

RODRIGO DE LIMA AMARAL

## EFEITO DA AUTOCALIBRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA PIV TOMOGRÁFICA NO CAMPO DE VELOCIDADE EM UMA SEÇÃO DE UM *RISER* DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

CAMPINAS – SÃO PAULO Abril de 2013

ii



## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

#### **RODRIGO DE LIMA AMARAL**

## EFEITO DA AUTOCALIBRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA PIV TOMOGRÁFICA NO CAMPO DE VELOCIDADE EM UMA SEÇÃO DE UM *RISER* DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO RODRIGO DE LIMA AMARAL E ORIENTADA PELO PROF. DR. MARCO AURÉLIO CREMASCO

Assinatura do Orientador Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

CAMPINAS – SÃO PAULO Abril de 2013

#### FICHA CATALOGRÁFICA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA

Amaral, Rodrigo de Lima, 1988 -

Am13e Efeito da autocalibração volumétrica para PIV tomográfica no campo de velocidade em uma seção de um riser de um leito fluidizado circulante / Rodrigo de Lima Amaral. – Campinas, SP: [s.n.], 2013.

Orientador: Marco Aurélio Cremasco.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

 Calibração. 2. Velocidade. 3. Partículas. I. Cremasco, Marco Aurélio, 1962- II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em inglês: Volume self-calibration effect for Tomographic PIV in velocity field in a riser section of a circulating fluidized bed Palavras-chave em inglês: Calibration Velocity Particle Área de concentração: Engenharia de Processos Titulação: Mestre em Engenharia Química Banca examinadora: Marco Aurélio Cremasco [Orientador] Montserrat Motas Carbonell Reginaldo Guirardello Data de defesa: 25-04-2013 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química Dissertação de Mestrado defendida por Rodrigo de Lima Amaral e aprovada em 25 de abril de 2013 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

aro

Prof<sup>1</sup> Dr. Marco Aurélio Cremasco FEQ/ UNICAMP Orientador

Montrenat Motor Carbonell

Dra. Montserrat Motas Carbonell PETROBRAS

della

Prof. Dr. Reginaldo Guirardello FEQ/ UNICAMP

Aos meus pais, Roberta Lopes de Lima e Francisco de Assis Amaral Lopes, por tudo.

À Grasiela de Sousa Lopes, minha vó, por sempre ter sido uma referência na Família.

À Renata de Lima Amaral, minha irmã, e à Sophia de Lima Amaral, minha sobrinha.

Aos meus familiares e amigos pela torcida e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco, pela oportunidade e por ter confiado no meu trabalho desde o começo. Também o agradeço pela orientação e por toda liberdade que me foi dada, fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro.

À Unicamp e à Faculdade de Engenharia Química pela estrutura e oportunidade cedida.

À PETROBRAS pelo suporte financeiro relativo ao projeto "Implantação de infraestrutura para projetos de modelagem e simulação de processos petroquímicos". Convênio n. 4375.

À Helder Lima de Moura, meu "amigo-irmão", por me acompanhar nessa luta desde 2005.

Aos amigos Carlos "Maranhão", Raphael, Hugo Valença, Erik "China", Jean, Ivanei "Miguelis", Vicente, Alex "Plancknelson", Bruno Tefé, Carlos "Colomba", Ana "Chefa", Bruno Guzzo, Murilo, Clairon, Elenice "Chefa", Wesley e Mateus "Tche" pelo companheirismo, amizade, contribuição, pelas risadas e pelas brincadeiras.

Ao Prof. Dr. Guilherme Castilho pela amizade e ajuda nesse trabalho.

À Fábio Savassi e Jairo Rotava da Quantum Tech pelo suporte técnico e por toda ajuda.

À Steve Anderson da LaVison pelo treinamento técnico da PIV Tomográfica e por toda ajuda no desenvolvimento desse trabalho

À Alcimar da Silveira pela amizade e pela parceria no desenvolvimento da estrutura das câmeras e do sistema *laser*.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Luz Lisbôa pela amizade, pelos conselhos e por ser uma referência para mim.

х

"Nada eu sou.

Apenas um operário.

Amigo das pessoas"

(Autor desconhecido apud Maranhão)

#### **RESUMO**

A técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) é empregada na caracterização do campo de velocidade em diversos tipos de escoamentos. A técnica PIV do tipo tomográfica (Tomographic PIV ou PIV Tomográfica) possibilita a determinação do campo de velocidade do fluido em três dimensões, utilizando partículas que seguem fielmente o fluxo desse fluido. A técnica faz uso de visualizações simultâneas, perspectivas diferentes, das partículas, iluminadas por laser, e sua reconstrução 3D como uma distribuição de intensidade de luz por meio da tomografia óptica para determinação dos vetores velocidades por correlação cruzada 3D. A relação entre a imagem (projeção) e as coordenadas do espaço físico (o objeto) é estabelecida por um procedimento de calibração. Cada câmera registra imagens de um alvo calibração em várias posições de profundidade em todo o volume. A partir dessas imagens o procedimento de calibração retorna uma função de mapeamento. Um procedimento de autocalibração é feito para diminuir o erro da calibração. A autocalibração é uma técnica para a correção a posteriori do desalinhamento do sistema de câmeras e pode melhorar significativamente a precisão da reconstrução tomográfica, o que pode acontecer devido a uma calibração imprecisa ou um leve movimento das câmeras. Esta Dissertação faz uma avaliação experimental do efeito da autocalibração volumétrica para a técnica PIV Tomográfica na investigação da velocidade em uma seção riser de um leito fluidizado circulante. Foi utilizada a técnica PIV Tomográfica, desenvolvida pela LaVision, com 4 câmeras (sensor CCD) e um sistema laser Nd:YAG. Foi desenvolvida uma estrutura que permite o deslocamento das quatro câmeras, nas três direções, e uma estrutura para o sistema laser. Os erros de calibração no volume ficaram entre 0,670 e 1,073 pixel e depois da autocalibração ficaram abaixo de 0,04 pixel. Foi analisado também o campo de velocidade instantânea (t = 71 s), campo de velocidade média no plano Z = 0 mm, flutuações da velocidade ao longo do raio do riser (X = -40, -20, 0, 20 e 40 mm) para Y = -15, 0, +15 mm e Z = -2, 0 e +2 mm. O erro de calibração interfere diretamente na qualidade do volume reconstruído e consequentemente no cálculo do deslocamento das imagens de partículas de forma que o procedimento de autocalibração se torna necessário

Palavras-chave: PIV Tomográfica, calibração, autocalibração, velocidade 3D, riser.

#### ABSTRACT

Particle Image Velocimetry (PIV) technique is employed in the characterization of velocity fields in different types of flow. PIV technique of type tomographic (Tomographic PIV) enables the determination of the velocity field of fluid in three dimensions by using particles which reliably follow the flow of fluid. The technique makes use of simultaneous views, different perspectives of particles illuminated by laser, and its 3D reconstruction as a light intensity distribution by optical tomography for determination of velocity vectors by 3D cross-correlation. The relationship between the image (projection) and the coordinates of physical space (the object) is established by a calibration procedure. Each camera records images of a calibration target in various positions throughout the depth volume. From these images the calibration procedure returns a mapping function. A self-calibration procedure is done to decrease the error of calibration. The self-calibration is a technique of *a-posteriori* correction of misalignment of the camera system and can significantly improve the accuracy of tomographic reconstruction, which can happen due to an inaccurate calibration or a slight movement of the camera. This Dissertation makes an experimental evaluation of the effect of volume self-calibration for Tomographic PIV technique in the investigation of velocity field on a short riser section of a circulating bed. Tomographic PIV technique used in this work was developed by LaVision with 4 cameras (CCD sensor) and Nd:YAG laser system. A structure that allows the displacement of the four cameras in the three directions and a structure for laser system were developed. The calibration errors in volume were between 0.670 and 1.121 pixel and after self-calibration were less than 0.04 pixel. It was also analyzed the instantaneous velocity field (t = 71 s), average velocity field in the plane Z = 0 mm, the velocity fluctuations along the radius of the riser (X = -40, -20, 0, 20 and 40 mm) for Y = -15, 0, +15 mm and Z = -2, 0 and +2 mm. Calibration error directly affects the quality of the reconstructed volume and consequently the calculation of particle images displacement and the self-calibration procedure is necessary.

Keywords: Tomographic PIV, calibration, self-calibration, 3D velocity, riser

# SUMÁRIO

RESL	J <b>MO</b>		xiii
ABST	RAC	CT	<i>xv</i>
NOM	ENC	LATURA	xxiii
LISTA	A DE	E FIGURAS	xxxi
LISTA	A DE	E TABELAS	xliii
CAPÍ	TUL	O 1 Considerações iniciais	1
1.1	INT	TRODUÇÃO	
1.2	OB	JETIVOS	5
1.2	2.1	Objetivos específicos	5
CAPÍ	TUL	O 2 Revisão da Literatura	7
2.1	ΤÉ	CNICAS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE PARTÍCULA	9
2.2 V	/ELO	CIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA	11
2.2	PR.	INCIPAIS TÉCNICAS 3D-PIV	13
2.3	VE	LOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA DO TIPO TOMOGR	ÁFICA
(PIV	' TOM	IOGRÁFICA)	15
2.3	3.1	Princípio de funcionamento da PIV Tomográfica	17
2.3	3.2	Sensores CCD	
2.3	3.2.1	Arquitetura dos sensores CCD	
2.3	3.3	Câmera e imagem	
2.3	3.3.1	Imagem geométrica	
2.3	3.4	Pré-processamento de imagem	
2.3	3.4.1	Vizinhança de um pixel e conectividade	
2.3	3.4.2	Filtro Gaussiano	
2.3	3.4.3	Filtro sliding minimum	
2.3	3.4.4	Filtro sharpening	
2.3	3.4.5	Pré-processamento em PIV	

2.3.5	Autocalibração volumétrica – Método de Wieneke	
2.3.6	Reconstrução tomográfica	
2.3.7	Correlação cruzada	
2.3.8	Iluminação do volume de medida	
2.3.9	Partículas fantasmas	
2.3.10	Concentração de imagem de partícula reconstruída	
2.3.11	Temporização e sincronização	
CAPÍTUI	LO 3 Parte Experimental	49
3.1 M	ATERIAIS	51
3.1.1	Leito fluidizado circulante	
3.1.2	Sistema PIV Tomográfica	
3.1.3	Suporte para as câmeras	
3.1.4	Suporte do sistema laser	
3.1.5	Placa de calibração e fenda para o volume de luz	
3.2 M	ÉTODO	
3.2.1	Arranjo das câmeras	
3.2.2	Calibração volumétrica	
3.2.3	Iluminação a laser	
3.2.4.	Avaliação do efeito da autocalibração	
CAPÍTU	LO 4 Resultados e Discussão	67
4.1	AVALIAÇÃO DO ARRANJO DAS CÂMERAS E DO PRÉ-	
PROC	ESSAMENTO	69
4.1.1	Arranjo quadrado	
4.1.2	Arranjo linear	
4.2	CALIBRAÇÃO	
4.3	AUTOCALIBRAÇÃO	
4.4	EFEITO DA AUTOCALIBRAÇÃO	
CAPÍTUI	LO 5 Considerações Finais	
5.1. Ce	ONCLUSÃO	
5.2. SU	UGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
REFERÊ	ÈNCIAS	

APÊND.	<i>ICE</i>	
A1	CALIBRAÇÃO	
A2	AUTOCALIBRAÇÃO	
A3	EFEITO DA AUTOCALIBRAÇÃO	
A4	SEGURANÇA NA UTIULIZAÇÃO DO LASER E DAS C	ÂMERAS EM
PIV		
A4.1 -	- Segurança no uso do Laser	
A4.2 -	- Segurança no uso da câmera	

### Letras Latinas

A <sub>p</sub> - Área da imagem da partícula	$[pixel^2]$
c – Maior pico de correlação	[-]
C- Valor de correlação	[-]
$C_p$ – Concentração de partícula	[partículas/cm <sup>3</sup> ]
$D_i$ - Diâmetro da área de interrogação	[pixel]
d <sub>i</sub> - Vetor disparidade	[-]
D <sub>R</sub> - Resolução da imagem digital	$[pixel/ mm^1]$
$d_{\tau}$ - Diâmetro da imagem de partícula.	[pixel]
$d_{\tau}^{*}$ - Diâmetro da imagem de partícula normalizado	[-]
E - intensidade da luz da imagem de partícula reconstruída	[Counts]
f - Função bidimensional da intensidade de luz no plano de imagem.	[Counts]
<i>I</i> - intensidade de luz no <i>pixel</i>	[Counts]
L <sub>p</sub> – Distância entre o laser e a fenda.	[m]
L <sub>z</sub> - Comprimento do volume ao longo da direção de profundidade	[pixel]
<i>M</i> – Função de Mapeamento	[ <i>pixel</i> /mm]
<i>M</i> <sub>0</sub> - Magnificação paraxial ou nominal.	[-]
$M_{\rm I1}$ - Tamanho da área de interrogação na direção horizontal	[pixel]
$M_{12}$ - Tamanho da área de interrogação na direção vertical	[pixel]
$M_{ref}^{-1}$ - Inverso da função de mapeamento	[-]
N - Tamanho da vizinhança do <i>pixel</i> alvo	$[pixel^2]$
N <sub>C</sub> – Número de câmeras	[câmera] xxiii

N <sub>f</sub> – Número de partículas fantasmas	[partículas fantasmas]
$N_H$ – Tamanho da vizinhança do <i>pixel</i> alvo na direção horizontal	[pixel]
N <sub>I</sub> – Número de imagens de partícula	[imagens de partícula]
N <sub>IC</sub> – Número de imagens de partículas correspondentes	[imagens de partícula]
N <sub>p</sub> – Número de partículas	[partículas]
N <sub>PC</sub> - Número total de pontos na placa de calibração	[-]
N <sub>R</sub> – Concentração de imagens de partículas reconstruídas	[partículas/voxel]
N <sub>RVI</sub> - Concentração de imagens de partículas reconstruídas por vol	ume de interrogação
	[partículas/voxel]
N <sub>S</sub> – Concentração da fonte	[partículas/pixel <sup>2</sup> ]
$N_V$ – Tamanho da vizinhança do <i>pixel</i> alvo na direção vertical	[pixel]
N <sub>VOX</sub> - O número total de <i>voxels</i> na linha de visão	[-]
ppp - Concentração da imagem de partícula	[partículas/pixel]
Q – Qualidade do volume de reconstrução	[-]
t – tempo	[s]
w - Coeficiente de ponderação	[-]
X- Posição no espaço de imagem	[pixel]
X, Y – Coordenada do plano no espaço de imagem.	[pixel]
X` - Posição no espaço físico	[mm]
X´, Y´ – Coordenada do plano no espaço físico	[mm]
x <sub>C</sub> – Conjunto de pontos sobre o alvo de calibração	[pontos]
$(x_i, y_i)$ Projeção do ponto no espaço de imagem $(X, Y, Z)$	[pixel]
$\boldsymbol{x}_p(t)$ - Posição da imagem de partícula no plano da câmera (x´, y´)	[pixel]
$\dot{X_p}(t)$ - Posição da partícula no espaço físico (X', Y', Z') em funçã	io do tempo [mm]

$x_{ref}$ , $y_{ref}$ - coordenada de referência da calibração no plano de imagem	[pixel]
$X_{ref}$ , $Y_{ref}$ - Coordenadas de referência no espaço de imagem	[pixel]
Z - Coordenada de profundidade no espaço de imagem	[pixel]
Z´ - Coordenada de profundidade no espaço físico	[mm]
$z_0$ - Distância entre o centro efetivo da lente e o plano de imagem.	[mm]
$Z_0$ - Distância entre o objeto e o centro efetivo da lente	[mm]

#### Letras gregas

- $\alpha$  Ângulo entre o plano da lente e o plano de imagem
- $\beta$  Ângulo de abertura das câmeras
- $\epsilon$  Erro de calibração
- $\epsilon_{max}$  Erro máximo de triangulação permitido
- $\theta$  Ângulo entre o plano da lente e o plano do objeto
- $\mu$  Parâmetro de relaxamento escalar
- $\mu_I$  média da intensidade de luz nos *pixels*
- $\sigma$  Desvio padrão da função Gaussiana

#### Abreviaturas

- CCD Dispositivo De Carga Acoplada (Charge Coupled-Devices)
- CI Circuito Integrado
- CW Onda Contínua (Continuous Wave)
- FCC Craqueamento Catalítico (Fluid Catalytic Cracking)
- FT Frame Transfer

HPIV – Velocimetria por Imagem de Partícula do tipo Holográfico (*Holographic Particle Image Velocimetry*)

KDP - Fosfato de Dideuterium de Potássio (Potassium Dideuterium Phosphate)

LDV – Linha de Visão

MART – Técnica de Reconstrução Algébrica Multiplicativa (*Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique*)

MOS - Metal-Óxido Semicondutores (Metal-Oxide-Semiconductor)

PIV – Velocimetria por Imagem de Partícula (Particle Image Velocimetry)

Pixel – Elemento de Imagem (Picture Element)

PTU – Unidade de Tempo Programável (Programmable Timing Unit)

PTV – Velocimetria por Rastreamento De Partícula (Particle Tracking Velocimetry)

SPIV - Velocimetria por Imagem de Partícula do tipo *Scanning (Scanning Particle Image Velocimetry*)

Voxel - Elemento de Imagem Volumétrico (Volumetric Picture Element)

#### LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Princípio de funcionamento da velocimetria por imagem de partícula (PIV)11
Figura 2.2 - Análise das propriedades dos <i>clusters</i> feita por Shi (2007)12
Figura 2.3 (a) Leito de jorro com duas fendas simétricas e (b) análise do campo de velocidade feita por Gryczka <i>et al.</i> (2008)
Figura 2.4 - Imagens gravadas e seus respectivos campos vetoriais obtido por He <i>et al.</i> (2009)
Figura 2.5 - Número de publicações que abordam o desenvolvimento da PIV Tomográfica ou suas aplicações em mecânica dos fluidos (Fonte: <i>Web of Science</i> ) (SCARANO, 2013).16
Figura 2.6 - Análise da velocidade em 3D em uma seção de um riser apresentado por Amaral <i>et al.</i> (2012a)
Figura 2.7 - Princípio de funcionamento da PIV Tomográfica17
Figura 2.8 - Estrutura básica da seção transversal de um sensor CCD (Adaptado de Kodak, 2010)
Figura 2.9 - Diagrama de bloco simplificado das três arquiteturas de sensores CCD fundamentais. As setas indicam o movimento dos pacotes de carga, facilitado pelos sinais de clock (Adaptado de Dalsa, 1998)
Figura 2.10 - Esquema de câmeras CCD full-frame interline transfer (Baseado em Raffel et al, 2007)
Figura 2.11 – (a) Representação esquemática da imagem geométrica para (b) uma magnificação constante e (c) para uma magnificação paraxial
Figura 2.12 - (a) Conectividade da vizinhança da imagem. (b) Exemplo de vizinhança 3x3 centrado em um <i>pixel</i> alvo (Adaptado de Solomon e Breckon, 2011)
Figura 2.13 - Mecanismo de filtragem da imagem (Equação 2.5) com uma máscara de convolução $N_H \times N_V = 3 \ge 3$ (Adaptado de Solomon e Breckon, 2011)
Figura 2.14 - Núcleos do filtro Gaussiano (a) $3 \times 3 \sigma = 1$ , (b) $11 \times 11 \sigma = 2 e$ (c) $21 \times 21 \sigma = 4$ (SOLOMON e BRECKON, 2011)

Figura 2.15 - Linhas de visão das quatros câmeras para uma função de mapeamento perfeita
(linha pontilhada)
Figura 2.16 - Triangulação da imagem de partícula (Adaptada de Wieneke, 2008)31
Figura 2.17 - Mapa de disparidade para um único subvolume
Figura 2.18 - Esquema do procedimento de correlação cruzada
Figura 2.19 - Princípio da análise estatística na interrogação PIV (Adaptado de Adrian e Westerweel, 2011)
Figura 2.20 – Esquema típico de um <i>laser</i> Nd:YAG pulsado de dupla-cavidade
Figura 2.21 – Formação do volume de iluminação destacando o perfil de intensidade antes e depois da fenda
Figura 2.22 – Configuração óptica (colimador) para iluminação a <i>laser</i> utilizada por Schröder <i>et al.</i> (2008)
Figura 2.23 - (a) Formação de partículas fantasmas em uma configuração de duas câmeras, (b, c e d) Solução da reconstrução para duas partículas numa configuração de duas câmeras (Baseado em Elsinga <i>et al.</i> , 2006b)
Figura 2.24 - Efeito do aumento da concentração de partículas na formação de partículas fantasmas (Adaptado de Atkinson e Soria, 2007)
Figura 2.25 - Efeito da espessura do volume na formação de partículas fantasmas (Adaptado de Atkinson <i>et al.</i> , 2011)
Figura 2.26 - (a) Formação de partículas fantasmas que contribuam para a correlação cruzada e (b) não-correlação entre partículas fantasma (Adaptado de Elsinga <i>et al.</i> , 2011).
Figura 2.27 – Três tipo de concentração de partícula usadas em PIV Tomográfica
Figura 2.28 - Qualidade do volume reconstruído em função da concentração de partículas e do número de câmeras (ELSINGA <i>et al.</i> , 2006)
Figura 2.29 – Diagrama do sistema de temporização típico em PIV (Adaptado de Adrian e Westerweel, 2011)

Figura	2.30 -	Diagrama	de	temporização	típico	para	um	sistema	PIV	usando	câmeras
digital	dual-fra	ume (Adapta	ado	de Adrian e W	esterw	eel, 2	011)				

Figura 3.1 - Esquema do leito fluidizado circulante
Figura 3.2 - Alimentador de ar (a) na entrada do <i>downer</i> , (b) na estrada da curva do U e na entrada do <i>riser</i>
Figura 3.3 - Detalhes do alimentador de ar (dispositivo de quatro bicos)
Figura 3.4 - Alimentador de partículas, silo de carregamento e ciclone do leito fluidizado circulante
Figura 3.5 - Região do <i>riser</i> investigada54
Figura 3.6 – Estrutura para o sistema óptico desenvolvido pela LaVision para PIV. (a) Trilho para o deslocamento das câmeras. (b) Cabeça engrenagem
Figura 3.7 – Suporte das câmeras. (a) Trilho desenvolvido pela LaVision. (b) Perfil de alumínio 40 x 80 utilizado no quadro. (c) Trilho menor. (d) Cantoneira utilizada para prender os trilhos no quadro. (e) Fenda para fixar o quadro na base
Figura 3.8- (a) Suporte do sistema <i>laser</i> . (b) Perfil de alumínio 40 x 40 mm <sup>2</sup> (c) Cantoneira usada para fixar a mesa no perfil
Figura 3.9 – (a) Pontos da placa de calibração (a = 2,5 mm e b = 0,5 mm). (b) Placa com uma fenda (90 x 17 mm <sup>2</sup> ) utilizada na obtenção do volume de luz homogêneo58
Figura 3.10 - Arranjo (a) linear e (b) quadrado das câmeras
Figura 3.11 - (a) Arranjo linear e (b) quadrado das câmeras no <i>riser</i>
Figura 3.12 – Efeito do ângulo de abertura na forma da imagem de partícula reconstruída (Adaptado de Scarano, 2013)
Figura 3.13 - Leito fluidizado circulante destacando a posição da placa de calibração61
Figura 3.14 – (a) Arranjo do sistema de <i>lasers</i> no <i>riser</i> . (b) Feixe de <i>laser</i> no <i>riser</i>
Figura 3.15 – (a) Arranjo do sistema de <i>lasers</i> para a formação do volume de iluminação no <i>riser</i> . (b) Espumas pretas usadas para isolar a área investigada
Figura 3.16 - Fluxograma da avaliação do efeito da autocalibração64
Figura 4.1 - Eleito da luz <i>laser</i> no <i>riser</i> para a câmera Q2 sem as partículas (Arranjo quadrado)
---
Figura 4.2 - Imagem da câmera Q2 (a) antes e (b) após o procedimento de subtração de imagem do <i>riser</i> (Equação 3.3)70
Figura 4.3 - Imagem das quatro câmeras para a configuração quadrada após a subtração de imagem do <i>riser</i> (Equação 3.3)
Figura 4.4 - Efeito da luz <i>laser</i> no <i>riser</i> para a câmera L1 (Arranjo linear)72
Figura 4.5 - Comparação entre o efeito da luz <i>laser</i> no tubo para o arranjo quadrado e linear das câmeras
Figura 4.6 - Imagem da câmera L1 (a) antes e (b) após o procedimento de subtração de imagem (no instante t = $0,71s$ )73
Figura 4.7 - Imagem das quatro câmeras para o arranjo linear após a subtração de imagem (no instante t = $0,71$ s)
Figura 4.8 - Configuração usada por Amaral <i>et al.</i> (2012a e 2012b)
Figura 4.9 – Imagem pré-processada para as quatro câmeras (no instante $t = 0,71s$ )75
Figura 4.10 – Volume calibrado (azul) e volume autocalibrado (vermelho)
Figura 4.11 – Mapa de disparidade da câmera 1, no plano Z <sub>2</sub> =1mm, para as 300 gravações para um (a) $\gamma = 1,0$ ; (b) $\gamma = 0,23$ ; (c) $\gamma = 0,10$ e (d) $\gamma = 2,68$
Figura 4.12 - Mapa de disparidade da câmera 1, no plano Z <sub>2</sub> =1mm, para as 300 gravações depois da autocalibração para um (a) $\gamma = 1,0$ ; (b) $\gamma = 0,23$ ; (c) $\gamma = 0,10$ e (d) $\gamma = 2,68$ 78
Figura 4.13 – <i>Iso-surfaces</i> da concentração média da imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação (16 <i>voxels</i> ) com a autocalibração para as 300 gravações
Figura 4.14 – Imagens da câmera 1 em diferentes tempos
Figura 4.15 – Mapa de disparidade ( $\gamma = 0.23$ ) da câmera 1 através do volume80
Figura 4.16 - Campo de vetor disparidade da câmera 1 através do volume

Figura 4.17 – Iso-surfaces da concentração de imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração no mesmo Figura 4.18- Concentração de imagem de partícula por volume de interrogação N<sub>RVI</sub> (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração, no ponto (0, 0, 0), em função do tempo. Figura 4.19 - Iso-surfaces da concentração média de imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação (16 voxels) sem o procedimento de autocalibração para as 300 Figura 4.20 - Simulações realizada por Elsinga *et al.* (2006) avaliando o efeito do (a) erro Figura 4.21 - Comparação entre um intervado do volume reconstruído (a) sem e (b) com o Figura 4.22 – Campo de velocidade instantânea (t = 0.71s) no plano Z = 0 mm (a) sem e Figura 4.23 - Campo de velocidade média no plano Z = 0 mm (a) sem e (b) com o Figura 4.24 - Campo vetorial instantâneo (t = 0,71s) completo (a) sem e (b) com o Figura 4.25 - Flutuação da velocidade, para Y = 0 mm e Z= 0 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.....90 Figura 4.26 - Iso-Surfaces do módulo da velocidade média (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração......91 Figura 4.27 - Análise da correlação cruzada na interrogação do volume reconstruído sem e com o procedimento de autocalibração......92 Figura 4.28- Efeito da variação no número de imagens de partículas correspondentes  $N_{IC}$ (a) no pico de correlação e (b) no pico de correlação normalizado em PIV (Adaptado de 

Figura 5.1 - Arranjo experimental para a avaliação do erro do campo de velocidade usano	do
dois sistemas Stereo-PIV e um PIV Tomográfica	99
Figura 5.2 - Sugestão para o sistema de iluminação no riser	00

Figura A3.1 - Comparação entre do volume completo reconstruído (a) sem e (b) com o
procedimento de autocalibração para o instante
Figura A3.2 -Flutuação da velocidade, para $Y = 0 \text{ mm e } Z = + 2 \text{mm}$ , sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z114
Figura A3.3 - Flutuação da velocidade, para $Y = 0 \text{ mm e } Z= -2 \text{mm}$ , sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z115
Figura A3.4 - Flutuação da velocidade, para $Y = -15$ mm e Z= 0 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z116
Figura A3.5 - Flutuação da velocidade, para Y = -15 mm e Z= 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z
Figura A3.6 -Flutuação da velocidade, para Y = -15 mm e Z= -2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z
Figura A3.7 - Flutuação da velocidade, para $Y = 15$ mm e Z= 0 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z119
Figura A3.8 - Flutuação da velocidade, para $Y = 15$ mm e Z= 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z120
Figura A3.9 - Flutuação da velocidade, para Y = 15 mm e Z= - 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z

Figura A4.1 – Arranjo esperimental usado por Amaral et al.(2012a e 2012b) destacando	0
volume de luz <i>laser</i>	6
Figura A4.2 - Arranjo esperimental usado nessa Dissertação12	27

Tabela 2.1 - Principais técnicas de medição de velocidade de partícula em leitos fluidizados
(Adaptado de ZHOU <i>et al.</i> 1995)9
Tabela 2.2 – Volume de medição típico em experimentos <i>PIV Tomográfica</i> (SCARANO,
2013)
Tabela 3.1 - Resultado das análises das propriedades físicas do catalisador de FCC
(BETIOLI, 2007)
Tabela 3.2 - Resumo dos principais parâmetros utilizados para aquisição e processamento
das imagens de partículas no riser pela PIV Tomográfica65
Tabela 4.1 - Coeficientes da função de mapeamento da câmera 1 para os planos Z de
calibração (X' <sub>0</sub> = 1930,26; Y' <sub>0</sub> = 768,576; $n_x$ = 747,69; $n_y$ = 996,92)76
Tabela 4.2 - Erro de calibração das quatro câmeras para os sete planos
Tabela 4.3 - Erro de calibração das quatro câmeras para os cinco planos após o
procedimento de autocalibração
Tabela 4.4 - Coeficientes da função de mapeamento da câmera 1 para os planos Z após a
autocalibração (X' <sub>0</sub> = 303; Y' <sub>0</sub> = 303; $n_x$ = 607; $n_y$ = 607)
Tabela 4.5 - Análise da velocidade média, para $Z = 0$ mm, sem e com o procedimento de
autocalibração
Tabela 4.6 – Apresenta um resumo dos principais parâmetros para a autocalibração e
determinação da distribuição da velocidade no <i>riser</i> utilizado

Tabela A1.3– Coeficientes da função de mapeamento da câmera 4 para os planos Z de calibração ( $X'_0 = 1930,26$ ;  $Y'_0 = 768,576$ ;  $n_x = 747,69$ ;  $n_y = 996,92$ )......109

Tabela A2.1- Coeficientes da função de mapeamento da câmera 2 para os planos Z após a
autocalibração ( $X'_0 = 303$ ; $Y'_0 = 303$ ; $n_x = 607$ ; $n_y = 607$ )110
Tabela A2.2 - Coeficientes da função de mapeamento da câmera 3 para os planos Z após a
autocalibração (X $_0$ = 303; Y $_0$ = 303; n <sub>x</sub> = 607; n <sub>y</sub> = 607)11
Tabela A2.3- Coeficientes da função de mapeamento da câmera 4 para os planos Z após a
autocalibração ( $X'_0 = 303$ ; $Y'_0 = 303$ ; $n_x = 607$ ; $n_y = 607$ )112

Tabela A3.1 - Análise da velocidade média, para $Z = -2 \text{ mm}$ , sem	e com o procedimento de
autocalibração	
Tabela A3.2 - Análise da velocidade média, para $Z = +2$ mm, sem	e com o procedimento de
autocalibração	

## **CAPÍTULO 1** Considerações iniciais

Além da motivação do tema desta Dissertação, este capítulo apresenta a técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV). Em seguida, são expostos os objetivos gerais e específicos que se desejam alcançar.

## 1.1 INTRODUÇÃO

Os processos em leitos fluidizados circulantes (LFC) têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo a combustão, gaseificação, craqueamento catalítico, calcinação de óxido de alumínio, etc. A compreensão dos regimes de escoamentos em *risers* de LFC é importante porque diferentes regimes de escoamento fornecem uma mistura gás-sólido muito diferente e, portanto, diferentes taxas de reação química (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Rhodes e Geldart (1987) demonstraram a existência de não uniformidades radiais na concentração da suspensão e do fluxo de partículas e provaram que os fenômenos fluidodinâmicos em *risers* de LFC não eram diferentes daquelas conhecidas em reatores de transporte da indústria do petróleo. É amplamente reconhecido que o *riser* de um LFC opera, geralmente, em um regime caracterizado por um núcleo diluído rodeado por uma suspensão caindo lentamente próximo das paredes (RHODES e LAUSSMANN, 1992). O conhecimento do campo de velocidade, em leitos fluidizados, é muito importante na mistura gás-partículas, no que diz respeito à transferência de massa, transferência de calor e na reação química em *risers* de um LFC (ZHOU *et al.*, 1995).

Atualmente, estes tipos de escoamentos são investigados pela velocimetria por imagem de partícula (*Particle Image Velocimetry* - PIV) por causa da sua capacidade de visualizar e quantificar o campo de velocidade instantânea dentro de um plano inteiro do domínio do escoamento. O potencial da PIV é estendido para obter os três componentes de velocidade no plano da folha de luz por meio da utilização de duas câmaras que registram movimento das partículas traçadoras de direções de visualização diferente. Esta técnica é referida como *Stereoscopic*-PIV (WILLERT, 1997). Vários métodos têm sido propostos para estender a técnica de PIV a uma técnica de medição tridimensional. *Scanning* PIV, velocimetria por imagem de partícula do tipo holográfica (*Holographic*-PIV ou HPIV), velocimetria 3D por rastreamento de partículas (3D PTV) e velocimetria por imagem de partículas do tipo tomográfica (PIV Tomográfica). A técnica PIV Tomográfica faz uso de dispositivos de imagem digitais e permite uma resolução espacial que é típica entre 3D PTV (concentração diluída de partículas no escoamento) e *Scanning* PIV (alta concentração de partículas no escoamento) (ELSINGA *et al.*, 2006a).

A velocimetria por imagem de partícula do tipo tomográfica, PIV Tomográfica ou Tomo-PIV, é uma técnica de medição óptica, desenvolvida por Elsinga et al. (2005a e 2005b), que determina o campo de velocidade em três dimensões (3D). Partículas imersas no escoamento (gasoso ou líquido) são iluminadas por uma fonte de luz pulsada em uma região do espaço 3D. O padrão de luz espalhada é registrado simultaneamente, de várias direções de visualização, utilizando câmeras CCD (Charge-Coupled Device). A distribuição de partículas em 3D (o objeto) é reconstruída como uma distribuição de intensidade da luz em 3D a partir de suas projeções sobre as matrizes CCD. A relação entre a imagem (projeção) e as coordenadas do espaço físico (o objeto) é estabelecida por um procedimento de calibração. Cada câmera registra imagens de um alvo calibração em várias posições de profundidade em todo o volume. A partir dessas imagens o procedimento de calibração retorna uma função de mapeamento. Um procedimento de autocalibração é feito para diminuir o erro da calibração. A reconstrução tomográfica depende da triangulação exata dos pontos de vista das câmeras. A autocalibração é uma técnica para a correção a posteriori do desalinhamento do sistema de câmeras e pode melhorar significativamente a precisão da reconstrução tomográfica, o que pode acontecer devido a uma calibração imprecisa ou um leve movimento das câmeras. O deslocamento de partículas (velocidade), dentro de um volume de interrogação escolhido, é então obtido pela correlação cruzada 3D da distribuição de partículas reconstruída nas duas exposições (ELSINGA et al., 2006a). A PIV Tomográfica não pode ser usada na investigação da velocidade em concentrações de partículas (com um diâmetro entre 10 e 50 µm) maiores do que 10 partículas/ mm<sup>3</sup>. A técnica pode ser aplicada em regimes transientes (Time-resolved Tomographic PIV ou PIV 4D) e em geometrias complexas com acesso óptico (entradas de reatores, motores, artérias, tubos, etc).

A PIV Tomográfica foi aplicada na análise de escoamento do sangue em uma artéria carótida humana (BUCHMANN *et al.*, 2011), da camada limite turbulenta (Atkinson et al., 2009), da camada limite turbulenta de baixa velocidade (ELSINGA *et al.*, 2007a), da camada limite turbulenta supersônica (ELSINGA *et al.*, 2007b) e da velocidade da fase particulada em uma seção de um *riser* (AMARAL *et al.*, 2012a).

Alguns problemas são relatados em PIV como, por exemplo, perdas de pares de imagens de partículas na análise da velocidade (principalmente para PIV 2D), iluminação

não-homogênea do plano de luz (ou volume de luz para PIV 3D), falta de foco no volume, distorção da imagem causada por janela óptica, etc. Vários métodos são usados para resolver ou diminuir o efeito desses problemas como, por exemplo, a autocalibração volumétrica para PIV Tomográfica.

## 1.2 OBJETIVOS

Esta Dissertação tem como principal objetivo avaliar o efeito da autocalibração volumétrica para a técnica velocimetria por imagem de partícula do tipo tomográfica (PIV Tomográfica) na investigação do campo de velocidade da fase particulada em uma seção *riser* de um leito fluidizado circulante.

## 1.2.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal da presente Dissertação, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento do suporte para as câmeras e para o sistema laser.
- Estudo do melhor arranjo para as 4 câmeras (linear ou quadrado).
- Construção da placa de calibração.
- Avaliação do efeito da luz *laser* na parede do *riser*.
- Avaliação do pré-processamento da imagem.
- Estudo detalhado do efeito dos parâmetros de autocalibração (tamanho do subvolume, erro máximo permitido e limite de intensidade na imagem no mapa de disparidade).
- Avaliação do erro de ajuste da função de mapeamento depois da autocalibração volumétrica.

- Avaliação do efeito da autocalibração volumétrica para a PIV Tomográfica na concentração de imagem de partícula reconstruída e na velocidade instantânea na direção X, Y e Z.
- Avaliação da autocalibração na flutuação de velocidade e na velocidade média nas direções X, Y e Z.

# CAPÍTULO 2

## Revisão da Literatura

Este capítulo tem como objetivo apresentar a técnica PIV Tomográfica e conceitos fundamentais relacionados a ela. Na primeira parte são apresentadas as principais técnicas PIV 3D mostrando as vantagens e desvantagens de cada técnica. Na segunda parte é apresentada a fundamentação teórica da PIV Tomográfica. É discutido o princípio de funcionamento da técnica, arquitetura dos sensores CCD, filtros de imagem, calibração volumétrica, autocalibração volumétrica, reconstrução tomográfica, correlação cruzada 3D, iluminação laser e a formação de partículas fantasmas.

## 2.1 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE PARTÍCULA

A observação, a medição, o controle, o cálculo, a comunicação e o registro de dados, bem como a instrumentação associada, são atributos e meios fundamentais em qualquer ramo da engenharia. A técnica de medição é um conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza. Estas operações podem ser realizadas manualmente ou automaticamente (CAMPILHO, 2000).

As técnicas de medição de velocidade podem ser intrusivas (contado direto com o meio analisado) ou não intrusivas. São exemplos de técnicas intrusivas a sonda de fibra óptica e o tubo de Pitot. São exemplos de técnicas não intrusivas a *Laser Doppler Velocimetry (LDV)* e a Velocimentria por Imagem de Partícula (PIV). A Tabela 2.1 e Tabela 2.2 apresentam as principais técnicas de medição de velocidade de partícula em leitos fluidizados.

Técnica	Aplicação
Tubo de Pitot	BADER <i>et al.</i> (1988) usaram um tubo de Pitot para medir velocidades de partículas locais. Tanto o perfil do fluxo de sólidos e do perfil de velocidade radial de partícula no <i>riser</i> foi considerado parabólico. No entanto, por causa da alta velocidade de queda gás-sólido e interferência causada por uma sonda relativamente grande, um tubo de Pitot não é um instrumento preciso para medir as velocidades de partículas. Também pode ser facilmente bloqueado por partículas finas.
Sondas de fibra óptica	Sondas de fibra óptica foram usadas por HARTGE <i>et al.</i> (1986), HORIO <i>et al.</i> (1988), ISHII e MURAKAMI (1990), NOWAK <i>et al.</i> (1990) e RHODES <i>et al.</i> (1990) para medir as velocidades de partículas na seção de um <i>riser</i> circular de um leito fluidizado circulante. As partículas geralmente se movem para cima na região central do <i>riser</i> . A velocidade das partículas diminui a partir do centro em direção à parede e partículas se movem para baixo próximos à parede.
Fotografia estroboscópica	ZHENG <i>et al.</i> (1992) desenvolveram um sistema multicor, controlado por um microcomputador, de fotografia estroboscópica para estudar o movimento de partículas na região próxima à parede em leitos fluidizados circulantes. Sucessivas imagens vermelhas, azuis e amarelas de partículas traçadoras brancas em leitos de partículas pretas foram usadas para fornecer informações como a velocidade das partículas e suas direções de movimento na região da parede em leitos fluidizados circulantes.

Tabela 2.1 - Principais técnicas de medição de velocidade de partícula em leitos
fluidizados (Adaptado de ZHOU et al. 1995).

Tabela 2.1- Principais técnicas	s de medição de velocidade de	e partícula em leitos fluidizados
---------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

Técnica	Aplicação
Técnica de vídeo de alta- velocidade	Uma técnica de vídeo de alta-velocidade foi utilizada por RHODES <i>et al.</i> (1990, 1992) para estudar o movimento de partículas próximo à parede de um leito fluidizado circulante. Uma velocidade de queda de 0,3-0,4 m/s foi obtida para os aglomerados de partículas em contato com a parede. Este método foi também utilizado por ARENA <i>et al.</i> (1989) em um <i>riser</i> de um leito fluidizado circulante para investigar as estruturas bidimensionais de escoamento de partículas.
Laser Doppler Velocimetry	A técnica <i>Laser Doppler Velocimetry</i> foi utilizada por YANG <i>et al.</i> (1990) para medir as velocidades de partículas em um leito fluidizado circulante diluído. Eles constataram que, no centro da seção transversal do riser, a média da velocidade da partícula aumenta com o aumento da velocidade do gás e com a diminuição da taxa de circulação de partículas. A técnica <i>Laser</i> <i>Doppler Velocimetry</i> fornece de forma precisa e instantânea as velocidades das partículas locais, mas é insensível à intensidade absoluta de luz dispersa ao longo do plano investigado. No entanto, esta técnica tende a ser limitada a escoamentos com concentrações volumétricas de partículas muito baixas (YIANNESKIS, 1987), e funciona melhor com partículas de uma ou duas ordens de grandeza menor do que as partículas de leitos fluidizados circulantes típicos $(8,1 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3})$ .
Rastreamento automatizado de partículas radioativas (CARPT)	Rastreamento automatizado de partículas radioativas (CARPT) é uma técnica não intrusiva avançada para medição de campos de escoamento de partículas (em sistemas gás-partícula, líquido-partícula e gás-líquido – partículas) ou líquidos (em sistemas gás-líquido) e para obtenção de parâmetros turbulentos (MOSLEMIAN <i>et al.</i> (1987), DEVANATHAN <i>et al.</i> (1990), LARACHI <i>et al.</i> (1994), DEGALEESAN (1997)) (BHUSARAPU <i>et al.</i> , 2006)
Velocimetria por imagem de partícula (PIV)	A PIV é uma técnica de medida não intrusiva, que objetiva obter o campo de velocidades instantâneas do fluido com alta precisão. Shi (2007) utilizou a PIV na investigação do movimento das partículas e das propriedades dos <i>clusters</i> (aglomerados) em um escoamento gás-partícula em um <i>riser</i> . Amaral <i>et al.</i> (2012a e 2012b) analisaram a velocidade em três dimensões da fase partícula em um <i>riser</i> de um leito fluidizado circulante.

(cont.)

## 2.2 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA



O princípio de funcionamento da técnica PIV é ilustrado na Figura 2.1

Figura 2.1 - Princípio de funcionamento da velocimetria por imagem de partícula (PIV).

A técnica PIV emprega partículas traçadoras que seguem fielmente o escoamento do fluido, para extrair indiretamente a velocidade do fluido. As partículas no fluido são iluminadas por uma folha de luz pulsada. As partículas espalham luz em uma lente fotográfica, localizada a 90° da folha de luz, de modo que o seu plano do objeto em foco coincide com a fatia iluminada do fluido. As imagens são formadas em um detector de arranjo de vídeo e são, em seguida, transferidas para um computador para análise automática (ADRIAN, 1991). Em vez de determinar o deslocamento de partículas individuais, é utilizado um algoritmo, para correlacionar a imagem de partículas contidas em regiões, conhecidas como janelas de interrogação, fornecendo um vetor de deslocamento por janela (PRASAD, 2000).

Shi (2007) utilizou a PIV na investigação do movimento das partículas e das propriedades dos *clusters* (aglomerados) em um escoamento gás-sólido em um *riser*, de seção quadrada (Figura 2.2), de um leito fluidizado circulante. A velocidade das partículas foi determinada nas regiões de baixa concentração. A câmera utilizada na investigação

possui uma frequência de 500 *frames* por segundo. O autor não apresentou o campo vetorial completo obtido.



Figura 2.2 - Análise das propriedades dos *clusters* feita por Shi (2007)



Figura 2.3 (a) Leito de jorro com duas fendas simétricas e (b) análise do campo de velocidade feita por Gryczka *et al.* (2008)

Gryczka *et al.* (2008) analisaram a velocidade das partículas, em um leito de jorro com duas fendas simétricas (Figura 2.3a), pela PIV sem o uso da luz *laser* (condição não ideal para a determinação de campos de velocidade por PIV). O leito analisado apresenta regiões densas e diluídas. A análise da velocidade na fase densa não foi discutida com detalhes pelos autores (Figura 2.3b). A PIV não pode ser usada na investigação da velocidade em sistemas opacos.

He *et al.* (2009) estudou o escoamento gás-sólido turbulento em um riser, de seção retangular, de um leito fluidizado circulante utilizando a PIV e análise numérica (Figura

2.4). O autor relata que não obteve imagem de boa qualidade, na análise feita pela PIV, com o aumento da fração volumétrica de sólidos, pois não foi possível a penetração da luz *laser* em zonas concentradas de partículas.



**Figura 2.4** - Imagens gravadas e seus respectivos campos vetoriais obtido por He *et al.* (2009)

## 2.2 PRINCIPAIS TÉCNICAS 3D-PIV

Velocimetria por imagem de partícula do tipo holográfica (HPIV), semelhante ao método da PIV, baseia-se na avaliação das imagens de partículas traçadoras adquiridas em um intervalo de tempo curto. No entanto, ao contrário da PIV, que utiliza imagens 2D das partículas formadas pelo sistema óptico da câmera sobre o sensor *Charge Coupled-Device* (CCD), a HPIV tira proveito de imagens 3D gravadas por meio de holografia. O processo holográfico consiste em duas operações: passo de gravação e passo de reconstrução. No primeiro passo, o volume da amostra é iluminado por um pulso de *laser* potente e a luz do *laser* dispersa pelas partículas traçadoras (onda de objeto) interfere com uma onda de referência mutuamente coerente com a onda de objeto. A gravação do padrão de interferência resultante é considerada como um holograma. Para obter as velocidades das partículas traçadoras são necessários, pelo menos, dois hologramas correspondentes a dois

instantes de tempo consecutivos. No segundo passo, a onda de objeto é reconstruída a partir do holograma, numericamente ou opticamente. Neste último caso, a onda reconstituída gera imagens 3D das partículas traçadoras, formando uma "réplica" do volume da amostra "congelado" no instante do pulso de gravação. Em seguida, as imagens 3D das partículas são digitalizadas atravessando uma câmara digital, por etapas, em todo o volume reconstruído da amostra. Os dados digitalizados, em seguida, podem ser avaliados por métodos de correlação semelhantes aos utilizados na PIV. No entanto, como todas as partículas contidas no volume de amostra são registradas ao mesmo tempo, a HPIV permite obter uma distribuição instantânea 3D dos três (ou dois) componentes de velocidade (SVIZHER e COHEN, 2006). Suas desvantagens são que o suporte de gravação é um filme holográfico, o que torna o processo demorado e de alguma forma imprecisa, devido ao desalinhamento, e distorção ao reposicionar o holograma para a reconstrução do objeto (ELSINGA, 2008). A técnica foi utilizada para avaliar estruturas de vórtices no ar (PU e MENG, 2000) e aplicada em túnel de vento (HERRMANN e HINSCH, 2004).

A técnica *Scanning Particle Image Velocimetry* (SPIV), introduzida por Brücker e Althaus (1992), oferece investigação quantitativa de estruturas tridimensionais de vórtices de escoamentos instáveis. Em princípio, esta técnica combina a PIV com a digitalização do volume utilizando varredura de folhas de luz (BRÜCKER, 1995). O volume é cortado pela folha de *laser* em posições sequenciais de profundidade em que o padrão de imagem da partícula é gravado. O procedimento retorna campos de velocidade das partículas obtidos por pequenos deslocamentos no espaço e no tempo, que podem ser combinados para retornar um campo de velocidades 3D. Os pontos fortes desta técnica são que ela mantém a alta resolução espacial da PIV e a simplicidade de análise das gravações (ELSINGA, 2008). Em geral, os requisitos tecnológicos para a aplicação de técnicas de *Scanning* PIV são as câmaras de gravação multi *frames* e elevadas taxas de repetição de pulso de *laser* ou *lasers* de alta intensidade de onda contínua (CW), em combinação com feixe tridimensional ou dispositivo de digitalização de folha (BRÜCKER, 1997). Esses requisitos não são um problema em escoamentos de baixa velocidade como mostrado por Hori e Sakakibara (2004), os quais estudaram a distribuição da velocidade em um jato turbulento.

A técnica de velocimetria 3D por rastreamento de partículas (3D PTV) tem como base a identificação de partículas individuais. A posição exata da partícula dentro do volume é dada pela intersecção das linhas de visão (eixo que liga a câmera ao alvo) correspondentes a uma imagem de partícula nas gravações de várias direções de visualização (tipicamente três ou quatro). A detecção e localização de partículas variam de acordo com os métodos. Em comparação aos dois métodos anteriores (HPIV e SPIV), a abordagem 3D PTV oferece a vantagem de ser totalmente digital e totalmente 3D sem o requisito de partes móveis. A distribuição da velocidade no volume é obtida para cada partícula de rastreamento ou por correlação cruzada 3D do padrão de intensidade das imagens de partículas (SCHIMPF *et al.*, 2003). A principal limitação relatada na literatura é a concentração baixa de partículas traçadoras, no fluido, a fim de manter uma baixa probabilidade de detecção de imagens de partículas que se sobrepõem (ELSINGA *et al.*, 2006a). Maas *et al.* (1993) relatam uma concentração de imagens de partículas de 0,005 partículas por *pixel* para um sistema de três câmeras. A 3D PTV tem sido aplicada no estudo do movimento Lagrangeano em turbulência (VIRANT e DRACOS, 1999; MORONI *et al.*, 2003).

## 2.3 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA DO TIPO TOMOGRÁFICA (PIV TOMOGRÁFICA)

O desenvolvimento da técnica PIV Tomográfica foi motivado devido à necessidade de se alcançar um sistema de medição 3D que combina o arranjo óptico simples da abordagem fotogramétrico com um robusto processo de reconstrução volumétrica das partículas. Como consequência, a concentração de partículas no escoamento pode ser aumentada em relação à técnica 3D PTV (0,005 partículas por *pixels*). Além disso, a técnica PIV Tomográfica apresenta a medição do campo de velocidade instantâneo, em oposição à técnica *Scanning* PIV, abrindo a possibilidade de realizar medições 3D em várias condições, independentemente da velocidade do escoamento (ELSINGA *et al.*, 2006a).

Os dois primeiros artigos sobre a técnica PIV Tomográfica foram apresentados por Elsinga *et al.* (2005a, 2005b) no *6th international PIV symposium hosted at Caltech (USA)* resultando no artigo *"Tomographic particle image velocimetry"* (ELSINGA *et al.*, 2006a). Desde o aparecimento da PIV Tomográfica, vários grupos de pesquisas iniciaram o

desenvolvimento da técnica em várias direções, com os primeiros esforços dedicados à reconstrução tomográfica. As aplicações concentraram-se na avaliação de estruturas instantâneas 3D de escoamentos turbulentos. Como resultado, o número de trabalhos científicos aumentou rapidamente (Figura 2.5). Dois grupos de pesquisas se destacam no desenvolvimento e na aplicação da técnica, o Departamento de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Tecnologia de Delft (TU Delft) e a empresa alemã LaVision (SCARANO, 2013).



**Figura 2.5** - Número de publicações que abordam o desenvolvimento da PIV Tomográfica ou suas aplicações em mecânica dos fluidos (Fonte: *Web of Science*) (SCARANO, 2013).

Amaral *et al.* (2012a) analisaram a velocidade em três dimensões da fase partícula (Figura 2.6), de um escoamento gás-sólido, na seção de um riser circular de um leito fluidizado circulante utilizando a PIV Tomográfica. Amaral *et al.* (2012b) apresentaram o primeiro trabalho sobre a PIV Tomográfica no Brasil. Esse trabalho analisou o efeito da resolução de interrogação na análise da velocidade da fase partícula na mesma seção do riser, de um leito fluidizado circulante, analisado por Amaral *et al.* (2012a). Nesses dois trabalhos, os autores não detalham o efeito da luz *laser* no tubo ou da distorção da imagem na análise do campo vetorial.



Figura 2.6 - Análise da velocidade em 3D em uma seção de um riser apresentado por Amaral *et al.* (2012a)

## 2.3.1 Princípio de funcionamento da PIV Tomográfica

O princípio de funcionamento da PIV Tomográfica é ilustrado esquematicamente na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Princípio de funcionamento da PIV Tomográfica.

Partículas imersas no escoamento (gasoso ou líquido) são iluminadas por uma fonte de luz pulsada em uma determinada região do espaço 3D. O padrão de luz espalhada é registrado simultaneamente, de várias direções de visualização, utilizando câmeras CCD (*Charge-Coupled Device*). A distribuição de partículas em 3D (o objeto) é reconstruída como uma distribuição de intensidade da luz em 3D a partir de suas projeções sobre as matrizes CCD. Um único conjunto de projeções pode resultar em diferentes objetos 3D. A determinação da distribuição 3D das imagens de partículas é o tópico da tomografia. O deslocamento das partículas (velocidade), dentro de um volume de interrogação escolhido, é obtido por correlação cruzada 3D da distribuição de partículas reconstruída nas duas exposições (ELSINGA, 2008). A relação entre a imagem (projeção) e as coordenadas do espaço físico (o objeto) é estabelecida por um procedimento de calibração.

## 2.3.2 Sensores CCD

Sensores CCDs consistem em milhares (ou milhões) de células sensíveis à luz ou *pixels* que são capazes de produzir uma carga elétrica proporcional à quantidade de luz que recebem. Cada *pixel* (elementos de imagem) tem um tamanho na ordem de  $10 \times 10\mu$ m. Um dos parâmetros fundamentais de um CCD é a resolução, que é igual ao número total de *pixels* que compõe a área sensível à luz do dispositivo. Os sensores CCD são, em essência, circuitos integrados (CIs) e são, portanto, como chips de computador (TAYLOR, 1998).

Os sensores CCDs seguem os princípios básicos da física dos dispositivos metalóxido semicondutores (MOS). Uma estrutura CCD MOS consiste de um material condutivo empilhada verticalmente (polissilício dopado) sobrejacente de um semicondutor (silício) separado por um material altamente isolante (dióxido de silício). Ao aplicar um potencial de tensão ao polissilício ou porta de eletrodos, os potenciais eletrostáticos dentro do silício podem ser alterados. Com uma tensão apropriada, pode ser formado um poço de potencial, que tem a capacidade de recolher os elétrons localizados que foram criados pela luz incidente. Os elétrons podem ser confinados sob esta porta, formando zonas de potencial mais elevado, chamado de barreiras, em torno do poço. Dependendo da voltagem, cada porta pode formar um poço de potencial ou uma barreira para a carga integrada (KODAK, 2010). A Figura 2.8 mostra a estrutura básica de um sensor CCD.



Figura 2.8 - Estrutura básica da seção transversal de um sensor CCD (Adaptado de Kodak, 2010)

Para permitir que a luz possa incidir sobre o chip de silício, uma pequena janela de vidro é inserida na frente do chip. Os circuitos integrados (CIs) convencionais normalmente são encapsulados em um corpo de plástico preto para fornecer principalmente resistência mecânica, mas também para protegê-los da luz, o que pode afetar o seu funcionamento normal (TAYLOR, 1998). O sensor CCD converte o sinal óptico em um sinal elétrico, uma para cada canal de cor. Este sinal elétrico é processado em um processador de sinal para obter o que é conhecido como banda base de vídeo (CENTEN, 1999).

#### 2.3.2.1 Arquitetura dos sensores CCD

Os *pixels* em um sensor CCD podem ser dispostos em várias configurações. A Figura 2.9 exibe três arquiteturas básicas dos sensores CCD. A mais simples arquitetura é a de um sensor linear (Figura 2.9a), consistindo de uma linha de fotodiodos adjacente a um único registo de leitura CCD. Neste arranjo, a densidade de *pixels* máxima é determinada pelo tamanho das portas CCD. É comum o uso de pelo menos dois registros CCD para formar um sensor bi-linear. Por imagens bidimensionais, uma matriz de superfície é formada por um conjunto de registradores CCD paralelos sensíveis à luz. Na extremidade inferior dessa matriz um único registrador CCD horizontal (HCCD) é usado para combinar as saídas dos registradores verticais (VCCD) em uma única saída. Isso produz um compacto e simples sensor superficial *full frame* (Figura 2.9b) (DALSA, 1998).



**Figura 2.9 -** Diagrama de bloco simplificado das três arquiteturas de sensores CCD fundamentais. As setas indicam o movimento dos pacotes de carga, facilitado pelos sinais de clock (Adaptado de Dalsa, 1998).

No entanto, para matrizes de grandes dimensões (2000 x 2000 pixels) a taxa de *frames* lenta pode resultar em uma grande quantidade de manchas porque os registradores verticais permanecem expostos à imagem e só pode deslocar para fora um pacote de carga cada vez que o registrador horizontal é esvaziado. Para evitar isso, os registradores verticais CCD podem ser estendidos para baixo, de modo a duplicar o seu comprimento, com a metade inferior sendo protegido a partir da imagem para formar uma região de armazenamento. Isto é conhecido como um sensor frame transfer (FT) (Figura 2.9c). Muitas vezes, um portão adicional de transferência é posicionado entre o registrador horizontal e os registradores CCD verticais para evitar transferência de carga no registrador horizontal enquanto ele está sendo esvaziado (DALSA, 1998). A grande vantagem da arquitetura frame transfer é que, geralmente, o fator de preenchimento (fração de área de pixel coberta por material sensível a luz) é de 100%, e a segunda exposição de pixels pode começar em centenas de microssegundos depois da primeira. As câmeras CCD full-frame *interline transfer* usam uma área de armazenamento para cada *pixel* ativo como mostrado na Figura 2.10. A transferência rápida de toda a imagem, dentro de alguns microssegundos, em conjunto com os formatos de alta resolução ampliou o campo de aplicações dessas câmeras, por exemplo, em técnicas de medição de velocidade como a PIV. A área de armazenamento no chip permite capturar dois sucessivos com um atraso de tempo muito curto (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).



Figura 2.10 - Esquema de câmeras CCD *full-frame interline transfer* (Baseado em Raffel *et al*, 2007)

Estes sensores, especialmente o CCD *full-frame interline transfer*, são escolhidos para a maioria das aplicações da técnica PIV com a taxa de *frames* moderada. Contudo, os desenvolvimentos especiais com base na tecnologia CCD podem também ser utilizados para a técnica PIV de alta velocidade. A alta taxa de , juntamente com a resolução espacial alta, necessária para a maioria das aplicações PIV resulta em grande quantidade de dados que tem de ser transferidos a partir do chip para o armazenamento (RAFFEL *et al*, 2007).

## 2.3.3 Câmera e imagem

#### 2.3.3.1 Imagem geométrica

A função da câmera e da lente é a de permitir a localização da partícula no fluido,  $X'_p(t)$ , em termos da localização da sua imagem na câmera,  $x_p(t)$  (Figura 2.11a). A localização do centro da imagem de uma partícula, no plano Z'=0, é encontrada pelo desenho de uma linha reta do objeto, através do centro efetivo das lentes, ao plano de imagem (Figura 2.11b). A geometria simples mostra que o ponto (X', Y', 0) é mapeado no ponto (x, y) de acordo com

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = M_0 \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix}$$
(2.1)

em que

$$M_0 = \frac{z_0}{Z'_0}$$
(2.2)

é a magnificação da imagem.  $Z_0$  é a distância entre o objeto e o centro efetivo da lente e  $z_0$  é a distância entre o centro efetivo da lente e o plano de imagem. Em alguns casos, o plano do objeto não é normal ao eixo ótico (Figura 2.11c) (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).



Figura 2.11 – (a) Representação esquemática da imagem geométrica para (b) uma magnificação constante e (c) para uma magnificação paraxial.

Por esse motivo, a magnificação da imagem não é constante. O ângulo  $\theta$  entre o plano da lente e o plano do objeto e o ângulo  $\alpha$  entre o plano da lente e o plano de imagem são relacionados pela magnificação da imagem nominal ou paraxial,  $M_0$ , definido pela Equação 2.3 (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).

$$M_0 = \frac{tan\alpha}{tan\theta}$$
(2.3)

#### 2.3.3.2 Mapeamento e calibração

A essência da imagem PIV é mapear precisamente a localização de cada partícula no plano de imagem. Idealmente o mapeamento deve ser uma função que relacione a localização tridimensional da partícula no fluido com o espaço bidimensional do plano de imagem (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011). Idealmente, deseja-se encontrar uma função de mapeamento M tal que para um ponto qualquer  $\mathbf{X'} = (\mathbf{X'}, \mathbf{Y'}, \mathbf{Z'})$ , no plano objeto, sua localização correspondente  $\mathbf{x}$  no plano de imagem seja determinado com precisão absoluta. Na realidade, não se pode determinar experimentalmente um M com um erro igual à zero para uma geometria arbitrariamente complexa. Assim, uma estimativa para a função de mapeamento, que tem uma representação analítica, é buscada. Muitas possibilidades surgem neste ponto, mas por causa de sua simplicidade, um polinômio multidimensional é uma escolha ideal. Existem várias maneiras de determinar o polinômio. Por exemplo, podese utilizar o método dos mínimos quadrados para determinar um F que aproxima os dados minimizando o erro médio quadrático, Equação 2.4, em que  $x_{\rm C}$  representa o conjunto de pontos sobre o alvo de calibração e N<sub>PC</sub> é o número total de pontos do conjunto (SOLOFF *et al*, 1997)

$$\varepsilon = \frac{1}{N_c} \sum_{\mathbf{x}_c} \left| \mathbf{M}(\mathbf{x}_c) - \mathbf{M}(\mathbf{x}_c) \right|^2$$
(2.4)

O processo de calibração do sistema é realizado manualmente pela orientação prévia das linhas de visão das câmeras, ajustando-se a lente da câmera, certificando que a imagem completa esteja em foco, tendo como alvo uma placa de calibração. O desenho do alvo de calibração é a parte mais importante da realização de uma calibração. Em geral, diferentes experimentos podem exigir diferentes alvos de calibração. As imprecisões na calibração são causadas por distorção óptica devido ao alinhamento óptico impreciso, imperfeição no design da lente, refração por janelas ópticas, interfaces de fluidos e outros elementos de óptica em um experimento (SOLOFF *et al*, 1997). A reconstrução do objeto, a distribuição de partículas em 3D, a partir das imagens digitais, exige conhecimento prévio da função de mapeamento M. O procedimento requer que a função de mapeamento seja definida para um domínio volumétrico (RAFFEL *et al.*, 2007).

## 2.3.4 Pré-processamento de imagem

O termo *imagem monocromática*, ou simplesmente imagem, refere-se à função bidimensional de intensidade de luz, f(x, y), onde x e y denotam as coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x, y) é proporcional ao brilho (ou nível de cinza) da imagem naquele ponto. Uma *imagem digital* é uma imagem f(x, y) discretizada tanto em coordenadas espaciais quanto em intensidade (brilho). Uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz digital são chamados de elementos da imagem, elementos da figura, "*pixels*" ou "*pels*", estes dois últimos, abreviações de "*picture elements*"(GONZALEZ e WOODS, 2000).

O objetivo do pré-processamento da imagem é o de melhorar a qualidade da imagem obtida. Vários algoritmos são usados para a melhoria de contraste, correção de brilho e remoção de ruído. Os filtros (também denominados "moldes", janelas ou máscaras) agem sobre uma imagem para alterar os valores dos *pixels* (valores de intensidade no *pixel*) de uma maneira específica e são geralmente classificadas em dois tipos: linear e não linear. Cada um dos *pixels* (*pixel* alvo) de uma imagem é sucessivamente tratado. O valor do *pixel* alvo é então substituído por um novo valor, que só depende do valor dos *pixels* em uma vizinhança especificada em torno do *pixel* de destino (SOLOMON e BRECKON, 2011).

#### 2.3.4.1 Vizinhança de um pixel e conectividade

Um conceito importante em imagens é o de conectividade. Muitas operações de processamento de imagem usam o conceito de vizinhança de imagem para definir um local de relevância, influência ou interesse. Um *pixel* alvo nas coordenadas (x, y) possui quatro vizinhos horizontais e verticais, cujas coordenadas são dadas por (x+1, y), (x-1, y), (x, y+1) e (x, y-1). Esse conjunto de *pixels* é chamado de vizinhança-de-4 (ou conectividade-de-4) do *pixel* alvo. Cada *pixel* está a uma unidade de distância de (x, y), sendo que alguns dos vizinhos do *pixel* alvo ficarão fora da imagem digital se (x, y) estiver na borda da imagem. Os quatro vizinhos diagonais do *pixel* alvo possuem como coordenadas (x+1, y+1),

(x+1,y-1), (x-1, y+1) e (x-1, y-1). Esses pontos, juntos com a vizinhança-de-4 (Figura 2.12a), são chamadas de vizinhança-de-8 (ou conectividade-de-8) do *pixel* alvo (GONZALEZ e WOODS, 2000).



**Figura 2.12 -** (a) Conectividade da vizinhança da imagem. (b) Exemplo de vizinhança 3x3 centrado em um *pixel* alvo (Adaptado de Solomon e Breckon, 2011).

De maneira geral, todas as operações de imagem, que usam esse conceito, consideram a localização do *pixel* alvo (i, j) em termos de sua vizinhança de *pixel* local indexada com um deslocamento  $(i \pm k, j \pm k)$ . O tamanho da vizinhança pode ser  $N_H \times N_V pixels$ , onde  $N_H \neq N_V$  para uma influência desigual de *pixels* na direção horizontal (linha) e vertical (coluna). A vizinhança  $N_H = N_V = N$  é a mais comum. A Figura 2.12b apresenta um exemplo de vizinhaça centrado em um *pixel* alvo.

O termo *domínio espacial* refere-se ao agregado de *pixels* que compõem uma imagem, e métodos no domínio espacial são procedimentos que operam diretamente sobre estes *pixels*. O uso de máscaras espaciais para processamento de imagens é usualmente chamado de *filtragem espacial* (em contrapartida à expressão *filtragem no domínio da frequência* usando a transformada de Fourier), e as máscaras são chamadas *filtros espaciais* (GONZALEZ e WOODS, 2000). A Figura 2.13 apresenta o mecanimo de filtragem da imagem utilizando a máscara definida pela Equação 2.5

$$f_{i} = \sum_{k=1}^{9} w_{k} I_{k}(i)$$
  
=(-1x10)+(-1x11)+(-1x8)+(-1x40)+(8x35)  
+(-1x42)+(-1x38)+(-1x36)+(-1x46)=14  
(2.5)



Figura 2.13 - Mecanismo de filtragem da imagem (Equação 2.5) com uma máscara de convolução  $N_H \times N_V = 3 \ge 3$  (Adaptado de Solomon e Breckon, 2011).

Em filtros lineares espaciais o novo valor ou filtrada do *pixel* alvo é determinado como uma combinação linear dos valores de *pixel* na sua vizinhança. Qualquer outro tipo de filtro é, por definição, um filtro não linear. A combinação específica linear dos *pixels* vizinhos que é tomada é determinada pelo núcleo (*kernel*) do filtro (também chamado de máscara ou máscara de convolução). Este filtro é uma matriz (sub-imagem), com o mesmo tamanho da vizinhança, contendo os pesos que serão atribuídos a cada um dos *pixels* correspondentes na vizinhança do *pixel* alvo. A filtragem prossegue sucessivamente pelo posicionamento do núcleo (*kernel*) de modo que a localização do seu *pixel* central coincide com a localização de cada *pixel* alvo, cada vez que o valor a ser filtrado é calculado pela combinação ponderada escolhida dos *pixels* vizinhos (Figura 2.13) (SOLOMON e BRECKON, 2011).

Operações de convolução são amplamente utilizados no processamento de imagem. Dependendo da escolha do *kernel*, a mesma operação de base pode ser usada para borrar uma imagem, reforçar, encontrar suas bordas, ou remover o ruído da mesma (MARQUES, 2011). Filtros não lineares não são comuns em processamento de imagem.
### 2.3.4.2 Filtro Gaussiano

O filtro Gaussiano é o exemplo mais conhecido de filtro *passa-baixa*. Os denominados filtros *passa-baixas* atenuam ou eliminam os componentes de alta frequência no domínio de Fourier enquanto deixam as frequências baixas inalteradas (isto é, o filtro "deixa passar" as baixas frequências). Os componentes de alta frequência caracterizam bordas e outros detalhes finos de uma imagem, de forma que o efeito resultante da filtragem *passa-baixas* é o borramento da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2000). O filtro Gaussiano usa um *kernel* discreto derivado de uma forma simétrica radial da função contínua Gaussiana-2D definida como:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right).$$
 (2.6)

Aproximações discretas desta função contínua são especificadas usando dois parâmetros: o tamanho desejado do *kernel* (como um filtro  $N_H \times N_V$ ) e o valor de  $\sigma$  (desvio padrão da função Gaussiana). Alguns exemplos de filtros discretos Gaussianos, com tamanhos de *kernels* e desvios padrão diferentes, são apresentadas na Figura 2.14 (SOLOMON e BRECKON, 2011).



**Figura 2.14** - Núcleos do filtro Gaussiano (a)  $3 \ge 3 = 1$ , (b)  $11 \ge 11 = 2 = 1$ (c)  $21 \ge 21 = 4$  (SOLOMON e BRECKON, 2011).

### 2.3.4.3 Filtro sliding minimum

Este filtro calcula um mínimo local em um comprimento de escala especificado N (três *pixels*, por exemplo). O filtro tem o mesmo princípio dos filtros Gaussianos, mas as equações aplicadas são diferentes:

$$S(x, y) = \frac{(N-1)}{N \cdot S(x \pm k, y \pm k)} + \frac{1}{N} \cdot f_{\min}$$
(2.7)

em que  $f_{\min}$ é o mínimo valor de intensidade no *pixel* (valor de *pixel*) encontrado na vizinhança (LAVISION, 2010).

### 2.3.4.4 Filtro sharpening

Este filtro melhora o contraste da imagem. Matematicamente isto é feito pela adição de um laplaciano na imagem original. *Sharpness*-1 (Equação 2.8) e *Sharpness*-2 (Equação 2.9) são exemplos desses filtros. Para um fator *a* igual a 1 tem-se uma adição de 50% (LAVISION, 2010).

$$f_i = \frac{1}{a} \left[ -I(x,y+1) - I(x-1,y) + (4+a) \cdot I(x,y) - I(x,y+1) - I(x,y-1) \right]$$
(2.8)

$$f_{i} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} -I(x-1,y+1) - I(x,y+1) - I(x+1,y+1) - I(x-1,y) + (8+a) \cdot I(x,y) \\ -I(x,y+1) - I(x-1,y-1) - I(x,y-1) - I(x+1,y-1) \end{bmatrix}$$
(2.9)

### 2.3.4.5 Pré-processamento em PIV

Em geral, os ruídos dos sensores CCD apresentam propriedades estatísticas homogêneas, que na maioria das vezes tem um menor efeito e pode ser quantificado na análise da interrogação PIV e consequentemente na determinação da velocidade. Isto torna mais complicado quando a imagem de fundo (*background*) contém um componente não homogêneo, por exemplo, uma superfície refletida pela folha de luz do *laser*. A maioria dos métodos de remoção da imagem de fundo baseia-se na observação que a imagem de partícula e a fundo imagem tem escalas de tamanho diferentes. Por exemplo, o tamanho da

imagem de partícula apresenta usualmente um diâmetro de poucos *pixels*, enquanto que as imagens de fundo são de escalas do *frame* da imagem completa (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).

### 2.3.5 Autocalibração volumétrica – Método de Wieneke

Com o objetivo de reduzir os erros da função de mapeamento, Wieneke (2008) propôs um procedimento de autocalibração volumétrica, empregando imagens gravadas depois de um pré-processamento, para corrigir a função de mapeamento da calibração de qualquer desalinhamento das câmeras, o que pode acontecer devido a uma calibração imprecisa ou a um leve movimento das câmeras. O pré-processamento de imagem é uma etapa importante para a autocalibração do volume e consequentemente na qualidade da reconstrução tomográfica. O procedimento da autocalibração volumétrica consiste basicamente de cinco etapas:

a. <u>Detecção de posições 2D de partículas nas imagens</u>: esta etapa é a de localizar as posições das partículas em 2D na imagem de cada câmera por um ajuste Gaussiano. Um limite de intensidade é determinado para que só as partículas mais brilhantes sejam selecionadas, 10 a 20 % do total de partículas, por exemplo, evitando a detecção de falsos picos de intensidade de luz na reconstrução tomográfica, que são referidos como partículas fantasmas (MAAS *et al*, 1993; ELSINGA *et al.*, 2011).

b. <u>Triangulação das posições de imagens de partículas 3D</u>: o objetivo dessa etapa é o de corresponder as posições 2D da partícula em todas as imagens da câmera a uma partícula no espaço 3D por triangulação padrão. As posições da imagem da partícula 2D (x, y) da câmera i de uma única partícula são trianguladas em uma posição de melhor ajuste no espaço de imagem (X, Y, Z). O critério de otimização é feito por meio da minimização da soma das distâncias  $d_i$ , vetor disparidade para a câmera i, Equação 2.10, em que  $(x_i, y_i)$  é a projeção do ponto no espaço de imagem (X, Y, Z) na imagem da câmera i (HARTLEY e STURM, 1997) (WIENEKE, 2008).

$$d_{i}(X, Y, Z) = |(x_{i}, y_{i}) - (x, y)|$$
(2.10)

Para uma função de mapeamento perfeita, as linhas de visão de todas as câmeras se cruzam em um único ponto no espaço de imagem (Figura 2.15) e o vetor disparidade  $d_i$  é igual à zero (WIENEKE, 2008).



**Figura 2.15** - Linhas de visão das quatros câmeras para uma função de mapeamento perfeita (linha pontilhada).

A Figura 2.16 mostra o procedimento para combinar imagens de partícula correspondente à mesma partícula no espaço. Para cada partícula na imagem da câmera 1 encontram-se partículas correspondentes, na imagem da câmera 2, localizadas dentro de uma faixa definida pela incerteza  $\varepsilon_{max}$  (erro máximo permitido), ao longo do comprimento  $L_z$ , que é a projeção da linha de visão da câmera 1 até o volume iluminado de  $z_1$  a  $z_2$  vista pela câmera 2 (princípio da interseção de linhas epipolar). Para a combinação de imagens de partículas da câmera 1 e 2, uma posição de partículas 3D (X, Y, Z) é calculada por triangulação. Então, para cada partícula na faixa, é verificado se na imagem da câmera 3 e 4 existe uma partícula correspondente dentro de  $\pm \varepsilon_{max}$  em torno da projeção de  $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$  (WIENEKE, 2008).



Figura 2.16 - Triangulação da imagem de partícula (Adaptada de Wieneke, 2008).

c. <u>Construção de mapas de disparidade 2D em todo o volume</u>: o volume iluminado é dividido em sub volumes. No subvolume são recolhidas todas as partículas 3D para ambos os tempos t<sub>0</sub> e t<sub>1</sub>, e para todas as partículas são calculados os vetores disparidades. As disparidades são exibidas, para cada sub volume, em um mapa de disparidade 2D, como um histograma, com cada ponto de medição representado graficamente como uma bolha pequena de Gauss 2D. O cálculo da disparidade  $d_i$  pode ser feito de formas diferentes. É usada uma das câmeras como uma referência, assumindo que a função de mapeamento para esta câmera seja perfeita, corrigindo apenas as funções de mapeamento das outras câmeras. Isto é feito tomando Z a partir da triangulação original e computação um X<sub>ref</sub> e Y<sub>ref</sub> pelo inverso da função mapeamento, Equação 2.11, para a câmara de referência e usando X<sub>ref</sub> e Y<sub>ref</sub> para o cálculo de (x'<sub>i</sub>,y'<sub>i</sub>) para as outras câmeras, Equação 2.12. O mapa de disparidade para um único subvolume é mostrado na Figura 2.17a. O cálculo do mapa de disparidade é feito para todos os subvolumes O resultado final é um mapa de disparidade para cada subvolume em cada plano z para todas as câmeras (WIENEKE, 2008).

$$(X_{ref}, Y_{ref}) = M_{ref}^{-1}(x_{ref}, y_{ref}, Z)$$
(2.11)

$$(x'_{i}, y'_{i}) = M_{i}(X_{ref}, Y_{ref}, Z)$$
 (2.12)



Figura 2.17 - Mapa de disparidade para um único subvolume

d. <u>Extração de vetores de disparidades de três dimensões - dois componentes (3D2C)</u>: para cada mapa de disparidade é detectado o pico de disparidade mais alto (semelhante ao pico de correlação cruzada no PIV) que fornece o menor erro de calibração. O resultado é um campo vetorial de disparidade 3D2C para cada câmera e um vetor para cada sub volume. A localização do pico de disparidade é determinada, por exemplo, por um ajuste Gaussiano 2D ou dual 1D e corresponde, provavelmente, ao vetor disparidade di. A posição do vetor disparidade é representada por d<sub>ix</sub> e d<sub>iy</sub> (Figura 2.17b). O centro do histograma, Figura 2.17c, representa um vetor disparidade igual à zero (função de mapeamento perfeita) (WIENEKE, 2008).

e. <u>Correção da função de mapeamento</u>: as funções de mapeamento  $M_i$  são corrigidas,  $M'_i$ , para cada câmera separadamente de acordo com a Equação 2.13. A sequência de etapas de autocalibração pode ser repetida após a primeira autocalibração para verificar se os picos de disparidade estão posicionados na posição central do histograma. Pode-se escolher, nas repetições seguintes, um menor erro de disparidade máxima permitida e um limite de intensidade mais baixo para diminuir o número de partículas fantasmas. Normalmente, duas ou três repetições são suficientes para reduzir os erros da função de mapeamento até abaixo de 0,1 *pixel*. Ao mesmo tempo, o número de subvolumes e o volume selecionado podem ser ajustados (WIENEKE, 2008).

$$M'_{i} = M_{i}(X, Y, Z) - d_{i}(X, Y, Z)$$
 (2.13)

### 2.3.6 Reconstrução tomográfica

A reconstrução tomográfica envolve a estimativa das distribuições 3D das intensidades da imagem de partículas a partir de um número limitado de imagens em 2D (MICHAEL e YANG, 1991). Geralmente, o objeto, a distribuição da imagem de partículas em 3D, é reconstruído como uma distribuição da intensidade da luz tridimensional empregando a técnica de reconstrução algébrica multiplicativa (MART) (HERMAN e LENT, 1976). O objeto é representado na forma de dados discretos, como uma matriz tridimensional de elementos de *voxels* (*pixels*<sup>3</sup>) cúbicos, e o conjunto de equações lineares (na hipótese de superposição dos efeitos) de modelagem do sistema de imagem é resolvido de forma iterativa. O objeto é discretizado por uma série de voxels tridimensionais no espaço de imagem (X, Y, Z), com a intensidade da luz representada por E(X, Y, Z). A projeção da distribuição da intensidade da luz em cada pixel da imagem (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>) fornece a distribuição da intensidade de imagem  $I(x_i, y_i)$ , para cada sentido da visão, que é escrita como uma equação linear (Equação 2.14). w<sub>i,j</sub> é o coeficiente de ponderação que descreve a contribuição da intensidade do j-ésimo voxel E(Xi,Yi,Zi) com a intensidade de luz do iésimo pixel I(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>). N<sub>vi</sub> é o número total de voxels na linha de visão, eixo que liga a câmera ao alvo, correspondente ao i-ésimo pixel (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>) (ELSINGA, 2008).

$$\sum_{j \in N_{vi}} w_{i,j} E(X_j, Y_j, Z_j) = I(x_i, y_i)$$
(2.14)

Na prática, a técnica MART é implementada como uma técnica iterativa, com uma atualização do sistema de equações com base na relação entre a intensidade de luz no *pixel* medido e a projeção do objeto, juntamente com um parâmetro apropriado escalar de relaxamento. Para um valor inicial  $E^0(X_j, Y_j, Z_j)$ , a atualização do objeto é feita em cada iteração completa (Equação 2.15).  $\mu$  é o parâmetro de relaxamento escalar (HERMAN e LENT, 1976), com a propriedade de que  $\mu \in (0,1)$  para a técnica MART. A magnitude da atualização é, por conseguinte, determinada pela relação da intensidade de luz no *pixel* 

medido  $I(x_i, y_i)$  com a projeção do atual objeto  $E^k(X_j, Y_j, Z_j)$ . O esquema MART exige que  $E(X_i, Y_i, Z_j)$  e  $I(x_i, y_i)$  sejam definidas positivas (ELSINGA, 2008).

$$E^{k+1}(X_{j}, Y_{j}, Z_{j}) = E^{k}(X_{j}, Y_{j}, Z_{j}) \cdot \left[\frac{I(x_{i}, y_{j})}{\sum_{j \in N_{vi}} w_{i,j} E^{k}(X_{j}, Y_{j}, Z_{j})}\right]^{\mu \cdot w_{i,j}}$$
(2.15)

.. ...

### 2.3.7 Correlação cruzada

A avaliação das imagens das partículas depende da forma como essas imagens foram gravadas pela câmera utilizada. Uma possibilidade é gravar a luz espalhada a partir da primeira iluminação em um *frame* e a luz espalhada a partir da segunda iluminação em outro *frame*. Isso é chamado de *double-frame*/single *exposure*. Estas imagens *double-frame* podem ser avaliadas por correlação cruzada. Em vez de determinar o deslocamento de partículas individuais, a correlação baseada em PIV determina o movimento médio de pequenos grupos de partículas contidas dentro de pequenas regiões, conhecidas como janelas de interrogação, fornecendo um vetor de deslocamento por janela (PRASAD, 2000).

Para análise de correlação cruzada, as janelas de interrogação não têm que ser, necessariamente, localizadas na mesma posição da gravação de PIV. Dois volumes de interrogação, separados por um intervalo de tempo suficientemente pequeno, utilizados para a avaliação estatística definem o volume de medição. Para efeitos de análise de imagem PIV, a distribuição de partículas traçadoras é descrita em termos de um padrão. As imagens das partículas resultantes mostram as posições instantâneas das partículas traçadoras como picos na intensidade de luz. Para um intervalo de tempo suficientemente pequeno (dt), as duas imagens consecutivas têm distribuições de intensidade de luz com a segunda exposição, aproximadamente, deslocado em relação à primeira (Figura 2.18) (RAFFEL *et al.*, 2007).

Esta mudança pode ser determinada utilizando-se uma técnica de correlação. As imagens são primeiramente divididas em sub-regiões menores, denominadas janelas de interrogação, que contêm distribuições locais de intensidade de luz. As duas intensidades de luz, dentro de uma janela de interrogação,  $I_1(i, j)$  e  $I_2(i, j)$  para o tempo t e t+dt,

respectivamente no i-ésimo e j-ésimo *pixels*, são então correlacionadas (RAFFEL *et al.*, 2007).



Figura 2.18 - Esquema do procedimento de correlação cruzada.

$$C(dx,dy) = \sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{N} \left[ I_{1}(i,j) - \mu_{I_{1}} \right] \left[ I_{2}(i+dx,j+dy) - \mu_{I_{2}} \right]$$
(2.16)

$$c(dx,dy) = \frac{C(dx,dy)}{\sqrt{\sigma_1}\sqrt{\sigma_2}}$$
(2.17)

em que 
$$\sigma(x,y) = \sum_{i=0}^{M_{I2}} \sum_{j=0}^{M_{II}} \left[ I(i,j) - \mu_I \right]^2.$$
 (2.18)

A soma dos produtos de todas as intensidades de luz que se sobrepõem nos *pixels* em cada mudança espacial (dx, dy) retorna o mapa de valor de correlação C(dx, dy), Equação 2.16, que é essencialmente uma medida do grau de correspondência entre as duas amostras para um dado deslocamento espacial. Ao se aplicar a Equação 2.16 para uma gama de deslocamentos, um mapa de correlação é formado. Aqui,  $M_{I1} \times M_{I2}$  é o tamanho da área de interrogação,  $\mu_{I1}$  é a média de I<sub>1</sub> e  $\mu_{I2}$  é a média de I<sub>2</sub>. O maior pico no mapa de correlação c(dx, dy), Equação 2.17, representa o deslocamento mais provável dentro de cada janela de interrogação. Com o conhecimento da separação do tempo dt, o campo de vetores de velocidade pode ser obtido (RAFFEL *et al.*, 2007).

O princípio da análise estatística na interrogação PIV é ilustrada na Figura 2.19.



Figura 2.19 - Princípio da análise estatística na interrogação PIV (Adaptado de Adrian e Westerweel, 2011)

As imagens de partícula na primeira e na segunda exposição são representados por pontos brancos e pretos, respectivamente. Para cada imagem de partícula da primeira exposição (representada como um ponto cinza) são consideradas todas as correspondências possíveis com as imagens de partículas da segunda exposição e as possibilidades correspondidas são representadas como picos em histogramas. Cada correspondência possível gera um pico no histograma de mesma amplitude. Este procedimento é repetido para todas as imagens de partículas da primeira exposição, e então todos os histograma são combinados. O pico mais alto no histograma combinado indica a maior probabilidade de correspondência das imagens de partículas na primeira e na segunda exposição. Na Figura 2.19, por exemplo, existem cinco correspondências de pares de imagens de partícula com o mesmo deslocamento (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).

Na técnica PIV Tomográfica, a distribuição tridimensional da intensidade de luz resultante pode ser dividida em pequenos volumes de interrogação, que são correlacionados por correlação cruzada 3D, para fornecer dados de campo de velocidade (HUMBLE, 2009). A análise da correlação cruzada pode ser realizada com uma técnica iterativa baseado na técnica de deformação da janela de interrogação (SCARANO, 2002), estendida para campos de intensidade tridimensional, em que os volumes de interrogação são deslocados/deformados com base no resultado da interrogação anterior. Múltiplos passos podem ser empregados, na interrogação, em que o tamanho do volume de interrogação pode ser progressivamente diminuído (RAFFEL *et al.*, 2007). Um estudo extensivo usando simulações de correlação espacial para gravação PIV *double-frame/single-frame, multiple-frame/single-frame* e *single-exposure/dual-frame* (por exemplo, correlação cruzada) foi realizado por Keane e Adrian (1990, 1991, 1992) (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011). Isto resultou em quatro regras de projeto prático para medidas PIV (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011):

$$N_{I} > 10, \qquad |\Delta X| < \frac{1}{4} D_{I}, \quad |\Delta Z| < \frac{1}{4} \Delta Z_{0} e^{M_{0}} |\Delta u| \Delta t < d_{\tau}$$

$$(2.19)$$

em que  $N_I$  é o número de imagens de partícula,  $\Delta X$  é o deslocamento da imagem de partícula,  $D_I$  é o diâmetro da área de interrogação (para filmes fotográficos) ou largura da área de interrogação (para sensores CCD),  $\Delta Z$  deslocamento para fora do plano,  $\Delta Z_0$  é a espessura da folha de luz,  $M_0$  é a magnificação da imagem paraxial ou nominal,  $\Delta u$ variação local da velocidade,  $\Delta t$  é o tempo entre as exposições e  $d_\tau$  é o diâmetro da imagem de partícula. Essas regras foram determinadas por meio do método Monte Carlo (MORGAN, 1984).

## 2.3.8 Iluminação do volume de medida

*Lasers* são amplamente utilizados na PIV devido à sua capacidade de emitir luz monocromática com alta densidade de energia. Atualmente, o sistema de *laser* mais usado para PIV é o *laser* Nd:YAG pulsado de dupla-cavidade.



Figura 2.20 – Esquema típico de um laser Nd: YAG pulsado de dupla-cavidade

Um típico sistema *laser* de dupla-cavidade consiste de dois compartimentos (Figura 2.20). Um compartimento contém dois *lasers* Nd:YAG e o outro contém um sistema ótico de combinação de feixes e um cristal de dupla frequência. Um *laser* Nd:YAG pulsado, de estado sólido, consiste de uma haste de *laser* dentro de uma cavidade. Esta cavidade usualmente contém um *flash lamp* ou um *laser* diodo de alta potência que é usado para excitar os átomos do material sólido Nd:YAG (meio ativo). Dois espelhos, sendo um espelho completamente reflexivo e um parcialmente transmissor, configuram o oscilador do *laser*. Ao incluir um interruptor (*Q-switch*), no interior da cavidade, o *laser* pode ser operado em um modo disparado. Cada *laser* gera pulsos infravermelhos (não visível) de curta duração com um comprimento de onda de  $\lambda = 1,064$  nm. Um espelho reflete um dos feixes para um polarizador dielétrico que combina os dois feixes de *laser* polarizados linearmente com orientação ortogonal da polarização. Uma placa  $\lambda/2$  rotaciona a polarização do feixe e uma placa  $\lambda/4$  converte a luz polarizada linearmente em luz

polarizada circular. Os dois feixes passam através de um cristal ótico não linear de temperatura controlada (KDP) que converte a maior parte da luz infravermelha em luz verde visível ( $\lambda = 532$  nm) dobrando a frequência dos fótons. Um espelho dicróico deflete a luz verde e faz passar a luz infravermelha (que é absorvido em um "depósito de feixes"). Um segundo espelho dicróico deflete o feixe através do orifício no compartimento do sistema *laser* (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011). O neodímio inserido em matrizes sólidas de granada de ítrio e alumínio (Nd:YAG) possui uma combinação única de propriedades favoráveis para a operação a laser (KOECHNER e BASS, 2003).

Para uma dada escolha do campo de visão, a intensidade da luz é inversamente proporcional à espessura requerida para o volume de medição. Em conjunto com o requisito da imagem de partícula em foco, este aspecto é considerado como o fator mais limitativo para experimentos tomográficos sendo dimensionada para volumes de medição de grande porte. Uma indicação do volume de medição, obtido em experimentos, é dada na Tabela 2.2, com os maiores volumes obtidos em fluxos de água com sistemas *laser* de alta-energia de pulso (baixa taxa de repetição) (SCARANO, 2013).

	Energia de pulso (mJ)	Espessura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )
Baixa taxa de repetição, ar.	200	4 a 12	20 a 50
Baixa taxa de repetição, água.	200	10 a 40	100 a 200
Alta taxa de repetição (3 kHz), água.	10	4 a 8	10 a 20
Baixa taxa de repetição (1 kHz), água.	50	10 a 20	20 a 50

Tabela 2.2 – Volume de medição típico em experimentos PIV Tomográfica

(SCARANO, 2013).

O volume de luz pode ser obtido pela combinação de duas lentes divergentes. Essa configuração, Figura 2.21, causa uma distribuição desigual da intensidade no volume (perfil do feixe ruim). É fundamental que a distribuição da intensidade do *laser*, no volume iluminado, seja a mais homogênea possível. Isso pode ser obtido com a utilização de uma placa com uma fenda para "cortar" a intensidade mais baixa nas laterais do volume

iluminado aumentando o perfil de intensidade *top-hat*. O aumento da distância L também favorece o perfil de intensidade *top-hat*.



Figura 2.21 – Formação do volume de iluminação destacando o perfil de intensidade antes e depois da fenda.



**Figura 2.22** – Configuração óptica (colimador) para iluminação a *laser* utilizada por Schröder *et al.*(2008)

Com o objetivo de melhorar o perfil de intensidade do feixe, Schröder *et al.*(2008) usaram um colimador óptico (conjunto de espelhos) para aumentar a intensidade da luz

espalhada pelas partículas de óleo no ar com um sistema PIV Tomográfica de altavelocidade (*Time-Resolved Tomographic* PIV ou PIV 4D). O feixe de *laser* passa através de um expansor de feixe e de um colimador óptico (conjunto de espelhos) e é então dirigido para a região de medição em paralelo à parede (Figura 2.22).

### 2.3.9 Partículas fantasmas

Um problema comum que surge na reconstrução de imagens de partículas é a presença de regiões não nulas de intensidade que não correspondem às posições de partículas reais (ELSINGA *et al.*, 2006b). As partículas fantasmas são definidas como picos de intensidade que não correspondem à localização real de partículas medidas, mas sim são criados pela presença de múltiplos locais de partícula que podem satisfazer as imagens gravadas (ATKINSON *et al.*, 2011). A intensidade das partículas fantasmas tende a ter uma intensidade mais baixa do que a das partículas (ELSINGA *et al.*, 2006b; ATKINSON e SORIA, 2009).



Figura 2.23 - (a) Formação de partículas fantasmas em uma configuração de duas câmeras, (b, c e d) Solução da reconstrução para duas partículas numa configuração de duas câmeras (Baseado em Elsinga *et al.*, 2006b)

A formação de partículas fantasmas, falsos picos de intensidade de luz na reconstrução tomográfica, para um sistema de duas câmaras é ilustrada na Figura 2.23a. O volume de medição contém duas partículas que são vistos pela câmera 1, ao longo das linhas de visão LDV<sub>1</sub> e LDV<sub>2</sub>, e pela câmera de 2, ao longo das linhas de visão LDV<sub>3</sub> e LDV<sub>4</sub>. Estas imagens são utilizadas para reconstruir a distribuição de partículas no volume

de medição. As partículas reconstruídas podem ser formadas nas intersecções das linhas de visão, a partir de cada câmera, correspondendo a uma partícula. Na Figura 2.23a, as linhas interceptam em quatro pontos resultando em três soluções possíveis para a reconstrução da imagem de partícula (Figura 2.23b-d). Pode ser mostrado que o algoritmo de reconstrução tomográfica converge para a solução de quatro partículas (Figura 2.23d) (ELSINGA *et al.*, 2006b).

O número de partículas fantasmas produzidas pela técnica de reconstrução MART pode ser comparável e, muitas vezes maior do que o número de partículas reais, e depende principalmente do número de pontos de vista simultâneos, da concentração de partículas e da espessura do volume iluminado (MAAS *et al.*, 1993). O efeito da concentração de partículas é claramente visível na Figura 2.24, em que a reconstrução em baixa concentração de partículas não mostra qualquer resultado significativo, porque a probabilidade de interação das partículas ao longo das mesmas linhas de visão é bastante baixa (NOVARA *et al.*, 2010).



Figura 2.24 - Efeito do aumento da concentração de partículas na formação de partículas fantasmas (Adaptado de Atkinson e Soria, 2007)

Além disso, a profundidade do volume de medição afeta a formação de partículas fantasmas em que a interseção da linha de visão (LDV) através do objeto determina a probabilidade de sobreposição das imagens de partículas. Isto pode ser visualizado pela observação das interseções ao longo das linhas de visão na Figura 2.25. Esta figura ilustra a forma como a espessura de volume, ao longo da profundidade do campo de visão das câmaras, pode afetar diretamente na formação de partículas fantasmas.



**Figura 2.25 -** Efeito da espessura do volume na formação de partículas fantasmas (Adaptado de Atkinson *et al.*, 2011)

De acordo com Elsinga *et al.* (2006b), a proporção de partículas  $N_p$  e partículas fantasmas  $N_f$  é dada pela Equação 2.20.  $N_C$  representa o número de câmeras,  $A_p$  é a área da imagem da partícula em *pixel*, *ppp* (partículas por *pixel*) é a concentração de partículas na imagem e  $L_z$  é o comprimento do volume ao longo da direção de profundidade.

$$\frac{N_p}{N_f} = \frac{1}{ppp^{N_c - 1} \cdot A_p^{N_c} L_z}$$
(2.20)

Para avaliar a contribuição das partículas fantasmas na medição da velocidade, não só a sua ocorrência em volumes individuais precisa ser considerado, mas também a maneira em que se adiciona ao sinal no mapa de correlação cruzada. Este é um problema de recorrência fantasmas em ambos os volumes reconstruídos Um modelo para o deslocamento da partícula fantasma, ou velocidade, é mostrado na Figura 2.26 (ELSINGA *et al.*, 2011).

O par de partículas fantasma resultante irá afetar o mapa de correlação. Se, no entanto, o deslocamento de uma única destas quatro partículas (a imagem de partícula reconstruída correspondendo à câmara 4 na Figura 2.26b) é diferente dos outros, as linhas de visão na segunda exposição (linhas tracejadas) não mais se cruzam em um único ponto comum. Neste exemplo, uma partícula fantasma é formada a partir de quatro imagens de partículas reconstruídas de um sistema de quatro câmaras. No caso do deslocamento normal à direção de observação, entre as duas posições, é quase igual para todos as quatro partículas (para dentro de aproximadamente um diâmetro de partícula de imagem, Figura 2.26a), a partícula fantasma é formada em ambas as exposições a partir das mesmas quatro imagens de partícula reconstruída e é deslocada aproximadamente pelo deslocamento médio dessas imagens de partículas reconstruídas reconstruídas (ELSINGA *et al.*, 2011).



Imagem de partícula reconstruída (t) O Partícula Fantasma
Imagem de partícula reconstruída (t+dt)

**Figura 2.26** - (a) Formação de partículas fantasmas que contribuam para a correlação cruzada e (b) não-correlação entre partículas fantasma (Adaptado de Elsinga *et al.*, 2011).

### 2.3.10 Concentração de imagem de partícula reconstruída

Em PIV Tomográfica, existem três tipos de concentração de partícula (Figura 2.27): concentração de partícula (*Cp*), concentração da imagem de partícula (*ppp*) e concentração da imagem de partícula reconstruída ( $N_R$ ).

A concentração da imagem de partículas reconstruídas  $(N_R)$  no interior do volume de medição, em última análise, determina a resolução espacial da medição. O número de partículas reconstruídas dentro do volume de interrogação necessário para realizar uma

análise de correlação cruzada robusta varia entre 5 e 10, considerando-se que o fenômeno de perda de pares de partículas é insignificante para a análise do movimento em 3D das partículas (SCARANO, 2013).



Figura 2.27 – Três tipo de concentração de partícula usadas em PIV Tomográfica



Figura 2.28 - Qualidade do volume reconstruído em função da concentração de partículas e do número de câmeras (ELSINGA *et al.*, 2006)

Simulações feitas por Elsinga *et al.* (2006), demonstram o efeito da concentração de partículas reconstruídas na qualidade do volume reconstruído Q, em que o fator de qualidade foi definido como a correlação normalizada da distribuição da intensidade exata e reconstruída, variando o número de câmeras utilizadas. Os resultados, Figura 2.28, mostram que uma alta concentração de imagens de partículas diminui a qualidade do volume reconstruído. A máxima concentração de imagem de partícula que resulta em uma qualidade aceitável do volume reconstruído é de 0,075 e 0,15 partículas por *pixel (ppp)* para um sistema de três e quatro câmeras, respectivamente.

Um parâmetro importante introduzido por Keane e Adrian (1990) é a concentração da fonte N<sub>s</sub> (*source density*), Equação 2.21, que leva em consideração a concentração da imagem de partícula no *frame* e o diâmetro da imagem de partícula, em que  $d_{\tau}^*$  é definido como o diâmetro da imagem de partícula normalizado.

$$N_s = ppp \cdot \frac{\pi \cdot d_\tau^*}{4} \tag{2.21}$$

A relação entre a concentração da fonte (N<sub>S</sub>) e a concentração de partícula ( $C_p$ ) é dada pela Equação 2.22, em que D<sub>R</sub> é a resolução da imagem digital (*pixel*. mm<sup>-1</sup>).

$$C_p = \frac{N_s \cdot D_R^2}{Z} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_\tau^{*2}}$$
(2.22)

Simulações feitas por Novara *et al.* (2010) indicam que um volume reconstruído precisamente é obtido quando  $N_S < 0.5$ .

# 2.3.11 Temporização e sincronização

Sistemas PIV são compostos de componentes complexos (*lasers*, câmeras e uma placa de captura que tem como função armazenar as imagens gravadas pelas câmeras) que precisam ser sincronizados precisamente. O esquema típico de um sistema de temporização PIV é apresentado na Figura 2.29.



Figura 2.29 – Diagrama do sistema de temporização típico em PIV (Adaptado de Adrian e Westerweel, 2011).

Para vários experimentos, é necessário que a temporização da iluminação do laser e a gravação das câmeras sejam precisamente sincronizadas com um determinado evento na instalação experimental como, por exemplo, a ignição em um motor de combustão interna. Entretanto, o sistema laser ou as câmeras digitais não permite um acionador externo arbitrário. Nesses casos, o sistema laser ou as câmeras digitais geram o sinal do acionador para outros componentes. O diagrama de temporização típico para um sistema PIV é mostrado na Figura 2.30. O sistema de temporização geralmente recebe um sinal do acionador da instalação experimental. O sistema de temporização envia um sinal para o sistema laser (usualmente lasers Nd:YAG), iniciando primeiramente o flash lamp. Pouco tempo depois (geralmente 180 µs) o sinal do sistema de temporização do Q-Switch do sistema laser é enviado, tal que dois pulsos de laser com um tempo de atraso pré-definido seja gerado. O sistema de temporização também inicia a gravação de um par de frames com a câmera digital PIV (ou múltiplas câmeras em sistemas PIV Tomográfica). A temporização é de tal forma que o primeiro pulso de laser ocorre no primeiro quadro, enquanto que o segundo pulso ocorre no segundo quadro. Para câmeras dual-frame frequentemente usadas em PIV, o período de gravação do primeiro frame é de aproximadamente 250 µs. O período de gravação do segundo frame é muito maior (geralmente 33 ms), enquanto que o tempo entre os frames é muito curto (geralmente  $0,2 \,\mu s$ ).





Os dados da imagem gravada no primeiro *frame* são transferidos da câmera para a memória de uma placa de captura durante o período de gravação do segundo *frame*. Isso significa que a câmera é incapaz de gravar alguma imagem até o segundo *frame* ter sido transferido para a placa de captura (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).

# CAPÍTULO 3

# Parte Experimental

Este capítulo destina-se à descrição dos materiais e dos equipamentos (leito fluidizado circulante e sistema PIV Tomográfica) utilizados para a realização dos experimentos. Os experimentos foram realizados na Unidade Multipropósito para Craqueamento Catalítico, que se encontra no Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) do Departamento de Engenharia de Processos (DePro), da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A unidade em questão refere-se a um sistema de leito fluidizado circulante.

### 3.1 MATERIAIS

Os ensaios experimentais para a obtenção da velocidade da fase particulada na seção do *riser*, de um leito fluidizado circulante, foram realizados utilizando-se ar ambiente, enquanto fase fluida, sendo a fase particulada caracterizada por partículas de FCC. As características físicas do catalisador estão apresentadas na Tabela 3.1.

Material	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro médio de partícula (µm)	Porosidade de partícula
Catalisador FCC	0,9017	2,4877	79,65 <u>+</u> 1,30	0,6375

Tabela 3.1 - Resultado das análises das propriedades físicas do catalisador de FCC(BETIOLI, 2007)

## 3.1.1 Leito fluidizado circulante

O leito fluidizado circulante é composto de: soprador, com vazão máxima de 3,9 m<sup>3</sup>/min e pressão de 3600 mmCa; *riser* (construído de acrílico); *downer*; ciclone 1º estágio; ciclone 2º estágio; silo de carregamento; transportador tipo rosca sem fim, que fornece uma vazão máxima de catalisador de 3,5 kg/min; inversor de frequência, com rotação máxima de 60 rpm; rotâmetros para vazões de 11,7 a 117 m<sup>3</sup>/h; rotâmetro para vazões de 0 a 50 m<sup>3</sup>/h; placas de orifício e colunas de água para medição de vazões no riser. O esquema do leito fluidizado circulante é mostrado na Figura 3.1. O sistema partículado não segue fielmente o escoamento do fluido (gás) como na maioria das aplicações PIV.

Conforme pode ser observado na Figura 3.2, há três alimentadores de ar: uma na entrada do *downer*, na entrada da curva "U" e na entrada do riser. O alimentador de sólidos encontra-se em paralelo a um alimentador de ar na entrada do *downer*. Cada alimentador de ar possui quatro bicos (Figura 3.3) e são conectadas ao soprador por tubos flexíveis.



Figura 3.1 - Esquema do leito fluidizado circulante.



Figura 3.2 - Alimentador de ar (a) na entrada do *downer*, (b) na estrada da curva do U e na entrada do *riser*.



Figura 3.3 - Detalhes do alimentador de ar (dispositivo de quatro bicos)

Os alimentadores de ar são conectados ao soprador por tubos flexíveis. Para a alimentação de partículas, está disposto um alimentador tipo parafuso (Figura 3.4). Dada a preocupação de minimizar a emissão de particulados no ambiente, optou-se pela instalação de um ciclone de 2º estágio.



Figura 3.4 - Alimentador de partículas, silo de carregamento e ciclone do leito fluidizado circulante.

Ar proveniente do soprador é alimentado na unidade através dos alimentadores de ar. As partículas sólidas, inicialmente armazenadas no silo de carregamento, são carregadas no alimentador de partículas e alimentadas na entrada do *downer* através de um transportador tipo rosca sem fim. Após escoarem ao longo do *downer*, da curva "U" e do *riser*, o ar e as partículas são separados no ciclone de  $1^{\circ}$  estágio. As partículas separadas voltam para o silo de carregamento para retornarem ao processo enquanto que as partículas remanescentes são separados do ar no ciclone  $2^{\circ}$  estágio e descartados. O ar, na saída de topo do ciclone  $2^{\circ}$  estágio, retorna à atmosfera.

A região do *riser* investigada, Figura 3.5, apresenta 10 cm de comprimento, 8 cm de largura e 3 cm de espessura e está a 50 cm do início do *riser*. O comprimento do *riser* é de 145 cm. O *riser* foi feito de acrílico.



Figura 3.5 - Região do riser investigada

## 3.1.2 Sistema PIV Tomográfica

O sistema PIV usado é do tipo tomográfica (PIV Tomográfica) desenvolvido pela LaVision, o qual permite medida de velocidade em três dimensões em um volume de até um milhão de vetores por volume, utilizando-se quatro câmaras. Tais câmeras apresentam uma matriz de 1648 x 1214 *pixels*, com saída digital de 14 bits, com 30 *frames*/s, tempo *inter frame* de 110 ns (modo *double-frame*) e 7,4 µm o passo de *pixel* (distância entre o centro de *pixels* adjacentes). Foram usadas lentes objetivas da Nikon com distância focal de 50 mm (F/1.4D) e adaptadores de *Scheimpflug* para garantir o foco em todo volume investigado. Foi utilizado um sistema *laser* Nd:YAG (200 mJ/pulso em 532 nm) com uma frequência máxima de 15 Hz. As câmeras e o *laser* foram controlados com uma unidade de tempo programável (PTU) pelo software DaVis 8.0. O computador utilizado tem um processador Intel Xeon X5650 2,67GHz, 36 Gb de RAM. O software usado foi o Davis 8.0 da LaVision.

Foram utilizados dois trilhos (100 x 2,25 x 9,5 cm<sup>3</sup>), para o deslocamento das câmeras no eixo X' (Figura 3.6a), e uma cabeça engrenagem (3 eixos) para cada câmera (Figura 3.6b), ambos desenvolvidos pela LaVision.



Figura 3.6 – Estrutura para o sistema óptico desenvolvido pela LaVision para PIV. (a)Trilho para o deslocamento das câmeras. (b) Cabeça engrenagem.

### 3.1.3 Suporte para as câmeras

Tendo como referência os trilhos, para o sistema óptico PIV, desenvolvido pela LaVision, o suportes das câmeras foi desenvolvida com o objetivo de variar a posição das câmeras principalmente no eixo X' e Y'. O suporte desenvolvido é apresentado na Figura 3.7.

O quadro (100 x 150 x 8 cm<sup>3</sup>) é fixado em uma base (150 x 55 x 50 cm<sup>3</sup>) por parafusos. No quadro, é permitido o deslocamento das câmeras na direção Y'. Uma fenda na base permite o deslocamento, de no máximo 25 cm, do quadro na direção Z'. Os dois trilhos desenvolvidos pela LaVision (Figura 3.7a) e os 4 trilhos menores (15 x 9,5 x 2,25 cm<sup>3</sup>) são fixados no quadro por cantoneiras (Figura 3.7d). O objetivo dos 4 trilhos menores é para obtenção de um maior ângulo de abertura das câmeras  $\beta$ .

# 3.1.4 Suporte do sistema laser

O suporte do sistema *laser*, Figura 3.8a, foi desenvolvido com o objetivo de permitir o deslocamento do *laser* na direção do eixo Y<sup>'</sup>. O perfil de alumínio (40 x 40 mm<sup>2</sup>), Figura

3.8b, permite um deslocamento de até 120 cm na direção do eixo Y'. A mesa do *laser* é fixada nos quatro perfis por cantoneiras Figura 3.8c. Os perfis de alumínio são parafusados na base (58 x 80 x 58 cm<sup>3</sup>). A base é uma estrutura soldada em perfil Metalon 40 x 40 mm<sup>2</sup>.



Figura 3.7 – Suporte das câmeras. (a) Trilho desenvolvido pela LaVision. (b) Perfil de alumínio 40 x 80 utilizado no quadro. (c) Trilho menor. (d) Cantoneira utilizada para prender os trilhos no quadro. (e) Fenda para fixar o quadro na base.



**Figura 3.8-** (a) Suporte do sistema *laser*. (b) Perfil de alumínio 40 x 40 mm<sup>2</sup> (c) Cantoneira usada para fixar a mesa no perfil.

# 3.1.5 Placa de calibração e fenda para o volume de luz

Foram utilizadas sete placas feitas de Polionda<sup>®</sup> (7,8 x 10 x 0,5 cm<sup>3</sup>) para a calibração. Na placa, foram feitos pontos, com um diâmetro de 0,5 mm, localizados 2,5 mm (arranjo quadrado) entre si (Figura 3.9a). Esses parâmetros foram escolhidos de acordo com o tamanho do campo de visão das câmeras (Seção 3.2.1) e com a distorção causada pelo tubo. O número de pontos da placa é proporcional ao tamanho do campo de visão e a distância entre os pontos é inversamente proporcional à quantidade de distorção da imagem causada pelo tubo.

A placa com a fenda (40 x 30 x  $0.5 \text{ cm}^3$ ), que é usada para se obter um volume de iluminação mais homogênea (Sessão 2.3.8), também foi feita de Polionda<sup>®</sup> (Figura 3.9b). A fenda tem um tamanho de 90 x 17 mm<sup>2</sup>.



**Figura 3.9** – (a) Pontos da placa de calibração (a = 2,5 mm e b = 0,5 mm). (b) Placa com uma fenda (90 x 17 mm<sup>2</sup>) utilizada na obtenção do volume de luz homogêneo.

# **3.2** *MÉTODO*

# 3.2.1 Arranjo das câmeras

Inicialmente, foram estudados dois arranjos de câmeras (linear e quadrado) frequentemente usadas em aplicações PIV Tomográfica (Figura 3.10). Para a configuração linear, as câmeras L3 e L4 apresentam um deslocamento angular de 20 graus em relação às câmeras L1 e L2, respectivamente (Figura 3.11a). A câmera L1 apresenta um deslocamento de 40 graus em relação à câmera L4. O ângulo de abertura ( $\beta$ ) dessa configuração é de 80 graus.

Para a configuração quadrada, o ângulo de elevação é de 32 graus e o ângulo azimutal é de 42 graus para as 4 câmeras (Figura 3.11b) mantendo a simetria das câmeras e o ângulo de abertura ( $\beta$ ) entre 60 e 80 graus. O campo de visão para o arranjo linear é de 80 x 110 mm<sup>2</sup> (M<sub>0</sub> = 0,10) e para o arranjo quadrado é de 148 x 195 mm<sup>2</sup> (M<sub>0</sub> = 0,06), respectivamente. O tamanho do campo de visão foi escolhido com o objetivo de determinar o campo vetorial de todo raio (na direção X').



**Figura 3.10 -** Arranjo (a) linear e (b) quadrado das câmeras.



Figura 3.11 - (a) Arranjo linear e (b) quadrado das câmeras no *riser*.

O efeito do ângulo de abertura foi estudado por Elsinga *et al.* (2006a) tendo como parâmetro a precisão da reconstrução tomográfica. A precisão da reconstrução das imagens de partículas é máxima para um  $\beta$  entre 40° e 80°. Simulações apresentadas por Scarano (2013) avaliam o efeito do ângulo de abertura ( $\beta$ ) no fator de qualidade do volume reconstruído (Q). A qualidade do volume reconstruído diminue para um  $\beta$  menor que 40° e maior que 100°. Valores menores de  $\beta$  (< 40°) leva à formação de imagens de partículas reconstruídas alongadas através da linha de visão das câmeras (Figura 3.12). Valores maiores de  $\beta$  (> 100°) contribui para o aumento de partículas fantasmas no volume reconstruído. As simulações mostram um 0,95 < Q < 1 para 60° <  $\beta$  < 80°.



Figura 3.12 – Efeito do ângulo de abertura na forma da imagem de partícula reconstruída (Adaptado de Scarano, 2013).

O melhor arranjo foi escolhido tendo como principal referência o efeito do espalhamento da luz *laser* na parede do *riser*.

### 3.2.2 Calibração volumétrica

Após a escolha do melhor arranjo das câmeras (Seção 3.2.1), foi realizado o procedimento de calibração volumétrica (Seção 2.3.3.2). A referência do sistema de imagem é escolhida de tal modo que X'e Y'são as coordenadas no plano, X' no centro do *riser* e Y' a 50 mm da entrada do *riser*, e Z a coordenada fora do plano dirigida para fora das câmeras (Figura 3.11a e b ). O sistema de imagem foi calibrado pela varredura de uma

placa através do volume na direção de Z<sup>(-15, 10, -5, 0, 5, 10 e 15 mm)</sup> (Figura 3.13). O tamanho do volume mapeado é de 80 x 100 x 30 mm<sup>3</sup>.



Figura 3.13 - Leito fluidizado circulante destacando a posição da placa de calibração.

Para cada um dos planos de calibração, a relação entre as coordenadas físicas (X', Y', Z') e as coordenadas de imagem (x, y) foi descrita por um ajuste polinomial de terceira ordem dada pela Equação 3.1, em que dX' e dY' são definidos na Equação 3.2. Os deslocamentos dX' e dY' são determinados usando as coordenadas normalizadas  $s = 2 \cdot (X'-X'_0)/n_x e t = 2 \cdot (Y'-Y'_0)/n_y$ , em que  $n_x e n_y é$  o tamanho da imagem em *pixel* e  $(X'_0, Y'_0)$  da escala no *frame*.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X' + dX(X',Y') \\ Y' + dY(X',Y') \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} dX' \\ dY' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4t + a_5t^2 + a_6t^3 + a_7st + a_8s^2t + a_9st^2 \\ b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + b_4t + b_5t^2 + b_6t^3 + b_7st + b_8s^2t + b_9st^2 \end{pmatrix}$$

$$(3.2)$$

Os coeficientes da Equação 3.2 para o arranjo de câmera escolhido (linear ou quadrado) são apresentados nos Resultados e Discussão (Capítulo 4) e no Apêndice A1 (Calibração).

# 3.2.3 Iluminação a laser

O sistema de *lasers* foi posicionado a 2 metros do *riser* para garantir a expansão do volume de luz, criado por duas lentes (distância focal de -50 e - 20 mm), antes da placa com fenda, localizada a 1,75 metro do sistema de *lasers* (Figura 3.14a). O volume de luz, produzido pelo *laser* ao passar pela fenda, está localizado no centro do riser (Figura 3.14b) e a 90 graus do plano das câmeras, para a configuração linear, garantindo o melhor ângulo de captação do espalhamento da luz das partículas pelas câmeras (Figura 3.14a e Figura 3.15a). Foram utilizadas espumas pretas para isolar a área filmada garantido que a reflexão da luz *laser* na estrutura do *riser* não seja captada pelas câmeras (Figura 3.15b).



Figura 3.14 – (a) Arranjo do sistema de *lasers* no *riser*. (b) Feixe de *laser* no *riser*.


Figura 3.15 – (a) Arranjo do sistema de *lasers* para a formação do volume de iluminação no *riser*. (b) Espumas pretas usadas para isolar a área investigada.

#### 3.2.4. Avaliação do efeito da autocalibração

A vazão de ar foi de 140 m<sup>3</sup>/h e a vazão de alimentação da fase particulada igual a 60 g/s. O regime de escoamento da fase particulada é transiente. Foi utilizada uma frequência de 7 Hz do sistema (*laser* + câmeras + placa de captura) na gravação das imagens. Foi utilizada essa frequência devido à instabilidade, na potência do feixe de *laser* emitido, causada pela frequência máxima do sistema *laser* (14 Hz) produzindo uma iluminação não-homogênea.

O intervalo de tempo entre os pulsos de *laser* é de 80 µs produzindo um deslocamento médio da imagem de partícula de 10 *voxels*. Este parâmetro foi determinado analisando a imagem da fase partículada nos dois *frames*. Um aumento no deslocamento ou um deslocamento muito pequeno da imagem de partícula (menor que 0,1 *voxel*) pode dificultar na correlação das imagens de partículas e, consequentemente, produzir vetores de velocidade falsos. O fluxograma para a avaliação do efeito da autocalibração é apresentado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Fluxograma da avaliação do efeito da autocalibração

Foi feito um procedimento de subtração de imagem para remover o efeito da luz *laser* no tubo (Equação 3.3). Foram feitas gravações com as partículas (Imagem A) e sem as partículas no tubo (Imagem B). A diferença das duas são as imagens de partículas (Imagem C). As imagens subtraídas foram pré–processadas utilizando alguns filtros lineares e não lineares (filtro gaussiano, *slinding minimum* e *sharpening*).

$$\begin{bmatrix} \text{Imagem A} \\ (riser + laser + \text{partícula}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Imagem B} \\ (riser + laser) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Imagem C} \\ (\text{partícula}) \end{bmatrix}$$
(3.3)

O procedimento de autocalibração utilizado é o mesmo descrito por Wieneke (2008). A distribuição da imagem de partícula do volume de medida foi reconstruída usando a técnica de reconstrução algébrica multiplicativa (MART). O volume reconstruído foi processado usando correlação cruzada 3D para um tamanho de volume de interrogação decrescendo de 110 *voxels* a um volume final de 16 *voxels*, com 75% de sobreposição dos volumes de interrogação adjacentes, utilizando múltiplos passos com o objetivo de otimizar o número de pares de imagens de partículas reconstruídas no domínio de interrogação. No

pós-processamento, foi usado o teste universal da mediana (WESTERWEEL e SCARANO, 2005). Segundo o autor, um limite de remoção igual a 2 é apropriado na detecção de vetores falsos em uma vizinhança de 3 x 3 x 3 *voxel*.

A análise do efeito da autocalibração foi realizada pela comparação das componentes da velocidade em função do tempo e da velocidade média (no tempo) em cinco posições no raio do *riser* (X = -40, -20, 0, 20 e 40 mm) para Y = -15, 0, +15 mm e Z = -2, 0 e +2 mm, sem e com o procedimento de autocalibração. A Tabela 3.2 e Tabela 3. apresentam um resumo dos principais parâmetros utilizados para aquisição e processamento das imagens de partículas no *riser* pela PIV Tomográfica.

**Tabela 3.2** - Resumo dos principais parâmetros utilizados para aquisição e processamentodas imagens de partículas no *riser* pela PIV Tomográfica

Parâmetro	Configuração	Justificativa
Arranjo das câmeras	Linear e quadrado	Arranjos mais usados em PIV Tomográfica por serem simétricos
Ângulo de abertura das câmeras ( $\beta$ )	80° para o arranjo linear e entre 60° e 80° para o arranjo quadrado (o ângulo de elevação é de 32° e o ângulo azimutal é de 42 °	As simulações feitas por Scarano (2013) mostram um fator de qualidade do volume reconstruído maior que $0,95$ para $60^{\circ} < \beta < 80^{\circ}$ .
Campo de visão	80 x 110 mm <sup>2</sup> (arranjo linear) e 148 x 195 mm <sup>2</sup> (arranjo quadrado)	Para obter o campo vetorial em todo o raio (direção X´).
Magnificação da imagem	$M_0 = 0,10$ (arranjo linear) e $M_0 = 0,06$ (arranjo quadrado)	Para obter o campo vetorial em todo o raio (direção X´).
Distância entre o <i>laser</i> e o <i>riser</i>	2 metros	Garantir a expansão do volume de luz antes da placa com fenda, localizada a 1,75 metro do sistema de <i>lasers</i> .
Localização do volume de luz <i>laser</i>	A 90° do plano das câmeras para o arranjo linear no centro do <i>riser</i> .	Melhor ângulo de captação do espalhamento da luz das partículas pelas câmeras.
Tempo entre os pulsos de <i>laser</i>	80 µ s	O deslocamento médio da imagem de partícula foi de 10 <i>voxels</i> . Um deslocamento grande (maior que 40 <i>voxel</i> ) ou pequeno (menor que 0,1 <i>voxel</i> ) da imagem de partícula dificulta na análise de correlação das imagens de partículas.

**Tabela 3.2** - Resumo dos principais parâmetros utilizados para aquisição e processamentodas imagens de partículas no *riser* pela PIV Tomográfica (cont. )

Parâmetro	Configuração	Justificativa
Frequência de aquisição de dados	7 Hz	Foi utilizada essa frenquência devido à instabilidade, na potência do feixe de <i>laser</i> emitido, causada pela frequência máxima do <i>laser</i> (14 Hz) produzindo uma iluminação não homogênea.
Algorítmo de reconstrução tomográfica	Técnica de reconstrução algébrica multiplicativa (MART)	Mais preciso na reconstrução do volume (ELSINGA, 2008)
Tamanho de volume de interrogação na correlação	Decrescendo de 110 <i>voxels</i> a um volume final de 16 <i>voxels</i> , com 75% de sobreposição dos volumes de interrogação adjacentes utilizando múltiplos passos	Otimizar o número de pares de imagens de partículas reconstruídas no domínio de interrogação
Limite de remoção do teste da mediana de Westerweel e Scarano (2005)	Limite igual a 2 em uma vizinhança de 3 x 3 x 3 <i>voxel</i> .	Maior detecção de falsos vetores (WESTERWEEL e SCARANO, 2005)

# CAPÍTULO 4

## Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na avaliação do efeito da autocalibração volumétrica no campo vetorial da fase particulada. A primeira parte apresenta os resultados do estudo do arranjo das câmeras e do pré-processamento, a segunda parte apresenta os resultados da autocalibração volumétrica e a terceira parte apresenta o efeito da autocalibração volumétrica no campo vetorial instantâneo, flutuação da velocidade e velocidade média.

## 4.1 AVALIAÇÃO DO ARRANJO DAS CÂMERAS E DO PRÉ-PROCESSAMENTO

#### 4.1.1 Arranjo quadrado

O efeito da luz do *laser* no *riser* para a câmera Q2, sem as partículas, é mostrado na Figura 4.1. A intensidade de fundo (imagem homogênea) é cerca de 100 counts. Percebese, na parede do *riser*, que o perfil do volume de luz não é completamente homogêneo. Essa diferença de intensidade pode ser diminuída com uso de filtros de imagem. O efeito do espalhamento e da reflexão da luz no tubo (imagem heterogênea) é evidente e a subtração de imagens (Equação 3.3) se torna necessária (Figura 4.2).

A Figura 4.2 mostra a imagem da câmera Q2 antes e após o procedimento de subtração de imagem. Após a subtração de imagem, a intensidade de fundo ficou próximo de 0 counts e o efeito a luz na parede foi reduzido consideravelmente. Como os ressonadores dos lasers Nd:YAG (Seção 2.3.8) são diferentes, há flutuações do perfil de intensidade nas gravações subsequentes. A flutuação do perfil de intensidade e a luz espalhada das partículas fazem com que o procedimento de subtração de imagem não resulte só na intensidade espalhada das partículas. Na Figura 4.2b a intensidade espalhada pelas partículas que contribuem para a imagem de fundo (imagem homogênea) é de aproximadamente 75 counts. A imagem subtraída para as quatro câmeras é apresentada na Figura 4.3. Nessa configuração, as câmeras Q1 e Q2 e as câmeras Q3 e Q4 estão localizadas na frente e atrás da direção de espalhamento da luz, respectivamente. As câmeras Q1 e Q2 recebem uma maior quantidade de luz em comparação com as câmeras Q3 e Q4. Mesmo com o pré-processamento, os diferentes ângulos de espalhamento e o efeito da luz laser no tubo indicam que a configuração quadrada não é a ideal para esse experimento. Outra desvantagem dessa configuração é que a magnificação da imagem é menor que a magnificação da configuração linear. Não é possível diminuir a distância entre as câmeras e o volume investigado, pois, com isso, as câmeras seriam danificadas pela luz *laser* refletida pelo tubo. As instruções para o manuseio seguro do *laser* e das câmeras podem ser encontradas no Apêndice A4.



Figura 4.1 - Eleito da luz *laser* no *riser* para a câmera Q2 sem as partículas (Arranjo quadrado)



**Figura 4.2 -** Imagem da câmera Q2 (a) antes e (b) após o procedimento de subtração de imagem do *riser* (Equação 3.3).



Figura 4.3 - Imagem das quatro câmeras para a configuração quadrada após a subtração de imagem do *riser* (Equação 3.3).

#### 4.1.2 Arranjo linear

O efeito da luz do *laser* no *riser* para a câmera L1, sem as partículas, é mostrado na Figura 4.4. Percebe-se que a intensidade de fundo (imagem homogênea) é também cerca de 100 counts, mas o efeito da luz *laser* no tubo é bem menor em comparação com o arranjo quadrado das câmeras (Figura 4.5).



Figura 4.4 - Efeito da luz laser no riser para a câmera L1 (Arranjo linear).



Figura 4.5 - Comparação entre o efeito da luz *laser* no tubo para o arranjo quadrado e linear das câmeras.



**Figura 4.6 -** Imagem da câmera L1 (a) antes e (b) após o procedimento de subtração de imagem (no instante t = 0,71s).

A Figura 4.6 mostra a imagem da câmera L1 antes e após o procedimento de subtração de imagem. O resultado do procedimento de subtração de imagem para o arranjo linear é melhor que o resultado para o arranjo quadrado. A imagem subtraída para as quatro câmeras é apresentada na Figura 4.7. A magnificação da imagem não é exatamente a mesma para as quatro câmeras. A resolução das quatro câmeras, para esse arranjo, é de aproximadamente 12 *pixels*/mm.

O arranjo linear das câmeras é a melhor opção para a avaliação do efeito da autocalibração, tendo como parâmetro o espalhamento da luz das partículas, magnificação da imagem e efeito da luz *laser* no tubo. Um arranjo das câmeras diferente da linear foi usado por Amaral *et al.* (2012a e 2012b), na análise da velocidade da fase particulada em um experimento semelhante ao apresentado nesse trabalho, obtendo um erro de calibração aceitável, após o procedimento de autocalibração, para um volume de 80 x 110 x12 mm<sup>3</sup> localizado a 80 cm da entrada de um *riser* de 175 cm, de um leito fluidizado circulante semelhante ao apresentado na Figura 3.1, sem o uso do procedimento da região de imagem (Equação 3.3), da placa com a fenda e da espuma para o isolamento da região de interesse (Figura 4.8).



**Figura 4.7 -** Imagem das quatro câmeras para o arranjo linear após a subtração de imagem (no instante t = 0.71s).



Figura 4.8 - Configuração usada por Amaral et al. (2012a e 2012b)

As imagens subtraídas foram pré-processadas para remover a imagem de fundo, igualar a intensidade de luz e para diminuir a quantidade de partículas fantasmas na imagem. Três procedimentos de pré-processamento foram feitos: uma subtração com o filtro *sliding minimum* sobre uma área de 3 x 3 *pixels* para remover a imagem de fundo (nível de intensidade da luz diferente de zero), normalização da intensidade da luz sobre uma área de deslizamento de 100 x 100 *pixels* para equalizar as diferenças de frequência espacial baixa na intensidade da folha de luz do *laser* e a aplicação de um alisamento gaussiano de 3 x 3 *pixels* (em geral melhora a qualidade do volume reconstituído). A imagem pré-processada para as quatro câmeras é mostrado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Imagem pré-processada para as quatro câmeras (no instante t = 0,71s)

## 4.2 CALIBRAÇÃO

Foi realizado o procedimento de calibração volumétrica (Seção 3.2.2) para o arranjo linear. Os coeficientes da função de mapeamento da Equação 3.2 para a câmera 1 são apresentados na Tabela 4.1.

	5						
Z [mm]	-15	-10	-5	0	5	10	15
$a_0$	1365,500	1331,220	1314,410	1311,210	1326,920	1339,210	1317,380
$a_1$	-176,716	-174,015	-172,877	-167,637	-162,811	-159,965	-146,220
$a_2$	13,138	3,709	7,917	5,324	6,555	4,463	6,426
a <sub>3</sub>	-30,790	-23,401	-3,914	3,953	11,993	18,346	13,295
$a_4$	0,378	11,775	24,027	0,125	7,070	-9,668	8,876
$a_5$	0,004	-0,028	-1,692	0,131	0,007	-0,705	-1,313
$a_6$	-1,046	-0,907	-0,274	-1,119	-1,177	-0,460	-0,669
a <sub>7</sub>	19,370	17,870	16,933	17,756	17,130	16,373	15,551
$a_8$	-0,411	1,413	0,795	0,913	-1,875	0,845	-0,927
a9	-0,401	0,008	-0,240	0,219	-0,433	0,151	-0,498
$b_0$	-101,293	-78,960	-56,600	-32,683	8,885	6,057	62,544
$b_1$	3,035	-2,649	-11,710	5,087	2,343	12,536	-2,634
$b_2$	0,009	0,761	1,561	1,029	0,557	0,390	0,916
<b>b</b> <sub>3</sub>	0,817	-0,953	0,484	0,541	0,768	0,616	0,568
$b_4$	.198,109	-195,443	-192,381	-187,019	-183,705	-180,352	-177,412
<b>b</b> <sub>5</sub>	22,289	23,626	20,314	22,055	21,751	20,101	18,369
$b_6$	-1,004	-0,696	0,354	-0,462	-0,588	0,741	0,086
$b_7$	0,201	1,595	2,027	1,173	0,958	0,549	1,012
$b_8$	0,954	0,831	0,783	0,595	0,426	0,599	0,665
<b>b</b> 9	0,041	0,224	-0,049	-0,046	-0,554	-0,008	-0,391

**Tabela 4.1 -** Coeficientes da função de mapeamento da câmera 1 para os planos Z de calibração (X'<sub>0</sub> = 1930,26; Y'<sub>0</sub> = 768,576;  $n_x$ = 747,69;  $n_y$  = 996,92)

Os coeficientes da função de mapeamento para as câmeras 2, 3 e 4 são apresentados na Tabela A1.1, A1.2 e A1.3, respectivamente. O erro de calibração no volume completo é apresentado na Tabela 4.2. Percebe-se que o erro de calibração no volume completo ficou entre 0,670 e 1,121 *pixel*.

Plano	Z'(mm)	Erro (pixel)						
		Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4			
1	-15	0,886	0,857	0,852	0,908			
2	-10	0,916	0,843	0,993	0,932			
3	-5	0,714	0,837	0,844	0,775			
4	0	0,670	0,788	0,714	0,730			
5	5	0,788	1,121	0,876	0,877			
6	10	1,003	1,072	0,950	0,942			
7	15	1,025	1,073	0,930	0,954			

Tabela 4.2 - Erro de calibração das quatro câmeras para os sete planos

#### 4.3 AUTOCALIBRAÇÃO

Todos os parâmetros da autocalibração foram analisados em uma faixa volumétrica de -40 mm a + 40 mm para X e Y e -5 mm a + 15 mm para Z, aproximadamente o tamanho do volume iluminado (Figura 4.10). O volume iluminado apresenta um deslocamento de 5 mm da origem da coordenada na direção Z (profundidade). Isso mostra a importância de se ter um volume calibrado maior que o volume de interesse (volume iluminado).



Figura 4.10 – Volume calibrado (azul) e volume autocalibrado (vermelho)

Para a detecção das posições das partículas 2D nas imagens, foi utilizado um limite de intensidade de 1780 counts. Os picos de disparidade foram encontrados utilizando um erro de triangulação permitido de 6 *pixels*. O mapa de disparidade foi divido em 7 x 9 x 5 subvolumes com o objetivo que cada subvolume se aproxime de um cubo.

O mapa de disparidade da câmera 1, no plano  $Z_2 = 1$  mm, para 300 gravações, antes da autocalibração, é mostrado na Figura 4.11a. O mapa de disparidade para as múltiplas

gravações foi somado. Percebe-se que são encontrados picos de disparidades com intensidade maior no canto superior esquerdo do mapa. Uma transformação gama foi feita na imagem com o objetivo de visualizar melhor o pico de disparidade no mapa (Figura 4.11b-d). Em geral, a transformação gama da imagem para  $\gamma > 1$  melhora o contraste da região da imagem com alto valor de intensidade e o inverso para  $\gamma < 1$ . O mapa de disparidade da câmera 1, no plano  $Z_2 = 1$  mm, para 300 gravações, depois da autocalibração, é mostrado na Figura 4.12.



**Figura 4.11** – Mapa de disparidade da câmera 1, no plano Z<sub>2</sub>=1mm, para as 300 gravações para um (a)  $\gamma = 1,0$ ; (b)  $\gamma = 0,23$ ; (c)  $\gamma = 0,10$  e (d)  $\gamma = 2,68$ .



**Figura 4.12** - Mapa de disparidade da câmera 1, no plano Z<sub>2</sub>=1mm, para as 300 gravações depois da autocalibração para um (a)  $\gamma = 1,0$ ; (b)  $\gamma = 0,23$ ; (c)  $\gamma = 0,10$  e (d)  $\gamma = 2,68$ .

Os picos de disparidade de maior intensidade encontrados na região superior esquerda dos mapas de disparidade, mostrado na Figura 4.11 e Figura 4.12, podem ser explicados pela distribuição não homogênea da média da concentração da imagem de partícula reconstruída por *voxel* para as 300 imagens mostrada na Figura 4.13 e pela imagem da câmera 1 em diferentes tempos (Figura 4.14). O tamanho do volume reconstruído é de 637 x 682 x 153 voxels utilizando a técnica MART com 5 iterações. Para um volume de interrogação de 16 *voxels*, percebe-se uma concentração média de 40 partículas por volume de interrogação nos intervalos de -20 mm < X < 5 mm, 20 mm < Y < 40 mm e 10 mm < Z < 12 mm.



**Figura 4.13** – *Iso-surfaces* da concentração média da imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação (16 *voxels*) com a autocalibração para as 300 gravações.

O mapa de disparidade obtido depois da autocalibração, para a câmera 1, em cada plano Z é mostrado na Figura 4.15. Percebe-se que no plano  $Z_4 = 9$  mm e  $Z_5 = 13$  mm há menos picos de disparidades e mais "manchas". Isso pode ser explicado pela falta de foco das câmeras, a partir de  $Z_4$ , ou uma maior quantidade de partículas fantasmas. A Figura 4.16 mostra mais claramente esse efeito no campo de vetor disparidade após a primeira autocalibração onde a disparidade foi maior que 1 *pixel* em  $Z_4$  e  $Z_5$ .



Figura 4.14 – Imagens da câmera 1 em diferentes tempos



**Figura 4.15** – Mapa de disparidade ( $\gamma = 0.23$ ) da câmera 1 através do volume.

O número de partículas fantasmas produzidas pela técnica de reconstrução MART pode ser comparável e, muitas vezes, maior do que o número de partículas reais, e depende principalmente do número de pontos de vista simultâneos, da concentração de partículas e da espessura do volume iluminado. A profundidade do volume de medição afeta a formação de partículas fantasmas em que a interseção da linha de visão (LDV) através do objeto determina a probabilidade de sobreposição das imagens de partículas.



Figura 4.16 - Campo de vetor disparidade da câmera 1 através do volume.

O erro de calibração no volume completo, após a autocalibração, é apresentado na Tabela 4.3. Os coeficientes da função de mapeamento (Equação 3.2) após a autocalibração para a câmera 1 são apresentados na Tabela 4.4.

Os coeficientes da função de mapeamento (Equação 3.2), após a autocalibração, para as câmeras 2, 3 e 4 são apresentados na Tabela A2.1, A2.2 e A2.3, respectivamente. O erro de calibração em todo volume é menor que 0,04 *pixel*.

Plano	Z (mm)	Erro (pixel)						
1 14110		Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4			
1	-3	0,009	0,025	0,009	0,038			
2	1	0,008	0,024	0,01	0,038			
3	5	0,009	0,023	0,011	0,037			
4	9	0,012	0,023	0,014	0,036			
5	13	0,014	0,023	0,015	0,036			

Tabela 4.3 - Erro de calibração das quatro câmeras para os cinco planos após o procedimento de autocalibração \_

Tabela 4.4 - Coeficientes da função de mapeamento da câmera 1 para os planos Z a	após	a
--	------	---

Z [mm]	-3	1	5	9	13
$a_0$	-317,743	316,576	304,104	294,385	305,076
$a_1$	-138,889	135,535	132,360	130,467	123,283
$a_2$	4,755	3,920	4,624	3,585	4,118
<b>a</b> <sub>3</sub>	-0,316	3,062	6,485	9,179	8,221
$a_4$	9,030	1,148	4,531	-3,631	1,097
$a_5$	-0,404	0,001	-0,031	-0,251	-0,451
$a_6$	-0,261	-0,374	-0,377	-0,237	-0,227
$a_7$	8,382	8,588	8,373	8,094	7,779
$a_8$	0,078	-0,092	-0,937	-0,012	-0,191
a9	-0,141	-0,094	-0,247	-0,107	-0,192
$b_0$	-516,840	494,199	461,013	463,354	430,084
$b_1$	-3,822	3,938	2,224	8,942	3,272
$b_2$	0,437	0,222	0,098	0,161	0,439
<b>b</b> <sub>3</sub>	0,243	0,282	0,364	0,271	0,219
$b_4$	115,642	113,273	111,642	109,983	108,483
<b>b</b> <sub>5</sub>	7,422	7,787	7,714	7,266	6,791
$b_6$	-0,162	-0,241	-0,276	-0,047	-0,008
$b_7$	0,837	0,534	0,399	0,180	0,242
$b_8$	0,099	0,132	0,221	0,384	0,456
b9	0,657	-0,016	-0,232	-0,191	-0,275

autocalibração (X'<sub>0</sub> = 303; Y'<sub>0</sub> = 303;  $n_x$ = 607;  $n_y$  = 607)

#### EFEITO DA AUTOCALIBRAÇÃO *4.4*

\_\_\_\_

\_

A comparação da imagem da câmera 1 com a concentração de imagens de partículas por volume de interrogação sem e com o procedimento de autocalibração, no mesmo instante, pode ser vista na Figura 4.17.

A qualidade da reconstrução tomográfica Q em função de vários parâmetros foi investigado por Elsinga *et al.* (2006), em que o fator de qualidade foi definido como a correlação normalizada da distribuição da intensidade exata e reconstruída. Um aumento da concentração de partículas produz uma alta porcentagem de partículas fantasmas e consequentemente a qualidade da reconstrução diminui. A variação de N<sub>RVI</sub> em função do tempo no ponto (0, 0, 0) com e sem o procedimento autocalibração é apresentada na Figura 4.18a-b.



**Figura 4.17** – *Iso-surfaces* da concentração de imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração no mesmo instante da Figura 4.6.



**Figura 4.18-** Concentração de imagem de partícula por volume de interrogação  $N_{RVI}$  (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração, no ponto (0, 0, 0), em função do tempo.



Figura 4.19 – Iso-surfaces da concentração média de imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação (16 voxels) sem o procedimento de autocalibração para as 300 gravações.

Percebe-se o efeito da autocalibração na  $N_{RVI}$  analisando a concentração média de imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação no ponto (0, 0, 0): 8,092 partículas por volume de interrogação sem o pocedimento de autocalibração e 24,815 partículas por volume de interrogação com o procedimento de autocalibração. A distribuição da média de  $N_{RVI}$  sem e com autocalibração é apresentado na Figura 4.19 e Figura 4.13, respectivamente.

Além do erro de calibração (Figura 4.20a), outro parâmetro importante que interfere na qualidade do volume de reconstrução é o número de iterações do algoritmo de reconstrução tomográfica. Simulações feitas por Elsinga *et al.* (2006) demonstraram que 5 iterações, utilizando a MART, é suficiente para a obtenção de uma boa qualidade do volume reconstruído (Figura 4.20b). O número de iterações é importante, pois o procedimento de reconstrução tomográfica exige um grande esforço computacional devido ao processamento de dados.

A Figura 4.21 apresenta um intervalo do volume reconstruído sem e com o procedimento de autocalibração para o instante t = 0,142s. Além de apresentar menos

partículas trianguladas, o volume reconstruído sem o procedimento de autocalibração apresenta algumas manchas em relação ao volume reconstruído com o procedimento de autocalibração. A comparação do volume completo é apresentado na Figura A3.1.



**Figura 4.20 -** Simulações realizada por Elsinga *et al.* (2006) avaliando o efeito do (a) erro de calibração e (b) do número de iterações.



**Figura 4.21** – Comparação entre um intervado do volume reconstruído (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração para o instante t = 0,142s.

O campo de velocidade instantâneo e médio, no plano Z = 0 mm, sem e com o procedimento de autocalibração são apresentados na Figura 4.22 e Figura 4.23, respectivamente. O campo vetorial instantâneo (t = 0,71s) completo para os componentes X, Y e Z sem e com o procedimento de autocalibração é mostrado na Figura 4.24.



Figura 4.22 – Campo de velocidade instantânea (t = 0,71s) no plano Z = 0 mm (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração



**Figura 4.23 -** Campo de velocidade média no plano Z = 0 mm (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração para as 300 gravações.



**Figura 4.24 -** Campo vetorial instantâneo (t = 0,71s) completo (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração.

A Figura 4.25 apresenta a flutuação da velocidade sem e com o procedimento de autocalibração ao longo do raio do *riser* (X= - 40, -20, 0, 20 e 40 mm) para Y = 0 mm (50 cm da entrada do *riser*) e Z = 0 mm. A Figura A3.9 apresenta a flutuação da velocidade com e sem o procedimento de autocalibração para todas as posições analisadas (X= - 40, -20, 0, 20 e 40 mm; Y = - 15, 0, +15 mm; Z = - 2, 0, +2 mm).

A Tabela 4.5 apresenta a velocidade média (no tempo), sem e com o procedimento de autocalibração, ao longo do raio do *riser* (X= -40, -20, 0, 20 e 40 mm) para Y = -15, 0, +15 mm e Z = 0 mm e a Tabela A3.1 e Tabela A3.2 apresenta a velocidade média (no tempo) para Z = -2 mm e Z = + 2 mm, respectivamente.

V	v	sem aut	ocalibrac	ão [m/s]	com aut	ocalibrac	ăo [m/s]	Desvio relativo (%)		
I [mm]		Scill auto	N/		V tom aut	V N		DC3VI	N7	<u> </u>
[mm]	[mm]	VX	VY	$v_Z$	VX	VY	$v_Z$	VX	VY	$v_Z$
	-40	-0,122	-0,225	-0,844	-0,728	3,097	-0,461	83,315	107,252	82,982
	-20	-0,278	0,471	0,195	0,709	2,761	-1,063	139,255	82,924	118,326
-15	0	0,016	-0,632	-0,042	-1,381	1,521	-1,753	101,141	141,519	97,621
	20	-0,509	-0,563	-0,428	0,330	0,711	0,146	254,408	179,270	393,987
	40	0,430	-0,519	-0,379	-1,994	0,335	1,424	121,564	255,080	126,634
	-40	0,052	-0,616	0,250	-1,089	3,446	-1,243	104,759	117,873	120,126
	-20	0,016	0,195	-0,332	-0,393	3,438	0,835	103,995	94,320	139,695
0	0	0,145	0,140	0,339	-0,849	2,902	-0,216	117,115	95,180	256,571
	20	0,340	-0,702	-0,301	-0,126	1,266	-0,062	369,993	155,455	384,571
	40	-0,127	-0,585	0,309	-0,225	-0,409	1,257	43,742	43,034	75,379
	-40	0,841	0,829	-0,287	-0,084	1,889	-0,591	1101,256	56,146	51,361
	-20	0,745	0,999	-0,167	1,127	2,359	0,370	33,854	57,629	144,972
15	0	0,483	0,752	-0,021	-0,744	1,588	-0,166	164,905	52,616	87,209
	20	0,079	0,054	0,065	-0,241	2,195	-0,505	132,665	97,561	112,955
	40	-0,025	0,245	0,480	0,872	-0,507	0,483	102,826	148,261	0,679

**Tabela 4.5 -** Análise da velocidade média, para Z = 0 mm, sem e com o procedimento de autocalibração

Percebe-se a diferença entre as flutuações de velocidade e a velocidade média (no tempo) com e sem o procedimento de autocalibração. Em alguns casos (Tabela 4.5, Tabela A3.1 e Tabela A3.2), o sinal da velocidade média é alterado e, consequentemente, o seu sentido no campo de velocidade com o procedimento de autocalibração. Essa mudança de sentido no campo vetorial pode ser vista na distribuição da velocidade média no plano Z = 0 mm que é apresentado na Figura 4.23.



Figura 4.25 - Flutuação da velocidade, para Y = 0 mm e Z= 0 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.

A distribuição do módulo da velocidade média, sem e com o procedimento de autocalibração, é apresentado na Figura 4.26. O erro de calibração interfere diretamente na qualidade do volume reconstruído e consequentemente no cálculo do deslocamento das imagens de partículas. As imagens de partícula não reconstruída e o aparecimento de manchas no volume reconstruído (Figura 4.21 e Figura A3.1), causadas pelo erro de calibração, produz ruídos (picos falsos de correlação) no cálculo da correlação cruzada que, consequentemente, pode resultar em falsos vetores.



**Figura 4.26** – *Iso-Surfaces* do módulo da velocidade média (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração.

A Figura 4.27 apresenta os possíveis efeitos das manchas e das imagens de partículas reconstruídas falsas na análise da correlação cruzada na interrogação do volume reconstruído sem o procedimento de autocalibração. O número de imagens de partículas reconstruídas correspondentes (Seção 2.3.7), das duas exposições, no volume com o erro de calibração diminue o valor do coeficiente de correlação (altura do pico), Equação 2.17, e aumenta o número de picos secundários (ruídos). O erro na identificação do pico de correlação conduz a vetores falsos. Como foi observado no campo de velocidade média e instantânea, na flutuação da velocidade e na velocidade média, o sentido e a direção do vetor velocidade pode ser diferente do volume reconstruído com e sem o erro de calibração.

A otimização de uma medida PIV é destinada na maximização da detecção do deslocamento do pico de correlação (seta azul na Figura 4.27).



**Figura 4.27 -** Análise da correlação cruzada na interrogação do volume reconstruído sem e com o procedimento de autocalibração.

A confiabilidade na identificação do pico mais alto como o pico de correlação é usualmente caracterizado pela detectabilidade de pico, D<sub>0</sub>, definido como a razão da amplitude do pico mais alto pela amplitude do segundo pico mais alto (COUPLAND e PICKERING, 1988; KEANE e ADRIAN, 1990). A detectabilidade geralmente melhora na proporção que o número de pares de imagens de partícula correspondentes no domínio de interrogação aumenta. A detectabilidade é dificultada pela perda de correspondência das imagens de partículas na primeira e na segunda exposição devido ao movimento para fora do plano das partículas traçadoras e a grandes variações do campo de velocidade (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011). Na Figura 4.27 a detectabilidade de pico para o volume de interrogação com a autocalibração é maior do que para o volume de interrogação sem a

92

autocalibração. No volume sem a autocalibração, o pico mais alto (maior coeficiente de correlação) é orindo de ruídos (picos formados devido às manchas e imagens de partículas reconstruídas falsas) produzindo um vetor velocidade falso.

A Figura 4.28 apresenta o efeito do número de imagens de partículas correspondentes  $N_{IC}$  na correlação cruzada em PIV. A amplitude do pico de correlação é diretamente proporcional ao  $N_{IC}$ , isto é, o pico aumenta fortemente quando o número de imagens de partículas correspondente em um domínio de interrogação (janela de interrogação para PIV 2D e volume de interrogação para PIV Tomográfica) aumenta. O ruído (correlações randômicas) também aumenta na proporção de  $N_{IC}$ . Contudo, quando a correlação é normalizada em relação ao pico mais alto, nota-se que o nível de ruído relativo (definido como o pico de correlação randomica mais alto) diminue com o aumento de  $N_{IC}$  (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).



**Figura 4.28-** Efeito da variação no número de imagens de partículas correspondentes N<sub>IC</sub> (a) no pico de correlação e (b) no pico de correlação normalizado em PIV (Adaptado de Adrian e Westerweel, 2011).

Na presente Dissertação, a concentração de partícula, no volume analisado, não é controlada e não é homogênea. Além da formação de partículas fantasmas e da sobreposição de partículas, as altas concentrações de partículas reconstruídas dificulta na identificação do deslocamento das partículas na análise de correlação cruzada.

As partículas fantasmas podem contibuir significativamente no pico de correlação. A probabilidade de uma partícula fantasma formar um par, a partir da reconstrução dos objetos em tempos subsequentes, é inversamente proporcional às flutuações espaciais no domínio da medição. As simulações feitas por Elsinga *et al.* (2011) mostraram que os erros diminuem com a precisão cada vez maior da reconstrução volumétrica, bem como com o aumento da variação do deslocamento real das partículas (ou do gradiente de deslocamento) ao longo da linha de visão das câmeras. Por isso, é importante verificar a reconstrução e a exatidão da variação de deslocamento ao longo da profundidade do volume em experimentos reais.

A Tabela 4.6 apresenta um resumo dos principais parâmetros para a autocalibração e para a determinação da distribuição da velocidade no *riser* utilizado.

Parâmetro	Configuração	Justificativa
Arranjo das câmeras	Linear	É a melhor opção, tendo como parâmetro o espalhamento da luz das partículas, magnificação da imagem e efeito da luz <i>laser</i> no tubo.
Ângulo de abertura das câmeras ( $\beta$ )	80 graus	As simulações feitas por Scarano (2013) mostram um fator de qualidade do volume reconstruído maior que 0,95 para $60^{\circ} < \beta < 80^{\circ}$ .
Campo de visão	80 x 110 mm <sup>2</sup>	Obter o campo vetorial em todo o raio (direção X´)
Magnificação da Imagem	$M_0 = 0,10$	Obter o campo vetorial em todo o raio (direção X´)
Faixa volumétrica da autocalibração	- 40 a + 40 mm para X e Y e – 5 mm a + 15 mm para Z	Tamanho do volume iluminado
Erro máximo de triangulação permitido	$\varepsilon = 6 \ pixels$	Os picos de disparidade foram encontrados utilizando esse valor.
Divisão do mapa de disparidade	7 x 9 x 5 subvolumes	Com o objetivo que cada subvolume se aproxime de um cubo
Tamanho do volume reconstruído	637 x 682 x 153 voxels	Mantendo a proporção <i>voxel/pixel</i> igual a 1.

Tabela 4.6 – Apresenta um resumo dos principais parâmetros para a autocalibração	e e
determinação da distribuição da velocidade no riser utilizado.	

## **CAPÍTULO 5** Considerações Finais

Este capítulo apresenta um resumo dos principais pontos relevantes e conclusões apresentados ao longo desta Dissertação. Por fim, são expostas algumas ideias para a continuação deste trabalho.

### 5.1. CONCLUSÃO

Foi investigado o efeito da autocalibração volumétrica para PIV Tomográfica na investigação da velocidade da fase particulada na seção *riser* de um leito fluidizado circulante.

Para o sistema de câmeras, foi desenvolvido um suporte que permite o deslocamento das câmeras nos três eixos (X', Y', Z'). Para o sistema *laser*, foi desenvolvida uma estrutura que permite o deslocamento do sistema na direção Y' (altura). Para a obtenção de um volume de luz homogêneo, foi utilizada uma placa com uma fenda localizada a 1,75 metro do sistema *laser*.

Foram utilizadas 300 gravações com uma frequência de 7 Hz para obtenção dos parâmetros da autocalibração. Previamente, foi feito um estudo do melhor arranjo das quatro câmeras investigando o arranjo quadrado e linear, os mais usados em PIV. A configuração linear das câmeras foi a melhor opção para a avaliação do efeito da autocalibração, tendo como parâmetro o espalhamento da luz das partículas, magnificação da imagem e efeito da luz *laser* no tubo. Foi feito um procedimento de pré-processamento para remover a imagem de fundo, igualar a intensidade de luz e para diminuir a detecção de falsos picos de intensidade de luz na reconstrução tomográfica, que são referidos como partículas fantasmas. Foram obtidos parâmetros essenciais (Tabela 3.2 e Tabela 3.3) para a aquisição e processamento das imagens de partículas e determinação do campo vetorial.

Utilizou-se o método de Wieneke (2008), que é baseado na detecção de imagens de partículas 2D e na triangulação da posição 3D das imagens de partículas no espaço. O volume de controle analisado ( $80 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$ ) se encontra a 50 cm da entrada do *riser*. Todos os parâmetros foram analisados em uma faixa volumétrica de -40 mm a + 40 mm para X e Y e – 5 mm a + 15 mm para Z. O erro de triangulação permitido é de 6 *pixels*. O mapa de disparidade foi divido em 7 x 9 x 5 subvolumes. Os picos de disparidade de maior intensidade encontrados na região superior esquerda dos mapas de disparidade podem ser explicados pela distribuição não homogênea da média da concentração da imagem de partícula reconstruída por voxel para as 300 gravações.

Os erros de calibração no volume ficaram entre 0,670 e 1,121 *pixel* e depois da autocalibração ficaram abaixo de 0,04 *pixel*. Como a imagem gravada é a mesma, fez-se a

comparação da distribuição da imagem de partícula por volume de interrogação e do campo vetorial com e sem a autocalibração. Foi analisado também o campo de velocidade instatânea (t = 71 s), campo de velocidade média (no tempo) no plano Z =0, flutuação da velocidade ao longo do raio do riser (X = -40, -20, 0, 20 e 40 mm) para Y = -15, 0, +15 mm e Z = -2, 0 e +2 mm

Percebe-se claramente o efeito da autocalibração na  $N_{RVI}$  (concentração de imagem de partícula reconstruida por volume de interrogação) pela análise da concentração média de imagem de partícula reconstruída por volume de interrogação no ponto (0, 0, 0): 8,092 partículas por volume de interrogação sem o pocedimento de autocalibração e 24,815 partículas por volume de interrogação com o procedimento de autocalibração.

É notoria a diferença entre as flutuações de velocidade e a velocidade média, com e sem autocalibração. Em alguns casos (Tabela 4.5, Tabela A3.1 e Tabela A3.2), o sinal da velocidade média é alterado e, consequentemente, o seu sentido no campo de velocidade com o procedimento de autocalibração. Essa mudança de sentido no campo vetorial pode ser vista na distribuição da velocidade média no plano Z = 0 mm que é apresentado na Figura 2.22.

Este erro de calibração e, consequentemente, o desalinhamento das câmaras pode ser explicado pela instabilidade mecânica dos suportes das câmaras e pelas vibrações do equipamento (leito fluidizado circulante) em operação. O erro de calibração interfere diretamente na qualidade do volume reconstruído e consequentemente no cálculo do deslocamento das imagens de partículas e o procedimento de autocalibração se torna necessário.

#### 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tornam-se necessárias algumas investigações a fim de se obter o erro, e não o efeito, dos parâmetros da técnica PIV Tomográfica e, consequentemente, determinar campos vetoriais mais confiáveis.

São listadas abaixo algumas sugestões para a continuidade desse trabalho:

• Avaliação experimental do número de iterações do algoritmo de reconstrução para a otimização do tempo computacional e a qualidade do volume reconstruído.
- Um estudo mais detalhado das estratégias de interrogação para a obtenção de um campo vetorial confiável.
- Avaliação experimental do erro total do campo vetorial utilizando a técnica *Stereo*-PIV (2 pares de câmeras) e PIV Tomográfica (4 câmeras) utilizando a configuração apresentada na Figura 5.1. Esse método foi aplicado por Elsinga *et al.* (2006).
- Desenvolvimento de um sistema óptico (Figura 5.2) evitando que a luz *laser* entre em contato com a parede do *riser*.
- Avaliação dos parâmetros de escoamento da fase particulada utilizando PIV 4D (*Time-Resolved Tomographic PIV* (SCHRÖDER *et al.*, 2006)).



Figura 5.1 – Arranjo experimental para a avaliação do erro do campo de velocidade usando dois sistemas Stereo-PIV e um PIV Tomográfica.



Figura 5.2 - Sugestão para o sistema de iluminação no riser

ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. **Particle Image Velocimetry.** New York: Cambridge University Press, p. 584. 2011.

ADRIAN, R. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. Annual review of fluid mechanics, v. 23, p. 261-304, 1991.

AMARAL, R. L.; CASTILHO, G. J.; CREMASCO, M. A. Efeito da resolução de interrogação na velocimetria por imagem de partícula do tipo tomográfica na investigação do campo de velocidade da fase particulada na seção de um *riser*. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2012).** Búzios - RJ. 2012b

AMARAL, R. L.; CASTILHO, G. J.; CREMASCO, M. A. Experimental Investigation of 3D Velocity by Tomographic Particle Image Velocimetry (Tomo-PIV) in a Short Riser Section. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 748-754, jan. 2012a.

ARENA, U.; CAMMAROTA, A.; MARZOCCHELLA, A.; MASSIMILLA, L. Solids flow structures in a two-dimensional riser of a circulating fluidized bed. **Journal of chemical engineering**, p. 236-241, 1989.

ATKINSON, C.; COUDERT, S.; FOUCAUT, J. The accuracy of tomographic particle image velocimetry for measurements of a turbulent boundary layer. **Experiments in Fluids**, v. 50, p. 1031-1056, 2011.

ATKINSON, C.; SORIA, J. Algebraic reconstruction techniques for tomographic particle image velocimetry. **16th Australasian Fluid Mechanics Conference**, p. 191-198, 2007.

ATKINSON, C.; SORIA, J. An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 47, n. 4-5, p. 553-568, 2009.

BADER, R.; FINDLEY, J.; KNOWLTON, T. M. Gas/solids flow patterns in a 30.5-eradiameter circulating fluidized bed. **Circulating Fluidized Bed Technology**, p. 123-137, 1988.

BETIOLI, M. L. P. Estudo experimental da distribuição de pressão estática no escoamento gás-sólido em um leito recirculante. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2007.

BHUSARAPU, S; AL-DAHHAN, M. H.; DUDUKOVIĆ M. P. Solids flow mapping in a gas-solid riser: Mean holdup and velocity fields Powder Technology. v.163, 98–123, 2006.

BRÜCKER, C. Digital-Particle-Image-Velocimetry (DPIV) in a scanning light-sheet: 30 starting flow around a short cylinder. **Experiments in Fluids**, v. 19, p. 255-263, 1995.

BRÜCKER, C. Study of the three-dimensional flow in a T-junction using a dual-scanning method for three-dimensional scanning-particle-image velocimetry (3-D SPIV). **Experimental thermal and fluid science**, v. 1777, n. 96, p. 35-44, 1997.

BRÜCKER, C.; ALTHAUS, W. Study of vortex breakdown by particle tracking velocimetry (PTV). **Experiments in fluids,** v. 349, p. 339-349, 1992.

BUCHMANN, N. A.; ATKINSON, C.; JEREMY, M. C.; SORIA, J. •Tomographic particle image velocimetry investigation of the flow in a modeled human carotid artery bifurcation. **Experiments in fluids**, v. 50, p. 1131-1151, 2011.

CAMPILHO, A. Instrumentação Eletrônica. Métodos e Técnicas de Medição. Marca-Artes Gráficas, Porto, 2010.

CENTEN, P. CCD imaging: concepts for low noise and high bandwidth. Technische Universiteit Eindhoven, 1999.

COUPLAND, J. M e PICKERING, C. J. D. Particle image velocimetry: Estimation of measurement confidence at low seeding densities. **Opt. Lasers Eng.** v. 9, p 201-210, 1988.

DALSA. CCD Technology Primer, DALSA Corporation, Ontário, Canada, 1998.

DEGALEESAN, S. Fluid dynamic measurements and modeling of liquid mixing in bubble columns, D.Sc. Thesis, Washington University, Saint Louis, Missouri, 1997

DEVANATHAN, N.; MOSLEMIAN, D.; DUDUKOVIC, M. P. Flow mapping in bubble coulmns using CARPT, **Chem. Eng. Sci.** 45–48, 2282–2291, 1990.

ELSINGA, G. E.; ADRIAN, R. J.; VAN OUDHEUSDEN, B.W.; SCARANO, F. **Tomographic-PIV investigation of a high Reynolds number turbulent boundary layer**. 7th Int. Symp. PIV (Rome, Italy). 2007b

ELSINGA, G. E.; KUIK, D. J.; VAN OUDHEUSDEN, B. W.; SCARANO, F. **Investigation of the three-dimensional coherent structures in a turbulent boundary layer** 45th AIAA Aerospace Science Meeting (Reno, NV, USA). 2007a

ELSINGA, G. E.; SCARANO, F.; WIENEKE, B.; VAN OUDHEUSDEN Tomographic particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 41, n. 6, p. 933-947, 11 out. 2006a.

ELSINGA, G. E.; SCARANO, F.; WIENEKE, B.; VAN OUDHEUSDEN. Assessment of **Tomo-PIV for three-dimensional flows.** 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry. California. 2005b

ELSINGA, G. E.; SCARANO, F.; WIENEKE, B.; VAN OUDHEUSDEN. **Tomographic particle image velocimetry.** 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry. California. 2005a

ELSINGA, G. E.; VAN OUDHEUSDEN, B. W.; SCARANO, F. **Experimental** assessment of tomographic-PIV accuracy. 13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon. 2006b

ELSINGA, G. Tomographic particle image velocimetry and its application to turbulent boundary layers. Thesis. University of Technology Delft, 2008.

ELSINGA, G.; WESTERWEEL, J.; SCARANO, F.; NOVARA, M. On the velocity of ghost particles and the bias errors in Tomographic-PIV. **Experiments in fluids**, v. 50, p. 825-838, 2011.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. Processamento de imagens digitais. Blucher, 2000.

GRYCZKA, O. HEINRICH, S.; MITEVA, V.; DEEN, N.G.; KUIPERS, J.A.M.; JACOB, M.; MÖRL, L. Characterization of the pneumatic behavior of a novel spouted bed apparatus with two adjustable gas inlets. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 3, p. 791-814, 2008.

HARTGE, E. U.; LI, Y.; WERTHER, J. Analysis of the local structure of the two phase flow in a fast fluidized bed. **Circulating Fluidized Bed Technology**, p. 153-160, 1986.

HARTLEY, R.; STURM, P. Triangulation. Computer vision and image understanding, p. 957-966, 1997.

HE, Y. DEEN, N. G.; ANNALAND, M. VAN SINT; KUIPERS, J. A. M.Gas–Solid Turbulent Flow in a Circulating Fluidized Bed Riser: Experimental and Numerical Study of Monodisperse Particle Systems. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 17, p. 8091-8097, 2009.

HERMAN, G.; LENT, A. Iterative reconstruction algorithms. Computers in biology and medicine, v. 6, n. 3, p. 273-294, 1976.

HERRMANN, S. F.; HINSCH, K. D. Light-in-flight holographic particle image velocimetry for wind-tunnel applications. **Measurement Science and Technology**, v. 15, n. 4, p. 613-621, 2004.

HORI, T.; SAKAKIBARA, J. High-speed scanning stereoscopic PIV for 3D vorticity measurement in liquids. **Measurement Science and Technology**, v. 15, n. 6, p. 1067-1078, 2004.

HORIO, M.; Morishita, K. Tachibana, O.; Murata, N.. Solid distribution and movement in circulating fluidized beds. Circulating fluidized Beds Technology II, p. 147-154, 1988.

HUMBLE, R. Unsteady flow organization of a shock wave/boundary layer interaction. Thesis. Delft University of Technology, 2009.

ISHII, H.; MURAKAMI, I. Evaluation of the scaling law of circulating fluidized beds in regards to cluster behaviors. In Circulating Fluidized Bed Technology III, p. 125-130, 1990.

KEANE, R.; ADRIAN, R. Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems. **Measurement Science and Technology**, v. 1, p. 1202-1215, 1990.

KEANE, R.; ADRIAN, R. Optimization of particle image velocimeters: II. Multiple pulsed systems. **Measurement science and technology**, v. 2, p. 963-974, 1991.

KEANE, R.; ADRIAN, R. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. Applied scientific research, v. 49, n. 3, p. 191-215, 1992.

KODAK. Kodak ccd primer - charge-coupled device (ccd) image sensors. New York p. 1-13

KOECHNER, W.; BASS, M. Solid-State Lasers: A Graduate Text. 2010

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. Fluidization Engineering. New York: Wiley, 1991.

LARACHI, F.; KENNEDY, G.; CHAOUKI, J. A  $\gamma$ -ray detection system for 3-D particle tracking in multiphase reactors, **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.** 338 (2–3) 568–576, 1994.

LAVISION. Product-Manual: Imaging Tools. Göttingen. 2010.

MAAS, H.; GRUEN, A.; PAPANTONIOU, D. Particle tracking velocimetry in threedimensional flows. **Experiments in Fluids,** v. 15, p. 133-164, 1993.

MARQUES, O. **Practical image and video processing using MATLAB**. New Jersey: JohnWiley & Sons, 2011.

MICHAEL, Y.; YANG, K. Recent developments in axial tomography for heat transfer and fluid flow studies. **Experimental thermal and fluid science**, v. 4, p. 637-647, 1991.

MORGAN, B. Elements of simulation. London: Chapman & Hall, 1984.

MORONI, M.; CUSHMAN, J. H.; CENEDESE, A. A 3D-PTV two-projection study of pre-asymptotic dispersion in porous media which are heterogeneous on the bench scale. **International Journal of Engineering Science**, v. 41, n. 3-5, p. 337-370, 2003.

MOSLEMIAN, D. Study of solids motion, mixing and heat transfer in gas-fluidized beds, Ph. D Thesis, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, Illinois, 1987.

NOVARA, M.; BATENBURG, K. J.; SCARANO, F. Motion tracking-enhanced MART for PIV Tomográfica. **Measurement science and technology**, v. 21, 2010.

NOWAK, W.; MINEO, H.; YAMAZAKI, R.; YOSHIDA, K. Behavior of particles in a circulating fluidized bed of a mixture of two different sized particles. In Circulating Fluidized Bed Technology III, p. 219-224, 1990.

PRASAD, A. Particle image velocimetry - **Review article. Current Science,** v. 79, p. 51-60, 2000.

PU, Y.; MENG, H. An advanced off-axis holographic particle image velocimetry (HPIV) system. Experiments in Fluids, v. 29, n. 2, p. 184-197, 7 ago. 2000.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide.** Second Edi ed. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007.

RHODES, M. J.; MINEO, H.; HIRAMA, T. **Particle motion at the wall of 305 mm diameter riser of a cold model circulation fluidized beds.** In Circulating Fluidized Bed Technology III, p. 171-176, 1990.

RHODES, M.; GELDART, D. A model for the circulating fluidized bed. **Powder** technology, v. 53, p. 155-162, 1987.

RHODES, M.; LAUSSMANN, P. Characterising non-uniformities in gas-particle flow in the riser of a circulating fluidized bed. **Powder technology**, v. 72, p. 277-284, 1992.

RHODES, M.; MINEO, H.; HIRAMA, T. Particle motion at the wall of a circulating fluidized bed. **Powder technology**, v. 70, p. 207-214, 1992.

SCARANO, F. Iterative image deformation methods in PIV. Measurement Science and Technology, v. 13, 2002.

SCARANO, F. PIV Tomográfica: principles and practice. Measurement Science and Technology, v. 24, n. 1, p. 012001, 2013.

SCHIMPF, A.; KALLWEIT, S.; RICHON, J. Photogrammetric particle image velocimetry. 5th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry, Japan. 2003.

SCHRÖDER, A.; Geisler, R.; Elsinga, G. E.; Scarano, F.; Dierksheide, U. Investigation of a turbulent spot and a tripped turbulent boundary layer flow using time-resolved PIV Tomográfica. **Experiments in Fluids**, v. 44, p. 305-316, 2008.

SCHRÖDER, A. Geisler, R.; Elsinga, G. E.; Scarano, F.; Dierksheide, U. **Investigation of a turbulent spot using time-resolved PIV Tomográfica.** 13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. 2006

SHI, H. Experimental research of flow structure in a gas-solid circulating fluidized bed riser by PIV. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, v. 19, n. 6, p. 712-719, 2007.

SOLOFF, S.; ADRIAN, R.; LIU, Z. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology,** v. 8, p. 1441-1454, 1997.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

SVIZHER, A.; COHEN, J. Holographic particle image velocimetry system for measurements of hairpin vortices in air channel flow. **Experiments in Fluids**, v. 40, n. 5, p. 708-722, 2006.

TAYLOR, S. **CCD and CMOS imaging array technologies: technology review**. Relatório técnico EPC-1998-106, Cambridge, 1998.

VIRANT, M.; DRACOS, T. 3D PTV and its application on Lagrangian motion. **Measurement science and technology**, v. 8, p. 1539–1552, 1999.

WESTERWEEL, J.; SCARANO, F. Universal outlier detection for PIV data. **Experiments** in Fluids, v. 39, n. 6, p. 1096-1100, 2005.

WIENEKE, B. Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, v. 45, n. 4, p. 549-556, 2008.

WILLERT, C. Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows. **Measurement science and technology**, v. 8, p. 1465-1479, 1997.

YANG, Y.; JIN, Y.; YU, Z.-Q.; WANG, Z., Sectional averaged particle velocity profile in low-density circulating fluidized beds. **Chemical Reaction Engineering Technology**, p. 30-35, 1990.

YIANNESKIS, M. Velocity, particle sizing concentration measurement techniques for multi-phase flow. **Powder technology**, v. 49, p. 261-269, 1987.

ZHENG, Z.; ZHU, J.; GRACE, J. R.; LIRA, C. J.; BRERETON, C. H. **Particle motion in circulating fluidized beds via microcomputer-controlled colour-stroboscopic photo-graphy**. In Fluidization VII, p. 781-789, 1992.

ZHOU, J.; GRACE, J. R.; LIM, C. J.; BRERETON, C. M. H. Particle velocity profiles in a circulating fluidized bed riser of square cross-section. **Chemical engineering science**, v. 50, n. 2, 1995.

# APÊNDICE

## A1 CALIBRAÇÃO

Z [mm]	-15	-10	-5	0	5	10	15
$a_0$	1377,410	1346,160	1327,750	1324,400	1338,820	1348,800	1329,210
$a_1$	-129,597	-127,244	-126,501	-121,144	-116,388	-115,084	-100,531
$a_2$	13,468	4,604	8,023	6,765	7,473	6,172	7,857
a <sub>3</sub>	-27,833	-19,176	-1,994	5,269	13,459	18,622	11,818
$a_4$	-18,419	-10,755	-0,883	-22,794	-15,132	-29,500	-13,992
$a_5$	-1,115	-0,349	-0,911	-1,234	-0,679	-2,432	-1,482
$a_6$	-0,912	-0,670	-0,134	-0,945	-0,816	-0,025	-0,124
$a_7$	-28,492	-29,597	-29,697	-27,978	-27,511	-27,688	-27,200
$a_8$	-0,704	0,265	0,386	0,495	-1,510	0,771	-2,036
a9	-1,622	-1,452	-1,849	-1,350	-1,816	-1,148	-1,392
$b_0$	57,689	42,583	4,979	-22,397	-38,719	-85,435	-91,725
$b_1$	11,690	5,959	-5,625	10,036	2,679	14,918	8,634
$b_2$	-2,084	-1,528	-2,576	-2,249	-2,594	-1,374	-2,502
<b>b</b> <sub>3</sub>	-0,882	-0,526	0,626	-2,377	0,150	-1,983	-1,616
$b_4$	-19,301	-18,719	-16,584	-14,622	-12,739	-11,525	-7,952
$b_5$	-29,035	-31,098	-29,460	-29,835	-28,685	-30,183	-27,701
$b_6$	-2,269	-1,896	-1,703	-2,739	-2,571	-2,618	-2,703
$b_7$	2,653	1,085	1,341	1,786	3,134	2,496	0,985
$b_8$	0,580	0,591	0,959	0,539	1,847	0,414	1,112
b9	-0,010	-0,262	-0,157	0,737	0,896	0,472	0,681

**Tabela A1.1**– Coeficientes da função de mapeamento da câmera 2 para os planos Z de calibração ( $X'_0 = 1930,26$ ;  $Y'_0 = 768,576$ ;  $n_x = 747,69$ ;  $n_y = 996,92$ )

						•	
Z [mm]	-15	-10	-5	0	5	10	15
$a_0$	1393,600	1363,160	1348,430	1345,930	1360,420	1372,070	1352,360
$a_1$	-122,462	-120,831	-119,760	-115,749	-112,514	-110,099	-98,555
$a_2$	13,249	4,705	9,565	6,944	7,797	5,594	8,026
a <sub>3</sub>	-27,054	-18,264	-1,745	5,427	12,935	18,273	12,408
$a_4$	4,644	15,614	27,025	5,540	11,620	-3,792	13,322
$a_5$	-0,350	-0,597	-2,445	-0,310	-0,524	-0,707	-1,596
$a_6$	-0,861	-0,625	-0,024	-1,143	-1,331	-0,780	-0,488
$a_7$	28,980	27,829	26,586	27,374	26,696	25,858	25,296
$a_8$	-0,395	0,742	0,668	0,823	-1,880	0,746	-1,865
a9	-1,754	-1,324	-1,650	-1,411	-1,936	-1,554	-1,504
$\mathbf{b}_0$	-79,209	-49,937	-12,258	23,361	73,382	88,304	150,911
$\mathbf{b}_1$	4,374	0,726	-4,494	7,151	7,102	13,235	-0,564
$b_2$	1,277	2,108	3,165	2,572	1,991	1,483	2,212
<b>b</b> <sub>3</sub>	1,433	-0,808	1,452	1,511	0,702	1,030	0,817
$b_4$	-24,489	-24,154	-25,420	-22,994	-22,592	-22,470	-23,545
$b_5$	28,023	30,442	26,658	28,673	28,162	27,214	25,416
$b_6$	-1,927	-1,995	-1,058	-2,395	-3,547	-2,632	-2,755
$b_7$	-0,125	1,700	1,443	0,857	-0,431	-0,298	1,332
$b_8$	1,036	1,347	0,994	1,230	0,370	1,246	-0,162
b9	0,148	0,352	-0,107	-0,039	-0,984	-0,309	-0,787

**Tabela A1.2** – Coeficientes da função de mapeamento da câmera 3 para os planos Z de calibração ( $X'_0 = 1930,26$ ;  $Y'_0 = 768,576$ ;  $n_x = 747,69$ ;  $n_y = 996,92$ )

Z [mm]	-15	-10	-5	0	5	10	15			
$a_0$	1341,870	1307,080	1290,970	1288,770	1306,270	1320,420	1298,680			
$a_1$	-202,236	-198,861	-197,226	-191,372	-184,940	-183,210	-166,647			
$a_2$	14,876	4,817	8,838	7,080	7,943	6,180	7,298			
a <sub>3</sub>	-32,245	-23,509	-2,855	5,059	13,321	19,868	14,141			
$a_4$	9,002	18,419	29,943	4,737	13,083	-3,656	14,200			
$a_5$	0,322	1,132	0,191	0,387	0,717	-1,019	-0,464			
$a_6$	-1,108	-0,918	-0,311	-1,001	-0,954	-0,128	-0,328			
a <sub>7</sub>	-20,251	-21,404	-21,701	-19,902	-19,760	-20,024	-19,774			
$a_8$	-0,082	0,970	0,719	0,737	-2,116	0,878	-1,560			
a9	-0,240	0,045	-0,389	0,149	-0,344	0,184	-0,340			
$b_0$	17,630	12,908	-9,160	-22,142	-17,870	-57,088	-39,912			
$b_1$	-11,047	-18,058	-31,252	-11,039	-18,169	-3,637	-14,441			
$b_2$	0,187	0,495	0,209	0,123	-0,394	0,448	-0,293			
<b>b</b> <sub>3</sub>	-1,801	-1,437	-0,465	-1,447	1,147	-1,027	0,959			
$b_4$	-224,988	-221,274	-215,569	-210,547	-204,616	-201,788	-193,966			
$b_5$	-26,266	-27,147	-26,891	-26,062	-24,945	-26,365	-24,652			
$b_6$	-1,421	-0,736	-0,091	-1,023	-0,741	0,226	0,192			
$b_7$	1,839	0,725	0,928	1,494	2,567	2,106	0,414			
$b_8$	0,555	0,635	1,047	0,637	1,405	0,405	0,770			
<b>b</b> 9	-0,162	-0,071	-0,072	0,513	0,462	0,326	0,719			

**Tabela A1.3**– Coeficientes da função de mapeamento da câmera 4 para os planos Z de calibração ( $X'_0 = 1930,26$ ;  $Y'_0 = 768,576$ ;  $n_x = 747,69$ ;  $n_y = 996,92$ ).

autocalibração (X' <sub>0</sub> = 303; Y' <sub>0</sub> = 303; $n_x$ = 607; $n_y$ = 607).									
Z [mm]	-3	1	5	9	13				
$a_0$	301,999	301,183	289,754	281,900	291,721				
$a_1$	100,777	-97,418	-94,373	-93,574	-86,298				
$a_2$	5,015	4,644	5,070	4,437	4,952				
<b>a</b> <sub>3</sub>	0,429	3,660	7,205	9,453	7,840				
$a_4$	-5,904	-12,912	-9,047	-15,897	-11,893				
$a_5$	-0,264	-0,286	-0,099	-0,585	-0,482				
$a_6$	-0,075	-0,232	-0,310	-0,270	-0,304				
$a_7$	-14,491	-13,925	-13,738	-13,822	-13,713				
$a_8$	-0,214	-0,338	-0,968	-0,231	-0,725				
a9	-0,357	-0,299	-0,418	-0,258	-0,261				
$b_0$	470,074	489,773	502,859	540,249	553,378				
$b_1$	0,565	6,995	2,210	10,156	9,081				
$b_2$	-1,760	-1,689	-1,887	-1,261	-1,553				
<b>b</b> <sub>3</sub>	-0,676	-0,976	0,084	-0,856	-0,983				
$b_4$	-9,806	-8,845	-7,912	-7,326	-5,882				
$b_5$	-11,077	-11,107	-10,818	-11,307	-10,887				
$b_6$	-0,646	-0,772	-0,720	-0,696	-0,688				
$b_7$	0,825	1,086	1,604	1,328	0,801				
$b_8$	0,437	0,422	0,801	0,293	0,318				
<b>b</b> 9	-0,301	-0,104	-0,010	-0,045	0,009				

**Tabela A2.1**– Coeficientes da função de mapeamento da câmera 2 para os planos Z após a

autocan	autocalibração ( $\Lambda_0 = 505$ , $\Gamma_0 = 505$ , $\Pi_x = 007$ , $\Pi_y = 007$ ).									
Z [mm]	-3	1	5	9	13					
$a_0$	282,001	280,687	269,226	260,027	269,570					
$a_1$	-96,038	-93,556	-91,435	-89,834	-83,792					
$a_2$	5,752	4,857	5,373	4,301	5,022					
<b>a</b> <sub>3</sub>	0,842	3,940	7,126	9,363	8,016					
$a_4$	11,570	4,414	7,277	-0,341	3,971					
$a_5$	-0,630	-0,126	-0,096	-0,045	-0,196					
$a_6$	-0,319	-0,417	-0,373	-0,174	-0,048					
$a_7$	13,368	13,526	13,246	12,909	12,657					
$a_8$	0,277	0,104	-0,774	0,030	-0,723					
a9	-0,540	-0,474	-0,484	-0,257	-0,144					
$b_0$	462,571	430,197	390,180	378,223	337,664					
$b_1$	0,213	5,894	5,917	9,985	4,317					
$b_2$	1,847	1,535	1,219	0,933	1,139					
<b>b</b> <sub>3</sub>	0,762	0,685	0,303	0,388	0,316					
$b_4$	-14,699	-13,753	-13,548	-13,495	-13,883					
$b_5$	10,346	10,733	10,539	10,215	9,721					
$b_6$	-0,251	-0,507	-0,757	-0,631	-0,626					
<b>b</b> <sub>7</sub>	1,107	0,827	0,337	0,388	0,873					
$b_8$	0,412	0,440	0,249	0,628	0,417					
<b>b</b> 9	0,072	-0,068	-0,318	-0,271	-0,383					

**Tabela A2.2** - Coeficientes da função de mapeamento da câmera 3 para os planos Z após a autocalibração ( $X'_0 = 303$ ;  $Y'_0 = 303$ ;  $n_x = 607$ ;  $n_y = 607$ ).

$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3 ,288 ,281 273
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	,288 ,281 273
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	,281 273 044
$a_2$ 5.240 4.627 5.028 4.072 4.2	273 044
	)44
a <sub>3</sub> 0,139 3,585 7,173 10,042 8,9	777
a <sub>4</sub> 12,083 3,862 7,876 -0,032 4,1	42
$a_5$ 0,001 0,042 0,088 -0,483 -0,	521
$a_6$ -0,074 -0,180 -0,193 -0,060 -0,	056
$a_7$ -10,437 -9,911 -0,982 -9,792 -9,	630
$a_8$ 0,021 -0,209 -1,116 -0,124 -0,	445
a <sub>9</sub> 0,088 0,218 0,210 0,435 0,4	18
b <sub>0</sub> 481,771 488,742 485,384 516,775 514	,321
$b_1$ -19,317 -10,491 -14,846 -5,108 -7,	842
$b_2$ -0,068 -0,208 -0,523 -0,090 -0,	262
$b_3$ -0,262 -0,344 0,677 -0,351 -0,	618
b <sub>4</sub> 131,364 128,782 125,799 124,271 120	,964
b <sub>5</sub> -10,038 -9,784 -9,485 -9,947 -9,	697
$b_6$ 0,944 0,799 0,767 0,827 0,7	/91
b <sub>7</sub> 0,427 0,605 0,898 0,642 0,0	)79
$b_8$ 0,782 0,724 0,927 0,557 0,5	536
b <sub>9</sub> 0,464 0,455 0,207 -0,097 -0,	193

**Tabela A2.3**- Coeficientes da função de mapeamento da câmera 4 para os planos Z após a<br/>autocalibração (X' $_0$  = 303; Y' $_0$  = 303; nx = 607; ny = 607).

### A3 EFEITO DA AUTOCALIBRAÇÃO



Figura A3.1 - Comparação entre do volume completo reconstruído (a) sem e (b) com o procedimento de autocalibração para o instante

t = 0,142s.



Figura A3.2 -Flutuação da velocidade, para Y = 0 mm e Z = + 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.



Figura A3.3 - Flutuação da velocidade, para Y = 0 mm e Z = -2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.



Figura A3.4 - Flutuação da velocidade, para Y = -15 mm e Z = 0 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.



Figura A3.5 - Flutuação da velocidade, para Y = -15 mm e Z = 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.



Figura A3.6 -Flutuação da velocidade, para Y = -15 mm e Z = -2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.



Figura A3.7 - Flutuação da velocidade, para Y = 15 mm e Z= 0 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.



Figura A3.8 - Flutuação da velocidade, para Y = 15 mm e Z = 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.

Apêndice



Figura A3.9 - Flutuação da velocidade, para Y = 15 mm e Z= - 2 mm, sem e com a autocalibração para as componentes (a) X, (b) Y e (c) Z.

Y	Х	Sem	autocalibra	ção	Cor	n autocalibi	ração	Des	vio relativo	(%)
[mm]	[mm]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]	Dx	Dy	Dz
	-40	-0,135	-0,216	-0,460	-0,715	3,096	-0,849	81,102	106,990	45,882
-15	-20	-0,293	0,495	0,168	0,737	2,726	-1,060	139,735	81,845	115,892
	-10	0,003	-0,631	-0,002	-1,406	1,513	-1,751	100,183	141,737	99,865
-15	0	-0,494	-0,576	-0,456	0,375	0,786	0,157	231,751	173,316	390,284
	10	-0,176	-0,558	-0,385	-2,008	0,433	1,477	91,240	228,686	126,061
	20	0,079	-0,592	0,236	-1,185	3,439	-1,281	106,692	117,221	118,406
	40	-0,036	0,170	-0,329	-0,428	3,446	0,815	91,594	95,074	140,368
	-40	0,092	0,162	0,301	-0,818	2,846	-0,146	111,227	94,317	306,364
	-20	0,251	-0,827	-0,259	-0,099	1,202	-0,080	354,418	168,816	223,837
	-10	0,410	-0,559	0,402	-0,238	-0,351	1,297	272,056	59,250	68,995
0	0	0,901	0,738	-0,338	-0,130	1,928	-0,556	793,393	61,757	39,273
	10	0,732	0,988	-0,493	1,042	2,402	0,384	29,766	58,869	228,339
	20	0,510	0,799	-0,069	-0,834	1,591	-0,196	161,171	49,785	64,893
	40	0,120	0,073	0,093	-0,247	2,147	-0,504	148,664	96,589	118,504
	-40	-0,493	-0,584	-0,458	0,384	0,772	0,151	228,339	175,706	404,153
	-20	-0,135	-0,216	-0,460	-0,715	3,096	-0,849	81,102	106,990	45,882
	-10	-0,293	0,495	0,168	0,737	2,726	-1,060	139,735	81,845	115,892
+15	0	0,003	-0,631	-0,002	-1,406	1,513	-1,751	100,183	141,737	99,865
	10	-0,494	-0,576	-0,456	0,375	0,786	0,157	231,751	173,316	390,284
	20	-0,176	-0,558	-0,385	-2,008	0,433	1,477	91,240	228,686	126,061
	40	0,079	-0,592	0,236	-1,185	3,439	-1,281	106,692	117,221	118,406

**Tabela A3.1 -** Análise da velocidade média, para Z = -2 mm, sem e com o procedimento de autocalibração

Y	Х	Sem	autocalibra	ção	Cor	n autocalibi	ração	Des	vio relativo	o (%)
[mm]	[mm]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]	Dx	Dy	Dz
	-40	-0,172	-0,191	-0,441	-0,635	3,016	-0,833	72,850	106,341	47,047
15	-20	-0,294	0,542	0,171	0,727	2,709	0,483	140,460	80,005	64,710
	-10	0,031	-0,615	-0,029	-1,388	1,467	-1,766	102,223	141,932	98,348
-15	0	-0,497	-0,581	-0,457	0,359	0,788	0,135	238,422	173,693	438,851
	10	-0,141	-0,548	-0,382	1,311	-0,358	1,311	110,789	53,203	129,152
	20	0,048	-0,618	0,246	-1,124	3,474	-1,266	104,290	117,784	119,446
	40	-0,001	0,218	-0,284	-0,422	3,445	0,896	99,746	93,686	131,675
0	-40	0,096	0,153	0,321	-0,809	2,854	-0,139	111,822	94,634	331,512
	-20	0,259	-0,785	-0,236	-0,099	1,223	-0,125	360,377	164,195	88,372
	-10	0,423	-0,558	0,400	-1,999	0,410	1,440	121,175	236,238	72,200
	0	0,902	0,743	-0,334	-0,141	1,909	-0,566	740,546	61,059	40,998
	10	0,736	1,026	-0,174	1,027	2,421	0,483	28,346	57,602	136,110
	20	0,503	0,813	-0,087	-0,808	1,599	-0,238	162,187	49,165	63,613
	40	0,130	0,081	0,094	-0,235	2,150	-0,505	155,417	96,247	118,533
	-40	-0,037	0,254	0,479	0,881	-0,542	0,488	104,171	146,794	1,994
	-20	-0,172	-0,191	-0,441	-0,635	3,016	-0,833	72,850	106,341	47,047
	-10	-0,294	0,542	0,171	0,727	2,709	0,483	140,460	80,005	64,710
+15	0	0,031	-0,615	-0,029	-1,388	1,467	-1,766	102,223	141,932	98,348
	10	-0,497	-0,581	-0,457	0,359	0,788	0,135	238,422	173,693	438,851
	20	-0,141	-0,548	-0,382	1,311	-0,358	1,311	110,789	53,203	129,152
	40	0,048	-0,618	0,246	-1,124	3,474	-1,266	104,290	117,784	119,446

**Tabela A3.2** - Análise da velocidade média, para Z = +2 mm, sem e com o procedimento de autocalibração

#### A4 SEGURANÇA NA UTIULIZAÇÃO DO LASER E DAS CÂMERAS EM PIV

#### A4.1 – Segurança no uso do Laser

Se um *laser* está integrado no sistema PIV, é importante que cada pessoa que trabalha com ele conheça todas as precauções de segurança contidas no manual. Os *lasers* utilizado nesse trabalho, Nd:YAG (200 mJ), são da classe 4. Eles são capazes de emitir níveis de radiações visíveis e invisíveis que podem causar danos para os olhos e pele. É necessário o uso de óculos de proteção para radiação de todos os comprimentos de onda (LA VISION, 2010).

Instruções importantes para o manuseio seguro do laser (LA VISION, 2010):

- Ler e entender o manual de instruções do tipo de *laser* utilizado. Ter cuidado com a emissão da luz *laser* próximos a gases perigosos;
- Estabelecer uma área de acesso controlado para a operação do *laser*. Limitar o acesso a pessoas treinadas. Nunca operar o *laser* em uma sala onde a luz do *laser* possa escapar através de janelas ou portas;
- Utilização de equipamentos de segurança como óculos de proteção. Usar roupas e luvas que cobrem os braços e as mãos para evitar danos à pele. Especialmente radiação UV que pode causar câncer de pele;
- Enquanto trabalhar com *lasers*, não usar jóias reflexivas como relógios e anéis, pois estes podem causar reflexões acidentais perigosas;
- Evitar olhar para o feixe do *laser*, mesmo as reflexões difusas podem ser perigosas;
- Operar o *laser* no menor nível de intensidade de feixe possível.

#### A4.2 – Segurança no uso da câmera

A câmera integrada no sistema é baseado em um sensor CCD (*Charge Coupled Device*) com alta resolução e alta sensibilidade. Um feixe de *laser* focalizado no sensor, diretamente ou por reflexão, pode causar danos permanentes ao sensor (LA VISION, 2010).

Instruções importantes para o manuseio seguro das câmeras (LA VISION, 2010):

- Ler e entender o manual de instruções específico da câmera utilizada;
- Colocar a tampa de proteção da lente da câmera sempre que não for feita gravação, especialmente quando o feixe de *laser* estiver sendo ajustado;
- Usar a resolução total do sensor e sempre ler o chip completo para ter o controle da intensidade em todas as áreas do sensor;
- Garantir que nenhuma parte da imagem esteja saturada, ou seja, a intensidade está abaixo do nível máximo de cinza (65535 counts para uma câmera de 16 bit);
- Iniciar as gravações com a menor potência do *laser* e com uma pequena abertura da lente da câmera;
- Aumentar a potência do *laser* passo a passo e verificar a intensidade na imagem correspondente.

Além das instruções acima, deve-se manter a região de investigação sempre isolada evitando que a luz *laser* reflita em algum anteparo e atinja a câmera. Deve-se também controlar a quantidade de luz *laser* que ilumina a região investigada utilizando, por exemplo, uma placa com uma fenda (Figura 3.9b). Um exemplo de um arranjo experimental que pode causar danos às câmeras, utilizado por Amaral *et al.*(2012a e 2012b), é apresentado na Figura 4.8 e na Figura A4.1. A quantidade de luz *laser* que passa na região do *riser* investigada não foi controlada e a região não foi isolada. Nessa Dissertação foi utilizada uma espuma preta pra isolar a área investigada e uma placa com fenda para controlar quantidade de luz *laser* no *riser* (Figura 3.15b e Figura A4.2). O volume de luz controlado é apresentado na Figura 3.14b.



Figura A4.1 – Arranjo esperimental usado por Amaral *et al.*(2012a e 2012b) destacando o volume de luz *laser* 



Figura A4.2 - Arranjo esperimental usado nessa Dissertação.