

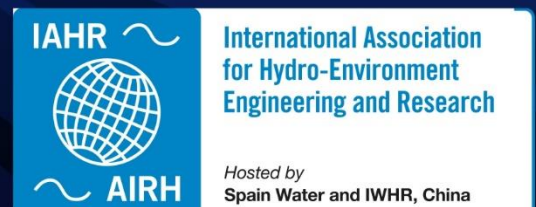
XXX CLH

CONGRESO LATINOAMERICANO
DE HIDRAULICA | BRASIL | 2022

ANALES

- VOLÚMEN 1 -

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL



Organizadores

Dr. Cristiano Poletto - UFRGS (Presidente)
Dr. José Gilberto Dalfré Filho - UNICAMP
Dr. André Luís Sotero Salustiano Martim - UNICAMP

**ANALES DEL
XXX CONGRESO LATINOAMERICANO DE
HIDRÁULICA 2022**

**- VOLÚMEN 1 -
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL**



Madrid – España
2023

Copyright © 2023, by IAHR Publishing.

Derechos Reservados en 2023 por **IAHR Publishing.**

Montaje: Cristiano Poletto

Organización General de la Obra: Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho;
André Luís Sotero Salustiano Martim

Maquetación: Juliane Fagotti; Cícero Manz Fagotti

Relectura General: Elissandro Voigt Beier

Portada: Juliane Fagotti

Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim
(Organizadores)

ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLÚMEN 1 –
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA FUNDAMENTAL / Organizadores:
Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim –
MADRI, España: IAHR Publishing, 2023.

380p.: il.;

ISBN • 978-90-832612-2-5

*ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin
autorización escrita del Editor o de los Organizadores.*

IMPLANTAÇÃO DE DISPOSITIVO DE CAVITAÇÃO EM LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA PARA ESTUDO DE SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Mauricio Dai Prá¹, Marcelo Giulian Marques¹, Eder Daniel Teixeira¹, Luiz Augusto Magalhães Endres¹, Daniela Guzon Sanagiotto¹, Aline Saupe Abreu¹, Pedro Guido Mottes Bassegio¹, Priscila Maria Kipper¹, Edgar Fernando Trierweiller Neto², Alba Valéria Brandão Canellas²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, ² Eletrobrás Furnas, Brasil

mauricio.daipra@ufrgs.br, mmarques@iph.ufrgs.br, eder.teixeira@ufrgs.br, endres@ufrgs.br, dsanagiotto@ufrgs.br, alsaupe@gmail.com, pedroguido33@hotmail.com, priscila_kipper@hotmail.com, edtrier@furnas.com.br, alba@furnas.com.br

RESUMO:

Em virtude da cavitação caracterizar-se como um fenômeno de alta complexidade, a construção de instalações experimentais apresenta-se como uma alternativa para analisar, avaliar e compreender sua manifestação em estruturas de concreto de diversas obras hidráulicas. Neste contexto, realizou-se o projeto e execução de um dispositivo para avaliação do fenômeno da cavitação em estruturas de concreto nas dependências do Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS). O dispositivo de cavitação implantado no LOH teve como base a instalação experimental construída pelo Laboratório de Hidráulica do *United States Bureau of Reclamation* (USBR). Neste trabalho serão apresentadas as estruturas, equipamentos e mecanismos projetados e instalados para obter as condições de ensaio necessárias visando avaliar os efeitos da cavitação em blocos de concreto cujas relações água/cimento variam de 0,35 a 0,70. Além das diferentes relações água/cimento dos blocos de concreto serão avaliadas diferentes concentrações de ar incorporado ao escoamento e os efeitos provocados pela cavitação nos blocos submetidos ao dispositivo implementado.

ABSTRACT:

As cavitation is characterized as a phenomenon of high complexity, the construction of experimental installation presents itself as an alternative to analyze, evaluate and understand its manifestation in concrete structures of several hydraulic works. In this context, the design and execution of a device for evaluating the phenomenon of cavitation in concrete structures was carried out on the premises of the Laboratory of Hydraulic Works of the Federal University of Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS). The cavitation device implanted in the LOH was based on the experimental installation constructed by the Hydraulics Laboratory of the United States Bureau of Reclamation (USBR). In this work, the structures, equipment and mechanisms designed and installed will be presented to obtain the necessary test conditions in order to evaluate the effects of cavitation in concrete blocks whose water/cement ratios vary from 0.35 to 0.70. In addition to the different water/cement ratios of the concrete blocks, different concentrations of air incorporated into the hydraulic flow and the effects caused by cavitation on the blocks subjected to the implemented device will be evaluated.

PALAVRAS-CHAVES: instalação hidráulica experimental, cavitação.

APRESENTAÇÃO

O concreto consiste no material estrutural de maior emprego em diferentes obras de engenharia. Dentre estas podem ser citadas as estruturas hidráulicas de barragens, como, por exemplo, vertedouros e bacias de dissipação. Invariavelmente, nesses tipos de estruturas, o concreto está sujeito a solicitações e esforços hidrodinâmicos significativos, podendo propiciar condições de ocorrência do fenômeno da cavitação.

A cavitação é descrita como a formação de bolhas de vapor e seu posterior colapso dentro de um fluxo de água, a partir do aumento de velocidade do escoamento e da queda brusca de pressão. Estas bolhas de vapor ao serem transportadas para regiões de elevadas pressões, tendem a implodir próximas à superfície da estrutura, ocasionando a deterioração local do concreto em questão (PINTO et al, 1988; FALVEY, 1990).

Embora haja inúmeros trabalhos na área, segundo Kormann (2002) a cavitação se trata de um dos fenômenos mais complexos de serem estudados na hidráulica. Devido suas particularidades e o elevado número de parâmetros relacionados com o fenômeno, seu estudo em campo se torna inviável em condições naturais de ocorrência. Assim, a utilização de modelos reduzidos e instalações experimentais implementadas em laboratório são amplamente utilizadas por diversos autores para a avaliação dos danos causados nas estruturas hidráulicas (de forma direta ou indireta).

Este trabalho aborda a utilização de dispositivo voltado à formação de cavitação implementado em condições de laboratório. O dispositivo de cavitação a ser apresentado foi implementado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Serão apresentados os principais detalhes envolvendo os componentes do sistema, o circuito hidráulico e o sistema de ar comprimido, além das condições hidráulicas de operação que propiciam a geração do fenômeno da cavitação.

REFERENCIAL TEÓRICO

Diversos autores realizaram estudos relacionados indiretamente à cavitação a partir da utilização de modelos reduzidos, nos quais são verificados os parâmetros do escoamento e seus efeitos, transferindo-os, posteriormente, para escala de protótipo. Outros autores utilizam dispositivos de cavitação que avaliam em condições reais a influência da cavitação em laboratório, dando destaque aos estudos realizados por Peterka (1953).

Peterka (1953) fez uso de um dispositivo de cavitação do tipo Venturi. O dispositivo usado pelo autor foi proposto pelo laboratório de hidráulica do *United States Bureau of Reclamation* (USBR). No dispositivo projetado pelo USBR, a formação e posterior implosão das bolhas de vapor são propiciadas a partir do estrangulamento da seção hidráulica, fazendo com que o escoamento passe por uma seção contraída de 6,32 mm de altura e 305 mm de largura. Nestas condições ocorrem a queda brusca das pressões até a pressão de vaporização do líquido no local e o aumento significativo da velocidade do escoamento.

Nos ensaios realizados pelo autor, as velocidades médias do escoamento variaram entre 28 e 30 m/s. A vazão dos ensaios utilizada foi de 60 l/s, onde foram observadas as pressões médias de 41,48 e 11,59 m.c.a., respectivamente, a montante e jusante da seção contraída. Na Figura 1 pode-se visualizar a representação esquemática da instalação experimental utilizada por Peterka (1953).

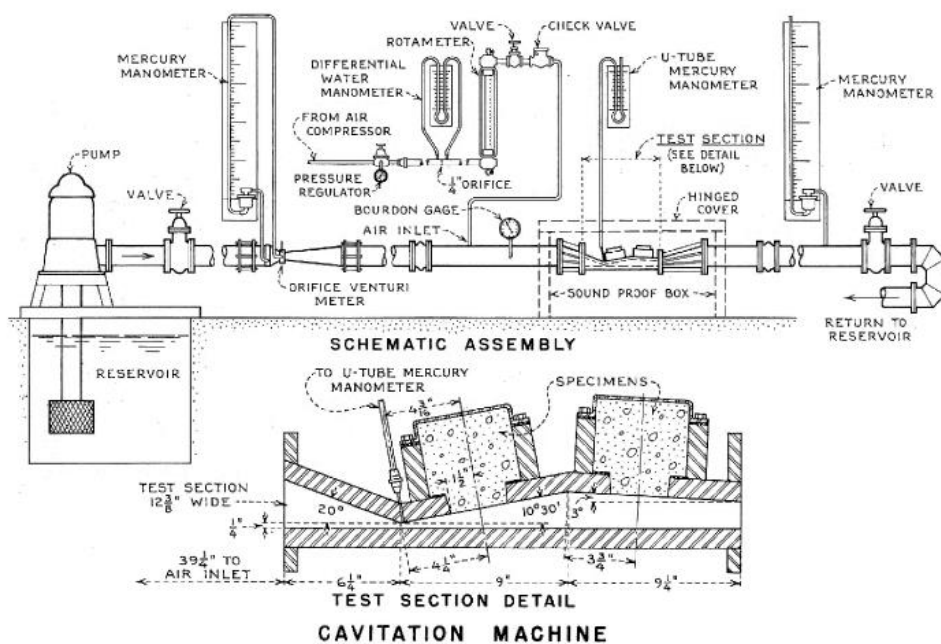


Figura 1.- Dispositivo de Cavitação. Fonte: Peterka (1953).

PROJETO DO DISPOSITIVO DE CAVITAÇÃO

O projeto do dispositivo de cavitação foi realizado em 4 principais etapas, tendo como princípio o dispositivo utilizado por Peterka (1953). As etapas do projeto do dispositivo mencionadas são as seguintes:

- A) Adaptação do circuito hidráulico existente no LOH/UFRGS;
- B) Dispositivo de cavitação;
- C) Sistema de ar comprimido;
- D) Estruturas adicionais.

As etapas empregadas na realização do projeto serão apresentadas e discutidas de forma individual, visando melhor detalhar as características, objetivos, princípios de funcionamento, soluções técnicas e demais características presentes. Cabe salientar que, este projeto tem por objetivo final avaliar a interação entre o fenômeno da cavitação e diferentes composições de concreto considerando distintas concentrações de ar no escoamento.

A) Adaptação do circuito hidráulico existente no LOH/UFRGS

A principal finalidade do circuito hidráulico consiste em conduzir e fornecer água ao dispositivo de cavitação, no intuito de atender as condições operativas de vazão e pressão previamente estabelecidas visando a realização de ensaios laboratoriais. Para melhor detalhar o tópico adaptação do circuito hidráulico existente no LOH/UFRGS, optou-se por dividi-lo em: *Sistema de armazenamento e de retorno*; *Sistema de distribuição* e *Medição de vazão de água e pressão*.

Sistema de armazenamento e de retorno

O sistema de armazenamento de água, utilizado nos ensaios do dispositivo de cavitação é composto de dois reservatórios, sendo denominados de inferior e superior. O reservatório superior caracteriza-se por ser um reservatório apoiado, construído em aço galvanizado, apresentando as

seguintes dimensões: 2m de largura, 2m de comprimento e 2,44m de altura, totalizando um volume de armazenamento de aproximadamente $9,8\text{m}^3$. A finalidade do reservatório superior se estabelece em atenuar elevadas velocidades do escoamento ao sair da tubulação a jusante do dispositivo de cavitação, garantindo, desta forma, o retorno de forma controlada do escoamento ao reservatório inferior, através do canal de retorno, localizado na saída do reservatório.

O reservatório inferior, por sua vez, é do tipo enterrado, com capacidade de armazenamento de 600m^3 , construído em concreto e localizado abaixo da laje que configura o piso do LOH. Este reservatório é responsável pelo armazenamento da água para captação da bomba, sendo este alimentado pelo sistema de captação de água pluvial instalado no telhado do LOH e pelo sistema de retorno existente, após o escoamento passar pelo canal localizado na saída do reservatório superior.

Sistema de distribuição

O sistema de distribuição de água implementado na instalação experimental encontra-se disposto separadamente à rede de distribuição de água existente. Esta nova disposição foi motivada pela necessidade de garantir a estanqueidade do sistema, aliada a garantia de atendimento das elevadas pressões demandadas com o intuito de assegurar as condições de ensaios no dispositivo de cavitação. O sistema de distribuição é composto por tubulações fabricadas em ferro fundido galvanizado unidas por meio de flanges. No recalque a tubulação possui diâmetro nominal de 150mm e o trecho de sucção foi implementado utilizando tubulações de 200mm de diâmetro nominal.

No sistema hidráulico, além das tubulações mencionadas, há presença de válvulas borboletas, registros gavetas, curvas, acessórios e dois sistemas *bypass*. Aliado ao sistema hidráulico, visando fornecer energia ao escoamento, de acordo com as demandas de vazão e pressão requeridas nos ensaios envolvendo o dispositivo de cavitação, instalou-se um conjunto motobomba.

O conjunto motobomba possui bomba hidráulica com capacidade de atender a vazão de 60 l/s e uma pressão exigida de, aproximadamente, 60m.c.a. Acoplado à bomba, o motor elétrico possui 100CV de potência. Instalou-se junto ao conjunto motobomba um inversor de frequência, com finalidade de proporcionar maior flexibilidade na determinação no ponto de operação da bomba, uma vez que as definições das condições de ensaio ocorrem através do ajuste de frequência de operação do motor e do fechamento de válvulas e registros ao longo da tubulação de recalque. A frequência do inversor é de 60Hz, sendo este trifásico com uma tensão operativa de 220V.

As alterações e adequações na rede elétrica existentes no LOH foram realizadas para que os equipamentos eletromecânicos mencionados acima pudessem operar de forma segura e eficiente. Para acionar a operação do conjunto motobomba e do inversor de frequência, instalou-se um painel elétrico de comando adicional aos já existentes no LOH.

Para conectar o reservatório inferior à sucção do novo conjunto motobomba foram refeitas as conexões e peças que compõem as tubulações de sucção ao equipamento de bombeamento. O novo sistema de sucção é composto de uma peça em ferro fundido, semelhante a um “tê”, de conexão especial, tendo seu *layout* adaptado a condição existente à casa de bombas do laboratório. As adaptações promovidas ao sistema de sucção do conjunto motobomba foram realizadas com o intuito de evitar o esvaziamento do reservatório, evitando assim, a realização de novo furo na parede de concreto do reservatório inferior. Deste modo, portanto, foi prevista e adicionada uma derivação a tubulação a partir do ponto de controle de uma saída pré-existente e controlada por um registro já presente no sistema de sucção existente na casa de bombas em questão. A conexão permitiu ainda a redução do diâmetro nominal de 300mm, da tubulação existente, para 200mm (entrada da bomba adicionada ao sistema de bombeamento do LOH).

A tubulação de recalque, após o dispositivo de cavitação, foi conectada diretamente ao reservatório superior do LOH, tornando possível realizar o retorno da água ao reservatório de captação por meio de um canal de restituição pré-existente.

Medição de vazão de água e pressão

No intuito de avaliar e monitorar a vazão de água e pressão durante a realização dos ensaios no dispositivo de cavitação instalou-se um medidor de vazão e manômetros ao longo da tubulação de recalque. O medidor de vazão instalado é do tipo eletromagnético e encontra-se localizado a montante do dispositivo de cavitação. Referente às medições de pressão, foram instalados três manômetros analógicos e dois manômetros digitais. Os manômetros analógicos estão posicionados na saída da bomba, a montante e a jusante do dispositivo de cavitação.

B) Dispositivo de cavitação

Definiram-se as características iniciais do dispositivo de cavitação através das informações apresentadas no artigo “*Design and Construction of New Cavitation Machine*”, de 1963, elaborado pelo USBR. Ao longo do projeto conceitual e básico, foram realizadas reuniões por videoconferências com a equipe de engenheiros do *Laboratory of Hydraulic* do USBR. As reuniões realizadas aliadas ao acesso às imagens do dispositivo de cavitação, incluindo de seu interior, contribuíram para promover alterações no dispositivo final a ser implementado.

De forma geral, as dimensões finais do dispositivo de cavitação foram mantidas idênticas ao previsto em projeto. As alterações realizadas foram em relação ao material de construção e ao sistema de fixação dos blocos de concreto. Previu-se a fabricação do dispositivo em aço carbono para a peça central e em ferro fundido galvanizado para as transições, entretanto, todas as peças foram construídas em aço inoxidável, visto que é o material mais indicado para tal aplicação. Outra alteração ocorreu no dispositivo de fixação do corpo de prova, sendo simplificado de modo a atender as dimensões e requisitos previstos em projeto e facilitar o posicionamento dos blocos de concreto durante os ensaios.

C) Sistema de ar comprimido

O sistema de ar comprimido é constituído por estruturas cujas funcionalidades são: proporcionar o ingresso de ar comprimido na tubulação hidráulica, armazenamento, distribuição e medição de pressão e vazão de ar incorporado ao escoamento de água.

O ingresso de ar comprimido na tubulação de recalque de água fica a cargo de um compressor de ar, do tipo parafuso, compressão de 7,5bar e potência de 15hp. O compressor mencionado é dotado de quatro módulos responsáveis pelo controle de velocidade, tratamento do ar por meio de filtros e secador, além de possuir um módulo de controle com painel de microprocessamento em seu interior.

O armazenamento de ar ocorre através de um reservatório cilíndrico e vertical, com capacidade de reservação de 425 litros. A pressão máxima operativa do ar comprimido do cilindro é de 12bar, conforme o fabricante. A distribuição de ar é conduzida por um sistema de tubulações de PPR (Polipropileno Copolímero Random) de diâmetro nominal de 32mm.

A medição de vazão de ar é realizada através de um quadro de medição e controle, valendo-se de dois tipos de instrumentos: rotâmetros e medidor digital. A aquisição dos dados de pressão é efetuada através da leitura de manômetros analógicos, instalados no quadro de medição e controle construído. Na Figura 2, encontra-se disposto o quadro de medição e controle elaborado próximo ao dispositivo de cavitação. As setas em vermelho fazem referência ao sentido do escoamento de ar no quadro.

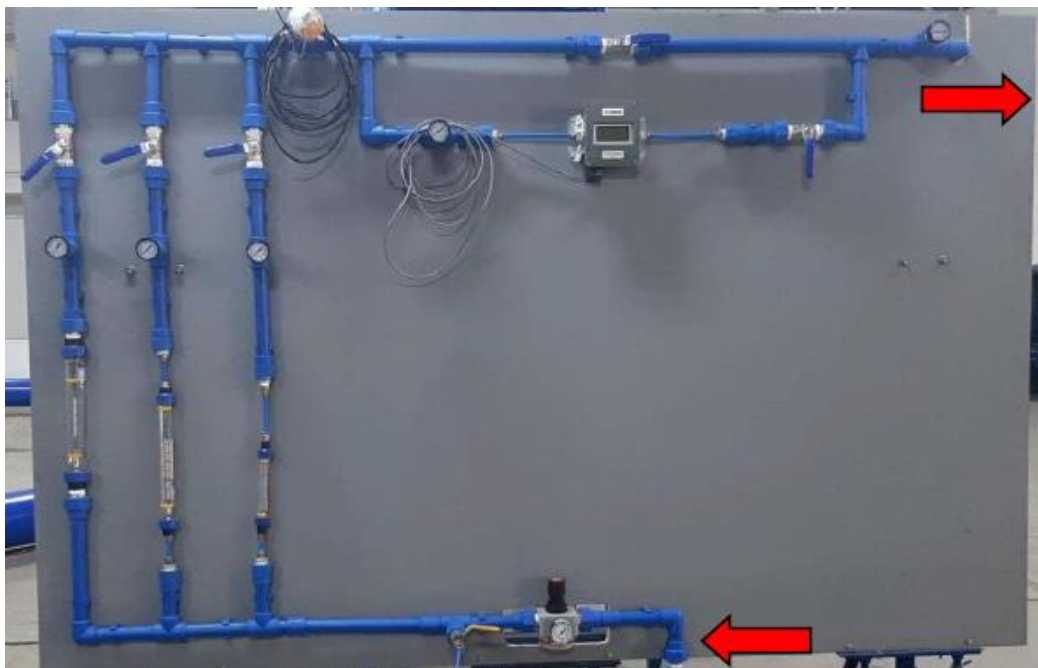


Figura 2.-Quadro de medição e controle do fluxo de ar.

D) Estruturas adicionais

De maneira geral, as estruturas adicionais possuem diferentes objetivos, como fornecer segurança, estabilidade e flexibilidade para a realização dos ensaios laboratoriais utilizando o dispositivo de cavitação. Fazem parte do conjunto de estruturas adicionais: os apoios ao longo da tubulação, sistemas *bypass* e os dispositivos para fixação dos blocos de concreto.

Os apoios fabricados em ferro fundido, tendo perfis de formato “U” e “I” foram instalados visando garantir a sustentação da tubulação de recalque e do dispositivo de cavitação. A colocação destes acessórios, já estava prevista, entretanto, alguns aspectos de disposição e quantidades necessitaram ser revistos e modificados ao longo da implementação do projeto executivo.

Os dois sistemas *bypass* possuem tubulações secundárias que apresentam diâmetros nominais de 100mm, e, encontram-se inseridos a montante e a jusante do dispositivo de cavitação. Desta forma, promoveu-se maior flexibilidade operacional ao sistema hidráulico, garantindo as condições de vazão e pressão para a realização dos ensaios.

Outro componente inserido no grupo das estruturas adicionais são os dispositivos de fixação dos blocos de concreto. Estas estruturas foram alteradas em relação ao projeto original do USBR. Substituiu-se, portanto, um dispositivo de fixação por uma estrutura de borracha espessa visando proporcionar estanqueidade na realização dos ensaios laboratoriais. Ressalta-se que todos os componentes de fixação foram mantidos os mesmos indicados no projeto original, exceto o acessório mencionado.

IMPLANTAÇÃO DO DISPOSITIVO DE CAVITAÇÃO

Uma vez apresentadas e definidas as estruturas que compõem o sistema para operação do dispositivo de cavitação, serão apresentadas a seguir as instalações visando complementar as informações e características mencionadas anteriormente.

O novo sistema de bombeamento implementado com motor elétrico de 100CV e bomba hidráulica com capacidade de atender a vazão de 60l/s no LOH, recebeu uma conexão de ligação, conforme mencionada anteriormente, que possibilitou interligar o reservatório à bomba sem a necessidade de esvaziamento do reservatório inferior. Nas Figuras 3a e 3b estão ilustradas a conexão na sucção e o conjunto motobomba devidamente instalados.



Figura 3.- a) Conexão na sucção da bomba hidráulica; b) Novo conjunto motobomba instalado.

As instalações referentes ao sistema de ar comprimido instalado no LOH estão apresentadas na Figura 4. Na Figura 4a encontram-se o compressor de ar e o reservatório vertical responsáveis pela compressão e armazenamento do ar visando a inserção do mesmo ao sistema hidráulico. O quadro de medição de ar, bem como o sistema de aquisição de dados podem ser visualizados na Figura 4b.



Figura 4.- a) Compressor e reservatório de ar comprimido; b) Quadro de medição de ar e sistema de aquisição de dados.

O sistema *as built* do dispositivo de cavitação, antes de ser construída a caixa acústica que o envolve atualmente, encontra-se disposto na Figura 5.



Figura 5.- Dispositivo de cavitação instalado no LOH/UFRGS, a seta vermelha indica o sentido do escoamento.

Com o intuito de atenuar os ruídos provenientes do fenômeno da cavitação no dispositivo instalado, tornou-se necessária a construção de uma caixa acústica. O núcleo das paredes da caixa foi revestido por lã de rocha e a superfície das paredes instalada uma manta acústica. Na Figura 6 é apresentado o sistema que proporciona maior conforto acústico aos pesquisadores do LOH durante a realização dos ensaios no dispositivo de cavitação.



a)



b)

Figura 6.- a) e b) Dispositivo de cavitação instalado no LOH/UFRGS.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tem o objetivo de apresentar à comunidade técnico-científica a implantação de um dispositivo em laboratório, capaz de provocar a formação do fenômeno de cavitação de maneira controlada e próximo das condições reais de sua ocorrência em protótipo. Com isso, uma extensa gama de possibilidades de estudos experimentais poderá ser desenvolvida.

Especificamente no que tange ao projeto atual, e dando sequência aos trabalhos, serão moldados corpos de provas de concretos confeccionados a partir de distintas composições (notadamente fatores água/cimento) variáveis entre 0,35 e 0,70. Espera-se, com isso, identificar o potencial erosivo da cavitação atuando sobre diferentes tipos de concretos e ainda sujeito à diferentes concentrações de ar no escoamento, as quais serão impostas a partir de valores entre 0% e 8%.

AGRADECIMENTOS

À Foz do Chapecó Energia e Eletrobrás-Furnas pelo apoio no desenvolvimento do projeto de P&D Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas, implementado no âmbito do programa de P&D ANEEL. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) Código de Financiamento 001 e ao CNPq pela concessão de bolsas para membros da equipe do projeto. Destinamos os agradecimentos também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Prof.Água, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico-científico aportado até o momento.

REFERÊNCIAS

- Falvey, H. T.** “Cavitation in chutes and spillways”. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1990.
- Kormann, A. C. M.** “Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens”. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná. 196p.
- Peterka, A. J.** “The effect of entrained air on cavitation pitting”. In: Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention. ASCE, 1953. p. 507-518.
- Pinto, L. C. S.; Vasconcellos, J. E.; Seyssel, R. L.** “Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado”. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 13., Havana, 1988. Memórias... Havana: IAHR, 1988. v. 2, p. 182-194