

## DIMENSIONAMENTO E ADEQUAÇÃO DE UMA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO

*Matheus Kunrath Oliveira<sup>1</sup>; Aline Saupe Abreu<sup>2</sup>; Pedro Guido Mottes Bassegio<sup>3</sup>; Mauricio Dai Prá<sup>4</sup>; Eder Daniel Teixeira<sup>5</sup>; Edgar Fernando Trierweiler Neto<sup>6</sup>*

**RESUMO** – O concreto utilizado em estruturas hidráulicas pode ser exposto a condições propícias para a cavitação. O presente artigo visa apresentar o dimensionamento do circuito hidráulico para a implementação de um dispositivo de cavitação em concreto no LOH/UFRGS. O sistema hidráulico dimensionado baseou-se nas premissas definidas por Peterka (1953), adequando às condições hidráulicas e elétricas do LOH. Dois reservatórios, um conjunto motobomba, dois sistemas *bypass*, tubulações de distribuição e outros acessórios compuseram o circuito hidráulico proposto. O dimensionamento envolveu o cálculo das perdas de carga do sistema, determinação da potência requerida e escolha do sistema motobomba. As tubulações fabricadas em ferro fundido tiveram como diâmetros adotados: 200 mm no trecho de sucção, 150 mm no trecho de recalque e 100 mm nos sistemas *bypass*. Acoplada a um motor elétrico de 100 CV, a bomba escolhida foi a 125-100-200 (KSB), com rotor de 184 mm, operando em 3177 rpm. Ensaios preliminares no dispositivo de cavitação mostraram resultados satisfatórios para o dimensionamento implementado.

**ABSTRACT**– The concrete used in hydraulic structures can be subject to conditions conducive to the occurrence of cavitation. The present study consists in the design of a hydraulic circuit that will be used to feed a concrete cavitation device at LOH/UFRGS. The hydraulic system herewith designed was based on the premises found by Peterka (1953). Adaptations were made according to the hydraulic and electrical conditions at LOH. The proposed hydraulic circuit consisted of two reservoirs, a motor pump set, two bypass systems, distribution pipes and other accessories. The design involved the calculation of the system head losses, the determination of the required power and the choice of the motor pump system. The pipes, made of cast iron, had the following diameters: 200mm at the suction section, 150mm at the discharge section and 100mm at the bypass systems. Coupled to a 100hp electric motor, the pump chosen was the 125-100-200 (KSB), with a 184mm rotor, operating at 3177rpm. Preliminary tests on the cavitation device showed satisfactory results for the implemented design.

**Palavras-Chave** – Hidráulica; Dimensionamento; Cavitação.

---

1) Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: matheuskunrath92@gmail.com

2) Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: alsaupe@gmail.com

3) Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: pedroguido33@hotmail.com

4) Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: mauricio.daipra@ufrgs.br

5) Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: eder.teixeira@ufrgs.br

6) Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica, Eletrobras FURNAS, Estrada do Pau da Fome 819, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: edtrier@furnas.com.br

## INTRODUÇÃO

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

A cavitação é descrita como a formação e posterior colapso de bolhas de vapor dentro de um fluxo, 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 et al. (2001), a cavitação se trata de um dos fenômenos mais complexos de serem estudados na hidráulica. Devido às particularidades e do elevado número de parâmetros relacionados com a ocorrência do fenômeno, torna-se economicamente inviável seu estudo em campo, em condições naturais de ocorrência. Assim, a utilização de modelos reduzidos e dispositivos implementados em condições de laboratório são amplamente utilizados por diversos autores para a avaliação dos danos causados nas estruturas hidráulicas e para o completo entendimento do fenômeno da cavitação.

Desta forma, o presente artigo visa apresentar o dimensionamento de um circuito hidráulico para a implementação de um dispositivo de cavitação no Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS). Este trabalho faz parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado: “Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas”, financiado por Foz do Chapecó Energia e Furnas Centrais Elétricas, com participação do Laboratório de Hidráulica e do Laboratório de Concreto do United States Bureau of Reclamation (USBR), da UFRGS através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) D e dos Laboratórios de Concreto e de Hidráulica de FURNAS

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

Peterka (1953) fez uso de uma máquina de cavitação do tipo Venturi. O dispositivo usado pelo autor foi proposto pelo Laboratório de Hidráulica e do Laboratório de Concreto do 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 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 de ensaio 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).

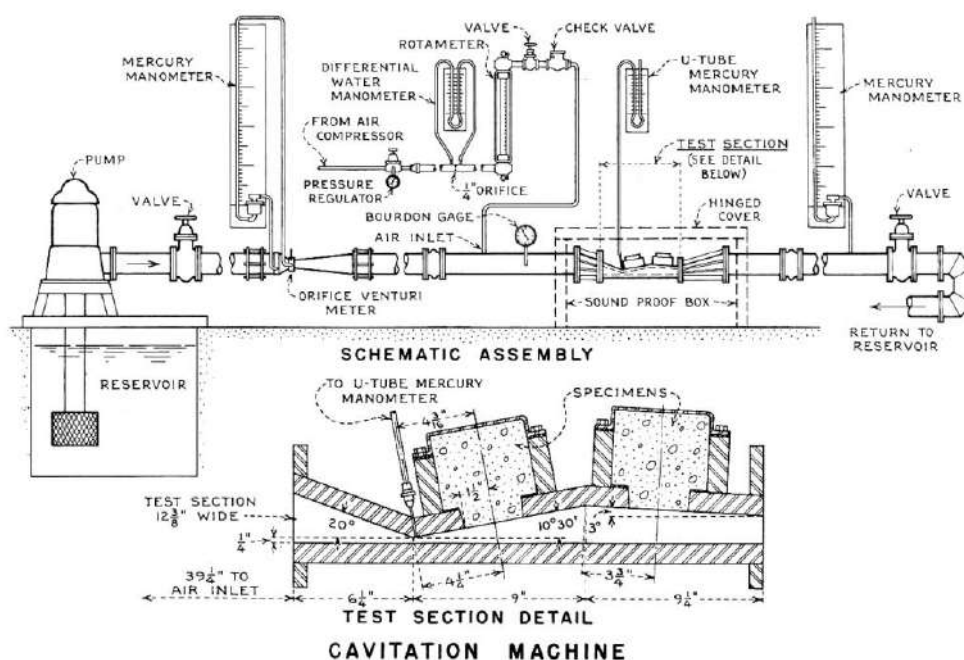


Figura 1 – Instalação experimental utilizada no estudo de Peterka (1953). Fonte: Peterka (1953)

Para o dimensionamento e instalação de sistemas de recalque, como o utilizado para alimentação da máquina de cavitação, deve-se considerar alguns parâmetros hidráulicos fundamentais. Dentre os parâmetros envolvidos no processo, Batista e Lara (2002) destacam a altura manométrica, a potência e o rendimento do conjunto elevatório.

Segundo os dois autores supracitados, a altura manométrica pode ser definida como a diferença entre a energia na saída de uma bomba hidráulica e a energia na entrada da mesma, ou seja, a energia, de fato, fornecida pela bomba ao sistema. A equação de Bernoulli aplicada à um

sistema de recalque, contendo uma bomba, assume a forma expressa na Equação 1, considerando a altura manométrica ( $H_m$ ). Caso o sistema realize a condução da água entre dois reservatórios, estando sujeitos à pressão atmosférica e velocidades, aproximadamente, nulas na superfície, a altura manométrica será descrita, apenas, como a soma entre o desnível geométrico entre os reservatórios e as perdas de carga no sistema de condutos que os conectam (Equação 2)

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} + H_m = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2} \quad (1)$$

$$H_m = Z_2 - Z_1 + \Delta h_{1-2} \quad (2)$$

A seguir, na Figura 2, podem ser observados os parâmetros mencionados anteriormente, contudo, divididos entre o trecho de sucção e o trecho de recalque. Desta forma, parâmetros com o índice  $s$  relacionam-se à sucção e com o índice  $r$  relacionam-se ao recalque.

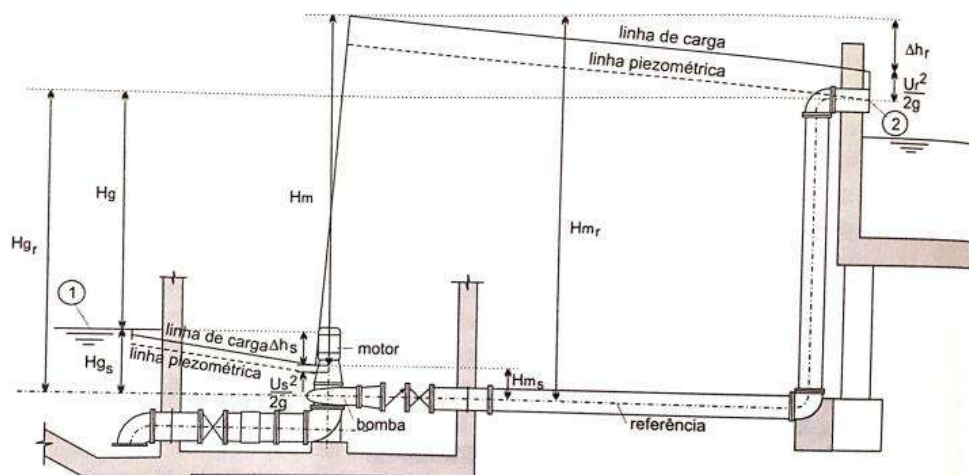


Figura 2: Parâmetros hidráulicos de uma estação elevatória. Fonte: HELLER e PÁDUA (2006).

Onde:

$H_{gr}$  a altura geométrica de recalque;  $H_{gs}$  a altura geométrica de sucção;  $H_g$  a altura geométrica total;  $H_{mr}$  a altura manométrica de recalque;  $H_{ms}$  a altura manométrica de sucção;  $H_m$  a altura manométrica de total.

Quando se utiliza uma bomba hidráulica em um sistema, necessariamente deve-se considerar a determinação de potências e rendimentos. A potência requerida pelo sistema consiste em dos fatores determinantes na escolha do motor elétrico que alimentará o conjunto. Entretanto, a transmissão de energia entre o motor elétrico e o escoamento, passando pela bomba hidráulica, envolve perdas de potência. Neste âmbito, insere-se o coeficiente de rendimento, o qual pode ser definido como a razão entre a potência útil (realmente aproveitada pelo escoamento) e a potência

motriz (potência fornecida pelo motor à bomba). A equação para o cálculo da potência, considerando o rendimento, é apresentada a seguir, como Equação 3 (MACINTYRE, 1997).

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (3)$$

Onde:

P é a potência mecânica no eixo da bomba (W);  $\gamma$  é o peso específico da água (N/m<sup>3</sup>); Q é a vazão de água do sistema hidráulico (m<sup>3</sup>/s);  $\eta$  é o rendimento da bomba adotada (adimensional).

## MATERIAIS E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

A instalação hidráulica experimental implementada no LOH/UFRGS foi baseada nas características do dispositivo de cavitação proposto pelo USBR. Entretanto, para viabilizar esta instalação, foi necessário adequá-la às particularidades dos sistemas hidráulico e elétrico existentes no LOH.

Os principais parâmetros de controle para o dimensionamento do sistema hidráulico implementado no LOH/UFRGS, foram a vazão e as pressões a montante e a jusante da seção contraída. A partir destes parâmetros, o dimensionamento foi realizado a fim de permitir o funcionamento do dispositivo de cavitação.

O circuito hidráulico proposto possui como componentes dois reservatórios (montante e jusante) com funções distintas. O reservatório de montante, de maior capacidade volumétrica, tem por finalidade o abastecimento de água para o circuito, localizando-se sob a laje do LOH. Em contrapartida, o reservatório de jusante, de menor capacidade, possui como principal função a dissipação de energia do fluxo de água proveniente do dispositivo de cavitação, além de possibilitar o retorno da água ao reservatório de montante, sem que haja qualquer tipo de dano aos canais de retorno utilizados.

O sistema de distribuição de água e o conjunto motobomba foram idealizados de maneira independente às instalações já existentes no Laboratório, visando possibilitar a obtenção das condições operativas (sendo estas as mesmas predefinidas pelo sistema do USBR, mencionadas anteriormente). Por esta razão, optou-se, também, pela inserção de dois sistemas *bypass* ao longo do sistema de distribuição. Além disso, a instalação de singularidades como válvulas borboleta, registros gaveta, curvas nos condutos e outros acessórios fez-se necessária. A distribuição do sistema hidráulico proposto, em planta baixa, bem como o detalhamento de algumas estruturas, pode ser observada na Figura 3. Devido à sua localização nas instalações do laboratório, o reservatório de montante acaba não sendo exibido na esquematização apresentada.



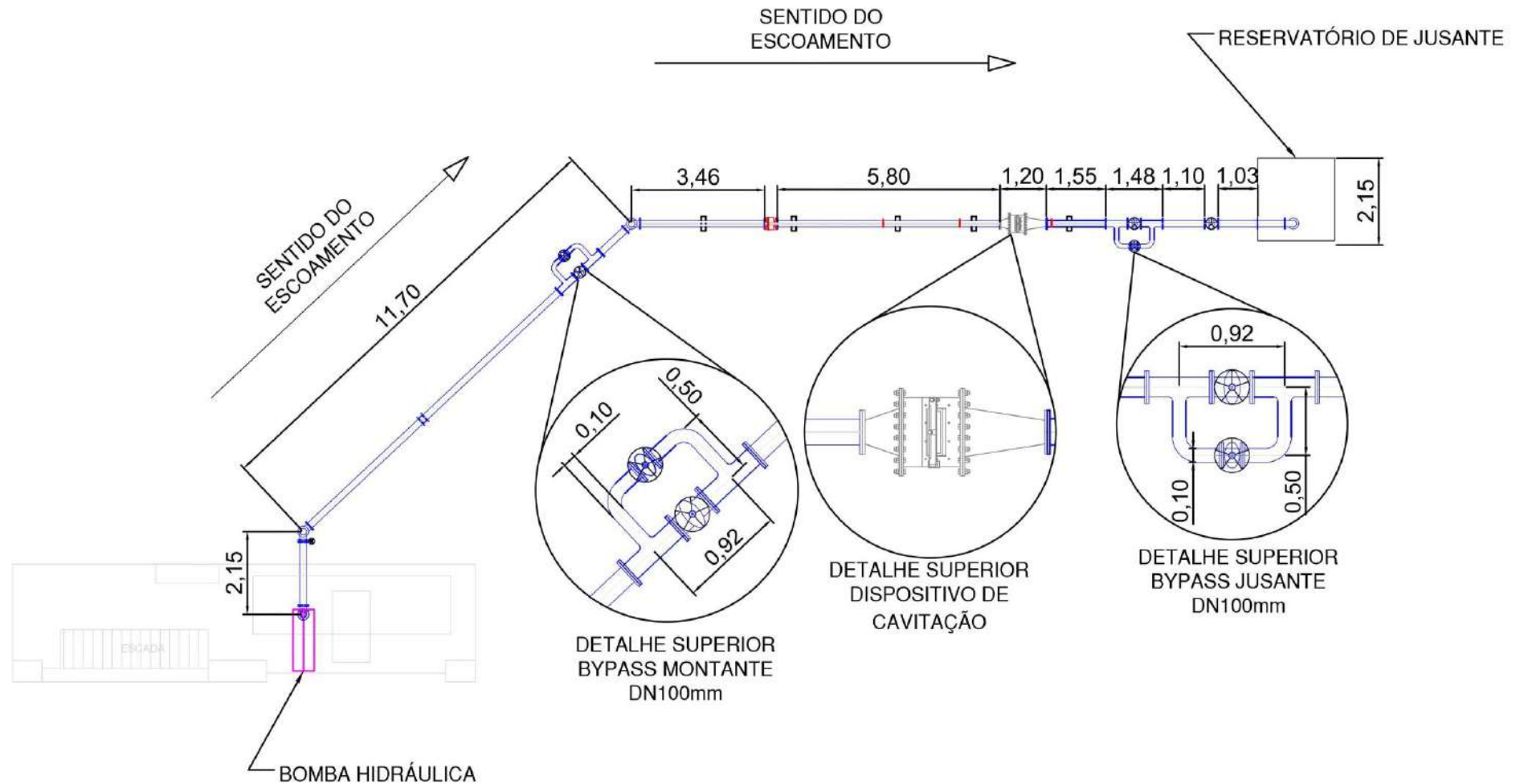


Figura 3 – Esquematização em planta baixa do sistema hidráulico implementado no LOH (medidas em metros). Fonte: Autores.

O dimensionamento do sistema de distribuição teve como premissas a localização desejada para implementação do dispositivo de cavitação dentro da área do LOH/UFRGS e a adequação do projeto às condições hidráulica e econômicas previstas pelo P&D. Os diâmetros das tubulações foram determinados visando atender normativas de limites de velocidade e a redução dos custos com materiais. Definidas as extensões, os diâmetros e tipo de material dos condutos, a altura manométrica do ponto de operação do sistema hidráulico foi determinada a partir da Equação 4.

$$H = P_m + h_G + h_L + h_S \quad (4)$$

Onde:

H é a altura manométrica do ponto de operação do sistema (m.c.a);  $P_m$  é a carga de pressão que deve ser garantida a montante do dispositivo de cavitação, sendo esta, de 42 (m.c.a);  $h_G$  é o desnível geométrico entre o nível do reservatório inferior e o dispositivo de cavitação (m);  $h_L$  é a perda de carga linear do sistema (m);  $h_S$  é a perda de carga singular do sistema (m).

A escolha da bomba hidráulica responsável por realizar o recalque da água até o dispositivo de cavitação envolveu o uso do ponto de operação do sistema hidráulico já determinado. O ponto de operação do sistema proposto consiste na combinação entre a vazão predeterminada de 60 l/s e a altura manométrica calculada a partir da Equação 1. O LOH faz uso de um inversor de frequência de 60 Hz, da marca Weg, o qual teve seu uso considerado na escolha da bomba hidráulica. A utilização de um inversor de frequência possibilita que a bomba hidráulica opere em rotações distintas da nominal e, conseqüentemente, translate a respectiva curva característica.

Para a escolha do motor, foi necessário atender a potência mecânica calculada no eixo da bomba, obtida através da aplicação da Equação 3. Posteriormente, o motor adotado deve apresentar potência elétrica superior à potência mecânica.

## DEFINIÇÕES E RESULTADOS

O dimensionamento apresentado resultou na adoção de tubulações fabricadas em ferro fundido para o sistema hidráulico do dispositivo para ensaios de cavitação em concreto. No trecho de sucção, o diâmetro nominal escolhido foi de 200 mm, enquanto que no trecho de recalque esta dimensão possui 150 mm. A opção pelo ferro fundido justifica-se pela sua ampla utilização neste tipo de sistema hidráulico, bem como a facilidade de acesso e montagem. Para os sistemas *bypass*, o diâmetro nominal usado foi de 100 mm.

O conjunto motobomba foi definido com a finalidade de atender a altura manométrica solicitada a montante do dispositivo de cavitação. Resultando na adoção de uma bomba centrífuga, modelo 125-100-200, com rotor de 184 mm e rotação nominal de 3570 rpm, da marca KSB. À esta bomba se escolheu acoplar um motor elétrico de 100 CV de potência, atendendo às necessidades energéticas requeridas.

Para o atendimento do ponto de operação requerido pelo circuito hidráulico dimensionado e do dispositivo de cavitação necessitou-se do uso do inversor de frequência. Neste caso, para atender as premissas previamente estabelecidas, deve-se operar a bomba em rotação de, aproximadamente, 3177 rpm, resultando na curva característica da Figura 4.

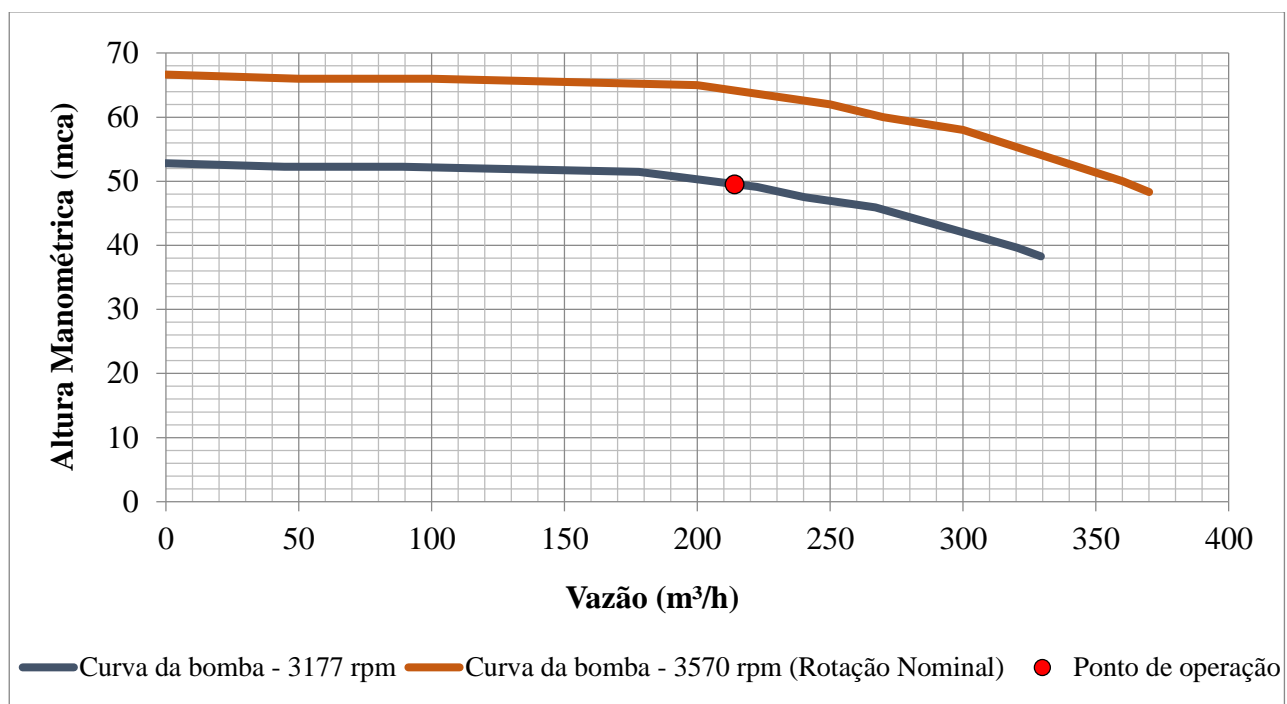


Figura 4 – Curva característica da bomba hidráulica para rotação aproximada de 3177 rpm, rotação nominal de 3570 rpm e ponto de operação requerido na entrada do dispositivo de cavitação. Fonte: Autores.

Após a implementação do circuito hidráulico e do dispositivo de cavitação no LOH/UFRGS, a curva de operação pôde ser validada de forma prática, a partir da execução de ensaios preliminares. Nestes ensaios, as premissas de dimensionamento do sistema hidráulico foram plenamente satisfeitas, atendendo, para uma vazão de, aproximadamente, 60 l/s, as pressões de 41,48 (montante) e 11,59 m.c.a (jusante).

A seguir, na Figura 5, podem ser observadas algumas imagens do sistema hidráulico instalado e de dois de seus componentes.



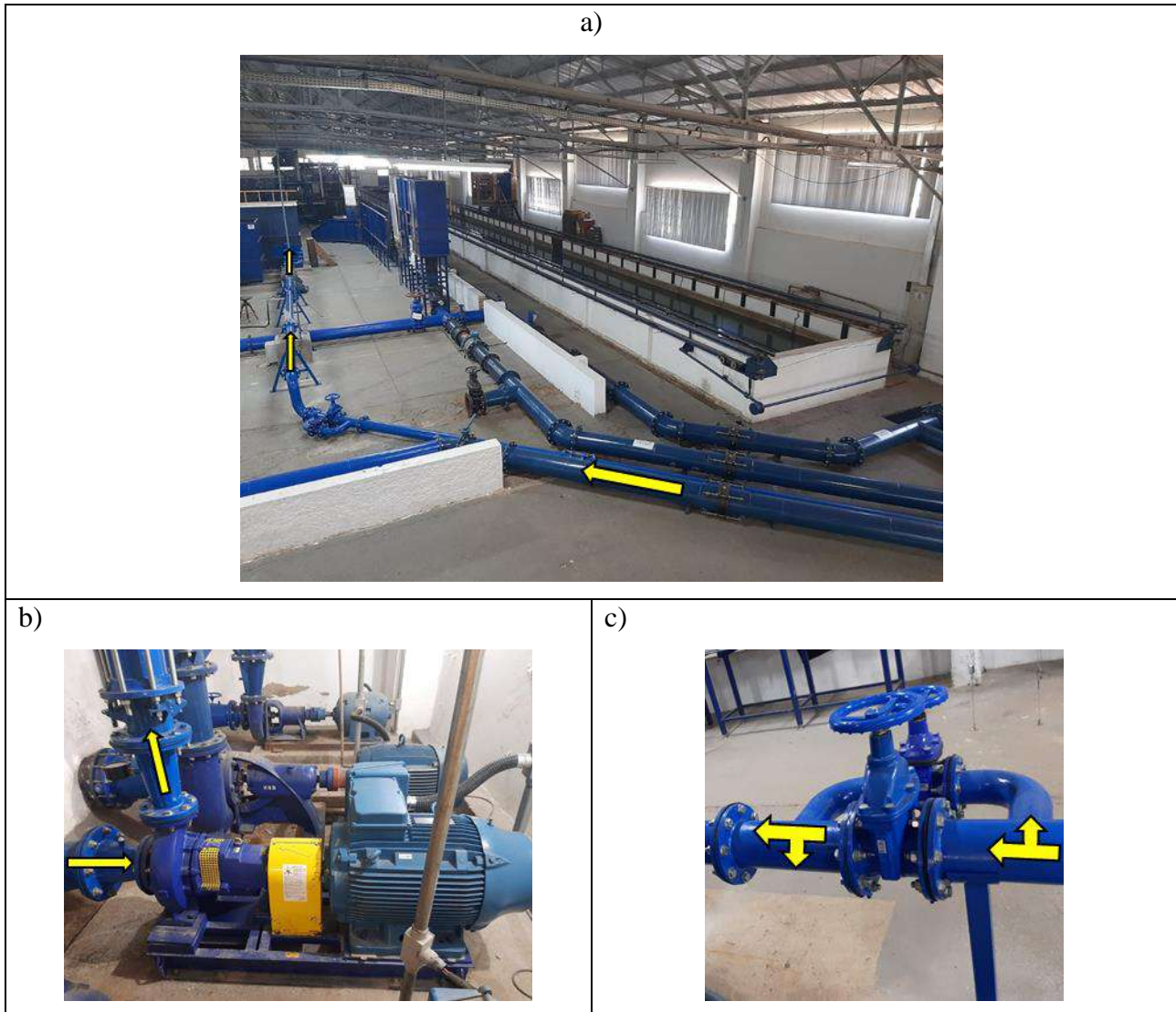


Figura 5 – Fotos das instalações dimensionadas (com representação do sentido do fluxo). a) Vista superior de parte do sistema; b) Bomba hidráulica instalada; c) Sistema *bypass* de jusante. Fonte: Autores

## CONCLUSÕES

A partir da realização dos ensaios preliminares no dispositivo de cavitação foi possível verificar o bom dimensionamento realizado.

Com a implementação do sistema apresentado, assegura-se o prosseguimento dos estudos referentes à cavitação em diferentes características de corpos de prova de concretos empregados em estruturas hidráulicas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Foz do Chapecó Energia, à Furnas Centrais Elétricas, ao LOH/UFRGS e todos os colegas que contribuíram para a concretização deste artigo.

## REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M; LARA M. “*Fundamentos da Engenharia Hidráulica*”. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 440 p.
- FALVEY, H. T. (1990). “*Cavitation in chutes and spillways*”. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- HELLER, L., PADUA, V. L. “*Abastecimento de Água para Consumo Humano*”. Belo Horizonte, UFMG. 2006.
- KORMANN, A. C. et al. (2001). “*Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – Mecanismo e recuperação*”. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza - CE. 11p.
- MACINTYRE, A. J. “*Bombas e Instalações de Bombeamento*”. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997.
- PETERKA, A. J. (1953). “*The effect of entrained air on cavitation pitting*”. In Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention (pp. 507-518). ASCE.
- PINTO, L. C. S., VASCONCELLOS, J. E., SEYSSEL, R. L. (1988). “*Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado*”. In CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA (Vol. 13, pp. 182-194).