

ALEX DE ALMEIDA PRADO

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO VSNT JAÚ II, BASEADO EM
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

São Paulo
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ALEX DE ALMEIDA PRADO

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO VSNT JAÚ II, BASEADO EM
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2009

ALEX DE ALMEIDA PRADO

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO VSNT JAÚ II, BASEADO EM
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Hélio Mitio Morishita

São Paulo
2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de março de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Prado, Alex de Almeida.

Metodologia experimental para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do VSNT JAÚ II, baseado em processamento digital de imagens / A.A. Prado. -- ed.rev. -- São Paulo 2009.

104 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

**1.Submersíveis não tripulados 2.Hidrodinâmica (Parâmetros)
3.Processamento digital de imagens I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. II.t.**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Marcos Antonio de Almeida Prado e Danira Aparecida Chiconi de Almeida Prado (in memoriam), ao meu irmão Alan de Almeida Prado e aos meus avós Ignácio de Almeida Prado (in memoriam), Lucia Degan de Almeida Prado, João Chiconi e Deolinda Cecheto Chiconi.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por minha vida, pela minha família, amigos e por todas as oportunidades a mim concedidas.

Aos meus pais pelo carinho e pelo maravilhoso ambiente familiar que eu convivo.

Aos meus familiares pelo apoio para a conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Hélio Mitio Morishita e Prof. Dr. Antonio Eduardo Assis Amorim que além dos laços de amizade formados, conduziram-me com paciência incomum pelo universo da pesquisa acadêmica, proporcionando a concepção deste trabalho.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Tecnologia de Jahu, Aramis M. C. de Mendonça, Daniela Galvanini, Luis Alberto Sorani, Miriam Luciana Passareti, Paulo Henrique Buscariollo, Rosa Maria Padroni e Vladimir Cancian Junior pelo incentivo, auxílio e compreensão.

Aos amigos Nelson Bortolucci Junior, Cristiano Rossi Vieira, Isac Medeiros Rosa e Julio Goulart Paixão, pela ajuda fornecida em horas decisivas para o término deste trabalho.

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta colaboraram para a conclusão desta dissertação.

Não vos aflijais, nem digais: Que comeremos? Que beberemos? Com que nos vestiremos? São os pagãos que se preocupam com tudo isso. Ora, vosso Pai celeste sabe que necessitais de tudo isso. Buscai em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça e todas estas coisas vos serão dadas em acréscimo. Não vos preocupeis, pois, com o dia de amanhã: o dia de amanhã terá suas preocupações próprias. A cada dia basta o seu cuidado.

Mateus (6:31-34)

RESUMO

Atualmente está aumentando a necessidade de utilização de veículos submersíveis não tripulados nos meios aquáticos, tanto para observação científica, como também para monitoramento de obras de engenharia. As posições destes veículos são controladas, em geral, manualmente o que torna essas operações tarefas longas e cansativas aos seus pilotos. Uma alternativa que simplifica estas operações é a utilização, quando necessário, de um sistema automático de posição para aliviar o piloto de funções básicas. Para o desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático eficiente é necessário um modelo matemático para a dinâmica do veículo, que envolve o conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam o comportamento do veículo, principalmente em casos onde o veículo possua formas geométricas complexas, sendo assim torna-se compulsório a realização de métodos experimentais para a determinação dos coeficientes hidrodinâmicos do modelo. Na Faculdade de Tecnologia de Jahu vem se desenvolvendo desde 1999 a segunda versão de um veículo submersível não tripulado para utilização em ambiente fluvial denominado VSNT JAÚ II. Este trabalho propõe a utilização de métodos experimentais para a obtenção de alguns dos coeficientes hidrodinâmicos do veículo, no qual são considerados massa adicional e amortecimento viscoso que serão estimados através de ensaios de decaimento livre, utilizando um modelo em escala reduzida e técnicas de processamento digital de imagem. Para estimativa dos coeficientes de massa adicional e amortecimento viscoso o método proposto é baseado método dos mínimos quadrados e separa os movimentos do veículo em dois planos, vertical e horizontal, considerando termos de acoplamento nos movimentos nesses planos.

Palavras chave: Veículos submersíveis não tripulados, parâmetros hidrodinâmicos, processamento digital de imagens.

ABSTRACT

Unmanned underwater vehicles they have been used continually by the planet in spite of the difficulties of your operation, both for scientific observation, but also for monitoring of engineering works. The positions of these vehicles are controlled, in general, which makes manually they work long and tiring to their pilots. An alternative that simplifies this operation is the use of an automatic system of position to relieve the pilot of basic functions. For the development of an efficient of automatic positioning system it is necessary a mathematical model of the vehicle, it is necessary the knowledge of the hydrodynamic parameters that characterize the behavior of the vehicle. Those parameters are difficult to obtain through theoretical procedures, in cases where the vehicle possesses complex forms, and then experimental methods are used. In Faculdade de Tecnologia de Jahu it comes the developing since 1999 the second version of an unmanned underwater vehicle for use in fluvial environments denominated VSNT JAÚ II. This work proposes the use of an experimental method for the obtaining of some of the hydrodynamic coefficients of the Vehicle, based on rehearsals of free decay, using a model in reduced scale and techniques of digital image processing. The proposed procedure separates the movements of the vehicle in two plans, vertical and horizontal, considering joining terms in the movements in those plans.

Key words: Unmanned underwater vehicles, hydrodynamic parameters, digital image processing.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	5
LISTA DE TABELAS	8
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	9
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
1.2.1 PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE VEÍCULOS SUBMARINOS NÃO TRIPULADOS	17
1.2.2 OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS ..	19
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
2.1 MODELAGEM DINÂMICA	25
2.2 IDENTIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS	34
2.2.1 MODELAGEM DINÂMICA PARA OS ENSAIOS DE DECAIMENTO LIVRE.	35
2.2.1.1 MODELAGEM PARA O PLANO VERTICAL	37
2.2.1.2 ADAPTAÇÃO DO MODELO PARA O MOVIMENTO DE CATURRO	42
2.2.1.3 MODELAGEM PARA O PLANO HORIZONTAL	45
2.2.2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	50
2.2.3 VISÃO COMPUTACIONAL	53
3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	68
3.1 DISPOSIÇÃO DOS ENSAIOS	69
3.2 ENSAIOS COM MOVIMENTO DE AVANÇO PURO.....	81
3.3 ENSAIOS COM MOVIMENTO DE ARFAGEM PURO.....	83
3.4 ENSAIOS COM MOVIMENTO DE CATURRO PURO	85
3.5 ENSAIOS COM MOVIMENTOS DO PLANO VERTICAL ACOPLADOS.....	87

4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.....	96
4.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O TRABALHO.....	96
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	99

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistemas de referências fixo (inercial) e móvel do VSNT JAÚ II.....	25
Figura 2 – Disposição dos propulsores na vista superior do veículo.....	34
Figura 3 – Disposição dos propulsores na vista lateral (boreste) do veículo.....	34
Figura 4 – Disposição do sistema para os ensaios no plano vertical.....	36
Figura 5 – Disposição do sistema para os ensaios no plano horizontal.....	37
Figura 6 – Decomposição da forças das molas nos eixo 0_0X_0 e 0_0Z_0	41
Figura 7 – Vista frontal da disposição para ensaios de caturro.....	44
Figura 8 – Vista de boreste da disposição para ensaios de caturro.....	45
Figura 9 – Decomposição da forças das molas nos eixos 0_0X_0 e 0_0Y_0	49
Figura 10 – Sistema de aquisição de imagens montado no tanque de provas da FATEC JAHU, para ensaios com movimentos do plano vertical.....	54
Figura 11 – Sistema de aquisição de imagens montado no tanque de provas da FATEC JAHU para ensaios com movimento de caturro puro.....	55
Figura 12 – Imagem do primeiro quadro do vídeo AVI de um ensaio.....	56
Figura 13 – Espaço de cores HSV (Mathworks, 2009).....	56
Figura 14 – Disposição dos marcos visuais L_1 , L_2 e L_3	57
Figura 15 – Disposição do marco visual L_4	57
Figura 16 – Regiões reconhecidas com marcos visuais.....	58
Figura 17 – Marcos visuais L_1 , L_2 e L_3 reconhecidos e seus respectivos centros geométricos utilizados para cálculo da posição inicial do CG do veículo e inclinação inicial do mesmo.....	61
Figura 18 – Marcos visuais L_1 , L_2 e L_3 reconhecidos e seus respectivos centros geométricos utilizados para calculo da posição do CG e inclinação do veículo em cada quadro.....	63
Figura 19 – Marco visual L_4 reconhecido e seu centro geométrico.....	65
Figura 20 – Marco visual L_4 e seu centro geométrico para cada quadro.....	67
Figura 21 – Disposição para os ensaios no plano vertical.....	70
Figura 22 – Disposição para os ensaios no plano vertical (vista superior do veículo).	70
Figura 23 – Disposição para os ensaios de caturro (vista de boreste).....	71
Figura 24 – Constante elástica das molas em função da porcentagem de alongação.	72
Figura 25 – Disposição para os ensaios de caturro (vista frontal).....	73
Figura 26 – Vistas do pitões de fixação das molas na estrutura e no veículo.....	73

Figura 27 – Localização do pitões de fixação das molas no veículo para os ensaios com os movimentos no plano vertical.	74
Figura 28 – Localização do pitões de fixação das molas no veículo para os ensaios com o movimento de caturro puro.	74
Figura 29 – Localização do leds no veículo.	76
Figura 30 – Localização do led no veículo para os ensaios com movimento de caturro.	76
Figura 31 – Sistema de disparo rápido (gatilho).	77
Figura 32 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimentos do plano vertical acoplados (vista de popa/bombordo).	77
Figura 33 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimentos do plano vertical acoplados (vista de proa/bombordo).	78
Figura 34 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimento de caturro puro (vista de proa).	78
Figura 35 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimento de caturro puro (vista de proa/bombordo).	79
Figura 36 – Modelo tridimensional dos flutuadores - CB do veículo.	80
Figura 37 – Verificação e ajuste da posição do CG do veículo.	80
Figura 38 – Posição para os ensaios com movimento de avanço puro.	81
Figura 39 – Velocidade para os ensaios com movimento de avanço puro.	82
Figura 40 – Aceleração para os ensaios com movimento de avanço puro.	82
Figura 41 – Posição para os ensaios com movimento de arfagem puro.	83
Figura 42 – Velocidade para os ensaios com movimento de arfagem puro.	84
Figura 43 – Aceleração para os ensaios com movimento de arfagem puro.	84
Figura 44 – Inclinação para os ensaios com movimento de caturro puro.	85
Figura 45 – Velocidade angular para os ensaios com movimento de caturro puro. ...	86
Figura 46 – Aceleração angular para os ensaios com movimento de caturro puro. ...	86
Figura 47 – Posição para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.	87
Figura 48 – Posição no eixo X para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.	88
Figura 49 – Posição no eixo Y para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.	88
Figura 50 – Inclinação para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.	89
Figura 51 – Velocidade no eixo X para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.	89
Figura 52 – Aceleração no eixo X para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.	90

Figura 53 – Velocidade no eixo Y para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.....	90
Figura 54 – Aceleração no eixo Y para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.....	91
Figura 55 – Velocidade angular para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.....	91
Figura 56 – Aceleração angular para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.....	92
Figura 57 – Coeficientes de massa adicional para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.....	92
Figura 58 – Coeficientes de amortecimento para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela1 – Posição do pitões de fixação das molas no veículo	73
Tabela2 – Comprimento inicial das molas para cada ensaio.	75
Tabela3 – Dados principais do modelo reduzido do VSNT JAÚ II.	79
Tabela4 – Coeficientes hidrodinâmicos para o movimento de avanço.....	83
Tabela5 – Coeficientes hidrodinâmicos para o movimento de arfagem.	85
Tabela6 – Coeficientes hidrodinâmicos para o movimento de caturro.	87
Tabela7 – Coeficientes hidrodinâmicos para os movimentos acoplados.	93
Tabela8 – Coeficientes hidrodinâmicos do VSNT JAÚ II (modelo em escala e protótipo).	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em nosso sistema solar, somente a Terra possui uma atmosfera e oceanos para apoiar a vida (ARDUS, 1990). Os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície do planeta, e dispõem de uma vasta gama de recursos naturais disponíveis como alimentos (peixes e mariscos), energia (gás e petróleo contidos no subsolo dos oceanos), minerais (cloreto de sódio, cobre, zinco e manganês encontrados em jazidas submersas) e biológicos (organismos utilizados na pesquisa e desenvolvimento de biotecnologia, podendo ser utilizados por exemplo, na fabricação de remédios e cosméticos).

Apesar da importância dos oceanos para o planeta, e dessa grande disponibilidade de recursos, apenas entre 5% a 7% de seus fundos estão levantados através de pesquisas, que fornecem informações como cartas batimétricas ou imagens submersas, utilizando equipamentos como ecobatímetros e câmeras submersas. (GOHEEN; JEFFREYS, 1990; MATIAS, 2005; ARDUS, 1990).

A exploração, proteção e o desenvolvimento tanto do espaço dos oceanos quanto de seus recursos devem ser tratados como prioridades, dado a importância dos mesmos para as sociedades humanas e para os Estados, na perspectiva político-estratégica da segurança e defesa, da economia e do desenvolvimento científico.

Crescentemente a humanidade vem se dando conta da importância do entendimento dos oceanos, notando a necessidade de pesquisas para o melhor conhecimento, por exemplo, do modo de circulação das águas dos oceanos e como isso afeta nosso clima, ou dos recursos contidos nos fundos e nas águas desses oceanos.

Veículos submersíveis tripulados permitiram aos cientistas a partir da década de 1950, explorarem regiões remotas dos oceanos chegando até profundidades de cerca de 10.000 metros, como é o caso dos veículos TRIESTE e do BATHYSCAPHE TRIESTE, projetados pelo professor Piccard e seu filho Jacques, concluídos respectivamente em 1953 e 1958 (SORANI, 2002 apud GLAUBER, 1991).

Porém devido às limitações físicas e psicológicas dos tripulantes os mergulhos têm curta duração, e devido à grande preocupação em se manter a segurança da vida humana envolvida, já que o veículo a essas profundidades fica submetido a altas pressões (aproximadamente 1000 kgf/cm^2), sua operação acaba tendo um alto custo (ZHAO, 2005)

Com o desenvolvimento da tecnologia robótica surgiram também os robôs para utilização nos ambientes subaquáticos, os veículos submersíveis não tripulados. Apesar da contínua utilização desses veículos, sua operação tem sido tarefas longas, difíceis e cansativas aos pilotos, principalmente quanto ao comportamento dinâmico do veículo. Uma alternativa que simplifica esta operação é a utilização de um sistema automático de posição (AVILA, 2005).

Para o desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático eficiente é necessário um modelo matemático do veículo, que requer o conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam o comportamento do mesmo.

Como os parâmetros são difíceis de se obter através de procedimentos teóricos, em casos onde os veículos possuam formas complexas, métodos experimentais são utilizados. Alguns destes métodos muitas vezes utilizam modelos em escala reduzida do veículo e equipamentos de alto custo como mecanismos de movimentação plana – PMM (NOMOTO, 1986; HERON, A.; DUNCAN, A.; ANDERSON, B., 2000; AZARSINA, F. WILLIAMS, C.D., ISSAC, M.T., 2007), o que pode tornar os ensaios longos e com custo elevado.

Ensaio de decaimento livre para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos de veículos submersíveis, utilizando modelos em escala reduzida também são

sugeridos na literatura (AVILA, J. J. et al, 2000; Morrison, A.T.; Yoerger, D.R., 1993; SORANI, 2002; ROSS, A.; FOSSEN, T. I.; JOHANSEN, T. A, 2004).

Na FATEC JAHU (Faculdade de Tecnologia de Jahu), desde 1999, vem sendo desenvolvida a segunda versão de um veículo submersível não tripulado chamado VSNT JAÚ II, que esta em fase final de construção e testes. Uma das necessidades do projeto é o desenvolvimento de um sistema de controle para corrigir pequenas variações no posicionamento do veículo, causadas por forças que atuam no mesmo, como correnteza entre outras (Buscariollo, 2008).

Considerando essas necessidades, neste trabalho será desenvolvida uma metodologia experimental economicamente viável, utilizando os equipamentos disponíveis na FATEC JAHU para determinar os coeficientes hidrodinâmicos do VSNT JAÚ II considerando termos cruzados. Tal metodologia baseia-se no processamento digital das imagens obtidas nos ensaios de decaimento livre nos quais um modelo em escala do veículo é submetido.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente a tecnologia robótica tem sido desenvolvida e utilizada nas mais variadas áreas, desde a utilização de robôs industriais que desenvolvem tarefas pré-programadas repetitivas, como soldagens e pinturas em carrocerias de automóveis, visando aumento da produtividade e melhoria na qualidade final do produto (FILHO, 1999), até as pesquisas e desenvolvimento de micro robôs na medicina (KIM, 2007), que poderão navegar pelas veias de seres humanos e desentupi-las mecânica ou quimicamente caso seja necessário.

Em ambientes subaquáticos principalmente nos meios marinhos, têm-se igualmente buscado o desenvolvimento de tecnologias que permitam a construção de robôs submarinos capazes de operar adequadamente nesses ambientes, que são de

grande importância para assuntos ambientais, tarefas científicas e militares e de recursos disponíveis.

A utilização desses veículos submersíveis não tripulados podem nos ajudar a melhor entender os ambientes subaquáticos seja nos oceanos, em rios e lagos ou em outros locais como tanques em plantas industriais, com isso eficazmente podemos utilizá-los para o nosso bem estar, utilizando-os em atividades como (YUH, 2000):

- Inspeções e vistorias em estruturas submersas como pilares de pontes, dutos de turbinas em usinas hidroelétricas, linhas de tubulações e obras de acostagem;
- Mapeamento do solo submerso;
- Busca e/ou recuperação de equipamentos submersos como transponders, bombas, armamentos, veículos, aeronaves e embarcações naufragadas;
- Retirada de amostras geológicas;
- Monitoramentos de longa duração, onde são abrangidas grandes áreas em várias profundidades, podendo utilizar os dados desse monitoramento para pesquisas ou para rápida remediação em caso de acidentes ou vazamentos de produtos contaminantes;
- Busca e desarmamento de minas submersas;
- Pesquisas e avaliação de recursos do oceano como jazidas submersas de metais;
- Construção e manutenção de estruturas submersas;
- Inspeções de cascos de embarcações e de tanques de navios;
- Instalação e inspeção de cabos de energia e de comunicação submersos.

Pesquisas, desenvolvimento e utilização desses veículos marcam do início na década de 50, e podemos citar algumas operações históricas realizadas com sucesso com esses robôs, como a missão de busca e recuperação da bomba “H” (bomba de hidrogênio) em 1966, na Espanha (TALKINGTON, 1983).

Nessa missão o submarino tripulado ALVIN encontrou e marcou a localização da bomba até então perdida no fundo do oceano, e posteriormente o robô submersível

não tripulado CURV I (Cable-Controlled Underwater Recovery Vehicle) pode ser usado para prender os cabos utilizados para trazer a bomba para a superfície.

Uma das evoluções do veículo CURV I, o CURV III, também realizou missões importantes em emergências submarinas, como o resgate de dois homens que estavam no submersível PISCES III a 1500 pés de profundidade no fundo do mar, 150 milhas ao sul da Irlanda em 1973.

Outras operações importantes que utilizaram submersíveis remotamente controlados e que foram realizadas com sucesso podem ser citadas, como a localização e observação dos escombros do transatlântico Titanic e do encoraçado Bismark (SORANI, 2002 apud AMORIM, 1997).

Segundo SORANI (2002) apud EGESKOV (1995), os robôs submersíveis estão classificados basicamente em quatro modos diferentes de operação, relacionados à sua autonomia, "ROV" (Remotely Operated Vehicle), "TETHER", "UUV" (Unmanned Untethered Vehicle) e "AUV" (Autonomous Underwater Vehicle).

Ainda um novo tipo de veículo capaz de operar em ambos os modos de operação, autônomo ou remotamente controlado foi desenvolvido (Woods Hole Oceanographic Institution - Oceanus Magazine, 2004), e é denominado veículo híbrido "HROV" (Hybrid Remotely Operated Vehicle), que utiliza as vantagens de cada modo em partes distintas das missões.

Este veículo navega de forma autônoma em partes da missão onde necessita cobrir grandes áreas de pesquisa, e utiliza o modo remoto de controle quando se aproxima da área específica em questão, onde é interessante que o piloto esteja no comando e possa realizar as tarefas como retirada de amostras do fundo, de rochas ou organismos.

Para a mudança de modo de operação é necessário que o veículo seja retirado da água, e seja colocado em uma embarcação de apoio ou plataforma, onde então são gastas algumas horas para a adaptação do veículo ao novo modo de operação.

Como visto, para ambos os modos de operação desses veículos, normalmente precisamos de uma embarcação de superfície de apoio, seja para embarcar e desembarcar o veículo na água, devido ao peso dos mesmos, que pode chegar a varias toneladas, como é o caso dos ROVs KAIKO pesando 5,5 toneladas (MURASHIMA, 2004) e do DOLPHIN 3K pesando 3,3 toneladas (NOMOTO, 1986) ou para o transporte dos veículos até os locais onde serão utilizados, distantes muitas vezes centenas de quilômetros da costa ou de estruturas de apoio flutuantes, já que os mesmos normalmente operam a baixa velocidade.

O progresso na robótica principalmente no desenvolvimento de sensores e sistemas de percepção gerou grandes avanços nas pesquisas e desenvolvimentos de ROVs e AUVs, porém a utilização destes dispositivos de alto custo como sistemas de posicionamento acústico, entre outros pode encarecer o custo dos veículos subaquáticos (AMATA, 1999; CACCIA, 2002).

Alguns desses veículos são capazes de operar a grandes profundidades e realizar tarefas em locais que o oferecem risco a vida humana. Dependendo da finalidade para que foram concebidos, podem possuir variados tipos de acessórios como braços articulados capazes de utilizar ferramentas para retirada de amostras ou intervenção em obras submersas, câmeras de vídeo que transmitem em tempo real à superfície as imagens submersas obtidas, sensores que podem monitorar continuamente características físico-químicas da água, entre outros.

Veículos submersíveis não tripulados vêm sendo aplicado em outros ambientes aquáticos além do marítimo e fluvial. Segundo YUH (2000), países como Estados Unidos da América, França e Japão vêm utilizando estes robôs em plantas de geração de energia nuclear para inspecionarem áreas submersas com altos níveis de radiação como tanques de resfriamento para combustível atômico retirado dos reatores, tanques de supressão que são utilizados para prevenir o superaquecimento do reator e outros tanques de armazenamento envolvidos em plantas nucleares. Estas aplicações têm sido úteis para melhorar a compreensão dos fenômenos internos dos reatores bem como têm auxiliado no planejamento das manutenções.

No Brasil a principal utilização de veículos submersíveis tem sido no meio marítimo, mormente na indústria do petróleo em alto mar (TAVARES, 2004), sendo que a utilização deles no ambiente fluvial tem sido ínfima. Apesar da imensa extensão fluvial do país, e da grande quantidade de usinas hidroelétricas e barragens existentes, a maioria das inspeções e vistorias realizadas tem sido feitas por mergulhadores, expondo-os muitas vezes a situações de risco.

O Instituto de Oceanografia da Universidade de São Paulo (IOUSP) possui um ROV que auxilia as pesquisas oceanográficas, podendo mergulhar até 150 metros de profundidade e transmitir imagens em tempo real a superfície. Tal veículo é um modelo comercial do fabricante Seabotix, possui duas câmeras de vídeo, uma para imagens coloridas e outra para imagens em preto e branco. Os sistemas de câmeras são preparados para movimentações de 270 graus de ângulo, e ainda um sistema de laser pode ser utilizado como escala nas imagens.

Na FATEC JAHU, entre 1995 e 1998, foi construída uma primeira versão de um veículo submersível não tripulado operado remotamente, via cabo, para ser operado na hidrovia, denominado VSNT JAÚ I.

Encerradas as fases de testes com a versão preliminar do submersível de baixo custo para operar no ambiente fluvial, o VSNT JAÚ I, onde se observou um bom desempenho relativo ao projeto mecânico e ao sistema de aquisição de imagens, verificou-se que os sistemas de controle precisariam ser aperfeiçoados incorporando novas tecnologias.

A partir de 1999 então se iniciou o desenvolvimento de uma nova versão deste veículo. Nessa versão, chamada VSNT JAÚ II em fase final de construção e testes, muitos sistemas foram melhorados para garantir melhor desempenho em relação à versão anterior, como o sistema de propulsão, onde o veículo é dotado de seis motores que permitem a movimentação do veículo com seis graus de liberdade.

Outro sistema modificado foi o de aquisição de imagens que agora é feita através de uma câmera digital móvel, garantindo um campo visual bastante amplo. Tem sido realizado um estudo sobre o processamento das imagens adquiridas, utilizando um

sistema de visão computacional, de modo que, com as imagens coletadas e com as informações dos demais sensores, o veículo pode identificar a sua posição e orientação no espaço tridimensional.

Os departamentos de Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI – USP) em parceria com o Centro de Pesquisas da Petrobrás vêm desenvolvendo um veículo submersível semi-autônomo, tipo “open frame”, para dar suporte à extração de petróleo e gás em águas profundas.

Este veículo realizará tarefas específicas, em profundidades entre 1000 e 2000 metros, possui uma massa de 420 quilogramas com um volume deslocado de aproximadamente 189 litros e sua propulsão é realizada por oito motores, sendo quatro para movimentação vertical e quatro para movimentação horizontal. O veículo conta ainda com sistema de ultra-som para localização e vasos de pressão para a eletrônica de controle e baterias.

Um exemplo de aplicação de veículos submersíveis de uso fluvial é o robô LUMA, desenvolvido pela COPPE a partir de 2003, que foi desenvolvido devido à necessidade de uma alternativa para vistoriar túneis subaquáticos nas represas dos municípios de Areal e de Macabu, no estado do Rio de Janeiro (Planeta COPPE – Notícias, 2008).

Este veículo tem como objetivo principal vistoriar esses túneis longos e estreitos que conduzem água turva de origem fluvial, impedindo assim que o trabalho seja feito por mergulhadores devido à periculosidade eminente, já que em caso de emergência o retorno à superfície não pode ser imediato.

Os veículos submersíveis não tripulados vêm sendo utilizados a mais de 40 anos, apesar das dificuldades inerentes ao piloto em sua operação, devido principalmente ao comportamento dinâmico do veículo, que possui movimentos com 6 graus de liberdade, o que torna estas operações tarefas longas, difíceis e cansativas (HSU, 2000; GOHEEN; JEFFERYS, 1990).

A alta interatividade entre os graus de liberdade do veículo e a não linearidade de sua dinâmica, dificultam seu posicionamento em casos onde o veículo deve permanecer em uma posição fixa para realizar, por exemplo, uma inspeção visual em alguma estrutura submersa, ou permanecer a uma determinada altitude em relação ao fundo e seguir linhas de tubulações, onde o piloto deve corrigir constantemente movimentações indesejáveis causadas por agentes externos como correntes marinhas.

Segundo AVILA (2005), a operação destes veículos ainda depende de outros fatores como sistema de posicionamento dinâmico das embarcações de apoio e das condições do mar, já que esses fatores podem causar movimentações indesejáveis nas embarcações de apoio, o que pode também causar perturbações nos movimentos dos ROVs, devido aos cabos umbilicais. Com isso as operações podem envolver altos custos e longos tempos de execução, já que utilizam números significativos de pessoas para tripular as embarcações de apoio e para operação do ROVs, e dependem de fatores externos como clima, correntes, entre outros.

Uma alternativa que simplifica esta operação é a utilização de um sistema automático de posição (AVILA, 2005), que alivia o piloto de funções básicas, como aproamento e altitude do veículo em relação ao fundo, permitindo que o mesmo possa operar o veículo apenas funções de nível mais elevado, como planejamento da missão ou desvio de obstáculos. O sistema de posicionamento automático é projetado utilizando-se os parâmetros hidrodinâmicos do veículo.

1.2.1 PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE VEÍCULOS SUBMARINOS NÃO TRIPULADOS

Para o desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático eficiente é necessário conhecer com precisão os valores dos parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam o comportamento do veículo e dependem fortemente das interações entre o veículo e o fluido em que o mesmo está submerso.

Podemos basicamente definir estes coeficientes em:

- Coeficientes de massas adicionais, onde são incluídos momentos de inércia adicionais e termos cruzados de acoplamento como coeficientes de força devido a acelerações lineares e angulares.
- Coeficientes de amortecimento viscosos lineares e não lineares, onde geralmente os coeficientes de amortecimento viscosos lineares são devido à camada limite com regime laminar, e os coeficientes de amortecimento viscoso quadrática são devido à camada limite com regime turbulento.

Os amortecimentos viscosos em veículos submersíveis que possuem 6 graus de liberdade, normalmente são acoplados e não lineares, porém costuma-se adotar uma aproximação assumindo que o veículo possui três planos de simetria e não possui movimentos acoplados e navega a baixas velocidades, logo os termos de ordens elevadas são descartados considerando somente valores para os termos lineares e quadráticos.

Em alguns tipos de veículos, que possuem formatos simples como torpedos ou hidrofólios baseados em séries sistemáticas, sem muitos apêndices agregados ao casco, que podem tornar o fluxo ao redor do mesmo complexo, esses parâmetros podem ser estimados através de métodos analíticos, como equações baseadas em conhecimentos heurísticos e programas computacionais de fluido-dinâmica.

Segundo HUMPHREYS, (1981), a marinha dos Estados Unidos da América iniciou na década de 1970 pesquisas no desenvolvimento de métodos analíticos para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos de submersíveis, envolvendo adaptações de técnicas desenvolvidas na comunidade aeroespacial para aeronaves subsônicas.

Essas pesquisas visavam adaptar os conhecimentos adquiridos em aerodinâmica subsônica e o amplo banco de dados resultante de ensaios nessa área para os veículos submersíveis, adotando a princípio similaridade na dinâmica dos veículos submersíveis e aéreos, considerando basicamente diferenças nas propriedades do fluido que os envolve.

Aeronaves necessitam da sustentação oriunda de suas asas para permanecerem voando, logo o corpo ou fuselagem, tem pouca influência no desempenho dessas aeronaves comparado com a influência de suas asas. Este fato ampara a pequena quantidade de dados existentes na época relacionados à dinâmica do corpo ou fuselagem das aeronaves, comparados a quantidade de dados relacionados à dinâmica das asas (HUMPHREYS, 1981).

No entanto em submersíveis, o corpo tem maior influência em seu desempenho, comparado a “asas” ou superfícies de controle, que podem ser utilizadas nos mesmos para manobras.

No caso de mísseis aeroespaciais, os dados em sua maioria são relacionados a regiões de fluxo supersônico, e devido aos efeitos de compressibilidade existentes no ar, esses dados não podem ser aplicados a submersíveis (HUMPHREYS, 1981).

Logo essas pesquisas mostraram varias deficiências na tecnologia aeronáutica quando aplicada a submersíveis (HUMPHREYS, 1981), mostrando que outros métodos deveriam ser desenvolvidos.

Como em sua maioria os submersíveis possuem formas complexas, estimar esses coeficientes de forma teórica é uma tarefa difícil. Para isso são necessários procedimentos experimentais como ensaios em tanques de prova, utilizando modelos em escala real ou reduzida e equipamentos sofisticados como mecanismo de movimentação plana - PMM (Planar Motion Mechanism), o que torna esses ensaios complicados e caros.

1.2.2 OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS

Exemplos de estimativa experimental dos coeficientes hidrodinâmicos no Brasil são apresentados por SORANI (2002) e AVILA (2005).

Em seu trabalho SORANI (2002) determina os coeficientes hidrodinâmicos dos movimentos de avanço, deriva e de guinada do VSNT JAÚ I, a partir de oscilações livres amortecidas para cada um dos movimentos, desprezando os movimentos acoplados. Um modelo em escala reduzida foi utilizado para os ensaios.

Os dados foram obtidos a partir dos ensaios realizados no tanque de provas da Escola Politécnica da USP, e a restauração foi obtida através de molas.

No estudo os movimentos do veículo foram restritos somente a quatro graus de liberdade, avanço, deriva, arfagem e guinada, sendo que cada um deles foi ensaiado separadamente. Em todos os ensaios o modelo foi deslocado de sua posição original e liberado e seu deslocamento medido através de células de carga ligadas às molas.

Através da frequência e do decaimento das oscilações foram obtidos os valores de massa adicional e amortecimento viscoso para os movimentos lineares de avanço, deriva e caturro, e do movimento rotacional de guinada.

O amortecimento viscoso foi analisado de três formas, com aproximação linear, quadrática e combinação das aproximações linear e quadrática, sendo que o autor conclui que a combinação das aproximações melhora a relação de equivalência entre os resultados obtidos.

O veículo estudado por AVILA (2005) é do tipo “*open frame*”, ou seja, não carenado, com muitos apêndices que tornam o fluxo ao redor do veículo complexo, acarretando com isto dificuldades para estimar os coeficientes hidrodinâmicos.

AVILA (2005) propõe uma abordagem experimental para obtenção das características hidrodinâmicas do veículo para os movimentos longitudinais, laterais e verticais, onde foram realizadas duas etapas de testes.

Primeiramente foram realizados ensaios hidrodinâmicos no tanque de provas do IPT, onde um modelo em escala 1:2 é rebocado à velocidade constante, e se obtém uma curva experimental do coeficiente de arrasto em função do número de

Reynolds. Utilizando-se então as leis de escala e de semelhança de escoamento os valores encontrados para o modelo são transportados para o protótipo.

Em seguida realizaram-se ensaios utilizando um oscilador mecânico onde uma montagem foi feita com o modelo formando um sistema massa-mola. O modelo foi submetido a um movimento harmônico simples e através da medida da frequência natural da vibração do modelo na água, foram estimados os coeficientes de massa adicional.

Tanto SORANI (2002) como AVILA (2005) em seus trabalhos, admitem independência dos movimentos em cada grau de liberdade. No entanto, isto é uma simplificação do modelo devido a dificuldades em se estimar os coeficientes hidrodinâmicos acoplados do modelo.

Para se avaliar os coeficientes hidrodinâmicos cruzados de modo simples, ROSS, A.; FOSSEN, T. I.; JOHANSEN, T. A. (2004) sugerem um experimento baseado em oscilação livre porém com leitura da posição em mais de um grau de liberdade em um determinado plano. A rigor, o método proposto requer além da posição, a velocidade e aceleração em função do tempo. Os autores sugerem obter as duas últimas grandezas a partir do processamento digital dos sinais de posição e os parâmetros são estimados usando regressão linear.

Os movimentos dos 6 graus de liberdade do veículo são divididos em dois planos e é admitido que a interação hidrodinâmica entre eles seja mínima. Um dos planos é o vertical e contém os movimentos de avanço, caturro e arfagem e o outro plano é o horizontal e contém os movimentos de deriva, guinada e avanço.

No ROV 3K (NOMOTO; HATTORI, 1986) que utiliza também a configuração “open frame”, com fluxo complexo ao redor do veículo, igualmente ao trabalho de AVILA (2005), os teste foram realizados em duas etapas.

A primeira com ensaios hidrodinâmicos para obtenção dos coeficientes de arrasto, onde foi utilizado um modelo em escala 1:4 no canal de água recirculante, na Mitsui

Engineering & Shipbuilding, e as forças e os momentos exercidos no modelo foram medidos por um sistema de balança de 6 componentes.

Uma das preocupações em ensaios com modelos reduzidos é a equivalência entre os números de Reynolds do veículo e do modelo em escala reduzida, pois através desse quociente adimensional podemos avaliar o tipo de escoamento que flui ao redor dos corpos nos ensaios, podendo indicar regimes turbulento ou laminar.

Como resultado preliminar dos ensaios, foi obtido que os resultados não dependiam do número de Reynolds para velocidades entre 0,4 e 0,8 m/s, os testes então foram realizados a 0,8 m/s devido a restrição da capacidade da célula de carga. As forças e os momentos foram medidos variando-se os ângulos de arfagem, deriva e jogo do modelo em relação ao fluxo.

A segunda etapa de testes o modelo foi ensaiado em um tanque de provas, utilizando um mecanismo de movimentação planar (PMM – Planar Motion Mechanism), para estimação dos coeficientes devido às acelerações e acelerações angulares do veículo no fluido, chamados de massas adicionais, incluindo momentos de inércia adicionais e termos cruzados de acoplamento como coeficientes de força devido às acelerações angulares.

Segundo o autor geralmente existem 36 termos de massa adicional, porém devido a simetria nos planos X-Z e Y-Z do veículo, somente 8 desses termos não podem ser desprezados, sendo que esses oito coeficientes e também os coeficientes de amortecimento dos movimentos rotacionais em torno dos eixos X, Y e Z do veículo foram obtidos nos ensaios dinâmicos.

CONTE et al (1994), descreve o desenvolvimento e a validação de um possível procedimento de baixo custo para avaliação de alguns parâmetros hidrodinâmicos existentes na modelagem dinâmica de um veículo subaquático.

Neste procedimento não se utiliza modelos em escala reduzida, nem ensaios em tanques de provas. Tal procedimento consiste basicamente em medir a aceleração linear do veículo em resposta à aplicação de forças conhecidas exercidas pelos

propulsores do veículo, e processando os dados obtidos através de um algoritmo numérico satisfatório.

A aceleração é medida através de uma unidade de medidas inercial, que facilmente pode ser instalada a bordo do veículo, e as forças dos propulsores pode ser avaliada experimentalmente em ensaios independentes.

Segundo o autor as vantagens desse procedimento são que o mesmo pode ser executado em um tempo muito curto (menor que 100 segundos), não requer instrumentação adicional, somente a utilizada para navegação e sua execução não conflita com as exigências habituais da missão.

Como desvantagens são citadas as dificuldades em garantir precisão e incorruptibilidade das medidas das acelerações e que as forças certas foram aplicadas pelos propulsores, e que o processamento dos dados só pode ser realizado na base de um modelo teórico aproximado, que requer alguma simplificação e restrição de hipóteses

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento experimental para determinar massas adicionais e coeficientes de amortecimento para veículos submersíveis. O procedimento é baseado em decaimento livre, considerando-se o movimento simultâneo em vários graus de liberdade, o que permite a determinação de diversos elementos das matrizes de massa adicional e de amortecimento.

Todo desenvolvimento do trabalho é baseado no veículo VSNT JAÚ II e os experimentos são realizados com seu modelo reduzido, cuja escala é 1:2,5, no tanque de provas da FATEC JAHU.

Para atingir tal objetivo foi adotada a seguinte metodologia:

- a) Desenvolver um modelo matemático para a dinâmica do veículo para identificar os coeficientes a serem determinados experimentalmente;
- b) Adotar um procedimento matemático para a determinação dos coeficientes desejados a partir dos dados que são os deslocamentos do modelo durante o ensaio;
- c) Projeto, construção e instalação de um aparato experimental baseado em decaimento livre multi-direcional;
- a) Desenvolvimento de um procedimento para a determinação dos deslocamentos do modelo durante os ensaios baseado em visão computacional;
- b) Realização de ensaios com o modelo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo desta dissertação são apresentadas as considerações gerais sobre o problema, a revisão bibliográfica sobre o assunto bem como os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 trata dos fundamentos teóricos utilizados, abordando a modelagem da dinâmica do veículo proposta e visão computacional utilizada.

No capítulo 3 são discutidos os procedimentos para realização dos ensaios e mostrados os resultados obtidos.

O capítulo 4 é composto pelas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MODELAGEM DINÂMICA

Os veículos submersíveis possuem movimentos com seis graus de liberdade, então são necessárias seis coordenadas independentes para determinar a posição e orientação do corpo rígido.

Seguindo os padrões propostos pela SNAME (1950), normalmente na robótica submarina, as equações do modelo dinâmico do veículo a seis graus de liberdade, são representadas com o auxílio de dois sistemas de coordenadas, um sistema de coordenadas fixo ou inercial $OXYZ$ e um sistema de coordenadas móvel ou local $O_0X_0Y_0Z_0$, conforme mostra a figura (1), pois os esforços hidrodinâmicos são obtidos com menor dificuldade quando referidos ao próprio veículo.

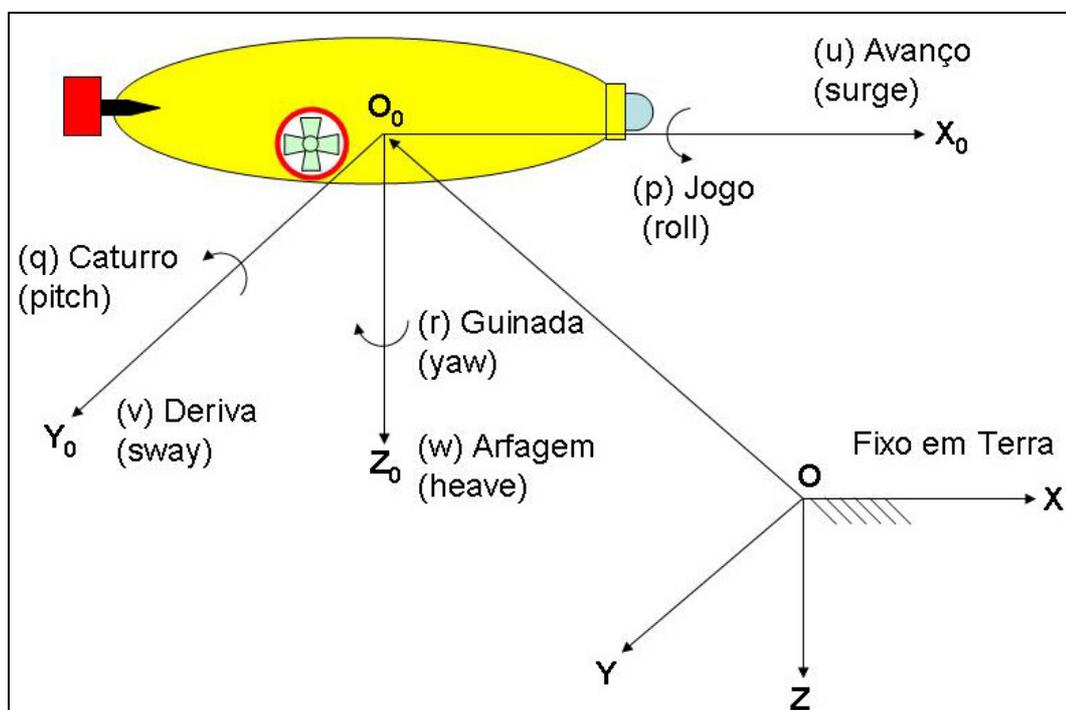


Figura 1 – Sistemas de referências fixo (inercial) e móvel do VSNT JAÚ II.

Segundo FOSSEN (1995), a posição e orientação do veículo devem ser descritos em relação ao sistema de coordenadas global, e as velocidades lineares e angulares devem ser descritas em relação ao sistema de coordenadas móvel.

Os movimentos do veículo submersível em seis graus de liberdade podem ser descritos pelos seguintes vetores:

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; & \eta_1 &= [x, y, z]^T; & \eta_2 &= [\phi, \theta, \psi]^T \\
 \nu &= [\nu_1^T, \nu_2^T]^T; & \nu_1 &= [u, v, w]^T; & \nu_2 &= [p, q, r]^T \\
 \tau &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T; & \tau_1 &= [X, Y, Z]^T; & \tau_2 &= [K, M, N]^T
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde:

η descreve o vetor das posições (η_1) e orientações (η_2) do veículo em relação ao sistema de coordenadas fixo;

ν descreve o vetor das velocidades lineares (ν_1) e angulares (ν_2) do veículo em relação ao sistema de coordenadas móvel;

τ descreve as forças (τ_1) e momentos (τ_2) que agem no veículo em relação ao sistema de coordenadas móvel;

x , y e z são, respectivamente, as posições do veículo em relação aos eixos OX , OY e OZ ;

ϕ é o ângulo de jogo, rotação em torno do eixo OX ;

θ é o ângulo de caturro, rotação em torno do eixo OY ;

ψ é o ângulo de guinada, rotação em torno do eixo OZ ;

u , v e w são, respectivamente, as velocidades lineares do veículo nos eixos O_0X_0 , O_0Y_0 e O_0Z_0 ;

p , q e r são, respectivamente as velocidades angulares do veículo em torno dos eixos O_0X_0 , O_0Y_0 e O_0Z_0 ;

X, Y e Z são respectivamente as forças atuantes no veículo nos eixos O_0X_0 , O_0Y_0 e O_0Z_0 ;

K, M e N são respectivamente os momentos atuantes no veículo nos eixos O_0X_0 , O_0Y_0 e O_0Z_0 .

Para transformação do sistema de coordenadas móvel para o fixo são utilizadas as seguintes equações:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (2.2)$$

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.3)$$

onde:

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

As equações (2.3 e 2.4) descrevem as transformações das velocidades lineares, estabelecendo as velocidades do veículo em relação ao sistema de coordenadas fixo \dot{x} , \dot{y} e \dot{z} , em função das velocidades em relação ao sistema de coordenadas móvel u , v e w , e os ângulos ϕ , θ e ψ .

Neste trabalho serão admitidas as seguintes hipóteses para desenvolver a modelagem matemática da dinâmica do veículo:

- O corpo é rígido;

- Os pesos e suas distribuições no interior do veículo são constantes;
- O modelo é simétrico apenas entre boreste e bombordo.
- A origem dos eixos cartesianos do referencial móvel coincide com o centro de gravidade do veículo ($x_G = y_G = z_G = 0$);
- Os eixos principais de inércia do veículo passam pela origem do sistema de coordenadas móvel.

Com estas hipóteses a equação que descreve a dinâmica do corpo para o sistema de coordenadas móvel, já incluindo as forças de massa adicional, segundo FOSSEN (1995) é dada por:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2.6)$$

onde:

M é a matriz de inércia;

$C(v)$ é a matriz de Coriolis e forças centrípetas;

$D(v)$ é a matriz de amortecimento;

$g(\eta)$ é o vetor de forças e momentos gravitacionais;

τ é o vetor de forças e momentos dos atuadores.

A matriz de inércia M é dada por:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (2.7)$$

onde:

M_{RB} é a matriz de inércia do corpo rígido.

$$M_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

M_A é a matriz de inércia adicional.

$$M_A = - \begin{pmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & X_{\dot{w}} & 0 & X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{p}} & 0 & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & K_{\dot{v}} & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & N_{\dot{r}} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Reescrevendo a equação (2.7) utilizando as equações (2.8 e 2.9) temos:

$$M = \begin{pmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -X_{\dot{w}} & 0 & -X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -Y_{\dot{p}} & 0 & -Y_{\dot{r}} \\ -Z_{\dot{u}} & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & -Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -K_{\dot{v}} & 0 & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ -M_{\dot{u}} & 0 & -M_{\dot{w}} & 0 & I_y - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

As matrizes de Coriolis e forças centrípetas do corpo rígido C_{RB} e da inércia adicional C_A , formam a matriz de Coriolis e forças centrípetas resultante C da seguinte forma:

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (2.11)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_z r & -I_y q \\ -mw & 0 & mu & -I_z r & 0 & I_x p \\ mv & -mu & 0 & I_y q & -I_x p & 0 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$$C_A(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -X_{\dot{w}}u - Z_{\dot{w}}w - Z_{\dot{q}}q & Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{r}}r \\ X_{\dot{w}}u + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q & 0 & -X_{\dot{u}}u - X_{\dot{w}}w - X_{\dot{q}}q \\ -Y_{\dot{v}}v - Y_{\dot{p}}p - Y_{\dot{r}}r & X_{\dot{u}}u + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{q}}q & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & -X_{\dot{w}}u - Z_{\dot{w}}w - Z_{\dot{q}}q & Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{r}}r \\ X_{\dot{w}}u + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q & 0 & -X_{\dot{u}}u - X_{\dot{w}}w - X_{\dot{q}}q \\ -Y_{\dot{v}}v - Y_{\dot{p}}p - Y_{\dot{r}}r & +X_{\dot{u}}u + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{q}}q & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{r}}v - K_{\dot{r}}p - N_{\dot{r}}r & X_{\dot{q}}u + Z_{\dot{q}}w + M_{\dot{q}}q \\ Y_{\dot{r}}v + K_{\dot{r}}p + N_{\dot{r}}r & 0 & -Y_{\dot{p}}v - K_{\dot{p}}p - K_{\dot{r}}r \\ -X_{\dot{q}}u - Z_{\dot{q}}w - M_{\dot{q}}q & Y_{\dot{p}}v + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{r}}r & 0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

A matriz de amortecimento D é formada pelos esforços viscosos que normalmente são expressos por um termo linear e/ou outro termo quadrático, sendo que o termo linear trata dos esforços para o veículo navegando em baixas velocidades produzindo um escoamento laminar, e o termo quadrático trata dos esforços para veículo navegando com velocidades que produzam escoamento turbulento (AVILA 2005).

Neste trabalho será admitido que o movimento do veículo será lento e desta forma a matriz de amortecimento pode ser dada por:

$$D(v)v = D_0v \quad (2.14)$$

onde:

D_0 é a matriz com os coeficientes lineares de amortecimento viscoso;

$$D(v)v = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} & d_{46} & d_{56} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde: d_{ii} são os coeficientes lineares de amortecimento.

O vetor de forças e momentos gravitacionais $g(\eta)$ é formado pelos esforços de restauração. O esforço de gravitação W é relacionado ao peso do veículo, já o esforço de empuxo B é relacionado com a massa de água deslocada pelo veículo, como é mostrado abaixo.

$$W = mg \quad (2.16)$$

$$B = -\nabla \rho g \quad (2.17)$$

onde:

W é o peso do veículo;

B é o força de empuxo do veículo;

m é a massa do veículo;

g é a constante gravitacional local;

∇ é o volume de líquido deslocado pelo veículo;

ρ é a densidade do líquido em que o veículo está submerso.

Considerando que o ponto de aplicação da força de gravitação concentrada coincide com o centro de gravidade do veículo definido por $C_G = [0, 0, 0]^T$, e que o ponto de aplicação da força de empuxo concentrada coincide com o centro de carena do veículo, e é dada por $C_B = [0, 0, z_B]^T$, segundo FOSSEN (1995), o vetor $g(\eta)$ pode ser descrito da seguinte forma:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\text{sen}\theta \\ -(W - B)\text{sen}\phi \cos\theta \\ -(W - B)\cos\phi \cos\theta \\ -z_B B \cos\theta \text{sen}\phi \\ -z_B B \text{sen}\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Tendo em vista que o submersível estará regulado para ter flutuabilidade indiferente, ou seja, $W = B$, então o vetor $g(\eta)$ ficará assim representado:

$$g(\eta) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -z_B W \cos\theta \text{sen}\phi \\ -z_B W \text{sen}\theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

As forças e momentos dos atuadores são agrupados no vetor τ , considerando que o veículo tenha n_x, n_y e n_z propulsores nas superfícies paralelas aos planos X_0Y_0 , Z_0Y_0 e X_0Z_0 respectivamente, tem-se que os esforços devido aos propulsores podem ser expressos da seguinte maneira:

$$\tau = \begin{bmatrix} \sum_1^{n_x} F_{Ti}^X \\ \sum_1^{n_y} F_{Ti}^Y \\ \sum_1^{n_z} F_{Ti}^Z \\ \sum_1^{n_y} F_{Ti}^Y h_{iZ} + \sum_1^{n_z} F_{Ti}^Z h_{iY} \\ \sum_1^{n_x} F_{Ti}^X h_{iZ} + \sum_1^{n_z} F_{Ti}^Z h_{iX} \\ \sum_1^{n_x} F_{Ti}^Z h_{iY} + \sum_1^{n_y} F_{Ti}^Y h_{iX} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

onde:

F_{Ti}^X é o empuxo do i -ésimo propulsor com empuxo na direção do eixo 0_0X_0 ;

h_{iZ} é a distância do propulsor i ao CG do veículo projetada no eixo 0_0Z_0 .

Especificamente para o caso do VSNT JAÚ II, cuja configuração dos propulsores é expressa nas figuras (2 e 3) a expressão respectiva pode ser descrita da seguinte forma:

$$\tau = \begin{pmatrix} F_{T1}^X + F_{T2}^X \\ F_{T5}^Y \\ F_{T3}^Z + F_{T4}^Z + F_{T6}^Z \\ F_{T3}^Z h_{3y} - F_{T4}^Z h_{4y} + F_{T5}^Y h_{5z} \\ F_{T3}^Z h_{3x} + F_{T4}^Z h_{4x} - F_{T6}^Z h_{6x} \\ F_{T1}^X h_{1y} - F_{T2}^X h_{2y} + F_{T5}^Y h_{5z} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

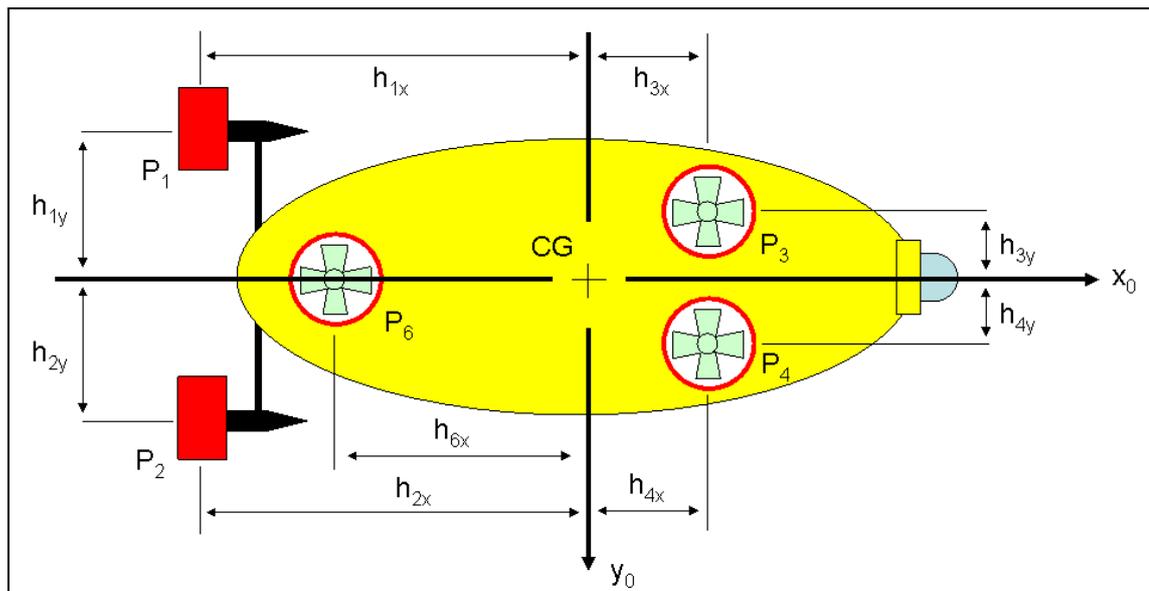


Figura 2 – Disposição dos propulsores na vista superior do veículo.

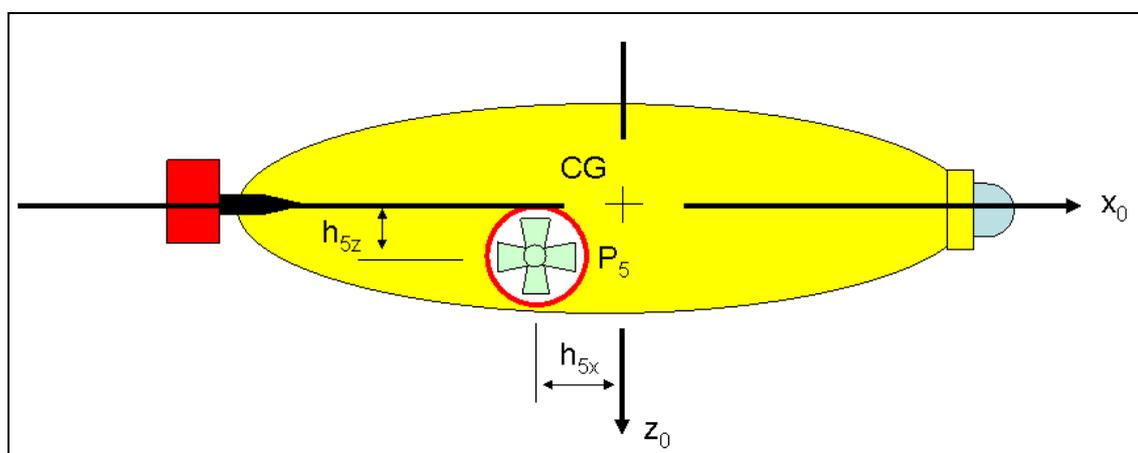


Figura 3 – Disposição dos propulsores na vista lateral (boreste) do veículo.

2.2 IDENTIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS

Conforme referido anteriormente a proposta deste trabalho é obter experimentalmente os coeficientes de massa adicional e de amortecimento conforme descrito nas equações (2.9 e 2.15). O procedimento para isto é efetuar

ensaios de decaimento livre considerando-se movimentos acoplados em mais de uma direção.

O ensaio ideal é forçar o decaimento de modo simultâneo nos 6 graus de liberdade do modelo. No entanto, este ensaio requer um aparato complexo de instalação e medição que está além da capacidade laboratorial hoje existente na FATEC JAHU. Desta forma decidiu-se realizar os ensaios desacoplando-se os movimentos de dois planos distintos, conforme é mostrado a seguir.

Para impor os movimentos de decaimento livre em um plano o veículo é fixado através de molas em uma estrutura retangular e são medidos os deslocamentos através da identificação de 3 marcos visuais instalados no veículo.

Uma rotina computacional processa digitalmente as imagens registradas por uma câmera de vídeo e identifica os marcos visuais, calculando para cada quadro dos vídeos a posição e a inclinação do modelo em relação ao referencial fixo. Com esses dados são calculados em relação ao sistema de coordenadas móvel as velocidades, acelerações e forças restauradoras das molas.

2.2.1 MODELAGEM DINÂMICA PARA OS ENSAIOS DE DECAIMENTO LIVRE

Os movimentos do veículo são separados em dois planos, um vertical considerando movimentos lineares nos eixos 0_0X_0 e 0_0Z_0 (avanço e arfagem) e rotacional em torno do eixo 0_0Y_0 (caturro) e outro horizontal considerando movimentos lineares nos eixos 0_0X_0 e 0_0Y_0 (avanço e deriva) e rotacional em torno do eixo 0_0Z_0 (guinada).

A modelagem dinâmica trata dos dois planos supracitados, porém como exemplo de utilização da metodologia proposta, somente ensaios no plano vertical do modelo são realizados.

Para cada um desses planos, é estabelecido um sistema de coordenadas bidimensional fixo à estrutura, com as origens dos eixos no canto superior esquerdo da estrutura, sendo os eixos OX e OZ no plano vertical e OX e OY no plano horizontal, como mostram as figuras (4 e 5).

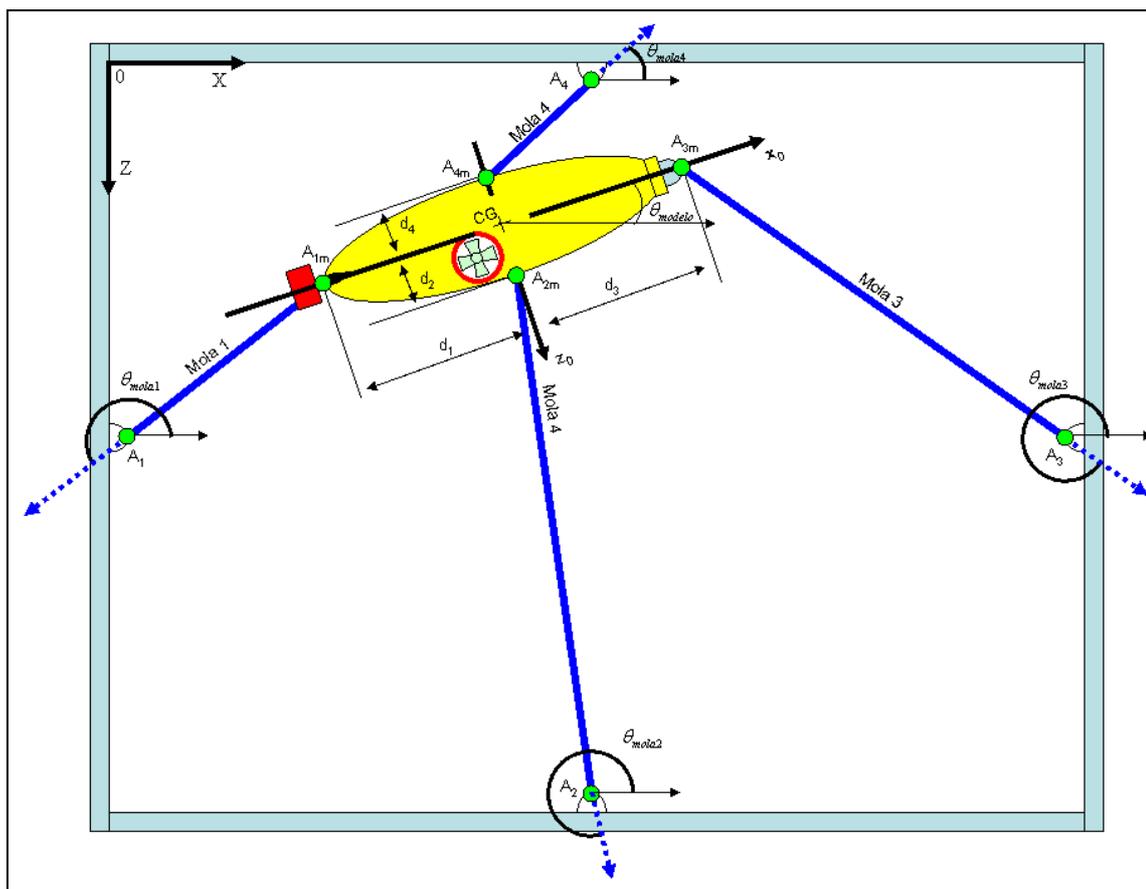


Figura 4 – Disposição do sistema para os ensaios no plano vertical.

Considerando a hipótese que o veículo opera a baixas velocidades, podemos desconsiderar a matriz de Coriolis e forças centrípetas resultante e assumir que o acoplamento entre os movimentos dos planos vertical e horizontal é pequeno e pode ser desprezado, assim podemos reescrever as equações de movimento do veículo para cada um desses planos a partir da equação (2.6).

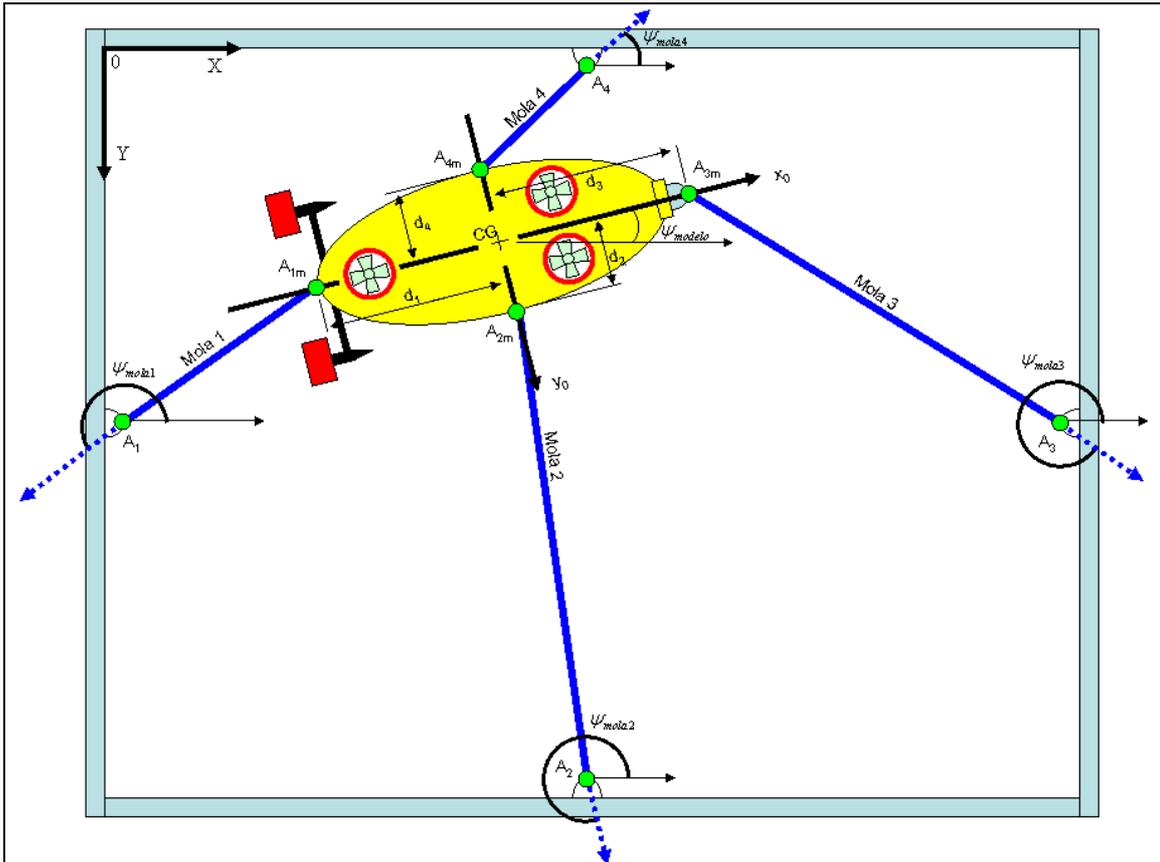


Figura 5 – Disposição do sistema para os ensaios no plano horizontal.

2.2.1.1 MODELAGEM PARA O PLANO VERTICAL

Equação para os movimentos no plano vertical, considerando que $v=\dot{v}=p=\dot{p}=r=\dot{r}=0$

$$M_{(ver)}\dot{v} + D_{(ver)}v + g_{(ver)}(\eta) = -\tau_{(ver)}(\eta) \quad (2.22)$$

onde:

η descreve o vetor das posições e orientações do veículo em relação ao sistema de coordenadas fixo a estrutura neste plano;

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; \quad \eta_1 = [x, z]^T; \quad \eta_2 = [\theta]^T \quad (2.23)$$

ν descreve o vetor das velocidades lineares e angulares do veículo em relação ao sistema de coordenadas móvel neste plano;

$$\nu = [\nu_1^T, \nu_2^T]^T; \quad \nu_1 = [u, w]^T; \quad \nu_2 = [q]^T \quad (2.24)$$

$M_{(ver)}$ é a matriz de inércia para o plano vertical, considerando somente os movimentos nesse plano, obtida a partir da equação (2.9).

$$M_{(ver)} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{13} & m_{15} \\ m_{31} & m_{33} & m_{35} \\ m_{51} & m_{52} & m_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & -X_{\dot{q}} \\ -Z_{\dot{u}} & m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} \\ -M_{\dot{u}} & -M_{\dot{w}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$D_{(ver)}$ é a matriz de amortecimento para o plano vertical, considerando somente o amortecimento linear puro, reiterando a hipótese que o veículo opera a baixas velocidades;

$$D_{(ver)}\nu = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{13} & d_{15} \\ d_{31} & d_{33} & d_{35} \\ d_{51} & d_{53} & d_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

$\mathcal{G}_{(ver)}$ é o vetor de forças e momentos gravitacionais para o plano vertical;

$$\mathcal{G}_{(ver)}(\eta) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -z_B W \sin\theta \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

$\tau_{(ver)}$ é o vetor de forças e momentos gerados pelas molas para o plano vertical;

$$-\tau_{(ver)}(\eta) = \begin{pmatrix} F_{xmolas} \\ F_{zmolas} \\ M_{kmolas} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

$$F_{xmolas} = F_{1xm} + F_{2xm} + F_{3xm} + F_{4xm} \quad (2.29)$$

$$F_{zmolas} = F_{1zm} + F_{2zm} + F_{3zm} + F_{4zm} \quad (2.30)$$

$$M_{Kmolos} = M_{mola1} + M_{mola2} + M_{mola3} + M_{mola4} \quad (2.31)$$

onde:

F_{xmolas} é a força resultante das molas no eixo 0_0X_0 ;

F_{zmolas} é a força resultante das molas no eixo 0_0Z_0 ;

M_{kmolas} é o momento resultante das forças das molas e das distâncias entre os pontos de fixação das molas no modelo até o centro de gravidade do mesmo, para o movimento rotacional em torno do eixo 0_0Y_0 ;

F_{ixm} é a força fornecida pela i-ésima mola na direção do eixo 0_0X_0 ;

F_{izm} é a força fornecida pela i-ésima mola na direção do eixo 0_0Z_0 ;

M_{molai} é o momento fornecido pela da i-ésima mola em torno do eixo 0_0Y_0 .

O vetor de forças e momentos das molas é expresso em relação ao referencial móvel e as equações abaixo mostram a relação entre a força fornecida por cada mola para os sistemas de coordenadas móvel e fixo (figura 6):

$$F_{1xm} = F_{mola1} \cos(\theta_{mola1} - \theta_{modelo}) \quad (2.32)$$

$$F_{2xm} = F_{mola2} \cos(\theta_{mola2} - \theta_{modelo}) \quad (2.33)$$

$$F_{3xm} = F_{mola3} \cos(\theta_{mola3} - \theta_{modelo}) \quad (2.34)$$

$$F_{4xm} = F_{mola4} \cos(\theta_{mola4} - \theta_{modelo}) \quad (2.35)$$

$$F_{1zm} = -F_{mola1} \sin(\theta_{mola2} - \theta_{modelo}) \quad (2.36)$$

$$F_{2zm} = -F_{mola2} \sin(\theta_{mola2} - \theta_{modelo}) \quad (2.37)$$

$$F_{3zm} = -F_{mola3} \sin(\theta_{mola3} - \theta_{modelo}) \quad (2.38)$$

$$F_{4zm} = -F_{mola4} \sin(\theta_{mola4} - \theta_{modelo}) \quad (2.39)$$

$$M_{mola1} = F_{1zm} d_1 \quad (2.40)$$

$$M_{mola2} = F_{2xm} d_2 \quad (2.41)$$

$$M_{mola3} = -F_{3zm} d_3 \quad (2.42)$$

$$M_{mola4} = -F_{4xm} d_4 \quad (2.43)$$

onde:

$F_{mola i}$ é a força fornecida pela i -ésima mola;

$\theta_{mola i}$ é a inclinação da i -ésima mola em relação ao eixo OX ;

θ_{modelo} é o ângulo de inclinação do modelo em relação ao eixo OX (caturro ou rotação em torno do eixo O_0Y_0);

d_i é a distância entre o CG e o ponto de fixação da i -ésima mola, nos eixos 0_0X_0 para $i = 1$ e 3 e 0_0Z_0 para $i = 2$ e 4 .

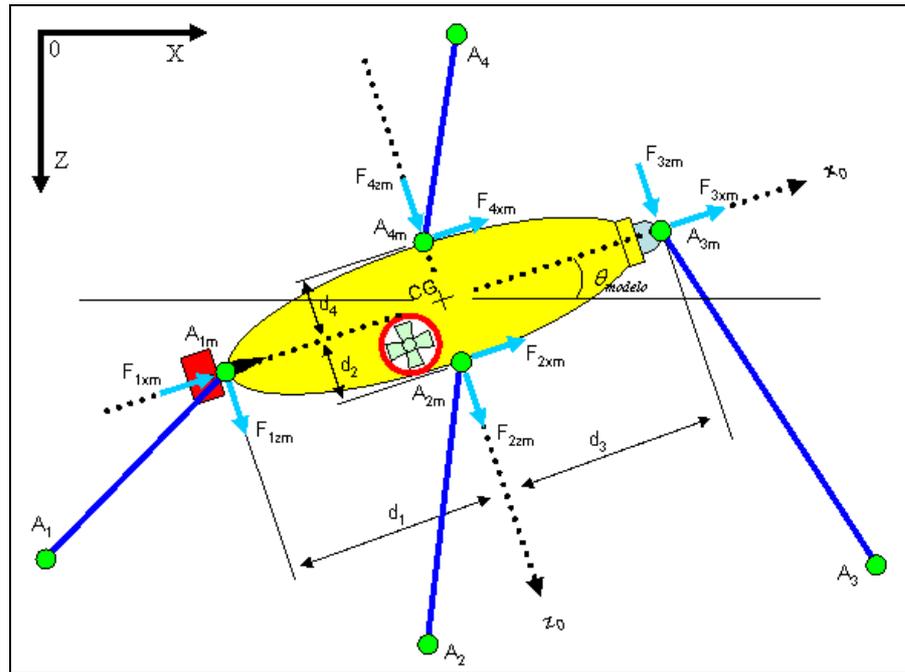


Figura 6 – Decomposição da forças das molas nos eixo 0_0X_0 e 0_0Z_0 .

As forças nas molas 1, 2, 3 e 4, em relação ao sistema de coordenadas fixo, são expressas da seguinte forma:

$$F_{mola1} = \left[\sqrt{(x_{A1m} - x_{A1})^2 + (z_{A1m} - z_{A1})^2} - l_{mola1} \right] k_{mola1} \quad (2.44)$$

$$F_{mola2} = \left[\sqrt{(x_{A2m} - x_{A2})^2 + (z_{A2m} - z_{A2})^2} - l_{mola2} \right] k_{mola2} \quad (2.45)$$

$$F_{mola3} = \left[\sqrt{(x_{A3m} - x_{A3})^2 + (z_{A3m} - z_{A3})^2} - l_{mola3} \right] k_{mola3} \quad (2.46)$$

$$F_{mola4} = \left[\sqrt{(x_{A4m} - x_{A4})^2 + (z_{A4m} - z_{A4})^2} - l_{mola4} \right] k_{mola4} \quad (2.47)$$

onde:

$l_{mola i}$ é o comprimento inicial da i-ésima mola;

x_{Ai} é a coordenada do ponto de fixação da mola i na moldura, projetada no eixo OX ;
 x_{Aim} é a coordenada ponto de fixação da mola i no modelo, projetada no eixo OX ;
 z_{Ai} é a coordenada do ponto de fixação da mola i na moldura, projetada no eixo OZ ;
 z_{Aim} é a coordenada do ponto de fixação da mola i no modelo, projetada no eixo OZ ;
 k_{molai} é a constante elástica da mola i .

2.2.1.2 ADAPTAÇÃO DO MODELO PARA O MOVIMENTO DE CATURRO

Para os ensaios com o movimento de caturro puro, é feita uma adaptação na disposição dos ensaios devido à necessidade de se utilizar um fio de aço para restringir os movimentos do modelo, permitindo somente o movimento rotacional em torno do eixo 0_0Y_0 (Figuras 7 e 8). O atrito no sistema devido à utilização desse fio é desprezado, pois é ínfimo comparado ao atrito viscoso ao qual o sistema é submetido.

A modelagem matemática para o plano vertical é usada para estes ensaios, modificando somente o vetor de forças e momentos $\tau_{(ver)}$ gerados pelas molas, que é reescrito da seguinte forma:

$$-\tau_{(ver)}(\eta) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{kmolas} \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

$$M_{Kmolas} = M_{mola1} + M_{mola2} \quad (2.49)$$

onde:

M_{kmolas} é o momento resultante das forças das molas e das distâncias entre os pontos de fixação das molas no modelo até o centro de gravidade do mesmo, para o movimento rotacional em torno do eixo 0_0Y_0 ;

$M_{mola i}$ é o momento fornecido pela i -ésima mola em torno do eixo $O_0 Y_0$.

Os momentos e as forças geradas pelas molas são expressos em relação ao referencial móvel. Para esta nova disposição dos ensaios, o sistema de coordenadas fixo tem sua origem na metade do comprimento do fio de aço que restringe os movimentos indesejados do modelo e que passa pelo CG do mesmo. As equações abaixo mostram a relação entre a força fornecida por cada mola para os sistemas de coordenadas móvel e fixo.

$$M_{mola1} = F_{1zm} d_{h1} + F_{1xm} d_{v1} \quad (2.50)$$

$$M_{mola2} = F_{2zm} d_{h2} + F_{2xm} d_{v2} \quad (2.51)$$

$$F_{1xm} = F_{mola1} \cos(\theta_{mola1} - \theta_{modelo}) \quad (2.52)$$

$$F_{2xm} = F_{mola2} \cos(\theta_{mola2} - \theta_{modelo}) \quad (2.53)$$

$$F_{1zm} = -F_{mola1} \sin(\theta_{mola2} - \theta_{modelo}) \quad (2.54)$$

$$F_{2zm} = -F_{mola2} \sin(\theta_{mola2} - \theta_{modelo}) \quad (2.55)$$

$$F_{mola1} = \left[\sqrt{(x_{A1m} - x_{A1})^2 + (z_{A1m} - z_{A1})^2} - l_{mola1} \right] k_{mola1} \quad (2.56)$$

$$F_{mola2} = \left[\sqrt{(x_{A2m} - x_{A2})^2 + (z_{A2m} - z_{A2})^2} - l_{mola2} \right] k_{mola2} \quad (2.57)$$

onde:

$F_{mola i}$ é a força fornecida pela i -ésima mola;

$\theta_{mola i}$ é a inclinação da i -ésima mola em relação aos eixos OY ;

θ_{modelo} é o ângulo de inclinação do modelo em relação ao eixo OX (caturro ou rotação em torno do eixo O_0Y_0);

d_{hi} é a distância entre o CG e o ponto de fixação da i -ésima mola no eixo O_0X_0 ;

d_{vi} é a distância entre o CG e o ponto de fixação da i -ésima mola, no eixo O_0Z_0 ;

l_{molai} é o comprimento inicial da i -ésima mola;

x_{Ai} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola na moldura, no eixo OX ;

x_{Aim} é a coordenada ponto de fixação da i -ésima mola no modelo, no eixo OX ;

z_{Ai} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola na moldura, no eixo OZ ;

z_{Aim} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola no modelo, no eixo OZ ;

k_{molai} é a constante elástica da i -ésima mola.

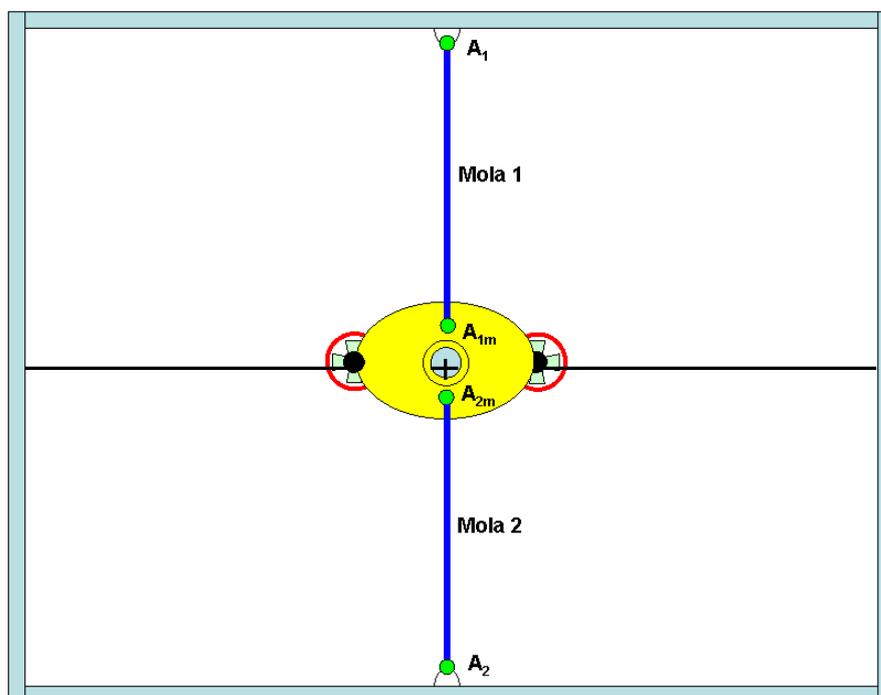


Figura 7 – Vista frontal da disposição para ensaios de caturro.

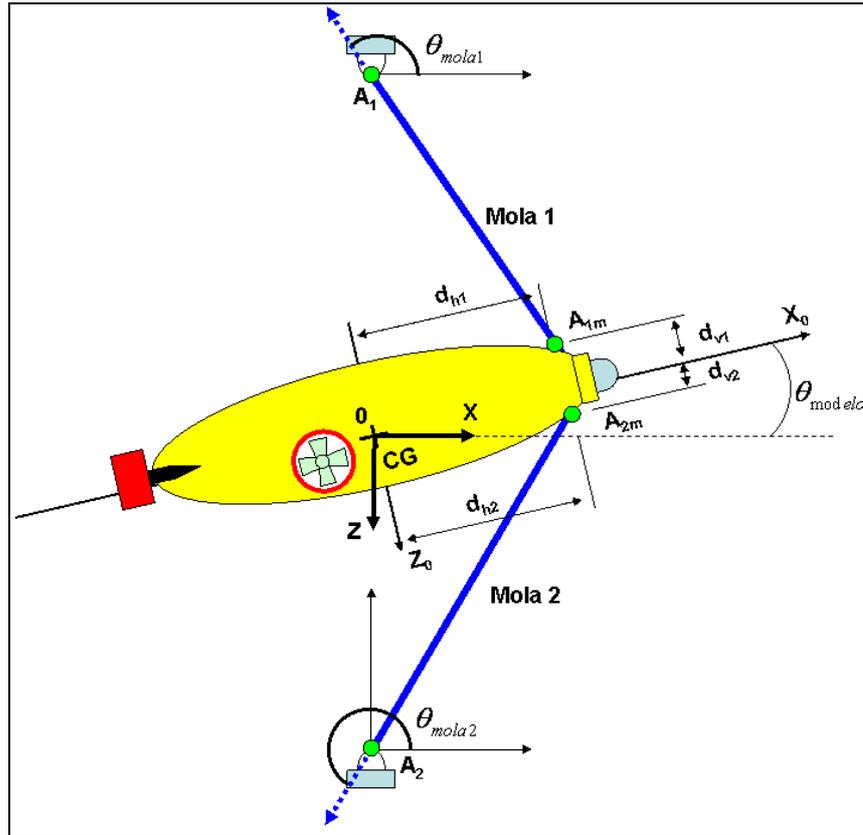


Figura 8 – Vista de boreste da disposição para ensaios de caturro.

2.2.1.3 MODELAGEM PARA O PLANO HORIZONTAL

Equação para os movimentos no plano horizontal, Considerando que $w = \dot{w} = p = \dot{p} = q = \dot{q} = 0$.

$$M_{(hor)}\dot{v} + D_{(hor)}v + g_{(hor)}(\eta) = -\tau_{(hor)}(\eta) \quad (2.58)$$

onde:

η descreve o vetor das posições e orientações do veículo em relação ao sistema de coordenadas fixo a estrutura neste plano;

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; \quad \eta_1 = [x, y]^T; \quad \eta_2 = [\psi]^T \quad (2.59)$$

v descreve o vetor das velocidades lineares e angulares do veículo em relação ao sistema de coordenadas móvel neste plano;

$$v = [v_1^T, v_2^T]^T; \quad v_1 = [u, v]^T; \quad v_2 = [r]^T \quad (2.60)$$

$M_{(hor)}$ é a matriz de inércia para o plano horizontal, considerando somente os movimentos nesse plano, obtida a partir da equação (2.9);

$$M_{(hor)} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{26} \\ m_{61} & m_{62} & m_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m - X_{\ddot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\ddot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

$D_{(hor)}$ é a matriz de amortecimento para o plano horizontal, considerando somente o amortecimento linear puro;

$$D_{(hor)}v = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{26} \\ d_{61} & d_{62} & d_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix} \quad (2.62)$$

$g_{(hor)}$ é o vetor de forças e momentos gravitacionais para o plano horizontal;

$$g_{(hor)}(\eta) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.63)$$

$\tau_{(hor)}$ é o vetor de forças e momentos gerados pelas molas para o plano horizontal.

$$-\tau_{(hor)}(\eta) = \begin{pmatrix} F_{xmolas} \\ F_{ymolas} \\ M_{nmolas} \end{pmatrix} \quad (2.64)$$

$$F_{xmolas} = F_{1xm} + F_{2xm} + F_{3xm} + F_{4xm} \quad (2.65)$$

$$F_{ymolas} = F_{1ym} + F_{2ym} + F_{3ym} + F_{4ym} \quad (2.66)$$

$$M_{nmolas} = M_{mola1} + M_{mola2} + M_{mola3} + M_{mola4} \quad (2.67)$$

onde:

F_{xmolas} é a força resultante das molas no eixo 0_0X_0 ;

F_{ymolas} é a força resultante das molas no eixo 0_0Y_0 ;

M_{nmolas} é o momento resultante das forças das molas e das distâncias entre os pontos de fixação das molas no modelo até o centro de gravidade do mesmo para o movimento rotacional em torno do eixo 0_0Z_0 ;

F_{ixm} é a força fornecida pela i -ésima mola na direção do eixo 0_0X_0 ;

F_{iym} é a força fornecida pela i -ésima mola na direção do eixo 0_0Y_0 ;

$M_{mola i}$ é o momento fornecido pela da i -ésima mola em torno do eixo 0_0Z_0 .

O vetor de forças e momentos das molas é expresso em relação ao referencial móvel, as equações abaixo mostram a relação entre a força fornecida por cada mola para os sistemas de coordenadas fixo e móvel (figura 9):

$$F_{1xm} = F_{mola1} \cos(\psi_{mola1} - \psi_{modelo}) \quad (2.68)$$

$$F_{2xm} = F_{mola2} \cos(\psi_{mola2} - \psi_{modelo}) \quad (2.69)$$

$$F_{3ym} = F_{mola3} \cos(\psi_{mola3} - \psi_{modelo}) \quad (2.70)$$

$$F_{4xm} = F_{mola4} \cos(\psi_{mola4} - \psi_{modelo}) \quad (2.71)$$

$$F_{1ym} = -F_{mola1} \sin(\psi_{mola1} - \psi_{modelo}) \quad (2.72)$$

$$F_{2ym} = -F_{mola2} \sin(\psi_{mola2} - \psi_{modelo}) \quad (2.73)$$

$$F_{3ym} = -F_{mola3} \sin(\psi_{mola3} - \psi_{modelo}) \quad (2.74)$$

$$F_{4ym} = -F_{mola4} \sin(\psi_{mola4} - \psi_{modelo}) \quad (2.75)$$

$$M_{mola1} = F_{1ym} d_1 \quad (2.76)$$

$$M_{mola2} = F_{2xm} d_2 \quad (2.77)$$

$$M_{mola3} = -F_{3ym} d_3 \quad (2.78)$$

$$M_{mola4} = -F_{4xm} d_4 \quad (2.79)$$

onde:

$F_{mola i}$ é a força fornecida pela i -ésima mola;

$\psi_{mola i}$ é a inclinação da i -ésima mola em relação aos eixos OX ;

ψ_{modelo} é o ângulo de inclinação do modelo em relação ao eixo OX (rumo ou rotação em torno do eixo O_0Z_0);

d_i é a distância entre o CG e ponto de fixação da i -ésima mola, nos eixos O_0X_0 para $i = 1$ e 3 e O_0Y_0 para $i = 2$ e 4 .

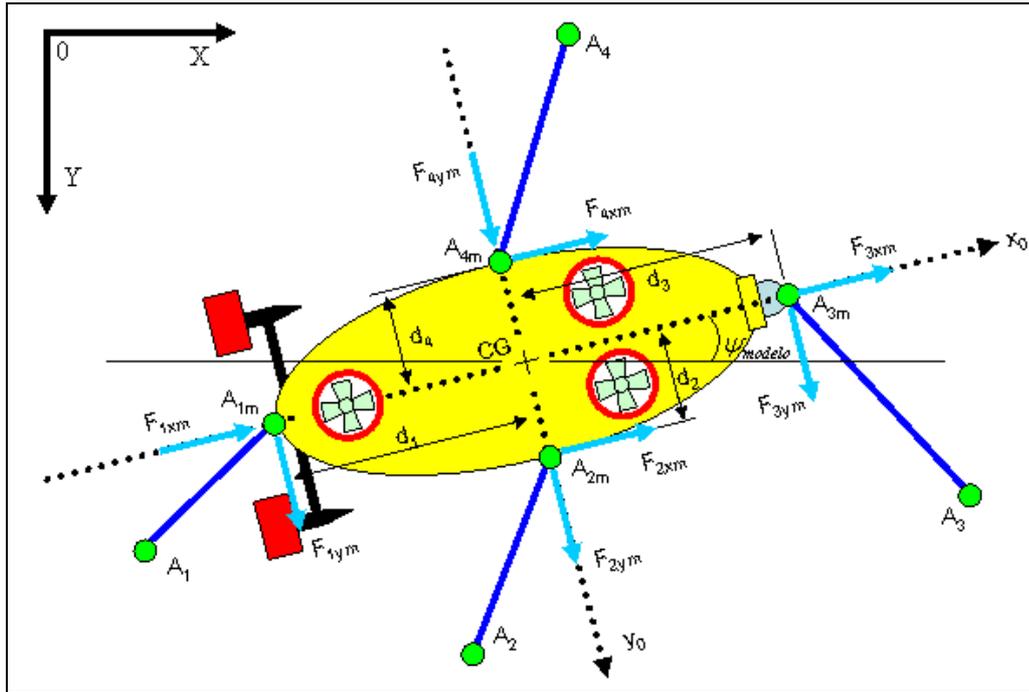


Figura 9 – Decomposição da forças das molas nos eixos 0_0X_0 e 0_0Y_0 .

As forças nas molas 1, 2, 3 e 4, em relação ao sistema de coordenadas fixo, são expressas da seguinte forma:

$$F_{mola1} = \left[\sqrt{(x_{A1m} - x_{A1})^2 + (y_{A1m} - y_{A1})^2} - l_{mola1} \right] k_{mola1} \quad (2.78)$$

$$F_{mola2} = \left[\sqrt{(x_{A2m} - x_{A2})^2 + (y_{A2m} - y_{A2})^2} - l_{mola2} \right] k_{mola2} \quad (2.79)$$

$$F_{mola3} = \left[\sqrt{(x_{A3m} - x_{A3})^2 + (y_{A3m} - y_{A3})^2} - l_{mola3} \right] k_{mola3} \quad (2.80)$$

$$F_{mola4} = \left[\sqrt{(x_{A4m} - x_{A4})^2 + (y_{A4m} - y_{A4})^2} - l_{mola4} \right] k_{mola4} \quad (2.81)$$

onde:

$l_{mola i}$ é o comprimento inicial da i -ésima mola;

x_{Ai} é a coordenada do ponto de fixação da mola i na moldura, projetada no eixo $0X$;

x_{Aim} é a coordenada ponto de fixação da mola i no modelo, projetada no eixo $0X$;

y_{Ai} é a coordenada do ponto de fixação da mola i na moldura, projetada no eixo OY ;
 y_{Aim} é a coordenada do ponto de fixação da mola i no modelo, projetada no eixo OZ ;
 k_{molai} é a constante elástica da mola i .

As coordenadas dos pontos de fixação das molas no veículo e na estrutura são obtidas através do processamento digital das imagens registradas nos ensaios, procedimento este detalhado posteriormente nesta dissertação.

2.2.2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Uma vez obtidas as posições durante o ensaio decaimento livre e calculadas as velocidades, acelerações, forças restauradoras gravitacionais e das molas para o referencial móvel, pois as equações dinâmicas do veículo são expressas em relação a esse sistema de coordenadas, há que se estabelecer um procedimento para obter os parâmetros desconhecidos que são as massas adicionais e os coeficientes de amortecimento viscoso.

Admitindo-se que o amortecimento seja linear, a equação da dinâmica do modelo pode ser expressa a partir das equações (2.22 e 2.58) da seguinte forma:

$$(M + M_A)\dot{v} + D_0v + g(\eta) = -\tau(\eta) \quad (2.82)$$

A equação (2.82) pode ser reagrupada como:

$$M_A\dot{v} + D_0v = \lambda \quad (2.83)$$

onde:

$$\lambda = -\tau(\eta) - M\dot{v} - g(\eta) \quad (2.84)$$

Sejam as matrizes Φ^T e θ tais que:

$$\Phi^T(\dot{v}, v) = [\Phi_M^T(\dot{v}) \quad \Phi_{D_0}^T(v)] \quad (2.85)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_M \\ \theta_{D_0} \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

$$\Phi_M^T(\dot{v})\theta_M = M_A\dot{v} \quad (2.87)$$

$$\Phi_{D_0}^T(v)\theta_{D_0} = D_0v \quad (2.88)$$

Considerando-se as equações (2.85 a 2.88) a equação (2.83) pode ser dada por:

$$\lambda = \Phi^T(\dot{v}, v)\theta \quad (2.89)$$

O objetivo é determinar os elementos do vetor θ . Vale ressaltar que para cada experimento tem-se uma seqüência de dados conhecidos que são o vetor λ e a matriz $\Phi^T(\dot{v}, v)$. Como a relação é linear o vetor θ pode ser estimado utilizando-se o método dos mínimos quadrados minimizando a seguinte função:

$$V = \frac{1}{2} \sum_1^N [\lambda - \Phi^T(\dot{v}, v)\theta]^T [\lambda - \Phi^T(\dot{v}, v)\theta] \quad (2.90)$$

onde:

N é quantidade de instantes em que a posição e a inclinação do veículo são calculadas durante o ensaio analisado.

Efetuada-se $\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0$, obtém-se que o valor de θ é dado por:

$$\theta^T = \left[\sum_1^N (\lambda^T \Phi(\dot{\nu}, \nu)) \right] \left[\sum_1^N \Phi^T(\dot{\nu}, \nu) \Phi(\dot{\nu}, \nu) \right]^{-1} \quad (2.91)$$

A matriz Φ e o vetor θ para o caso deste trabalho são dados por:

Para o plano vertical temos:

$$\Phi_{M(ver)}^T(\dot{\nu}) = - \begin{pmatrix} \dot{u} & \dot{w} & \dot{q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{u} & 0 & \dot{w} & \dot{q} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{u} & 0 & \dot{w} & \dot{q} \end{pmatrix} \quad (2.92)$$

$$\Phi_{N(ver)}^T(\nu) = - \begin{pmatrix} u & w & q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u & w & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u & w & q \end{pmatrix} \quad (2.93)$$

$$\theta_{M(ver)} = [X_{\dot{u}}, X_{\dot{w}}, X_{\dot{q}}, Z_{\dot{w}}, Z_{\dot{q}}, M_{\dot{q}}]^T \quad (2.94)$$

$$\theta_{N(ver)} = [X_u, X_w, X_q, Z_u, Z_w, Z_q, M_u, M_w, M_q]^T \quad (2.95)$$

Para o plano horizontal:

$$\Phi_{M(hor)}^T(\dot{\nu}) = - \begin{pmatrix} \dot{u} & \dot{v} & \dot{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{u} & 0 & \dot{v} & \dot{r} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{u} & 0 & \dot{v} & \dot{r} \end{pmatrix} \quad (2.96)$$

$$\Phi_{N(hor)}^T(\nu) = - \begin{pmatrix} u & v & r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u & v & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u & v & r \end{pmatrix} \quad (2.97)$$

$$\theta_{M(hor)} = [X_{\dot{u}}, X_{\dot{v}}, X_{\dot{r}}, Z_{\dot{v}}, Z_{\dot{r}}, M_{\dot{r}}]^T \quad (2.98)$$

$$\theta_{N(hor)} = [X_u, X_v, X_r, Z_u, Z_v, Z_r, M_u, M_v, M_r]^T \quad (2.99)$$

onde assumimos que para ambos os planos, $M_A = M_A^T$, enquanto $N \neq N^T$.

2.2.3 VISÃO COMPUTACIONAL

Para a identificação da posição do modelo durante os ensaios com os movimentos do plano vertical, utilizaremos o processamento digital das imagens registradas por uma câmera de vídeo.

Um visor na parede lateral do tanque de provas permite a obtenção das imagens do interior do mesmo por uma câmera que é posicionada próxima ao visor, alinhada paralelamente ao plano vertical longitudinal do modelo, para os ensaios com os movimentos de avanço puro, arfagem pura e avanço, arfagem e caturro combinados (Figura 10) e alinhada paralelamente ao plano vertical transversal do modelo para os ensaios com movimento de caturro puro (Figura 11).

O sistema de aquisição das imagens é composto por:

- câmera de vídeo SONY modelo SteadyShot CCD-TR848;
- computador Intel Pentium IV, com velocidade de 1,8 Ghz, 512 Mega Bytes de memória RAM, sistema operacional Windows XP equipado com uma placa de captura de vídeo PixelView com chipset BT 878;
- driver e programa para aquisição de vídeo do mesmo fabricante da placa.

As imagens capturadas pela câmera de vídeo são coloridas e transmitidas até a placa de captura por um cabo tipo RCA para redução de ruídos e proteção dos fios contra a alta umidade presente no ambiente.

Para cada ensaio, as seqüências de imagens adquiridas são gravadas em um vídeo tipo AVI, sendo que uma rotina computacional é utilizada para posterior leitura

desses arquivos, separando-os quadro a quadro (Figura 12). Cada quadro é transformado em uma matriz tridimensional $M \times N \times 3$, que representa a imagem no espaço de cores HSV (Hue, saturation e value), onde a cor de cada componente da imagem é representado da seguinte forma:

- Matiz ou tonalidade (H), é a cor pura indicada nos valores da matriz 1 ($M \times N$);
- Saturação (S) também chamado de “pureza”, indica a quantidade de branco misturado com a matiz. Quanto menor esse valor, mais parecida com tons de cinza é o elemento da imagem e seus valores são indicados na matriz 2 ($M \times N$);
- Brilho (V) é o brilho da cor indicado na matriz 3 ($M \times N$).

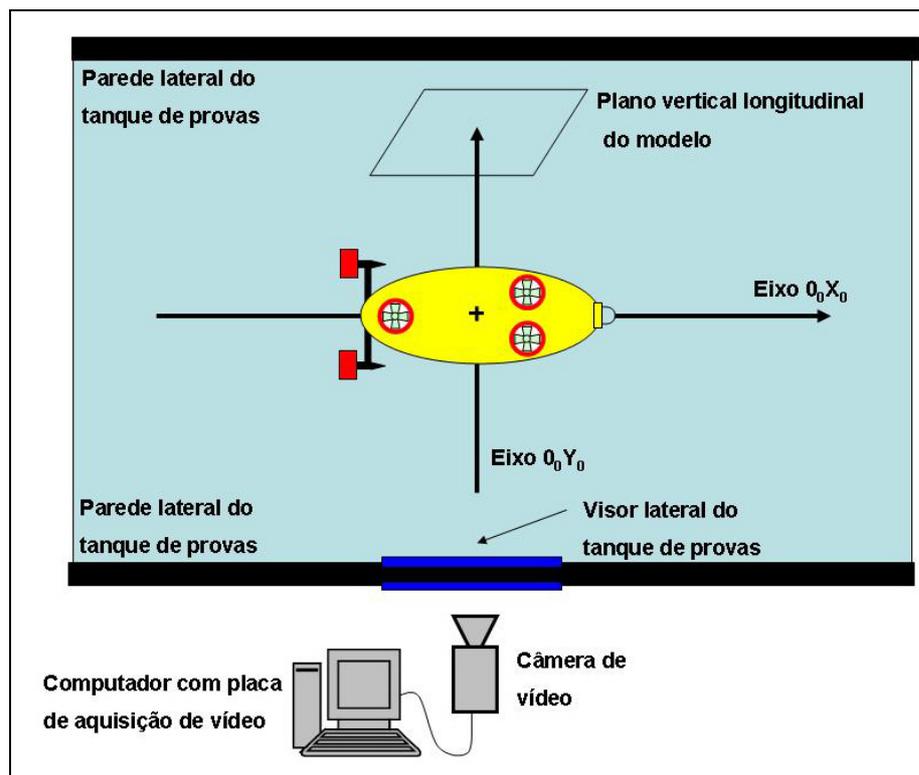


Figura 10 – Sistema de aquisição de imagens montado no tanque de provas da FATEC JAHU, para ensaios com movimentos do plano vertical.

No programa MatLab a representação das imagens no espaço de cores HSV (Figura 13) ocorre da seguinte forma:

- A matriz 1 (H – hue), varia de 0 a 1 e corresponde a cor pura, variando do vermelho, passando pelo amarelo, verde, ciano, azul, magenta e retornando ao vermelho.
- A matriz 2 (S – saturation), varia de 0 a 1 e corresponde a saturação da cor pura, variando do insaturado, ou tons de cinza até totalmente saturado, ou sem componente branco.
- O brilho, varia de 0 a 1 e é representado pela matriz 3 (V – value). (Mathworks, 2009).

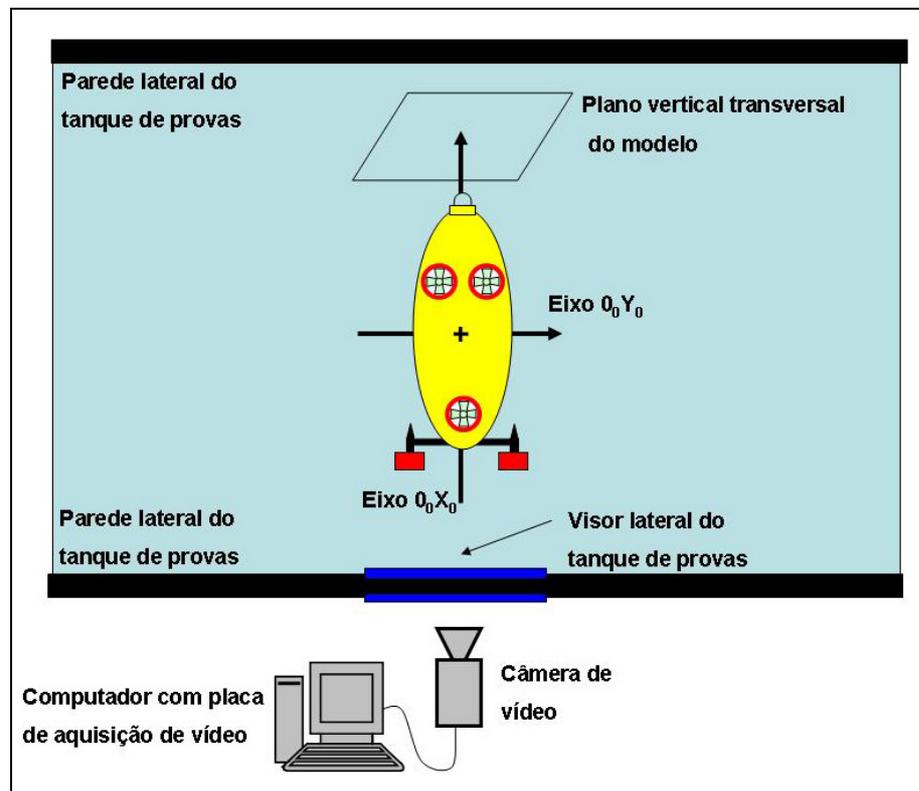


Figura 11 – Sistema de aquisição de imagens montado no tanque de provas da FATEC JAHU para ensaios com movimento de caturro puro.

A definição da câmera define o número de linhas (M) e colunas (N) dessas três matrizes, sendo que cada elemento dessas matrizes é denominado pixel (picture element).

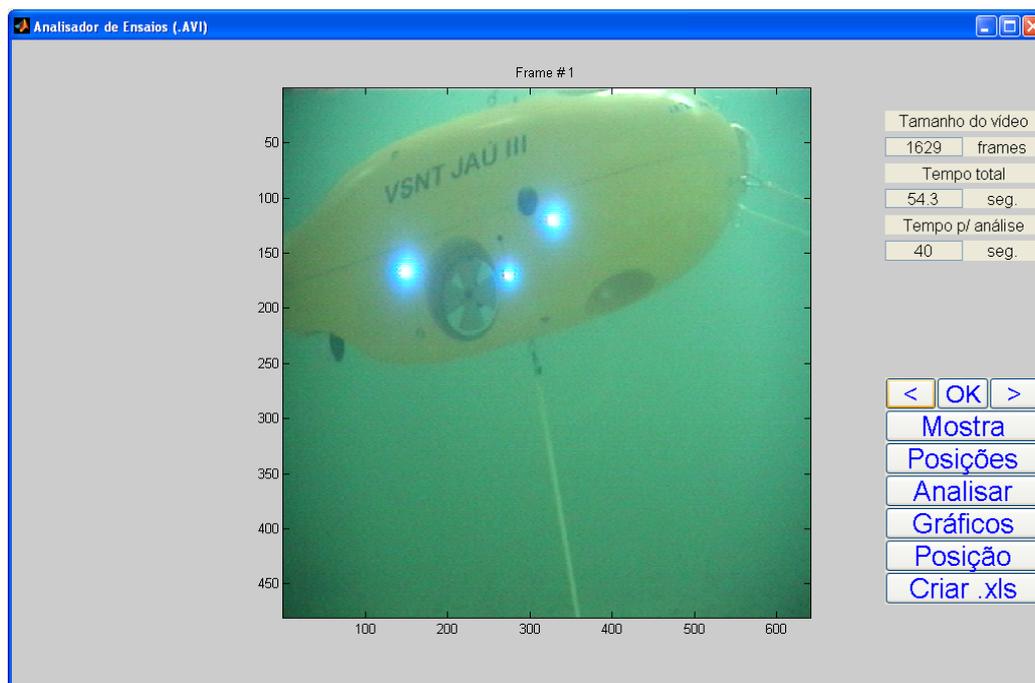


Figura 12 – Imagem do primeiro quadro do vídeo AVI de um ensaio.

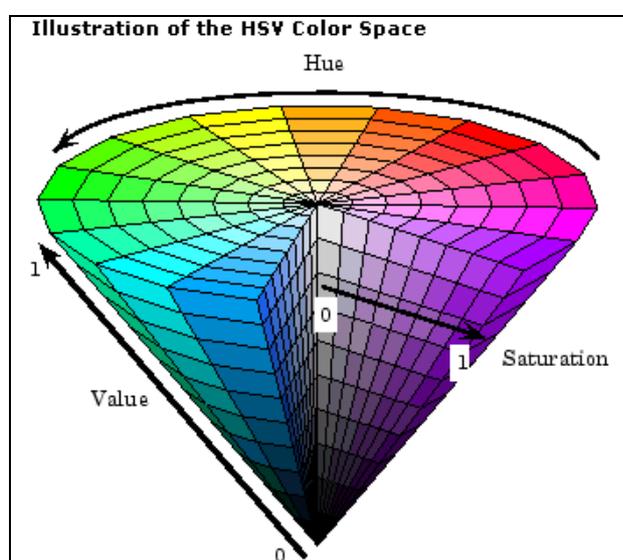


Figura 13 – Espaço de cores HSV (Mathworks, 2009).

Para os ensaios com o modelo do VSNT JAÚ II, a taxa de aquisição do sistema de captura de vídeo é configurada para 30 quadros por segundo, considerando que o veículo opera a baixas velocidades (máximo 2 m/s). A configuração dos equipamentos permite capturar imagens com resolução de 640x480 pixels.

A metodologia utilizada para identificação das posições do modelo nos ensaios através do processamento digital das imagens necessita de marcos visuais instalados no veículo. Diodos emissores de luz (leds) de cor azul são utilizados como marcos nos ensaios.

Para os ensaios com os movimentos de avanço, arfagem e combinado (avanço, arfagem e caturro), são utilizados 3 marcos denominados L_1 , L_2 e L_3 (Figura 14). Isto se faz necessário para verificar a ausência de movimentos acoplados entre os planos vertical e horizontal. Como nos ensaios com o movimento de caturro puro os outros movimentos do veículo são restringidos através de um fio de aço preso a estrutura e que atravessa as buchas presas ao modelo, somente 1 marco denominado L_4 é utilizado (Figura 15).

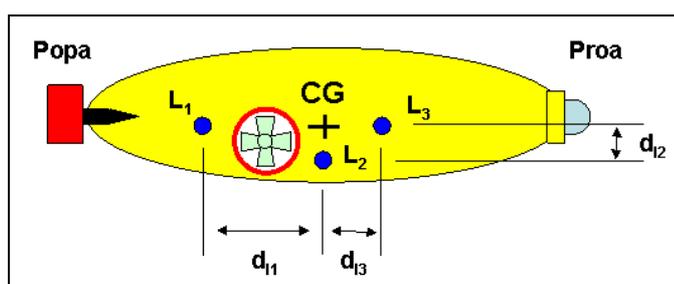


Figura 14 – Disposição dos marcos visuais L_1 , L_2 e L_3 .

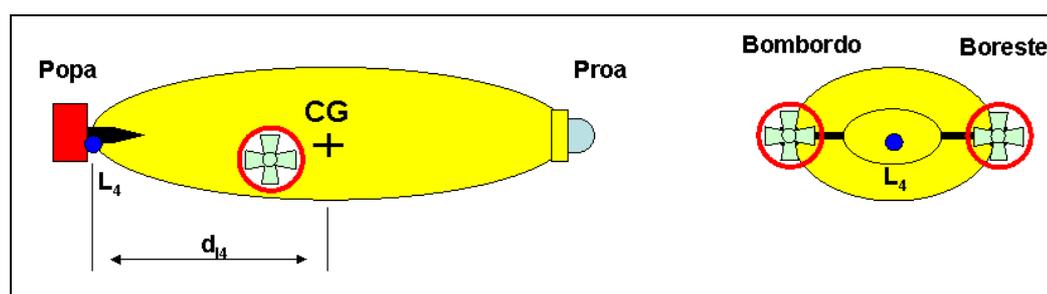


Figura 15 – Disposição do marco visual L_4 .

Para o reconhecimento dos leds nas imagens, o processamento baseia-se na segmentação das imagens em dois processos. No primeiro são procuradas nas matrizes que representam as imagens no espaço HSV, as posições que respeitam as seguintes condições:

- 1 - Matriz 3 (V – Value) com valores igual a 1;
- 2 - Matriz 1 (H – Hue) com valores maiores que 0,5.

Uma nova matriz binária R de dimensões $M \times N$ iguais as das linhas e colunas das matrizes HSV é formada, sendo que as posições que respeitam as condições impostas assumem valor 1 e as posições que não respeitam assumem valor 0.

Nesta matriz, para corrigir o efeito de distorção da lente da câmera, conhecido como efeito barril, utiliza-se a metodologia e coeficientes propostos por BUSCARIOLLO(2008), ressaltando que a câmera utilizada nestes ensaios é a mesma utilizada pelo autor citado.

Para evitar que itens indesejados sejam classificados como marcos visuais, o segundo processo de segmentação é realizado na matriz corrigida, onde são procuradas regiões que contenham pixels conectados entre si (vizinhança de 8 pixels conectados) com área maior que 100 pixels quadrados (Figura 16).

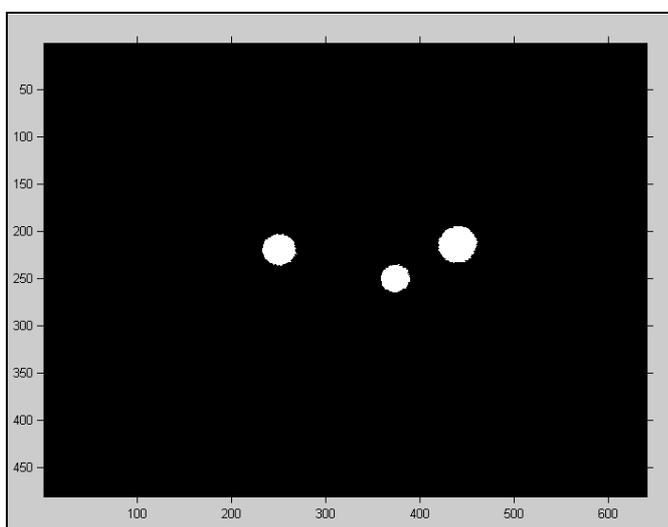


Figura 16 – Regiões reconhecidas com marcos visuais.

A varredura das matrizes é realizada da esquerda para direita e de cima para baixo e as regiões encontradas que respeitam os critérios são classificadas na ordem como marcos visuais L_1 , L_2 e L_3 e registradas em uma variável. Para os ensaios com

movimento de arfagem somente um marco visual é reconhecido e classificado com L_4 . A partir destas variáveis, as coordenadas dos centros geométricos de cada marco visual são calculadas como mostrado a seguir:

$$cg_{L_n} = (x_{mL_n}, z_{mL_n}) \quad (2.100)$$

$$x_{mL_n} = \frac{\sum_1^k x_{L_n}}{k} \quad (2.101)$$

$$z_{mL_n} = \frac{\sum_1^k z_{L_n}}{k} \quad (2.102)$$

onde:

L_n é a região de pixels classificada como marco visual de índice n ;

cg_{L_n} é o vetor das coordenadas em pixels do centro geométrico da região L_n ;

x_{mL_n} é o valor médio das coordenadas em pixels dos pontos da região L_n em relação as colunas da matriz R ;

z_{mL_n} é o valor médio das coordenadas em pixels dos pontos da região L_n em relação as linhas da matriz R ;

$\sum_1^k x_{L_n}$ é a somatória de 1 a k das coordenadas em pixels dos pontos da região L_n

em relação as colunas da matriz R ;

$\sum_1^k z_{L_n}$ é a somatória de 1 a k das coordenadas em pixels dos pontos da região L_n

em relação as linhas da matriz R ;

k é o número de pixels encontrados na região L_n .

Para cada ensaio são gravados dois vídeos, um do modelo em sua posição inicial, com aproximadamente 1 segundo de duração, e outro que registra os movimentos do veículo após ser retirado de sua posição inicial e solto para que retorne a sua posição inicial atuado pela força restauradora das molas.

Para os ensaios de avanço, arfagem e acoplados, com o processamento dos vídeos de acordo com a metodologia citada que utiliza as equações (2.100, 2.101 e 2.102), tem-se as coordenadas em pixels dos marcos visuais em cada quadro (figura 17). Calculando a média dessas coordenadas durante a duração do vídeo, podemos calcular a inclinação inicial e a posição inicial do CG do veículo através das equações a seguir:

$$\theta = \arctan\left(\frac{(z_{mL_1} - z_{mL_3})}{(x_{mL_1} - x_{mL_3})}\right) \quad (2.103)$$

$$CG_p = (CG_{px}, CG_{pz}) \quad (2.104)$$

$$CG_{px} = x_{mL_2} - (d_{l_2} / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.105)$$

$$CG_{pz} = z_{mL_2} + (d_{l_2} / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.106)$$

onde:

θ é a inclinação do veículo;

CG_p é o vetor das coordenadas em pixels do CG do veículo;

CG_{px} é a coordenada em pixels do CG do veículo em relação as colunas da matriz

R ;

CG_{pz} é a coordenada em pixels do CG do veículo em relação as linhas da matriz R ;

p_{pm} é o fator que relaciona pixels com metros;

d_{li} é a distância entre o marco visual de índice i até o CG do veículo em metros.

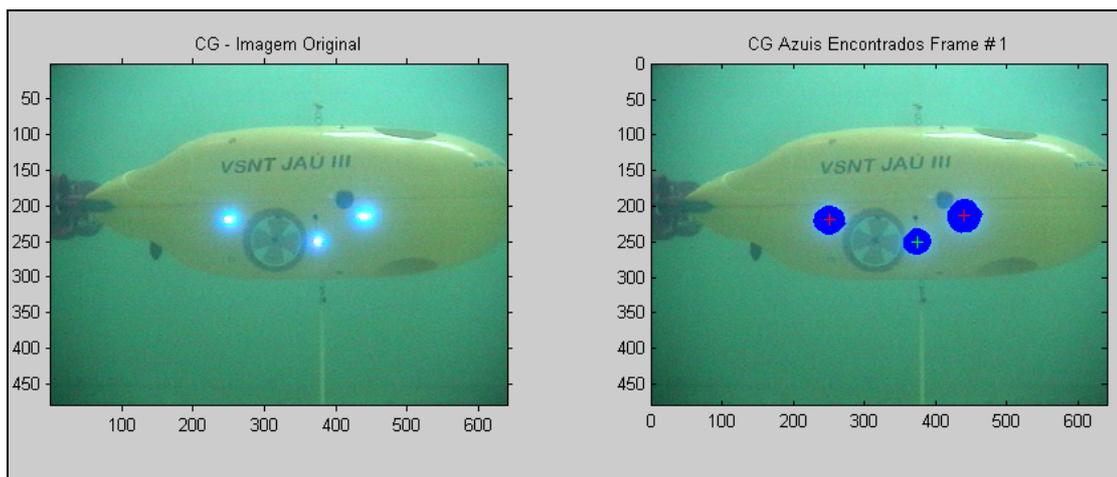


Figura 17 – Marcos visuais L_1 , L_2 e L_3 reconhecidos e seus respectivos centros geométricos utilizados para cálculo da posição inicial do CG do veículo e inclinação inicial do mesmo.

As posições dos pontos de fixação das molas na estrutura em relação à posição do CG e inclinação inicial do veículo são calculadas através das seguintes equações:

$$A_{1x} = CG_x - ((d_{pit1} + d_{p1}) / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.107)$$

$$A_{1z} = CG_z + ((d_{pit1} + d_{p1}) / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.108)$$

$$A_{2x} = CG_x + ((d_{pit2} + d_{p2}) / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.109)$$

$$A_{2z} = CG_z + ((d_{pit2} + d_{p2}) / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.110)$$

$$A_{3x} = CG_z + ((d_{pit3} + d_{p3}) / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.111)$$

$$A_{3z} = CG_z - ((d_{pit3} + d_{p3}) / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.112)$$

$$A_{4x} = CG_x - ((d_{pit4} + d_{p4}) / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.113)$$

$$A_{4z} = CG_z - ((d_{pit4} + d_{p4}) / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.114)$$

onde:

A_{ix} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola na estrutura em relação as colunas da matriz R , para $i = 1$ a 4 ;

A_{iz} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola na estrutura em relação as linhas da matriz R , para $i = 1$ a 4 ;

d_{piti} é a distância entre os pontos de fixação da i -ésima mola no modelo e na estrutura para o sistema em equilíbrio.

d_{pi} é a distância entre o ponto de fixação da i -ésima mola no modelo e o CG do mesmo.

Processando as imagens dos vídeos para cada ensaio segundo as equações (2.100, 2.101, 2.102, 2.103, 2.104, 2.105 e 2.106), temos para cada quadro as coordenadas em pixels dos marcos visuais, a posição do CG do veículo e a inclinação do mesmo (Figura 18). Com esses dados podemos calcular o ponto de fixação das molas no veículo em relação ao CG do mesmo em cada quadro de acordo com as equações abaixo:

$$A_{1mx} = CG_x - (d_{p1} / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.115)$$

$$A_{1mz} = CG_z + (d_{p1} / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.116)$$

$$A_{2mx} = CG_x + (d_{p2} / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.117)$$

$$A_{2mz} = CG_z + (d_{p2} / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.118)$$

$$A_{3mx} = CG_x + (d_{p3} / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.119)$$

$$A_{3mz} = CG_z - (d_{p3} / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.120)$$

$$A_{4mx} = CG_x - (d_{p4} / p_{pm}) \sin(\theta) \quad (2.121)$$

$$A_{4mz} = CG_z - (d_{p4} / p_{pm}) \cos(\theta) \quad (2.122)$$

onde:

A_{imx} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola no modelo em relação as colunas da matriz R ;

A_{imz} é a coordenada do ponto de fixação da i -ésima mola no modelo em relação as linhas da matriz R ;

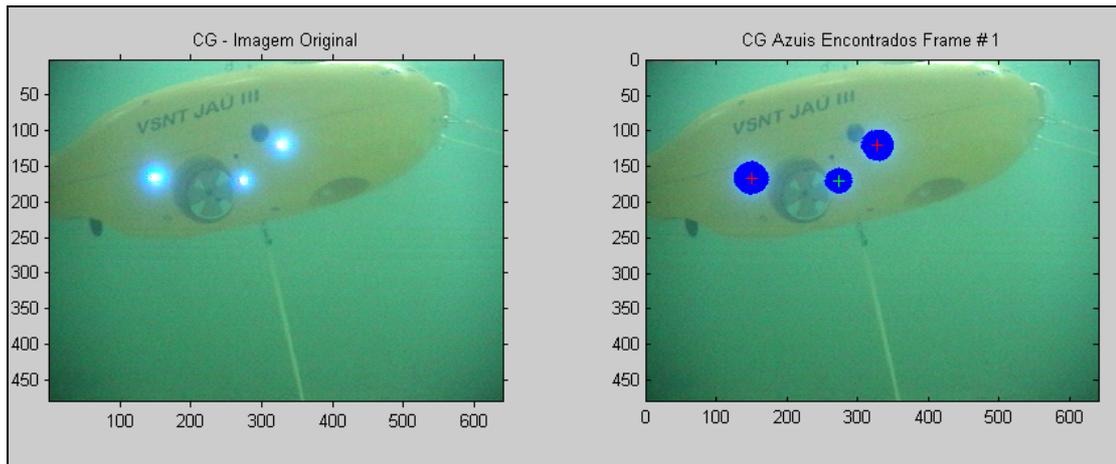


Figura 18 – Marcos visuais L_1 , L_2 e L_3 reconhecidos e seus respectivos centros geométricos utilizados para calculo da posição do CG e inclinação do veículo em cada quadro.

Utilizando os pontos de fixação das molas na estrutura e os pontos de fixação das molas no modelo em cada quadro, temos a força em cada mola para cada quadro através das equações a seguir:

$$F_{mola1} = 2((d_{pit1} p_{pm}) - l_1)k_1 \quad (2.123)$$

$$F_{mola2} = 2((d_{pit2} p_{pm}) - l_2)k_2 \quad (2.124)$$

$$F_{mola3} = 2((d_{pit3} p_{pm}) - l_3)k_3 \quad (2.125)$$

$$F_{mola4} = 2((d_{pit4} p_{pm}) - l_4)k_4 \quad (2.126)$$

$$d_{pit1} = \sqrt{(A_{1mx} - A_{1x})^2 + (A_{1mz} - A_{1z})^2} \quad (2.127)$$

$$d_{pit2} = \sqrt{(A_{2mx} - A_{2x})^2 + (A_{2mz} - A_{2z})^2} \quad (2.128)$$

$$d_{pit3} = \sqrt{(A_{3mx} - A_{3x})^2 + (A_{3mz} - A_{3z})^2} \quad (2.129)$$

$$d_{pit4} = \sqrt{(A_{4mx} - A_{4x})^2 + (A_{4mz} - A_{4z})^2} \quad (2.130)$$

onde:

$F_{mola i}$ é a força na i-ésima mola;

l_i é o comprimento inicial da i-ésima mola;

k_i é a constante elástica da i-ésima mola;

d_{piti} é a distância em pixels entre os pontos de fixação da i-ésima mola na estrutura e no modelo;

A partir da força calculada para cada mola durante os ensaios, obtêm as forças e os momentos de cada mola para os eixos do referencial móvel utilizando as equações abaixo:

$$F_{1xm} = F_{mola1} \cos(\theta_{mola1} - \theta) \quad (2.131)$$

$$F_{2xm} = F_{mola2} \cos(\theta_{mola2} - \theta) \quad (2.132)$$

$$F_{3xm} = F_{mola3} \cos(\theta_{mola3} - \theta) \quad (2.133)$$

$$F_{4xm} = F_{mola4} \cos(\theta_{mola4} - \theta) \quad (2.134)$$

$$F_{1zm} = -F_{mola1} \sin(\theta_{mola1} - \theta) \quad (2.135)$$

$$F_{2zm} = -F_{mola2} \sin(\theta_{mola2} - \theta) \quad (2.136)$$

$$F_{3zm} = -F_{mola3} \sin(\theta_{mola3} - \theta) \quad (2.137)$$

$$F_{4zm} = -F_{mola4} \sin(\theta_{mola4} - \theta) \quad (2.138)$$

$$M_{mola1} = F_{1zm} d_{p1} \quad (2.139)$$

$$M_{mola2} = F_{2xm} d_{p2} \quad (2.140)$$

$$M_{mola3} = -F_{3zm} d_{p3} \quad (2.141)$$

$$M_{mola4} = -F_{4xm} d_{p4} \quad (2.142)$$

$$\theta_{mola1} = \arctan\left(\frac{(A_{1mz} - A_{1z})}{(A_{1mx} - A_{1x})}\right) + \pi \quad (2.143)$$

$$\theta_{mola2} = \arctan\left(\frac{(A_{2mz} - A_{2z})}{(A_{2mx} - A_{2x})}\right) + \frac{3\pi}{2} \quad (2.144)$$

$$\theta_{mola3} = \arctan\left(\frac{(A_{3mz} - A_{3z})}{(A_{3mx} - A_{3x})}\right) \quad (2.145)$$

$$\theta_{mola4} = \arctan\left(\frac{(A_{4mz} - A_{4z})}{(A_{4mx} - A_{4x})}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (2.146)$$

onde:

F_{ixm} é a força da i-ésima mola projetada no eixo 0_0X_0 do veículo;

F_{izm} é a força da i-ésima mola projetada no eixo 0_0Z_0 do veículo;

M_{molai} é o momento gerado pela força da i-ésima mola em torno do eixo 0_0Y_0 ;

θ_{molai} é a inclinação da i-ésima mola.

Para os ensaios de caturro puro, com o processamento dos vídeos do ensaio, têm-se as coordenadas em pixels do marco visual L_4 em cada quadro (figura 19). Calculando a média dessas coordenadas durante a duração do vídeo, temos a posição do marco L_4 para o veículo com inclinação inicial nula.

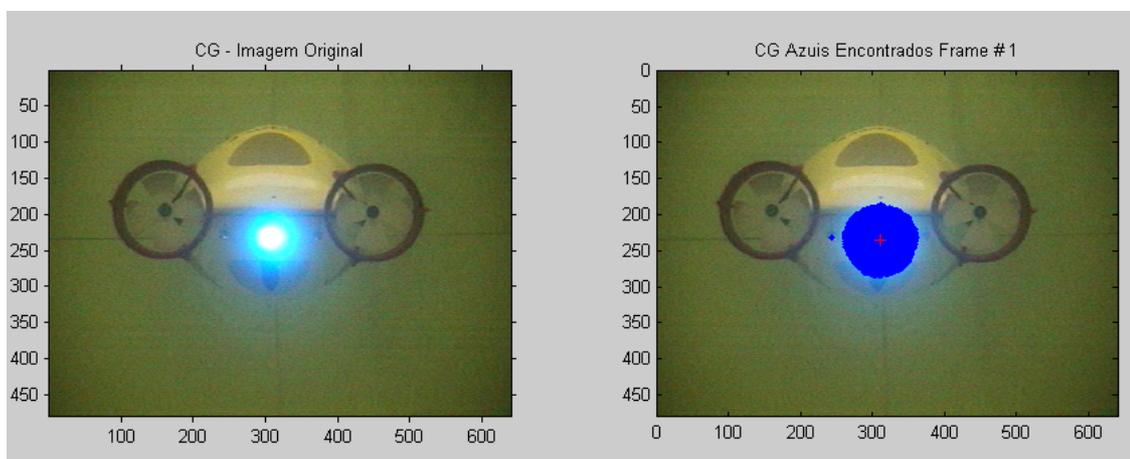


Figura 19 – Marco visual L_4 reconhecido e seu centro geométrico.

Os pontos de fixação das molas na estrutura são calculados de acordo com as equações abaixo:

$$A_{1x} = 0 \quad (2.147)$$

$$A_{1z} = d_{pit1} + d_{p1} \quad (2.148)$$

$$A_{2x} = 0 \quad (2.149)$$

$$A_{2z} = -d_{pit2} - d_{p2} \quad (2.150)$$

Processando as imagens dos vídeos para cada ensaio, temos para cada quadro as coordenadas em pixels do marco visual L₄ (Figura 20). A inclinação do veículo, os pontos de fixação das molas no veículo e os momentos gerados pelas forças das molas são calculados de acordo com as equações abaixo:

$$\theta = \arcsin\left(\left(z_{mL4} - z_{mL40}\right) p_{pm} / d_{ledx}\right) \quad (2.151)$$

$$A_{1mx} = d_{px1} \cos(\theta) - d_{py1} \sin(\theta) \quad (2.152)$$

$$A_{1mz} = -d_{py1} \cos(\theta) - d_{px1} \sin(\theta) \quad (2.153)$$

$$A_{2mx} = d_{px2} \cos(\theta) + d_{py2} \sin(\theta) \quad (2.154)$$

$$A_{2mz} = d_{py2} \cos(\theta) - d_{px2} \sin(\theta) \quad (2.155)$$

$$d_{pit1} = \sqrt{(A_{1mx} - A_{1m})^2 + (A_{1mz} - A_{1z})^2} \quad (2.156)$$

$$d_{pit2} = \sqrt{(A_{2mx} - A_{2x})^2 + (A_{2mz} - A_{2z})^2} \quad (2.157)$$

$$F_{mola1} = (d_{pit1} - l_1)k_1 \quad (2.158)$$

$$F_{mola2} = (d_{pit2} - l_2)k_2 \quad (2.159)$$

$$\theta_{mola1} = \arctan\left(\frac{(A_{1mz} - A_{1z})}{(A_{1mx} - A_{1x})}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (2.160)$$

$$\theta_{mola2} = \arctan\left(\frac{(A_{2mz} - A_{2z})}{(A_{2mx} - A_{2x})}\right) + \frac{3\pi}{2} \quad (2.161)$$

$$F_{1xm} = F_{mola1} \cos(\theta_{mola1} - \theta) \quad (2.162)$$

$$F_{2xm} = F_{mola2} \cos(\theta_{mola2} - \theta) \quad (2.163)$$

$$F_{1zm} = -F_{mola1} \sin(\theta_{mola1} - \theta) \quad (2.164)$$

$$F_{2zm} = -F_{mola2} \sin(\theta_{mola2} - \theta) \quad (2.165)$$

$$M_{mola1} = -F_{xm1} d_{v1} - F_{zm1} d_{h1} \quad (2.166)$$

$$M_{mola2} = F_{2xm} d_{v2} - F_{2zm} d_{h2} \quad (2.167)$$

onde:

d_{ledx} é a distância entre o ponto de fixação do marco visual L_4 e o CG do modelo no eixo 0_0X_0 .

d_{hi} é a distância no eixo 0_0X_0 entre o CG e pontos de fixação da i -ésima mola no modelo.

d_{vi} é a distância no eixo 0_0Z_0 entre o CG e pontos de fixação da i -ésima mola no modelo.

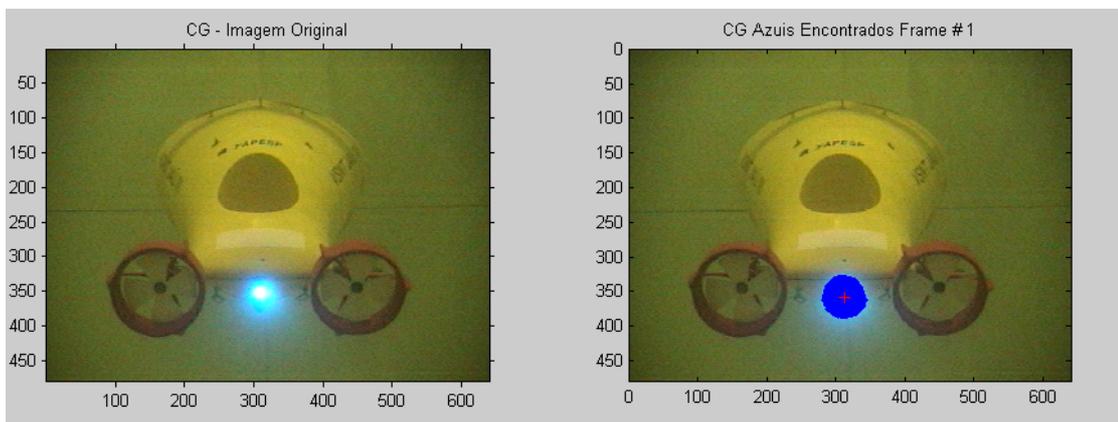


Figura 20 – Marco visual L_4 e seu centro geométrico para cada quadro.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo estão detalhados os procedimentos adotados para os ensaios de decaimento livre para obtenção das massas adicionais e os coeficientes de amortecimento do VSNT JAÚ II.

Os experimentos foram realizados no tanque de provas da FATEC JAHU, com um modelo na escala 1:2,5 do veículo e, conforme descrito no Capítulo 2, os coeficientes foram obtidos considerando-se movimentos no plano vertical do modelo, a saber: movimentos de avanço, arfagem e caturro.

Para realizar os ensaios de decaimento livre bidimensional o modelo foi convenientemente fixado em uma estrutura através de molas. Na posição de equilíbrio não há inclinação do modelo em relação ao referencial fixo.

Durante os ensaios o veículo é deslocado de sua posição de equilíbrio e retorna a sua posição inicial sob a ação restauradora das molas. Uma câmera de vídeo posicionada ao lado do tanque de provas registra os movimentos do veículo através de um visor. Este registro consiste em armazenar as imagens de 3 marcos visuais instalados no modelo, os quais através da técnica de processamento digital e relações geométricas permitem determinar as coordenadas do centro de gravidade do modelo bem como o seu ângulo em função do tempo.

Para garantir a repetibilidade dos procedimentos cada ensaio foi repetido 3 vezes e para garantir sempre o mesmo deslocamento inicial foi instalado um sistema de disparo rápido denominado gatilho.

Através das posições determinadas do veículo durante o tempo para cada ensaio são calculadas as velocidades, acelerações e a força restauradora das molas.

Uma rotina computacional que utiliza o método dos mínimos quadrados processa os dados obtidos nos ensaios de forma a determinar os coeficientes hidrodinâmicos do veículo.

Os dados dos ensaios com os movimentos puros (avanço, arfagem e caturro), são utilizados para determinar os termos das diagonais principais das matrizes de massa adicional e amortecimento viscoso, já os dados dos ensaios que combinam os movimentos puros, são utilizados para determinar os termos das diagonais principais e também os termos acoplados.

A comparação dos resultados obtidos nos ensaios com os movimentos puros com os movimentos combinados permite avaliar a metodologia proposta.

3.1 DISPOSIÇÃO DOS ENSAIOS

Para os ensaios com os movimentos no plano vertical, o veículo foi preso a estrutura através de seis molas de forma a permanecer no centro da estrutura (Figura 21). Optou-se por utilizar duas molas na popa, denominadas Mola 1a (bombordo) e Mola 1b (boreste) e duas na proa, denominadas Mola 3a (bombordo) e Mola 3b (boreste), para evitar movimentos de guinada, conforme é mostrado na figura (22).

Para adequação do sistema de molas ao modelo matemático proposto, considera-se uma mola equivalente na popa denominada Mola 1 e uma mola equivalente na proa denominada Mola 3. As constantes das molas equivalentes 1 e 3 são dadas por:

$$k_1 = k_{1a} + k_{1b} \quad (3.1)$$

$$k_3 = k_{3a} + k_{3b} \quad (3.2)$$

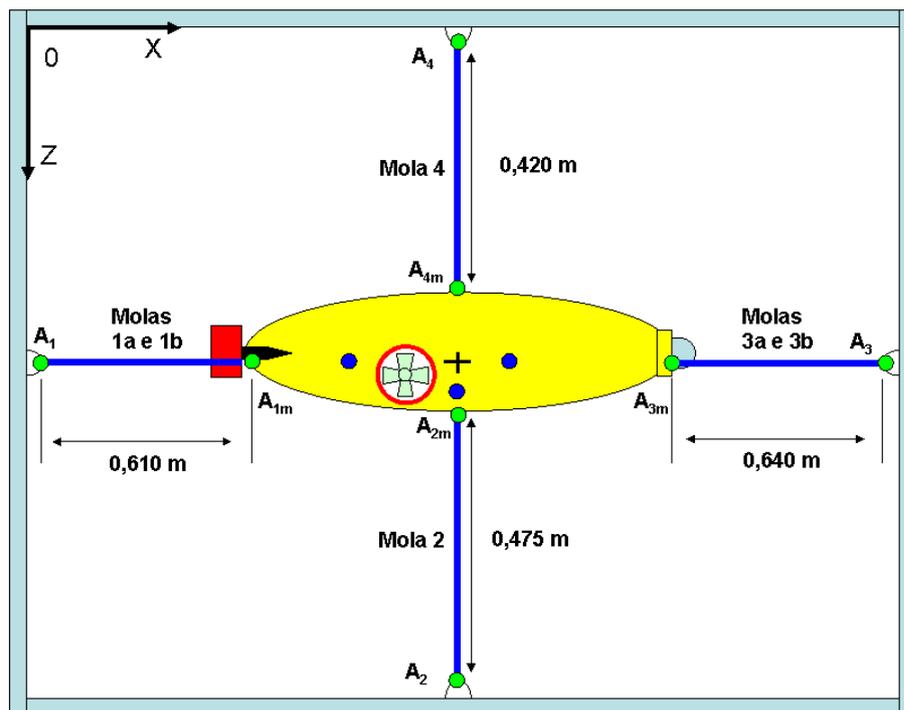


Figura 21 – Disposição para os ensaios no plano vertical.

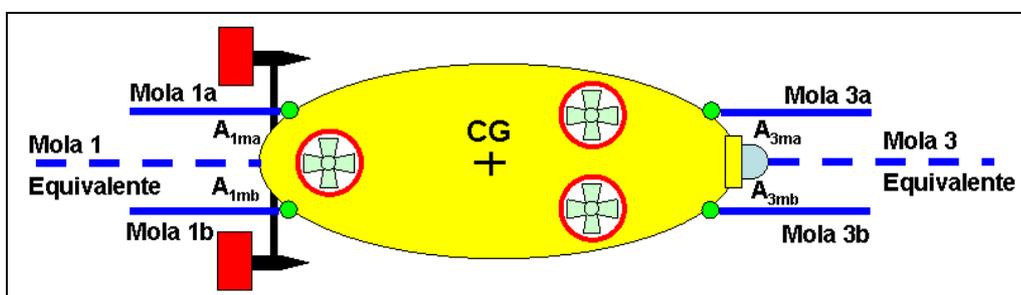


Figura 22 – Disposição para os ensaios no plano vertical (vista superior do veículo).

Para os ensaios com o movimento de caturro puro, duas molas denominadas Mola R1 e Mola R2 prendem o veículo a estrutura, de modo a mantê-lo sem inclinação (Figura 23). Um fio de aço de diâmetro 3 mm, preso a estrutura e tensionado por um sistema de catraca, é utilizado para evitar movimentos indesejados do veículo como avanço e arfagem.

Devido à distância entre os pontos de fixação do fio de aço na estrutura, foi necessária a instalação de duas colunas intermediárias denominadas col1 e col2,

que são fixadas a estrutura e ao fio de modo que evitem a oscilação do mesmo no sentido vertical e horizontal (Figura 25).

O fio de aço atravessa duas buchas de 30 mm de comprimento produzidas em ¹technyl, fixadas na estrutura do veículo e alinhadas ao CG do mesmo, sendo que o atrito gerado pelo contato entre o fio e as buchas é desprezado, considerado que o material utilizado nas buchas possui baixo coeficiente de atrito e que a lubrificação do sistema pela água diminui ainda mais este coeficiente.

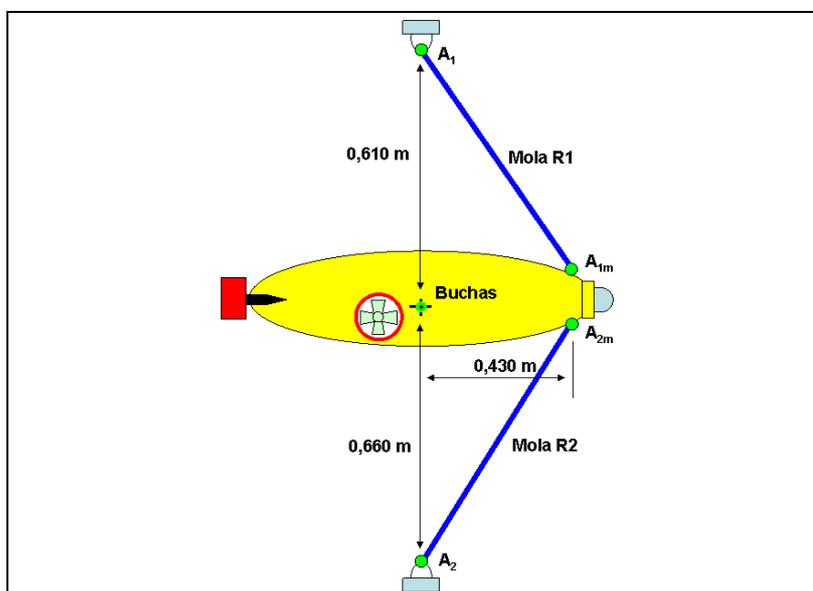


Figura 23 – Disposição para os ensaios de caturro (vista de boreste).

Para fixação das molas no veículo e na estrutura, foram utilizados anéis metálicos denominados pitões (Figura 26).

As molas utilizadas para os ensaios com movimento de caturro puro são denominadas molasG e as molas utilizadas para ensaios com outros movimento são denominadas molasF. As constantes elásticas dessas molas foram determinadas através de ensaios expressas em função da porcentagem de alongação das mesmas (figura 24) de acordo com as equações a seguir.

¹ technyl é marca de produtos da Rhodia.

$$k_{molaG} = -2,00 \cdot 10^{-5} x^3 + 1,46 \cdot 10^{-2} x^2 - 3,96x + 6,30 \cdot 10^2 \quad (3.3)$$

$$k_{molaF} = 3,00 \cdot 10^{-6} x^3 + 4,00 \cdot 10^{-4} x^2 - 7,19x + 2,16 \cdot 10^2 \quad (3.4)$$

onde:

k_{molaG} é a constante elástica da molaG em N/m.

k_{molaF} é a constante elástica da molaF em N/m.

x é a porcentagem de alongação das molas.

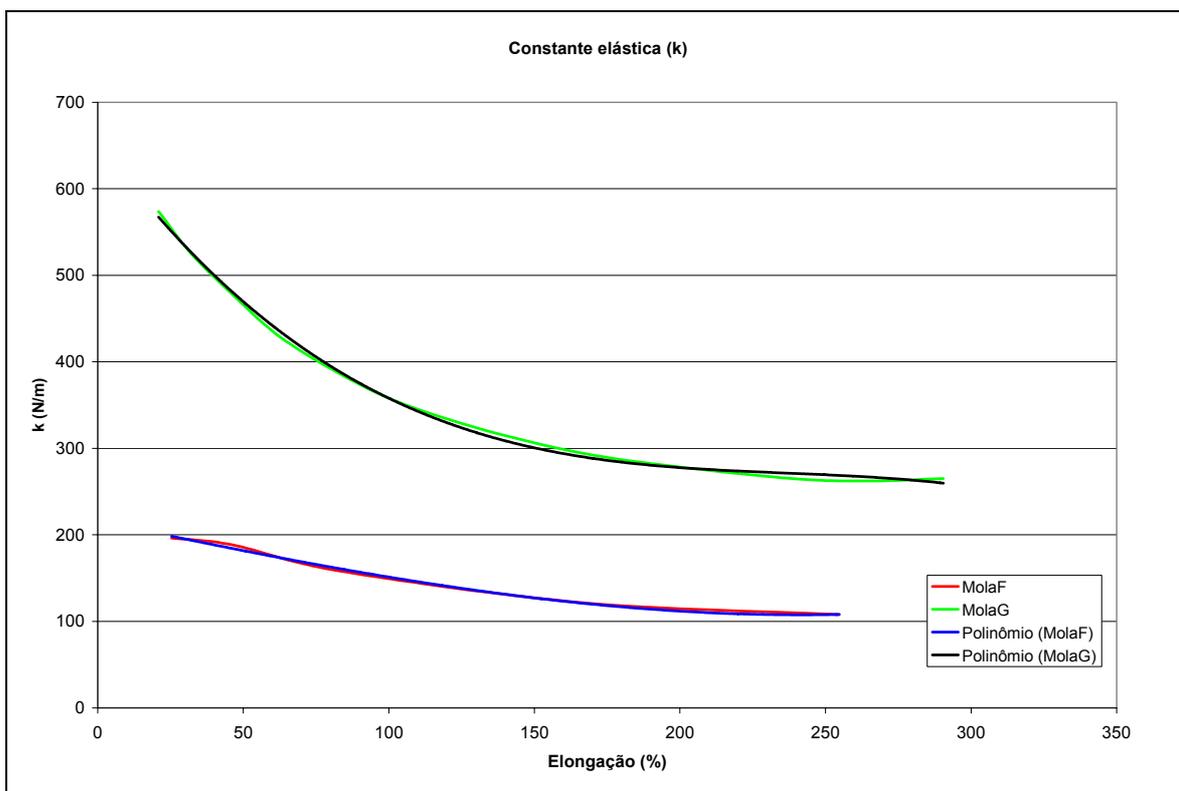


Figura 24 – Constante elástica das molas em função da porcentagem de alongação.

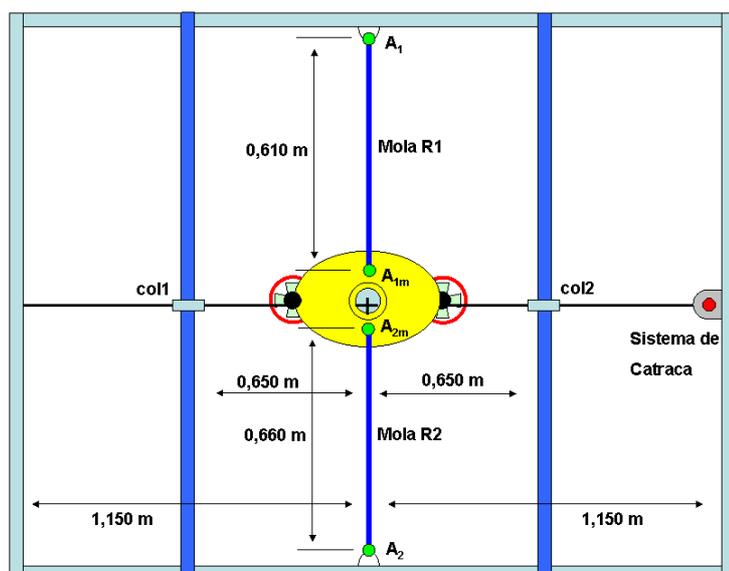


Figura 25 – Disposição para os ensaios de caturro (vista frontal).

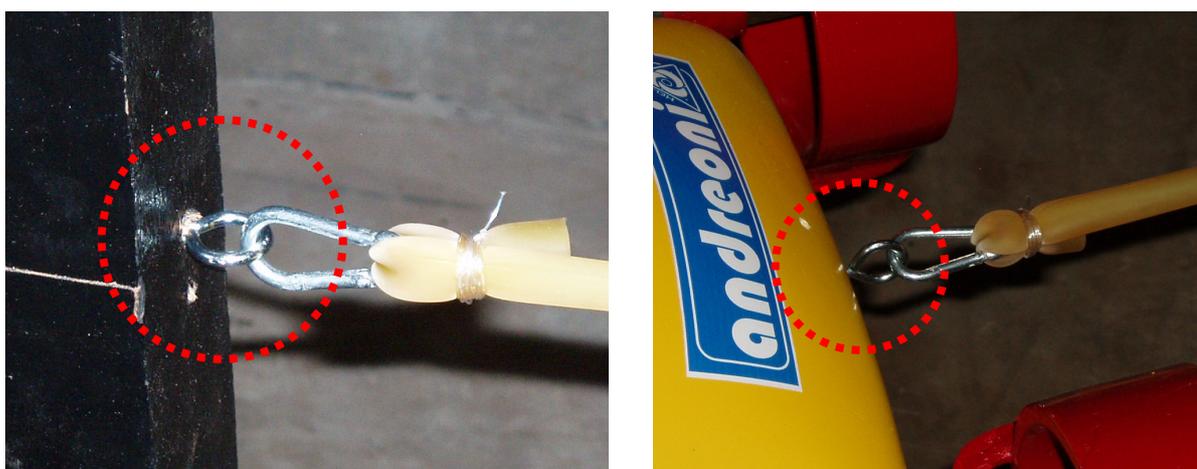


Figura 26 – Vistas do pitões de fixação das molas na estrutura e no veículo.

As distâncias entre o CG do veículo e os pontos de fixação das molas no mesmo (Figuras 21, 22 e 23) são dadas na tabela a seguir:

Tabela1 – Posição do pitões de fixação das molas no veículo

Ensaio com movimentos de avanço, afundamento e combinado	
d_1 - Distância do CG ao ponto de fixação A_{1m}	0,540 m
d_2 - Distância do CG ao ponto de fixação A_{2m}	0,155 m
d_3 - Distância do CG ao ponto de fixação A_{3m}	0,470 m
d_4 - Distância do CG ao ponto de fixação A_{4m}	0,260 m

Ensaio com movimento de arfagem	
D_{h1} – Distância horizontal do CG ao ponto de fixação A_{1m}	0,430 m
D_{h2} – Distância horizontal do CG ao ponto de fixação A_{2m}	0,430 m
d_{v1} – Distância vertical do CG ao ponto de fixação A_{1m}	0,140 m
d_{v2} – Distância vertical do CG ao ponto de fixação A_{2m}	0,050 m

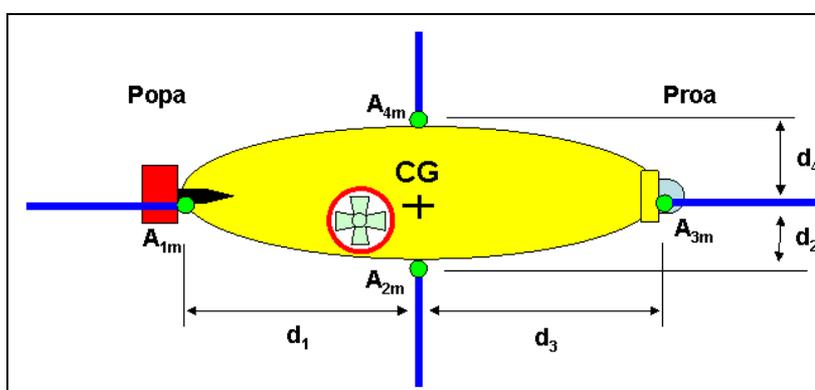


Figura 27 – Localização do pitões de fixação das molas no veículo para os ensaios com os movimentos no plano vertical.

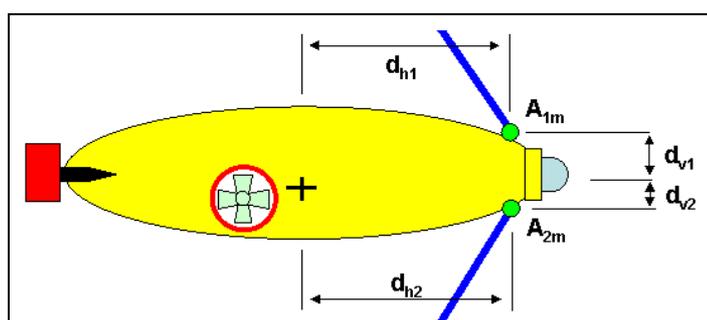


Figura 28 – Localização do pitões de fixação das molas no veículo para os ensaios com o movimento de caturro puro.

O comprimento inicial das molas para cada série de ensaios é mostrado pela tabela abaixo:

Tabela2 – Comprimento inicial das molas para cada ensaio.

Ensaio com movimento de avanço	
l_1 – Comprimento inicial da mola 1	0,305 m
l_2 – Comprimento inicial da mola 2	0,240 m
l_3 – Comprimento inicial da mola 3	0,335 m
l_4 – Comprimento inicial da mola 4	0,185 m
Ensaio com movimento de afundamento	
l_1 – Comprimento inicial da mola 1	0,335 m
l_2 – Comprimento inicial da mola 2	0,230 m
l_3 – Comprimento inicial da mola 3	0,365 m
l_4 – Comprimento inicial da mola 4	0,175 m
Ensaio com movimento combinado	
l_1 – Comprimento inicial da mola 1	0,335 m
l_2 – Comprimento inicial da mola 2	0,240 m
l_3 – Comprimento inicial da mola 3	0,365 m
l_4 – Comprimento inicial da mola 4	0,185 m
Ensaio com movimento de arfagem	
l_1 – Comprimento inicial da mola 1	0,380 m
l_2 – Comprimento inicial da mola 2	0,520 m

Para que a rotina computacional determine a posição do veículo durante os ensaios, é necessária a instalação de marcos visuais que são reconhecidos em cada quadro dos vídeos. São utilizados leds (diodos emissores de luz) como marcos visuais, sendo que para os ensaios com movimentos de avanço puro, arfagem puro e avanço, arfagem e caturro acoplados são instalados três leds na lateral do veículo (Figura 29) e para os ensaios de caturro puro é instalado um led na popa do veículo (Figura 30).

O gatilho utilizado para disparar o movimento do veículo foi confeccionado na FATEC JAHU e para cada série de ensaios foi posicionado na estrutura de forma estratégica (Figura 31).

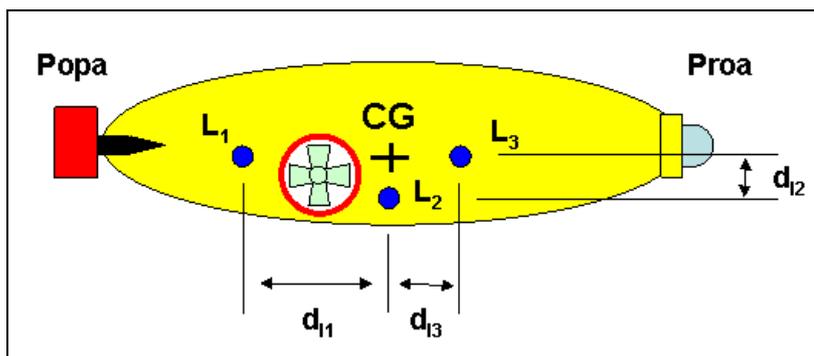


Figura 29 – Localização do leds no veículo.

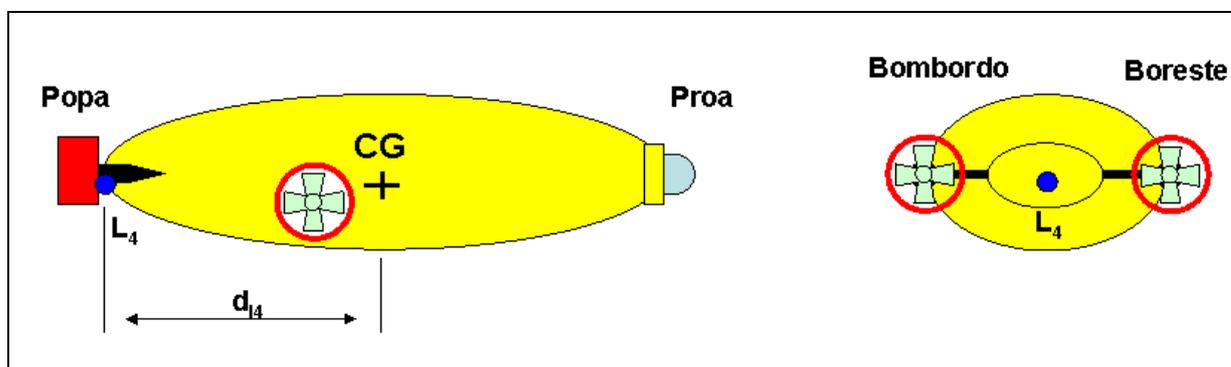


Figura 30 – Localização do led no veículo para os ensaios com movimento de caturro.

Um cabo de aço de 0,5 mm de diâmetro, fixado ao veículo em uma das pontas e a uma argola de metal na outra, é utilizado para prender puxar e prender o modelo ao sistema de gatilho (Figuras 32, 33, 34 e 35). Para cada série de ensaios este cabo é preso em determinada posição do veículo, com isso conseguimos a variação de posição e inclinação desejadas antes do disparo.

Para evitar a interferência das ondas geradas pelo movimento após um disparo e para garantir a ausência de movimentos no sistema após o veículo ser travado novamente no sistema de gatilho, utiliza-se um intervalo de 20 minutos entre o final de um ensaio e travamento do veículo no sistema de gatilho e o disparo do ensaio seguinte.

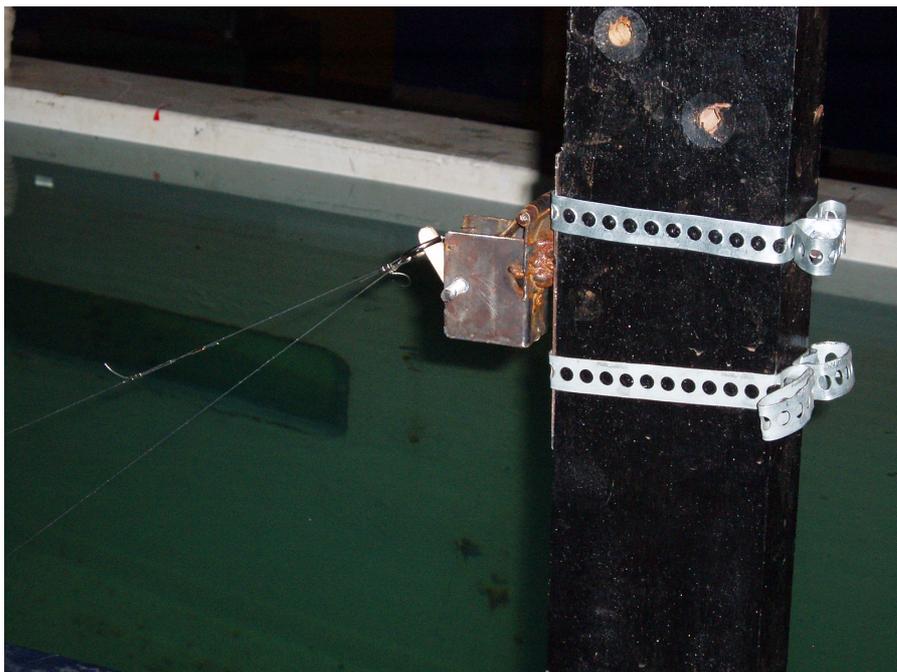


Figura 31 – Sistema de disparo rápido (gatilho).

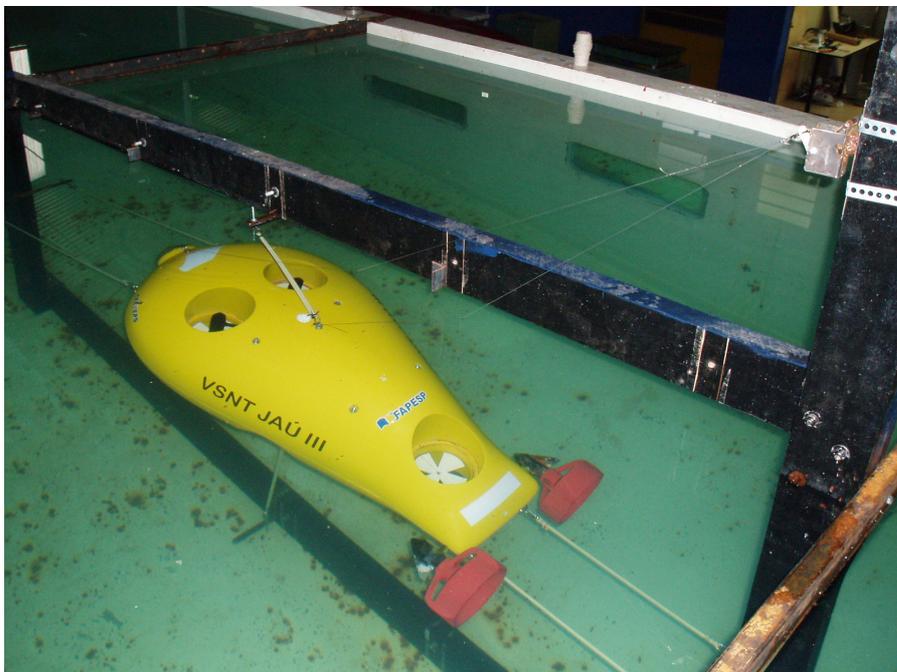


Figura 32 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimentos do plano vertical acoplados (vista de popa/bombordo).

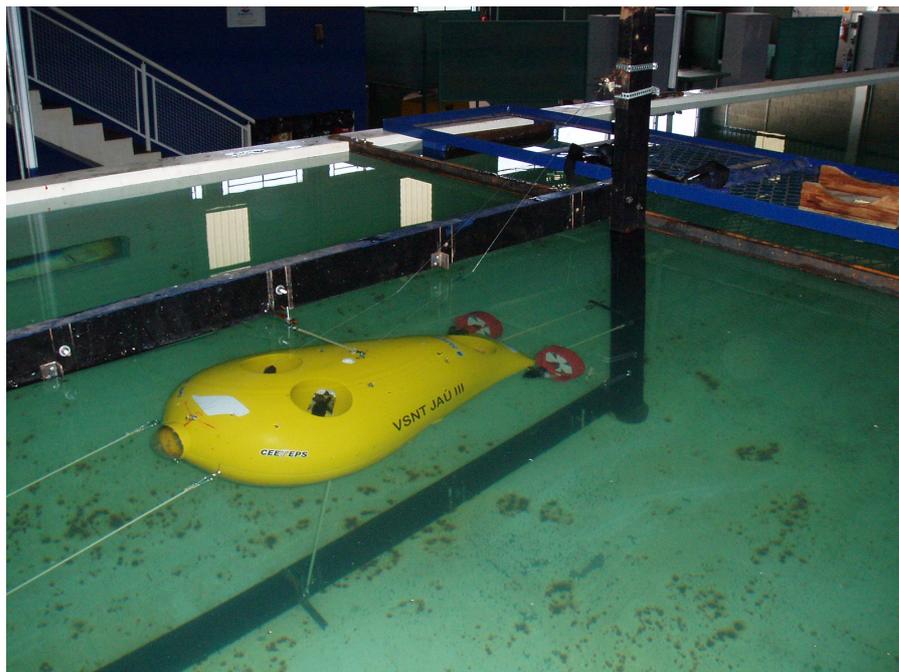


Figura 33 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimentos do plano vertical acoplados (vista de pro/bombordo).

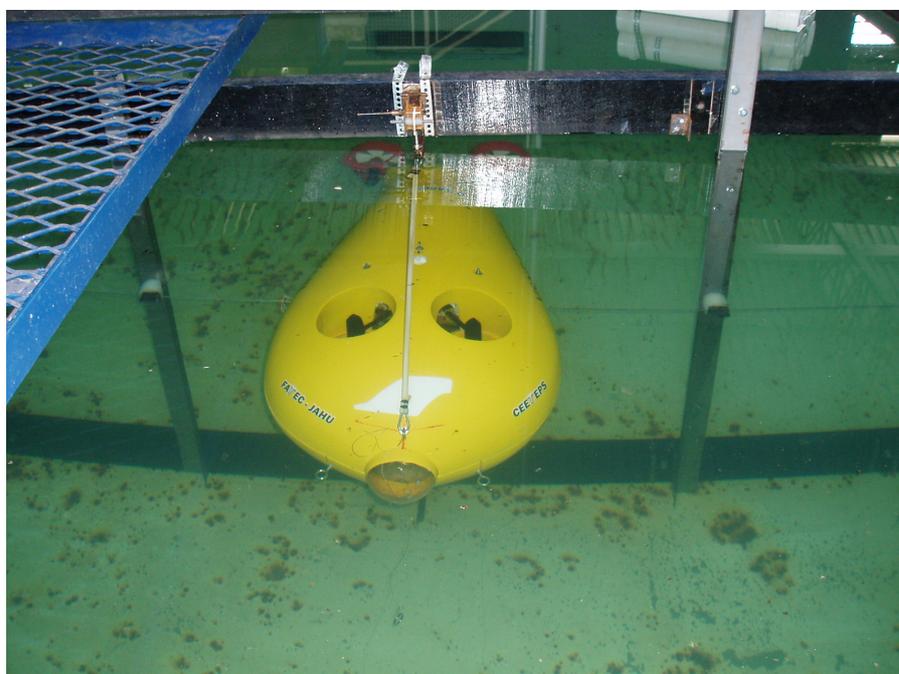


Figura 34 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimento de caturro puro (vista de proa).

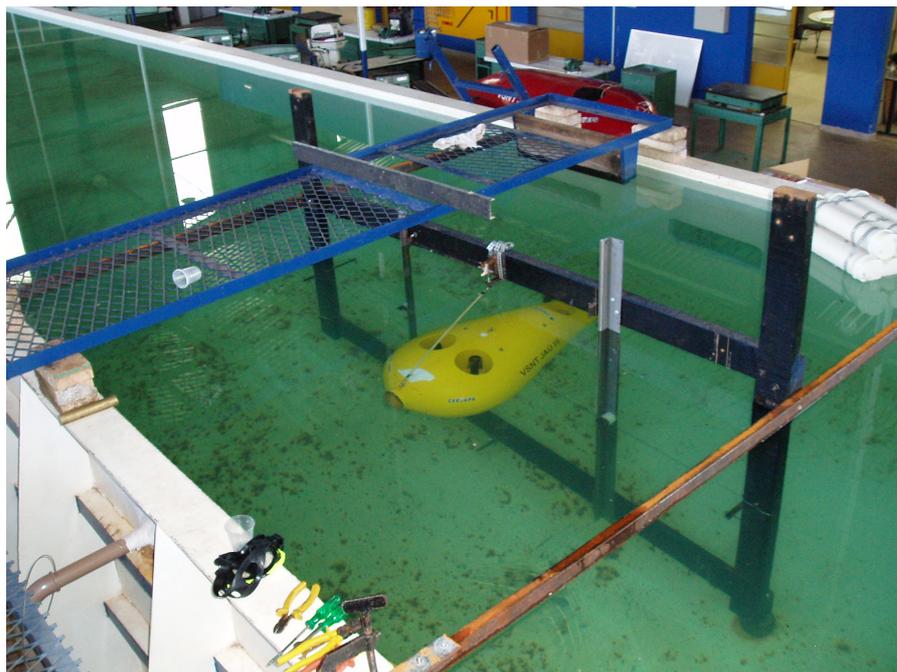


Figura 35 – Veículo preso ao sistema de gatilho para ensaios com movimento de caturro puro (vista de proa/bombordo).

As posições do CG e do CB do veículo foram preliminarmente determinadas através de uma modelo virtual concebido no software AutoCAD (Figura 36). Para verificação e ajuste da posição do centro de gravidade o veículo, peças do interior do mesmo foram deslocadas de posição. (Figura 37).

O momento de inércia de veículo foi determinado através experimentos realizados na FATEC JAHU, utilizando a metodologia proposta por SORANI (2002). A tabela a seguir mostra os dados do veículo utilizados nos cálculos juntamente com os dados obtidos nos ensaios.

Tabela3 – Dados principais do modelo reduzido do VSNT JAÚ II.

Dados principais do modelo reduzido do VSNT JAÚ II	
Comprimento:	1,16 m
Boca:	0,54 m
Pontal:	0,38 m
Massa:	49,75 kg
Momento de inércia eixo Y do modelo:	6,39 kg.m ²
Posição do centro de flutuação (CB):	0,19 m

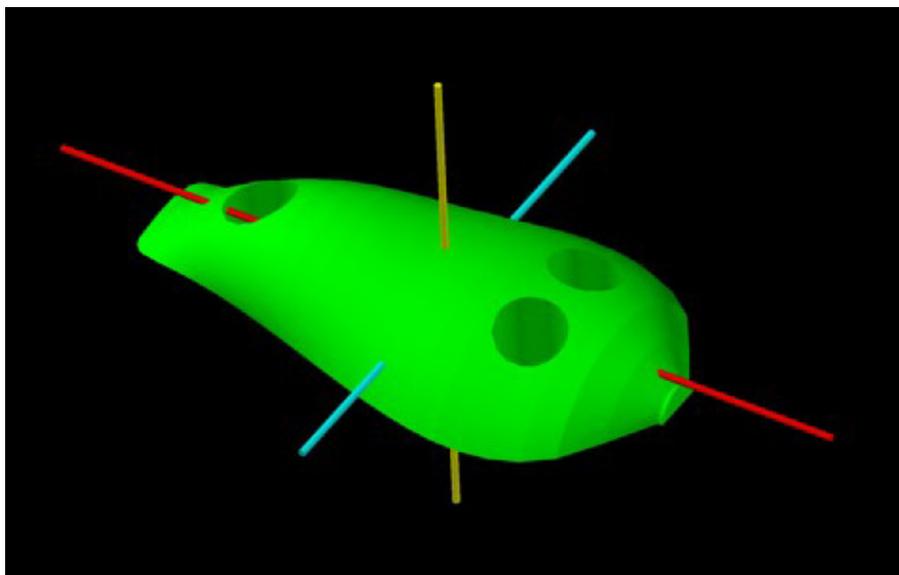


Figura 36 – Modelo tridimensional dos flutuadores - CB do veículo.



Figura 37 – Verificação e ajuste da posição do CG do veículo.

3.2 ENSAIOS COM MOVIMENTO DE AVANÇO PURO

Para o movimento de avanço, o veículo foi deslocado 0,24 metros de sua posição original no eixo X e sem inclinação.

Abaixo segue o gráfico da posição do centro de gravidade de veículo versus tempo para os três ensaios considerados, denominados H1, H2 e H3. São analisados 15 segundos de movimento.

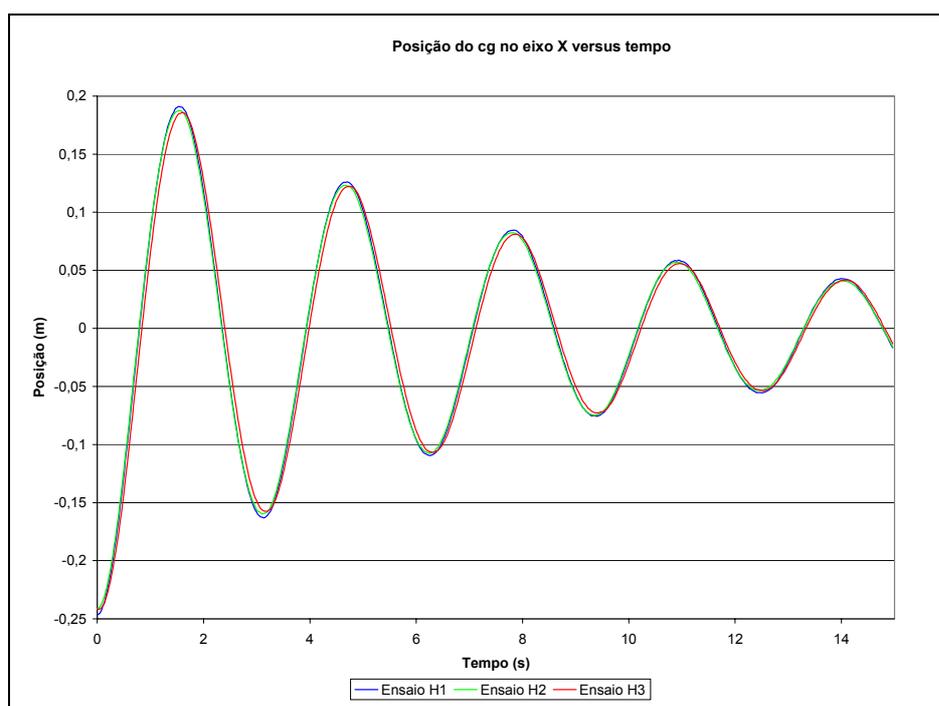


Figura 38 – Posição para os ensaios com movimento de avanço puro.

A seguir são mostrados os gráficos de velocidade e aceleração do centro de gravidade do veículo no eixo X do referencial móvel.

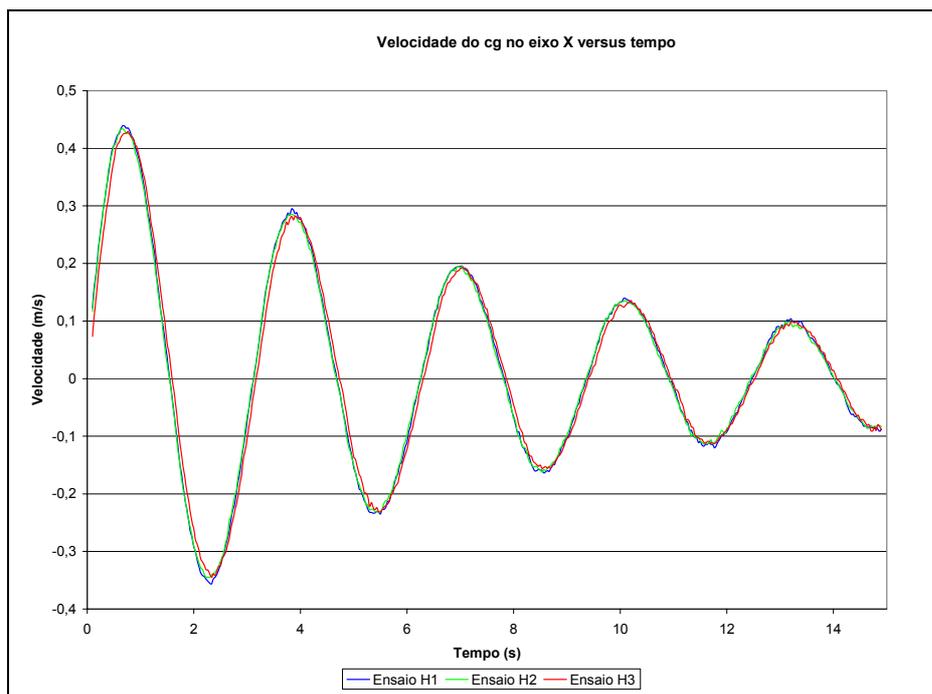


Figura 39 – Velocidade para os ensaios com movimento de avanço puro.

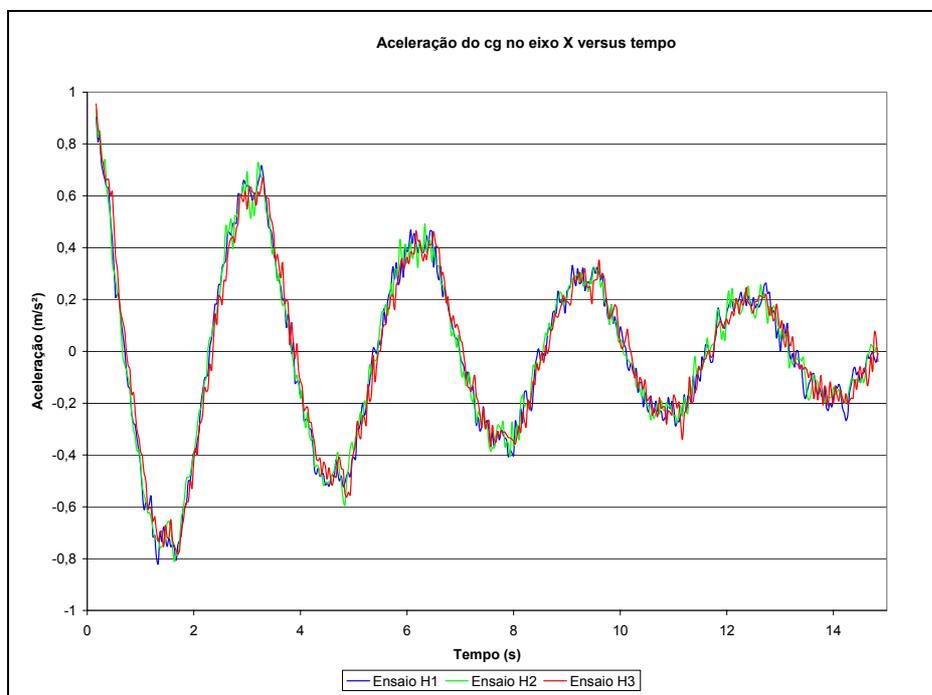


Figura 40 – Aceleração para os ensaios com movimento de avanço puro.

A média dos valores dos coeficientes hidrodinâmicos calculados pela rotina computacional para os ensaios H1, H2 e H3 são mostrados tabela abaixo.

Tabela4 – Coeficientes hidrodinâmicos para o movimento de avanço.

Valores calculados para o modelo em escala 1:2,5.			
Coeficientes de massa adicional		Coeficientes de amortecimento	
$X_{\dot{u}}$	12,8 kg	X_u	25,5 kg/s

3.3 ENSAIOS COM MOVIMENTO DE ARFAGEM PURO

Para o movimento de afundamento, o veículo foi deslocado 0,23 metros de sua posição original no eixo Y e sem inclinação.

Abaixo segue o gráfico da posição do centro de gravidade de veículo versus tempo para os três ensaios considerados, denominados V1, V2 e V3. São analisados 15 segundos de movimento.

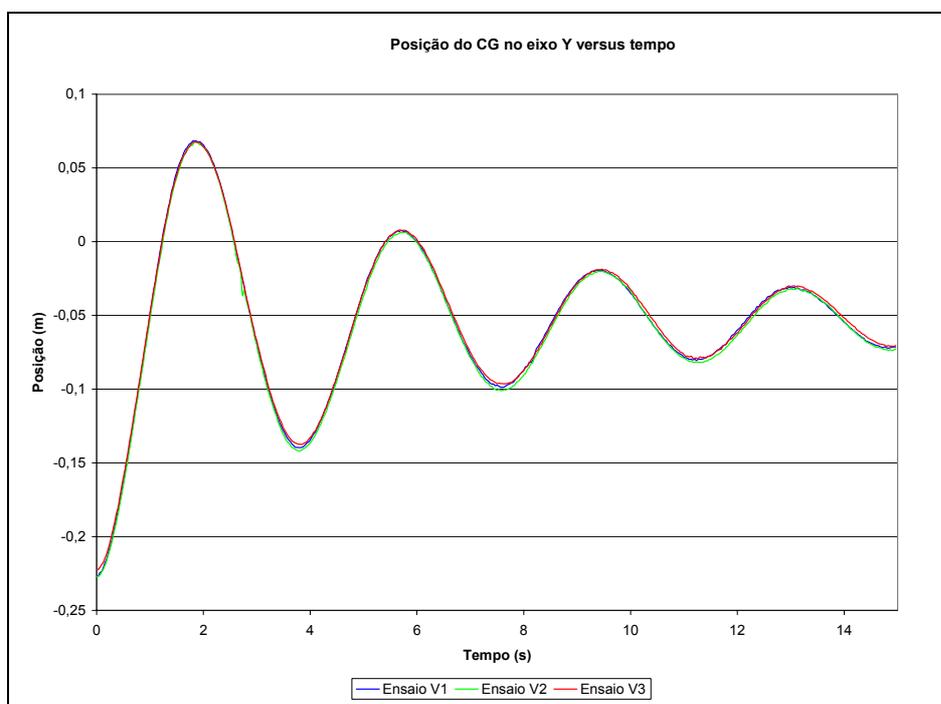


Figura 41 – Posição para os ensaios com movimento de arfagem puro.

A seguir são mostrados os gráficos de velocidade e aceleração do centro de gravidade do veículo no eixo Y do referencial móvel.

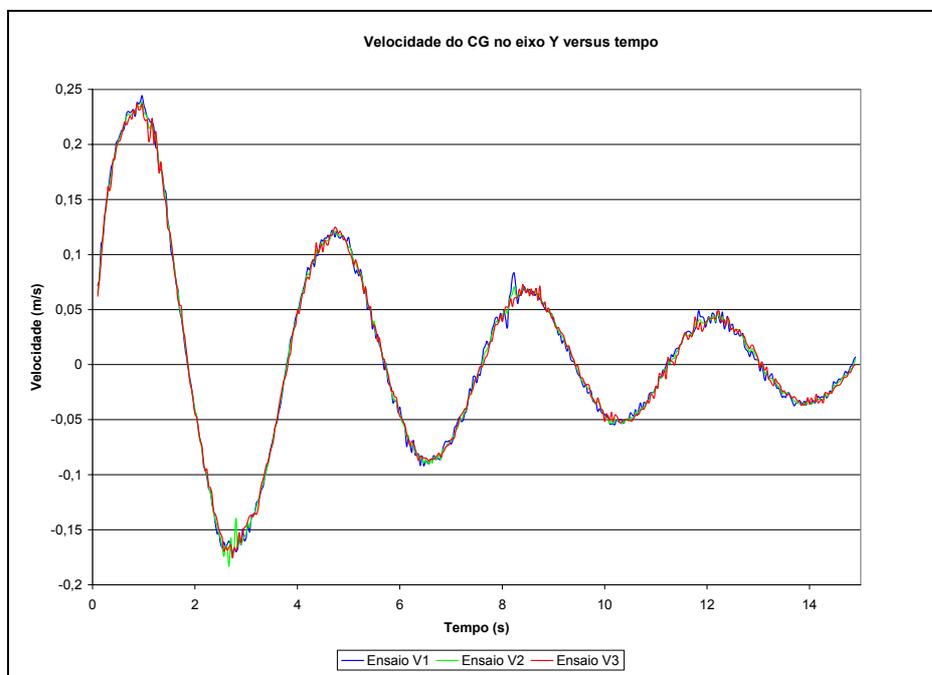


Figura 42 – Velocidade para os ensaios com movimento de arfagem puro.

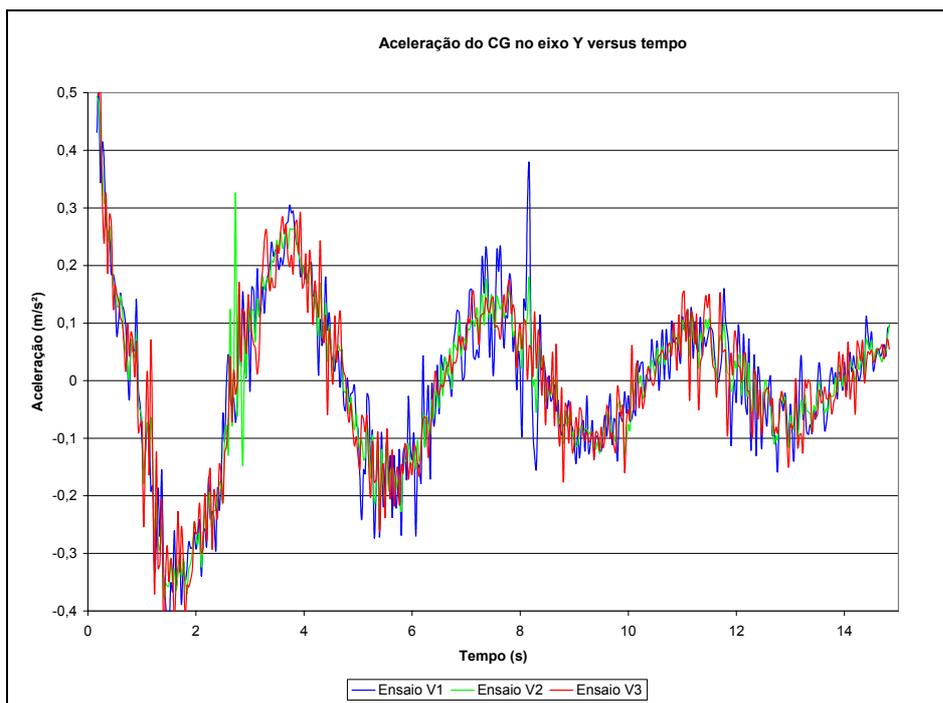


Figura 43 – Aceleração para os ensaios com movimento de arfagem puro.

A média dos valores dos coeficientes hidrodinâmicos calculados pela rotina computacional para os ensaios V1, V2 e V3 são mostrados na tabela abaixo.

Tabela5 – Coeficientes hidrodinâmicos para o movimento de arfagem.

Valores calculados para o modelo em escala 1:2,5.			
Coeficientes de massa adicional		Coeficientes de amortecimento	
$Z_{\dot{w}}$	45,9 kg	Z_w	50,3 kg/s

3.4 ENSAIOS COM MOVIMENTO DE CATURRO PURO

Para o movimento de caturro puro, o veículo foi inclinado 0,42 radianos de sua posição inicial em torno do CG.

Abaixo segue o gráfico da inclinação do veículo versus tempo para os três ensaios considerados, denominados R1, R2 e R3. São analisados 15 segundos de movimento.

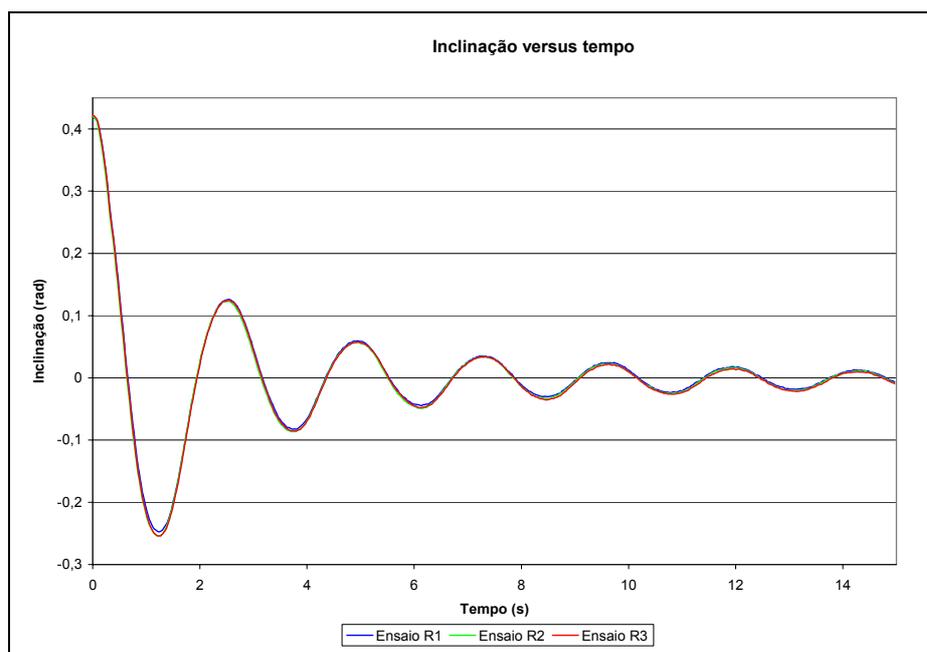


Figura 44 – Inclinação para os ensaios com movimento de caturro puro.

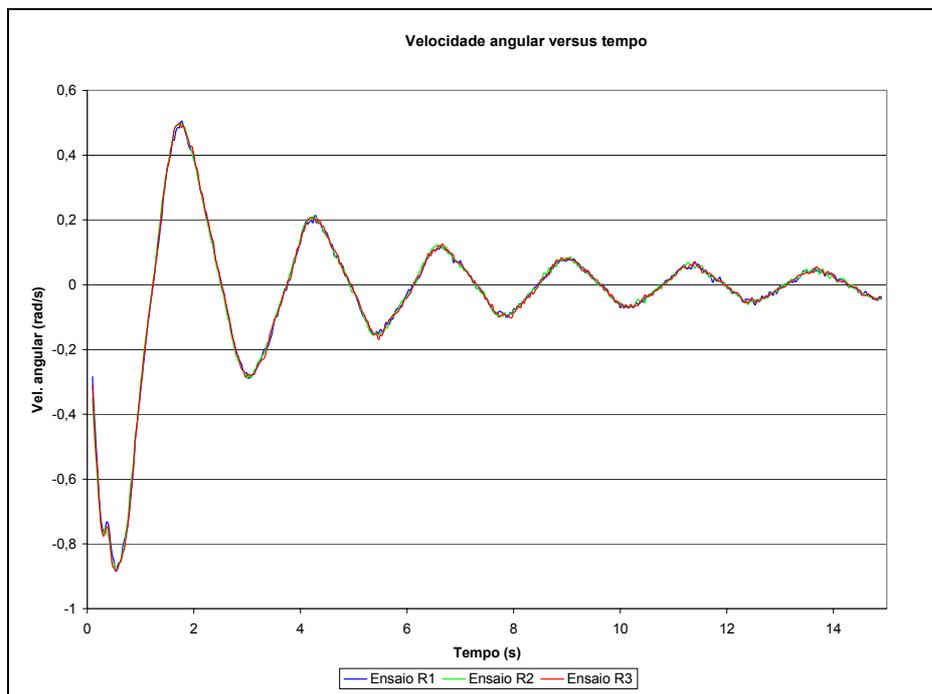


Figura 45 – Velocidade angular para os ensaios com movimento de caturro puro.

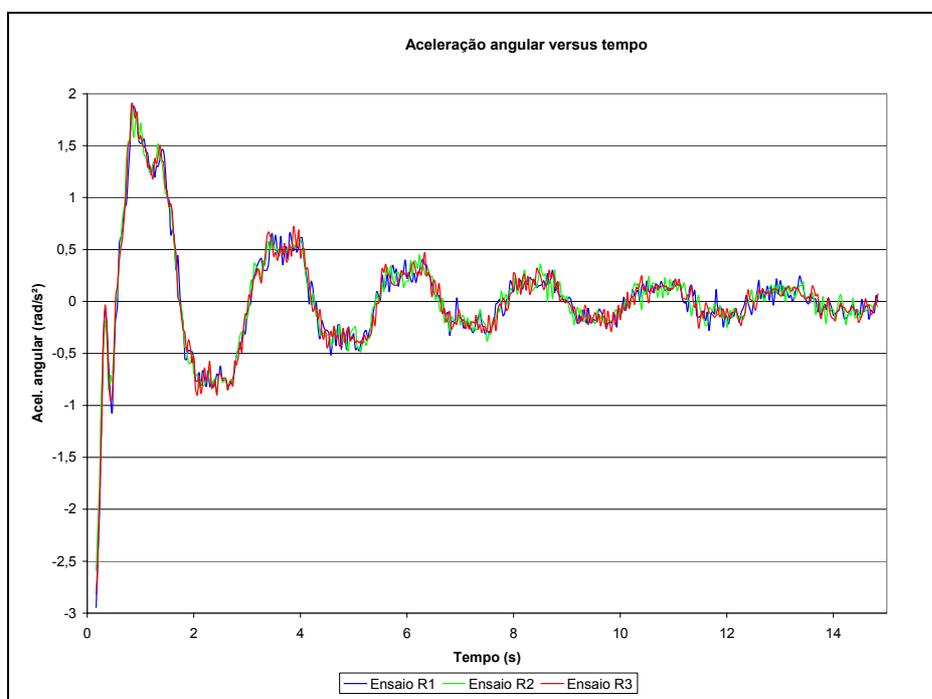


Figura 46 – Aceleração angular para os ensaios com movimento de caturro puro.

A média dos valores dos coeficientes hidrodinâmicos calculados pela rotina computacional para os ensaios R1, R2 e R3 são mostrados na tabela abaixo.

Tabela6 – Coeficientes hidrodinâmicos para o movimento de caturro.

Valores calculados para o modelo em escala 1:2,5.			
Coeficientes de massa adicional		Coeficientes de amortecimento	
$M_{\dot{q}}$	6,3 kg.m ²	$M_{\dot{q}}$	9,7 kg.m ² /s

3.5 ENSAIOS COM MOVIMENTOS DO PLANO VERTICAL ACOPLADOS

Para os movimentos acoplados, o veículo foi deslocado 0,18 metros de sua posição original no eixo X, 0,15 metros no eixo Z e 0,23 radianos de inclinação. São analisados 15 segundos de movimento.

Abaixo segue o gráfico da posição Y versus posição em X do centro de gravidade de veículo para a média dos três ensaios considerados, denominados L1, L2 e L3.

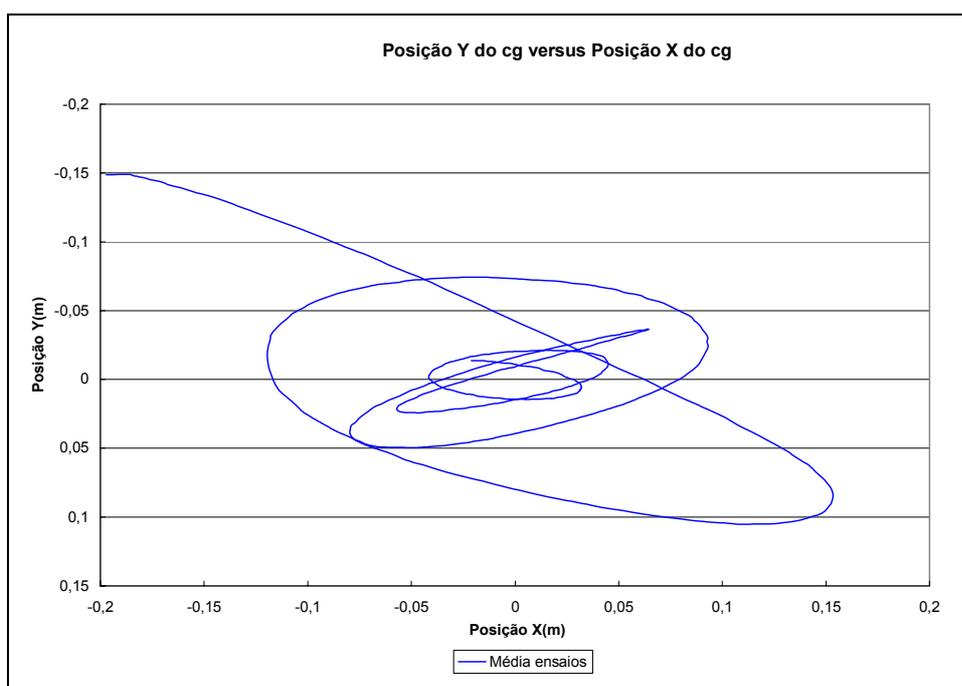


Figura 47 – Posição para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

A seguir são mostrados os gráficos da posição do centro de gravidade de veículo versus tempo para os eixos X e Y e inclinação do veículo versus tempo para os ensaios L1, L2 e L3.

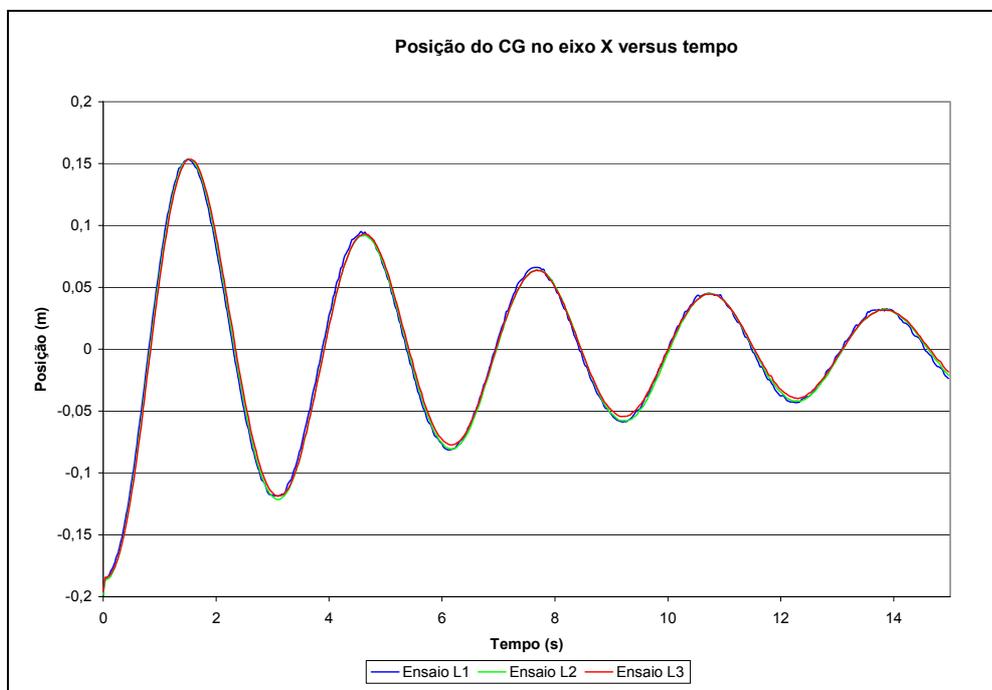


Figura 48 – Posição no eixo X para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

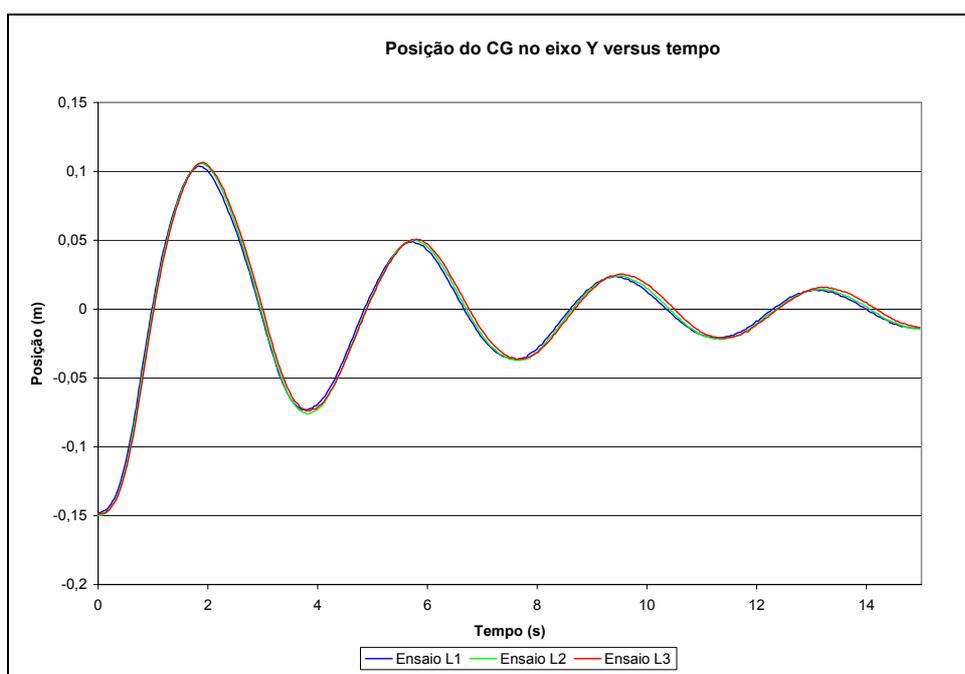


Figura 49 – Posição no eixo Y para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

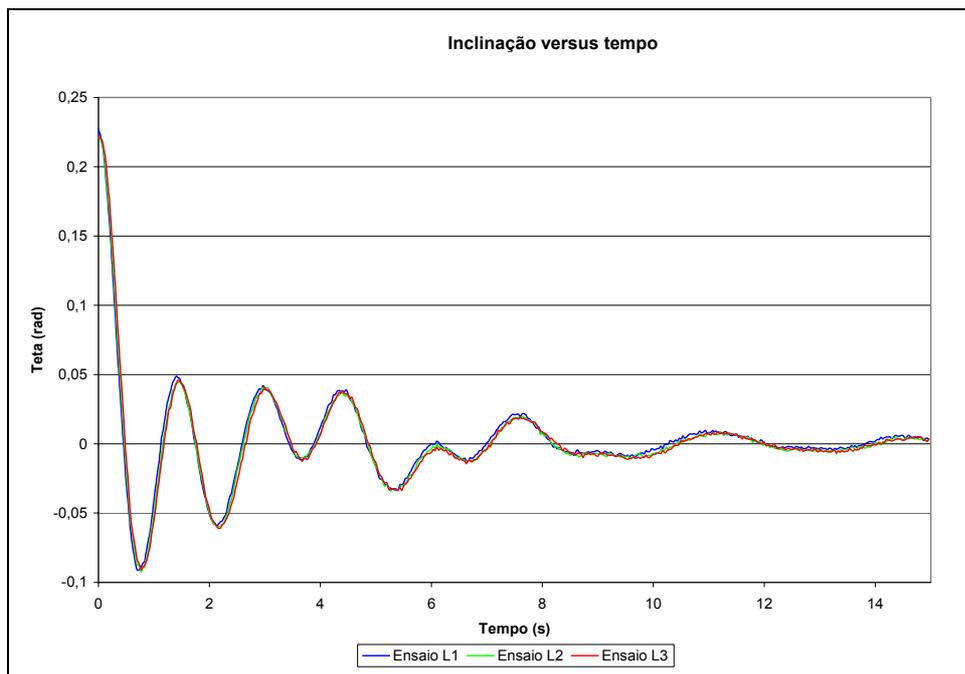


Figura 50 – Inclinação para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

A velocidade e a aceleração do CG nos eixos X e Y e a velocidade e a aceleração angular do veículo são mostradas respectivamente nos gráficos a seguir.

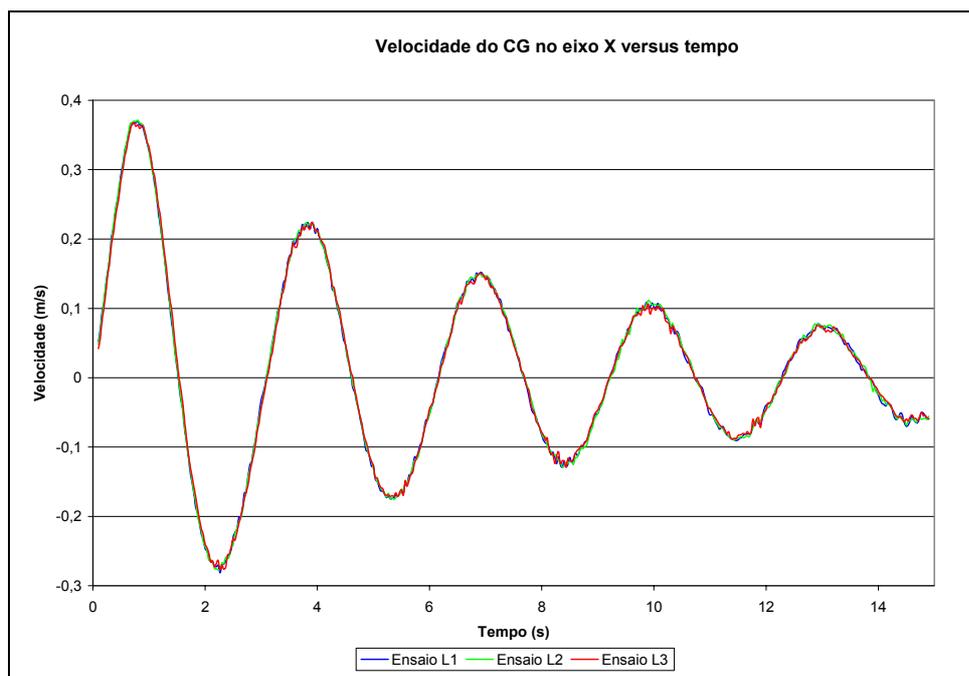


Figura 51 – Velocidade no eixo X para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

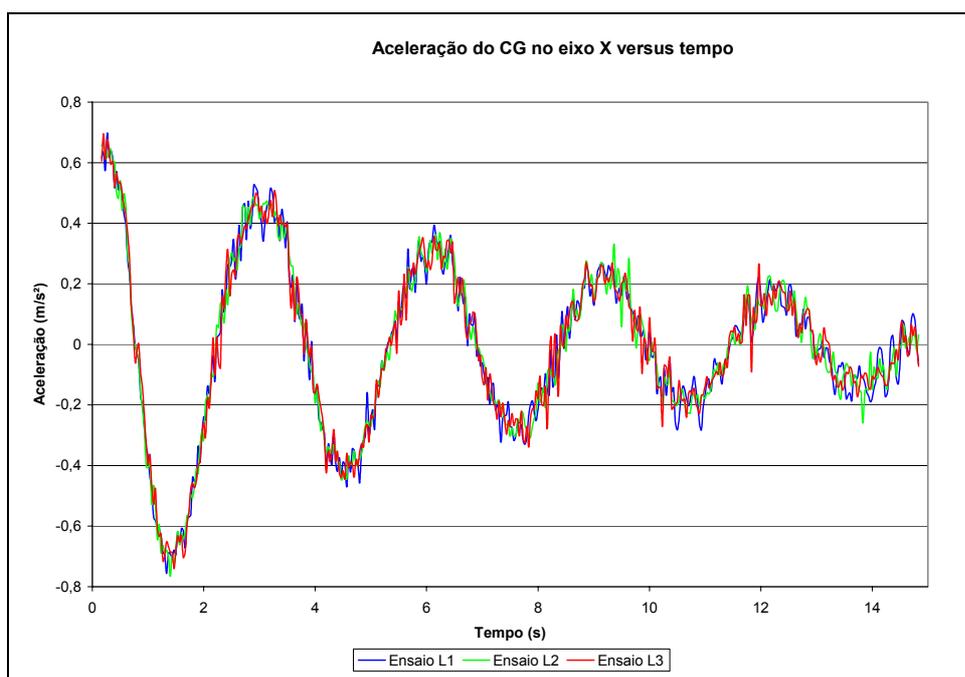


Figura 52 – Aceleração no eixo X para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

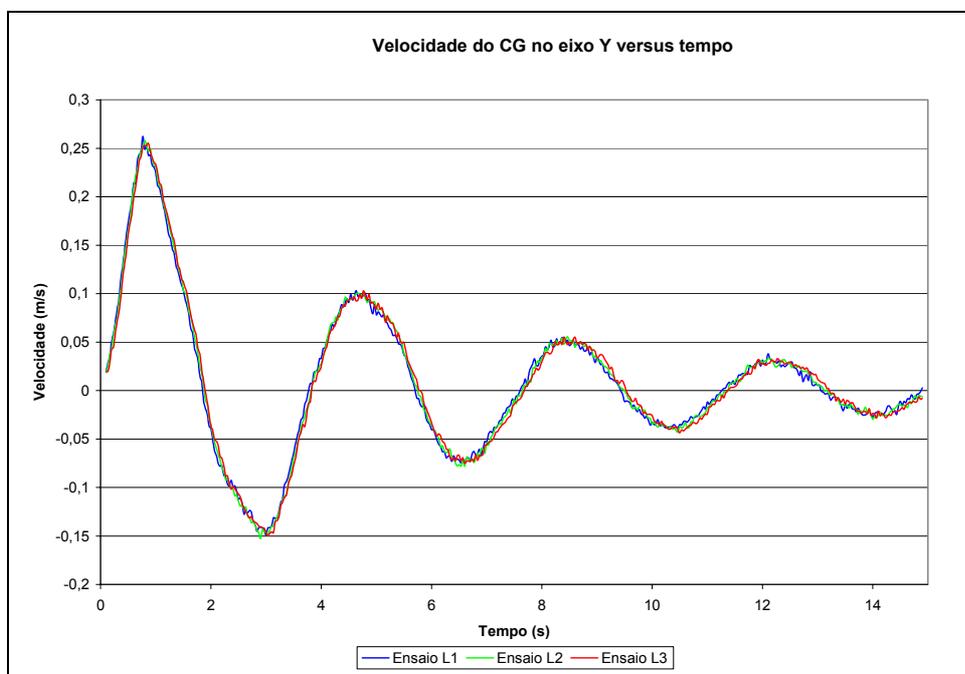


Figura 53 – Velocidade no eixo Y para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

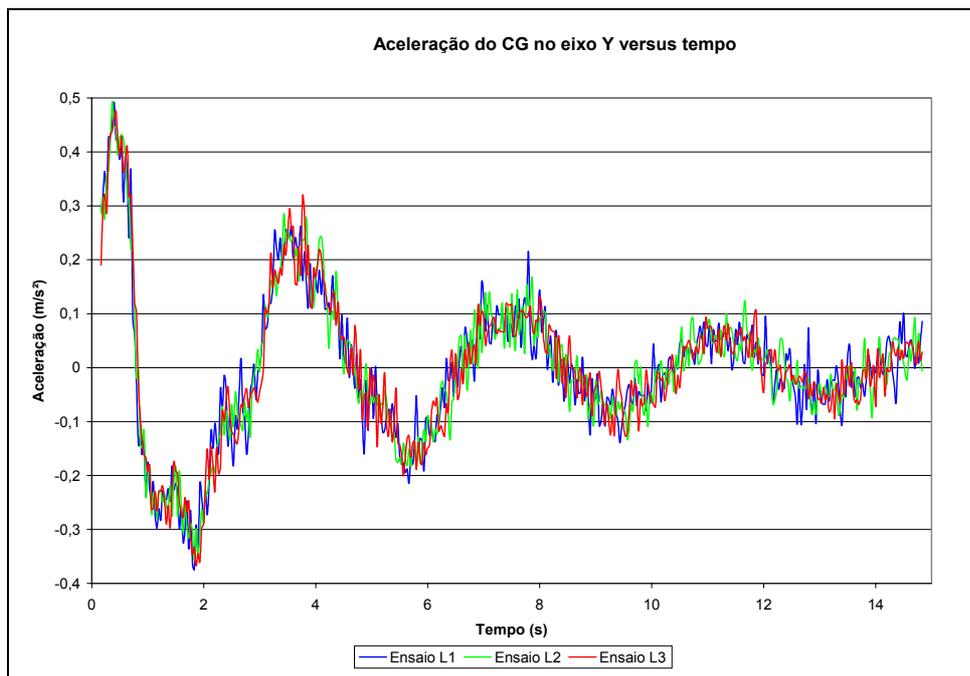


Figura 54 – Aceleração no eixo Y para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

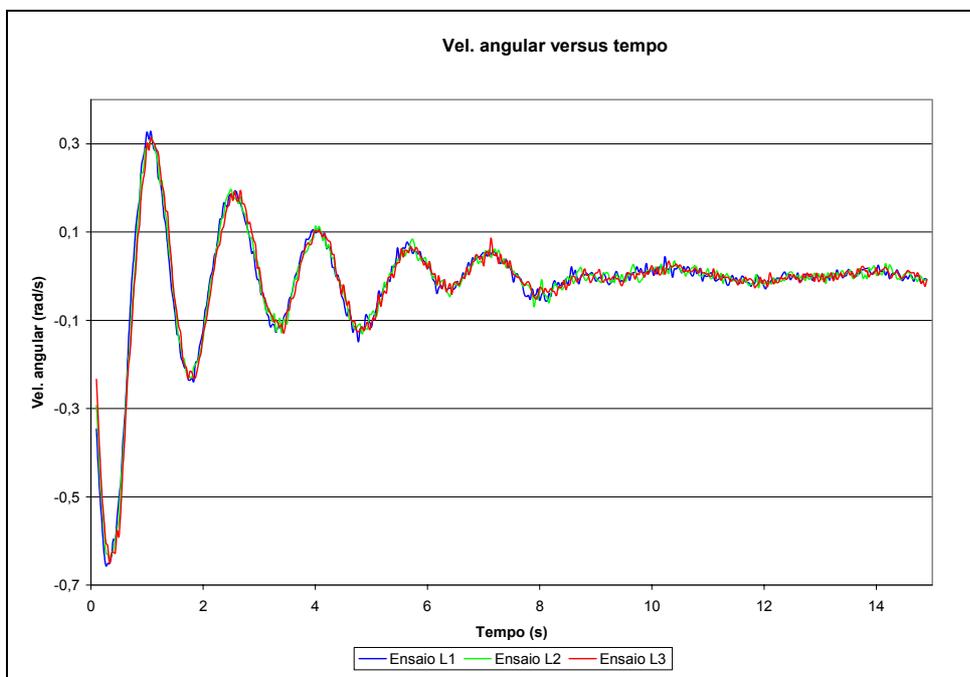


Figura 55 – Velocidade angular para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

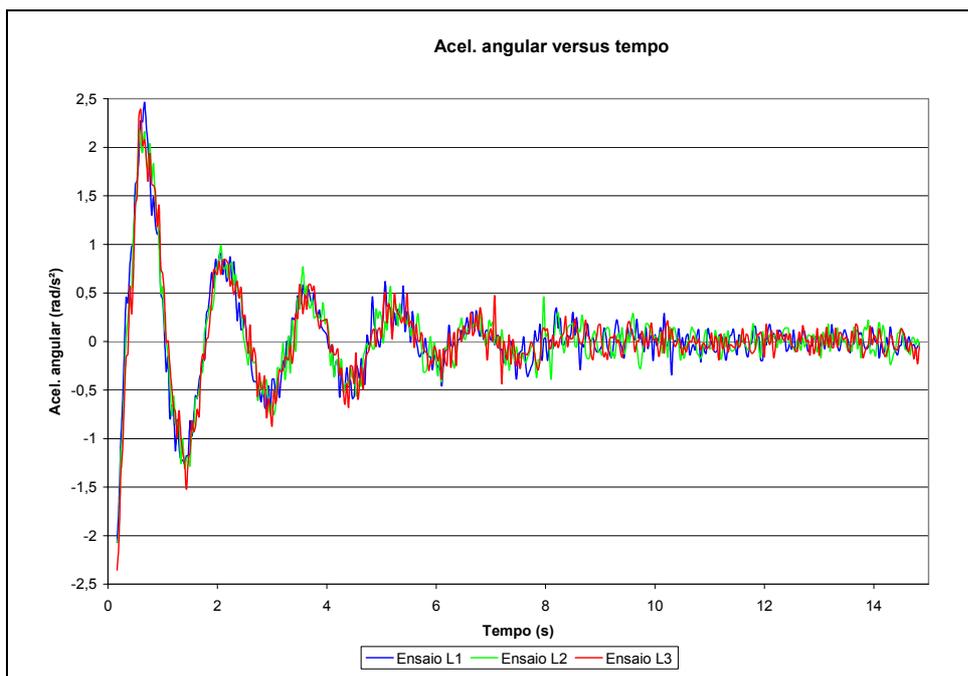


Figura 56 – Aceleração angular para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

A média dos valores dos coeficientes hidrodinâmicos calculados pela rotina computacional para os ensaios L1, L2 e L3 são mostrados em função do tempo nos gráficos a seguir, e a tabela (7) mostra o valor final calculado de cada coeficiente após o tempo de ensaio considerado (15 segundos).

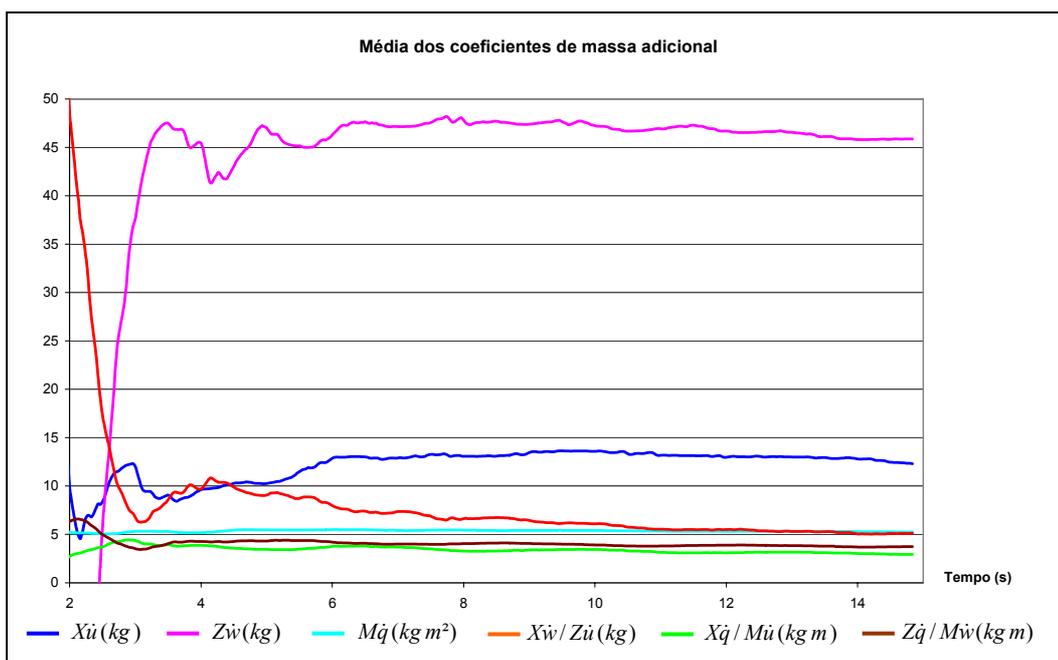


Figura 57 – Coeficientes de massa adicional para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

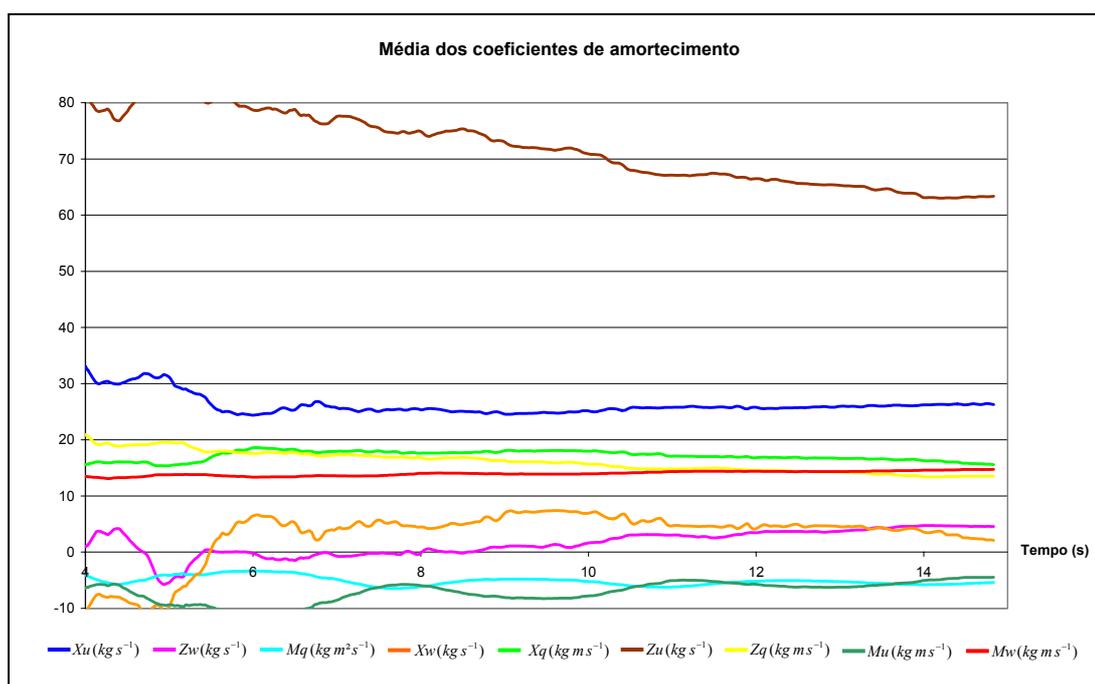


Figura 58 – Coeficientes de amortecimento para os ensaios com movimentos do plano vertical acoplados.

Tabela7 – Coeficientes hidrodinâmicos para os movimentos acoplados.

Valores calculados para o modelo em escala 1:2,5.			
Coeficientes de massa adicional		Coeficientes de amortecimento	
$X_{\dot{u}}$	12,30 kg	X_u	26,27 $kg.s^{-1}$
$X_{\dot{w}}$	5,12 kg	X_w	2,09 $kg.s^{-1}$
$X_{\dot{q}}$	2,92 kg.m	X_q	15,57 $kg.m.s^{-1}$
$Z_{\dot{u}}$	5,12 kg	Z_u	4,54 $kg.s^{-1}$
$Z_{\dot{w}}$	45,87 kg	Z_w	63,37 $kg.s^{-1}$
$Z_{\dot{q}}$	3,75 kg.m	Z_q	13,57 $kg.m.s^{-1}$
$M_{\dot{u}}$	2,92 kg.m	M_u	-5,39 $kg.m.s^{-1}$
$M_{\dot{w}}$	3,75 kg.m	M_w	-4,48 $kg.m.s^{-1}$
$M_{\dot{q}}$	5,24 $kg.m^2$	M_q	14,83 $kg.m^2.s^{-1}$

SORANI (2002) em seu trabalho utiliza equações abaixo, deduzidas a partir de regras de escala, para transferir os valores calculados para os coeficientes hidrodinâmicos do modelo em escala reduzida para o protótipo.

$$M_R = N^3 \cdot M_E \quad (3.5)$$

$$M_{CR} = N^4 \cdot M_{CE} \quad (3.6)$$

$$I_R = I_E \cdot N^5 \quad (3.7)$$

$$d_R = d_E N^{2,5} \quad (3.8)$$

$$d_{CR} = d_{CE} N^{3,5} \quad (3.9)$$

$$d'_R = d'_E \cdot N^{4,5} \quad (3.10)$$

onde:

M_R é a massa do protótipo;

M_{CR} é o coeficiente de massa adicional do protótipo (termo cruzado, $X\dot{q}$, $Z\dot{q}$, $M\dot{u}$ e $M\dot{w}$);

N é o fator de escala entre o modelo em escala reduzida e o protótipo;

M_E é a massa do modelo em escala reduzida;

M_{CE} é o coeficiente de massa adicional do modelo em escala reduzida (termo cruzado, $X\dot{q}$, $Z\dot{q}$, $M\dot{u}$ e $M\dot{w}$);

I_R é o momento de inércia do protótipo;

I_E é o momento de inércia do modelo em escala reduzida;

d_R é o coeficiente de amortecimento linear para movimentos de translação do protótipo;

d_E é o coeficiente de amortecimento linear para movimentos de translação do modelo em escala reduzida;

d_{CR} é o coeficiente de amortecimento linear para movimentos de translação do protótipo (termo cruzado, Xq , Zq , Mu e Mw);

d_{CE} é o coeficiente de amortecimento linear para movimentos de translação do modelo em escala reduzida (termo cruzado, Xq , Zq , Mu e Mw);

d'_R é o coeficiente de amortecimento linear para movimentos de rotação do protótipo;

d'_E é o coeficiente de amortecimento linear para movimentos de rotação do modelo em escala reduzida.

A tabela abaixo mostra os valores dos coeficientes de massa adicional e amortecimento viscoso linear para o modelo em escala reduzida e para o protótipo, calculados segundo as equações (3.5, a 3.10).

Tabela8 – Coeficientes hidrodinâmicos do VSNT JAÚ II (modelo em escala e protótipo).

Valores calculados para o modelo em escala 1:2,5.		Valores calculados para o protótipo.	
Coeficientes de massa adicional		Coeficientes de massa adicional	
$X_{\dot{u}}$	12,30 kg	$X_{\dot{u}}$	192,19 kg
$X_{\dot{w}}$	5,12 kg	$X_{\dot{w}}$	80,00 kg
$X_{\dot{q}}$	2,92 kg.m	$X_{\dot{q}}$	114,06 kg.m
$Z_{\dot{u}}$	5,12 kg	$Z_{\dot{u}}$	80,00 kg
$Z_{\dot{w}}$	45,87 kg	$Z_{\dot{w}}$	716,72 kg
$Z_{\dot{q}}$	3,75 kg.m	$Z_{\dot{q}}$	146,48 kg.m
$M_{\dot{u}}$	2,92 kg.m	$M_{\dot{u}}$	114,06 kg.m
$M_{\dot{w}}$	3,75 kg.m	$M_{\dot{w}}$	146,48 kg.m
$M_{\dot{q}}$	5,24 kg.m ²	$M_{\dot{q}}$	511,72 kg.m ²
Coeficientes de amortecimento viscoso		Coeficientes de amortecimento viscoso	
X_u	26,27 kg.s ⁻¹	X_u	259,60 kg.s ⁻¹
X_w	2,09 kg.s ⁻¹	X_w	20,65 kg.s ⁻¹
X_q	15,57 kg.m.s ⁻¹	X_q	384,66 kg.m.s ⁻¹
Z_u	4,54 kg s ⁻¹	Z_u	44,86 kg.s ⁻¹
Z_w	63,37 kg.s ⁻¹	Z_w	626,22 kg.s ⁻¹
Z_q	13,57 kg.s ⁻¹	Z_q	335,25 kg.m.s ⁻¹
$M_{\dot{u}}$	-5,39 kg.m.s ⁻¹	$M_{\dot{u}}$	133,16 kg.m.s ⁻¹
$M_{\dot{w}}$	-4,48 kg.m.s ⁻¹	$M_{\dot{w}}$	110,67 kg.m.s ⁻¹
$M_{\dot{q}}$	14,83 kg.m ² .s ⁻¹	$M_{\dot{q}}$	915,94 kg.m ² .s ⁻¹

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O TRABALHO

Neste trabalho uma metodologia de baixo custo foi desenvolvida para se obter experimentalmente os coeficientes hidrodinâmicos de um veículo submersível a partir dos movimentos de decaimento livre multidirecional em um plano, tomando-se como exemplo o VSNT JAÚ II.

Inicialmente foi estabelecido o modelo matemático da dinâmica do veículo para definir os parâmetros a serem identificados experimentalmente. A modelagem foi efetuada admitindo-se que os movimentos no plano vertical (avanço, arfagem e caturro) são independentes dos movimentos do plano horizontal (avanço, deriva e guinada). No entanto, neste trabalho só foram apresentados resultados experimentais para o plano vertical.

Para atingir os objetivos do trabalho foi desenvolvido um aparato experimental, relativamente simples, onde o submersível a ser ensaiado é preso convenientemente através de molas de tal forma que os graus de liberdade desejados são preservados. As únicas leituras de dados efetuadas ao longo dos ensaios foram as posições de 3 marcos visuais localizados no veículo através de uma câmera. Aplicando-se técnicas de processamento digital de imagens aos registros foram obtidas as coordenadas do centro de gravidade bem como a inclinação ao longo de cada experimento. A partir destes valores processados foram obtidos as velocidades e acelerações e, posteriormente, obtidos os coeficientes hidrodinâmicos desejados utilizando-se a técnica de mínimos quadrados.

A averiguação do procedimento foi realizado com um modelo em escala 1:2,5 do VSNT JAÚ II e os ensaios foram realizados no tanque de provas da Faculdade de Tecnologia de JAHU.

A montagem do aparato experimental se mostrou relativamente simples e o sistema de aquisição dos dados baseado em processamento digital de imagem, que requer uma câmera de vídeo e um microcomputador equipado com placa de captura de vídeo, se mostrou apropriado para o tipo do experimento.

Embora tenham sido realizados experimentos e obtidos resultados, a verificação da precisão dos valores obtidos não se faz possível até o presente momento já que os valores dos parâmetros hidrodinâmicos do veículo não foram obtidos por outros procedimentos. Entrementes, é razoável supor que os resultados experimentais, mormente os relacionados às massas adicionais, tem certa consistência na medida em que eles são da mesma ordem de grandeza da massa e da inércia do modelo.

Os gráficos de posição do veículo nos eixos X e Z do referencial inercial versus tempo deixam claro que o arranjo utilizado garante boa repetibilidade na determinação da posição do veículo, visto que a defasagem entre os sinais de posição do veículo para ensaios com mesmo movimento é pequena.

Neste trabalho as velocidades e acelerações são obtidas a partir das derivadas dos sinais das posições. Este procedimento, embora simples, não é totalmente satisfatório, pois introduz-se erros inerentes das operações aritméticas adotadas. Sugestões são feitas no próximo sub-capítulo desta dissertação para diminuir os erros.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para corroborar os resultados experimentais obtidos com o procedimento proposto sugere-se realizar experimentos com modelo com formas geometricamente mais simples que permitam a estimação teórica dos coeficientes.

Para garantir uma maior precisão nos resultados pode-se realizar experimentos utilizando-se células de carga em série com as molas para determinar as forças bem

como acelerômetros para comparar com os valores obtidos através do processamento digital de imagens.

Dificuldades foram encontradas na confecção e determinação das constantes elásticas das molas, devido a falta de materiais e equipamentos adequados. Para melhor execução dos ensaios, e conseqüentemente aumento na precisão na determinação dos parâmetros, a aquisição de molas helicoidais de constante elástica linear e comprimento inicial pré-determinado é uma boa opção.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMATA, J. et al. GARBI: a low-cost underwater vehicle. *Microprocessors and Microsystems*, v. 23, p. 61 – 67, set. 1999.

AMORIM, A. E. A. et al. Relatório anual do Projeto VSNT JAÚ I. Jahu, Fatec-Jahu-CEETEPS. 1997.

ARDUS, D. A.; CHAMP, M. A. Ocean Resources. International Ocean Technology Congress on EEZ Resources: Technology Assessment. 1990. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Disponível em: <http://books.google.com/books?id=IBlaJ7o6xY4C&pg=PT49&hl=pt-BR&sig=WjSnJjpdyrVibpVd2tIWV2ndyg#PPT1,M1>.

Acesso em: 17/01/2008.

AVILA, J. J. et al. Hydrodynamic Parameter Estimation of an Unmanned Underwater Vehicle. 18th International Congress of Mechanical Engineering, 8 p. Ouro Preto, MG, Nov. 6-11, 2005

AVILA, J. P. J.; ADAMOWSKY, J. C.; BARBARINI, L. H. M. Estimação de Coeficientes Hidrodinâmicos de um Veículo Submarino Semi-Autônomo.

BUSCARIOLLO, P. H.; Sistema de Posicionamento Dinâmico Baseado em Visão Computacional e Laser. 2008. 103 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

AZARSINA, F. WILLIAMS, C.D., ISSAC, M.T. Pure Yaw Experiments on a Series of Hull Forms for an Underwater Vehicle: Hydrodynamic Observations and Analysis. Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2007. p. 437 – 445, Abr. 2007.

CACCIA, M. Optical Triangulation-Correlation Sensor for Underwater Vehicles' Motion Estimation. Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2002, 10 p., Jul. 2002.

Committee on Undersea Vehicles and National Needs - National Research, Undersea Vehicles and National Needs. 116 p. 1996.

Disponível em: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=5069#toc

Acesso em: 25/01/2008.

CONTE, G. et al. Evaluation of hydrodynamics parameters of a UUV. A preliminary study. in: First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004. p. 545 – 548. 2004.

CUNHA, J. P. V. S. et al. Sistema de Posicionamento Dinâmico para um Veículo Submarino de Operação Remota. in Anais do 10º Congresso Brasileiro de Automática, vol. 2, Rio de Janeiro, Set. 1994.

CUTIPA, J. C. Controle Robusto Multivariável para um Veículo Submersível Autônomo. 2007. 103 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

EGESKOV, P. et al. Pipeline inspection using an autonomous underwater vehicle. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE'95, v. 5, Pipeline Technology, p. 539 - 546. ASME, New York, 1995.

FILHO, T. F. B. Aplicação de Robôs nas Indústrias. Aplicação de Robôs e Sensores em Manufatura. Universidade Federal do Espírito Santo, 1999. 14 p. Disponível em: <http://www.ele.ufes.br/~tfbastos/OfiRob/robosindustriais.pdf>
Acesso em 19/01/2008.

FOSSON, T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 480 p.

GOHEEN, K. R.; JEFFERYS, E. R. The Application of Alternative Modelling Techniques to ROV Dynamics. in: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990. v. 2 p. 1302 - 1309, mai. 1990

HERON, A.; DUNCAN, A.; ANDERSON, B. Hydrodynamic testing of underwater vehicles at the Australian Maritime Engineering Co-operative Research Centre. Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology, 2000. UT 00. , p. 475-479, Mai. 2000.

HSU, L.; COSTA, R. R.; LIZARRALDE, F.; CUNHA, J. P. V. S. Avaliação Experimental e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação Remota. Controle & Automação, v.11, n. 2, p. 82 - 93, ago. 2000.

HSU, L.; COSTA, R. R.; LIZARRALDE, F.; CUNHA, J. P. V. S. Dynamic positioning of remotely operated vehicles. in: Robotics & Automation Magazine, IEEE. 2000. v. 7, A. 3 p. 21 – 31. Sep 2000.

HUMPHREYS, D. E. Dynamics and Hydrodynamics of Ocean Vehicles. in: IEEE OCEANS 1981. v. 13, p. 88 – 91 set. 1981.

INSTITUTO OCEANOGRÁFICO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (IOUSP). Diário de Bordo, v. 3, n. 14, 4 p., Out./Nov./Dez 2007.

JANNASCH, H. W.; WIRSEN, C. O. Chemosynthetic Primary Production at East Pacific Sea Floor Spreading Centers. BioScience, v. 29, n. 10, p. 592 - 598, out. 1979.

KIM, J. et al. Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers. in: IEEE Journal of Oceanic Engineering 2002. v. 27 n.4 p. 830 - 840 out. 2002.

KIM, J.; et al. Establishment of a fabrication method for a long-term actuated hybrid cell robot. The Royal Society of Chemistry - Lab Chip, n. 7, p. 1504 – 1508, 2007.

KREUZER, E.; PINTO, F. C. Controlling the Position of a Remotely Operated Underwater Vehicle. *Applied Mathematics and Computation*. V. 78, n. 2-3, p. 175 – 185, set 1996.

MATIAS, V. O Mar – Um oceano de oportunidades para Portugal. *Cadernos Navais*. N. 13 abr. – jun. 2005 Comissão Cultural da Marinha - Grupo de Estudo e Reflexão de Estratégia (GERE). 2005.

MELLO, S. L. M.; QUENTAL, S. H. A. J. Depósitos de Sulfetos Metálicos no Fundo dos Oceanos. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18 n. 3 p. 411 - 430, 2000.

MOMMA, H. et al. Loss of the Full Ocean Depth ROV Kaiko - Part 1 Loss of the Full Ocean Depth ROV Kaiko - Part 1: ROV Kaiko - A Review , *Proceedings of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference - ISOPE* , 2004. Toulon. p. 191 – 193.

MORRISON, A.T.; YOERGER, D.R. Determination of the hydrodynamic parameters of an underwater vehicle during small scale, non-uniform, 1-dimensional translation. *Proceedings OCEANS '93. 'Engineering in Harmony with Ocean'*. v. 2, p. 277 – 282, Oct. 1993.

MURASHIMA et al, 7,000m class ROV KAIKO7000. *OCEANS '04. MTTTS/IEEE Techno-Ocean'04*. 2004, v. 2, p. 812 – 817. Nov. 2004.

NOMOTO, M; HATTORI, M. A Deep ROV “DOLPHIN 3K”: Design and Performance Analysis. in: *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1986 v.11, n. 3, p. 373 – 391. 1986.

PAIM, P. K.; JOUVENCEL, B.; BORGES, G. A. Controle Reativo para o Robô Submarino TAIPAN. In: *VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente / II IEEE Latin-American Robotics Symposium*, 2005, São Luís, 2005. p. 1-8.

- PEREIRA, J.; DUNCAN, A. System identification of underwater vehicles. Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology, 2000. UT 00. p.419 – 424, 2000
- PLANETA COPPE - Notícias, COPPE apresenta sua mais recente inovação: o robô Luma. 3 p. Jan. 2008.
Disponível em: <http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=785>
Acesso em: 12/01/2008.
- ROSS, A.; FOSSEN, T. I.; JOHANSEN, T. A. Determination of Underwater Vehicle Hydrodynamic Coefficients using Free Decay Tests. IFAC CAMS 2004, p. 363 – 368. Ancona, 2004, Italia.
- SNAME. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid, Technical and Research Bulletin n.1-5. 1950.
- SONG, F. P.; An, E.; FOLLECO, A. Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Vehicles: Design and Implementation. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 28, n. 2, p. 283 – 296, abr. 2003.
- SORANI, L. A. Estudo da Dinâmica e Controle de um Submersível Não Tripulado para uso no Ambiente Fluvial. 2002. 81 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- TALKINGTON, H. R. History and Accomplishments in Ocean Engineering at the Naval Ocean Systems Center 1966 – 1983, IEEE – Oceans. v. 15, p. 384 – 387, ago. 1983.
- TAVARES, A. M. et al. Modelagem dinâmica e controle de um veículo subaquático. Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias. V. 14, n. 1, 2004

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION (WHOI) - Oceanus Magazine. Realizing the Dreams of da Vinci and Verne - A Diverse Fleet of Innovative. Deep-submergence Vehicles Heralds a New Era of Ocean Exploration. v. 42, n. 2, 2004.

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION (WHOI), Hystory of Alvin.

Disponível em: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=10737>.

Acesso em 19/01/2008.

YUH, J. Control of Underwater Robotic Vehicles. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 1993. Japan. P. 517 - 521. jul. 1993.

YUH, J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey. Autonomous Robots, n. 8, p. 7 – 24, 2000.

YUH, J. Development in Underwater Robotics. IEEE International Conference on Robotics and Automation, v. 2, p. 1862 - 1867, mai.1995.

ZHAO,S.; YUH, J. Experimental Study on Advanced Underwater Robot Control. IEEE Transactions on Robotics. V. 21, n. 4, p. 695 – 703. ago. 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)