

**ESTUDO DO PARÂMETRO TURBULENTO VELOCIDADE COM USO DE
VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS**

Amanara Potykytã de S.D. Vieira¹ & Woodrow Nelson Lopes Roma²

Resumo

A turbulência é um fenômeno aleatório e é um desafio para os pesquisadores provar sua face determinística. Neste trabalho foi observada a turbulência gerada em um tanque com grade oscilatória trabalhando nas frequências de 154,25 e 175 rotações por minuto. A intenção foi verificar a homogeneidade da turbulência gerada nessas condições. Para tanto, foram escolhidos 12 pontos de medida. Foram geradas curvas da velocidade em função do tempo para cada ponto e calculada a média quadrática, a fim de comparar os resultados aos demais pontos. A medida de velocidade foi obtida utilizando o método de velocimetria por imagens de partícula (PIV). Para verificar o controle das amostras e conseqüentemente a homogeneidade da turbulência utilizou-se um gráfico de controle de dispersão.

Abstract

The turbulence appears to be a random phenomenon and is a challenge for researchers to prove his deterministic view. In this study, the turbulence was generated in an oscillating grid tank at 154.25 and 175 revolutions per minute. The intention was to check the homogeneity of the turbulence generated under these conditions. For this purpose, we selected 12 points of measurement. Velocity curves were generated as a function of time for each point and the root mean square was calculated and used to compare the results to other points. The speed measurement was made using the method of particle image velocimetry (PIV). To verify the control sample and the resulting homogeneity of the turbulence, we used control chart dispersion.

Palavras-Chave – PIV, turbulência e velocimetria.

INTRODUÇÃO

Em todo fluido existem pelo menos dois tipos de força atuantes. As forças de inércia, que fazem as moléculas tenderem a se movimentar no sentido e direção em que foi aplicada uma força inicial, e as forças viscosas, que tendenciam as moléculas a permanecerem coesas. A razão entre a ação destas duas forças determina se um fluido é laminar ou turbulento. Em um regime turbulento, as forças de inércia predominam sobre as forças cisalhamento, resultando em um movimento desordenado, ocasionando mistura intensa no fluido.

Na área de Fenômenos de Transporte sempre foi um desafio descrever precisamente o comportamento turbulento dos fluidos. Várias fórmulas descrevem bem o comportamento laminar,

¹ Afiliação: Times New Roman, 8 pt com endereço completo, fone, fax e e-mail

entretanto o regime turbulento apresenta comportamento aleatório e em partes determinístico. Por isso é interessante o uso de métodos de medida que observem o espaço 3D no estudo da turbulência.

Este trabalho se propôs a medir a turbulência em um tanque de acrílico, em laboratório, com o uso de um PIV (velocimetria por imagens de partículas) estereoscópico, para verificar a condição de homogeneidade da turbulência gerada.

REGIME TURBULENTO

Um escoamento pode ser classificado como turbulento ou laminar de acordo com sua estrutura interna, ou seja, o padrão de movimento das moléculas do fluido. O primeiro a estudar a estrutura interna dos escoamentos foi Osborne Reynolds, em 1883. O início deste estudo deu-se através da experiência conhecida como experiência de Reynolds. De acordo com o comportamento observado, o escoamento interno a tubos foi classificado em laminar, de transição e turbulento (Tabela 1).

Tabela 1- Número de Reynolds para diferentes regimes de escoamento. Adaptado de (PORTO, 2006)

Tipo de regime	Número de Reynolds
Laminar	< 2000
Transitório	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	> 4000

O número de Reynolds é uma relação entre forças de inércia e de cisalhamento; Havendo prevalência das forças de inércia, ocorre amplificação das perturbações existentes no escoamento, provocando novas perturbações que são novamente amplificadas (ROMA, 2006).

De acordo com Porto (2006), o escoamento pela própria natureza física do processo de transferência individual de moléculas entre lâminas adjacentes ao escoamento, permite um tratamento analítico da tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, do fator de atrito, com comprovação experimental. No escoamento turbulento, são agrupamentos de moléculas animadas com velocidade de perturbação que se transportam, de forma caótica, para camadas adjacentes do fluido, produzindo forças tangenciais de muito maior intensidade.

Algumas características importantes no estudo da turbulência são isotropia, ergodicidade e homogeneidade. Este trabalho observou a homogeneidade da turbulência. Um escoamento é considerado homogêneo quanto à turbulência quando a turbulência gerada (velocidade) é igual (dentro de limites estatísticos) em qualquer ponto do escoamento.

VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV)

Adrian (2005) cita como peculiaridades da turbulência a abrangência de escalas físicas e sua aleatoriedade, o que dificulta a determinação da direção do fluxo. Uma técnica de medição de turbulência deve ser capaz de medir uma ampla escala de comprimento e velocidade. O PIV é um método de velocimetria que utiliza imagens de partículas capturadas em um intervalo de tempo determinado. A Figura 1 ilustra os componentes do sistema PIV.

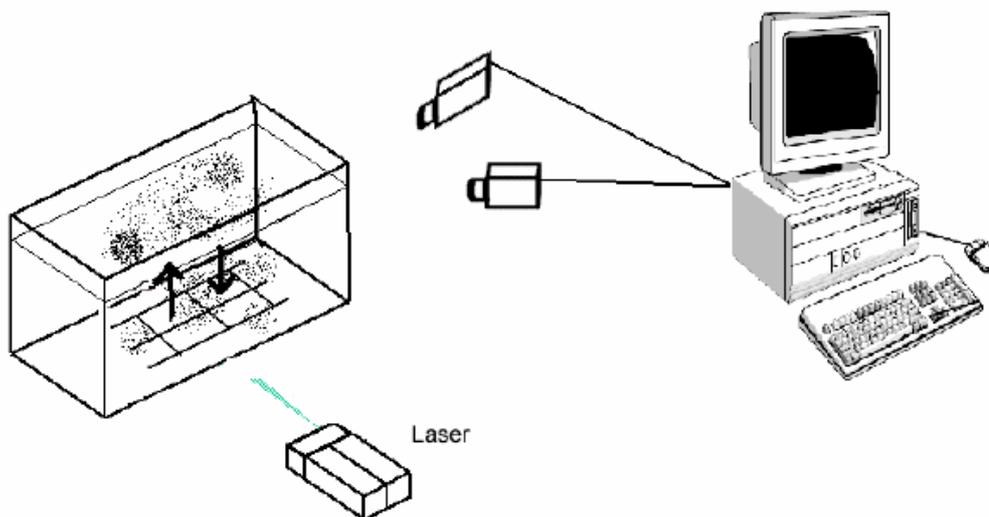


Figura 1- Equipamentos de um sistema de velocimetria por imagens de partículas (PIV)

Com o avanço das câmeras CCD e das técnicas de processamento de imagem, a técnica PIV destacou-se das demais. O PIV consegue visualizar fenômenos da dinâmica de fluidos e usa algoritmos matemáticos de fácil manipulação em microcomputadores.

O PIV digital veio com o advento de câmeras que poderiam gravar duas imagens em rápida sucessão, transferindo e armazenando a primeira imagem em um chip, onde depois é gravada também a segunda imagem. As câmeras capturam pares de imagens com intervalos de aproximadamente 10 nano segundos. O laser ilumina um plano de partículas, que refletem esta luz. O deslocamento de partículas esféricas inseridas no fluido é observado através das imagens adquiridas pelas câmeras. Um exemplo da movimentação das esferas refletidas pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 - Exemplo de imagem de partículas inseridas na água

O software processa o deslocamento médio de um grupo de partículas. Como são conhecidas as variações de posição e tempo, torna-se possível determinar a direção, sentido e intensidade do vetor velocidade média de cada subárea da imagem. A imagem é dividida em várias áreas menores e o vetor resultante desta área é o que aparecerá no mapa de vetores (Figura 3).

O PIV 3D associa as imagens de duas ou mais câmeras, permitindo ao software calcular mais precisamente a velocidade. O processo de velocimetria por imagens de partículas depende da distribuição das partículas no fluido, iluminação e qualidade na captura das imagens. A qualidade do processamento das imagens está relacionada principalmente à amostragem. A partir deste ponto é feita a análise e obtido o resultado.

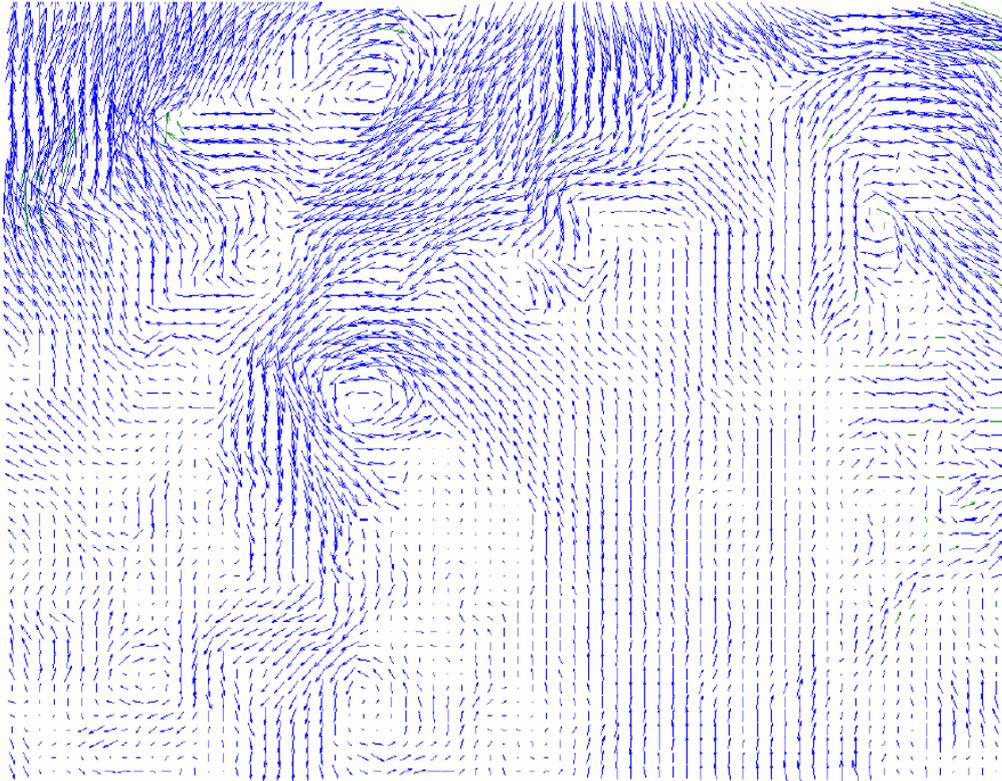


Figura 3 – Campo de vetorização

Vantagens e desvantagens

Adrian, 2005 lista como vantagens do PIV:

- O método não interfere no fluxo;
- Alta velocidade de processamento de dados permite a geração de um grande número de pares de imagens que, em um computador pessoal podem ser analisados em tempo real ou em um momento posterior, e uma grande quantidade de informação pode ser adquirida;
- Métodos de velocimetria por imagens de partículas podem, em geral, não ser capazes de medir os componentes ao longo do eixo z. Essas componentes não podem apenas ser perdidas, elas podem também apresentar uma interferência nos dados x e y, causada por paralaxe. No PIV estereoscópico, que usa duas ou mais câmeras para medir todas as três componentes da velocidade, esse problema não existe;

Desvantagens e erros possíveis são:

- Uma vez que o vetor velocidade resultante é baseado em correlação entre as distribuições de intensidade em áreas pequenas do fluxo, o campo de velocidade resultante é uma representação espacial média do campo de velocidade real. Isto, obviamente, tem conseqüências para a

precisão de derivadas espaciais do campo de velocidade e funções provenientes de campos de velocidade PIV (PRASAD, 2000);

- Pode haver sobreposição de algumas partículas (PRASAD, 2000);
- Por causa dos limites das pequenas áreas em que a imagem está dividida, o deslocamento de uma partícula pode não ser representado por inteiro;
- Escorregamento de partículas. Partículas inadequadas para o fluido, com densidades muito baixas, podem escorregar”, ou seja, deslocar-se exageradamente comparada à velocidade do fluxo. No caso oposto, partículas com densidades muito elevadas podem sedimentar em velocidades mais baixas de fluxo (PRASAD, 2000);
- Tempo muito curto de duração do pulso do laser pode dificultar a observação do deslocamento das partículas. No caso oposto, tempo longo pode causar o aparecimento de estrias nas imagens ao invés de pontos nítidos (PRASAD, 2000).

Vale destacar o desafio que ainda é medir turbulência na superfície. Banerjee (2010) utiliza o PIV para realizar medidas muito próximas à superfície, porém ainda não é uma medida na superfície.

GRÁFICO PARA CONTROLE DA DISPERSÃO

Para observar se um grupo de amostras está próximas é necessário estabelecer um limite acima e abaixo da média destes valores. O gráfico para controle de dispersão utilizado no trabalho é o gráfico de amplitudes. Este gráfico é útil, segundo LEME (1965), para amostras de menos de 12 exemplares. Nele são apresentados limites de zonas de controle do processo. O método estabelece os seguintes valores:

Tabela 2- Limites das zonas de controle

<i>n</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>.d1</i>	0.00	0.06	0.20	0.37	0.54	0.69	0.83	0.96	1.08	1.20	1.30
<i>.d2</i>	0.04	0.30	0.59	0.85	1.06	1.25	1.41	1.55	1.67	1.78	1.88
<i>.d3</i>	3.17	3.68	3.98	4.20	4.36	4.49	4.61	4.70	4.79	4.86	4.92
<i>.d4</i>	4.65	5.06	5.31	5.48	5.62	5.73	5.82	5.90	5.97	6.04	6.09

A tabela apresenta valores limites em função do número de amostras. Um processo é considerado sob controle se 95% das amostras estão dentro dos limites impostos. O limite se dá pelo produto de *d1* pelo desvio padrão das amostras.

DESENVOLVIMENTO

Criação das oscilações

A primeira etapa do trabalho consistiu em criar distúrbios na água com diferentes velocidades. Foi utilizado um tanque contendo água com superfície livre, com formato prismático com base quadrada de $0,5 \times 0,5 m^2$ e altura $0,70 m$ com um sistema de biela manivela de raio variável e um dispositivo de esgotamento de água, uma grade oscilante quadrada, como barras de seção $10 \times 10 mm^2$, montadas com malhas quadradas com espaçamento entre barras de $3,9 cm$ e medidas externas de $46 \times 46 cm^2$, motor elétrico (WEG), contador digital de rotações do motor e contador digital de oscilações da grade. A figura 4 detalha o esquema montado para geração de oscilações e a foto 5 mostra o equipamento.

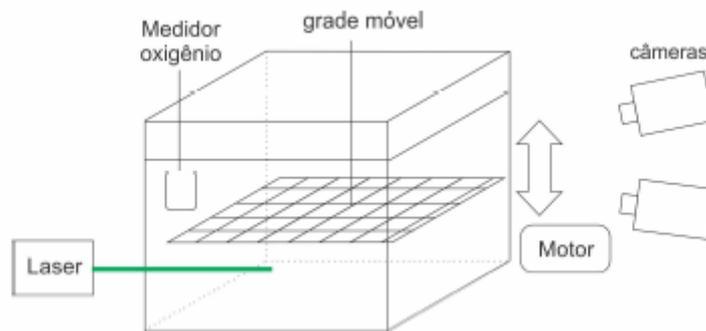


Figura 4 – Esquema do equipamento gerador de turbulência

Neste trabalho foram utilizadas duas velocidades de oscilações da grade, sendo elas 95,5 e 154,25 rotações por minuto. Estes valores foram obtidos pela média de quatro medidas efetuadas pelo contador digital de oscilações da grade.



Figura 5 – Equipamento para geração de oscilações

Determinação dos perfis de velocidade

A velocimetria foi feita usando um PIV estereoscópico. O PIV utilizado na pesquisa pertence à indústria Andritz, localizada em Araraquara e foi disponibilizada de março a novembro de 2010. Neste período, o equipamento esteve no laboratório de fenômenos de transporte da Escola de Engenharia de São Carlos.

A velocimetria é feita capturando-se pares de imagens em duas câmeras digitais. Nas imagens observa-se o deslocamento de partículas inseridas na água. Estas imagens são processadas pelo pacote de softwares DynamicStudio versão 2.30 para configurar, adquirir, analisar e processar os dados adquiridos, resultando em um campo de vetorização. Os mapas de vetorização expõem as velocidades e direções do movimento gerado pelas oscilações.

O tanque prismático transparente é preenchido com água e aproximadamente 10 ml de uma solução contendo partículas de vidro revestidas com prata. O software ativa o laser, que emite pulsos no momento da captura de imagens. A luz reflete na superfície das pequenas esferas, destacando-as nas imagens.

O software divide a área total da imagem em subáreas. Cada subárea possui várias partículas em movimento. No mapa de vetores, cada vetor representa a velocidade e direção média do grupo de partículas contidas na pequena área.

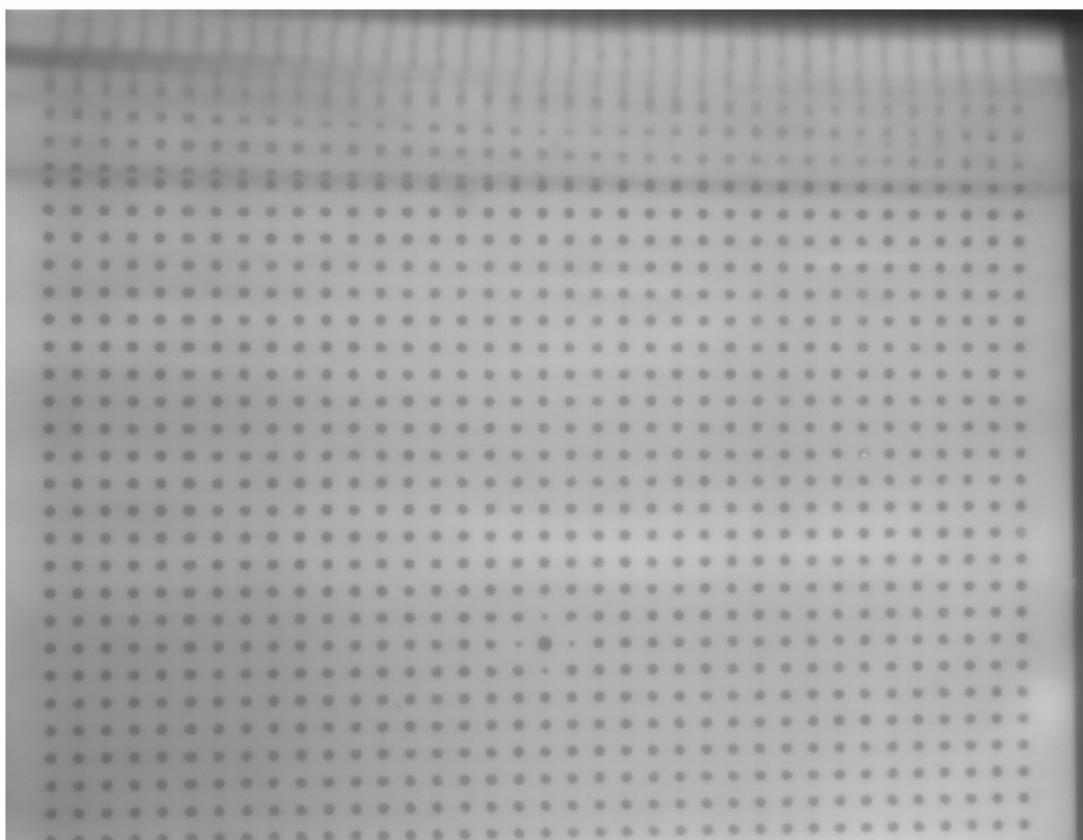


Figura 6 – Grid para calibração em 3D

O programa oferece algumas opções de análises. Para processar as imagens obtidas por cada câmera foi escolhida a correlação adaptada, pois com esta análise alguns vetores falsos (erros) já são excluídos. Como desvantagem, essa opção apresenta o fato de estar distanciando-se do campo de velocidades real. Selecionando os mapas resultantes de cada câmera, referente ao mesmo tempo, é possível obter o mapa vetorial 3D.

Para a calibração 3D, que é o caso deste estudo, utiliza-se uma placa alvo com a imagem de calibração. Imagens são capturadas com a placa no sentido do plano criado pelo laser, e em alguns ângulos determinados para a calibração de cada software, assim tornam-se conhecidas as distâncias nos eixos x,y e z. No caso do software utilizado, a placa era inclinada para a direita, esquerda, acima e abaixo em ângulos de 10° a 30°.

A imagem capturada pelas câmeras é a de um plano de partículas, porém para obtenção de imagens 3D são utilizadas duas câmeras, e a combinação dos dois planos obtidos para obter a imagem 3D. O campo com vetores, para demonstrar o deslocamento (e consequentemente velocidade) das partículas nos eixos x, y e z, deve apresentar os vetores resultantes entre as imagens obtidas na câmera 1 e 2.

A imagem obtida pelo PIV é dividida em uma matriz com 66 linhas e 53 colunas. As informações adquiridas são apresentadas através de imagens e de conjuntos numéricos. As planilhas obtidas (conjuntos numéricos) contém as componentes da velocidade de cada posição da matriz. Na planilha os pontos são colocados em uma única coluna, como mostra o quadro 1, resultando uma planilha com 3498 linhas (66 x 53)

Quadro 1 – Matriz de mapeamento do PIV

(a)					(b)	
$A_{0,0}$	$A_{0,1}$	$A_{0,2}$	...	$A_{0,52}$	1	$A_{0,0}$
$A_{1,0}$	$A_{1,1}$	$A_{1,2}$	...	$A_{1,52}$	2	$A_{0,1}$
$A_{2,0}$	$A_{2,1}$	$A_{2,2}$	...	$A_{2,52}$	3	$A_{0,2}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots
$A_{65,0}$	$A_{65,1}$	$A_{65,2}$	...	$A_{65,52}$	53	$A_{0,52}$
					54	$A_{1,0}$
					55	$A_{1,1}$
					56	$A_{1,2}$
					\vdots	\vdots
					3498	$A_{65,52}$

- a) matriz bidimensional correspondente a janela do tanque
- b) posições dos elementos alinhados em um vetor

Após a obtenção das imagens, foi elaborado um programa usando o software MatLab 7.5. O programa importou as planilhas com as informações numéricas das imagens obtidas para cada medida de turbulência (rotações da grade). Para calcular a posição do ponto da matriz bidimensional na matriz unidimensional usou a equação 1.

$$L = C \cdot l + c + 1 \tag{1}$$

Onde,

L = linha na matriz unidimensional;

C = total de colunas da matriz bidimensional;

l = linha na matriz bidimensional;

c = coluna na matriz bidimensional.

Usando o programa MatLab, foram extraído das planilhas as componentes da velocidade U, V e W.

Para este trabalho, foram escolhidas duas velocidades de rotação da grade, 154,25 e 175 rotações por minuto. Foram escolhidos 12 pontos, expostos na tabela a seguir.

Tabela 3- Pontos escolhidos na matriz

Ponto	Linha	Coluna
1	13	13
2	14	40
3	18	20
4	21	32
5	24	15
6	30	28
7	32	43
8	40	10
9	48	14
10	52	16
11	57	45
12	61	22

A tabela acima apresenta a localização dos pontos nas imagens adquiridas pelo PIV. A imagem foi dividida em uma matriz com 66 linhas e 53 colunas.

As componentes da velocidade de cada um dos doze pontos foram somados vetorialmente, em cada instante do tempo. Existem 1024 instantes, correspondentes às 1024 imagens adquiridas em seqüência pelo PIV. As velocidades resultantes do ponto em cada instante do tempo foram expostas em um gráfico e com essas informações foram calculados os valores RMS para a comparação dos resultados de cada ponto, verificando a homogeneidade da turbulência. Como no sistema de tanque com grelha móvel não há velocidade de escoamento além da velocidade gerada pela grelha, considera-se que:

$$V = v + u'$$

$$V = u'$$
(2)

Para realizar este teste estatístico das informações obtidas, elaborou-se um gráfico de controle da dispersão. Neste gráfico, para um processo estar sob controle, a grande maioria dos pontos (95%) deve estar dentro da zona I.

$$\bar{u} = \sum \frac{x_i}{n}$$
(3)

$$\sqrt{\sigma^2} = \frac{\sqrt{\sum [(x_i - \bar{u})^2]}}{n-1}$$
(4)

O limite da zona I é dado pela equação:

$$\bar{u} + d_1 \cdot \sigma$$
(5)

Sendo:

\bar{u} = média dos valores RMS;

σ = desvio padrão;

No caso de 12 pontos, o d_1 vale 1,30. Este valor é dado pelo método para gráficos de controle de dispersão encontrado em LEME (1965).

RESULTADOS

Neste item são apresentados um gráfico da variação da velocidade em um ponto, para explanação, os valores da média quadrática para cada curva de velocidade gerada em um ponto no decorrer do tempo e um gráfico expondo os valores RMS e os limites impostos pela zona I de confiança.

Nas duas rotações escolhidas observou-se uma grande discrepância dos valores RMS de pontos localizados entre a camada limite e a linha 11, por isso foram escolhidos pontos abaixo desta linha.

O gráfico abaixo é a curva da velocidade do ponto formado pelo encontro da linha 38 com a coluna 20, na rotação 154,25 rpm.

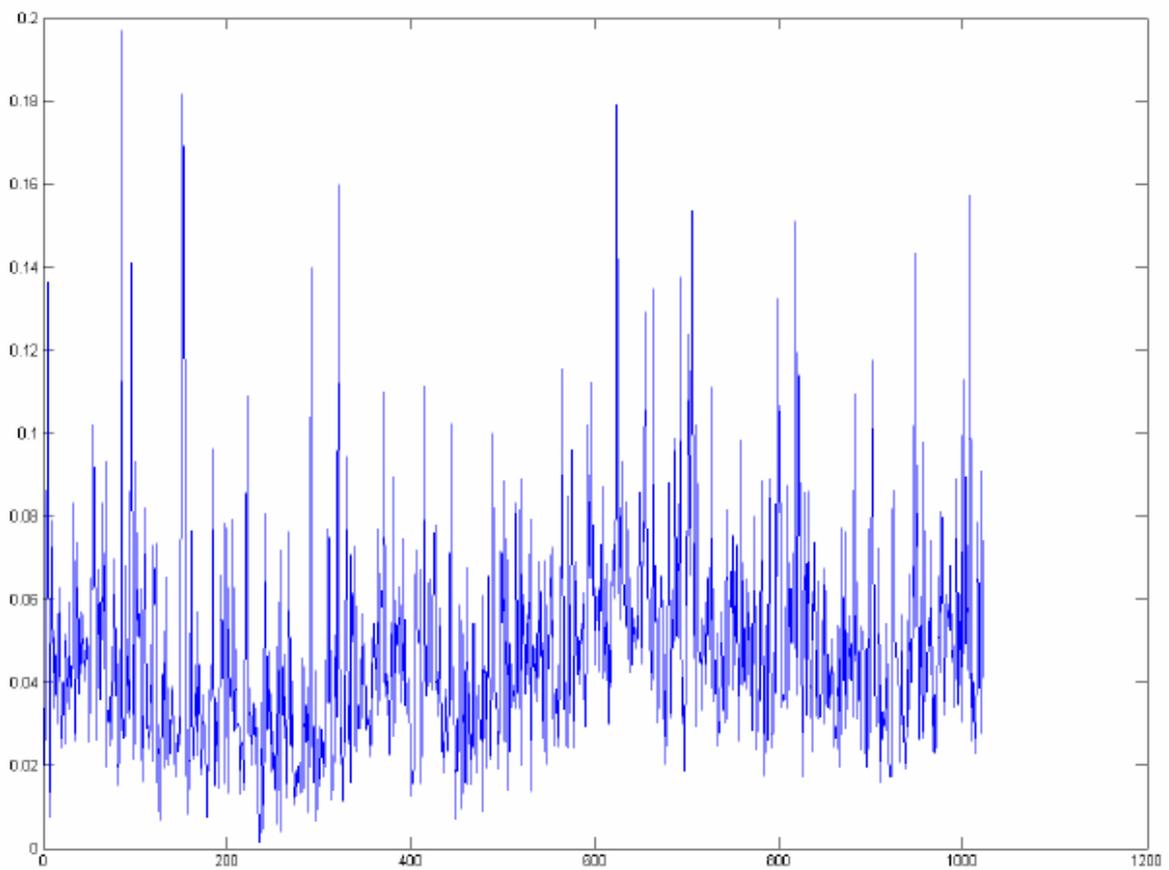


Figura 7 – Curva velocidade versus tempo

Neste gráfico estão marcadas as velocidades resultantes (soma vetorial das componentes U, V e W da velocidade no espaço) ao longo de 1024 instantes de tempo. É possível observar o comportamento randômico do escoamento no interior do tanque.

Para cada ponto, de um total de 12 pontos foi elaborado um gráfico como o da figura 7. Para transformar a curva em um único valor que possa ser comparado aos demais, calculou-se a média quadrática (RMS) de cada curva. Os valores para 154,25 rpm da grelha são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 4 – Valores RMS

Pontos	RMS
1	0.0651
2	0.0628
3	0.0641
4	0.0604
5	0.0645
6	0.0533
7	0.0501
8	0.0541
9	0.0438
10	0.0427
11	0.0432
12	0.0422

Os valores obtidos foram lançados em um gráfico, onde aparece também a média dos valores e os limites impostos na zona I de confiabilidade, de acordo com equações expostas na metodologia deste trabalho.

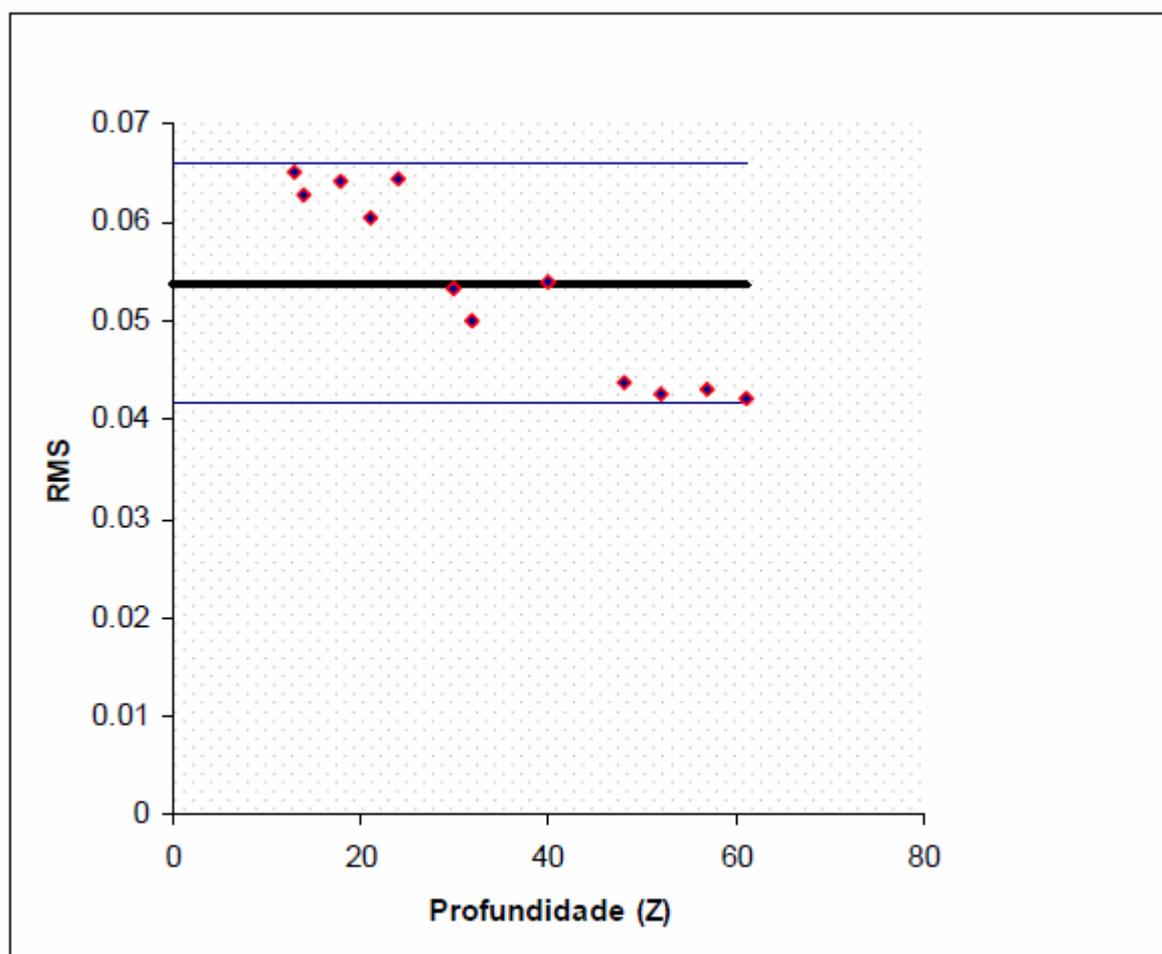


Gráfico 1 – Pontos versus RMS (rotação 154,25)

No gráfico observam-se os valores RMS para cada ponto, a média destes valores e o limite imposto pelo método para a zona de controle dos pontos, dado pela equação 5. Percebe-se que os valores RMS obtidos para cada ponto estão dentro dos limites impostos pelo teste estatístico para delimitar a zona I. É possível observar também o decréscimo dos RMS com relação à profundidade do tanque. O último ponto localiza-se na linha 61 da matriz com 66 divisões horizontais.

Para 175 rotações da grelha por minuto foram encontrados os seguintes valores de RMS:

Tabela 5 – Valores RMS

Pontos	RMS
1	0.0699
2	0.0660
3	0.0633
4	0.0612
5	0.0678
6	0.0604
7	0.0568
8	0.0688
9	0.0685
10	0.0649
11	0.0477
12	0.0634

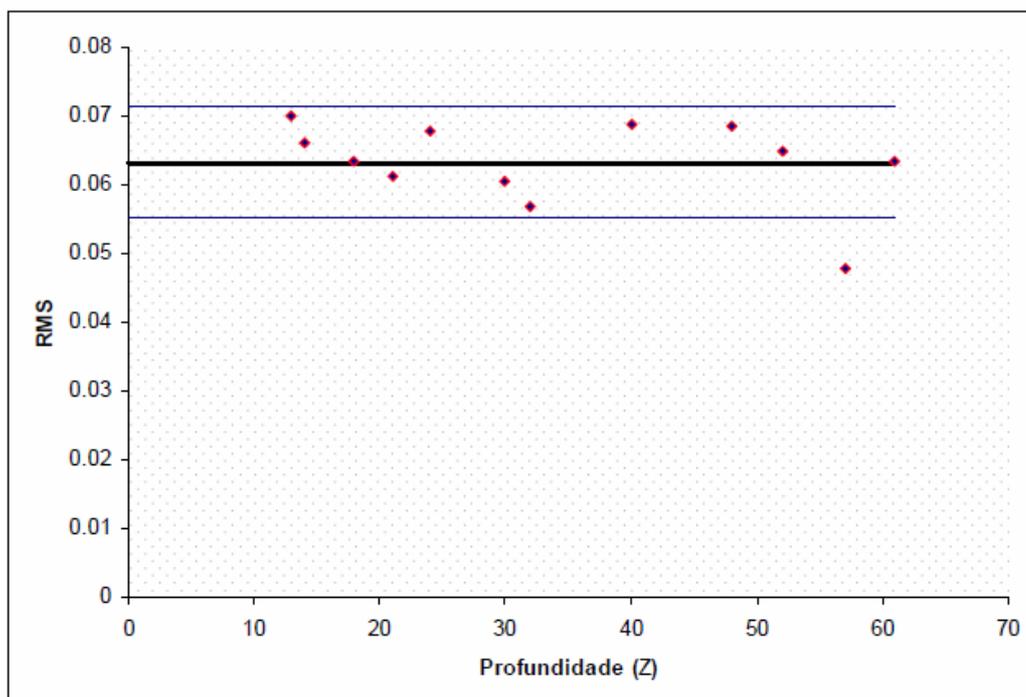


Gráfico 2 – Pontos versus RMS (rotação 175)

O gráfico dois mostra um dos pontos ultrapassando o limite imposto pelo método estatístico. Segundo o teste, 95% dos pontos devem estar dentro dos limites para que seja considerada a existência de um controle no processo. Em um universo de 12 pontos, 1 ponto corresponde a aproximadamente 8,33%. Para esta rotação não ficou visível o decréscimo dos valores RMS com o crescimento da profundidade.

CONCLUSÃO

Durante a realização do trabalho observou-se a discrepância dos valores RMS obtidos acima da linha 11 da matriz. Esta discrepância provavelmente deve-se ao método de medida (PIV), já que a medida de turbulência na superfície ainda é um desafio, como foi observado durante a revisão.

Através do teste estatístico é possível afirmar que a turbulência gerada dentro do tanque é homogênea para 154,25 rotações por minuto da grelha. Não é possível fazer a mesma afirmação para a situação com 175 rotações por minuto da grelha, embora 11 dos 12 pontos estejam dentro dos limites.

A homogeneidade da turbulência gerada no tanque seria melhor avaliada usando mais pontos e com a escolha de um teste estatístico adequado para validar a nova quantidade de amostras.

BIBLIOGRAFIA

ADRIAN, R. J. (2005). *Twenty years of particle image velocimetry*. Experiments in fluids.

PORTO, R.M. (2006). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP

ROMA, W. N. L. (2006). Fenômenos de transporte para engenharia. [S.l.]:Rima

TURNEY, D. & BANERJEE, S. (2010). Near surface turbulence and its relationship to air-water gas transfer rates . GTWS (Gas Transfer Water Surface), Japan