

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**EXPERIMENTOS PARA ANÁLISE DOS CAMPOS DE
VELOCIDADE E VORTICIDADE NO ESCOAMENTO AO REDOR
DE MODELOS DE *MANIFOLDS***

Ricardo de Oliveira Dias

São Paulo

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**EXPERIMENTOS PARA ANÁLISE DOS CAMPOS DE
VELOCIDADE E VORTICIDADE NO ESCOAMENTO AO REDOR
DE MODELOS DE *MANIFOLDS***

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Ricardo de Oliveira Dias

Orientador: Julio Romano Meneghini

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Dias, Ricardo de Oliveira

Experimentos para análise dos campos de velocidade e vorticidade no escoamento ao redor de modelos de *manifolds* / R. de O. Dias. – São Paulo: EPUSP, 2011. 45 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Vórtices dos fluidos (Medição) 2.Velocidade do fluxo dos fluidos (Medição) 3.E escoamento 4.*Manifolds* I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

A exploração de petróleo no Brasil tem se desenvolvido muito nos anos recentes, e se tornando importante atividade para o desenvolvimento sustentável do país. A Petrobras tem focado seus projetos de extração e suas novas instalações nas maiores reservas nacionais, recentemente descobertas: as submersas em águas profundas. Com a descoberta da camada pré-sal, muito tem sido investido no desenvolvimento de novas tecnologias de exploração do produto em profundidades cada vez maiores.

Na exploração de petróleo em águas profundas (que podem chegar a cerca de 2.000 metros de profundidade oceânica), muitas estruturas, das mais variadas geometrias e funções, encontram-se submersas e sob ação das correntes marítimas. São cabos de sustentação das plataformas, dutos de circulação de petróleo e gases extraídos do solo submarino – os chamados *risers* -, árvores de natal molhadas, *manifolds*, etc.

O escoamento ao redor de corpos rombudos é um fenômeno bastante freqüente na natureza e muito estudado na Mecânica dos Fluidos. Prédios e torres sob ação do vento; pilares de pontes submersos, submarinos e outras estruturas sob ação de correntes marítimas, todos são exemplos de invenções da engenharia sujeitas a tal fenômeno.

O campo de pressões que se forma a partir da interação fluídoelástica entre o fluido e a estrutura do corpo, devido à diferença de velocidade entre eles, é responsável pela ação de forças fluidodinâmicas, que são muito importantes e sempre devem ser consideradas na análise dinâmica da estrutura do corpo.

O objetivo do projeto é medir o campo de velocidades e o campo de vorticidades na esteira do escoamento ao redor de modelos simplificados de *manifolds* em escala reduzida, usando a técnica de medição de velocidades chamada Velocimetria por Imagens de Partículas - PIV (*Particle Image Velocimetry*). Pretende-se também, posteriormente, identificar a relação entre o campo de vorticidades na esteira e os coeficientes hidrodinâmicos, que serão calculados simultaneamente por outros pesquisadores do grupo.

Os resultados obtidos, além de servirem como forma de validação de simulações numéricas feitas em CFD, devem servir como base para obtenção de detalhes do escoamento em questão pouco encontrados na literatura, que podem fornecer subsídios para otimização da geometria e da forma dos *manifolds*, e para definição de procedimentos de instalação adequados para essas estruturas.

SUMÁRIO

1. MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO	1
2. ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS SUBMERSOS	4
3. COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS	6
3.2.1. Equação de Morison.....	8
3.2.2. O número de Keulegan – Carpenter.....	9
3.2.3. Matriz de inércia adicional, matriz de forças e momentos hidrodinâmicos e matriz de massa estrutural do sistema	11
4. <i>MANIFOLDS</i>	14
4.1. Modelos de <i>manifolds</i> para ensaio experimental	16
4.1.1. Máquina de Prototipagem Rápida	16
4.1.2. Banho em soda cáustica para remoção do material de molde.....	17
4.1.3. Modelo 1.....	18
4.1.4. Modelo 2.....	19
5. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DOS CAMPOS DE VELOCIDADES	21
5.1. Anemometria de Filme Quente.....	21
5.2. Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV	21
6. ENSAIOS NO CANAL DE TESTES	23
6.1. Calibração do Sistema PIV.....	23
6.2. Posicionamento dos modelos no canal	26
6.2.1. Suporte para fixação dos modelos no canal	26
6.3. Ensaios com o modelo 1	28
6.4. Ensaios com o modelo 2	29
7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	31
7.1. Resultados com o modelo 1.....	31

7.2. Resultados com o modelo 2.....	34
7.3. Análise geral das medições	38
7.4. Estimativa das forças hidrodinâmicas nos modelos com a utilização dos campos de velocidades.....	40
8. Referências Bibliográficas	44

1. MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

A indústria de exploração de petróleo no Brasil tem se desenvolvido muito nos últimos anos e vem adquirindo grande importância para o desenvolvimento sustentável do país. A Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), líder nacional nesse ramo, tem focado seus projetos de extração e suas novas instalações nas maiores reservas nacionais, recentemente descobertas: as submersas em águas profundas. A exploração dessas reservas tem se mostrado bastante complexa e, além disso, com a recente descoberta das reservas petrolíferas na camada pré-sal, um enorme avanço de tecnologias brasileiras para esse setor encontra-se em andamento.

Nos sistemas de exploração de petróleo - em especial, nas instalações para extração em águas profundas - muitas estruturas, das mais variadas geometrias e funções, encontram-se submersas e expostas às correntes marítimas do fundo oceânico. São cabos de sustentação das plataformas, dutos de circulação de petróleo e gases extraídos do solo submarino – os chamados *risers*, árvores de natal molhadas, *manifolds*, etc, conforme a ilustração da Fig. (1).

Árvores de natal molhadas são sistemas compostos por válvulas que conectam os poços do solo submarino à unidade de produção na superfície do mar, e que permitem o fluxo de petróleo e gás dos poços para a superfície, assim como a injeção de líquido e gás da superfície para os poços. Os *manifolds* são estruturas submarinas que funcionam como concentradores de óleo e gás. O petróleo, assim como o gás natural e outras substâncias, é extraído de vários pontos de um poço e transportado previamente aos *manifolds*, e então destes é transportado para a plataforma de produção na superfície do mar, de forma a minimizar o número de *risers* que ligam a plataforma até o leito oceânico (a profundidade de poços explorados no Brasil pode chegar a mais de 2.000 metros, e o custo de instalação de apenas um *riser* pode chegar a 4 milhões de dólares).

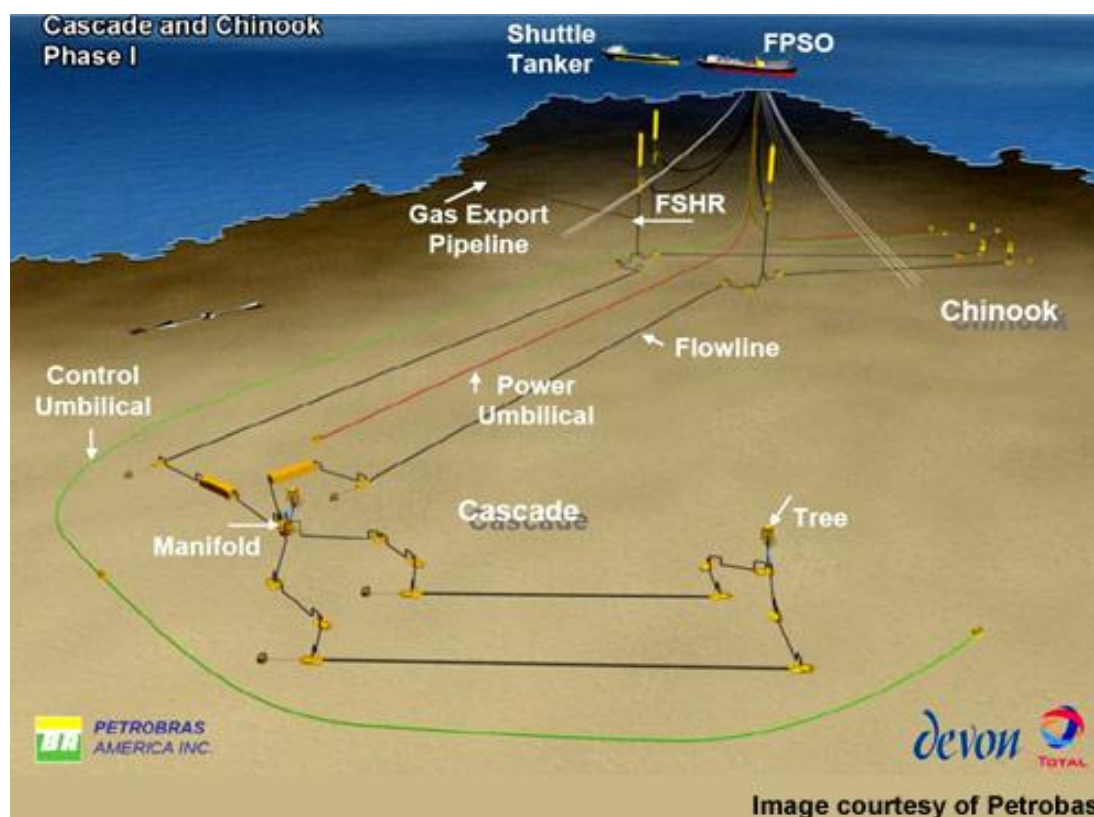


Figura 1. Detalhe das diversas estruturas submersas de um sistema de extração de petróleo (www.offshore-technology.com, 2010).

Esses equipamentos submersos estão sujeitos a todo e qualquer tipo de intempérie marítima e, portanto, estão constantemente sob ação de forças hidrodinâmicas que, nesse caso, são extremamente complexas e difíceis de ser analisadas, uma vez que as correntes marítimas ocorrem em direções, intensidades e instantes aleatórios. No caso dos *manifolds*, faz-se necessária uma investigação severa dos campos de velocidades e de vorticidades e do campo de pressões ao redor de suas estruturas, assim como uma estimativa das forças hidrodinâmicas que agem sobre sua superfície, sob as mais variadas condições de escoamento e de deslocamento das estruturas no meio fluido, a fim de minimizar os esforços sofridos, e de se obter parâmetros suficientes para sua construção, otimização de sua forma geométrica e definição de procedimentos corretos para sua instalação no fundo do mar.

Quanto aos *risers*, no critério de projeto comumente adotado que impõe vida útil superior a 250 anos, o fenômeno de VIV em suas estruturas deve ser evitado e, para tanto, são empregados sistemas de atenuação e supressão de VIV. Alguns destes sistemas atualmente utilizados possuem custo muito elevado, alcançando cerca de 2 milhões de dólares por *riser* instalado, e podendo chegar a 40 milhões de dólares por sistema de produção. Dessa maneira, estudar a natureza de tal fenômeno, analisar sua influência sobre conjuntos de estruturas e propor novas soluções que aumentem a durabilidade dos *risers*, bem como reduzam efeitos danosos, são fundamentais.

2. ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS SUBMERSOS

Em várias aplicações da engenharia, assim como na natureza, muitos corpos e estruturas - parados ou em movimento - encontram-se imersos em escoamentos fluidos. Prédios, torres e outras construções civis, ou cabos em redes de transmissão elétrica, sob ação do vento - escoamento do ar; pilares de pontes submersos, submarinos, ou cabos de ancoragem de navios, sob ação de correntes marítimas - escoamento da água; carros em movimento, aviões, enfim, muitas invenções da engenharia encontram-se constantemente sob esse tipo de situação.

Evidentemente, o escoamento ao redor de corpos rombudos é um problema presente na grande maioria das aplicações da engenharia mecânica e, portanto, sua compreensão e sua análise são de suma importância para um bom projeto. Um corpo “rombudo” - denominação técnica usada na mecânica dos fluidos - é aquele que, quando imerso em uma corrente de fluido, gera separação do escoamento e essa ocorre em uma porção considerável de sua superfície (MENECHINI, 2002).

A partir da interação fluidoelástica entre o fluido e a estrutura do corpo nele submerso, surge uma distribuição de pressão ao redor da superfície do corpo provocada pela variação, neste local, da velocidade relativa entre corpo e fluido (ÁSSI, 2005). O efeito desse campo de pressões é a resultante das forças fluidodinâmicas que atuam sobre o corpo. Mesmo que o corpo em questão esteja fixo dentro do escoamento fluido (como no caso de um prédio sob a ação do vento), essas forças influem e devem ser consideradas na análise dinâmica de sua estrutura.

A existência desse campo de pressões ao redor do corpo, variável ao longo do tempo, faz com que este esteja constantemente sob ação de forças fluidodinâmicas, também variáveis no tempo e, dependendo de sua mobilidade dentro do fluido, o corpo pode sofrer fenômenos de excitação chamados de VIE – Vibrações Induzidas pelo Escoamento. Quando há separação do escoamento ao redor da superfície do corpo, ocorrem a geração e o desprendimento de vórtices e, se ele possuir uma estrutura muito longa, como a de um cilindro, ele sofre excitações denominadas VIV – Vibração Induzida por Vórtices, um tipo específico de VIE (FRANZINI et al., 2006).

Seja no caso de “corpo em movimento - fluido em repouso” ou de “corpo parado - fluido escoando” (ou uma combinação dos dois casos), a ação dessas forças fluidodinâmicas, sobre qualquer estrutura construída, influi significativamente em sua dinâmica e podem comprometer fatalmente seu funcionamento se não forem previamente previstas e levadas em conta em seu projeto. Dessa forma, o estudo de escoamento ao redor de corpos rombudos, das forças fluidodinâmicas que atuam em suas estruturas, juntamente com a compreensão das causas e conseqüências de VIE e VIV, são fundamentais e contribuem muito para o desenvolvimento de novas aplicações práticas da engenharia.

3. COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS

3.1. Forças hidrodinâmicas e inerciais

O escoamento ao redor de corpos rombudos gera esforços de duas naturezas: forças hidrodinâmicas e forças inerciais. As forças hidrodinâmicas são geradas pela alteração no campo de pressão atuante no corpo devido à circulação de corrente, separação e geração de esteiras. Essa força é composta pelas parcelas de arrasto (na direção do escoamento) e as de sustentação (ortogonais ao escoamento). Já as forças inerciais são provocadas pela alteração do campo de velocidade e pressão do fluido, provocados pela movimentação do corpo (FALTINSEN, 1990).

Considere um corpo qualquer se movimentando imerso em um fluido. A aceleração do corpo provocará a aceleração de algumas partículas fluidas em seu entorno, e conseqüentemente o corpo receberá uma força reativa proporcional a massa de fluido acelerada. Essa parcela de força provocada pelo fluido dividida pela aceleração do corpo é conhecida como *massa adicional* (SARPKAYA, ISAACSON, 1981).

Muitas vezes define-se que a massa adicional é a parcela fluida de massa acelerada pelo movimento do corpo, porém essa definição não é adequada. Determinar a intensidade da aceleração das partículas de fluido ao redor do corpo é uma tarefa complexa, não proposta neste estudo, onde a preocupação é somente com os efeitos dessa aceleração no corpo. Uma definição correta de massa adicional é o quociente da força do fluido aplicada ao corpo em fase com a aceleração do corpo, dividida pela aceleração do corpo. Ou seja, ao integrar o campo de pressões na superfície do corpo ao longo do tempo, obtém-se a força total atuante no corpo ao longo do tempo. A parcela dessa força em fase com a aceleração do corpo, dividida pela aceleração do corpo, resulta na chamada massa adicional.

Outra maneira de compreender a massa adicional é relacionando-a com a variação de energia cinética do fluido. O movimento de uma partícula de fluido implica certa energia cinética. Considerando uma porção de fluido $\forall$, sua energia cinética total será:

$$K = \frac{1}{2} \rho \int_{\forall} u_i u_i d\forall$$

Onde:

u_i representa a velocidade da porção infinitesimal de fluido i ;

ρ é a densidade do fluido.

A aceleração do corpo transfere movimento as partículas de fluido, transferindo um trabalho igual a variação da energia cinética do fluido, $\frac{dK}{dt}$. Esse trabalho é provocado pela parcela adicional de força atuante no corpo multiplicado pela velocidade relativa entre o corpo e o fluido, ou seja, balanceando a equação:

$$F_a U = - \frac{dK}{dt}$$

Sendo a força F_a de mesmo sentido da força de inércia necessária para acelerar a massa m_0 do corpo, então é conveniente visualizar a massa de fluido acelerado como uma massa adicional m_a do sistema:

$$F_a = m_a \frac{du}{dt}$$

3.2. Coeficientes adimensionais

Em hidrodinâmica, normalmente as grandezas são expressas através de adimensionais. No caso das forças hidrodinâmicas, é definido o coeficiente de força hidrodinâmica C_h , dado por:

$$C_h = \frac{F_h}{\frac{1}{2} \rho A U^2}$$

Onde: F_h é a força hidrodinâmica na condição direção considerada;

ρ a densidade da água;

A a área projetada do corpo na direção do escoamento

U a velocidade do escoamento ao redor do corpo.

Note que ao definir C_h , nada foi dito a respeito de arrasto ou sustentação. Isso se deve ao fato de que como serão feitos ensaios em varias direções diferentes, é mais conveniente considerar apenas a intensidade e direção da força e intensidade e direção da velocidade, gerando vários C_h com sub-índices diferentes.

No caso da massa adicional, é definido o coeficiente de massa adicional C_a como a razão entre a massa adicional e a massa de fluido deslocado:

$$C_a = \frac{m_a}{\rho \forall}$$

Onde: m_a é a massa adicional;

ρ a densidade da água;

$\forall$ o volume ocupado pelo corpo.

O mesmo conceito da massa adicional pode ser aplicado para movimentos angulares. Neste caso, será tratado como *momento de inércia adicional* ao redor de um eixo de rotação. Se por exemplo, for escolhido o eixo x de rotação, o coeficiente de momento de inércia adicional será:

$$C_{I_{0x}} = \frac{I_{ax}}{I_{0x}}$$

Assim como nos coeficientes de força hidrodinâmica, os coeficientes de força de inércia serão medidos em várias direções diferentes, sendo necessária uma convenção para representá-los, apresentada adiante.

3.2.1. Equação de Morison

A maioria dos sistemas navais e oceânicos pode ser modelada como um sistema massa-mola amortecido, considerando-se pequenas oscilações em um grau de liberdade, por:

$$m_0 \ddot{x} + b \dot{x} + kx = F_x(t)$$

Onde: m_0 é a massa estrutural do corpo submerso;

b é o coeficiente de amortecimento do sistema;

k o coeficiente de rigidez estrutural do sistema;

$F_x(t)$ é a força hidrodinâmica total em função do tempo que atua no corpo;

$\dot{x}$ é a velocidade do corpo;

$\ddot{x}$ é a aceleração do corpo.

No caso em estudo, pode-se considerar a hipótese de corpo rígido e assim eliminar os termos internos de amortecimento e rigidez, reduzindo a equação a:

$$m_0 \ddot{x} = F_x(t)$$

Como explicado na seção anterior, $F_x(t)$ é dividida em duas parcelas, uma de inércia e outra hidrodinâmica. Uma aproximação comumente utilizada nesse tipo de aplicação, conhecida como aproximação de Morison, divide a força em duas parcelas, uma proporcional a aceleração do corpo e outra relativa a velocidade do corpo. Aplicando-se essa aproximação na modelagem do problema, chega-se a Equação de Morison:

$$m_0\ddot{x} = \rho V C_a \ddot{x} + \frac{1}{2} \rho A_x C_h \dot{x} |\dot{x}|$$

Onde: C_a é o coeficiente de massa adicional;

C_h é o coeficiente de força hidrodinâmica (força de arrasto);

A_x a área do corpo projetada em x;

V o volume deslocado pelo corpo.

Assim, ao medir a força resultante que atua sobre um corpo livre se movimentando no escoamento, verifica-se que tem a seguinte forma:

$$F_x(t) = (m_0 + \rho V C_a) \ddot{x} + \frac{1}{2} \rho A_x C_h |\dot{x}| \dot{x}$$

Portanto, medindo a força $F_x(t)$ que atua sobre o corpo, e conhecendo a trajetória do corpo ($\ddot{x}$ e $\dot{x}$), consegue-se estimar os valores de C_a e C_h .

3.2.2. O número de Keulegan – Carpenter

Na seção anterior foi visto que, conhecendo o movimento do corpo e a força atuante neste provocada pelo escoamento, pode-se encontrar os valores de C_a e C_h . No entanto existe certa dificuldade de encontrar as contribuições de cada um para a força total. Para solucionar essa questão, é utilizado um coeficiente conhecido como número de Keulegan-Carpenter que relaciona as forças hidrodinâmicas e inerciais em um escoamento.

Considere-se que o corpo submerso apresente oscilação harmônica em um grau de liberdade em água parada. Seu deslocamento é dado por uma senóide de amplitude $\hat{x}$ e frequência ω :

$$x = \hat{x} \sin \omega t$$

Neste caso, a velocidade e a aceleração são dadas por:

$$\dot{x} = \hat{x} \omega \cos \omega t$$

$$\ddot{x} = -\hat{x}\omega^2 \sin \omega t$$

O número de Keulegan-Carpenter é dado por:

$$KC = \frac{U_m}{fL_c}$$

Onde: U_m é a máxima velocidade do escoamento oscilatório;

$f = \frac{2\pi}{\omega}$ é a frequência de oscilação do corpo;

L_c é um comprimento característico do corpo.

A magnitude de KC é o parâmetro utilizado para determinar a importância de cada termo da força. Para KC pequenos, as forças inerciais são mais importantes que as hidrodinâmicas. Para altos valores de KC, ocorre o contrário. Se o movimento for senoidal, a máxima velocidade será $\hat{x}\omega$ e a frequência, $\frac{2\pi}{\omega}$.

$$KC = \frac{2\pi\hat{x}}{L_c}$$

Se $\hat{x} \ll L_c$, então $KC \ll 1$, e as forças hidrodinâmicas podem ser consideradas insignificantes, assim pode se calcular o valor de C_a . À medida que o valor de $\hat{x}$ aumenta, KC aumenta e as forças hidrodinâmicas passam a ser cada vez mais relevantes. No caso limite, quando $\hat{x} \rightarrow \infty$, $KC \rightarrow \infty$, tem-se um escoamento com velocidade constante, em que os efeitos inerciais são desprezíveis. Deste modo, calcula-se o valor de C_h .

Outro parâmetro a ser avaliado é número de Reynolds oscilatório, que é o número de Reynolds associado a máxima velocidade U_m do escoamento

$$Re_{osc} = \frac{U_m L_c}{\nu}$$

Onde ν é viscosidade cinemática da água.

Pode-se verificar que Re_{osc} e KC se relacionam da seguinte forma:

$$Re_{osc} = \frac{L_c^2 f}{\nu} KC$$

Dessa maneira, os valores de C_a podem ser obtidos experimentalmente ensaiando o modelo de interesse em movimento oscilatório em água parada e medindo-se os esforços em sua estrutura. E para a obtenção dos valores de C_h , o modelo deve ser ensaiado sem movimento em uma corrente constante do escoamento. Para os dois tipos de ensaios, a frequência e a amplitude de oscilação do

modelo – obtenção de C_a - e a intensidade da corrente do escoamento – obtenção de C_h - são obtidas de forma que Re_{osc} seja equivalente a Re .

3.2.3. Matriz de inércia adicional, matriz de forças e momentos hidrodinâmicos e matriz de massa estrutural do sistema

Um corpo livre submerso, como é o caso de um *manifold*, pode se movimentar em 6 graus de liberdade: 3 graus relativos as translações e 3 graus relativos a as rotações. Adotando para a explicação um sistema de coordenadas numérico, para facilitar a representação dos movimentos do corpo no eixo de coordenadas ortogonal, deslocamentos lineares (translação) ao longo dos eixos x, y e z recebem os índices 1, 2 e 3, respectivamente, enquanto os deslocamentos angulares (rotação) ao longo dos eixos x, y e z recebem os índices 4, 5 e 6, respectivamente, conforme Fig. (2).

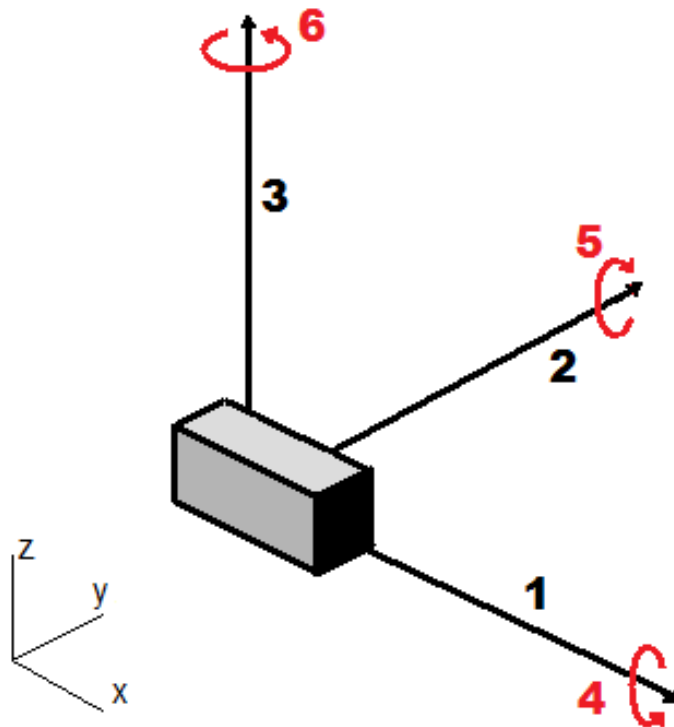


Figura 2. Sistema de coordenadas adotado para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos.

O movimento do corpo em uma direção pode gerar forças inerciais em qualquer uma das direções ortogonais. Por exemplo, o movimento no eixo x (1) pode provocar forças inerciais no eixo z(3) ou um torque no eixo y (5). Neste caso, seriam determinados o coeficiente de massa adicional na coordenada 3 provocada pela oscilação do corpo na coordenada 1, definida como C_{a13} ; e o coeficiente de momento de inércia adicional na coordenada 5 provocado pela oscilação do corpo na coordenada 1, definida por C_{a15} . Percebe-se então que o movimento do corpo em cada direção provoca forças em cada um dos 6 graus de liberdade, e existe um total de 36 coeficientes de forças inerciais, que podem ser agrupados na seguinte *matriz de inércia adicional*:

$$[C_a] = \begin{bmatrix} C_{a11} & C_{a12} & C_{a13} & C_{a14} & C_{a15} & C_{a16} \\ C_{a21} & C_{a22} & C_{a23} & C_{a24} & C_{a25} & C_{a26} \\ C_{a31} & C_{a32} & C_{a33} & C_{a34} & C_{a35} & C_{a36} \\ C_{a41} & C_{a42} & C_{a43} & C_{a44} & C_{a45} & C_{a46} \\ C_{a51} & C_{a52} & C_{a53} & C_{a54} & C_{a55} & C_{a56} \\ C_{a61} & C_{a62} & C_{a63} & C_{a64} & C_{a65} & C_{a66} \end{bmatrix}$$

De maneira análoga, o escoamento de uma corrente uniforme em uma determinada direção gera forças e momentos hidrodinâmicas nas 6 coordenadas, resultando num total de 36 coeficientes, agrupados na seguinte matriz de força e momentos hidrodinâmicos:

$$[C_h] = \begin{bmatrix} C_{h11} & C_{h12} & C_{h13} & C_{h14} & C_{h15} & C_{h16} \\ C_{h21} & C_{h22} & C_{h23} & C_{h24} & C_{h25} & C_{h26} \\ C_{h31} & C_{h32} & C_{h33} & C_{h34} & C_{h35} & C_{h36} \\ C_{h41} & C_{h42} & C_{h43} & C_{h44} & C_{h45} & C_{h46} \\ C_{h51} & C_{h52} & C_{h53} & C_{h54} & C_{h55} & C_{h56} \\ C_{h61} & C_{h62} & C_{h63} & C_{h64} & C_{h65} & C_{h66} \end{bmatrix}$$

Aplicando as aproximações da Equação de Morison em todas as direções, chega-se a equação de movimento do corpo, dada na forma matricial por:

$$[M_0]\{X_0\} = \rho V [C_a] \{\ddot{X}\} + \frac{1}{2} \rho L_c [C_h] \{\dot{X}|\dot{X}\}$$

Onde $\{X\} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{Bmatrix}$ é o vetor deslocamento do corpo nos seis graus de

liberdade (Ω_x , Ω_y e Ω_z são as rotações em torno nos eixos x, y e z, respectivamente);

e:

$$[M_0] = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 & 0 & m_0 g_3 & m_0 g_2 \\ 0 & m_0 & 0 & m_0 g_3 & 0 & m_0 g_1 \\ 0 & 0 & m_0 & m_0 g_2 & m_0 g_1 & 0 \\ 0 & m_0 g_3 & m_0 g_2 & I_{44} & I_{45} & I_{46} \\ m_0 g_3 & 0 & m_0 g_1 & I_{54} & I_{55} & I_{56} \\ m_0 g_2 & m_0 g_1 & 0 & I_{64} & I_{65} & I_{66} \end{bmatrix}$$

é a matriz de massa estrutural do sistema.

Nota-se que a matriz de massa estrutural é simétrica, porem não diagonal. Isso se deve ao fato de que os coeficientes adimensionais são calculados em relação aos eixos geométricos do modelo, e não aos eixos principais de inércia. Isso provoca o aparecimento dos termos cruzados ($m_0 g_j$) não nulos, onde g_j representa a distância do centro de gravidade ao centro geométrico na direção j.

4. MANIFOLDS

Os *manifolds* são estruturas submarinas, integrantes do conjunto de equipamentos para a extração de petróleo, que podem ser de vários tipos e possuir várias funções [12]. Diferentes tipos desse equipamento são listados a seguir:

- *FLOWLINE GATHERING MANIFOLD* – consiste de uma estrutura submarina que recebe tubos vindos de árvores-de-natal molhadas e os distribui para *risers* de produção conectados às plataformas na superfície do oceano;
- *TEMPLATE MANIFOLD* - Estrutura tubular metálica, apoiada no fundo do oceano, que possui válvulas e acessórios que permitem sua conexão a árvores-de-natal molhadas, poços de extração, outros *manifolds*, *risers* e demais tubulações;
- MSGA/MSGB - *Manifolds* submarinos de gás de alta/baixa pressão (MSGA – alta; MSGB – baixa) utilizados na Bacia de Campos, formados por um conjunto de válvulas e conexões submarinas para fluxo de gás entre leito e superfície oceânicos;

Em geral, uma estrutura denominada *manifold* é constituída por um conjunto de tubulações e válvulas, com a função de receber, armazenar e enviar óleo e gases durante o complexo processo de extração de petróleo. A Fig. (3) mostra um desenho técnico da perspectiva isométrica de um *manifold* típico, e a Fig. (4) mostra a foto de um *manifold* sendo lançado para o fundo do mar. Suas dimensões são geralmente por volta de 20 m de comprimento, 10 m de largura e 5 m de altura.

O processo de instalação de um *manifold* geralmente é feito como mostra a foto da Fig. (4). A estrutura é lançada para o fundo do mar apoiada em cabos que a liga até a plataforma, e é monitorada durante sua descida por sensores de posição hidroacústicos. Durante a descida, porém, um dos problemas mais críticos para a realização do processo está nas forças hidrodinâmicas que a estrutura sofre, devido interação entre seu movimento e a água do mar. Essas forças hidrodinâmicas podem ser críticas durante a operação e comprometer uma instalação bem sucedida e, portanto, precisam ser cuidadosamente estimadas com base em ensaios experimentais e numéricos a cerca de tal problema.

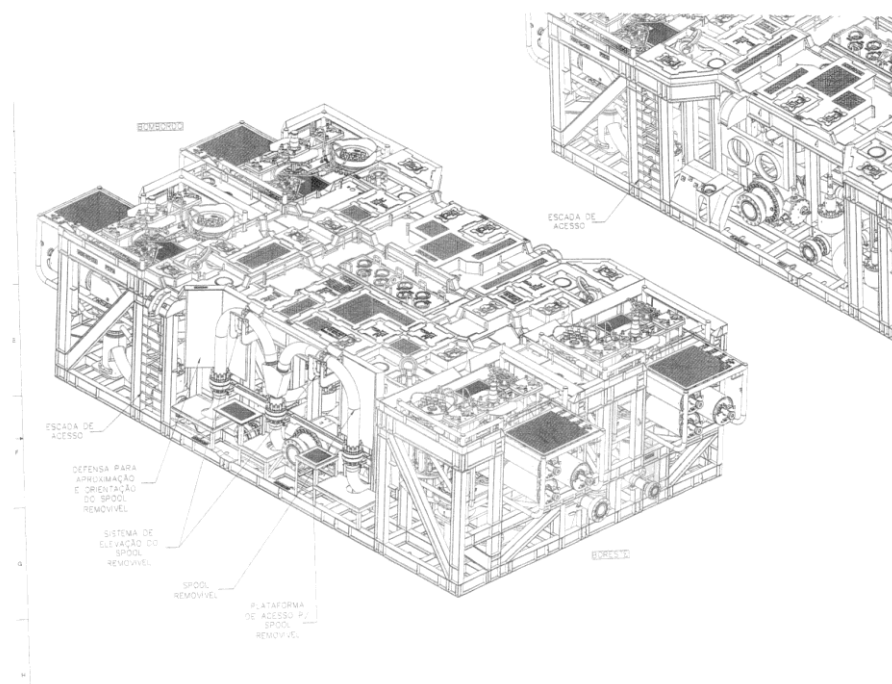


Figura 3. Desenho técnico de perspectiva isométrica de um *manifold* típico (fornecido pelo Projeto Petrobras / FMC Technologies: *Manifold SSAO Marlin Station*).



Figura 4. Foto de um *manifold* sendo lançado para o fundo do mar (www.offshore-technology.com, 2010).

4.1. Modelos de *manifolds* para ensaio experimental

A partir dessas características típicas levantadas para estrutura, geometria e função de um *manifold*, partiu-se à elaboração de modelos, em escala reduzida, para representar tal equipamento em ensaios no canal de água de testes, simulando condições de escoamento encontradas na sua instalação e na sua plena operação (já fixos no fundo do mar).

A seguir são apresentadas as descrições das etapas necessárias para a elaboração e construção dos modelos, entre elas o estudo da técnica de prototipagem rápida utilizada para a sua confecção, e o banho dos modelos em solução de soda cáustica, necessário para remoção do material de suporte utilizado pela máquina, juntamente com os detalhes das geometrias construídas para os modelos 1 e 2.

4.1.1. Máquina de Prototipagem Rápida

“Prototipagem rápida” é uma técnica de construção automatizada de objetos físicos utilizando a tecnologia de manufatura de adição de material. Essa tecnologia transforma um desenho 3D, feito em CAD, em “fatias” finas horizontais, virtuais, e então realiza a deposição de material seguindo a forma dessas fatias, criando sucessivas camadas até o objeto construído ser completado.

Há diferentes tecnologias para o processo de deposição do material. Algumas máquinas realizam a deposição de material derretido ou macio; outras depositam líquidos termoplásticos que posteriormente são curados e endurecidos, de diferentes maneiras.

Para a construção dos modelos de *manifolds* deste projeto, algumas restrições foram impostas na seleção da máquina de prototipagem rápida a ser adquirida pelo NDF:

- O material para a confecção do modelo não pode ser higroscópico;
- A espessura da “fatia” para a deposição do material deve ser a menor possível, para garantir a máxima riqueza de detalhes ao modelo;
- O volume máximo de fabricação deve ser capaz de confeccionar um modelo com as dimensões desejadas.

Com base nestas imposições, a máquina selecionada pelo NDF foi a *Dimension Elite*, mostrada na Fig. (5). Este modelo possui a tecnologia *FDM* (*Fused Deposition Modeling*). O material depositado na confecção dos objetos é o *ABSplus*, que não absorve água e é resistente mecanicamente. A espessura mínima para deposição desse material é de 0.178 mm, e a dimensão máxima do objeto fabricado é de 203 x 203 x 305 mm. A máquina *Dimension Elite* ainda possui a tecnologia *SST* (*Soluble Support Technology*), que permite a construção de modelos com estruturas internas com alto grau de complexidade, visto que o material depositado como molde para o modelo é solúvel e pode ser removido após o término da construção. O modelo fabricado ainda pode ser usinado e tratado superficialmente para a obtenção do acabamento e das tolerâncias dimensionais desejadas.



Figura 5. Máquina de Prototipagem Rápida *Dimension Elite*.

4.1.2. Banho em soda cáustica para remoção do material de molde

A máquina de prototipagem rápida adquirida pelo NDF, como já dito, é capaz de confeccionar objetos com estruturas internas, com grau elevado de complexidade. Para tanto, ele emprega em seu funcionamento a deposição de um material para molde do modelo, que preenche espaços internos e dá suporte para a deposição do plástico *ABSplus* que dará forma ao objeto criado. Este material de molde pode ser

removido após o término da construção, pois se torna quebradiço e frágil ao esfriar à temperatura ambiente e, além disso, é solúvel em banho adequado de soda cáustica. De acordo com as especificações do plástico *ABSplus*, foi adquirido um produto adequado para preparação de tal solução, *WaterWorks Soluble Concentrate*, da *Stratasys Inc.* - uma soda cáustica em pó para mistura em água -, e foi comprada também uma cuba elétrica de aquecimento para manter o banho na faixa dos 60° graus Celsius.

Na construção do modelo 1, detalhada na seção seguinte, não foi necessário este banho, visto que suas cavidades internas eram geometricamente simples e a remoção do material molde pôde ser feita manualmente, diferentemente da preparação do modelo 2, também descrita com detalhes mais adiante. O equipamento citado e a soda cáustica utilizada podem ser vistos na Fig. (6).



Figura 6. Equipamento utilizado para banho de soda cáustica nos modelos de prototipagem rápida.

4.1.3. Modelo 1

O modelo 1 desenvolvido, cuja foto está apresentada na Fig. (7), possui forma de um paralelepípedo, com dimensões externas de 196 x 106 x 55 mm, escala que corresponde a aproximadamente 1:80 para os *manifolds*. Três furos passantes atravessam o centro das faces do modelo, passando pelo seu centro geométrico, feitos para a instalação de eixos de suporte e posicionamento do modelo no canal de testes.

O interior do paralelepípedo é constituído de cavidades ortogonais, a fim de proporcionar rigidez suficiente ao modelo sem que este possua massa em excesso e, ao mesmo tempo, oferecer a possibilidade de variar os momentos de inércia do corpo, pela adição de massas no interior de algumas dessas cavidades.

A geometria elaborada para o modelo 1 é consideravelmente simples, diante do que se vê na geometria de um *manifold* real. A justificativa para essa simplificação é de que o modelo, visto que possui a forma de um paralelepípedo, pode ter seus parâmetros - como coeficiente de arrasto, matriz de inércia adicional, etc. - encontrados na literatura, ou estimados analiticamente, e dessa maneira ele pode ser usado para avaliar a precisão e a sensibilidade dos equipamentos de medição utilizados, como o PIV e células de carga de 6 graus de liberdade, projetadas por outros pesquisadores do Núcleo.

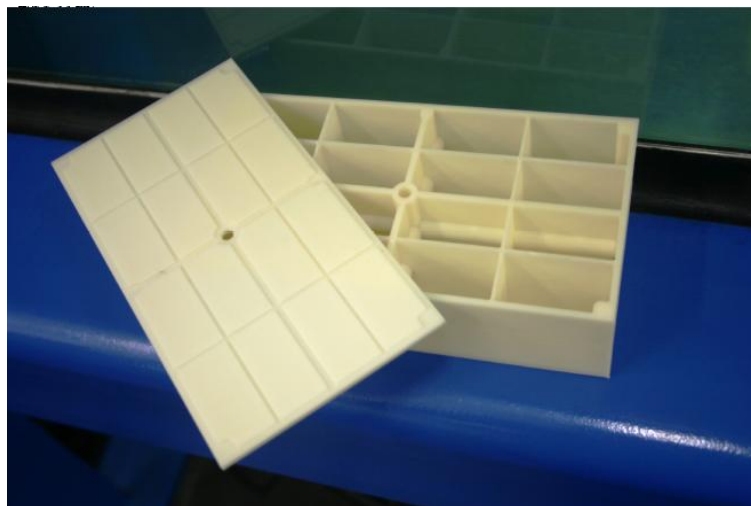


Figura 7. Foto do modelo 1.

4.1.4. Modelo 2

Buscando uma forma geométrica mais próxima daquela de um *manifold* típico, mas sem comprometer a praticidade do modelo de ser ensaiado, e tendo em vista também as observações e conclusões feitas a respeito da geometria do modelo 1, foi construído o modelo 2, vide Fig. (8).



Figura 8. Foto do modelo 2.

O modelo 2 tem o formato externo próximo ao de um cubo, de 10 cm de aresta, e é formado por “tubos” retorcidos entre si, de maneira a se aproximar do formato das tubulações em um *manifold* real, e de uma “grade” retangular em duas de suas faces, para simular a base da estrutura real, que fica sobre o leito oceânico. Além disso, três furos passantes atravessam os centros das faces do modelo, feitos para a instalação de eixos de suporte e posicionamento deste no canal, da mesma maneira que do modelo 1.

O modelo foi desenhado em software de CAD e posteriormente gerado na máquina de prototipagem rápida. Como sua geometria possui muitos vãos internos, entre os tubos retorcidos, e entre a ligação das duas grades e tais tubos, foi necessário no modelo um banho de soda cáustica, já descrito na seção 4.1.2., por um tempo de aproximadamente 15h, para a remoção do material de molde que persistiu nesses locais. Esse tempo de 15h não foi contínuo: o modelo foi retirado do banho para não passar uma noite na solução, e colocado na solução no dia seguinte, a fim de não se perder o controle de quanto tempo levaria para a remoção completa do material de molde, já que o equipamento e o produto para o banho estavam sendo usados pela primeira vez. Acredita-se, pela experiência já adquirida com este e outros banhos em modelos, que se não tivesse ocorrido essa interrupção – em que o modelo teve de ser lavado e mantido seco fora da solução – o tempo necessário de banho seria de aproximadamente 10h.

5. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DOS CAMPOS DE VELOCIDADES

A seguir são apresentadas descrições de duas principais técnicas de medição de velocidades do escoamento em um canal de testes: Anemometria de Filme Quente (CTA) e Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV).

5.1. Anemometria de Filme Quente

A Anemometria de Filme Quente – CTA (*Constant Temperature Anemometry*) é uma técnica para medir velocidades em pontos de escoamentos fluidos. É um método bastante comum, que utiliza um circuito elétrico cuja corrente se ajusta de forma a manter constante a temperatura de um fio sensor (“fio quente” ou “filme quente”) que fica imerso no escoamento, ou seja, toda a energia térmica dissipada no circuito elétrico é transferida para o fluido. Chega-se então a uma relação matemática que relaciona a velocidade do escoamento com a corrente medida no circuito e com a energia térmica transferida do circuito para o fluido, e que fornece uma série temporal da velocidade do escoamento no ponto em que se encontra o fio sensor (ÁSSI, 2005).

5.2. Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV

Velocimetria por Imagens de Partículas - PIV (*Particle Image Velocimetry*) é uma técnica óptica que avalia o campo de velocidades por meio da iluminação de um plano do escoamento com feixes de laser. Seu princípio de funcionamento consiste na adição de partículas em suspensão ao escoamento, capazes de refletir a luz do laser (GRANT, 1997).

O sistema possui dois canhões de laser que iluminam um plano do escoamento que se deseja investigar, com feixes pulsantes de laser, e duas câmeras filmadoras, posicionadas ortogonalmente ao plano iluminado, que registram a posição das partículas em dois instantes consecutivos, separados por um intervalo de tempo muito pequeno.

Segundo Prasad (2000), as duas fotografias obtidas são comparadas pelo software que comanda o sistema: em cada *pixel* do plano iluminado e filmado, o programa analisa a posição das partículas na primeira fotografia, e compara com a

posição das mesmas partículas percebida na segunda fotografia. Sabendo o intervalo de tempo em que ocorreu tal deslocamento das partículas – intervalo de tempo entre as duas fotografias -, obtém-se um conjunto de vetores velocidade para as partículas captadas e, conseqüentemente, um mapa do campo vetorial de velocidades no plano analisado.

O processo descrito acima é feito repetidamente, em alta frequência, de maneira que o sistema de PIV consegue obter o campo de velocidades do plano iluminado ao longo do tempo (um “filme” do campo de velocidades daquele plano), ou seja, uma medição euleriana da velocidade do escoamento (KORKISCHKO, 2006).

O Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Experimental e Anemometria Laser do NDF possui sistema *Laser-PIV* da empresa TSI, o qual utiliza o software *DaVis* para processamento das imagens capturadas.

6. ENSAIOS NO CANAL DE TESTES

Nesta seção estão descritos os ensaios realizados com os dois modelos construídos, juntamente com as tarefas necessárias para tanto, como a construção dos suportes para fixação dos modelos no canal e as calibrações dos sistemas de medição.

6.1. Calibração do Sistema PIV

Antes do início das medições com o sistema PIV, faz-se necessário um procedimento de calibração do equipamento, que está descrito a seguir.

Como já dito, o sistema em questão possui duas câmeras para captura das imagens de um plano escolhido do escoamento, além do feixe de *laser* para iluminar tal plano. Deve-se então relacionar adequadamente a posição das duas câmeras, para que ambas estejam focadas no mesmo plano (escolhido para a medição), e também a do feixe de *laser*, para que ele esteja iluminando este mesmo plano. As lentes das câmeras utilizadas para todos os ensaios foram lentes 50 mm.

Para tal posicionamento, é utilizada uma placa para ajuste de foco, Fig. (9), que é posicionada dentro do canal na região do plano de interesse. É com referência nessa placa que as duas câmeras e o *laser* são posicionados.

Primeiramente, todo o equipamento é ligado: as duas câmeras, os dois canhões do feixe de *laser* (que demoram cerca de 20 min para esquentarem e estarem prontos para uso), e o computador com o software *DaVis*, que controla o equipamento. Uma vez posicionada a placa no plano de interesse do canal, conforme Fig. (9), é ajustada a posição das câmeras, de forma que elas estejam focalizadas nas bolinhas brancas da placa. As câmeras já se encontram fixas num suporte adequado, que permite ajuste horizontal e vertical de cada uma independentemente, mostrado na Fig. (10).

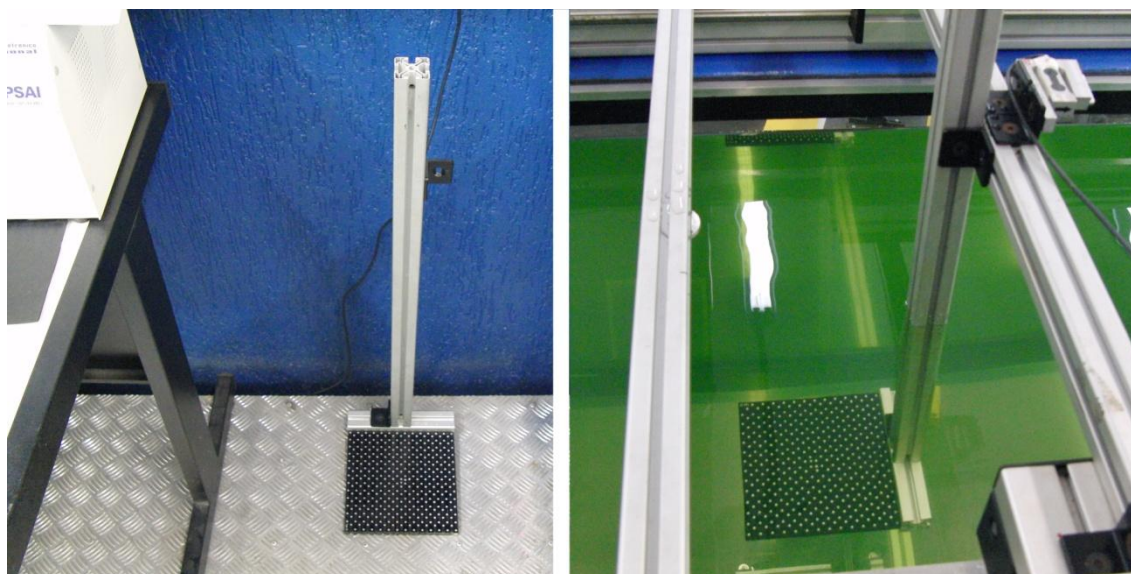


Figura 9. Placa para ajuste de foco (fora do canal, à esquerda, e já posicionada no canal, à direita).

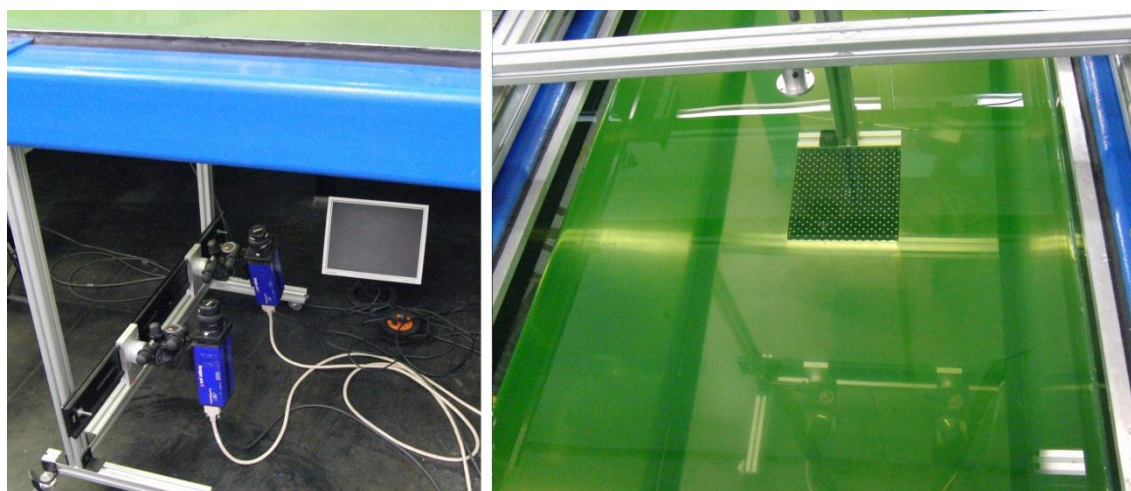


Figura 10. Câmeras posicionadas embaixo do canal (à esquerda); vista superior do canal, mostrando as câmeras focalizadas na placa (à direita).

Parte-se então para o posicionamento do feixe de *laser*. Com os canhões ligados em potência baixa, de 10% (de forma que a iluminação possa ser observada sem uso de óculos especiais), é feito o ajuste da posição da plataforma onde se encontram os canhões, bem como o ajuste de sua altura, de forma a posicionar o plano iluminado à mesma altura da placa de calibração, conforme Fig. (11).



Figura 11. Canhões de *laser* posicionados de acordo com a placa de calibração.

Feito esse posicionamento manual, a calibração é finalizada com um comando no programa *DaVis* para ajuste fino do foco das câmeras, a fim de que elas capturem as imagens como se suas lentes estivessem posicionadas paralelamente ao plano de medição. O equipamento em questão é capaz de medir o campo de velocidades de um plano de aproximadamente 210 x 160 mm, conforme Fig.(12), foto que mostra a imagem física capturada pelo sistema. A frequência de captura das imagens, definida diretamente no programa, foi de 15 Hz para todos os ensaios realizados.

Finalmente, com todo o sistema PIV devidamente posicionado e calibrado, é feito o posicionamento do modelo a ser ensaiado, de acordo com a altura e posição da placa de calibração, ainda fixada no canal. Nas seções seguintes, em que são apresentados detalhadamente os ensaios, o posicionamento dos modelos está descrito mais a fundo.

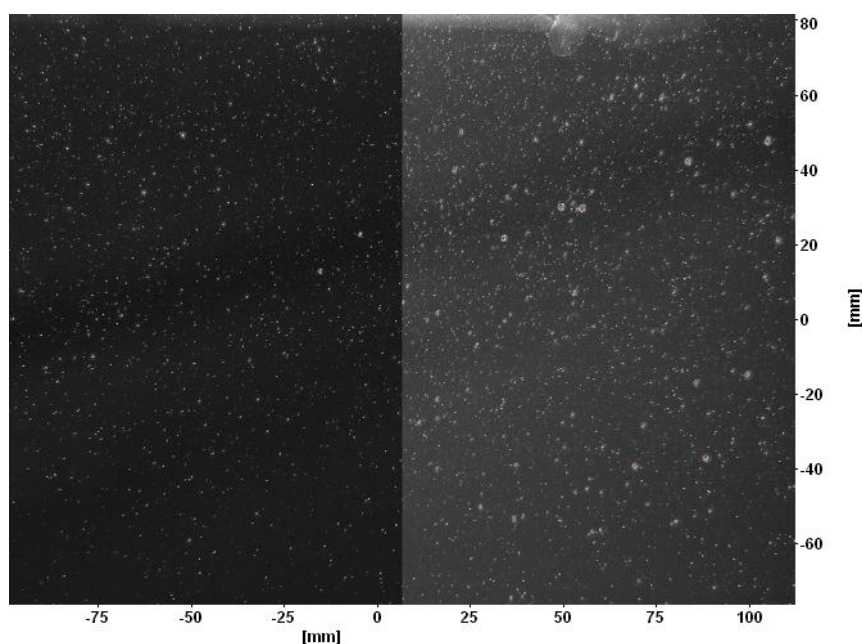


Figura 12. Foto das partículas no escoamento captada pelas câmeras do sistema PIV.

6.2. Posicionamento dos modelos no canal

De acordo com a proposta inicial deste projeto, os ensaios previstos exigiram a elaboração e construção de suportes e fixadores para os modelos na seção de testes do canal, cuja descrição está apresentada a seguir.

6.2.1. Suporte para fixação dos modelos no canal

O suporte elaborado, para a fixação tanto do modelo 1 como do modelo 2, consiste de um eixo cilíndrico de 15 mm de diâmetro e 450 mm de comprimento, vide Fig. (13), de aço inox, com uma ponta de 25 mm rosqueada para encaixe nos modelos, no local de seus furos passantes já citados, e a sua outra ponta acoplada a uma bucha de alumínio, presa a uma célula de carga, projetada pelo Núcleo, e instalada para a realização de ensaios simultâneos aos deste projeto.



Figura 13. Ferrão de suporte para os modelos.

Para a junção entre o ferrão e o modelo 1, foram feitas roscas nos furos passantes das suas três faces ortogonais, e o encaixe se dá diretamente rosqueando o ferrão no modelo. Já para o modelo 2, os furos passantes de sua estrutura possuíam diâmetro maior do que a ponta rosqueada do ferrão, e foi necessária a construção de buchas, vide Fig. (14), para intermediar o encaixe ferrão – modelo.

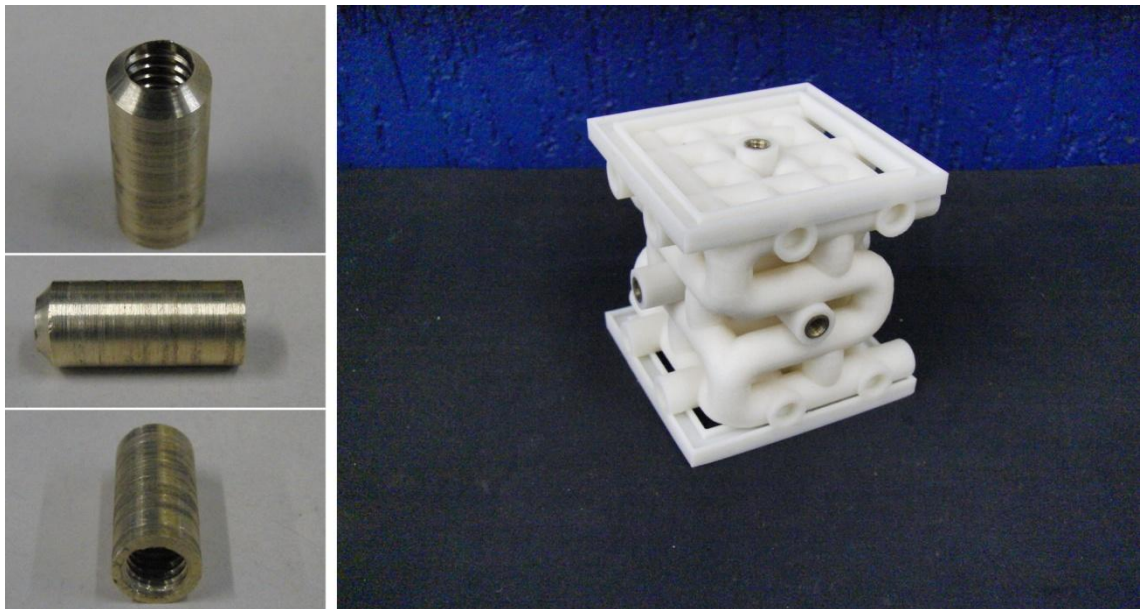


Figura 14. Buchas para junção entre o modelo 2 e o ferrão de suporte.

6.3. Ensaaios com o modelo 1

O intuito dos ensaios realizados com o modelo 1, como previsto, foi o mapeamento do campo de velocidades na esteira do escoamento ao redor de sua estrutura. A Fig. (15) mostra a configuração de uma das três posições de ensaio, evidenciando o sentido da corrente de água (flecha vermelha) e o plano horizontal observado pelo sistema PIV (em verde claro). Observa-se também o ferrão de suporte, preso à célula de carga, anteriormente citada, para medição de forças hidrodinâmicas no modelo por outros pesquisadores do grupo.

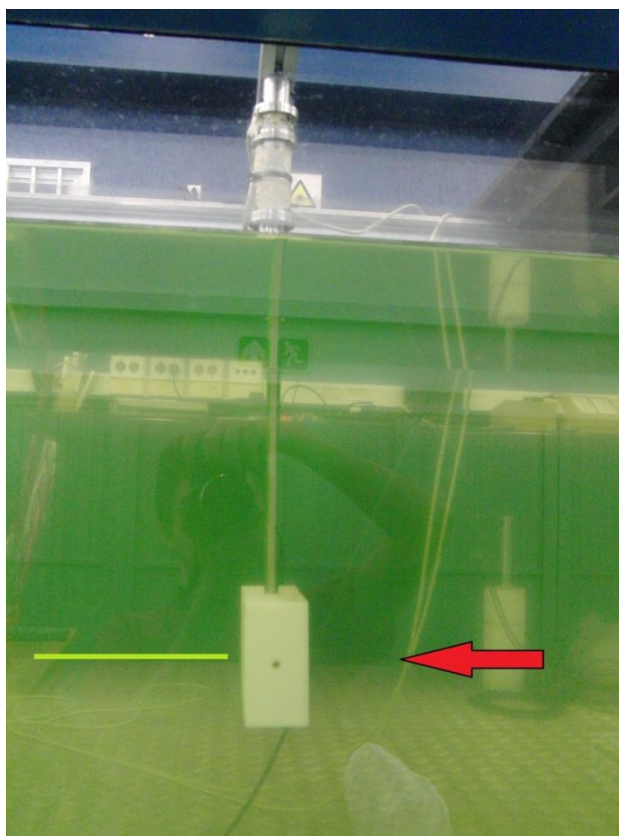


Figura 15. Ensaio do modelo 1 em uma de suas três posições diferentes.

O modelo 1 foi ensaiado em três posições diferentes: em cada uma delas, uma de suas três faces ortogonais foram posicionadas ortogonalmente à direção da corrente incidente. Em todas as três configurações, a região observada pelo sistema PIV foi um plano (de aproximadamente 210 x 160 mm) situado à jusante do escoamento, a cerca de 30 mm de distância horizontal do modelo, e em uma altura

coincidente com aquela do seu centro geométrico (à “meia altura” do modelo, como mostra a Fig. (15)). Em todas essas três situações, a velocidade da corrente do canal foi mantida em aproximadamente 0,1 m/s, que corresponde a um número de Reynolds da ordem de 10.000 (o valor varia de acordo com a posição do modelo – dimensão característica).

6.4. Ensaios com o modelo 2

De maneira semelhante aos ensaios com o modelo 1, o modelo 2 também foi experimentado, com a diferença de que sua estrutura foi posicionada em apenas duas configurações diferentes, vide Fig. (16), com a justificativa de que sua geometria externa se assemelha bastante à de um cubo, e a posição que não foi ensaiada (posição da direita na Fig. (16)) seguramente geraria resultados muito próximos aos de uma das outras duas (posição do meio). Na Fig. (17) consta uma foto do modelo 2 devidamente fixado no canal para a realização dos ensaios descritos, na “1ª posição” conforme Fig.(16).

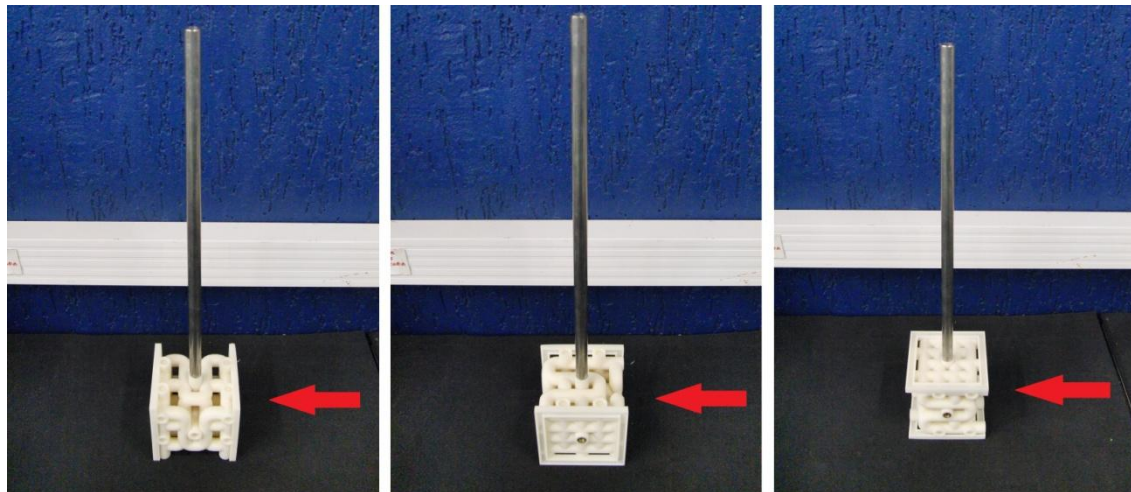


Figura 16. Posições de ensaio com o modelo 2: à esquerda, 1ª posição ensaiada; no meio, 2ª posição ensaiada; à direita, posição não ensaiada, por ser muito semelhante à 2ª posição.

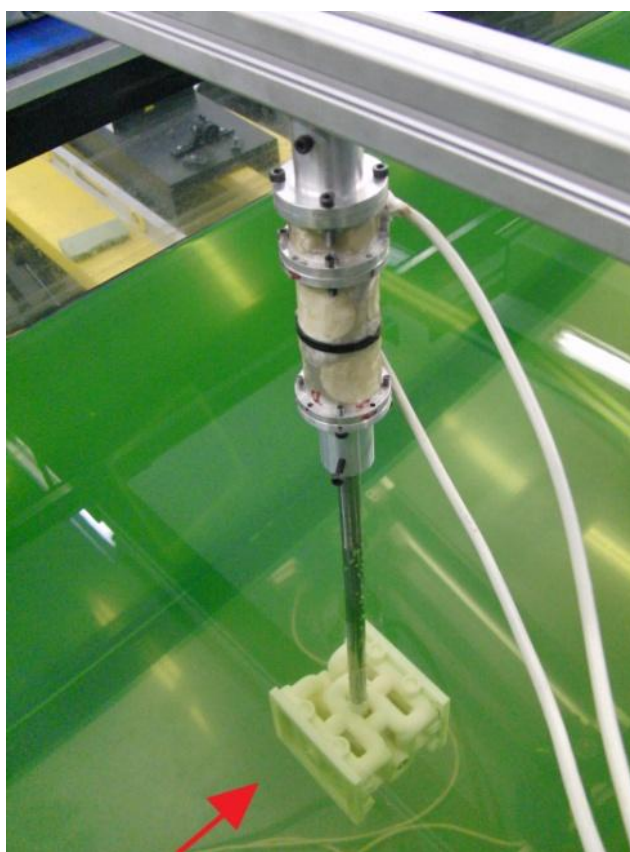


Figura 17. Modelo 2 na 1ª posição ensaiada.

7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os dados obtidos das medições feitas nos ensaios dos dois modelos, bem como aqueles que puderam ser calculados a partir dos primeiros, e também uma análise geral de todas as informações coletadas.

7.1. Resultados com o modelo 1

Nos ensaios descritos, feitos com o modelo 1, foi obtido o campo instantâneo de velocidades na esteira do escoamento ao redor do modelo, obtendo-se um total de 345 campos de vetores velocidade discretizados em um intervalo de tempo de aproximadamente 23 s. A Fig. (18) mostra um desses 345 campos vetoriais (especificamente, o 160º campo gerado) no ensaio com o modelo na posição da Fig. (15), e as Fig.(19) e (20) mostram o 160º campo gerado com o modelo nas outras duas posições de ensaio descritas.

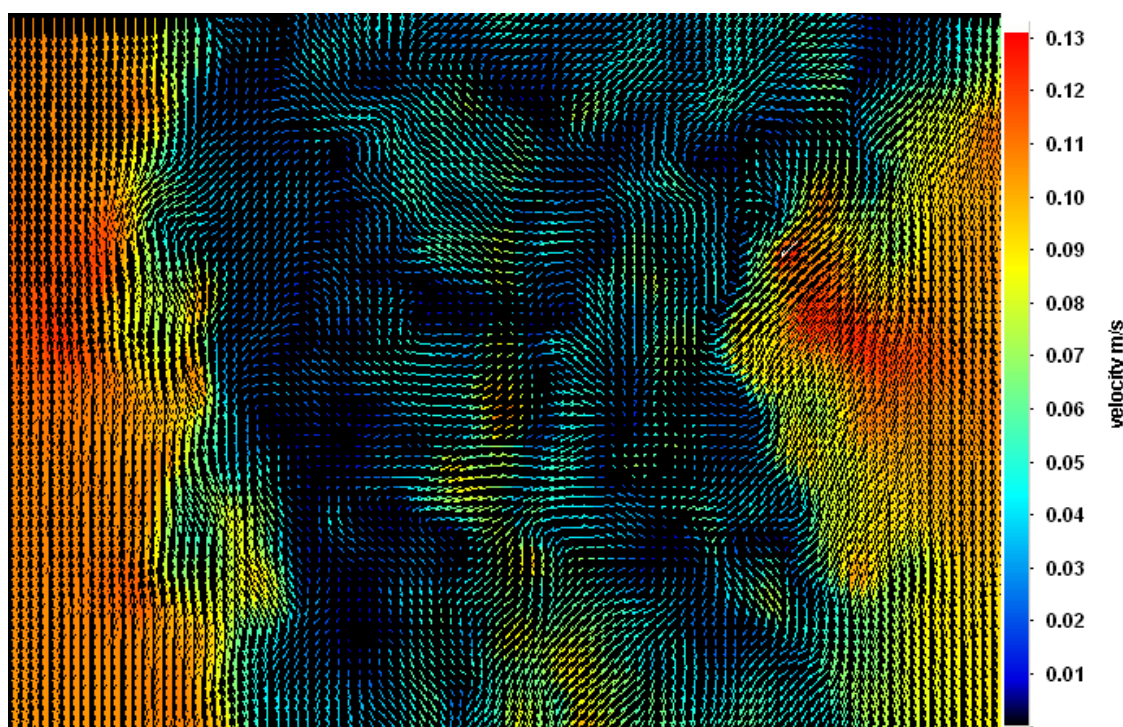


Figura 18. Campo instantâneo de velocidades para o modelo 1 na posição da Fig. (14).

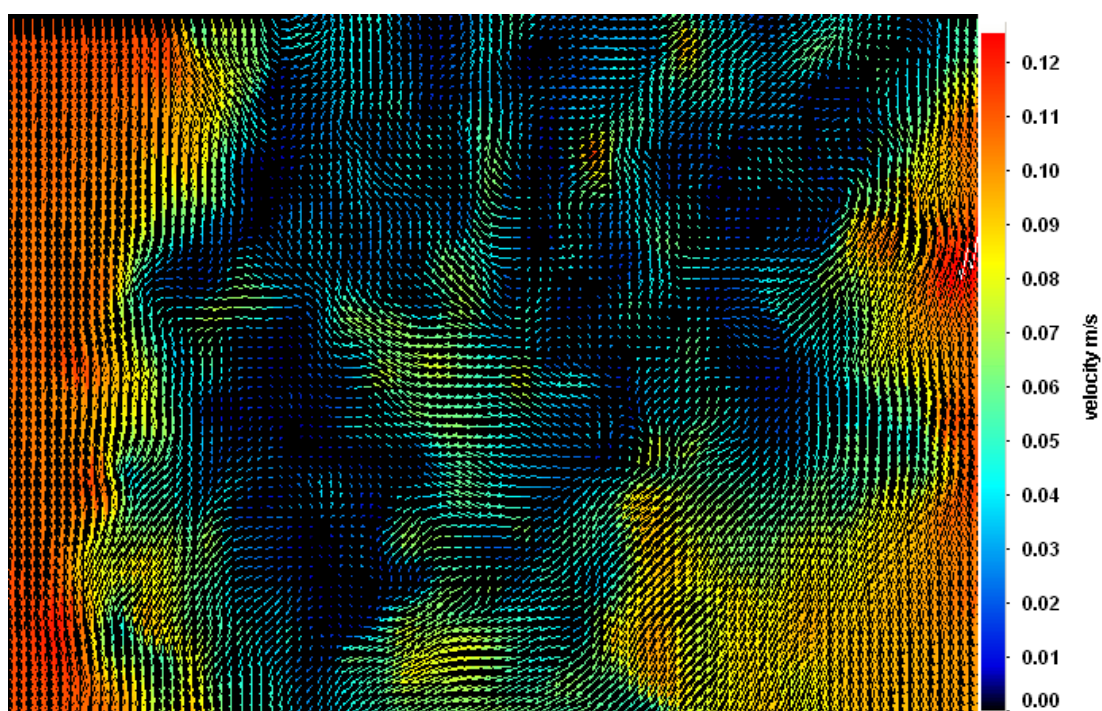


Figura 19. Campo instantâneo de velocidades para o modelo 1 na 2ª posição.

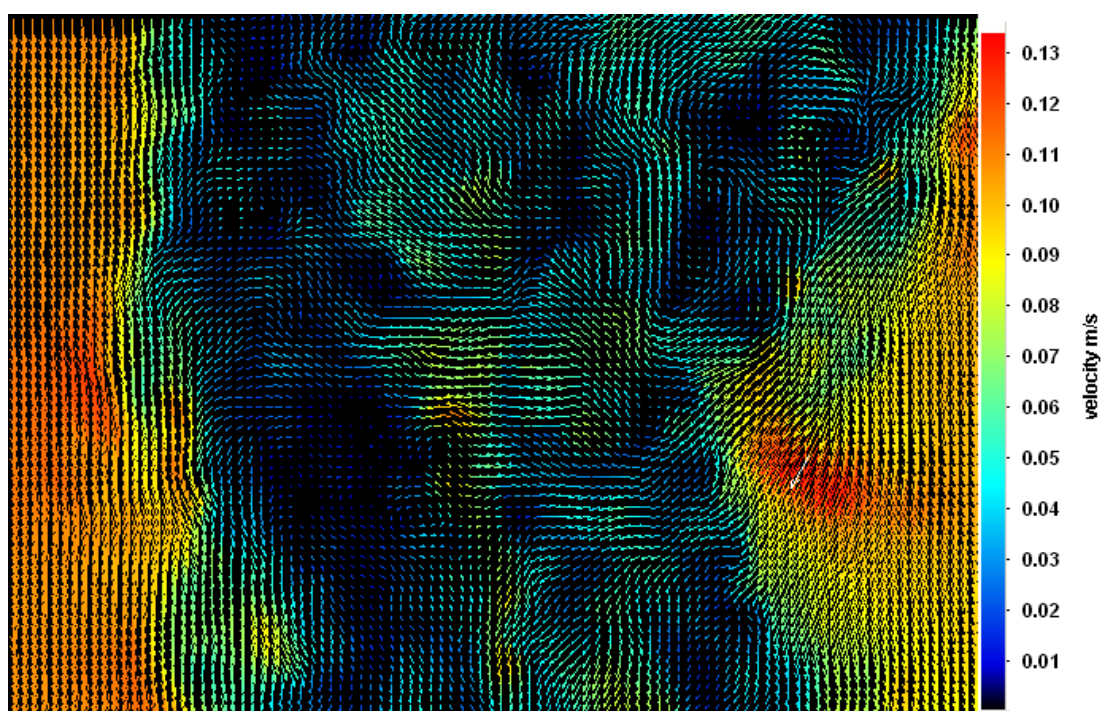


Figura 20. Campo instantâneo de velocidades para o modelo 1 na 3ª posição.

Não é conveniente mostrar neste relatório os 345 campos discretos da velocidade instantânea para as três posições ensaiadas do modelo. A observação que pôde ser feita é que os resultados dos três casos foram muito próximos: fato coerente,

visto que o modelo trata-se de um paralelepípedo, de dimensões todas da mesma ordem, próximas (196 x 106 x 55 mm) e, portanto, a esteira do escoamento ao redor do modelo ocorre da mesma maneira, não importando a face do modelo que está ortogonal à corrente incidente. Outra observação possível é que a esteira se apresenta bastante perturbada, com formação de vórtices bastante irregular, sendo difícil estabelecer um padrão ou mesmo um período para tal fenômeno.

Na Fig. (21) é apresentado um mapa da componente V_z da velocidade instantânea no plano analisado (também do 160° campo gerado), para o modelo na 1ª posição (Fig. (15)), visto que as Fig. (18), (19) e (20) mostram os vetores velocidade apenas em 2D (mostram a componente da velocidade no plano x-y), e sua escala de cores representa o módulo desses vetores 2D. Para as outras duas posições ensaiadas, não são mostrados esses mapas de V_z , devido à semelhança dos resultados já explicada.

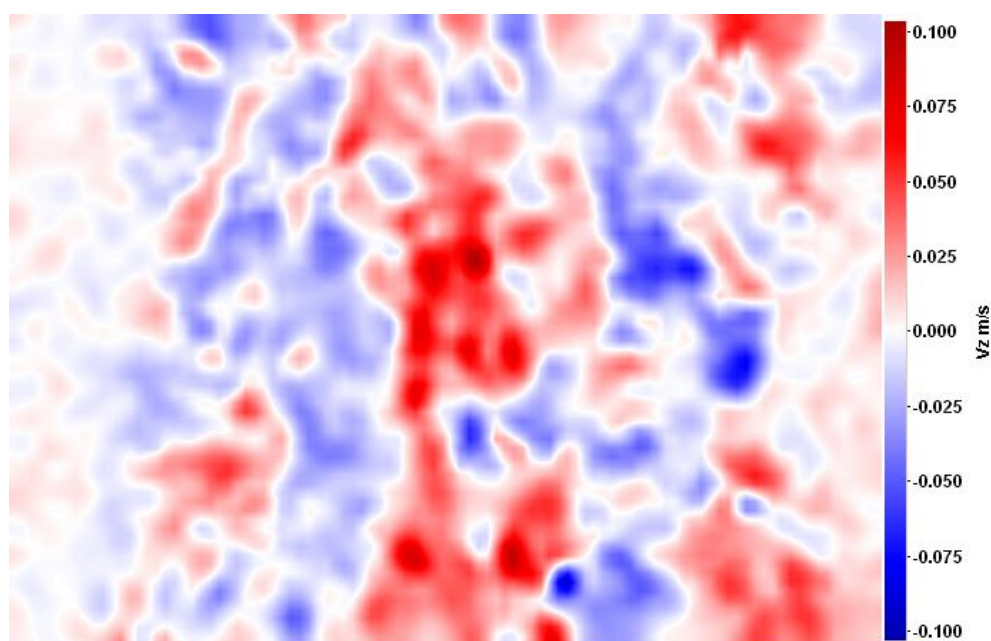


Figura 21. Mapa da componente V_z do campo instantâneo de velocidades para o modelo na 1ª posição ensaiada (Fig. (15)).

Pode-se analisar novamente o forte efeito da tridimensionalidade do modelo, uma vez que os vetores velocidade no plano analisado apresentam componentes na direção z (vertical) tanto positivas como negativas, espalhadas na esteira sem um padrão bem definido.

Com os campos instantâneos de velocidades obtidos, pôde ser calculado também o campo instantâneo de vorticidades, para as três situações. A Fig. (22) mostra o 160º campo instantâneo de vorticidade gerado para o modelo na 1ª posição (Fig. (15)), em que a escala de cores representa a intensidade do vetor vorticidade (Rot_z), e também o sentido – tons em laranja são vetores saindo do plano e tons em azul são vetores entrando no plano. Foi possível observar novamente, com os campos de vorticidade, a semelhança entre as esteiras geradas nas três posições ensaiadas.

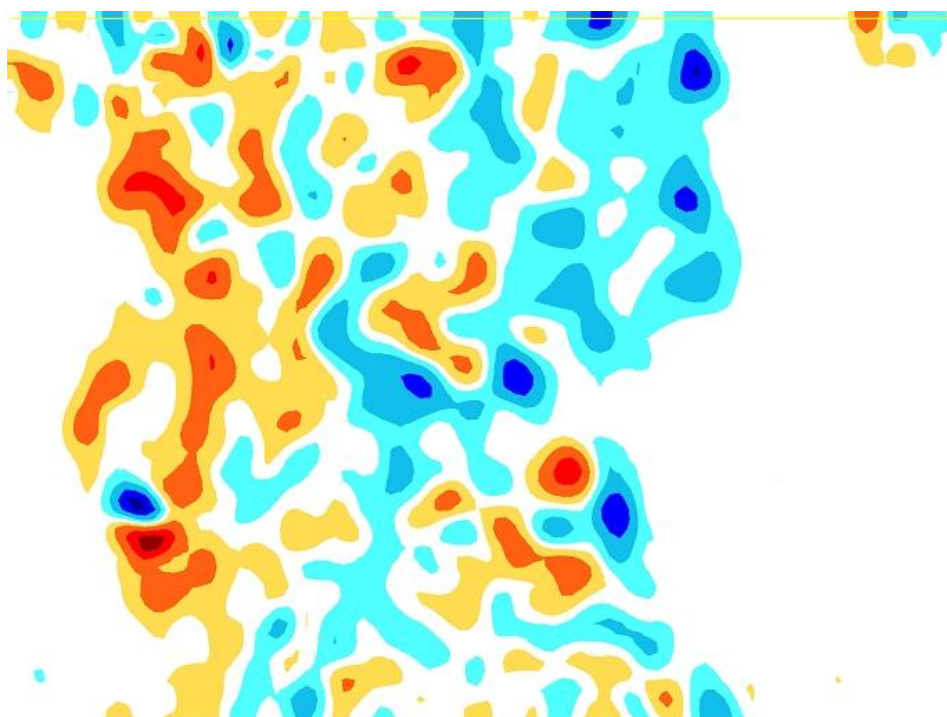


Figura 22. Campo instantâneo de vorticidades para o modelo 1 na posição da Fig. (15).

7.2. Resultados com o modelo 2

De maneira análoga aos dados obtidos para o modelo 1, já explicitados, foram também obtidos os campos instantâneos de velocidades para as duas posições diferentes ensaiadas do modelo 2. A Fig. (23) mostra o 50º campo instantâneo (dos 345 campos discretizados) para o modelo 2 na 1ª posição ensaiada, e a Fig. (24) mostra o 50º campo para o modelo 2 na 2ª posição.

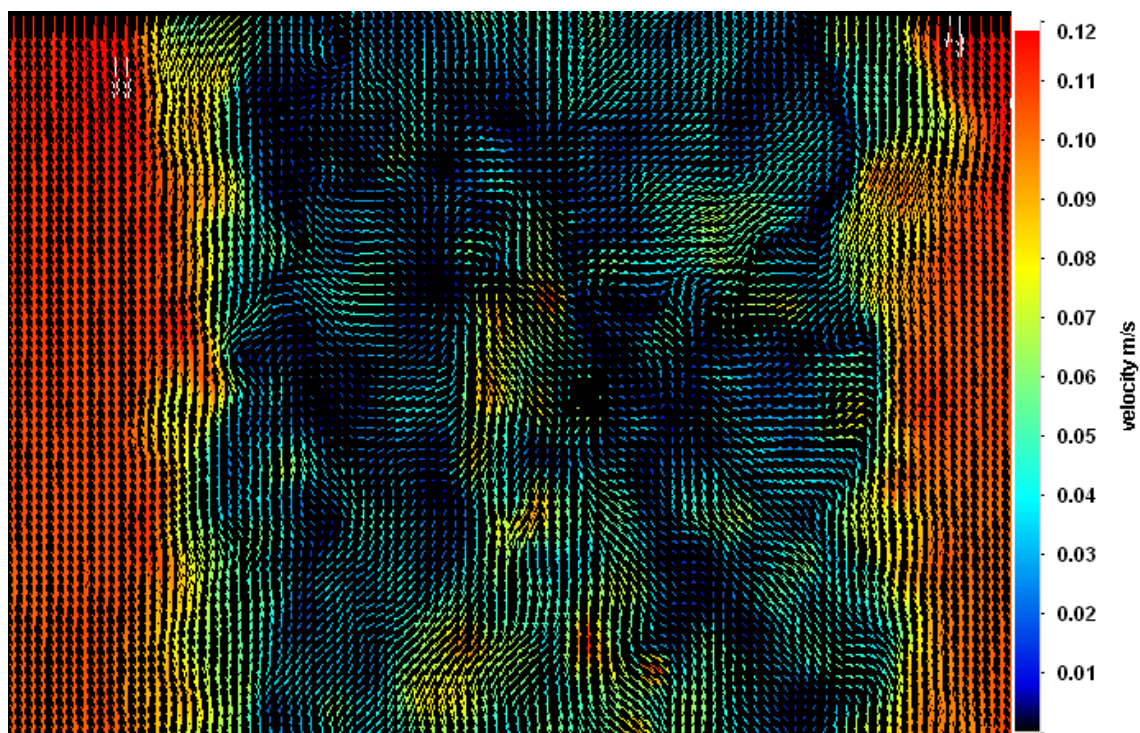


Figura 23. Campo instantâneo de velocidades para o modelo 2 na 1ª posição ensaiada.

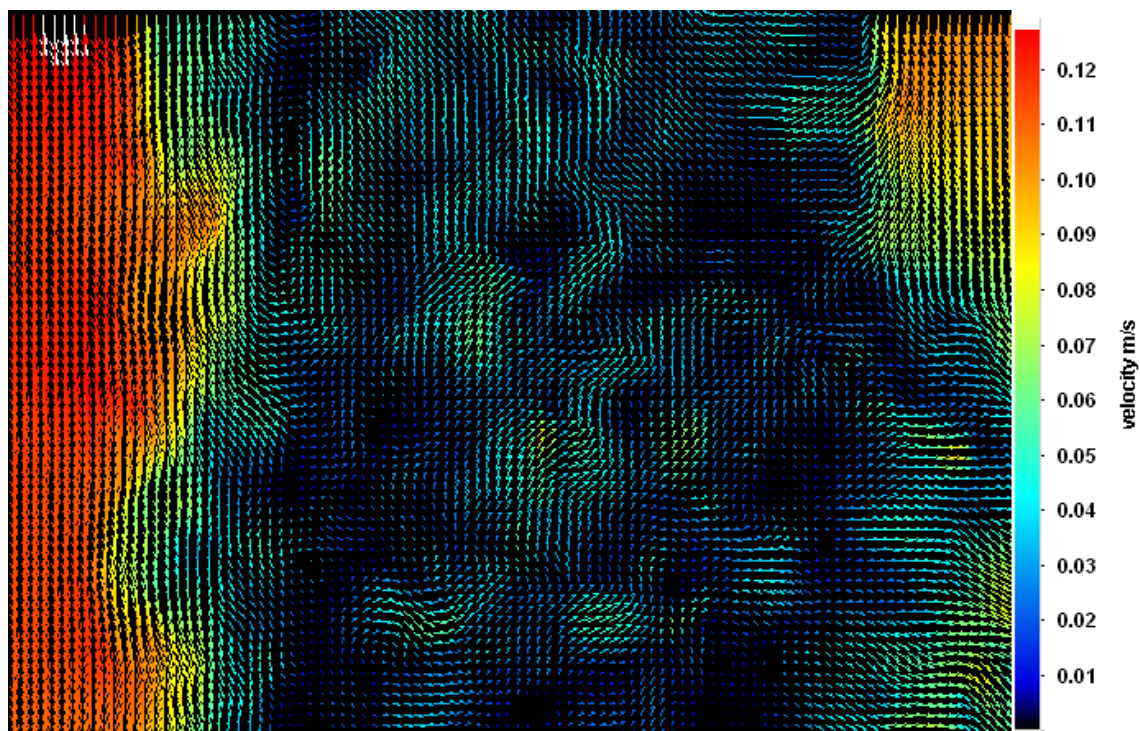


Figura 24. Campo instantâneo de velocidades para o modelo 2 na 2ª posição ensaiada.

Analisando os 345 campos gerados, para as duas posições diferentes, e também o vídeo desses campos durante os 23 s, percebe-se que, apesar da 1ª posição ensaiada diferir da 2ª (vide geometria do modelo 2 já apresentada) a esteira formada no escoamento ao redor do modelo é semelhante para os dois casos, mas não tão semelhante como no caso do modelo 1. Isso pode ser mostrado pelos campos médios de velocidades das duas situações, calculados a partir dos campos instantâneos, que estão evidenciados nas Fig. (25) e (26), respectivamente para a 1ª e 2ª posição de ensaio do modelo 2.

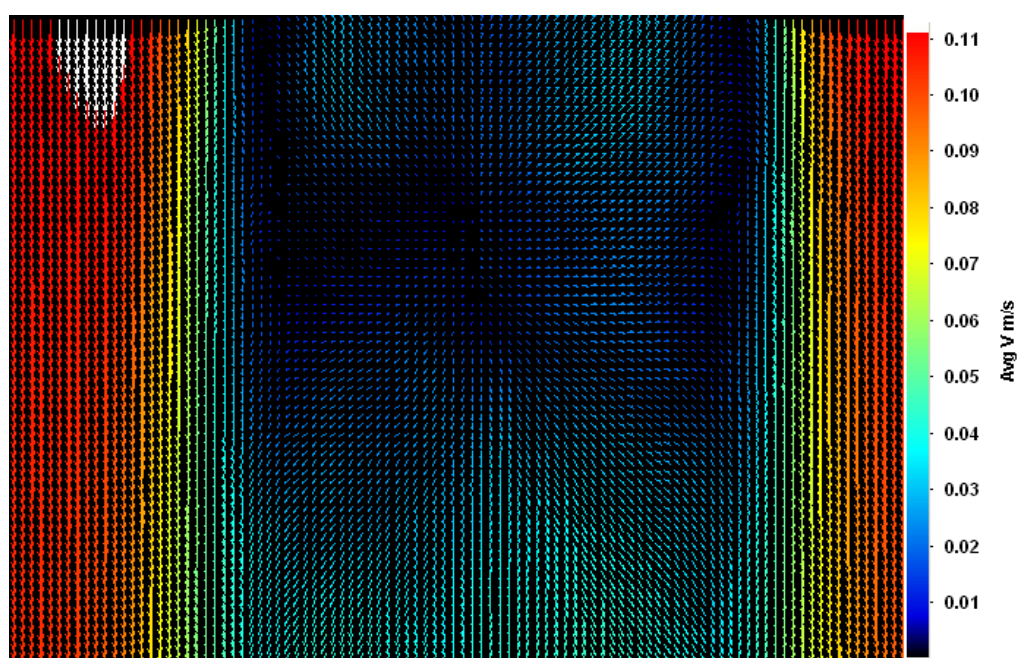


Figura 25. Campo médio de velocidades para o modelo 2 na 1ª posição ensaiada.

É possível notar uma pequena diferença entre os dois campos médios de velocidades, na região de recirculação, apesar de a geometria externa do modelo 2 se aproximar bastante à de um cubo. Essa diferença certamente é resultado da “grade” na estrutura do modelo que, na 1ª posição, se encontra ortogonal à direção do escoamento e, na 2ª, paralela ao mesmo.

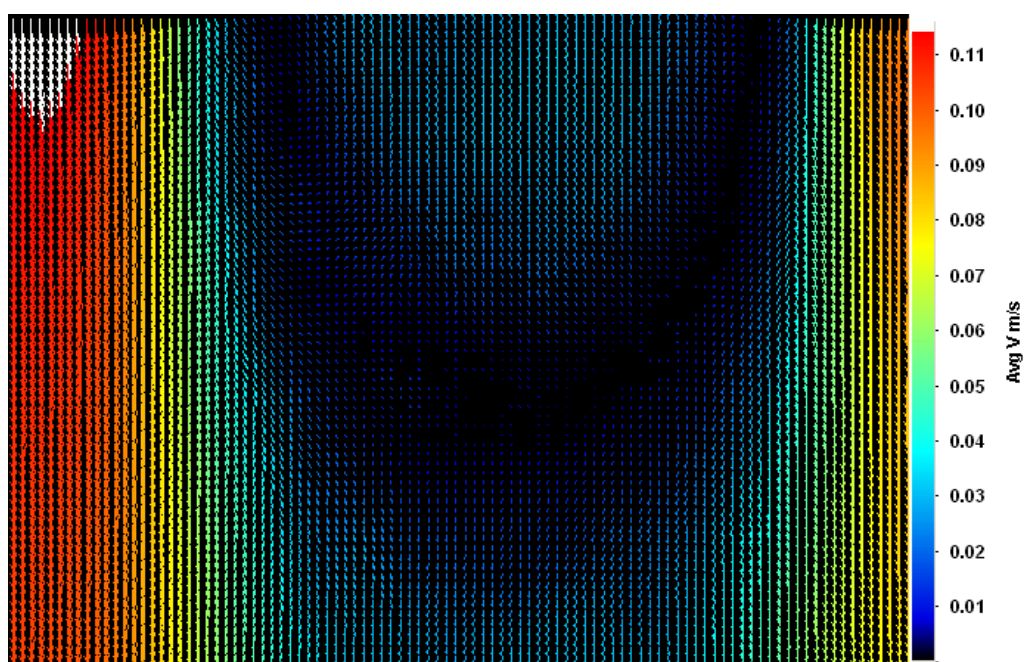


Figura 26. Campo médio de velocidades para o modelo 2 na 2ª posição ensaiada.

Analisando também a componente V_z do campo médio de velocidades, para as duas situações, nota-se mais uma vez a semelhança entre os resultados. A Fig. (27) mostra o resultado para a 1ª posição do modelo 2, e a Fig. (28), para a 2ª posição dele.

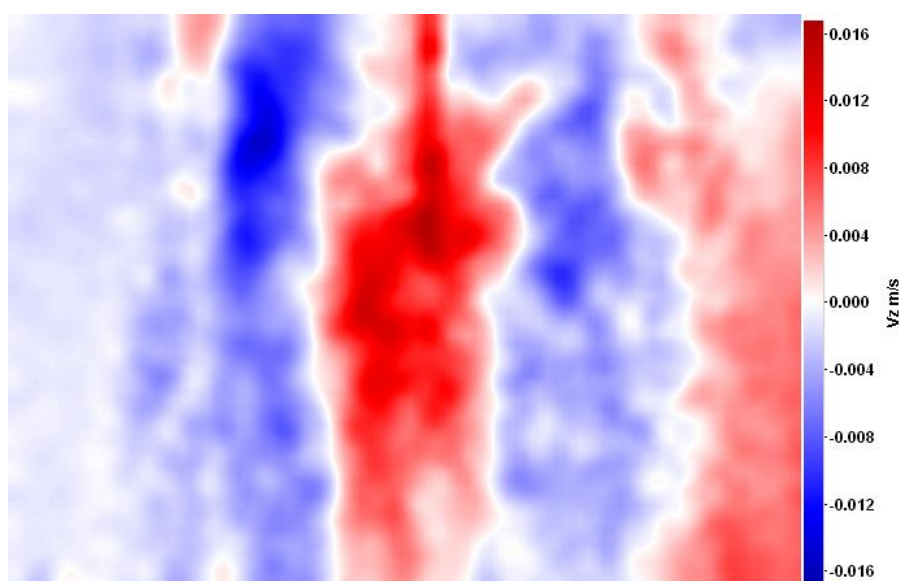


Figura 27. Componente V_z do campo médio de velocidades para o modelo 2 na 1ª posição ensaiada.

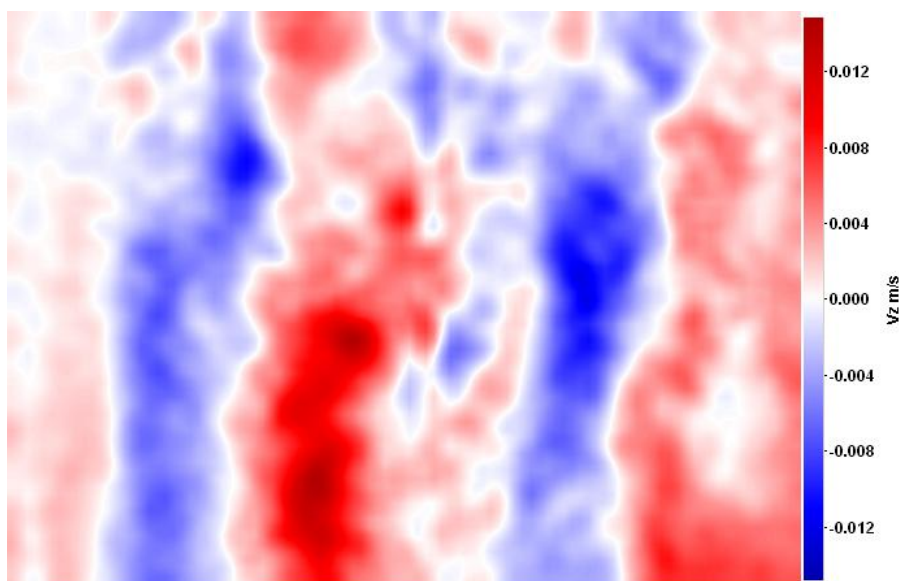


Figura 28. Componente Vz do campo médio de velocidades para o modelo 2 na 2ª posição ensaiada.

7.3. Análise geral das medições

De todas as medições de campos de velocidades efetuadas, já descritas nas seções anteriores, e também de todos os dados adicionais que puderam ser calculados a partir deles, como campo de velocidade média na esteira, componente vertical da velocidade, vorticidade, etc., o principal fato a ser observado é o significativo efeito de tridimensionalidade, tanto para o modelo 1 como para o modelo 2. A esteira formada no escoamento ao redor dos dois modelos não possui um padrão de forma bem definida, sendo difícil estabelecer um período para formação e desprendimento de vórtices, devido ao fato de suas geometrias possuírem cantos vivos, que geram vorticidades tridimensionais de difícil análise quantitativa e mesmo qualitativa.

Para o objetivo do plano inicial de obter detalhes do escoamento e o campo de velocidades ao redor dos modelos, não foi possível observar toda a região em volta deles, como no esquema da Fig. (29), devido a impossibilidades do sistema PIV: a iluminação do plano “atrás” do corpo do modelo (do lado contrário aquele onde fica o canhão de *laser*) não é suficiente para boa captura das partículas na água, como se pode intuir pela Fig. (29); o sistema não é capaz de calcular vetores velocidade para as regiões bem próximas à superfície do modelo, provavelmente pelo fato de as partículas na água, nessas regiões, apresentarem movimentação extremamente

perturbada; o corpo do modelo causa reflexos e distorções nas imagens capturadas pelas câmeras, gerando regiões do plano observado com falha no cálculo dos vetores velocidade (esses reflexos poderiam ser amenizados pintando os modelos com tinta apropriada e utilizando filtro adequado nas câmeras do sistema PIV, o que não foi possível na realização dos experimentos).

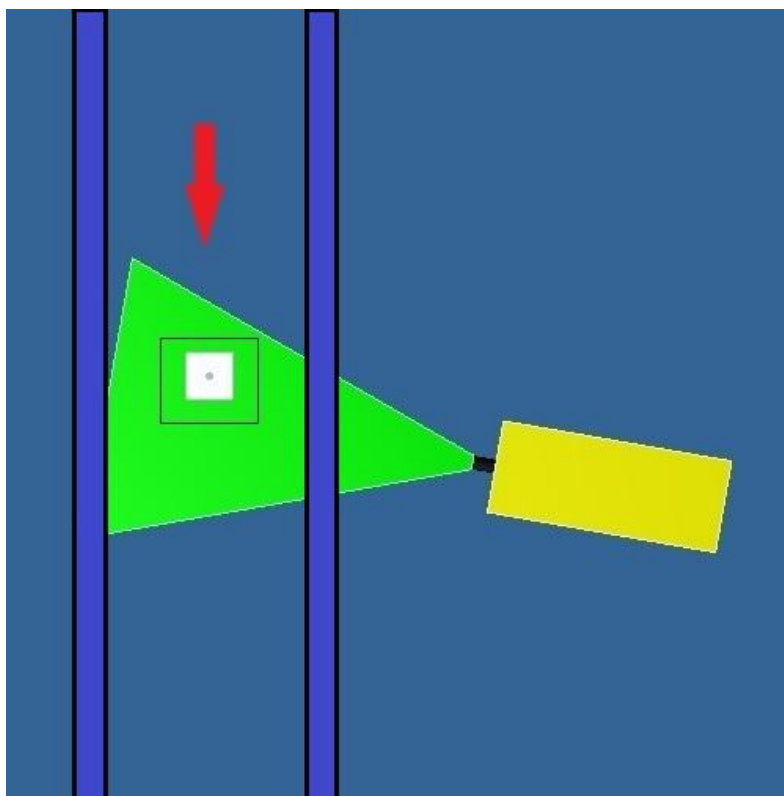


Figura 29. Vista superior do ensaio com o plano de interesse contendo o modelo.

Diante dessa dificuldade, todas as medições foram feitas, como já sucintamente descritas, com o plano de interesse situado à jusante dos modelos, à distância de aproximadamente 30 mm, como pode ser visto na Fig. (30). Com esse arranjo, as falhas citadas no parágrafo acima puderam ser evitadas, e ainda assim a esteira do escoamento pôde ser observada sem prejuízos ao objetivo principal.

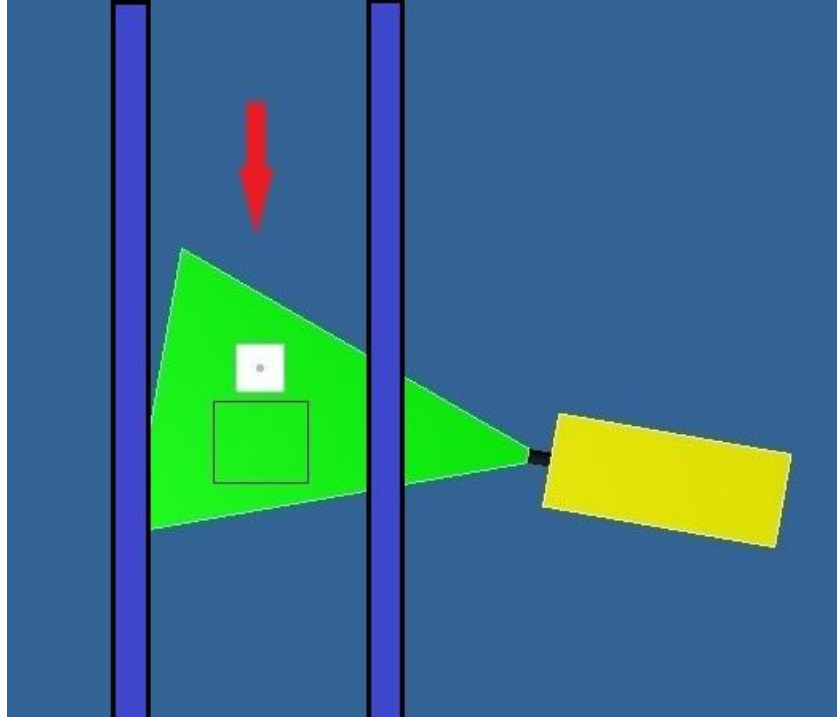


Figura 30. Vista superior do ensaio com o plano de interesse à jusante do modelo.

7.4. Estimativa das forças hidrodinâmicas nos modelos com a utilização dos campos de velocidades

Conforme proposta apresentada no cronograma inicial do projeto, foi feito um estudo bibliográfico sobre este assunto, e então buscou-se idealizar um meio para se calcular as forças hidrodinâmicas exercidas sobre os modelos, nos ensaios que foram elaborados e efetuados ao longo deste projeto, com a utilização dos campos de velocidades medidos.

O modelo idealizado e desenvolvido para tal objetivo se baseia no princípio da 1ª Lei da Termodinâmica que, para um volume de controle definido, como o da Fig. (31), aplica o seguinte equacionamento para balanço de energia:

$$Q_e + W_e + m_e \cdot \left(\frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_e + h_e \right) - Q_s - W_s - m_s \cdot \left(\frac{V_s^2}{2} + g \cdot z_s + h_s \right) \\ = m_f \cdot u_f - m_i \cdot u_i$$

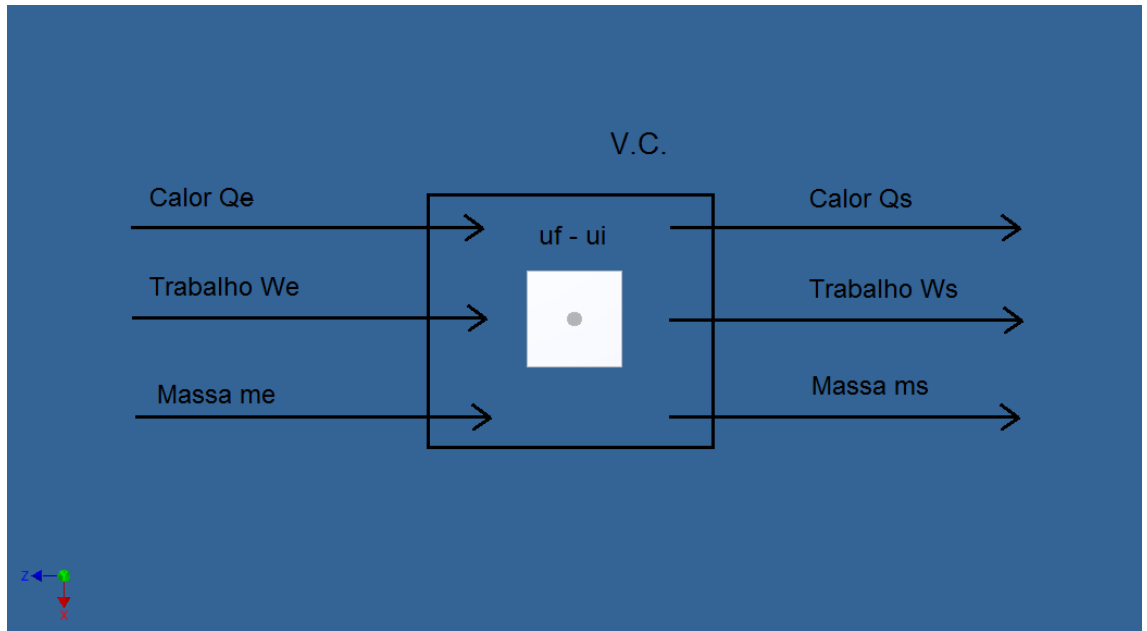


Figura 31. Volume de controle envolvendo o modelo de *manifold* (vista superior).

Como se observa na Fig. (31), o modelo matemático idealizado visa realizar um balanço de energia da água escoando em um volume de controle que envolve o modelo ensaiado. Considerando este volume de controle em regime permanente, não há variação de massa e de energia interna, e a equação fica na forma:

$$Q_e + W_e + m \cdot \left(\frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_e + h_e \right) = Q_s + W_s + m \cdot \left(\frac{V_s^2}{2} + g \cdot z_s + h_s \right)$$

Adotando as hipóteses de que as cotas de entrada e saída são as mesmas, $z_e = z_s$, e que não há variação de entalpia da água, $h_e = h_s$, o equacionamento fica:

$$\frac{m}{2} \cdot (V_e^2 - V_s^2) = \Delta Q + \Delta W$$

Como mostra a equação final obtida, a diferença entre as energias cinéticas de entrada e saída da água no volume de controle (lado esquerdo da equação) resultaria em uma parcela de energia (“ $\Delta Q + \Delta W$ ” na equação) que seria a energia dissipada devido à força total de arrasto aplicada sobre o corpo do modelo.

A partir daí, o desenvolvimento deste modelo matemático deparou-se com as seguintes dificuldades:

- Obter um valor para a velocidade de saída da água do volume de controle (velocidade da água na seção do canal à jusante do modelo ensaiado), a partir dos dados gerados pela medição do sistema PIV, que fornecem um campo de vetores velocidade de um plano horizontal do canal, e não apenas de uma seção transversal deste;
- Calcular a velocidade de entrada da água no volume de controle (à montante do modelo) apenas com o valor fornecido pelo software *LabView*, utilizado nos experimentos para controle de velocidade do canal, visto que este programa calcula uma média dessa velocidade apenas com base no valor da rotação da bomba e do volume de água no canal. A hipótese de a velocidade da água na seção de entrada do V.C. ser totalmente uniforme e ter este valor calculado pelo *LabView* estaria muito fora das condições reais, e percebeu-se a necessidade da realização de medições (com o sistema PIV) também nessa região do escoamento;
- Com o modelo matemático desenvolvido, não seriam obtidos valores de força de arrasto (em unidades de força), e sim resultados em unidade de energia (J, ou J/m^3), e a sua comparação com resultados de medições de força com células de carga exigiria mais um tratamento matemático dos valores obtidos, por ora desconhecido.

Além dessas complexidades citadas, acrescentam-se as análises feitas dos resultados obtidos dos ensaios, que apontaram um significativo efeito da tridimensionalidade – não inesperado - das geometrias dos dois modelos de *manifolds*. Este fato leva a crer que a análise de apenas “seções transversais” do V.C. idealizado não seria suficiente, sendo necessário então medir não somente um, mas vários planos horizontais do escoamento à jusante do modelo, como o esquema representado na Fig. (32), e realizar uma integração desses planos ao longo da dimensão vertical, a fim de acrescentar esse efeito da tridimensionalidade ao modelo matemático idealizado. E em última análise, a medição do sistema PIV dos vetores velocidade, da maneira já descrita neste relatório, fornece valores pouco precisos

para sua componente vertical, V_z , fato que torna ainda mais difícil o sucesso do modelo matemático desenvolvido.

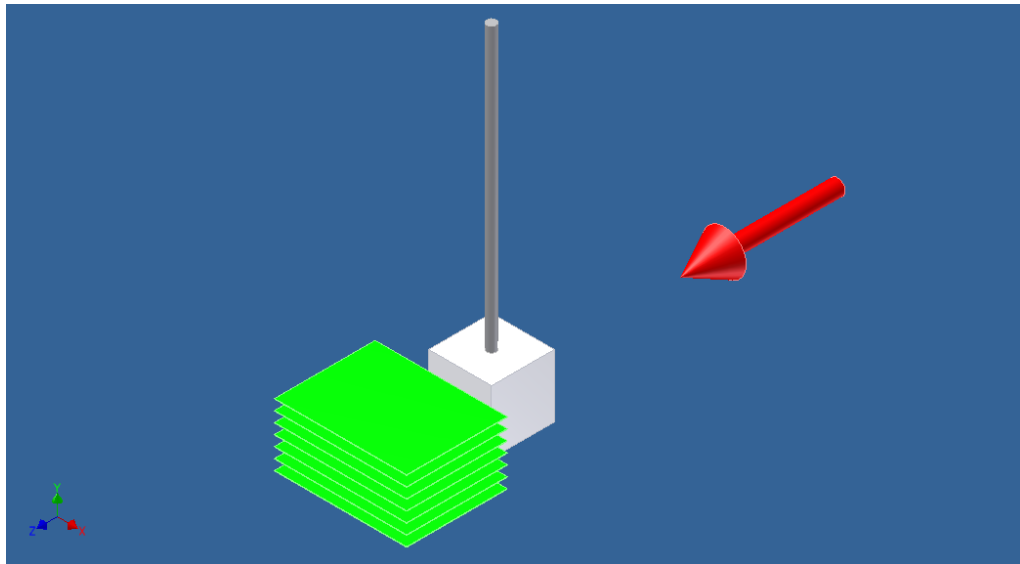


Figura 32. Medição de vários planos horizontais (em verde) na esteira do escoamento (direção e sentido indicados pela seta vermelha) ao redor do modelo.

Diante dessas dificuldades, não foi possível a tentativa de validação do modelo desenvolvido, visto que seria necessário um tratamento matemático dos dados (medidos com o sistema PIV) consideravelmente complexo, e ainda não pôde ser reproduzido.

8. Referências Bibliográficas

ÁSSI, G.R.S. (2005); Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados; Tese de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FALTINSEN, O.M. (1990); *Sea loads on ships and offshore structures*; Cambridge University press.

FRANZINI, G.R.; FUJARRA, A.L.C.; MENEHINI, J.R.; KORKISCHKO, I.; FRANCISS, R. (2009); *Experimental investigation of Vortex-Induced Vibration on rigid, smooth and inclined cylinders*; *Journal of Fluids and Structures*; 25, 742-750.

GRANT, I. (1997); *Particle Image Velocimetry, A Review*; *Proc Instn Mech Engrs Vol 211 Part C*.

KORKISCHKO, I. (2006); Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed; Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MENEHINI, J. R. (2002); Projetos de pesquisa no tópico de geração e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de cilindros; Resenha de livre docência apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PRASAD, A. K. (2000); *Stereoscopic Particle Image Velocimetry*; *Experiments in Fluids*, 29, 103-116 (2000), Springer-Verlag.

SARPKAYA, T.; ISAACSON, M. (1981); *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*; Van Nostrand Reinhold Company.

www.offshore-technology.com, 2010.