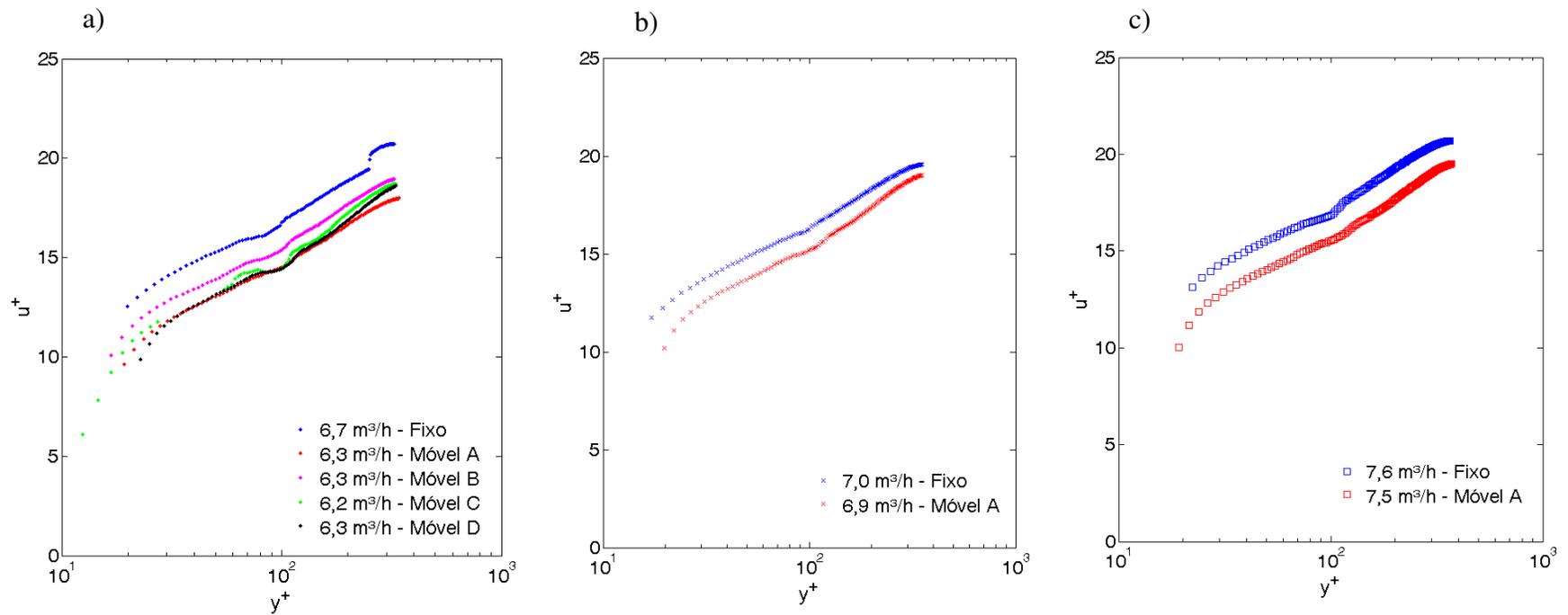


Figura 61 - Perfis das velocidades médias adimensionais obtidos através do ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel para $d_{50} = 160 \mu\text{m}$. Vazões representativas de cada ensaio: a) $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $7 \text{ m}^3/\text{h}$; c) $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os perfis de velocidade para uma mesma vazão se mostraram aproximadamente coincidentes para quase todos os ensaios em leito móvel. Os pequenos deslocamentos entre um ensaio e outro se devem, provavelmente, a não obtenção de uma exata vazão em todos os ensaios e a compactação do leito granular (*'armouring'*). No desenvolvimento do trabalho serão mostradas quais vazões podem ser descartadas de forma a melhorar a análise dos resultados.

A partir dos perfis de velocidade média adimensionalizados, Figura 59, Figura 60 e Figura 61, tem-se as diferentes regiões que compõem o escoamento, como foi proposto por Bagnold (1941) para o caso eólico: a região interna ($y^+ < 40$), perto da camada de saltação, onde os efeitos da transferência de quantidade de movimento são fortes e desaceleram o escoamento de líquido. No trabalho, esta região teve a maior incidência de reflexos do leito e da parede do canal, mas ainda assim é possível observar alguma desaceleração do escoamento; a região externa ($y^+ > 200$), longe o suficiente da camada de saltação (perto da região central do canal) onde o escoamento de fluido deve ter um comportamento similar àquele sobre leito fixo; a região intermediária ($50 < y^+ < 150$) que, como no caso das camadas limites turbulentas sobre leito fixo, devem apresentar um comportamento logarítmico.

A Figura 59, a Figura 60 e a Figura 61 mostram que a mobilidade dos grãos causa um efeito na camada limite equivalente a introdução de uma rugosidade no leito, reduzindo o valor da constante B. Para escoamento sobre leito fixo e regime hidraulicamente liso tem-se $B = 5,5$ (Schlichting, 2000) e para escoamento sobre leitos móvel e regime hidraulicamente liso, foi obtido um valor de B distinto e inferior a $B = 5,5$. A Tabela 22 apresenta os valores obtidos para a constante B e a velocidade de atrito u_* para a parede inferior (leito rugoso móvel com $d_{50} = 160 \mu m$) e a parede superior (parede lisa).

A Figura 62 apresenta o comportamento da velocidade de atrito com o número de Reynolds para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$ e compara, também, os resultados obtidos com a correlação de Blasius.

A constante B para o caso de escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$, apresentada na Tabela 22, apresenta dispersão, assim, os resultados de B são apresentados na Figura 63 para facilitar sua visualização. Nesta figura, os resultados obtidos para escoamento sobre leito fixo para mesma granulometria também são apresentados e a reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso.

Tabela 22 - Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$), u^* e B, e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup} .

	Q_{real} (m ³ /h)	u^*	u^*_{sup}	B	B_{sup}
Ensaio A	5,2	0,0129	0,0121	3,9	5,9
	5,8	0,0148	0,0135	3,3	5,3
	6,3	0,0156	0,0147	3,5	5,2
	6,9	0,0161	0,0152	4,2	5,7
	7,5	0,0170	0,0162	4,4	5,9
Ensaio B	5,3	0,0131	0,0126	3,8	5,1
	5,8	0,0144	0,0133	3,6	5,4
	6,3	0,0148	0,0148	4,4	5,2
Ensaio C	5,2	0,0140	0,0126	2,3	5,3
	5,7	0,0139	0,0133	3,6	5,6
	6,2	0,0151	0,0147	3,7	5,3
Ensaio D	5,3	0,0134	0,0123	3,4	5,6
	5,8	0,0140	0,0133	3,9	5,8
	6,3	0,0151	0,0143	3,5	5,8

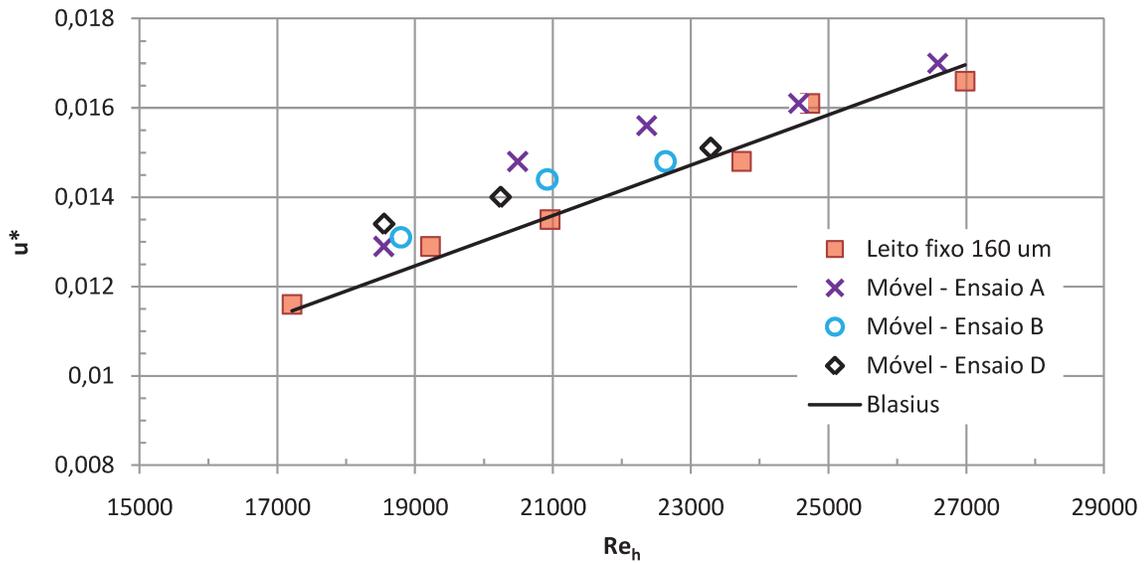


Figura 62 - Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre leitos fixo e móvel, ambos com $d_{50} = 160 \mu m$, comparando com os resultados obtidos pela correlação de Blasius

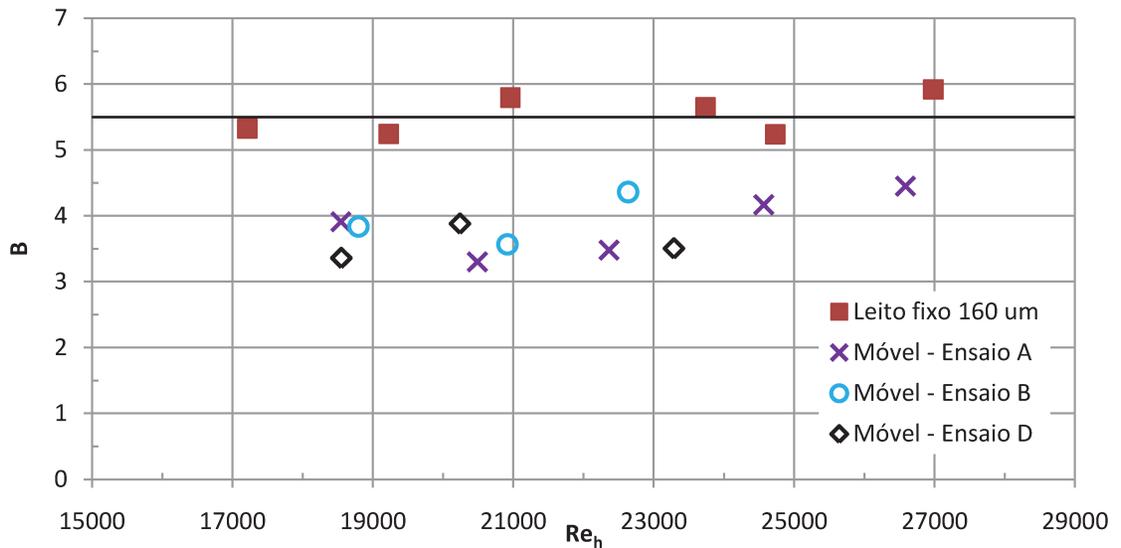


Figura 63 – Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo e sobre leito móvel, ambos com $d_{50} = 160 \mu m$. A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo em regime hidraulicamente liso.

A Figura 62 mostra que a velocidade de atrito para leito móvel é superior aos resultados apresentados pela correlação de Blasius. Os resultados mostram que os ensaios A e B apresentam dispersão: ocorre um aumento da velocidade de atrito u^* e posterior diminuição com o número de Reynolds, se aproximando dos resultados obtidos para leito fixo com a mesma granulometria. Ao analisar os resultados para leito móvel de maneira geral, observa-se uma distribuição média de 0,0008 m/s acima da correlação de Blasius, com espalhamento de, aproximadamente, 0,0006 m/s para cima e para baixo. O espalhamento obtido para leito móvel é da mesma ordem de grandeza do espalhamento obtido para leito fixo (uma referência adquirida dos resultados experimentais para validar os resultados para leito móvel) colocando este comportamento de aproximação sob suspeita, uma vez que a tendência dos resultados pode se tornar distinta. Porém, não se pode descartar o comportamento e a provável evidência da presença de ‘*armouring*’.

O comportamento da constante B com o aumento do número de Reynolds mostra que foram obtidos valores inferiores aos obtidos para leito fixo. Ao realizar uma média aritmética dos dados obtidos, obtém-se $B = 3,8$, com uma distribuição de valores em torno de 0,5 para mais e para menos ($3,3 < B \text{ (móvel)} < 4,4$). Porém, ao analisar, o comportamento ensaio a ensaio para a constante B: ocorre uma diminuição e posterior aumento com o número de Reynolds, aproximando os resultados novamente para o leito fixo, para os ensaios A e B. O ensaio D obteve comportamento distinto, de aproximação e posterior afastamento. Este comportamento dos ensaios pode ser colocado sob suspeita ao se basear no espalhamento de dados para leito fixo, de 0,4 para mais e para menos com relação a $B = 5,5$. Mas os resultados obtidos não podem ser ignorados, evidenciando a provável presença de ‘*armouring*’ no escoamento.

O ‘*armouring*’ nesta granulometria pode agir da seguinte forma: com o aumento da vazão e com o passar do tempo, aumenta-se a mobilidade dos grãos mas estes encontram lacunas onde acabam se depositando. Assim, o observado no trabalho foi que com o aumento da vazão, o leito se tornou cada vez mais compacto e o comportamento se aproximou ao do leito fixo. Porém, não é possível afirmar que um aumento da vazão, acima do apresentado neste trabalho, seria capaz de desalojar os grãos das lacunas e retomar a mobilidade do leito, uma vez que o aumento da vazão tende a diminuir o tempo característico de formação de rugas (Franklin, 2010). Por exemplo, o limite superior das vazões ensaiadas no trabalho é o tempo característico para a formação de instabilidades iniciais no leito que dá origem às rugas (este tempo varia inversamente com a

velocidade de atrito (Franklin, 2010)). No caso dos ensaios com vazões mais elevadas, alguns chegaram a ser descartados pela presença de rugas na seção de testes, logo se formaram em um tempo característico da ordem de duração do ensaio. Assim, o efeito de compactação do leito se torna particular em cada ensaio e a identificação é importante para garantir resultados adequados.

A determinação da velocidade de atrito u^* e da constante B torna a compreensão da rugosidade aparente y_0 mais acessível. A Tabela 23 apresenta os valores para a rugosidade y_0 , para o número de Reynolds na escala do grão Re^* e para o número de Shields do escoamento θ .

Tabela 23 – Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior y_0 (leito móvel com $d_{50} = 160 \mu m$) e parede superior $y_{0 \text{ sup}}$ (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala do grão (Re^*) e número de Shields (θ)

	Q_{real} (m ³ /h)	y_0	y_0 (μm)	$y_{0 \text{ sup}}$	$y_{0 \text{ sup}}$ (μm)	Re^*	θ
Ensaio A	5,2	d/10	16,0	d/21	7,6	2	0,07
	5,8	d/9	17,8	d/18	8,9	2	0,09
	6,3	d/10	16,0	d/20	8,0	2	0,10
	6,9	d/14	11,4	d/26	6,2	3	0,11
	7,5	d/17	9,4	d/29	5,5	3	0,12
Ensaio B	5,3	d/10	16,0	d/16	10,0	2	0,07
	5,8	d/10	16,0	d/19	8,4	2	0,09
	6,3	d/14	11,4	d/20	8,0	2	0,09
Ensaio C	5,2	d/6	26,7	d/18	8,9	2	0,08
	5,7	d/10	16,0	d/21	7,6	2	0,08
	6,2	d/11	14,5	d/20	8,0	2	0,10
Ensaio D	5,3	d/8	20,0	d/20	8,0	2	0,08
	5,8	d/11	14,5	d/22	7,3	2	0,08
	6,3	d/10	16,0	d/24	6,7	2	0,10

O número de Shields crítico θ_c (abaixo deste limite o leito granular pode ser considerado estático) para um valor de $Re^* = 2$ é $\theta_c = 0,06$ (veja Figura 4, seção 2.2). Assim, pode-se afirmar que nas vazões de, aproximadamente, 5 m³/h, 5,5 m³/h, 6 m³/h e 6,5 m³/h o leito estava um pouco acima do limite de mobilidade dos grãos, uma vez que foi obtido $0,07 \leq \theta \leq 0,10$ para $Re^* = 2$. O deslocamento dos perfis de velocidade na Figura 61 a), b), c) e d), com relação aos perfis de velocidade para leito fixo, confirma a existência de mobilidade dos grãos nesta faixa de vazão. Importante ressaltar que o Diagrama de Shields, Figura 4, é apenas uma indicação do estado de um leito solto, uma vez que é baseado em dados de diversos autores e possui considerável dispersão.

A maior densidade do fluido ao se utilizar água, em comparação com o ar, significa menor redução de velocidade para a mesma transferência de quantidade de movimento. Isto significa que, para um dado leito granular móvel, o limite de mobilidade dos grãos ocorre em gradientes de velocidades menores (e menores velocidades), então isto pode ocorrer em regimes hidraulicamente lisos ($Re^* \leq 5$). A Figura 61 mostra o deslocamento dos perfis de velocidade com o aumento da mobilidade dos grãos, muito similar ao caso aeólico (no regime hidraulicamente rugoso) (Figueiredo, 2011).

Assim, para escoamento de líquido em regime hidraulicamente liso ($Re^* \leq 5$), como é o caso do trabalho, os efeitos do transporte de grãos (*'feed-back effect'*) no escoamento são similares àqueles propostos por Bagnold (1941): a transferência de quantidade de movimento do fluido para os grãos móveis desaceleram o líquido na região próxima ao leito, deslocando os perfis de velocidade mas mantendo a mesma forma normalizada. Este deslocamento será equivalente ao aumento da rugosidade efetiva y_0 (Figueiredo, 2011), embora no regime hidraulicamente liso, como pode ser observado comparando os resultados obtidos para y_0 (μm) para leito fixo, Tabela 17, com os resultados obtidos para leito móvel, Tabela 23.

A análise do comportamento de y_0 com o número de Reynolds, Figura 64, indica que ocorreu uma diminuição com o aumento de Re_h . Este comportamento é mais um indicativo da existência de *'armouring'* no leito: ao ligar a bomba, as partículas são deslocadas e transportadas, encontram interstícios no leito onde ficam aprisionadas. O leito se torna, então, mais compacto e

se aproxima de um leito estacionário porque menos partículas são colocadas em movimento. Assim, devido a compactação do leito de partículas, com o aumento da vazão, o comportamento observado do leito se aproxima ao apresentado para um leito fixo.

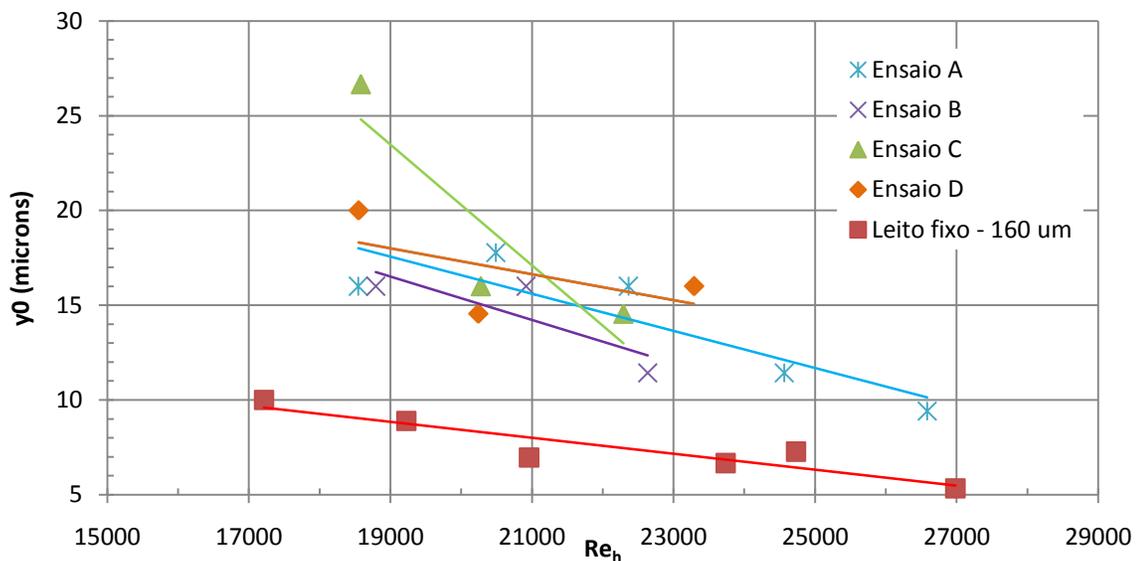


Figura 64 - Distribuição dos valores e a linha de tendência de y_0 com o número de Reynolds para os ensaios A, B, C e D na granulometrias $160 \mu m$

4.3.2 Resultados para $d_{50} = 360 \mu m$

Nesta seção serão apresentados os perfis e os resultados obtidos para o leito rugoso móvel para a granulometria média de $360 \mu m$ na mesma seqüência que os dados foram apresentados na seção anterior.

A Figura 65 a), b) e c) apresenta, respectivamente, os perfis de velocidades médias adimensionalizados a partir de escalas externas para os ensaios E, F e G sobre um leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$.

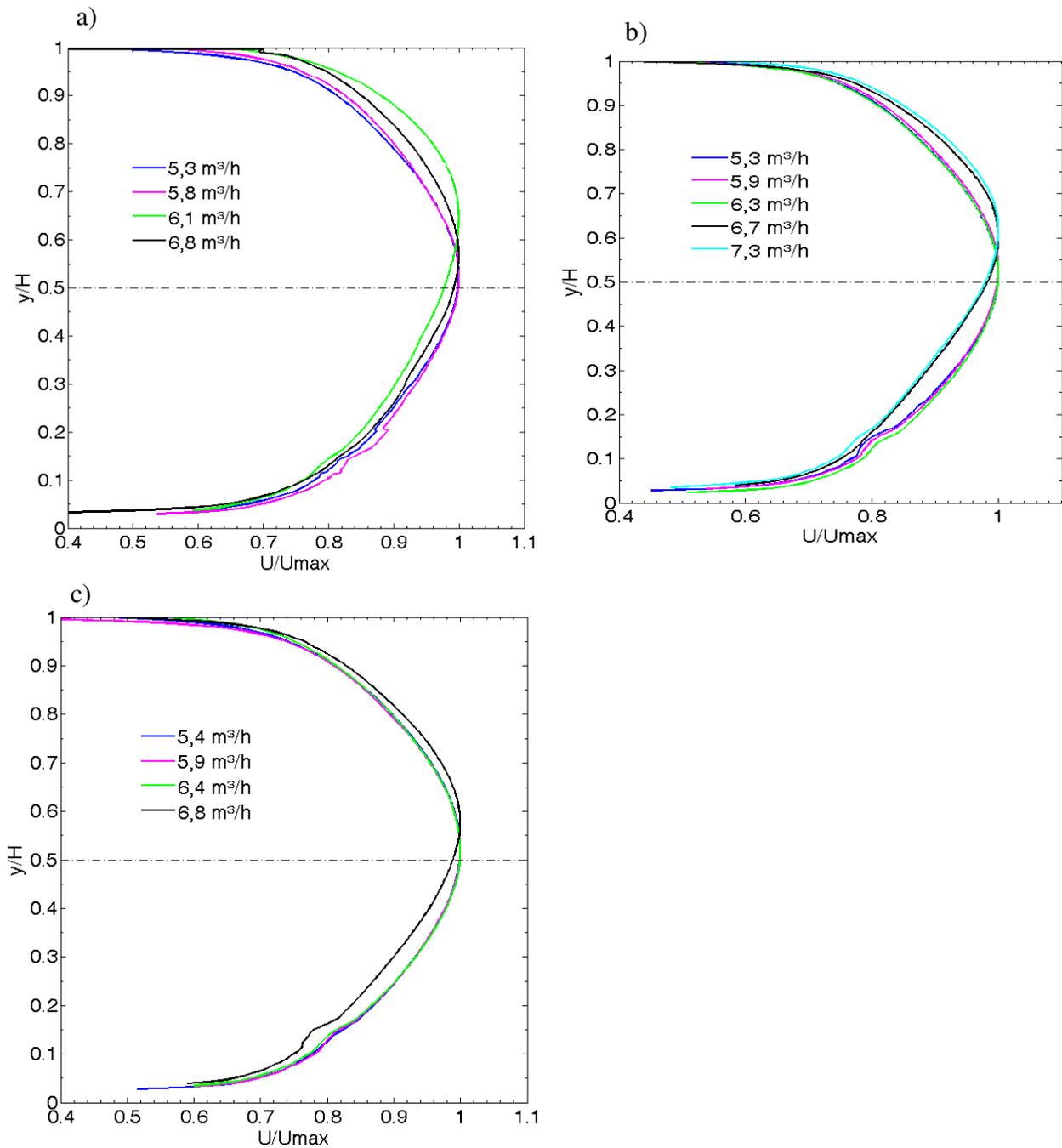


Figura 65 - Perfis de velocidade média adimensional obtidos do ensaio em leito rugoso móvel com $d_{50} = 360 \mu m$. a) corresponde ao ensaio E; b) ensaio F; c) ensaio G.

A Figura 65 mostra que ao aumentar a vazão de, aproximadamente, 5 m³/h para, aproximadamente, 7 m³/h, os perfis de velocidade se deslocam em direção a parede superior,

aumentando sua assimetria. Este comportamento é mais evidente com o aumento do tamanho das partículas do leito, como ocorreu para $d_{50} = 360 \mu m$ em comparação a $d_{50} = 160 \mu m$. A Tabela 24 apresenta os valores obtidos para as velocidades máximas (U_{max}) e as respectivas posições, na coordenada y/H para escoamento sobre leito móvel $d_{50} = 360 \mu m$.

Os perfis de velocidades mostrados na Figura 65 também apresentam distorções na região inferior, indicando a presença de reflexos do leito granular e/ou acrílico do canal durante a captura das imagens pelo PIV. Apesar de presentes, estas distorções são bem menos acentuadas do que as observadas para a granulometria de $160 \mu m$ e não se tornaram um obstáculo para o desenvolvimento dos resultados do trabalho.

Tabela 24 - Valores de U_{max} e a correspondente posição em y/H para escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$

	Q_{real} (m ³ /h)	U_{max} (m/s)	y/H para U_{max}
Ensaio E	5,3	0,24	0,54
	5,8	0,26	0,52
	6,1	0,27	0,65
	6,8	0,30	0,56
Ensaio F	5,3	0,24	0,51
	5,9	0,26	0,53
	6,3	0,29	0,52
	6,7	0,30	0,60
	7,3	0,33	0,62
Ensaio G	5,4	0,24	0,53
	5,9	0,26	0,52
	6,4	0,29	0,51
	6,8	0,31	0,58

Como dito anteriormente, a existência de assimetria no perfil de velocidades se deve a desaceleração na camada inferior do escoamento que implica, por conservação da massa, na aceleração da camada superior. Se o escoamento de fluido está próximo ao limite de mobilidade dos grãos (vazão de 5 m³/h), a tensão na interface do leito não é capaz de mover partículas. Assim, a transferência de quantidade de movimento na camada inferior é menor e, então, a desaceleração perto do leito e a aceleração na região intermediária é pouco notada. Desta forma, o perfil de velocidades para leito móvel em vazão baixa é praticamente coincidente com o perfil de velocidades para leito fixo. Ao aumentar a vazão, aumenta-se a transferência de quantidade de movimento do fluido para as partículas e assim a desaceleração do fluido perto do leito e, por conservação da massa, é acentuada a assimetria do perfil de velocidades, fazendo com que o posicionamento y/H da velocidade máxima U_{max} atinja valores acima de 0,55.

Considerando que a diferença entre um perfil simétrico (velocidade máxima posicionada em $y/H = 0,50$) e assimétrico para esta granulometria seja de, aproximadamente, $y/H = 0,10$ e que a altura onde ocorre efetivamente o escoamento tenha $H = 43$ mm, obtém-se uma diferença da ordem de 4,3 mm (este valor está na faixa de resolução do equipamento PIV - 0,14 mm x 0,14 mm). Logo, a assimetria apresentada equivale a 12 partículas de d_{50} (360 μm).

Para comparar o comportamento entre leito rugoso fixo e móvel para $d_{50} = 360 \mu m$ serão apresentados gráficos com perfis de velocidade obtidos para vazões, aproximadamente iguais, destes dois leitos (fixo e móvel). A Figura 66 e a Figura 67 apresentam estes perfis sujeitos as seguintes vazões de escoamento: a) 5,5 m³/h, b) 6 m³/h, c) 6,5 m³/h; d) 7 m³/h e e) 7,5 m³/h.

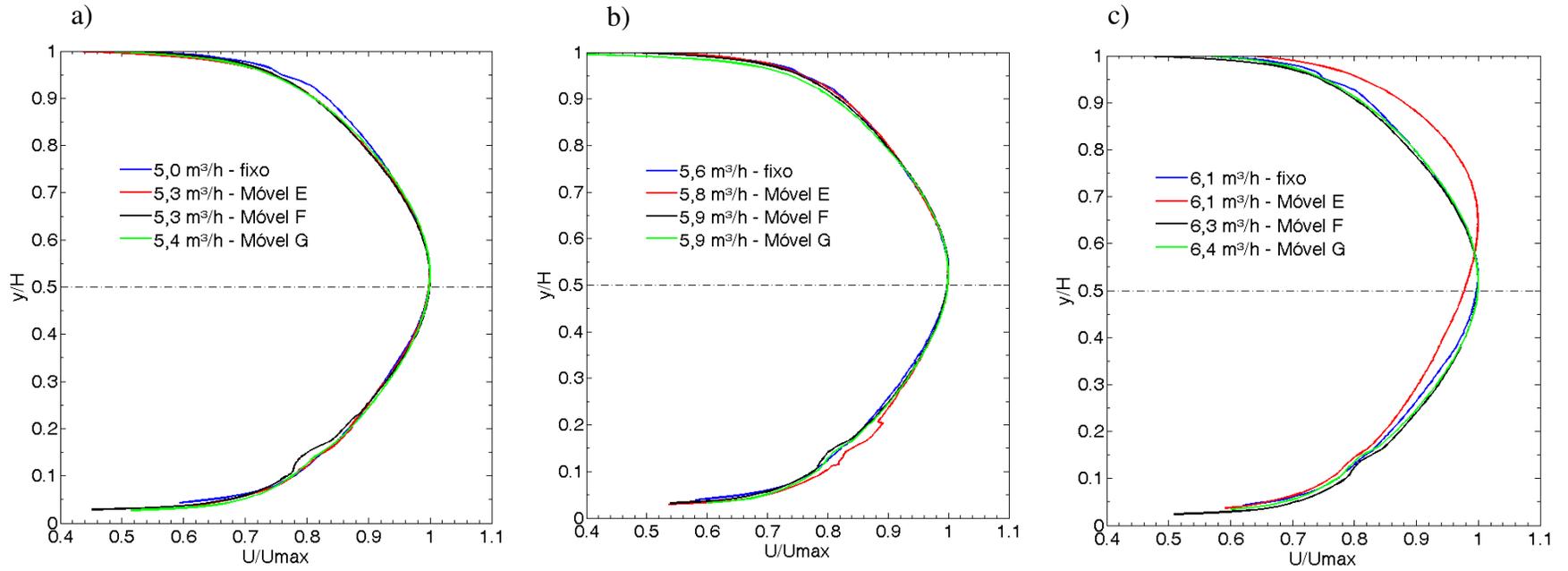


Figura 66 - Perfis de velocidades médias adimensionais obtidos do ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu\text{m}$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $6 \text{ m}^3/\text{h}$; c) $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

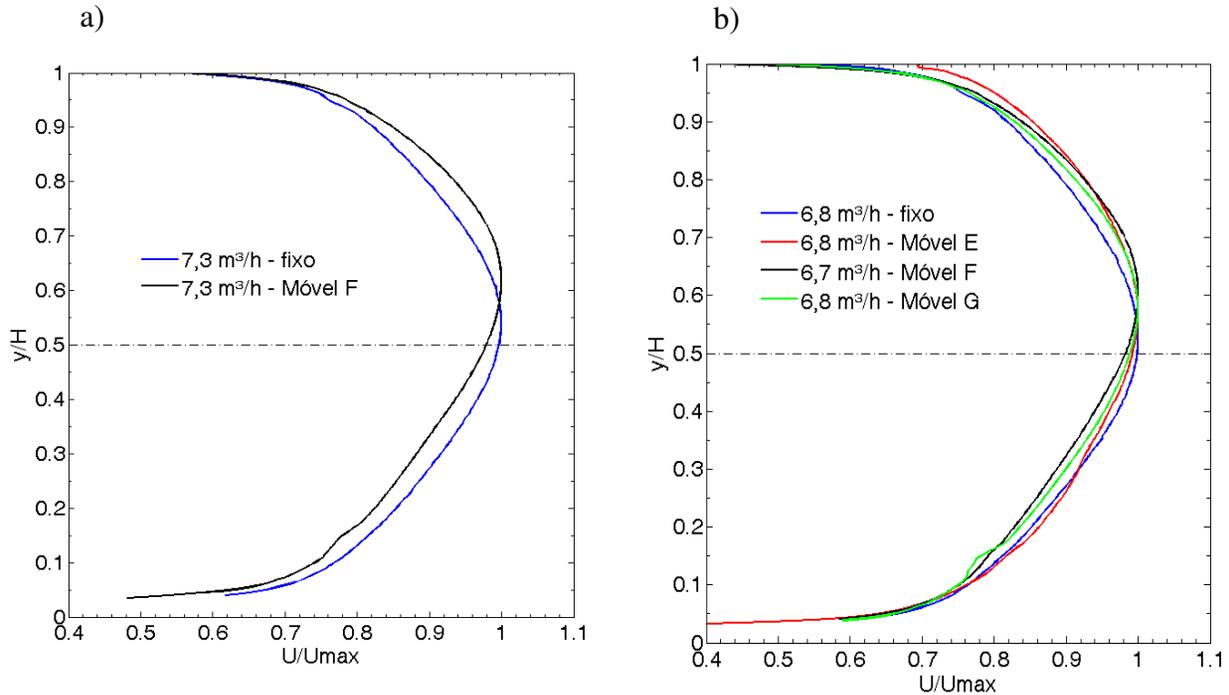


Figura 67 - Perfis de velocidades médias adimensionais obtidos do ensaio em leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ sujeito às vazões de aproximadamente: a) $7 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Conforme a vazão de água é aumentada, se afastando do limite de mobilidade dos grãos, ocorre maiores deslocamentos do perfil de velocidades para leito móvel. A Figura 66 a) e b) exibem perfis de velocidades praticamente coincidente pois as vazões (respectivamente, $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $6 \text{ m}^3/\text{h}$) estão muito próximas ao limite de mobilidade dos grãos. Ao aumentar a vazão para $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $7 \text{ m}^3/\text{h}$ como mostram, respectivamente, a Figura 66 c) e Figura 67 a), os perfis de velocidades para leito móvel começam a ser afetados e é possível observar um aumento da assimetria, indicando um aumento da resistência de escoamento de água sobre leito móvel. Este aumento da mobilidade dos grãos irá refletir em um aumento da rugosidade equivalente do leito, como será visto na Tabela 26.

A Figura 67 b) mostra que o perfil de velocidade para escoamento sobre leito móvel para a vazão de, aproximadamente, $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ possui uma assimetria mais acentuada, indicando o efeito que o aumento de vazão de água causa sobre o leito granular solto.

A Figura 68 exibe o perfil de velocidade média adimensional $y^+ x u^+$ para um escoamento em leito rugoso fixo e móvel de $d_{50} = 360 \mu m$; a), b) e c) se referem, respectivamente, aos ensaios E, F e G.

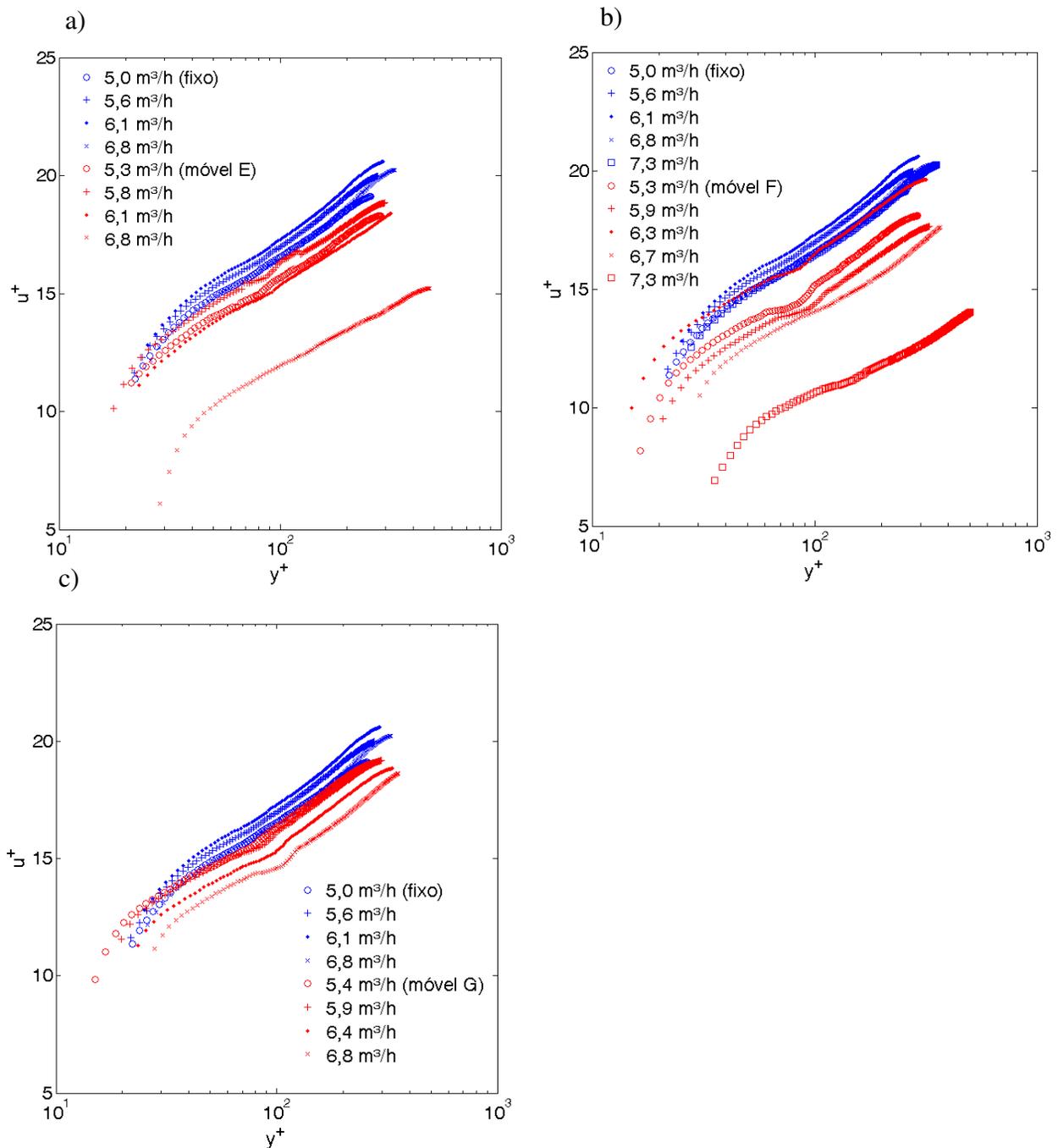


Figura 68 - Perfis das velocidades médias dimensionais para os ensaios a) E; b) F; c) G sobre o leito rugoso móvel de $d_{50} = 360 \mu m$.

Assim como explicado para $d_{50} = 160 \mu m$, os perfis para leito móvel apresentam uma região logarítmica acima do leito, estão deslocados a localizações mais altas em relação aos perfis de leito fixo e este deslocamento tende a crescer com o aumento da mobilidade dos grãos, se afastando do perfil para escoamento sobre leito fixo.

Os perfis de velocidade obtidos para as vazões de $6,8 \text{ m}^3/\text{h}$ e $7,3 \text{ m}^3/\text{h}$ para, respectivamente, os ensaios E e F (Figura 68 a) e b)) apresentam um nítido afastamento dos demais perfis de velocidade, evidenciando a existência de grãos móveis para esta faixa de vazão. Já o perfil obtido para a mesma vazão do ensaio G não apresenta este deslocamento. Assim, estuda-se a hipótese de que durante a realização do ensaio G (Figura 68 c)) ocorreu uma maior acomodação das partículas no leito, fazendo com que se atingissem vazões de escoamento mais altas com comportamento similar as das demais vazões para leito móvel. Estes comportamentos, de distanciamento e aproximação, do perfil de velocidade confirmam que em cada ensaio o fenômeno de ‘*armouring*’ atua de maneira particular.

Os perfis de velocidades médias adimensionais para leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu m$ podem ser exibidos de acordo com sua vazão na Figura 69 a) $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e b) $6 \text{ m}^3/\text{h}$, e na Figura 70 a) $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$, b) $7 \text{ m}^3/\text{h}$ e c) $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

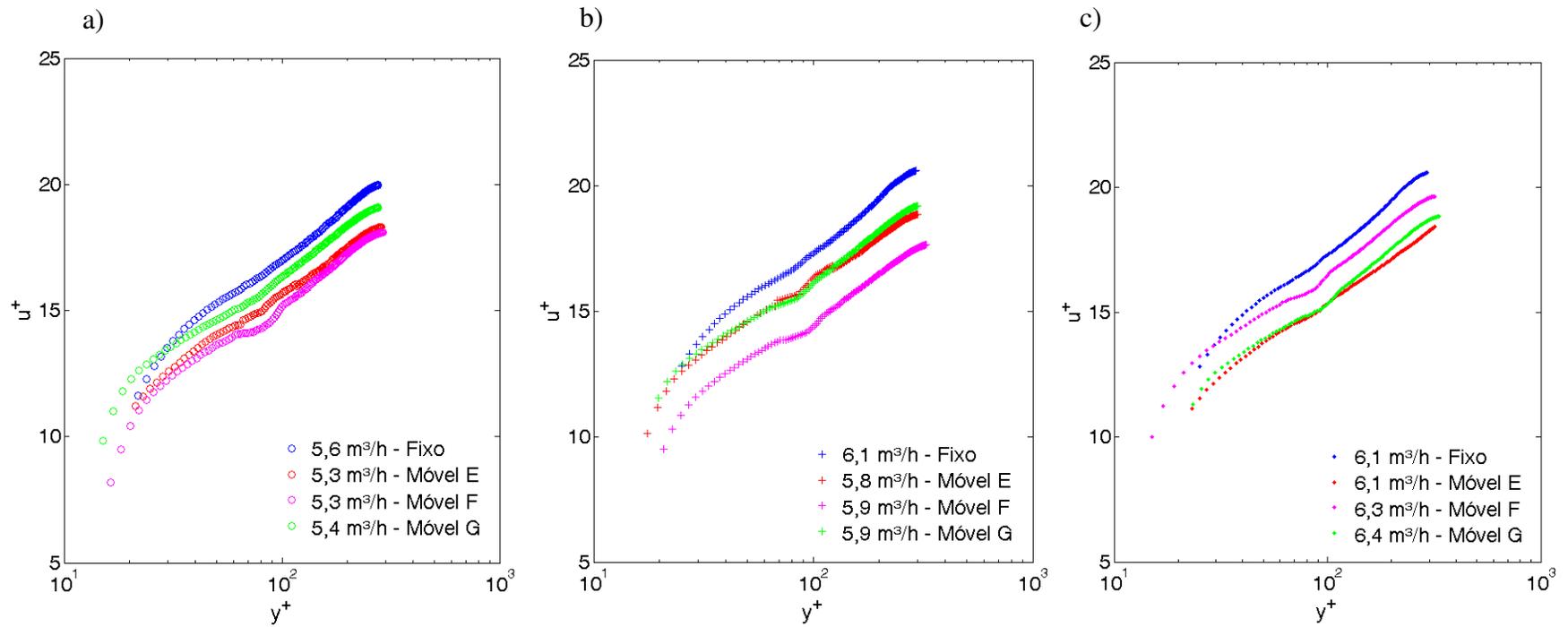


Figura 69 - Perfis das velocidades médias para ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel com $d_{50} = 360 \mu\text{m}$. Vazões representativas de cada ensaio: a) $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $6 \text{ m}^3/\text{h}$; c) $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

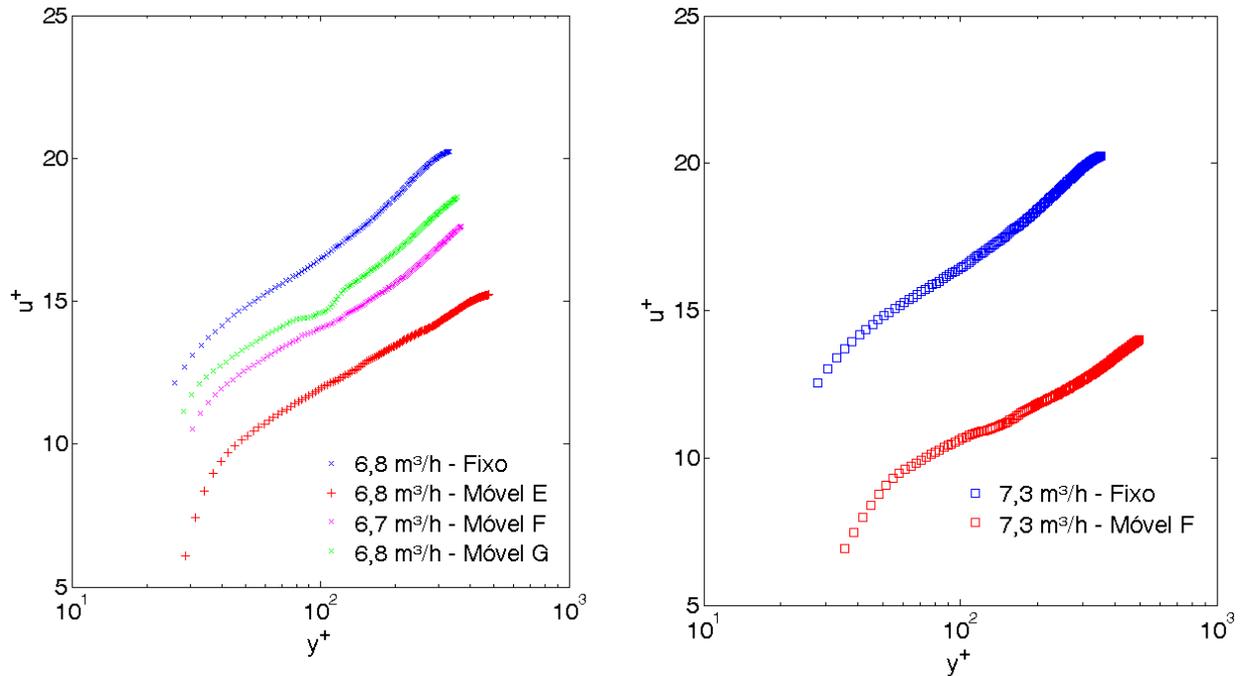


Figura 70 - Perfis das velocidades médias adimensionais obtidos através do ensaio sobre leito rugoso fixo e móvel de $d_{50} = 360 \mu m$. Vazões representativas de cada ensaio: a) $7 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Comparando os perfis de velocidade obtidos para leito granular móvel e fixo, Figura 69 e Figura 70, é possível observar como a mobilidade dos grãos afetam os perfis. Para vazões de, aproximadamente, $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 70 a) e b)), observa-se que todos os perfis de velocidade obtidos nos ensaios para leito móvel se apresentam próximos ao perfil obtido para leito fixo. Com o aumento da vazão, Figura 69 c) e Figura 70 a), os perfis obtidos para leito móvel tendem a se distanciar do perfil obtido para leito fixo. Com a vazão $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 70 b)) existe um considerável distanciamento entre os dois perfis obtidos para os dois diferentes leitos. Este comportamento é explicado pela progressiva desaceleração da camada inferior do escoamento durante o aumento da vazão. Esta desaceleração da camada inferior causa, por conservação da massa, uma aceleração das camadas intermediárias do perfil de velocidades.

A Figura 69 e a Figura 70 mostram a efetiva influência da mobilidade dos grãos no escoamento: a desaceleração do fluido em escoamento na camada logarítmica desloca o perfil de velocidades logarítmico ($y^+ \times u^+$) inteiro a posições mais altas, comparando com o leito fixo.

Este deslocamento do perfil logarítmico gera valores distintos para a constante B. Assim, quanto mais distante o perfil de logarítmico para leito móvel estiver do perfil logarítmico para leito fixo, maior será a diferença entre os valores obtidos para os parâmetros medidos.

A Tabela 25 mostra os valores para a velocidade de atrito u^* e a constante B, para a parede inferior (parede rugosa com $d_{50} = 360 \mu m$) e para a parede superior (parede lisa). A Figura 71 e a Figura 72 apresentam, respectivamente, o comportamento da velocidade de atrito u^* e da constante B com o número de Reynolds.

Tabela 25 - Valores obtidos para a velocidade de atrito e a constante B para a parede inferior (leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$), u^* e B, e parede superior (parede lisa), u^*_{sup} e B_{sup}

	Q_{real} (m ³ /h)	u^*	u^*_{sup}	B	B_{sup}
Ensaio E	5,3	0,0130	0,0125	4,4	5,3
	5,8	0,0136	0,0130	5,0	6,0
	6,1	0,0145	0,0148	4,1	5,5
	6,8	0,0171	0,0159	2,9	5,1
Ensaio F	5,3	0,0133	0,0122	3,9	5,8
	5,9	0,0149	0,0134	3,4	5,7
	6,3	0,0145	0,0142	5,3	5,7
	6,7	0,0168	0,0158	3,0	5,2
	7,3	0,0228	0,0169	-0,5	5,5
Ensaio G	5,4	0,0126	0,0126	5,1	5,5
	5,9	0,0136	0,0136	5,0	5,3
	6,4	0,0153	0,0146	4,3	5,5
	6,8	0,0162	0,0156	3,8	5,4

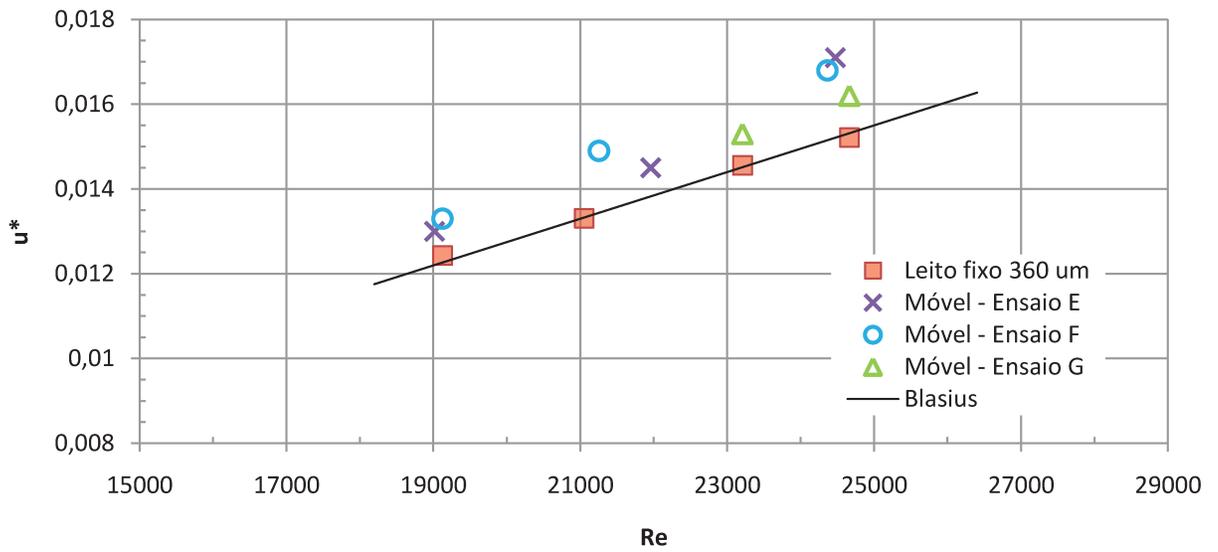


Figura 71 - Variação de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo e sobre leito móvel, ambos com $d_{50} = 360 \mu m$

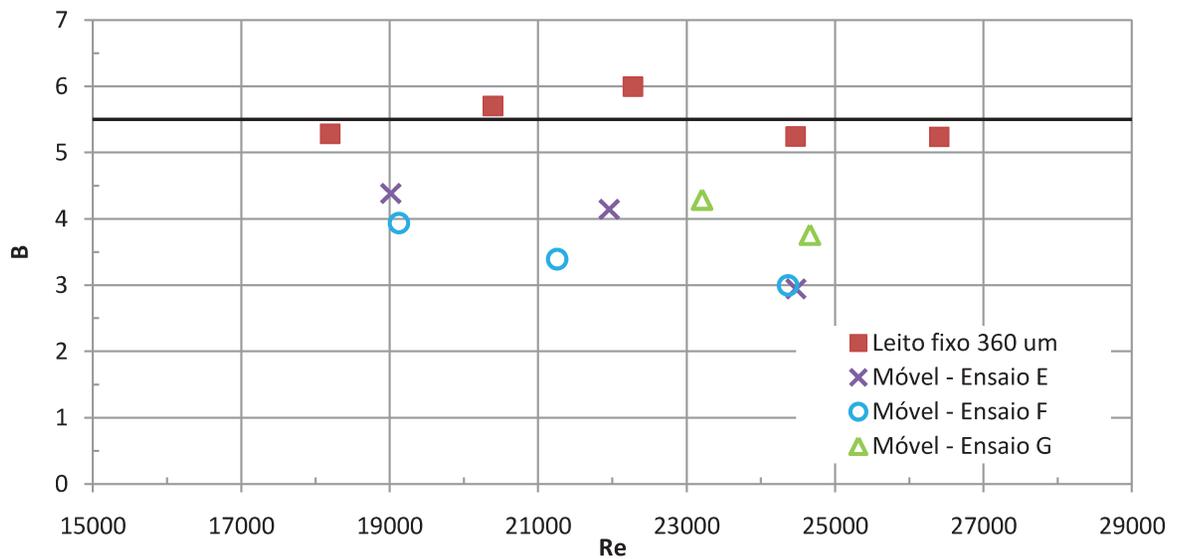


Figura 72 - Variação de B com o número de Reynolds para escoamento sobre um leito granular fixo e sobre leito móvel, ambos com $d_{50} = 360 \mu m$. A reta em $B = 5,5$ é apenas uma indicação de referencia para escoamento sobre leito fixo.

Assim como ocorreu para $d_{50} = 360 \mu m$, alguns pontos experimentais foram descartados na Figura 71 e na Figura 72: vazão de 5,8 m³/h do ensaio E, 6,3 m³/h do ensaio F, 5,4 m³/h e 5,9 m³/h do ensaio G. A partir dos dados da Tabela 25, observa-se que para estas vazões obteve-se, respectivamente, $B = 5,0$, $B = 5,3$, $B = 5,1$ e $B = 5,0$, valores altos para a constante B ($B > 5$, considera-se escoamento sobre leito fixo) e, ainda, a velocidade de atrito u^* destas vazões está muito próxima do valor obtido para a correlação de Blasius. Estes resultados indicam forte evidência da existência de ‘*armouring*’, uma vez que os resultados estão próximos ao obtido para leito fixo. Apesar dos efeitos do transporte de grãos em escoamento de fluidos para regime hidraulicamente liso serem desconhecidos, também foi descartada a vazão de 7,3 m³/h do ensaio F pois apresenta comportamento fora da tendência geral das demais vazões, com $B = -0,5$ e a velocidade de atrito muito alta. Não existem justificativas aparentes (reflexos parasitas ou fontes de incerteza) para este comportamento, entretanto as demais vazões se apresentam em uma faixa de B entre 2,5 e 4,5 e assim optou-se por não mostrá-lo nos resultados.

A velocidade de atrito para $d_{50} = 360 \mu m$ também apresentou resultados superiores aos calculados através da correlação de Blasius, Figura 71. Observa-se uma distribuição média dos resultados de 0,0008 m/s acima da correlação de Blasius, com espalhamento de, aproximadamente, 0,0006 m/s para cima e para baixo. Quando se analisa o comportamento da velocidade de atrito u^* com o aumento do número de Reynolds, observa-se que os resultados parecem se distanciar dos resultados obtidos para leito fixo, para todos os ensaios. Este comportamento, distinto do observado para $d_{50} = 160 \mu m$, também pode ser colocado sobre suspeita. Levando em consideração o espalhamento obtido para leito fixo de mesma granulometria, os resultados para o leito móvel podem apresentar tendência distinta da apresentada. Porém, o comportamento observado não pode ser descartado e uma análise comparativa com a granulometria de 160 μm se torna apropriado. Veja seção 4.3.3.

Observando o comportamento da constante B com o aumento do número de Reynolds foram obtidos valores inferiores aos obtidos para leito fixo. Os resultados atingiram uma faixa de $2,9 < B \text{ (móvel)} < 4,4$, dando um espalhamento de, aproximadamente, 0,7 em torno da média $B = 3,7$. Quando se analisa individualmente os dados de cada ensaio obtém-se, da Figura 72, uma diminuição do valor de B com o aumento do número de Reynolds. Explica-se este

comportamento como o efeito do transporte de grãos (*'feed-back effect'*) no escoamento de fluido: o aumento da vazão causa um aumento da mobilidade das partículas e, conseqüentemente, afastamento do comportamento obtido para leito fixo. Esta tendência dos resultados também pode ser interpretada diferente com base no espalhamento obtido para os resultados de leito fixo com mesma granulometria.

A Tabela 26 apresenta para $d_{50} = 360 \mu m$ os valores para a rugosidade relativa y_0 , em escala de diâmetro e em micrometros, o número de Reynolds na escala do grão, Re^* , e o número de Shields do escoamento θ .

Tabela 26 - Valores obtidos para a rugosidade aparente da parede inferior (leito móvel com $d_{50} = 360 \mu m$) e parede superior (parede lisa), em escala de diâmetro e em micrometros, número de Reynolds na escala (Re^*) do grão e número de Shields (θ)

	$Q_{real} (m^3/h)$	y_0	$y_0 (\mu m)$	$y_{0 sup}$	$y_{0 sup} (\mu m)$	Re^*	θ
Ensaio E	5,3	d/28	12,9	d/40	9,0	5	0,03
	5,8	d/38	9,5	d/56	6,4	5	0,03
	6,1	d/29	12,4	d/52	6,9	5	0,04
	6,8	d/21	17,1	d/46	7,8	6	0,05
Ensaio F	5,3	d/24	15,0	d/48	7,5	5	0,03
	5,9	d/22	16,4	d/50	7,2	5	0,04
	6,3	d/46	7,8	d/54	6,7	5	0,04
	6,7	d/21	17,1	d/49	7,3	6	0,05
	7,3	d/7	51,4	d/59	6,1	8	0,10
Ensaio G	5,4	d/37	9,7	d/44	8,2	5	0,03
	5,9	d/38	9,5	d/43	8,4	5	0,03
	6,4	d/32	11,3	d/49	7,3	6	0,04
	6,8	d/27	13,3	d/52	6,9	6	0,05

Para as vazões de, aproximadamente, 5 m³/h e 5,5 m³/h, foi obtido número de Shields $\theta \leq 0,04$ e número de Reynolds na escala do grão $Re^* = 5$.

O Diagrama de Shields (Figura 4 da seção 2.2) é baseado em dados experimentais e apresenta dispersão de dados, assim será utilizado como um indicativo do comportamento do leito móvel durante o escoamento de líquido. Para Re^* na faixa de 5, obtém-se o valor limite do número de Shields de $\theta_c = 0,04$. Assim, para esta faixa de vazão, os grãos estão imobilizados ou no limite de mobilidade e os perfis de velocidade entre leito fixo e móvel têm comportamento quase coincidente, como mostra a Figura 67 a) e b).

Para vazões de, aproximadamente, $6 \text{ m}^3/\text{h}$ e $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$, o número de Reynolds na escala do grão varia entre 5 e 6 e número de Shields obtido é $\theta \leq 0,05$. Para determinar se o escoamento está no limite de mobilidade dos grãos para este Re^* , deve-se analisar novamente o diagrama de Shields (Figura 4 da seção 2.2). Através dos dados fornecidos, tem-se $\theta_c = 0,04$. Logo, pode-se afirmar que esta faixa de vazão está no limite ou ultrapassando o limite de mobilidade dos grãos e a existência de grãos se movimentando e rolando é mais freqüente. A Figura 67 c) e d) mostram que os perfis de velocidade para leito móvel estão cada vez mais afastados dos perfis de velocidade para leito fixo, indicando a existência de movimento de grãos no leito durante o escoamento.

As vazões de $5,4 \text{ m}^3/\text{h}$ e $5,9 \text{ m}^3/\text{h}$ do ensaio G apresentam uma particularidade: como explicado anteriormente, os valores para a constante B e a velocidade de atrito u^* quase não se alteraram com relação aos valores obtidos pra leito fixo e isto pode ter ocorrido devido ao efeito de ‘*armouring*’. Para confirmar o aumento de compacidade do leito granular tem-se $Re^* = 5$ e $\theta = 0,03$, a partir da Tabela 26, e com estes valores sabe-se que o escoamento está abaixo do limite de mobilidade dos grãos.

Comparando os resultados de y_0 para esta granulometria com os resultados para leito fixo, novamente foi obtido um valor maior para leito móvel, como já explicado. E ao analisar o comportamento de y_0 com o número de Reynolds para cada ensaio, tem-se que y_0 cresce com o número de Reynolds. Veja Figura 73. Este comportamento de distanciamento do comportamento obtido para leito rugoso fixo, como aumento da vazão e aumento da mobilidade dos grãos, era esperado e é distinto dos efeitos que a compactação causou no escoamento sobre leito móvel com $d_{50} = 160 \mu\text{m}$.

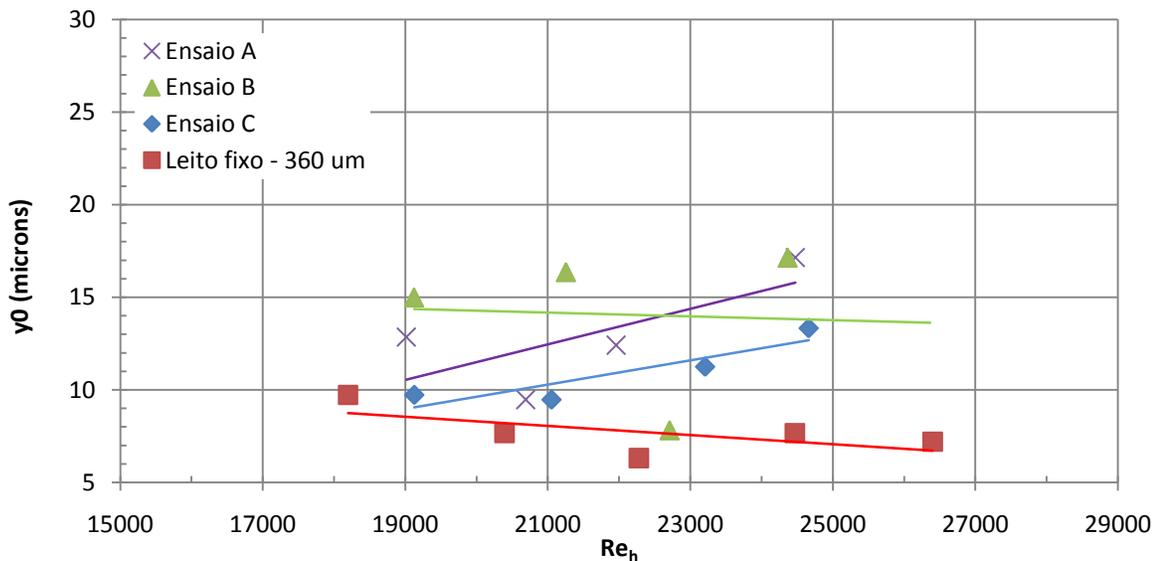


Figura 73 - Distribuição dos valores e a linha de tendência de y_0 com o número de Reynolds para os ensaios E, F e G na granulometrias $360 \mu m$

4.3.3 Comparação entre as duas granulometrias

A Figura 74 e a Figura 75 apresentam o comportamento médio obtido com o aumento do número de Reynolds para as duas granulometrias para, respectivamente, a velocidade de atrito u^* e a constante B. Em ambas figuras este comportamento médio é representado por uma reta ajustada aos valores obtidos nos ensaios para as duas granulometrias. Foram considerados somente os pontos experimentais válidos, de modo a ficarem de fora os pontos descartados anteriormente.

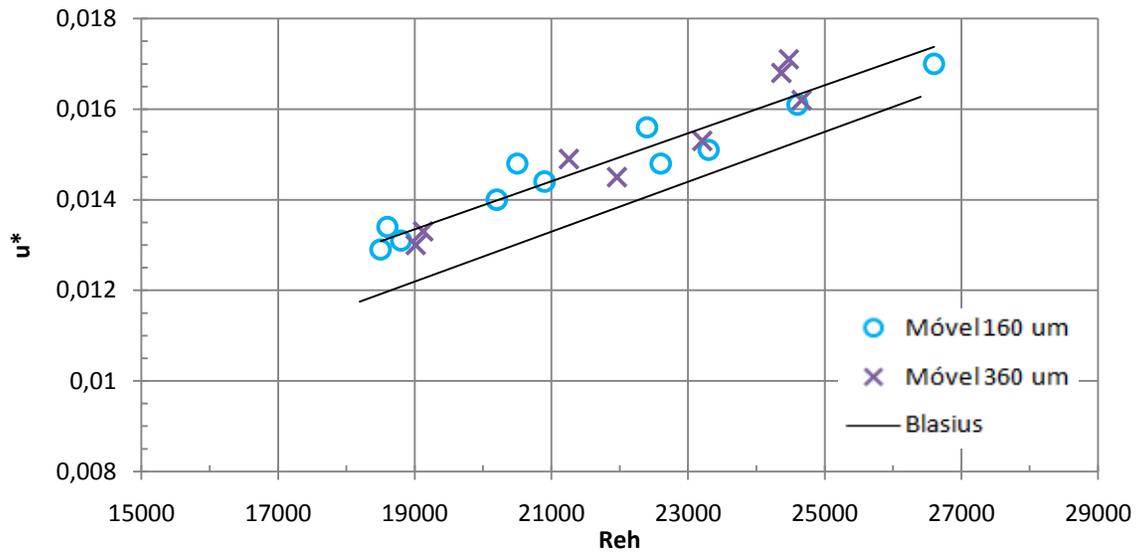


Figura 74 - Distribuição dos valores e a linha de tendência de u^* com o número de Reynolds para escoamento sobre leito móvel nas granulometrias 160 μm e 360 μm

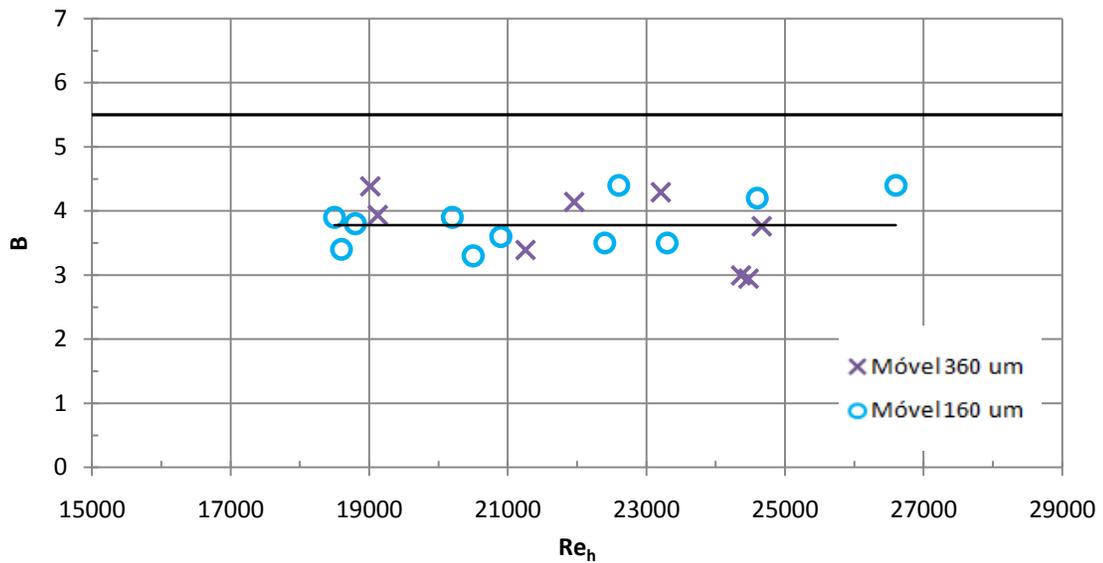


Figura 75 - Distribuição dos valores e a linha de tendência da constante B com o número de Reynolds para escoamento sobre leito móvel nas granulometrias 160 μm e 360 μm . A linha em $B = 5,5$ é uma referência para escoamento sobre leito fixo em regime hidráulicamente liso.

A partir da Figura 74, observa-se que os pontos experimentais estão distribuídos acima da correlação de Blasius e não é possível afirmar que determinada granulometria possui valor de u^* superior a outra. Ao ajustar o comportamento dos pontos válidos (sem reflexo e sem comportamento distorcido) para leito móvel (as duas granulometrias) e realizando uma média dos resultados obtidos, obtém-se uma reta superior e paralela a Blasius, que representa a tendência de u^* com Re_h para o leito móvel. A partir dos resultados individuais do comportamento para leito móvel (Figura 62 e Figura 71), foi obtido uma distribuição média de 0,0008 m/s acima da correlação de Blasius, com espalhamento de, aproximadamente, 0,0006 m/s para cima e para baixo para $d_{50} = 160 \mu m$ e para $d_{50} = 360 \mu m$. Esta incerteza dos dados experimentais é da ordem da obtida para leito fixo (espalhamento de 0,0004 m/s para $160 \mu m$ e 0,0002 m/s para $360 \mu m$), portanto é possível encontrar este tipo de tendência geral dos resultados.

Ao realizar uma média aritmética dos valores obtidos para a constante B (também considerando os pontos considerados válidos) encontra-se $B = 3,8$ para $160 \mu m$ (Tabela 22) e $B = 3,7$ para $360 \mu m$ (Tabela 25). Apesar de apresentarem comportamentos distintos durante o escoamento, o valor de B para ambas as granulometrias possui aproximadamente a mesma magnitude. A Figura 75 apresenta uma reta ajustada aos valores obtidos para a constante B utilizando as duas granulometrias e mostra a ocorrência de dispersão dos dados em torno de $B = 3,75$. A diferença máxima obtida entre esta reta de ajuste e os dados experimentais é de 0,65 para cima e de 0,85 para baixo. Esta distribuição dos resultados é maior que a obtida para leito fixo e pode ser atribuída as incertezas inerentes ao procedimento experimental como, por exemplo, na determinação da interface entre leito rugoso e escoamento. Mas ainda assim o resultado é da ordem de grandeza dos resultados obtidos para leito fixo.

Observando os resultados obtidos nesta seção, pode-se concluir que apesar da análise dos comportamentos de cada granulometria separadamente (Figura 62, Figura 63, Figura 71 e Figura 72) terem apresentado tendências, quando as granulometrias são colocadas juntas (Figura 74 e Figura 75) o comportamento médio para leito móvel mantém-se constante. A Figura 74 mostrou que u^* tem uma taxa de variação com Re_h similar ao proposto por Blasius, paralelo e superior ($0,01.u^*$) e a Figura 75 mostra que os valores de B podem ser aproximados para, aproximadamente, $B = 3,8$.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No caso de escoamento de água sobre um leito de partículas soltas, o limite de mobilidade dos grãos ocorre em gradientes de velocidades menores do que quando se utiliza como fluido o ar. A velocidade na escala do grão u^* (que é proporcional à tensão de cisalhamento) para o limite de mobilidade do leito granular é da ordem de 0,01 m/s para escoamento de água sobre um leito com granulometria de 160 μm e de 360 μm , enquanto que para um ensaio com escoamento de ar utilizando grãos de 250 μm é obtido tipicamente $u^* = 0,2$ m/s (Bagnold, 1941). Esta redução significativa da velocidade deve-se à maior massa específica da água em comparação a do ar. Assim, a combinação de diversos fatores como, por exemplo, a ocorrência do limite de mobilidade do leito móvel para velocidades menores, diâmetro das partículas e viscosidade cinemática, fazem o limite de mobilidade ocorrer dentro no regime hidraulicamente liso.

O efeito do transporte de grãos no escoamento (conhecido como '*feed-back effect*') de líquido em regime hidraulicamente liso causa um deslocamento do perfil de velocidades com o aumento da mobilidade granular (e com a vazão de água) devido ao aumento da transferência de quantidade de movimento da água para os grãos móveis. Este deslocamento é refletido nos resultados de alguns parâmetros como a constante B e a velocidade de atrito. A alteração destes resultados é equivalente a um aumento da rugosidade equivalente para o escoamento sobre leito móvel.

Assim, os resultados distintos obtidos entre leitos fixo e móvel são similares àqueles encontrados por Bagnold (1941) no estudo do escoamento de ar sobre leito granular. Bagnold (1941) observou que a influência de um leito móvel no perfil de velocidade média é a geração, em regime hidraulicamente rugoso, de uma rugosidade aparente maior do que a esperada se o escoamento ocorresse sobre um leito granular fixo com mesma granulometria. Este aumento da rugosidade aparente com a mobilidade dos grãos ocorre devido à transferência de quantidade de movimento do fluido para os grãos móveis.

Para as granulometrias de 160 μm e 360 μm obtiveram-se velocidades de atrito superiores às calculadas pela correlação de Blasius. Quando se analisa cada granulometria individualmente,

observa-se que o comportamento de $d_{50} = 160 \mu m$, para alguns ensaios, se aproxima dos resultados obtidos para leito fixo. Já para $d_{50} = 360 \mu m$, esta tendência não é observada. A análise de tendência dos dados experimentais é prejudicada se considerarmos que as incertezas das medidas estão distribuídas num intervalo de $0,01 u^*$ para mais e para menos.

Analisando a constante B com relação a cada ensaio, encontra-se que para $d_{50} = 160 \mu m$ foi obtido novamente uma aproximação aos valores obtidos para leito fixo enquanto que para $d_{50} = 360 \mu m$ ocorreu um afastamento. Ao realizar uma média aritmética dos resultados obtidos para leito móvel encontrou-se $B = 3,8$ para a granulometria de $160 \mu m$ e para $360 \mu m$, um valor médio de $B = 3,7$. Considerando que as tendências (de aproximação e afastamento dos resultados para leito fixo) citadas no parágrafo acima estão dentro do intervalo de incerteza de, aproximadamente, $B = \pm 0,4$, não se pode afirmar se elas de fato existem ou não. Neste caso, propõe-se que o valor esperado de B para ambas granulometrias é constante e igual a $B = 3,75$.

Ao comparar as duas granulometrias em uma dada vazão obedecendo ao mesmo regime de escoamento, hidraulicamente liso, os grãos menores são, em princípio, mais facilmente mobilizados (tendência a se movimentar). Isto porque eles têm uma maior razão força_tensão/peso_aparente, ou seja, número de Shields θ . De fato, os valores de Shields para os grãos de $160 \mu m$ são maiores (pois $\theta \sim d$) (Veja Tabela 17 para $160 \mu m$ e Tabela 26 para $360 \mu m$). Assim, a maior mobilidade dos grãos de $160 \mu m$, comparado ao grão de $360 \mu m$, significa uma maior concentração de grãos móveis, o que pode significar uma transferência de quantidade de movimento (do fluido para os grãos) mais eficiente. Assim, para um dado leito com granulometria maior, existirá menos grãos em movimento para uma mesma quantidade de movimento, se comparado a um leito de granulometria menor. Isto ocorre devido a maior massa apresentada pelos grãos de maiores tamanhos. Porém, deve-se levar em consideração também que para uma mesma dimensão de leito, existem mais grãos quando se utiliza granulometria de $160 \mu m$ e, conseqüentemente, maior densidade de interstícios. Assim, pode-se dizer que $d_{50} = 160 \mu m$ possui uma probabilidade dos grãos caírem mais facilmente nos interstícios presentes no leito e aumentarem a compactação do que os leitos formados com $d_{50} = 360 \mu m$.

Esta análise justifica em parte os resultados obtidos para a velocidade de atrito e para a constante B onde a menor granulometria ($160 \mu m$) apresenta uma maior tendência de

'*armouring*', isto é, com o aumento da vazão, o comportamento do leito se assemelha ao comportamento de um leito fixo, devido a compactação do leito de partículas.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se a utilização de um leito de partículas composto de esferas de vidro pintadas de preto. Isto garantiria uma diminuição do reflexo durante a aquisição de imagens pelo PIV e, conseqüentemente, perfis de velocidade com menor presença de distorções geradas por regiões de saturação. Ainda no segmento da alteração das esferas de vidro, seria interessante utilizar esferas de cores distintas para medir o transporte de grãos. De modo que fosse possível observar a trajetória individual de algumas partículas durante o escoamento.

Adicionalmente, propõe-se uma análise dos momentos de segunda ordem, tal como o componente $-\overline{u'v'}$ do tensor de Reynolds. As variações de $-\overline{u'v'}$ entre leitos fixos e móveis mostrariam, por exemplo, a transferência da quantidade de movimento.

Uma última sugestão é a investigação da camada externa do perfil de velocidade e da região central do escoamento, observando os efeitos do transporte de grãos no escoamento turbulento de um líquido.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDREWS, E. D. **Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material.** Geological Society of America Bulletin, v94, p.1225-1231, 1983.

BAGNOLD, R. A. **The physics of blown sand and desert dunes.** Ed. Chapman and Hall, 1941. 320p.

BAGNOLD, R. A. **The flow of cohesionless grains in fluids.** Philosophical Trans. Roy. Soc. London, n°964, 1956.

BAGNOLD, R. A. **An empirical correlation of bed-load transport rates in flumes and natural rivers.** Proceeding of the Royal Society of London, A372, p-453-473, 1980.

BAUER, B. O.; HOUSER, C. A.; NICKLING, W. G. **Analysis of velocity profile measurements from wind-tunnel experiments with saltation.** Geomorphology, v59, p.81-98, 2004.

BUFFINGTON, J.; MONTGOMERY, D. **A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies with special reference to gravel-bedded rivers.** Water Resources Research, v33, p.1993-2009, 1997.

CARBONNEAU, P.; BERGERON, N. **The effect of bedload transport on mean and turbulent flow properties.** Geomorphology, v35, p.267-278, 2000.

CARLING, P. A. **Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams.** Earth Surface Processes Landforms, v8, p.1-18, 1983.

CHANG, F. M.; SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V. **Total bed material discharge in alluvial channels.** Proc. 12th Congress, v1, 1967.

CHIN, C. O.; MELVILLE, B. W.; RAUDKIVI, A. J. **Streambed armorings.** Journal Hydraulic Engineering, v120, p.899-918, 1994.

COHEN, L. S.; HANRATTY, T. J. **Effect of waves at a gas-liquid interface on a turbulent air flow.** Journal of Fluids Mechanics, v31, p.467-479, 1968.

COLES, D. E. **The Young Person's Guide to the Data. Proceedings of the Computation of Turbulent Boundary Layers.** Stanford Conference, v2, p.1-19, 1968.

COLEBROOK, C. **Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws.** Journal of the Institution of Civil Engineers, v11, p.133-156, 1938-39.

CHARRU, F.; MOUILLERON, H.; EIFF, O. **Erosion and deposition of particles on a bed sheared by a viscous flow.** Journal of Fluids Mechanics, v519, p.55-80, 2004.

DAY, T. J. **A study of the transport of graded sediments.** Hydraulic Research Station, v10, 1980.

DAVIDSON, P. A. **Turbulence: An introduction for scientists and engineers.** Oxford University Press, 2004

DONG, Z.; LIU, X.; WANG, X.; LI, F.; ZHAO, A. **Experimental investigation of the velocity of a sand cloud blowing over a sandy surface.** Earth Surface Processes and Landforms, v29, p.343-358, 2004.

EINSTEIN, H. A. **Formulae for the transportation of bed load.** Trans. A.S.C.E., v107, 1942.

FIGUEIREDO, F. T.; AYEK, G. A.; ROSA, E. S.; FRANKLIN, E. M. **Perturbation of a turbulent liquid flow by the bed-load transport of granular matter.** COBEM, 2011.

FONSECA, R. J. **Medição do campo instantâneo de velocidade do líquido no escoamento bifásico intermitente em tubos horizontais e inclinados.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

FRANKLIN, E. M. **Initial Instabilities of a Granular Bed Sheared by a Turbulent Liquid Flow: Length-Scale Determination.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v32, p.460-467, 2010.

FOX, R. F.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** Sexta edição, ed. LTC, 2006. 788p.

GILBERT, G. K. **The transportation of debris by running water.** Geological Survey Professional Paper, v86, 1914, 263p.

GRASS, A. J. **Initial instability of fine bed sand.** Journal Hydraulics Division ASCE, v96, p.619-632, 1970.

GOMEZ, B.; CHURCH, M. **An assessment of bed-load sediment transport formulae for gravel bed rivers.** Water Resources Research, v25, p.1161-1186, 1989.

HAALAND, S. E. **Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow.** Journal of Fluids Mechanics, p.89-90, 1983.

HAMMOND, T. M.; COLLINS, M. B. **On the threshold of transport of sand-sized sediment under the combined influence of unidirectional and oscillatory flow.** *Sedimentology*, v26, p.795-812, 1979.

HANJALIC, K.; LAUNDER, B. E. **Fully developed asymmetric flow in a plane channel.** *Journal of Fluids Mechanics*, v51, p.301-335, 1972.

JIANG, Z.; HAFF, P.K. **Multiparticle simulation methods applied to the micromechanics of bed load transport.** *Water Resources Research*, v29, p.399-412, 1993.

JIMÉNEZ, J. **Turbulent flows over rough walls.** *Annual Review of Fluid Mechanics*, v36, p.173-196, 2004.

KANTARDGI, I. G. **Incipiency of sediment motion under combined waves and current.** *Journal Coastal Research*, v8, p.332-339, 1992.

KAPDASLI, M. S.; DYLER, K. R. **Threshold conditions for sand movement on a rippled bed.** *Geo-Marine Letters*, v6, p.161-164, 1986.

KÁRMÁN, TH. VON **Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz.** *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse*, p.58-76, 1930.

KATORI, S.; SAKAKIYAMA, T.; WATANABE, A. **Measurement of sand transport in a cross unidirectional oscillatory flow tank.** *Coastal Engineering in Japan*, v27, p.193-203, 1984.

KOMAR, P. D. **Selective gravel entrainment and the empirical evaluation of flow competence.** *Sedimentology*, v34, p.1165-1176, 1987.

KRAMER, H. **Sand mixtures and sand movement in fluvial models.** *Transactions of American Society of Civil Engineers*, v100, p.798-878, 1935.

KRAUS, W.; WIRZ, H. J.; SMOLDEREN, J. J. **Panel Methods in Aerodynamics. Numerical Methods in Fluid Dynamics**, 1978.

LAVISION (Göttingen, Germany). **ImagerProPlus & ImagerProX**: catálogo. 2009a. 143p.

LAVISION (Göttingen, Germany). **Sheet Optics**: catálogo. 2009b. 14p.

LAVISION (Göttingen, Germany). **Translation Unit**: catálogo. 2009c. 34p.

LEE-YOUNG, J. S.; SLEATH, J. F. A. **Initial motion in combined wave and currents flows**. Proceedings of 21st on Coastal Engineering Conference - American Society of Civil Engineers, New York, p.1140-1151, 1989.

LEIGHTON, D.; ACRIVOS, A. **Viscous resuspension**. Chemical Engineering Science, v41, p.1377-1384, 1986

LUQUE, R. F.; VAN BECK, R. **Erosion and transport of bed-load sediment**. Journal of Hydraulic Research, v14 (2), p.127-144, 1976.

MARTIN, Y. **Evaluation of bed-load transport formulae using field evidence from the Vedder River, British Columbia**. Geomorphology, v53, p.75-95, 2003.

MARTIN, Y.; CHURCH, M. **Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia**. Earth Surface Processes and Landforms, v20, p.336-347, 1995.

MEYER-PETER, E.; MÜLLER, R. **Formulas for bed-load transport**. Proceedings 2nd Meeting International Association of Hydraulic Research, p.39-64, 1948.

MILLER, M. C.; MCCAVE, I. N.; KOMAR, P. D. **Threshold of sediment motion under unidirectional currents.** Sedimentology, v24, p.507-527, 1977.

MOODY, L. F. **Friction factors for pipe flow.** Transactions of the ASME, v66, p.671-684, 1944.

MOUILLERON, H.; CHARRU, F.; EIFF, O. **Inside the moving layer of a sheared granular bed.** Journal of Fluid Mechanics, v628, p.229-239, 2009.

NAKATO, T. **Tests of selected sediment-transport formulas.** Journal of Hydraulics Engineering, v116, p.362-379, 1990.

NIKURADSE, J. **“Strömungsgesetze in rauhen rohren”.** VDI Forschungsh, English trans., NACA Technical Memorandum 1292, v361, 1933.

ORSZAG, S. A. **Analytical Theories of Turbulence.** Journal of Fluid Mechanics, v41, p.363-386, 1970.

OWEN, P. R. **Saltation of uniform grains in air.** Journal of Fluids Mechanics, v20, p.225-242, 1964.

PAINTAL, A. S. **Concept of critical shear stress in loose boundary open channels.** Journal Hydraulic Resources, v9, p.91-113, 1971.

PANTON, R. L. **Incompressible flow.** ed. Wiley, 1984. 780p.

PARKER, G.; KLINGEMAN, P. C. **On why grave bed streams are payed.** Water Resources Research, v18, p.1409-1423, 1982.

PRANDTL, L. **“Neuere ergebnisse der Turbulenzforschung”.** Z.VDI, v77, p.105-114, 1933

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J. **Particle Image Velocimetry – A Practical Guide**. Second Edition, ed. Springer, 2007. 448p.

RAUDKIVI, A. J. **Loose Boundary Hydraulics**. ed. A. A. BARKEMA, 1998. 496p.

RASMUSSEN, K. R.; MIKKELSEN, H. E. **Wind tunnel observation of aeolian transport rates**. Acta Mechanica Suppl., v1, p.135-144, 1991.

RASMUSSEN, K. R.; IVERSEN, J. D.; RAUTAHEMIO, P. **Saltation and wind-flow interaction in a variable slope wind tunnel**. Geomorphology, v17, p.19-28, 1996.

SCHLITING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-Layer Theory**. 8^a Edition, ed. Springer, 2000. 801p.

SHIELDS, A. **Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung**. Mitt. Preussische Versuchsanstalt Wasserbau Schiffbau, v26, 1936, 36p.

SOULSBY, R. L.; WHITEHOUSE, R. J. S. **Threshold of sediment motion in coastal environments**. Proceedings of the 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference, v1, p.149-154, 1997.

SPALDING, D. B. **A single formula for the law of the wall**. Journal of Applied Mechanics, v28, p.444-458, 1961

TABLER, R. D. **Geometry and density of drift formed by snow fences**. Journal Glaciol, v26, p.405-419, 1980.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. **A first course in turbulence**. ed. MIT Press, 1972. 300p.

WESTERWEEL, J. **Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data.** Experiments in Fluids, v16, p.236-247, 1994.

WESTERWEEL, J.; SCARANO, F. **Universal outlier detection for PIV data.** Experiments in Fluids, v39, p.1096-1100, 2005.

WHITE, F. M. **Viscous Fluid Flow.** 2th Edition, ed. McGraw-Hill, 1991, 614p.

WHITE, C. M. **The equilibrium of grains on the bed of a stream.** Proceedings of the Royal Society of London A, v174, p322-338, 1940.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics.** 4th Edition, ed. New York:McGraw-Hill, 1999, 711p.

WILBERG, P. L.; SMITH, D. **Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments.** Water Resources Research, v23, p.1471-1480, 1987.

YALIN, M. S. **Mechanics of sediment transport.** 2th Edition, ed. Pergamon Press, 1977, 298 p.

YALIN, M. S. **An expression for bed-load transportation.** Proc. A.S.C.E., v89, 1963

YALIN, M. S.; KARAHAN, E. **Inception of sediment transport.** Journal of the Hydraulics Division – American Society of Civil Engineers, v105, p.1433-1443, 1979.

YANG, P.; DONG, Z.; QIAN, G.; LUO, W.; WANG, H. **Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud: Wind tunnel measurements by Particle Image Velocimetry.** Geomorphology, v89, p.320-334, 2007.

ZHANG, W.; WANG, Y.; LEE, S. **Two-phase measurements of wind and saltating sand in an atmospheric boundary layer.** Geomorphology, v88, p.109-119, 2007.

ANEXO I

PIV (Particle Image Velocimetry)

1. Introdução

O desenvolvimento da velocimetria por imagens de partículas (em inglês, *Particle Image Velocimetry*, PIV), como técnica de medida, permitiu a captura de informações a respeito dos campos instantâneos de velocidades de escoamento. O princípio básico da medição por PIV se dá de forma indireta: um plano laser ilumina as partículas (traçadores) previamente misturadas ao fluido em dois instantes de tempo próximos, que por sua vez são filmados por uma câmera sincronizada ao laser, e as velocidades locais das partículas de fluido são assimiladas aos deslocamentos dos grupos de traçadores. Para isto, é necessário um sofisticado sistema de pós-processamento. As informações mostradas nesta seção são baseadas em Raffel et al. (2007).

A Figura 76 mostra uma típica configuração para a técnica de medição através do PIV em túnel de vento retirado de Raffel et al. (2007).

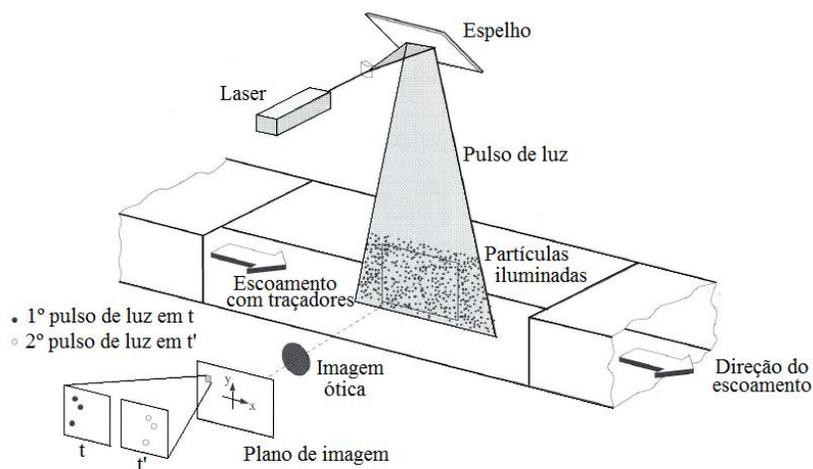


Figura 76 - Arranjo experimental para PIV em túnel de vento [Fonte: Raffel et al. (2007)]

No fluido em escoamento são introduzidas partículas traçadoras de pequena dimensão e de densidade (massa específica) próxima à do fluido. Um plano de laser ilumina a seção de interesse para a medição do campo de velocidades e as imagens são armazenadas em um computador. As partículas traçadoras se movem de acordo com o fluido e a captura de duas imagens consecutivas em curto instante de tempo determina o campo de deslocamento mais provável do fluido. A divisão pelo intervalo de tempo entre as imagens fornece o campo de velocidades (instantâneo) do deslocamento.

A técnica de medição PIV tem como principais características o fato de ser um dispositivo ótico não-intrusivo e que permite a medição de forma indireta, ou seja, através da determinação da velocidade das partículas traçadoras que se obtém a velocidade do escoamento do fluido. Para isto, as imagens obtidas e armazenadas pelo sistema de gravação do PIV são divididas em pequenas áreas, chamadas de zonas de interrogação. Assumindo que as partículas dentro de uma área de interrogação se movem entre duas iluminações consecutivas e sabendo que as partículas traçadoras refletem a luz em um comprimento de onda conhecido, as imagens podem ser tratadas para estimar o deslocamento mais provável das partículas traçadoras entre duas imagens consecutivas, determinando o campo de velocidades. O vetor deslocamento local mais provável para cada zona de interrogação é determinado através de métodos estatísticos.

Depois de determinados os campos de velocidades instantâneos, é possível realizar um pós-processamento e encontrar, por exemplo, o campo de velocidades médio. A análise dos vetores obtidos nestes campos, tanto instantâneo quanto médio, irá mostrar se existe a necessidade de utilização de algum tipo de filtro e se a quantidade de traçadores presentes no escoamento está adequada.

A velocidade de processamento de dados deve ser alta e capaz de gerar e armazenar um grande número de pares de imagens, fazendo com que as informações adquiridas se apresentem de maneira quase contínua. Além disso, o método de medição é capaz de capturar um campo de velocidades bidimensional em um plano (PIV – 2D), ou um campo tridimensional de velocidades (PIV – 3D). Neste trabalho, trataremos de campos bidimensionais (PIV – 2D).

2. Partículas traçadoras

O princípio do PIV é baseado na determinação de duas dimensões primárias que compõem a velocidade: comprimento e tempo. Por outro lado, as técnicas de medida são indiretas pois determinam-se as velocidades das partículas traçadoras ao invés das velocidades das partículas de fluido (Raffel et al., 2007). Assim, estabelecido um escoamento no canal deve-se observar que pequenas partículas, geralmente invisíveis a olho nu, escoam com a mesma velocidade do fluido na região onde estão situadas. O fato destas partículas sólidas estarem em suspensão, de terem inércia semelhante às partículas do fluido de trabalho e ainda não perturbarem o escoamento fazem delas traçadores passivos.

A partícula traçadora e o fluido em questão devem possuir diferenças nos índices ópticos para que a câmera consiga distinguir um do outro. A captação da imagem é possível pois as partículas refletem em um comprimento de onda diferente daquele emitido pelo fluido durante um pulso de luz do laser. O pulso de laser é repetido após um dado intervalo de tempo, que depende da velocidade do escoamento do canal, gerando um par de imagens do escoamento. São estas imagens que serão utilizadas para a execução de correlações que devem fornecer um campo de velocidades instantâneo. Como a intensidade e o contraste das imagens são proporcionais a potencia de luz inserida, é mais efetivo e econômico aumentar a intensidade da imagem escolhendo partículas com propriedades óticas adequadas, que reflitam satisfatoriamente a luz fornecida, do que aumentar a potência do laser. Em geral, pode-se dizer que a intensidade de luz espalhada por uma partícula iluminada é função do comprimento de onda de luz incidente, do tamanho, formato e orientação da partícula, da posição e do ângulo de observação. Para partículas esféricas com diâmetros maiores que o comprimento de onda da luz incidente, pode-se aplicar a Teoria de Espalhamento de Mie (Raffel et al., 2007).

A Figura 77 a) e b), reproduzidas de Raffel et al. (2007), mostram a distribuição polar da intensidade de luz espalhada em partículas de óleo de diferentes diâmetros em meio ao ar, para um comprimento de onda da luz incidente de $\lambda = 532$ nm, de acordo com a previsão de distribuição de luz da Teoria de Mie. As escalas de intensidade mostradas nas figuras estão representadas em escala logarítmica e estão plotadas de modo que cada anel é separado por um

fator de 100. A luz espalhada se propaga em todas as direções mas a maior intensidade é observada a 180° .

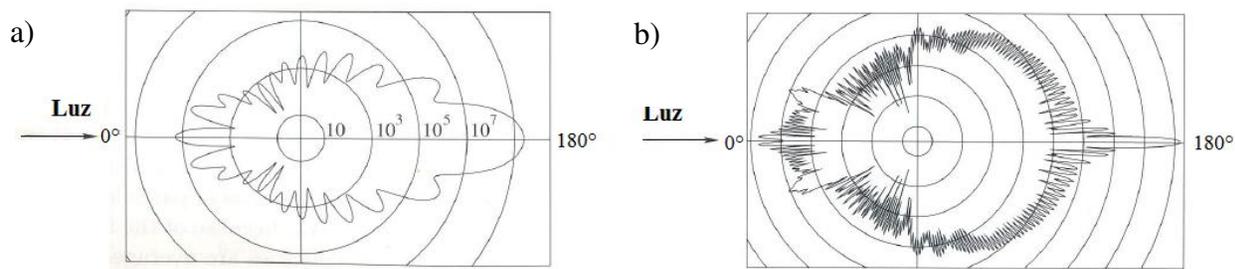


Figura 77 - Luz espalhada por uma partícula de óleo na água de diâmetro de a) $1 \mu\text{m}$ e b) $10 \mu\text{m}$ [Fonte: Raffel et al. (2007)]

É clara a tendência do aumento da intensidade de luz espalhada com o aumento do diâmetro das partículas. Assim, para a determinação satisfatória de um traçador passivo, além de se levar em consideração fatores como a densidade das partículas, é importante a determinação da dimensão adequada dos traçadores: devem ser de tamanho pequeno e densidade aproximadamente igual à do fluido, de forma a seguir o escoamento sem perturbá-lo, porém devem ser capazes de refletir luz suficiente para que sejam visíveis nas imagens obtidas.

Em alguns casos, apenas partículas de poeira presentes no fluido não são suficientes para a obtenção de boas imagens, quando isto acontece é necessário que se adicione traçadores específicos. Em escoamentos em que o fluido de trabalho utilizado é o ar, as partículas traçadoras geralmente utilizadas são gotas de óleo que tem a faixa de diâmetro entre $1 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$. Para aplicações em água, usa-se tipicamente poliestireno, poliamida ou esferas ocas de vidro que tem o diâmetro na faixa de $5 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$.

A eficiência de espalhamento de luz é função do índice de refração dos traçadores comparadas ao fluido em que estão inseridas. Como o índice de refração da água é maior que o do ar, o espalhamento de luz das partículas no ar possui uma ordem de grandeza mais potente do que quando inseridas na água. Desta forma, partículas maiores devem ser usadas em

experimentos na água, para que possam fornecer melhores resultados, desde tenham o comportamento de traçadores passivos no escoamento (Raffel et al., 2007).

Como dito anteriormente, para a obtenção de medidas com qualidade através do PIV, é necessário assegurar-se que as partículas utilizadas seguem o escoamento sem perturbá-lo e que elas refletem suficientemente a fonte de luz utilizada. Além disso, estas partículas também devem estar em quantidades suficiente para que o equipamento seja capaz de capturar e quantificar corretamente o deslocamento entre duas imagens instantâneas. A escassez ou o excesso de traçadores aumenta o erro das correlações entre as imagens, gerando um campo de deslocamento errôneo.

3. Fonte de luz

A fonte de luz deve ser capaz de iluminar um plano de espessura da ordem do milímetro, de possuir uma quantidade relativamente grande de energia para iluminar as partículas e ser capaz de pulsar em pares com um intervalo de tempo adequado. Buscando estes requisitos, a fonte de luz mais amplamente utilizada em equipamentos PIV é o laser.

Todos os lasers tem em sua constituição três componentes: o material do laser, uma bomba e um oscilador. Tem-se diversas opções de lasers disponíveis no mercado para a utilização com o equipamento PIV e uma das mais procuradas é o laser Nd:YAG. É assim chamado, pois o feixe do laser Nd:YAG é gerado por íons Nd^{3+} os quais são incorporados em um cristal YAG (yttrium-aluminum-garnet). Lasers Nd:YAG têm a característica de serem ópticamente bombeados através de uma lâmpada de flash de criptônio ou diodos de laser e possuem um conjunto de espelhos altamente reflexivos, cuja configuração irá gerar um feixe de luz de perfil gaussiano.

Os lasers Nd:YAG possuem alta amplificação, boas propriedades mecânicas e térmicas. Em condições normais de operação, este laser emite em comprimento de onda de $\lambda = 1064$ nm em infravermelho, mas por razões de segurança em aplicações em PIV, utiliza-se $\lambda = 532$ nm, que emite uma luz verde cujo reflexo é geralmente visto a olho nu. Um cabo de fibra ótica pode ser usado para direcionar a luz do laser para a instalação experimental. Lasers Nd:YAG têm a vantagem de poder operar no modo pulsado e no modo contínuo. Quando trabalham no modo

pulsado operam no modo Q-Switch (em inglês, *Quality Switch*), em geral o de maior interesse e o mais usado em PIV.

O modo Q-Switch consiste em um polarizador e um cristal de célula Pockels. Estas células podem ser usadas para liberar a energia guardada no laser em um único pulso através da mudança rápida da reflexividade do ressonador (componente eletrônico que tem a capacidade de produzir oscilações numa frequência específica). Se as células Pockels estiverem arranjadas em combinação com um polarizador no ressonador de laser, a voltagem aplicada determina se a luz pode passar o Q-Switch ou não. No início do processo de bombeamento, o Q-Switch está fechado, então não há oscilação e amplificação do laser. Depois que a energia armazenada atinge o seu máximo, Q-Switch é aberto e a oscilação do laser se inicia imediatamente. A energia armazenada é extraída em um pulso de duração de nanossegundos. Embora o modo Q-Switch possa ser utilizado para gerar mais de um pulso, os lasers para PIV são projetados com sistema de duplo oscilador. Sendo possível que se opere no modo sincronizado e que controle o intervalo de tempo entre os pulsos de cada cavidade, permitindo que o tempo entre dois pulsos de lasers sucessivos também sejam controlados. Este motivo faz com que este sistema seja o de maior interesse para uso em sistemas de medição PIV (Raffel et al., 2007).

O intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo pulso de laser deve ser ajustado para cada uma das vazões trabalhadas e o seu cálculo é baseado na velocidade do escoamento e no tamanho da zona de interrogação que se deseja trabalhar. É importante o ajuste correto deste intervalo pois quando muito longo os traçadores podem atravessar a zona de interrogação, ou até mesmo podem sair do plano de iluminação entre as duas aquisições e quando muito curto o deslocamento das partículas traçadoras não gera boa resolução.

A regulagem da potência do laser é necessária para se obter os contrastes desejados entre os traçadores e o fluido. O uso inadequado da potência do laser pode fazer com que as partículas não fiquem claras o suficiente para que se faça uma boa distinção destas em relação ao fluido de trabalho. Ou contrariamente, causar reflexos parasitas indesejados nas imagens.

4. Plano de luz laser

A escolha das lentes e suas respectivas distâncias podem controlar a espessura e a abertura de iluminação de tal forma que o plano de luz do laser atinja a seção de interesse.

Para fontes de luz como lasers Nd:YAG, a combinação de diferentes lentes é requerida para gerar um plano de luz de espessura fina e alta intensidade (Raffel et al., 2007).

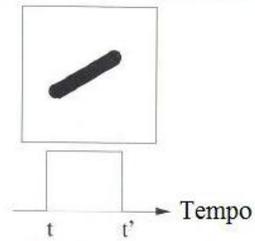
De modo geral, lentes divergentes devem ser utilizadas primeiro pois geram distâncias focais negativas e assim evita-se a criação de linhas focais. Em lasers que produzem alta potência, os pontos focais devem ser evitados para que a poeira na vizinhança deste ponto não seja queimada e mude as propriedades do feixe. A combinação das lentes cilíndricas com lentes esféricas deixa o sistema mais versátil. A altura e a abertura do plano de laser são dadas pela distância focal da lente cilíndrica enquanto a lente esférica é usada para controlar a espessura do feixe em uma desejada espessura. A adaptação da altura do laser deve ser feita alterando as lentes cilíndricas até a obtenção do plano desejado e o ajuste da espessura deve ser controlado deslocando as lentes esféricas entre si.

5. Sistema de aquisição de imagens

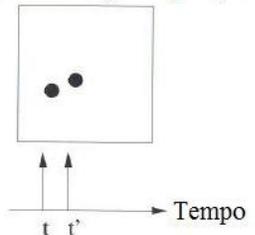
Os modos de gravação do PIV podem ser classificados em duas categorias: (1) captura de imagens em um único suporte (único *frame*) e (2) captura de uma única imagem, relativa a cada pulso de iluminação em um suporte individual (duplo *frame*).

As Figura 78 e Figura 79 exemplificam a utilização da técnica de quadro único (em inglês, *single frame*) e quadros múltiplos (em inglês, *multi-frame*), respectivamente.

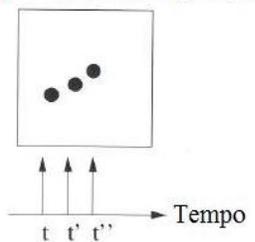
Único quadro /Única Exposição



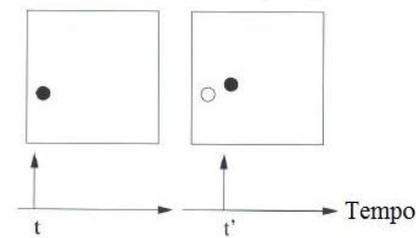
Único quadro /Dupla Exposição



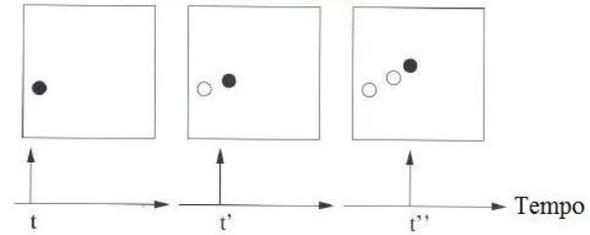
Único quadro /Multi-Exposição



Duplo quadro /Única Exposição



Múltiplos quadros /Única Exposição



Múltiplos quadros /Dupla Exposição

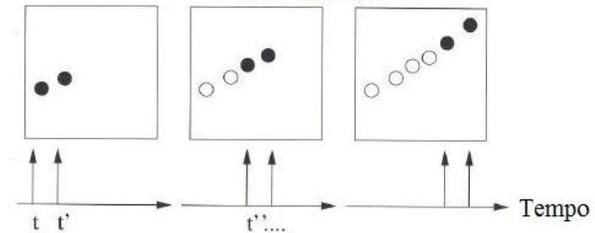


Figura 78 – Técnica de quadro único (em inglês, *single frame*)
[Fonte: Raffel et al. (2007)]

Figura 79 – Técnica de quadros múltiplos (em inglês, *multiple frame*) onde os círculos não preenchidos representam as posições nos quadros anteriores [Fonte: Raffel et al. (2007)]

A principal diferença entre as duas categorias é que a primeira, *single frame*, não retêm informações a respeito da ordem temporal do pulso de luz dando origem a uma ambigüidade direcional quanto ao vetor deslocamento. Para contornar esta situação, é necessário introduzir métodos que solucionem esta ambigüidade. Já a segunda categoria, *multi-frame*, preserva a ordem temporal do deslocamento das partículas nas imagens e se torna o método escolhido em grande parte das aplicações com PIV devido sua facilidade de tratamento de imagens. É um método que torna possível a utilização de uma câmera de alta velocidade desde que o laser sincronizado à câmera suporte frequências elevadas.

Em termos de fotografia, uma exposição dupla é uma técnica na qual o filme é exposto duas vezes a duas imagens diferentes. O resultado desta técnica, em termos fotográficos, é a segunda imagem, sobreposta a primeira. A técnica pode ser usada para adicionar objetos que não estavam originalmente lá. Já em exposição múltipla, uma ou mais exposições individuais são realizadas para criar uma única fotografia.

Os sensores mais comumente utilizados são o CCD (em inglês, *charge coupled device*), CID (em inglês, *charge injection device*) e CMOS. Mas nos últimos anos, o CCD tem ganhado mais espaço no ramo de fotografias digitais e, conseqüentemente, em técnicas de medição como PIV. As câmeras CCD oferecem a vantagem de ter uma boa resolução espacial e uma arquitetura eletrônica que permite a aquisição de duas imagens consecutivas, com um intervalo temporal de microsegundos.

Os sensores CCD que compõem a câmera são responsáveis por converter luz (fotões) em cargas elétricas (elétrons) e podem se apresentar individuais ou em arranjos que variam de forma, como em linha ou retangular. Cada elemento individual do CCD é chamado de pixel (abreviação do termo em inglês *picture element*) e seu tamanho é geralmente da ordem de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ou 100 pixel/mm. (Fonseca, 2009). Os sensores CCD chamados *full frame* representam o CCD na sua forma mais clássica. A Figura 80 descreve esquematicamente a disposição dos sensores CCD. Na figura uma área fotosensível de pixels, que foi exposta a luz, é então lida sequencialmente linha por linha.

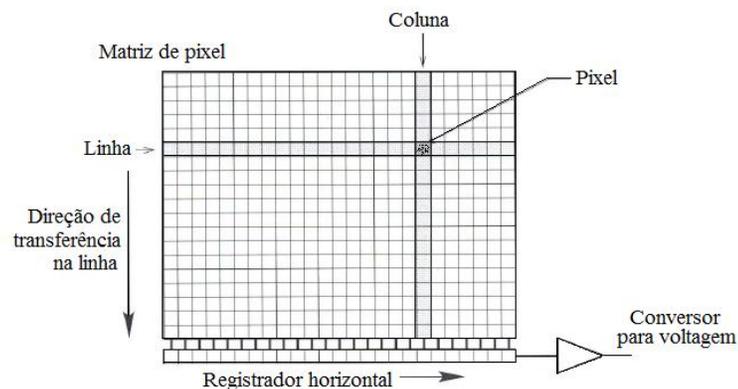


Figura 80 – Geometria típica de um sensor CCD [Fonte: Raffel et al. (2007)]

Cada pixel ativo possui em torno de si um local próprio de armazenamento de carga que é protegido contra exposições de luz. O tempo de transferência entre uma área ótica ativa e a área de armazenamento é menor que $1 \mu\text{s}$, garantindo a rápida transferência de carga entre as duas áreas e estendendo a aplicação do uso de imagens do PIV. A área de armazenamento presente no *pixel* permite a captura de dois *frames* sucessivos em um curto período de tempo. A gravação das imagens é feito em dois passos. A área sensitiva ótica do CCD é exposta e a carga acumulada de cada *pixel* é deslocada rapidamente para a área de armazenamento. Para a leitura da primeira exposição, a carga é deslocada verticalmente obedecendo à direção de transferência. Então, os *pixels* que geraram uma tensão produzem um sinal de vídeo. Enquanto a primeira exposição é lida, a segunda exposição é gravada na área sensitiva de luz no *pixel*. Depois que a leitura da primeira exposição é completada, a segunda imagem é deslocada para a área de armazenamento que será, então, lida. Forma-se um ciclo como mostrado no diagrama temporal para gravação com duplo *frame* da Figura 81 (Raffel et al., 2007).

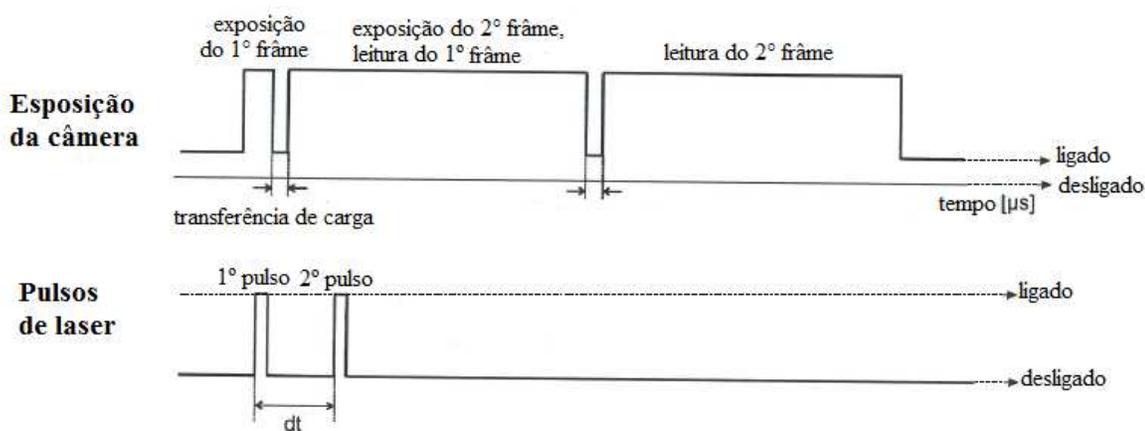


Figura 81 – Esquema de tempo em gravação de duplo quadro (em inglês, *double frame*)

[Fonte: LaVision (2009a)]

O intervalo de tempo para cada exposição no modo duplo *frame* é diferente. Geralmente, o tempo de exposição para o primeiro frame é da ordem de microsegundos, enquanto o tempo para a segunda exposição é determinado pela necessidade de se realizar a leitura da primeira

exposição, que corresponde à taxa de repetição da câmera, que é da ordem de milisegundos. Para tentar contornar esta diferença de tempo entre as duas exposições, um filtro é colocado na lente da câmera, fazendo com que apenas certos comprimentos de ondas possam atingir os sensores CCD e a luz incidente indesejada seja suprimida. O comprimento do flash de laser é que determina a efetividade do tempo de exposição.

Em geral, a câmera deve ser sincronizada com o laser, possuir uma boa resolução espacial e um número suficiente de níveis de cinza para a realização das correlações entre as imagens uma vez que os reflexos do laser aparecem nas imagens em tons de cinza, inversamente proporcionais à intensidade da luz capturada.

6. Sincronizador

O sincronizador proporciona o controle de sistemas e a sincronização entre diferentes componentes. Atualmente, os sincronizadores são digitais e controlados por um computador. Sua função se estende além da sincronização do controle de tempo entre cada disparo de pulso de laser e a captação das imagens pela câmera CCD. Eles podem configurar também a duração e a potência do pulso do laser e os dispositivos externos que auxiliam as medições no equipamento PIV.

7. Análise de imagens

O princípio do PIV é a assimilação de velocidades locais do fluido às velocidades dos traçadores passivos. Para tanto, pares de imagens nos quais os traçadores são visíveis são capturados em um intervalo de tempo conhecido entre cada pulso de laser. Para determinar o campo de velocidades instantâneas do escoamento, basta dividir os deslocamentos dos traçadores pelo intervalo de tempo entre os pares de imagens.

O método mais utilizado para a determinação dos deslocamentos dos traçadores e, conseqüentemente, obtenção da velocidade instantânea do escoamento consiste em realizar

correlações estatísticas entre as imagens, que podem ser auto-correlações ou inter-correlações. As auto-correlações acontecem quando as imagens são registradas em um mesmo suporte, ou seja, um único *frame* com dupla exposição e as inter-correlações ocorrem quando as imagens são registradas em suportes diferentes, ou seja, em dois *frames*. O procedimento de inter-correlações é atualmente o mais utilizado e assim é possível o emprego da técnica de gravação em *frame* duplo/ exposição única.

Neste método, divide-se o campo total capturado pela câmera CCD em pequenas regiões quadradas, chamadas de região, área ou zona de interrogação, que são comparadas entre dois *frames* por inter-correlações. Em geral, a técnica consiste em se fazer transformadas rápidas de Fourier (FFT) da mesma zona de interrogação de cada *frame*, realizar o cálculo do espectro cruzado destas zonas no espaço de Fourier e, então, fazer a transformada inversa de Fourier, conforme ilustrado na Figura 82. Um pico de correlação é obtido correspondendo ao deslocamento mais provável dos traçadores. Para se obter o campo de deslocamentos mais prováveis, deve-se repetir o procedimento para todas as zonas de interrogação. Finalmente, após a multiplicação deste campo por fatores de calibração e da divisão pelo intervalo de tempo entre os *frames*, um campo instantâneo de velocidades é obtido.

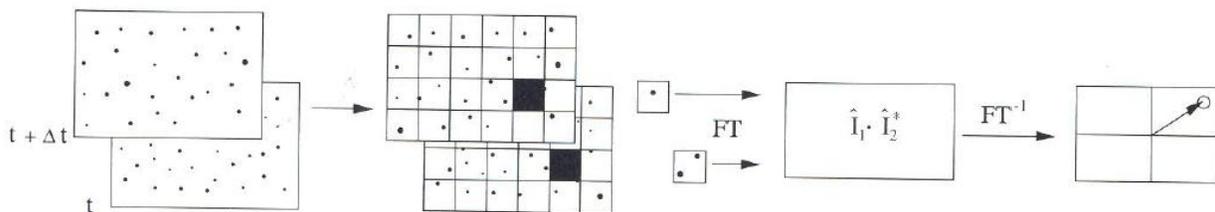


Figura 82 – Análise de gravação em duplo quadro (em inglês, double frame)/exposição simples no método de inter-correlações digitais [Fonte: Raffel et al. (2007)]

Do ponto de vista do processamento de sinais, a primeira imagem pode ser considerada a entrada para um sistema cuja saída produz a segunda imagem do par. A Figura 83 exemplifica a situação. A função de transferência do sistema, H , converte a imagem de entrada I para a imagem de saída I' e tem em sua composição o deslocamento d e o ruído N . A função de interesse é a mudança do vetor d , que é responsável pelo deslocamento das partículas de uma imagem para a

outra. O ruído, N , modela o efeito devido ao ruído de gravação. Se d e N são conhecidos, é possível usá-los como funções de transferência para a imagem de entrada I produzir a imagem de saída I' . Com as imagens I e I' conhecidas, o objetivo é estimar o deslocamento d , considerando os efeitos do ruído, N , desprezíveis. O fato do sinal não ser contínuo gera a necessidade de se estimar a função deslocamento d usando abordagens estatísticas nas zonas de interrogação (Raffel et al., 2007).

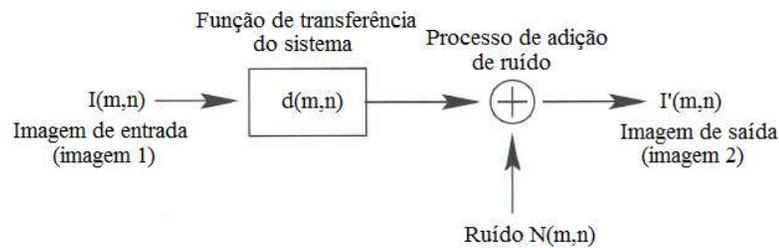


Figura 83 – Modelo de processamento de sinal digital linear descrevendo a relação funcional entre duas sucessivas gravações de quadros de imagens de partículas [Fonte: Raffel et al. (2007)]

Ao invés de se estimar o deslocamento de cada partícula analiticamente deve-se localizar a melhor correspondência entre as imagens em senso estatístico. Isto é realizado através do uso da função de inter-correlação discreta, cuja fórmula é dada por:

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j)I'(i + x, j + y) \quad (1.1)$$

Essencialmente, a janela I é linearmente deslocada ao redor da janela I' , a qual sempre é maior que a primeira. Para cada deslocamento da janela (x, y) , o somatório dos produtos de todas as intensidades dos pixels sobrepostos produz um valor da função de correlação cruzada, $R_{II}(x, y)$, conforme é mostrado na Figura 84. Aplicando-se essa operação ao longo da janela $(-M \leq x \leq +M, -N \leq y \leq +N)$, um plano de correlação de tamanho $(2M + 1) \times (2N + 1)$ é formado. Para valores de deslocamento no qual as partículas se alinham, a soma dos produtos de intensidade do pixel será maior em outro lugar, resultando em um valor R_{II} da correlação muito alto nesta posição. Assim, a função de correlação cruzada mede estatisticamente o grau de coincidência de duas amostras para um dado deslocamento. O valor mais elevado do plano de

correlação pode ser usado para estimar diretamente o deslocamento das imagens das partículas. A Figura 85, extraída de Raffel et al. (2007), foi obtida a partir de dados reais de uma função inter-correlação R_{II} .

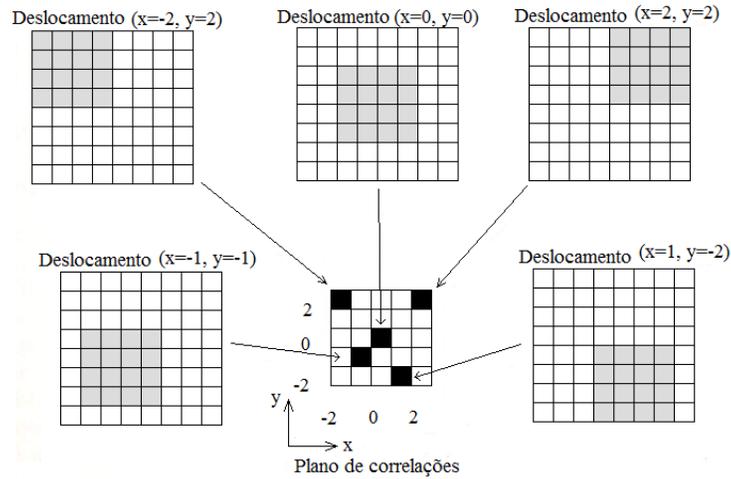


Figura 84 – Exemplo de formação do plano de correlação por inter-correlações diretas: um modelo de 4 x 4 pixel é correlacionada com uma amostra maior de 8 x 8 pixel para produzir um plano de 5 x 5 pixel de correlação [Fonte: Raffel et al. (2007)]

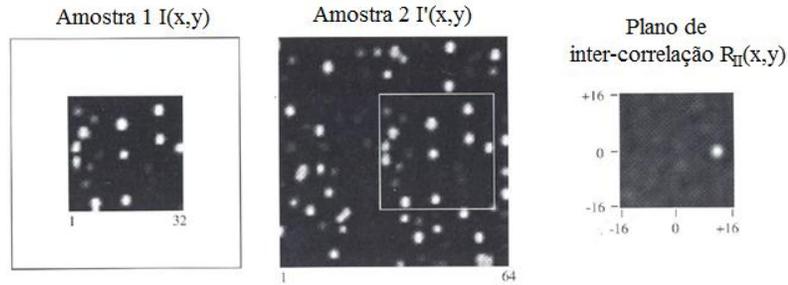


Figura 85 – A função de correlação cruzada R_{II} (direita) computada a partir de dados reais por um pequeno modelo I (32x32 pixel) com um modelo maior I' (64x64 pixel). O deslocamento médio das partículas nas imagens é, aproximadamente, 12 pixels para a direita. [Fonte: Raffel et al. (2007)]

A inter-correlação entre duas amostras de imagens de partículas irá produzir o vetor deslocamento em primeira ordem, isto é, o deslocamento linear médio das partículas dentro da

zona de interrogação. Isto significa que a zona de interrogação deve ser suficientemente pequena tal que os efeitos de segunda ordem, como gradientes de deslocamento, sejam desprezíveis dentro da zona de interrogação.

Uma alternativa ao uso da equação (1.1) é aplicar o teorema de correlação que estabelece que a inter-correlação de duas funções é equivalente à multiplicação da transformada de Fourier, ou seja, realizar os cálculos no espaço de Fourier e retornar ao espaço Real:

$$R_{II} \Leftrightarrow \hat{I} \cdot \hat{I}'^* \quad (1.2)$$

$$R_{II} = F^{-1}\{F[I] \cdot F[I']^*\} \quad (1.3)$$

Onde F é o operador de Transformada de Fourier e F^{-1} é o operador transformada inversa de Fourier. No espaço de Fourier, \hat{I} e \hat{I}' são transformadas das funções I e I', respectivamente. Na prática, estas transformadas são eficientemente implantadas para dados discretos usando as transformadas rápidas de Fourier ou FFT, que reduz o esforço computacional. O processo de cálculo da correlação pode ser feito calculando-se a FFT bidimensional da mesma zona de interrogação de cada imagem, seguido da multiplicação de uma FFT pelo complexo conjugado da outra. Após esta etapa, é realizada a transformada inversa de Fourier, produzindo o plano de correlação que tem a mesma dimensão espacial, NxN, da janela de correlação. A eficiência computacional desta implementação pode ser aumentada ainda mais com a otimização das rotinas FFT's e também através da observação das propriedades simétricas entre as funções de valores reais e suas transformadas de Fourier, ou seja, a parte real da transformada é simétrica: $\text{Re}(\hat{I}_i) = \text{Re}(\hat{I}_{-i})$, enquanto a parte imaginária é assimétrica: $\text{Im}(\hat{I}_i) = -\text{Im}(\hat{I}_{-i})$ (Raffel et al., 2007).

8. Filtros vetoriais

O sinal da correlação é fortemente influenciado por variações na intensidade das imagens. O pico da correlação é dominado por imagens onde algumas partículas se apresentam mais brilhantes que outras. A iluminação não uniforme, que introduz ruídos no plano de correlação, é gerada através de feixe de luz do laser não uniforme, variação na seqüência de pulsos, formato

irregular das partículas, movimento de partículas para fora do plano de análise, etc. Por esta razão, é importante a análise das imagens obtidas antes de processá-las. A aplicação de filtros tem como objetivo o ajuste do contraste e o nivelamento do nível da intensidade das imagens, de modo que, o sinal obtido seja similar para todas as partículas e a contribuição na função de correlação não seja alterada por picos.

Durante o procedimento de avaliação das imagens obtidas através do processo de medição PIV é provável que se encontre picos de correlação, originando pontos onde os dados podem ser errôneos. Em geral, os vetores espúrios, também chamados de vetores falsos, apresentam comportamento discrepante de seus vizinhos, com magnitude ou direções diferentes dos demais e são definidos a partir da observação do comportamento médio dos vetores vizinhos.

A observação crítica é muito eficiente para a detecção dos vetores falsos e seu tratamento pode ser feito através de métodos iterativos, quando se tem um pequeno número de imagens capturadas. Já para um grande número de imagens, o processo de observação não é uma ferramenta viável e assim, deve-se partir para a escolha do processamento automático dos dados do campo de escoamento, utilizando softwares que possuem algoritmos especialmente desenvolvidos para analisar e reconhecer um comportamento distinto.

Os filtros podem ser usados para diversas tarefas como suavizar as imagens, detectar bordas, reforçar a textura e o contraste e, até mesmo, eliminar áreas afetadas por ruídos. Assim, existem inúmeros tipos de filtros e a sua escolha deve levar em conta a eficiência de detecção de vetores espúrios e sua capacidade de implementação, tornando-o automático.

O filtro mais básico que pode-se aplicar em um campo de velocidades instantâneas é o chamado teste do módulo do vetor, na qual faz-se a análise e comparação do módulo de cada vetor obtido com o tamanho da zona de interrogação. Para serem validados, os vetores presentes no campo de velocidades devem se apresentar menores do que o tamanho da zona de interrogação. Além deste filtro, muitos esquemas de validação do PIV utilizam o teste de valor mediano, chamado “filtro Median”. Os algoritmos que contêm este método fazem a checagem de cada vetor de velocidade individual através da comparação de sua magnitude ($|U_{2D}(i, j)|$) com o valor médio de seus vizinhos mais próximos ($\mu_U(i, j)$). Tipicamente, uma vizinhança 3 x 3 com oito vizinhos mais próximos é selecionado. O vetor velocidade a ser validado será rejeitado se a

diferença absoluta entre as magnitudes e a média dos vizinhos estiver acima de um determinado limite. O teste pode ser modificado aplicando não apenas a magnitude mas também os componentes de velocidade U e V do vetor, ou através da utilização de um grande número de vizinhos para comparação.

A expressão a seguir é calculada para $N = 8$ vizinhos próximos:

$$\mu_U(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_{2D}(n) \quad (1.4)$$

A magnitude média do vetor que calcula a diferença entre o vetor médio e seus 8 vizinhos pode ser calculado:

$$\sigma_U^2(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\mu_U(i, j) - U_{2D}(n))^2 \quad (1.5)$$

E o critério de validação dos dados é dado por:

$$|\mu_U(i, j) - U_{2D}(i, j)| < \varepsilon_{Limite} \quad (1.6)$$

Onde $\varepsilon_{Limite} = C_1 + C_2 \sigma_U(i, j)$ onde C_1 e C_2 são constantes.

Este tipo de filtro, quando aplicado em um algoritmo, é capaz de tratar altos gradientes de velocidade através da aplicação do código localmente, fazendo então a comparação do resultado com um valor limite. As constantes devem ser determinadas experimentalmente e podem ser utilizadas para todas as séries de dados do PIV tomadas no mesmo tipo de escoamento (Raffel et al. (2005)). Como exemplo pode-se citar o artigo de Westerweel et al. (2005), no qual ele descreve a possibilidade de se fazer uma adaptação do filtro Median para a detecção de dados espúrios do PIV.

Para os algoritmos de pós-processamento, é necessário ter um campo de dados completo uma vez que existe dificuldade em trabalhar com lacunas nos dados experimentais, geradas por falta de imagens de partículas nas janelas de interrogação ou devido à baixa razão sinal-ruído da imagem. Assim, é possível preencher os espaços vazios que eventualmente surgiram nos campos instantâneos de velocidade através da interpolação bilinear. De acordo com Westerweel (1994), a probabilidade que haja vetores espúrios na própria vizinhança deste vetor espúrio é dado por uma distribuição binomial. Se por exemplo, em um campo de vetores há 5% de vetores espúrios, então mais de 80% destes dados podem ser recuperados por uma interpolação bilinear direta, através da

análise dos quatro vetores contidos na vizinhança destes vetores espúrios. Em sistemas PIV que garantem dados de alta qualidade, menos de 1% de vetores espúrios aparecem sob condições regulares de trabalho e menos de 5% aparecem em situações experimentais consideradas desafiantes. Deste modo, esquemas de reposição não devem ser utilizados se a quantidade de vetores espúrios for maior do que esta (Raffel et al. (2007)).

9. Pós-processamento das imagens

Normalmente, as investigações com o PIV fornecem uma grande quantidade de dados armazenados que podem aumentar com a resolução dos campos instantâneos (tamanho das zonas de interrogação) e o número de imagens adquiridas. A definição da quantidade de imagens que devem ser capturadas deve variar dependendo do tipo de escoamento analisado. Por exemplo, para o caso do estudo de um escoamento turbulento, uma boa apresentação do campo vetorial de velocidades média deve se basear nos princípios estatísticos. Sabe-se que os dados deverão ser processados gerando uma malha quadrada bidimensional de vetores igualmente espaçada, onde cada vetor representa a velocidade instantânea local do fluido na área de medição. Assim, em virtude do alto grau de armazenamento de dados (ordem de gigabytes) que será necessário para a utilização da técnica PIV, recomenda-se que os sistemas de pós-processamento sejam automáticos e rápidos, apontando como melhor opção o uso de computadores.

O pós processamento é uma etapa particular de cada trabalho e a escolha do tipo de processo de cálculo depende dos resultados que se deseja obter. Por exemplo, com a utilização do sistema PIV em escoamento de regime turbulento é possível obter, a partir dos campos instantâneos de velocidade, informações a respeito do campo médio de velocidades, a distribuição dos valores R.M.S. (em inglês, *root mean square*) das flutuações das velocidades e até ajustar o perfil logarítmico do escoamento. Deste modo, um grande número de pacotes computacionais, sejam comerciais ou aqueles desenvolvidos internamente em laboratórios de pesquisa, está disponível para a apresentação dos campos de velocidades instantâneos e médios como resultados de dados obtidos no PIV. Mas ainda a análise dos dados através de uma visão crítica é importante, como forma de avaliação do comportamento do escoamento.