

Estudo de um Veículo Submersível para uso em Inspeção de Estruturas Hidráulicas

Carlos Barreira Martinez, Paulo Henrique Vieira Magalhães,
Alexandre Augusto Marinho da Motta Bastos, Isaak Gruberger

Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - UFMG

martinez@cce.ufmg.br

Recebido: 05/03/07 – revisado: 25/09/07 – aceito: 25/02/08

RESUMO

A inspeção visual de estruturas hidráulicas é uma atividade para a qual, normalmente, designam-se seres humanos treinados capazes de gerar opiniões sobre o item inspecionado. Entretanto, devido à diversidade de condições, as dificuldades inerentes ao trabalho subaquático e a segurança do pessoal envolvido nestas inspeções, tornam esta tarefa um problema de gerenciamento complexo. Devido a este fato e visando propiciar melhores condições de trabalho, propõe-se a utilização de sistemas de monitoramento remoto através de câmera e sensores dos mais diversos tipos. Motivado por estas questões, elaborou-se o projeto e o protótipo de um veículo de inspeções subaquático que se tem como objetivo principal, permitir o estudo de uma solução viável e efetiva no quesito “eliminar riscos e prover melhores condições de trabalho”. O veículo consiste em um sistema móvel telecomandado capaz de captar imagens e transmiti-las via cabo para um ponto distante permitindo seu posterior armazenamento e análise. O veículo desenvolvido para testes foi concebido com o objetivo inicial de permitir a formação de conhecimento básico sobre o problema. Assim, enfocou-se no primeiro protótipo os problemas relativos a flutuabilidade, capacidade de manobra, sistemas de refrigeração interna e sistemas de vídeo. O projeto do “Veículo Subaquático de Inspeção” foi denominado de “VSI-01”.

Palavras-chave: submersível; estruturas hidráulicas; inspeção.

INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um veículo subaquático de inspeção (VSI). Inicialmente faz-se um breve histórico sobre veículos subaquáticos. Em seguida é apresentada uma descrição do VSI onde são definidos os equipamentos embarcados, tais como circuitos de controle, sistemas de propulsão, sistema de câmera para monitoração e filmagem, sistema de câmaras hidráulicas para controle posicional, sistemas de alimentação de energia etc. A seguir apresentam-se os ensaios do veículo com suas curvas de submergência, curvas do sistema de vetorização de empuxo e curvas de variação de temperatura no interior do corpo pressurizado. Ao final são apresentadas várias sugestões para o desenvolvimento de um segundo veículo denominado VSI-02.

HISTÓRICO

Segundo Harris (1997), o primeiro desenho prático de um submersível surgiu em 1578 quando o

inglês Willian Bourne descreveu um barco que possuía um meio mecânico simples de variar o peso total do barco, permitindo que o mesmo ficasse submerso. Neste primeiro projeto o problema de renovação de ar foi resolvido através de um tubo, mas não há qualquer registro da forma de propulsão.

Em 1624 o holandês Van Drebbel construiu dois submarinos movidos a remo, que se restringiam a buscas de resgates e a obras de construção no leito do mar. Em 1799 o americano Robert Fulton construiu o Nautilus que dispunha de propulsão manual e era equipado com armas grosseiras de curto alcance.

Em 1850, Wilhelm Bauer produziu um submarino chamado Brandtaucher ou “Mergulhador de Fogo”. Já em 1855 Wilhelm Bauer construiu para a marinha Imperial Russa um submarino melhorado de 16m de comprimento, de nome Seeteufel ou “Diabo do Mar”.

Durante a guerra civil americana os estados confederados construíram um submersível chamado de David. Estes conseguiram algum sucesso, mas a

um custo muito alto, pois todos os tripulantes morreram em ação.

Em 1878, em Liverpool, o Reverendo George Garrett, construiu um pequeno barco em forma de ovo. Um ano depois construiu o "Resurgam" que tinha 12 m de comprimento e usava vapor na superfície. Antes da submersão o vapor era elevado ao máximo para acumular calor latente em tanques especiais de armazenamento. Thorsten Nordenfelt, um fabricante de armas sueco, investiu capital na construção de um novo barco com desenho de Garrett. Apesar do limitado sucesso foram os primeiros a usar o torpedo Whitehead que permitiu atacar um alvo a uma distância segura.

A grande dificuldade para estes equipamentos se referia a sua propulsão sob a água e ela veio com o motor elétrico, mas os primeiros geradores de eletricidade eram pesados demais. A bateria acumuladora também era muito grande, porém ofereceu um meio de contornar o problema.

Em 1886, um oficial naval espanhol projetou um barco propulsionado por dois motores de 30 hp. Em abril de 1887, os franceses lançaram seu primeiro submarino, o Gimnote ou "Enguia". Seu armamento era um único tubo de torpedo de 14 polegadas na popa, e suas baterias elétricas permitiam uma velocidade máxima teórica de 6,5 nós. O Gimnote dependia inteiramente das baterias acumuladoras que tinham de ser recarregadas por um gerador em terra ou em outro navio.

Em 1893, John P Holland entrou em uma concorrência da Marinha Americana para a escolha de um projeto de submarino. O barco, chamado Plunger, foi lançado em 1897. Em seguida a Holland Boat Company construiu um segundo submarino que obteve pleno êxito, e a Marinha Americana o comprou em 1900.

O projeto do Holland tinha um sistema duplo de propulsão, porém usava um motor à gasolina de 45 hp para a superfície, com o que ganhava potência e perdia peso, além de partidas e paradas mais seguras. Com isso o barco podia ser menor e submergir mais rápido que os equipamentos anteriores.

Assim, por volta de 1904 as grandes linhas dos modernos submarinos estavam definidas.

Os três grandes marcos – a bateria acumuladora elétrica, o motor a diesel e os torpedos de autopropulsão – seriam continuamente melhorados. No final da segunda guerra mundial, equipes americanas, britânicas e soviéticas de especialistas recolheram o maior número de informações possíveis sobre os novos barcos Walter com motores a peróxido de hidrogênio.

Em 1954 foi lançado ao mar o primeiro submarino movido à energia nuclear, o americano Nautilus, da classe Trident. Seu reator era capaz de gerar vapor para propulsionar seus dois eixos motores.

Os próximos passos deram origem ao surgimento de vários tipos de submarinos visando não só permitir ao homem alcançar enormes profundidades, como também permitir que outras áreas da ciência pudessem ser beneficiadas. Hoje existem exemplos de pequenos batiscafos tripulados capazes de atingir profundidades superiores a 6000 m.

Existem, ainda, modelos de batiscafos capazes de atingir profundidades acima de 11000m (33000pés) como o Trieste que desceu as Fossas Marianas. Também existem pequenos veículos submarinos utilizados em pesquisas (Jimenez, 2004), dotados de sistemas de foto-filmagem e braços mecânicos, capazes de recolher amostras e efetuar pequenos consertos em estruturas subaquáticas.

O equipamento descrito nesse trabalho se enquadra nessa última categoria, tem pequenas dimensões e se destina a permitir que seja dado um passo no sentido de se obter um veículo remotamente operado (ROV – Remote Operation Vehicle) capaz de realizar inspeções em estruturas submersas.

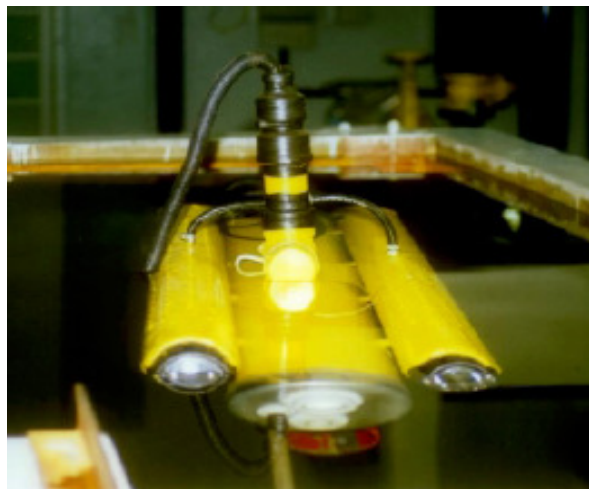
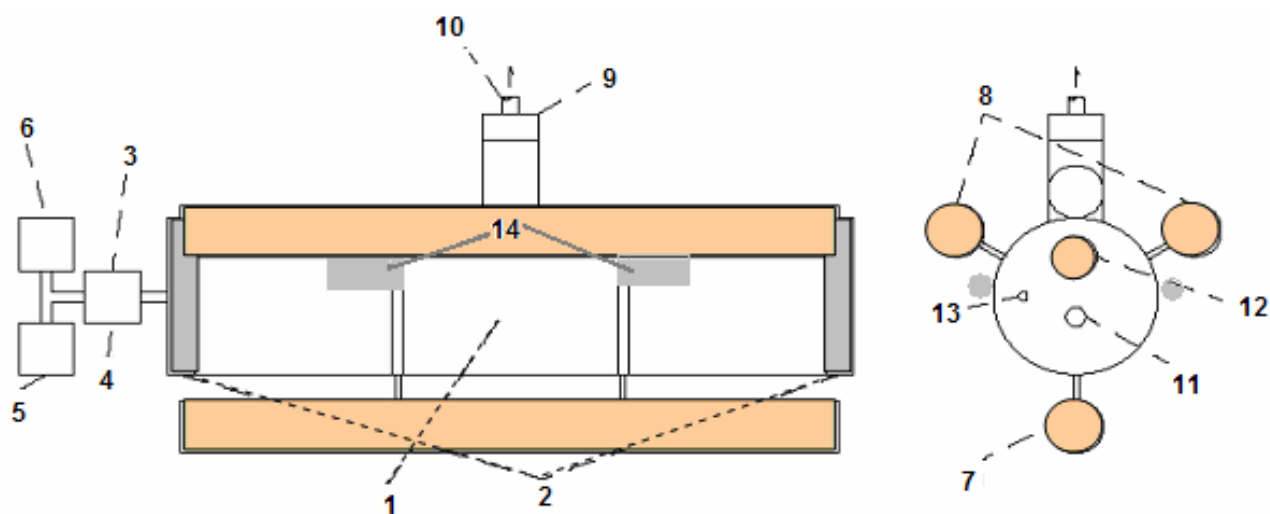


Figura 1 - Vista do geral do VSI-01.

METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO VEÍCULO SUBAQUÁTICO DE INSPEÇÃO

O "Veículo Subaquático de Inspeção (VSI-01)" tem por objetivo eliminar riscos e criar condi-



01 Corpo do VSI-01	08 Tubos laterais do sistema de flutuação / submersão
02 Tampas dianteira e traseira	09 Torre de conexão dos controles e alimentação remotos
03 Válvula solenóide vetorização à direita	10 Cabo de conexão ao controle e sistemas de alimentação
04 Válvula solenóide vetorização à esquerda	11 Tomada de sistema de propulsão e vetorização
05 Válvula solenóide vetorização à frente	12 Lente de vigia da câmera de vídeo
06 Válvula solenóide vetorização à ré	13 Cabo de vídeo da câmera de vídeo
07 Tubo de lastro	14 Motores auxiliares

Figura 2 - Vista geral e esquemática do VSI-01.

ções melhores para inspeções subaquáticas em estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas. Por meio do uso de um veículo não tripulado totalmente telecomandado dotado de um sistema de câmeras digitais capazes de captar imagens e enviá-las a um computador localizado junto à unidade de comando, objetiva-se a melhoria nas condições operacionais e facilidade no trato de informações. A figura 1 apresenta uma vista geral do VSI-01 no tanque de teste do laboratório.

Sistema Construtivo

O VSI-01 foi construído em 1998, no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG. É constituído por um cilindro principal no qual está inserido um esqueleto estrutural que tem como objetivo enrijecer o corpo do equipamento onde se localizam os sistemas de propulsão e o de vídeo-monitoração. A figura 2 apresenta um esquema geral do equipamento desenvolvido com as suas principais características. A estrutura interna é encaixada dentro de um tubo de PVC de diâmetro de 200 mm e comprimento de 1400 mm. Vários anéis foram dispostos longitudinalmente ao tubo, com o

objetivo de permitir a fixação dos tubos auxiliares superiores (de flutuação) e inferiores (de lastro). Em cada um desses anéis foram feitos três orifícios dispostos em 120° nos quais foram encaixados parafusos ($\phi = 4\text{ mm}$ e $L = 50\text{ mm}$) aos quais são fixados os tubos descritos. O esqueleto foi projetado baseando-se em informações referentes às pressões externas que devem ser suportadas. No caso, por se tratar do primeiro protótipo de um veículo experimental, trabalhou-se com pressões máximas de projeto de 5 kgf/cm^2 ($0,5\text{ MPa}$).

Assim a estrutura é formada por vários anéis de madeira leve (cavernames), de 20 mm de espessura e de raio médio interno de 62 mm e externo de 98 mm, fixados por hastes parafusadas.

As hastes foram dispostas em 120° de modo a propiciar o encaixe dos cavernames que possuem furos de diâmetro igual a $3/8''$. Em cada ponto de passagem das hastes pelos cavernames é colocado um conjunto de porcas e arruelas de forma a manter o cavername imobilizado aumentando a sua rigidez.

A distância que separa os cavernames é de 45 mm entre eixos. A figura 3 apresenta uma vista em detalhe do esquema construtivo dos cavernames.

Na região onde o motor está instalado, foram colocados cavernames móveis para facilitar a manutenção do equipamento. Neste caso têm-se quatro cavernames que são ligados por braçadeiras auto-travantes e imobilizados mediante colagem. A Tabela 1 apresenta as principais dimensões do VSI-01. Em todos os cavernames existem quatro orifícios para a passagem dos cabos de alimentação e controle. Duas tampas de alumínio fecham a estrutura principal e fazem a comunicação dos sistemas internos com o exterior.

Na tampa dianteira encontram-se: a tomada de água do sistema de propulsão, a lente de acrílico da câmera e a saída do cabo do sistema de vídeo. Na tampa traseira localizam-se: a saída de água pressurizada do sistema de propulsão e a conexão elétrica do motor juntamente com o duto de pressurização do corpo principal.

A figura 4 mostra o sistema estrutural montado com detalhes da região de colocação do motor principal.

À saída de água do sistema de propulsão conecta-se o sistema de vetorização do empuxo formado por quatro válvulas solenóides que controlam a movimentação do veículo. Duas delas se destinam ao sistema de empuxo para movimentação longitudinal (a frente e a ré), e as outras duas válvulas direcionam o fluxo para permitir deslocamento lateral (direita e esquerda - estibordo e bombordo) do veículo.

No caso do deslocamento lateral trabalha-se com um sistema de fluxo aplicado diagonalmente ao longo do corpo do VSI-01. Este esquema de direcionamento se mostrou mais eficiente e permite manobras laterais mais rápidas. Entretanto, este sistema somente funciona com o motor principal ligado e, portanto, aduzindo água frontalmente.



Figura 3 - Detalhe do esquema construtivo dos cavernames.

Tabela 1 - Principais dimensões do VSI-01.

DIMENSÃO	VALOR
Comprimento máximo	$L_{max} = 2.100 \text{ mm}$
Comprimento do tubo Principal + tampas	$L_{tubo} = 1.450 \text{ mm}$
Largura máxima	$W_{max} = 450 \text{ mm}$
Altura máxima	$H_{max} = 800 \text{ mm}$
Comprimento do Conjunto de vetorização	$L_{vetor} = 400 \text{ mm}$



Figura 4 - Sistema estrutural montado com detalhes da região de colocação do motor principal.

Desta forma optou-se por instalar quatro motores direcionais trabalhando de forma complementar ao sistema de vetorização principal. A vantagem destes motores reside no fato de serem acionados com o VSI-01 parado. Estes motores auxiliares permitem o alinhamento da câmara de filmagem.

As figuras 5 e 6 apresentam um esquema dos motores auxiliares utilizados no VSI-01. Estes quatro motores auxiliares de direção acionam as moto-bombas alimentadas em 12 volts em corrente contínua, encapsulados em conjuntos de PVC de $\varnothing = 40\text{mm}$ e $L = 130\text{mm}$, fechados cada um por dois tampões de $\varnothing = 40\text{mm}$ e uma luva $\varnothing = 40\text{mm}$.

O conjunto de vetorização auxiliar foi fixado ao tubo central de modo a permitir uma base de manobra mais rígida. Conforme mostrado na figura 2, ao corpo principal do submarino conectam-se três tubos de menor diâmetro ($\varnothing = 100\text{mm}$ e $L = 1300 \text{ mm}$): dois tubos auxiliares superiores posicionados nos quadrantes superiores simetricamente e um tubo auxiliar inferior disposto na linha de lastro do veículo. Nos dois tubos superiores encontram-se os pneumáticos e as válvulas de controle que permitem a submersão e emersão do veículo.

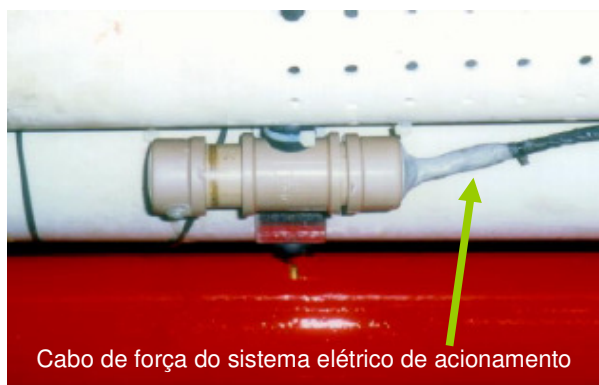


Figura 5 - Detalhe de um motor auxiliar do VSI-01 e do cabo de força do sistema elétrico de acionamento.

À frente desses dois tubos e do tubo de lastro encaixam-se os sistemas de iluminação compostos de três lanternas seladas, capazes de suportar até 50 m (aproximadamente 5 kgf/cm²) de profundidade, e três refletores em alumínio, para permitir o direcionamento do feixe de luz.

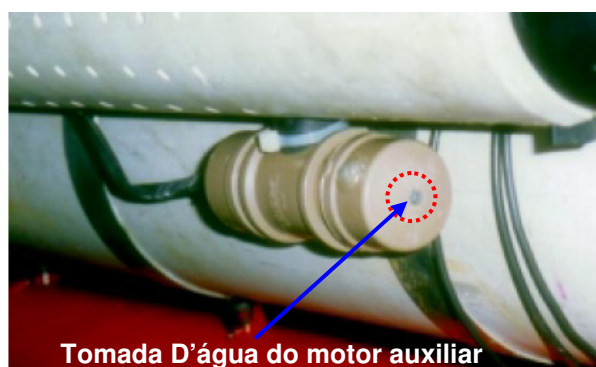


Figura 6 - Detalhe da tomada d'água do motor auxiliar do VSI-01.

Ainda sobre o corpo principal dispõe-se a torre de conexão do cabo de controle ao VSI-01 que será descrito a seguir.

Torre de Controle

O corpo principal do VSI-01 está acoplado a uma pequena torre de controle em PVC dentro da qual conectam-se os principais elementos de ligação entre o controle remoto e o VSI-01 que são: cabo principal de controle contendo todos os cabos descritos anteriormente, cabo de vídeo e os conduítes de ar comprimido para os pneumáticos e para pres-

surização do corpo principal. A torre foi idealizada para permitir flexibilidade aos sistemas e isolá-los de forma a evitar problemas diversos envolvendo vedação.

A torre é uma estrutura de fácil vedação, permitindo o acesso aos conectores dos cabos de forma simples e rápida. As figuras 7 e 8 mostram detalhes da torre onde se pode identificar o cabo de comando entrando pela sua parte superior, a base da torre, onde ficam as conexões e as saídas dos cabos direcionadas para cada parte do veículo. A figura 9 apresenta um detalhe do sistema de acoplamento dos cabos elétricos de alimentação e controle do equipamento.

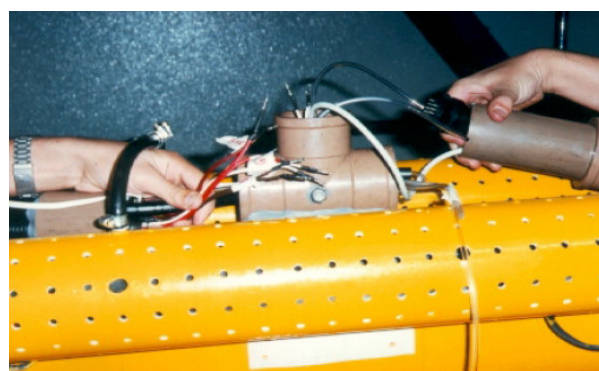


Figura 7 - Detalhe da montagem da torre de controle do VSI-01 onde se pode observar o conjunto de cabos e tubos na entrada da torre.

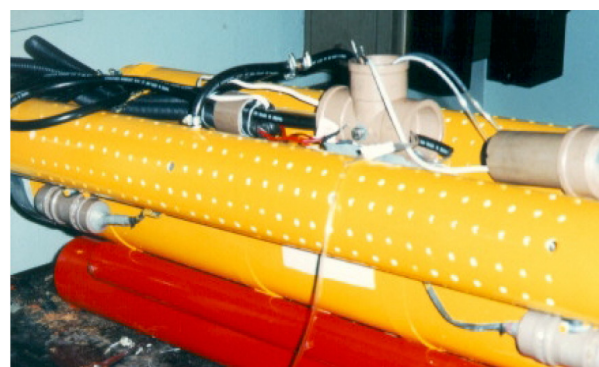


Figura 8 - Detalhe da montagem da torre de controle do VSI-01.

Para evitar problemas de vedação da torre de controle, optou-se por uma solução baseada no preenchimento de toda câmara com óleo isolante. A utilização deste tipo de óleo se baseou no fato de

existir uma grande diversidade de conexões e sistemas elétricos. Entretanto, a escolha do óleo teve que ser acompanhada de um estudo de compatibilidade química do mesmo com os diversos componentes das conexões, de modo a evitar um desgaste por corrosão das conexões e do isolamento.

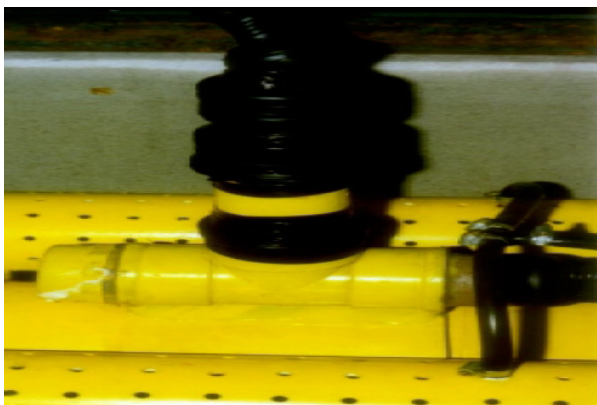


Figura 9 - Detalhe da torre de controle já montada e dos 5 tubos de saída para alimentação do VSI-01. Característica de Vedação do Vaso de Pressão

Devido ao fato do equipamento trabalhar em profundidades variadas, com uma grande diversidade de pressões e, portanto de deformações na sua estrutura, um dos problemas enfrentados foi o de garantir a vedação dos sistemas. Assim as tampas dianteira e traseira foram executadas de forma a se encaixarem perfeitamente ao tubo principal. Adicionalmente uma vedação complementar foi realizada utilizando-se cola e fita adesiva de borracha. Apesar do sistema ser bastante simples, se mostrou eficiente desde o primeiro teste tendo sido mantido até o final do desenvolvimento deste protótipo.

As conexões de tomada e saída de água do sistema de propulsão com as tampas são feitas através de flanges em PVC com anéis de borracha e cola. As passagens dos cabos do sistema elétrico também são feitas através de flanges preenchidos com cola de silicone. A vigia para a câmara, em acrílico, foi adaptada de forma a não permitir vazamentos. Um sistema de pressurização foi criado para manter a pressão interna sempre maior do que a externa, evitando assim problemas de entrada de água. Desta forma foi necessário o desenvolvimento de um sistema que permitisse a despressurização do equipamento de forma rápida garantindo uma manobra de subida acelerada. Isto foi obtido a partir de um sistema de retirada forçada de ar que passa pelo cabo

de controle. Apesar do sistema “cabos de pressurização/despressurização” ter um volume elevado, esta foi a melhor solução alcançada neste primeiro protótipo.

A figura 10 apresenta um detalhe do sistema de lente adaptado à tampa frontal do VSI-01, onde se pode observar um orifício utilizado para permitir a passagem da tomada d’água para acionamento do motor de propulsão principal.



Figura 10 - Detalhe do tampão frontal do VSI-01.

Sistemas de Câmaras de Flutuação

Os tubos auxiliares superiores comportam o sistema de flutuação / emersão do VSI-01, composto de dois pneumáticos de borracha e duas válvulas solenóides de controle de admissão e escape de ar comprimido. Os tubos são fabricados em PVC e foram perfurados de forma a não prejudicar sua rigidez e permitir a entrada e a saída da água de seu interior. A figura 11 apresenta uma vista dos tubos de submersão / emersão e do tubo de lastro.

Em cada um dos tubos superiores se encontra uma câmara de borracha de $\varnothing = 21''$, dois tampões na forma de placas em PVC e um sistema de iluminação. A 200 mm das extremidades do tubo, foram feitos 360 orifícios distanciados de 30 mm longitudinalmente entre si e dispostos a 30° com relação a linha de centro do mesmo.

As câmaras pneumáticas foram acopladas as válvulas de admissão e expulsão de gás.

A partir de um console de comando pode-se ativar o controle de emersão, através de um compressor e de um conjunto de válvulas solenóides.

Ao se energizar as válvulas injeta-se o ar comprimido nos pneumáticos, que inflam e expulsam a água do interior dos tubos. No caso do comando de submersão, uma válvula de escape é energizada e permite o escape do ar comprimido contido nos pneumáticos para o ambiente. Esta

operação é facilitada pela pressão exercida pela água sobre os pneumáticos. A massa do VSI-01 foi determinada por meio de pesagem direta, e assim, projetou-se o sistema de lastro. O sistema de lastro é composto por um tubo de aço carbono (tubo auxiliar inferior) lastreado com uma massa complementar de ferro e chumbo.



Figura 11 - Vista do VSI-01 onde se pode notar os orifícios de saída d'água da câmara de flutuação.

O processo de abertura das válvulas solenóides permite o escape de ar para um ambiente externo ao VSI-01, conduzindo a formação de uma cortina de bolhas. Nos testes efetuados no laboratório esta cortina de bolhas não causou instabilidade no equipamento apesar de indicar com clareza a posição do mesmo. Devido ao fato da cortina de bolhas ser formada na parte lateral do equipamento e de não ser necessário manter o VSI-01 incógnito durante manobras submersas, considerou-se que o sistema pode ser utilizado para este fim. Devido ao fato do veículo ter sido projetado para atingir profundidades operacionais de até 20 m (50 m de projeto), foram efetuados ensaios de pressão no sistema de pneumáticos visando identificar possíveis problemas ligados à variação dos níveis de pressão interna nos

mesmos sob condições de operação rápida. Isto se deve ao fato do controle ser feito mediante um sistema de válvulas de alívio que se comunicam com o lado externo do equipamento. O resultado dos ensaios mostrou que o tubo de proteção das câmaras pneumáticas resiste a pressões acima de 8 Kgf/cm². No caso em questão o ensaio não foi do tipo destrutivo, tendo sido efetuado mediante a elevação da pressão interna nos pneumáticos até o limite de pressão indicado e mantido durante 24 horas. Também foram efetuados duzentos ciclos de ensaios de enchimento/ esvaziamento das câmaras (correspondentes a duzentas operações de submergência / emergência consecutivas).

EQUIPAMENTOS EMBARCADOS

O projeto do VSI-01 teve como objetivo estudar e caracterizar uma plataforma para inspeção visual de estruturas hidráulicas submersas. Desta forma procurou-se embarcar uma série de equipamentos que permitissem ao veículo cumprir a sua proposta de trabalho inicial. A seguir descrevem-se os equipamentos instalados no mesmo.

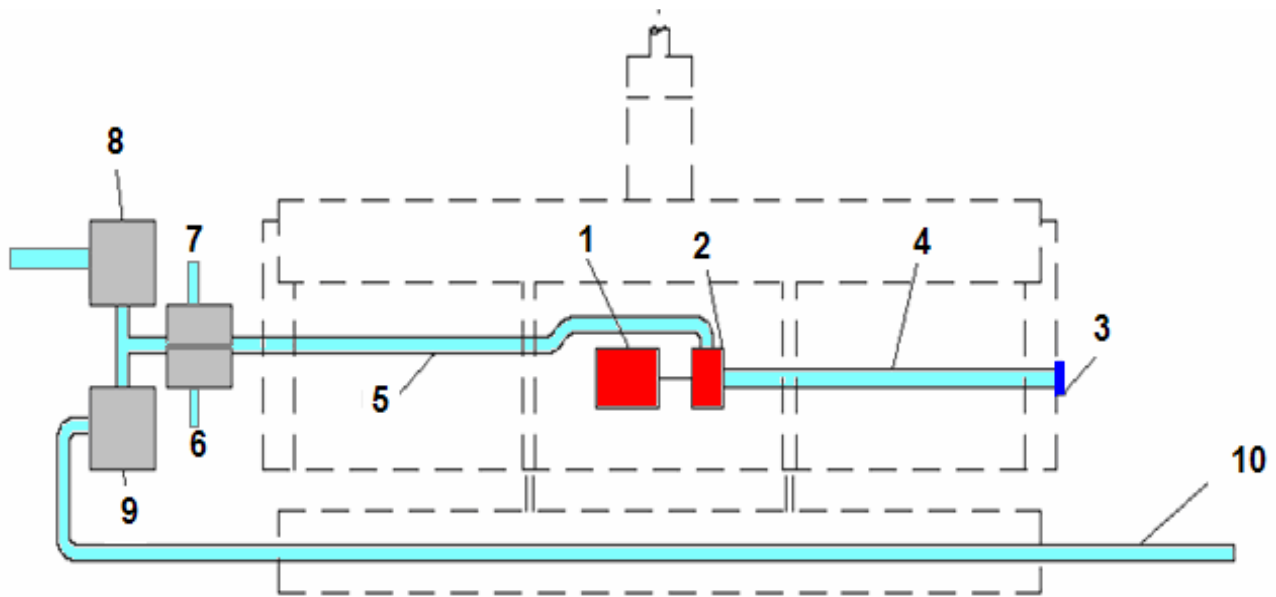
Os Sistemas de Posicionamento do VSI-01

Por se tratar de um primeiro protótipo dentre uma série a ser projetado e implementado, o circuito de controle foi concebido de modo a garantir uma elevada robustez ao equipamento, a um custo de instalação pequeno.

Assim os sistemas de posicionamento do VSI-01 podem ser considerados simples em relação às disponibilidades tecnológicas atuais inseridas. Para o controle de posição, foi utilizado um sistema constituído de conjuntos moto-bomba que fornecem o empuxo necessário para a movimentação. Com a utilização de um conjunto de quatro válvulas solenóide pode-se controlar o posicionamento do VSI-01. As válvulas solenóide são alimentadas por VCa = 127V. Duas delas são utilizadas para controle de vazão que permitem o movimento avante / ré e duas para controle esquerda / direita, sempre movimentos complementares.

A Figura 12 apresenta um esquema dos equipamentos embarcados no VSI-01.

A Figura 13 apresenta a torre de válvulas localizada à ré do VSI-01. O sistema de direcionamento possui ainda quatro motores-bomba 12V CC, trabalhando diagonalmente.



01 - Motor-Bomba de 1/8 CV	06 - Válvula solenóide de vetorização à direita
02 - Bomba Centrífuga de 1/8 CV	07 - Válvula solenóide de vetorização à esquerda
03 - Tomada de água do sistema de propulsão e vetorização	08 - Válvula solenóide de vetorização à frente
04 - Tubo de admissão de água	09 - Válvula solenóide de vetorização à ré
05 - Tubo de recalque	10 - Tubo de saída à ré

Figura 12 - Esquema dos equipamentos embarcados no VSI-01.



Figura 13 -Torre de válvula localizada à ré do VSI-01

O circuito elétrico foi projetado de forma a se obter o menor número de cabos mantendo-se um referencial de segurança. Por ter de utilizar mais de um tipo de alimentador de energia, os sistemas de proteção tiveram de ser projetados independentemente, permitindo maior flexibilidade ao sistema.

Todos os sistemas embarcados são conectados a um console de controle remoto por meio de um cabo blindado e protegido, que ao mesmo tempo, provê as ligações elétricas e pneumáticas.

Os Sistemas de Propulsão do Veículo

O sistema de propulsão foi implementado a partir da instalação de um sistema de geração de empuxo, formado por um tubo de admissão à frente, uma bomba centrífuga elétrica alimentada por $V_{Ca} = 127V$ e um tubo de recalque à ré. A potência do conjunto moto-bomba é de 1/8CV.

Devido ao fato do conjunto moto-bomba de impulsionamento principal se localizar no corpo principal do VSI-01, o seu funcionamento causa o aumento de temperatura no seu interior. Esse aumento conduziu, após uma hora de funcionamento contínuo, a valores de temperatura de até 60°C.

Assim optou-se por instalar o conjunto moto-bomba acoplada a uma tubulação de cobre, que promovem a circulação da água em torno do motor e tem a função de refrigerar o interior do VSI-01. O resultado obtido manteve o interior do corpo prin-

principal a uma temperatura próxima de 35°C, que é compatível com a temperatura de trabalho dos demais equipamentos embarcados.

Na seção a seguir são apresentados os ensaios referentes ao teste deste sistema.

A Figura 14 apresenta uma vista do motor instalado no corpo central do VSI-01 e os dutos de circulação de água em torno do motor de propulsão principal.

Apesar do sistema adotado ser bastante simples ele se mostrou eficiente, mesmo para condições de operação direcional onde a vazão circulada no interior do motor era bastante baixa. Entretanto, para o caso de parada total do VSI-01, quando a circulação de água se reduz a zero, é necessário que o sistema de propulsão seja desligado, pois a elevação de temperatura se torna sensível.

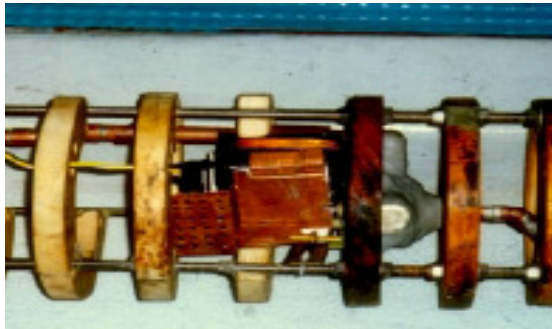


Figura 14 - Vista do motor instalado no corpo central do VSI-01 e dos dutos de circulação de água em torno do motor de propulsão principal.

Para eliminar este inconveniente, adotou-se um sistema de sensores de temperatura que limitam o funcionamento do equipamento acima de 40°C. Este sistema, apesar de se constituir em uma limitação operacional evita que haja danos aos demais sistemas embarcados, especialmente ao sistema de visualização de imagens.

Sistemas de câmera de vídeo e de iluminação

Para visualização das estruturas submersas optou-se, neste primeiro protótipo, pela utilização de uma câmera de vídeo digital QUICKCAM da marca CONNECTIX, acoplada a um microcomputador, o qual retém os dados obtidos, no formato digital, permitindo uma boa capacidade de processamento de imagem.

Essa câmera foi ajustada a um receptáculo preparado para recebê-la. Devido ao fato do seu formato externo ser esférico, foi possível ajustar o ângulo da mesma com facilidade. Junto ao apoio foi instalada uma lente de acrílico, perfeitamente ajustada ao sistema, permitindo a vedação do sistema e dando acesso visual ao interior do corpo principal do VSI-01. O sistema é controlado através de softwares que permitem, além das filmagens tradicionais, a obtenção de fotos detalhadas.

O sistema de iluminação é constituído por um conjunto de três lanternas blindadas com capacidade de submersão de até 50m. Devido à dificuldade de alimentação das lanternas a partir do sistema elétrico principal optou-se por um sistema independente de baterias para cada lanterna, mantendo-as em operação durante quatro horas consecutivas, tempo necessário para uma jornada de trabalho de inspeção.

A Figura 15 mostra o conjunto de iluminação sendo montado no VSI-01.

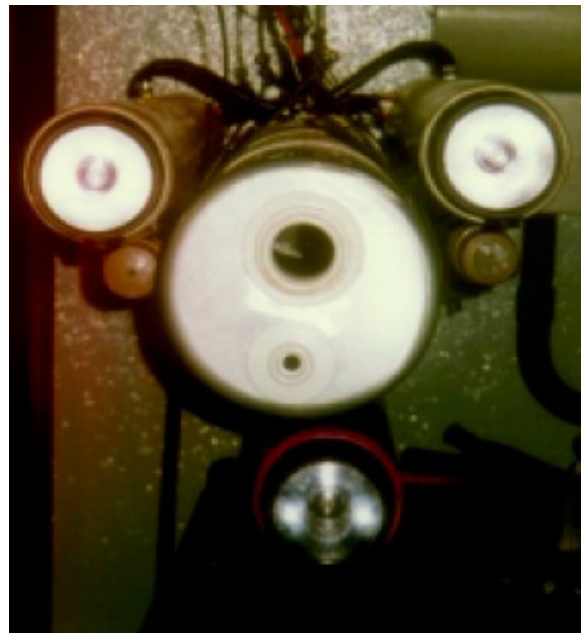


Figura 15 - Detalhe da montagem do conjunto de iluminação no VSI-01.

Sistemas de alimentação de energia

A alimentação de energia para os sistemas do VSI-01 é provida externamente, em 127 Volts AC e 12 Volts DC. O motor principal, as válvulas solenóides e o computador para registro de imagens são

alimentados em 127 Volts alternado, provido pela rede elétrica ou por um pequeno grupo gerador a gasolina. Já os motores auxiliares de direcionamento e o compressor externo de ar são alimentados em 12 Volts DC por meio de uma bateria ou por um sistema de retificação de energia acoplado ao circuito em corrente alternada de 127 Volts. O sistema de vídeo pode ser considerado auto-suficiente, visto que sua alimentação é feita diretamente pelo micro-computador. Foram feitos estudos para a alimentação através de inversores estáticos, que poderia suprir em corrente alternada ao sistema a partir da bateria do equipamento. Toda a alimentação elétrica do VSI-01 passa pelo console de controle remoto e pelos sistemas de proteção eletro-eletrônico. Desta forma considera-se que o veículo esteja protegido contra curtos circuitos e demais problemas oriundos de uma sobrecarga do sistema.

Cabo de comando

O cabo de comando é composto por um conjunto de cabos de força e de controle necessários para a alimentação, controle e comando do VSI-01. Sua conexão com a torre de comando é realizada através de conectores atarraxáveis contendo 24 conexões robustas. Esse cabo liga o console de controle remoto ao conector da torre do submarino. Pelo cabo de comando chegam dois conduítes de ar comprimido e o cabo do sistema de vídeo. Todos os cabos foram inseridos em um conduíte corrugado flexível e em PVC. O comprimento total do cabo é de 25 m, do controle à torre, o que permite testar o equipamento até o limite de profundidade proposto (20 metros). Entretanto, devido à massa do cabo, quando totalmente desenrolado, notou-se uma redução na agilidade e rapidez de manobra do VSI-01, identificando a necessidade de se desenvolverem estudos mais detalhados visando a redução das suas dimensões internas e, conseqüentemente, da sua massa.

CARACTERIZAÇÃO DO VSI-01

Curva de arrasto do protótipo

O protótipo desenvolvido com todos os seus equipamentos acoplados e lastro tem um deslocamento submerso de 92 Kg. O deslocamento na superfície é de 81 kg (parcialmente submerso, como na condição da Figura 16). A massa do sistema de lastro é de 12,4 kg e possibilita manter uma boa

estabilidade no sistema. As medições de arrasto no protótipo foram feitas utilizando-se um canal reto de alvenaria. Entretanto, devido a limitações físicas (extensão do canal), as medidas de velocidade foram muito difíceis de serem executadas. Assim, para este ensaio arrastou-se o VSI-01 ao longo do canal e se mediu a força necessária para se manter uma velocidade constante.

A partir de um conjunto de medidas se pode levantar a curva de arrasto do protótipo, indicada na figura 16. A curva teve um formato bastante próximo do modelo ensaiado. Pela análise da curva obtida observa-se a tendência de aumento do arrasto com o aumento de velocidade.

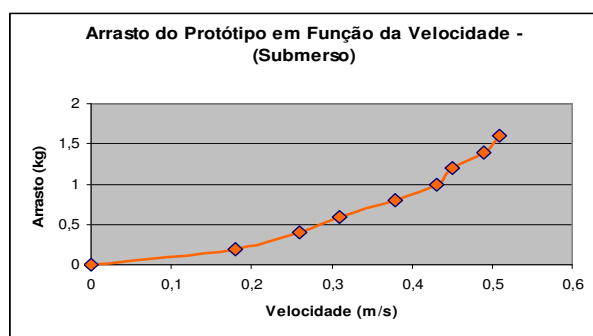


Figura 16 - Curva de arrasto do protótipo submerso.

A acentuação da declividade da curva (derivada) mostra o efeito conhecido, no qual a partir de um ponto, um aumento significativo da força de propulsão aplicada não é mais capaz de gerar um aumento de velocidade significativo.

Curvas de submersão e emersão

Sabe-se que os grandes veículos submersíveis possuem grandes potências em seus motores e altas velocidades de deslocamento. Para sua submersão ou emersão, além do sistema de tanques superiores inundáveis estes veículos se utilizam de profundores e da potência de seus motores. Esta alternativa não foi utilizada no VSI-01, principalmente devido à necessidade de deslocamento lento para inspeção. Utilizou-se apenas o sistema de tanques de lastro de modo a se ter uma maior eficiência no controle de profundidade a baixa velocidade. Os ensaios efetuados no VSI-01 mostraram-se compatíveis com o previsto no projeto. Assim pode-se observar, pela análise da figura 17, que o VSI-01 tem uma inércia de 40 segundos para iniciar o processo de submersão. Esta

inércia se deve a característica dos tanques de lastro (constituídos de um par de câmaras pneumáticas); entretanto, não se considera que esta característica seja um impedimento à operação eficiente do VSI-01.

Os ensaios de emersão e submersão foram efetuados visando caracterizar a inércia do VSI-01 no que diz respeito à capacidade do equipamento retornar à superfície.

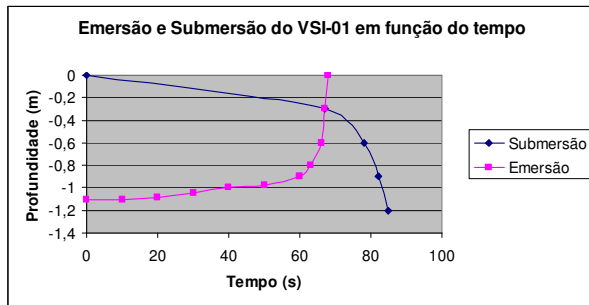


Figura 17 - Curvas de emersão e submersão do VSI-01.

O ensaio mostrou que a partir de 50 segundos de acionamento dos tanques de lastro o VSI-01 começou a se deslocar, conforme pode ser observado na figura 18.

Esta característica está ligada ao projeto dos tanques de lastro e a potência dos compressores de ar utilizados para expulsão da água das câmaras.

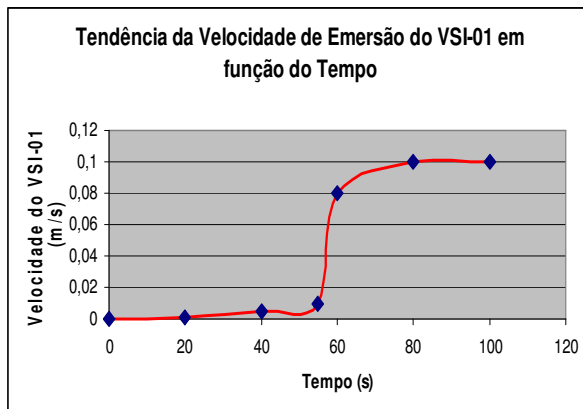


Figura 18 - Curva de Velocidade de Emersão do VSI-01.

Considera-se que é necessário o redimensionamento deste sistema, pois, à medida que o equipamento for sendo posicionado a maiores profundidades, a inércia tende a aumentar, tornando a operação do VSI-01 cansativa e demorada.

Devido ao fato de se trabalhar com um sistema de enchimento de câmaras pneumáticas, optou-se pela instalação de um sistema de válvulas de segurança para controle da pressão diferencial entre o interior / exterior das mesmas.

O sistema de enchimento de câmaras pneumáticas permite que se tenha um controle das velocidades de submersão / emersão do VSI-01, impedindo que o mesmo realize a operação de emersão sem controle chegando à superfície com velocidade elevada, saltando para fora da superfície.

Característica do sistema de posicionamento e vetorização de empuxo do VSI-01

O sistema de vetorização de empuxo do VSI-01 é composto por dois circuitos independentes. O primeiro é impulsionado por um conjunto moto-bomba central que alimenta um grupo de bocais de impulsão controlados por válvulas solenóides. O segundo circuito é formado por quatro motores auxiliares que têm a função de permitir um ajuste posicional fino do VSI-01. Os testes de vazão / empuxo dos circuitos visaram caracterizar o sistema de vetorização e permitir um maior conhecimento sobre as suas limitações em termos de resposta.

Para a execução do ensaio foi estabelecido um esquema de acionamento do conjunto das válvulas solenóides que permitem uma série de movimentos a frente, a ré, a direita e a esquerda, conforme mostrado na figura 19. Assim, ao acionar a válvula V1 o veículo tende a se deslocar para direita (bombordo); ao acionar a válvula V3 o veículo se desloca para a esquerda (estibordo).

O acionamento da válvula V2 faz com que o veículo avance a frente e a válvula V4 promove o avanço a ré. Desta forma o acionamento de duas ou mais válvulas permite a movimentação do VSI-01 sob diversas condições de operação.

A caracterização do empuxo (Streeter, 1982 e Hwang, 1984), obtido pelo sistema acionado pela bomba central (Giles, 1997 e Quintela, 1981), seguiu uma seqüência de acionamento das válvulas que está apresentado na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Seqüência de acionamentos das válvulas do sistema de posicionamento do VSI-01.

Seqüência	Movimento Resultante
V1 ou V3	direita ou esquerda
V2 e V1 ou V3	frente / (direita ou esquerda)
V4	ré
V4 e V1 ou V3	ré / direita ou esquerda

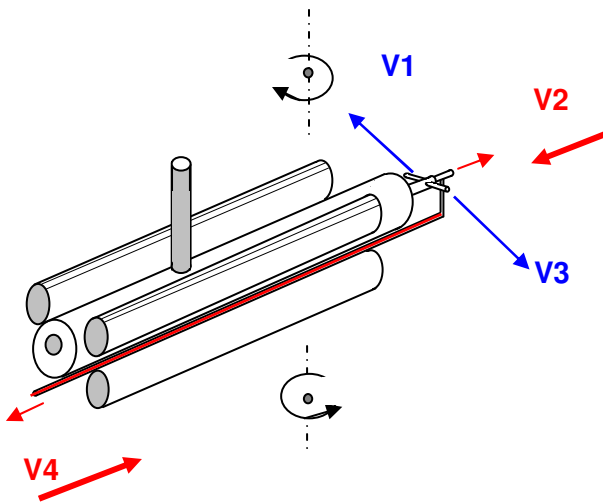


Figura 19 - Esquema de atuação dos sistemas de direção, frente e ré do VSI-01.

As tabelas de 3 a 6 apresentam a caracterização do sistema de posicionamento do VSI-01.

Os cálculos das forças de reações dos sistemas de propulsão do veículo foram realizados através da equação (1) apresentada abaixo:

$$F = \rho Q_r^2 / (\pi \cdot r^2) \tag{1}$$

Onde: ρ -> Densidade da água;

Q_r -> Vazão na saída do sistema;

r -> Raio do duto de saída do fluxo.

Tabela 3 - Características do sistema de posicionamento / propulsão do VSI-01 com a válvula V1 ou V3 acionada (direita ou esquerda).

Tempo de medição	T=10s
Volume colhido saída anterior	V1=575 ml
Volume colhido saída posterior	V1=640 ml
Vazão saída anterior	Q1=0,0575 l/s
Vazão saída posterior	Q2=0,0640 l/s
Vazão medida total	QT=0,1215 l/s
Força de reação total (Empuxo)	F=0,291 N

Tabela 4 - Características do sistema de posicionamento / propulsão do VSI-01 com a válvula V2 acionada (frente).

Tempo de medição	T=10 s
Volume colhido	V=3000ml
Vazão medida	Q=0,3 l/s
Força de reação	F = 0,291N

Tabela 5 - Características do sistema de posicionamento / propulsão do VSI-01 com a válvula V4 acionada (ré).

Tempo de medição	T=10 s
Volume colhido	V=1310 ml
Vazão medida	Q=0,131 l/s
Força de reação	F = 0,342 N

Tabela 6 - Características do sistema de posicionamento / propulsão do VSI-01 com a válvula V4 (ré) e V1 ou V3 (direita / esquerda) acionadas.

Tempo de medição	T=10s
Volume colhido saída anterior	V11=575 ml
Volume colhido saída posterior	V12=590 ml
Volume colhido a ré	Vr=1210 ml
Vazão saída lateral anterior	Q1=0,0545 l/s
Vazão saída lateral posterior	Q2=0,0590 l/s
Força de reação lateral total	F=0,069 N
Vazão saída a ré	Qr=0,121 l/s
Força de reação a ré (Empuxo)	F=0,291 N

Caracterização da temperatura no interior do vaso de pressão

Devido ao pequeno espaço livre dentro do corpo principal do VSI-01 e da presença de equipamentos elétricos tais como o motor principal, válvulas etc, esperava-se desde o início do projeto um aumento da temperatura no seu interior.

Medições no protótipo mostraram que o interior do cilindro principal atingiu, após 20 minutos funcionando a vazio, até 47°C. Sob carga, esta temperatura podia aumentar até um limite de 60°C sob condições de solicitação severa (carga máxima do conjunto propulsor). Em regime de operação normal a temperatura atingida ficou em torno de 33°C quando em operação durante 45 minutos.

Desta forma optou-se por inserir um sistema de refrigeração. Após a inclusão do sistema de refrigeração a temperatura do interior do submarino foi reduzida a valores bastante razoáveis. Assim sob condição de funcionamento a vazio atingiu-se valores em torno de 25°C e quando sob carga a temperatura alcançada ficou em menos de 35°C.

Esta temperatura permitiu o funcionamento da câmara para monitoração e filmagem.

A Figura 20 apresenta a curva de elevação de temperatura interna do VSI-01 sob condição de carga máxima, após a instalação do sistema de refrigeração.

Para uma temperatura da água na admissão do conjunto moto-bomba de 20,8°C, a temperatura da água na saída do conjunto moto-bomba é de 21,9 °C.

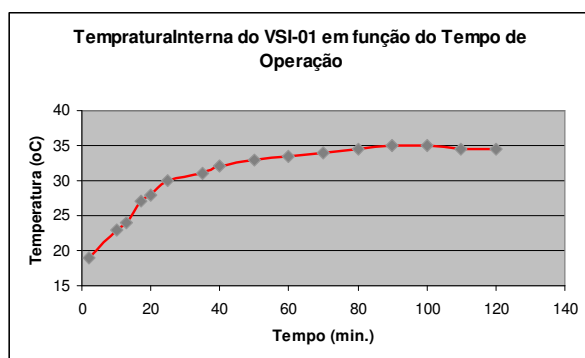


Figura 20 - Curva de elevação de temperatura interna do VSI-01 sob condição de carga máxima, após a instalação do sistema de refrigeração.

CONCLUSÕES

O veículo desenvolvido constitui uma boa plataforma de testes para o início dos estudos com veículos operados remotamente (ROV). Os testes de elevação de temperatura mostraram que um dos grandes problemas ainda continua sendo a dissipação de calor dentro da carcaça do submersível. A instalação de dissipadores permitiu que se mantivesse a temperatura interna em 35°C após 100 minutos de operação. Este valor é considerado aceitável para este tipo de veículo.

Observando as curvas de emersão e de submersão do VSI-01, percebe-se um tempo de retardo de aproximadamente 40 segundos nestas operações. Conclui-se que as operações de emersão e submersão somente podem ser consideradas efetivas após 60 segundos do início destas operações. Isso ocorre devido à configuração do sistema de flutuação do VSI-01, que se baseia na variação do volume de ar dentro de um conjunto de câmaras pneumáticas alocadas nos cilindros de flutuação (figura 2). Pode-se observar também que os tempos de emersão/submersão são diferentes: o tempo necessário para submergir é de aproximadamente 85 segundos e para emergir de aproximadamente 65 segundos.

O sistema de posicionamento do VSI-01 se mostrou eficaz. Entretanto, os tempos de resposta foram lentos comparados com outros veículos (YUH, 2000), o que torna a operação do veículo difícil. Isso se deve principalmente ao fato do con-

junto propulsor ser de baixa potência. Entretanto, o sistema de vetorização se mostrou viável e deve ser melhor estudado em projetos futuros. Durante o teste do sistema de vídeo do VSI-01 pode-se observar uma grande interferência eletromagnética, principalmente quando do acionamento dos propulsores. Isso deve ser motivo de estudos de modo a se corrigir esse efeito.

Visto que a plataforma do VSI-01 não comporta mais modificações, está-se iniciando um segundo projeto, o VSI-02, que deve incorporar algumas alterações. A primeira delas diz respeito aos sistemas de potência e de controle de posicionamento, que passarão a atuar com um sistema independente de propulsores, permitindo que o VSI-02 se movimente com maior grau de liberdade (Smallwood et. al., 1999). Sugere-se a utilização de propulsores com hélice para melhor rendimento do sistema de vetorização de empuxo (Cavallo et. al., 2004). Além disso, considera-se necessário que a carcaça do VSI-02 seja construída em aço (de preferência inox). Isso possibilitará uma maior resistência mecânica do submersível, fazendo com que possa alcançar maiores profundidades. A concepção de um sistema de flutuação diferenciado, capaz de prover estabilidade ao ROV em determinadas profundidades (Wasserman et. al., 2003), também é uma sugestão para este novo projeto.

REFERÊNCIAS

- CAVALLO, E., MICHELINI, R.C. e FILARETOV, V. F., *Conceptual design of an AUV equipped with a three degrees of freedom vectored thruster*, Journal of Intelligent & Robotic Systems 39 (4):365-391, 2004.
- GILES, R.V., EVETT, J.B., LIU, C. , *Mecânica de Fluidos e Hidráulica*, Editora Makron Books, 2ª. ed., São Paulo, 1997, p. 398-426.
- HARRIS, B., *The Navy Times Book Of Submarines: A Political, Social, And Military History*, Edited by Walter Boyne, 1997. www.submarine-history.com/
- HWANG, N.H.C., *Sistemas de Engenharia Hidráulica*, Editora Prentice/Hall do Brasil, 1ª. ed., Rio de Janeiro, 1984, p. 100-124.
- JIMENEZ, T. S., *Contribution na la commande d'un robot sous-marin autonome de type torpille*, Tese apresentada 2004, UNIVERSITE MONTPELLIER II.
- QUINTELA, A. C., *Hidráulica*, Editora Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª.ed., Lisboa, 1981, p. 309-487.
- SMALLWOOD, D., BACHMAYER, R. e WHITCOMB, L., *New Remotely Operated Underwater Vehicle for Dynam-*

ics and Control Research, Department of Mechanical Engineering, Johns Hopkins University, In Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered, Submersible Technology, Durham, NH, September 19-22, 1999.

STREETER, V.L., WYLIE, E.B., *Mecânica dos Fluidos*, Editora Mc.Graw Hill, 7ª. ed., São Paulo, 1982, p. 394-470.

YUH, J., *Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey*, *Autonomous Robots* 8, 7-24 (2000), Kluwer Academic Publishers.

WASSERMAN, K.S. et al., *Dynamic Buoyancy Control of an ROV using a Variable Ballast Tank*, *OCEANS 2003*. Proceedings, Vol. 5, 22-26 Sept. 2003 pp- SP2888 - SP2893.

A Study of a Submergible Vehicle For Use in Hydraulic Inspection of Structures

ABSTRACT

The visual inspection of hydraulic structures is an activity that usually requires trained human beings able to produce opinions about the items inspected. However, due to the diversity conditions, the inherent difficulties on sub aquatic works and the safety of the individuals involved in these inspections, this task becomes a complex management problem. Due to these facts and aiming to provide better conditions of work it was proposed the utilization of remote monitoring systems through different types of cameras and sensors. Motivated by these questions the project was elaborated and the prototype of a sub aquatic inspector vehicle was constructed that attempts mostly to permit the study of an effective and possible solution for the question “eliminate risks and supply better conditions of work”. The projected vehicle consists in a wired remote controlled mobile system that is capable to capture images and transmit them to a distant place through cable which permits the posterior storage and analysis. The vehicle developed to the tests was conceived with the initial objective to permit the basic formation of the knowledge. Therefore, this first prototype was focused on problems relatives to the capacity of floatation and maneuver, internal cooling systems and video monitoring systems. The project of the “Underwater Inspector Vehicle” was named “VSI-1”.

Key Words: hydraulic structures; submergible; inspection.