

ANALISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DA CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS RADIAIS.

Vinicius Dilinskir Pereira (IC) e Antônio Gonçalves de Mello Junior (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

Resumo

A cavitação é um dos principais fenômenos que ocorre nas máquinas de fluxo quando submetidas em certas condições de funcionamento. As bombas centrífugas, por causarem um grande diferencial de pressão, entre a sucção e o recalque, sofrem muito com a cavitação, principalmente se trabalharem em condições para as quais não foram projetadas. O fenômeno de cavitação pode chegar a tal ponto que causa um efeito destrutivo no rotor da bomba, chegando a inutilizá-lo. Para a cavitação ser evitada em uma bomba, deve-se ter em mãos a curva característica, além da curva do $NPSH_{requerido}$ e a curva do $NPSH_{3\%}$. Com essas curvas da bomba, pode-se fazer o correto dimensionamento da tubulação e da fundação onde a bomba será instalada, diminuindo assim, a probabilidade de ocorrência de cavitação. Neste trabalho serão realizados testes de bancada com a bomba centrífuga disponível no laboratório de hidráulica do Mackenzie para obter as curvas características da bomba. Será adotada a metodologia proposta pelo fabricante da bancada de teste, com a finalidade de tornar o experimento mais assertivo possível. Com as curvas características realizadas, as mesmas serão comparadas com as curvas da literatura e com a curva obtida por meio de uma simulação CFD, para validar o experimento. Como resultado, espera-se chegar em uma curva mais perto possível da teórica, mas por ser um experimento de bancada, é aceitável um pequeno desvio.

Palavras chaves: Cavitação; Bombas; Centrífugas.

Abstract

Cavitation is one of the villains of all flow machines that work submerged in water. The radial centrifugal pumps, causes a large differential pressure, between the suction and discharge, suffer greatly from cavitation, especially if they work in conditions for which they were not designed. The centrifugal pump suffers a lot from cavitation, it causes a destructive effect on its impeller, reaching its destruction. To be avoided cavitation in a pump, one has to have at hand the pump's curves as the curve of $NPSH_r$ and $NPSH_{3\%}$. With the pump characteristics curves, can make correct dimensioning of the foundation and the pipe and where the pump is installed, thus reducing the likelihood of cavitation. In this paper, it will be performed bench tests with the centrifugal pump available in Mackenzie's hydraulic laboratory, to get the curves pump characteristics. It will be adopted throughout the methodology proposed by the manufacturer of the test bench, for the experiment can be more assertive. With the

characteristic curves performed, the tables are compared with literature curves and the curve obtained by a CFD simulation to validate the experiment. As a result, it is expected to arrive at a close as possible to the theoretical curve but to be a benchtop experiment, a small deviation is acceptable.

Keywords: Cavitation, Pumps, Centrifugal

INTRODUÇÃO

Cavitação é um fenômeno de ocorrência limitada a líquidos, com consequência danosa para o escoamento e para as regiões sólidas onde a mesma ocorre.

“Cavitação vem do latim *cavus* – cavidade – e significa formação de bolhas de vapor em um líquido.” (COELHO, W., 2006).

A cavitação é a formação de bolhas de vapor, onde a dinâmica de escoamento leva a pressão estática do fluido cair a valores abaixo da pressão de vapor. Normalmente, a pressão do fluido cai abaixo da pressão de vapor logo após a entrada do rotor, fazendo com que essa região tenha a maior criação de bolhas de vapor.

Essas bolhas de vapor serão conduzidas pelo fluxo líquido, até atingir regiões de pressão elevada, onde se processa seu colapso, com a condensação.

Esse colapso da bolha de vapor submete à superfície metálica, com quais se chocam, a atuação de forças complexas, oriunda da energia liberada pelo colapso.

Figura 1 – Colapso de bolha em três situações características

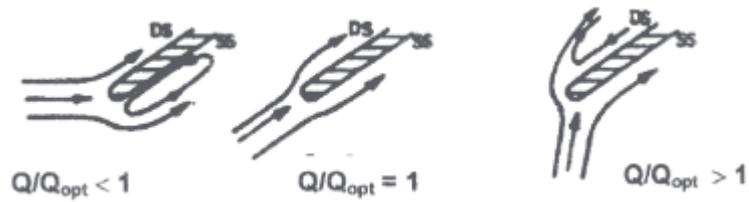


Fonte: GREIN & WYSS, 1974.

A principal causa para que ocorra a cavitação é ter o $NPSH_{disponível}$ menor que o $NPSH_{requerido}$, que pode ocorrer por erro de cálculo na hora do projeto.

Cada bomba é projetada para trabalhar em uma vazão ótima, e quando a mesma trabalha em uma faixa de valores diferentes do valor ideal, ocorre a recirculação do fluido na entrada do rotor da bomba, como pode ser visto na figura 2 a seguir.

Figura 2: Estrada do escoamento no rotor



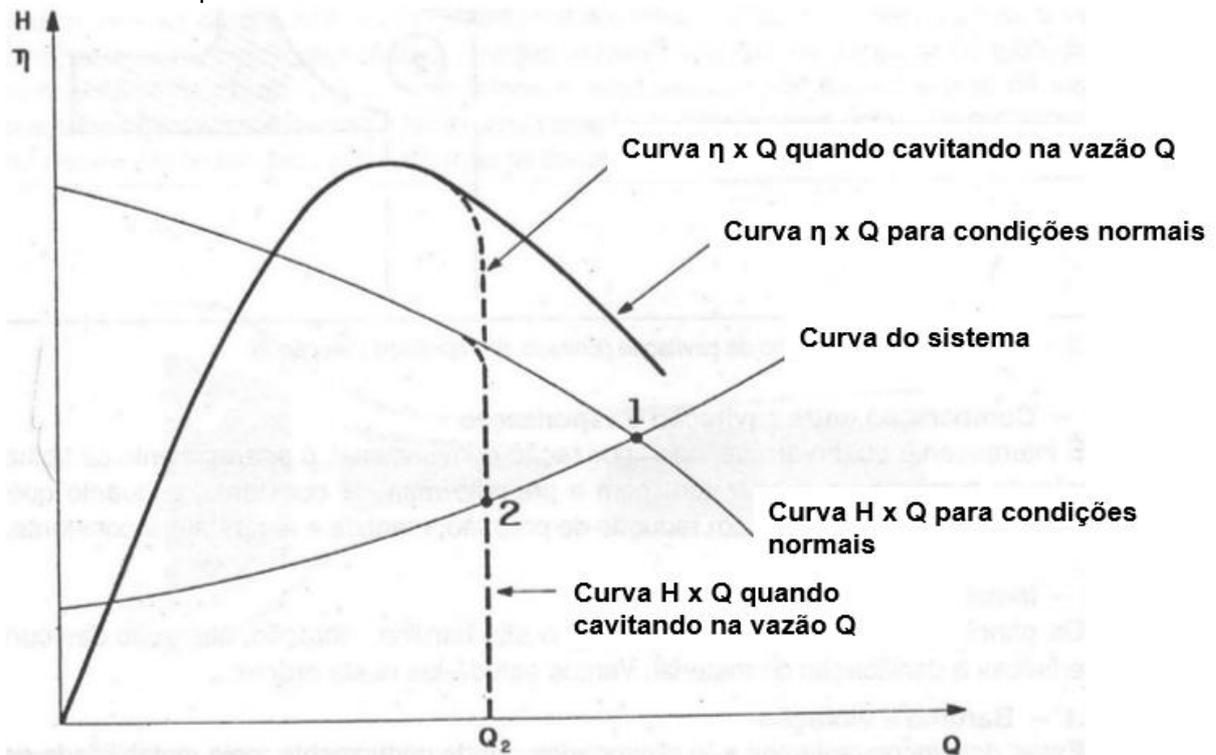
Fonte: LEITE, J., 2012.

Quando ocorre a recirculação dentro do rotor da bomba, há uma queda de pressão muito acentuada, que pode causar a cavitação. Quando a vazão é maior que a ideal, a parte do rotor que tende a cavitatar é a do lado da descarga, já quando a vazão é menor que a vazão ideal, a região que tende a cavitatar é a do lado da sucção.

Quando o fenômeno de cavitação ocorre dentro de uma bomba centrífuga, há um grande número de consequências, umas com menos e outras com mais importância, umas que podem ser detectadas logo na primeira ocorrência e outras que vão se mostrar ao longo do tempo.

A consequência mais evidente quando ocorre a cavitação é a queda brusca da altura manométrica bombeada, logo o rendimento da bomba também cairá, como podemos verificar no gráfico 1 a seguir.

Gráfico 1: Exemplo das curvas características de uma bomba



Fonte: MATTOS, 1998.

A queda do rendimento e da altura manométrica são algumas das consequências imediatas da cavitação, além da vibração.

A vibração, devido à cavitação, ocorre principalmente por três fatores, que são: i) como cada pá da bomba tem certa percentagem de bolhas de ar, que quer dizer que, uma região vai ter mais água passando do que outra, logo causa um desbalanceamento; ii) quando as bolhas de ar implodem dentro do rotor, causam forças externas, que originam a vibração; e iii) quando a área ocupada pelas bolhas são muito extensas, causa uma queda de pressão a jusante do rotor, resultando na saída separada de fluído, originando a vibração.

Como detectar a vibração característica da cavitação vai ser tratado no tópico a seguir.

As consequências da cavitação por um longo tempo são a erosão e o desgaste do rotor.

“As superfícies metálicas onde se chocam as diminutas partículas... são submetidas a uma atuação de força complexa..., que produzem percussões, desagregando elementos de material.... É a erosão por cavitação.” (MACINTYRE, 1997).

Com a constante implosão de bolhas de ar dentro do rotor, que podem exercer uma pressão de até 10^5 bar, vai causando fadiga no rotor da bomba, até começar, literalmente, a arrancar seus pedaços.

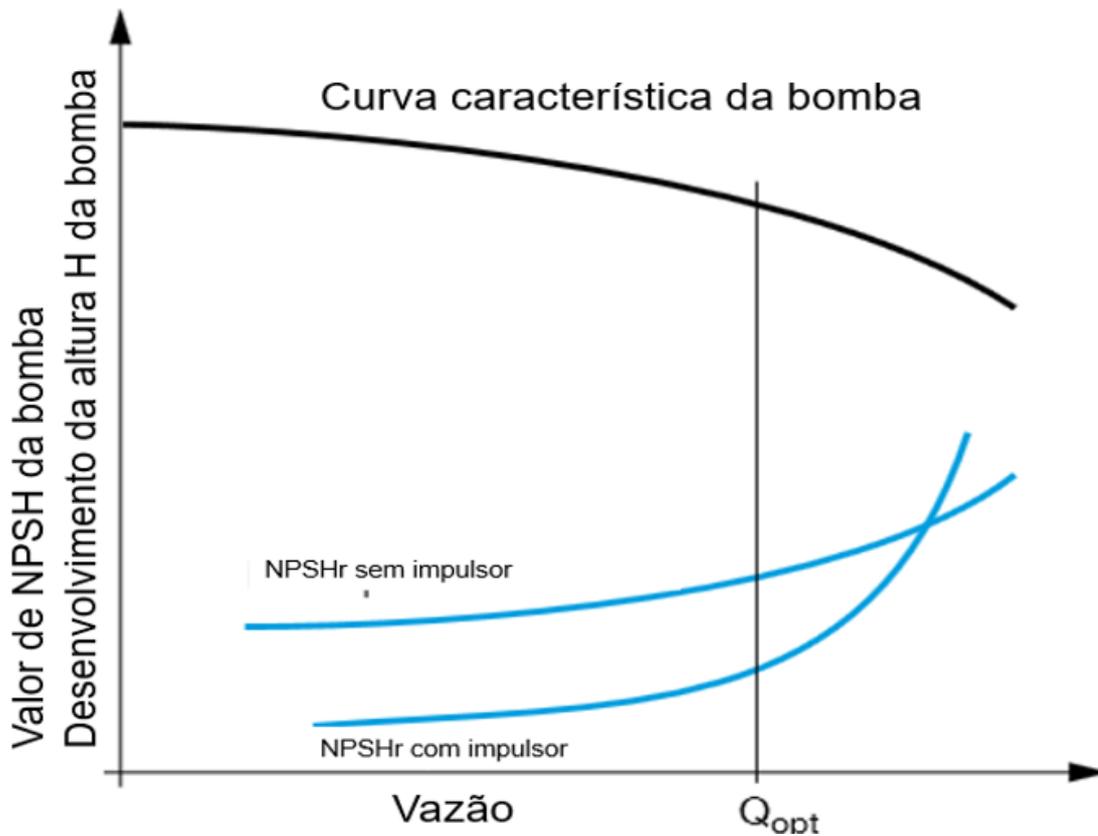
Devido a corrosão por cavitação, é necessário realizar a troca do rotor da bomba, pois o mesmo fica danificado, tornando-o inutilizável.

“Sem dúvida que a melhor solução para evitar os efeitos da cavitação, começa pela sua prevenção desde o início do projeto da instalação.” (LEITE, J., 2012).

Dentre algumas soluções para amenizar o efeito da cavitação estão: i) instalar uma bomba pressurizadora antes do grupo de bombas que estão sob o efeito de cavitação, assim aumenta a pressão de aspiração; ii) montagem de um impulsor adicional na aspiração da bomba, como mostra a Figura 4, desta forma a curva do $NPSH_{requerido}$ fica com valores menores (Gráfico 2).

Outros fatores que podem influenciar de uma forma positiva para evitar a cavitação é a utilização de tubos com rugosidades menores, fazer a tubulação o mais curta possível, e evitar o máximo possível de cotovelos e de válvulas em toda a tubulação, desta forma a perda de carga irá diminuir, logo o $NPSH_{disponível}$ aumenta, dando mais margem para evitar a cavitação.

“A escolha do material a ser empregado na fabricação da bomba é de maior importância.” (MATTO, 1998).

Gráfico 2: A influência do impulsor no NPSH_r

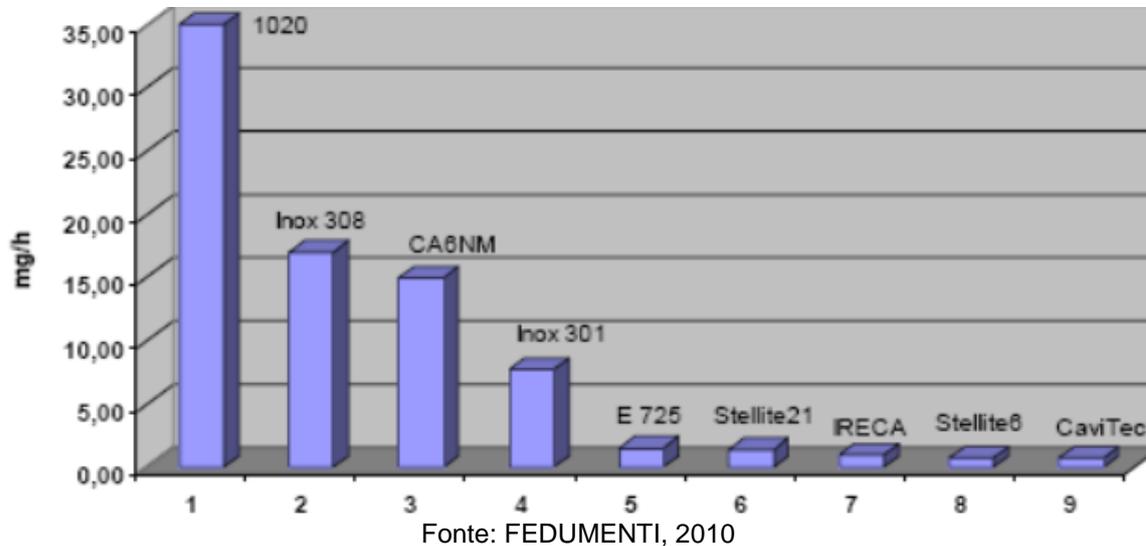
Fonte: KSB, 2005.

A resistência dos materiais, sobre o efeito de cavitação, é determinada em laboratório através de experimentos. O principal experimento para determinar a resistência do material à cavitação é o que tem como base o peso do rotor. Primeiramente é pesado o rotor novo, em seguida coloca-se a bomba para funcionar com uma velocidade X e uma pressão Y por um tempo Z determinado. Após terminar o experimento, o rotor é pesado novamente e, quanto menos massa ele perder durante a operação, quer dizer que maior é a sua capacidade à corrosão.

O experimento é feito com a mesma pressão, velocidade e tempo para todos os tipos de materiais.

No gráfico 3 podemos ver como diferentes materiais se comportam com o efeito da cavitação, a taxa de erosão devida a cavitação é de mg/h, logo o rotor que perder mais peso por hora devido a cavitação será aquele que apresenta menor resistência.

Gráfico 3 – Taxa de erosão por cavitação

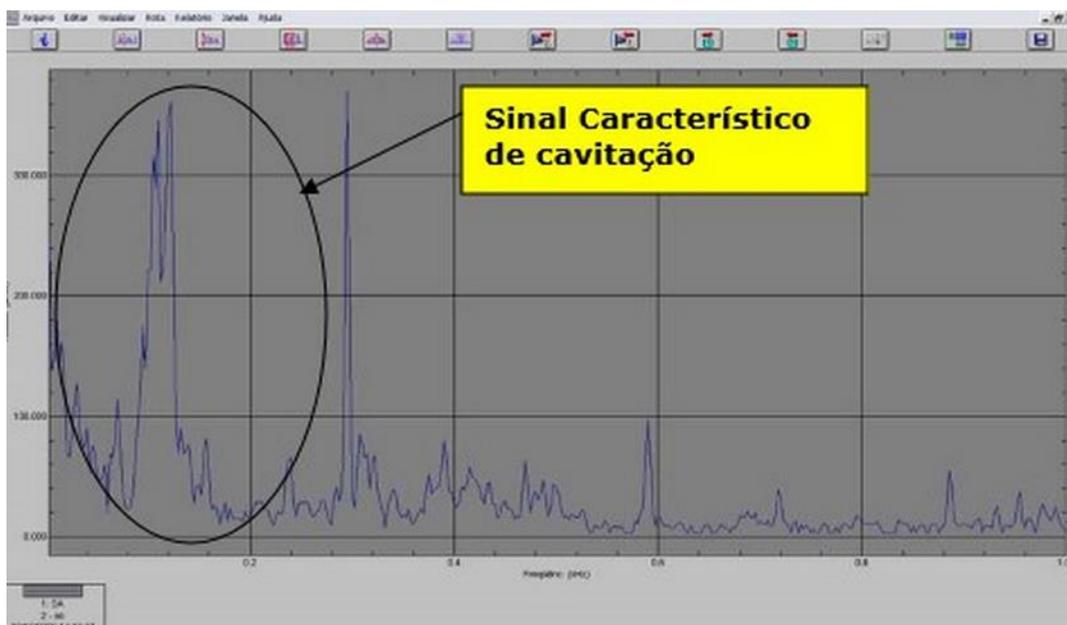


No gráfico 3 podemos ver que o aço inox é mais resistente do que o aço-carbono sem nenhum componente de liga, e o material que menos sofre com a corrosão é o CaviTec, que é um material desenvolvido para ser aplicado nas condições de cavitação, este material seria um aço inoxidável austenítico ligado ao Co (Fe-Cr-Mn-Co).

Nos espectros de vibração, identifica-se a cavitação pelo surgimento de sinais randômicos, na região de baixa frequência (80 a 200 HZ) nos espectros de velocidade e em alta frequência nos espectros de aceleração.

Pelo aspecto sensitivo, identifica-se a cavitação através de ruídos fortes na voluta da bomba, causando a impressão de que está bombeando corpos sólidos, como pedra.

Figura 3: Espectro de vibrações de uma bomba centrífuga.



Fonte: OLIVEIRA, R., 2010.

REFERENCIAL TEORICO.

NPSH (net positive suction head) significa altura de aspiração positiva, que é um conceito predominante entre os fabricantes de bombas centrífugas e a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, que trata de ensaios de cavitação.

“NPSH é um importante conceito que permite avaliar as condições de aspiração de uma bomba centrífuga e fazer a previsão da margem de segurança contra os efeitos de cavitação...” (LEITE, J., 2012).

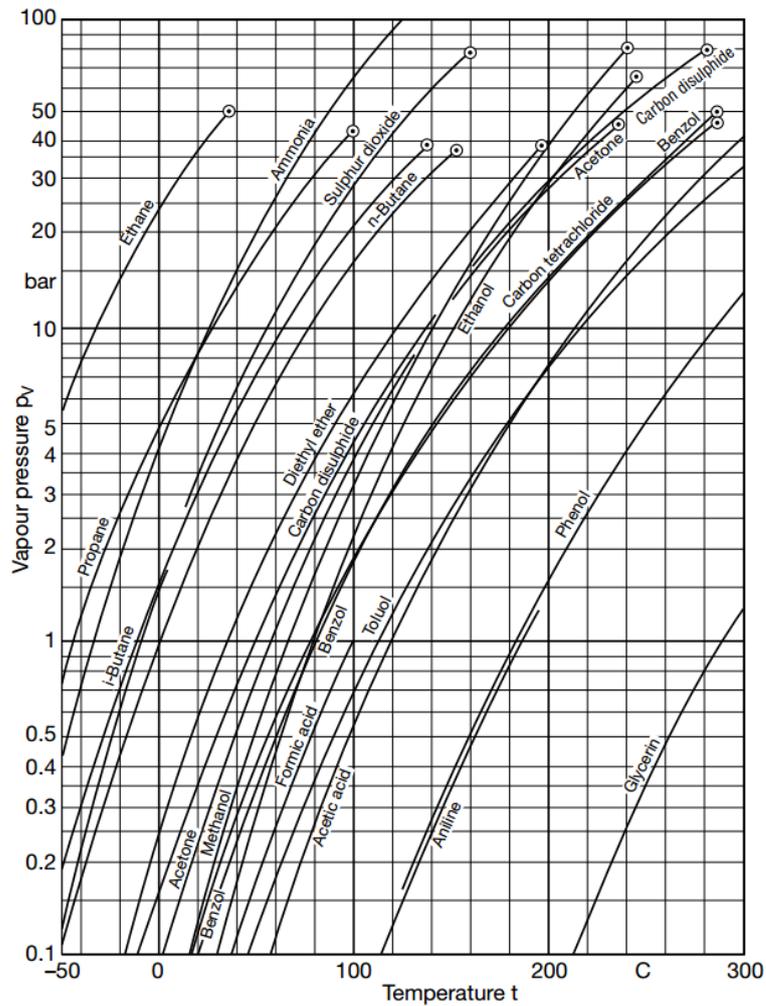
A condição de $P_{e_{abs}} > P_v$ pode não ser suficiente para determinar se ocorrerá ou não cavitação na bomba, dessa forma, foi criada a constante “NPSH”, que mede a diferença entre a energia total de sucção e a pressão de vaporização.

$$NPSH = \frac{P_0 - P_v}{\gamma} + \Delta Z - h_l$$

Onde P_0 é a pressão na superfície da água, P_v é a pressão de vapor, h_l é a perda de carga entre o ponto de sucção e o recalque, ΔZ é a diferença de altura entre a sucção e o recalque e γ é o peso específico do líquido.

Podemos ver algumas pressões de vaporização de vários fluidos em função da temperatura na Figura 4 a seguir.

Figura 4: Efeito da temperatura na pressão de vaporização de vários fluidos



Fonte: KSB, 2005.

Em termos práticos, o procedimento usual para analisarmos a operação de uma determinada bomba num sistema, é através do concito de $NPSH_{requerido}$ e $NPSH_{disponivel}$.

$NPSH_{disponivel}$ é uma característica do sistema (perdas de carga na tubulação, pressão atmosférica e etc.) e do fluído a ser bombeado, ele define a quantidade de energia absoluta disponível na sucção da bomba, acima da pressão de vapor do fluído.

$$NPSH_{disponivel} = \frac{P_e + P_v + P_0}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2 * g} - \Delta Z - h_l$$

Onde P_e é a pressão no tanque de sucção, no caso de tanques fechados, para tanques abertos é igual a 0; V_e é a velocidade de sucção da bomba, g é a gravidade e ΔZ neste caso é a diferença entre a altura do tanque de sucção e a linha de centro da bomba.

Para a água em um tanque aberto à 20°C no nível do mar, podemos simplificar a equação para:

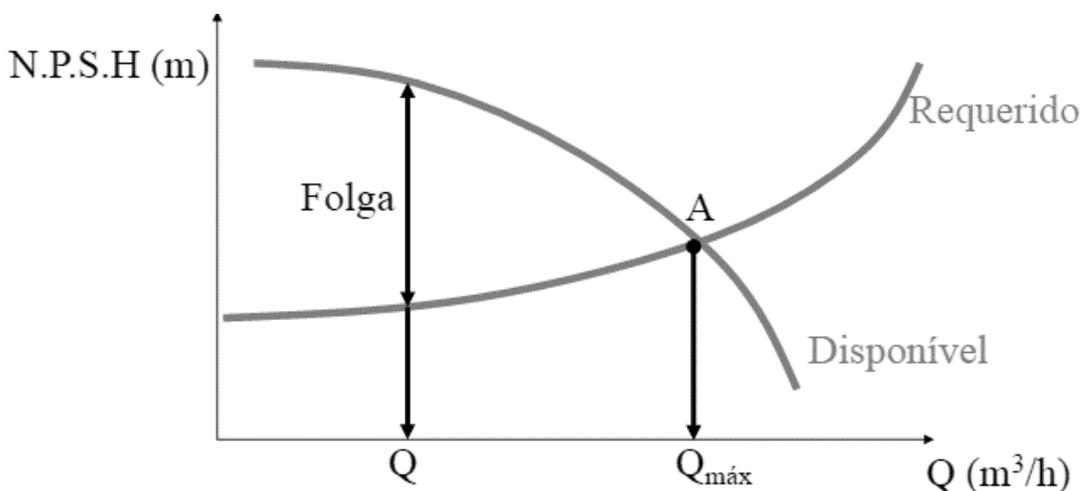
$$NPSH_{disponivel} = 10 - \Delta Z - h_l$$

No Gráfico 4, podemos observar que o $NPSH_{disponível}$ cai conforme a vazão aumenta. Um dos fatores para que isto aconteça, é que com a vazão aumentando a velocidade aumenta e na equação de perda de carga a velocidade está ao quadrado.

$NPSH_{requerido}$ é uma variável que depende de cada bomba, dependendo do seu tamanho, características construtivas e etc.

Cada fabricante fornece a curva de $NPSH_{requerido} \times Q$ para cada bomba de seu catálogo, a característica desta curva é demonstrada na figura abaixo, onde o $NPSH_{requerido}$ aumenta conforme a vazão aumenta. Esta curva pode ser obtida experimentalmente em uma bancada de teste, isso será feito na nossa bomba do laboratório de hidráulica e os resultados serão mostrados no próximo capítulo.

Gráfico 4: N.P.S.H X Vazão



Fonte: AUTORIA PROPRIA.

$NPSH_{requerido}$ representa a energia absoluta do líquido, acima de sua pressão de vapor, necessário no flange de sucção da bomba, assim garante que não ocorra a cavitação.

Teoricamente, para não ocorrer cavitação, o $NPSH_{disponível} \geq NPSH_{requerido}$, porém para haver uma margem de segurança, utiliza-se a fórmula:

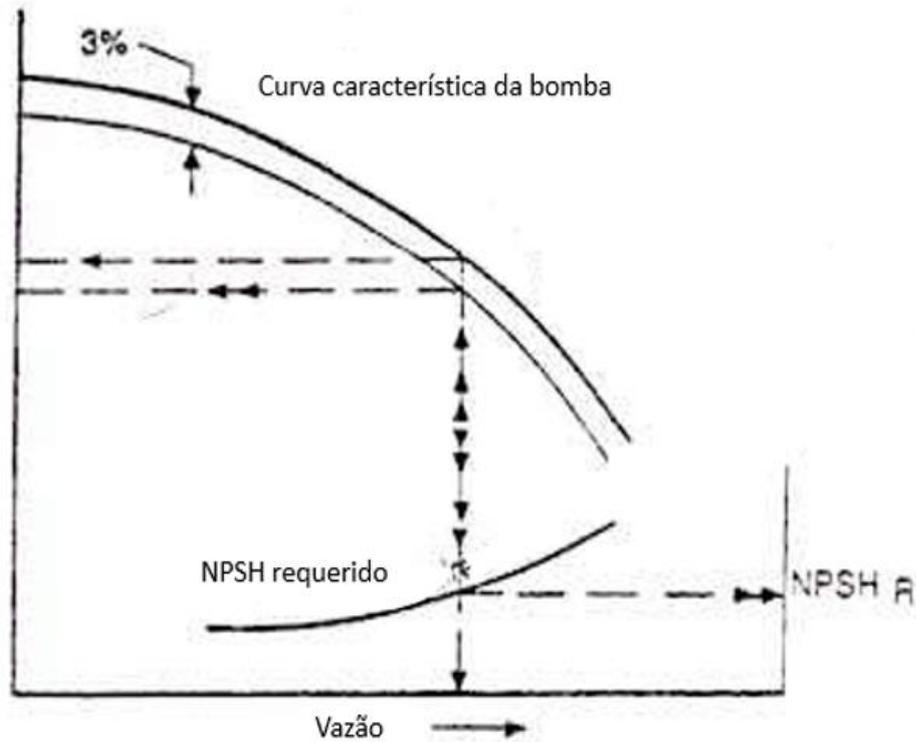
$$NPSH_{disponível} - NPSH_{requerido} \geq 0,5m$$

Outra forma de garantir a não ocorrência de cavitação, é utilizar o método do $NPSH_{3\%}$.

Esta metodologia consiste em ter uma margem de segurança, onde é possível ter uma perda de 3% na altura manométrica do $NPSH_{disponível}$, e mesmo assim o $NPSH_{requerido}$ na vazão de trabalho seja inferior, para não ocorrer a cavitação.

Podemos ver no gráfico 5 a seguir, a representação gráfica de NPSHxVazão. Podemos ver que a curva do NPSH_{disponível} é reduzida em 3% e é utilizada para comparar com a curva do NPSH_{requerido}.

Gráfico 5: NPSH_{requerido}. 3%



Fonte: HART, R. 1993.

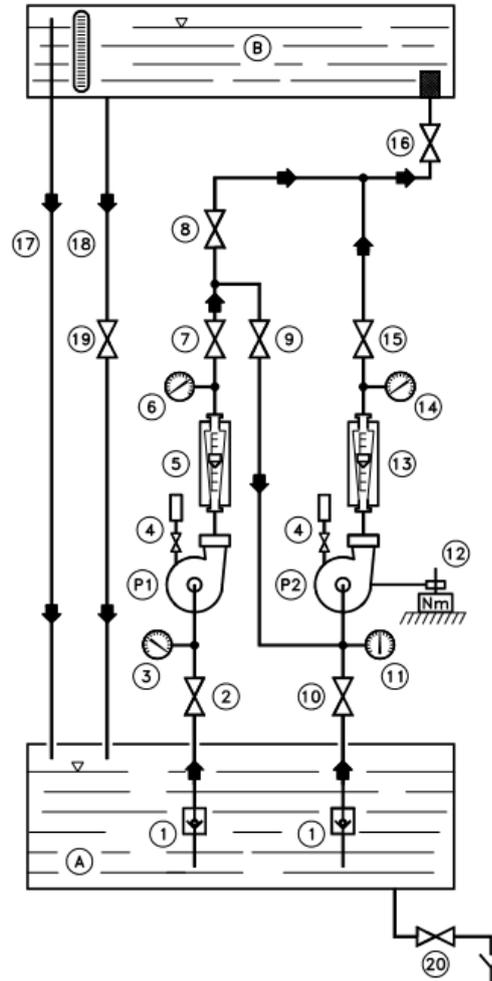
METODOLOGIA

Neste capítulo será tratado o funcionamento da bancada de hidráulica do Mackenzie, e como o experimento será realizado. Primeiramente será feito uma análise pelos componentes que compõem a bancada e posteriormente a parte técnica do experimento a ser feito.

Na figura 5 vamos poder observar como a bancada é composta, e na figura 7 qual será o caminho da água pela bancada.

Descrição da bancada.

Figura 5: Desenho esquemático da bancada de teste



Fonte: DIDACTA ITALIA, 2009.

A – Tanque de sucção com capacidade de 350l

B – Tanque de recalque, com indicador de nível com capacidade de 150l

P1 – bomba com duas velocidades acionada por um motor assíncrono de 3 fases

P2 – bomba com motor de velocidade variável

1 – Válvulas de fundo

2 – Válvula de retenção da sucção da bomba 1

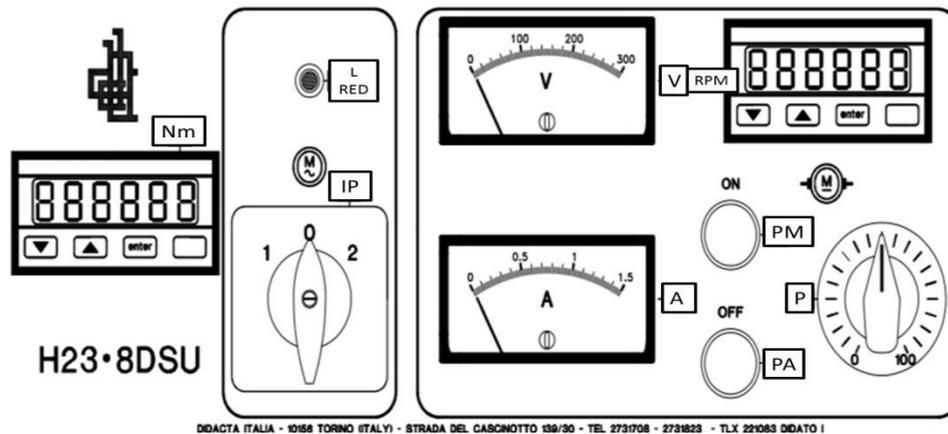
3 – Barômetro de sucção da bomba 1

4 – Manômetro.

5 – Rotâmetro da bomba 1

- 6 – Barômetro de recalque da bomba 1
- 7 – Válvula de retenção do recalque da bomba 1
- 8 – Válvula de retenção de serie/paralelo
- 9 – Válvula para operar bombas em serie
- 10 – Válvula de retenção da sucção da bomba 2
- 11 – Barômetro de sucção da bomba 2
- 12 – Célula de carga
- 13 – Rotâmetro da bomba 2
- 14 – Barômetro de recalque da bomba 2
- 15 – Válvula de retenção do recalque da bomba 2
- 16 – Válvula de ajuste da vazão
- 17 – Luz Tubulação de descarga
- 18 – Tubulação de descarga para calibração do tanque B
- 19 – Tubulação de descarga rápida para calibração do tanque B
- 20 – Tubulação de descarga para coleta do tanque A

Figura 6: Comando da bancada



Fonte: DIDACTA ITALIA, 2009

- L – Lâmpada piloto (bomba ligada)
- IP – Seletor de velocidade da bomba 1 (2 velocidades)
- PM – Botão luminoso para ligar bomba 2
- PA – Botão luminoso para parar bomba 2
- P – Potenciômetro para ajustar a velocidade da bomba 2

V – Voltímetro para medir a voltagem do motor da bomba 2

A – Amperímetro para medir a amperagem do motor da bomba 2

RPM – Instrumento digital para medir a rotação do motor da bomba 2

Nm – instrumento digital para medir o torque da célula de carga

Descrição dos componentes mecânicos

Rotâmetro - medidor de vazão, de área variável e pressão constante, no qual o fluido escoar, em sentido ascendente, através de um tubo, elevando um peso nele contido até uma posição de equilíbrio com a força de ascensão do fluido.

Barômetro – é um instrumento científico utilizado em meteorologia para medir a pressão atmosférica

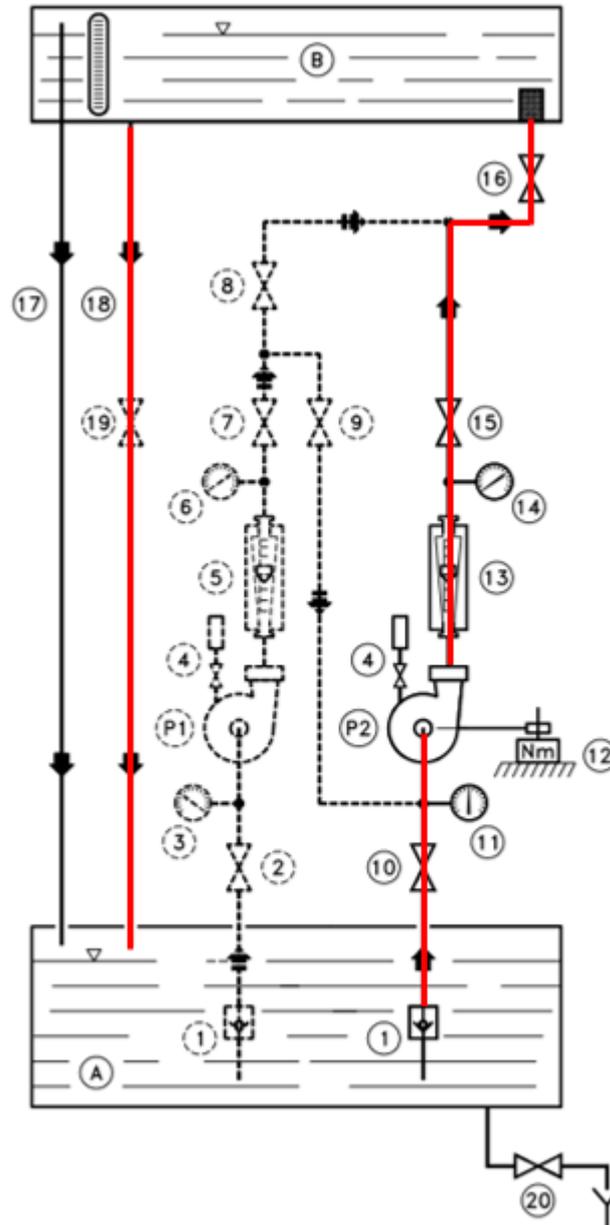
Célula de carga - é um transdutor de força. A força é medida de forma indireta, normalmente relacionando-a com a resposta de algum material à aplicação de carga

Bomba 1 • tipo: BCS/20 • Máxima vazão: 80 l/min (em 2900 rpm) • Pressão máxima: 13.3 m H₂O • Motor assíncrono de três fases com duas velocidades • Voltagem 220/380 V, três fases • Frequência 50 Hz • Potência 0.8/1.1 kW • Amperagem 4/4.9 A • velocidade de rotação 1450/2900 rpm

Bomba 2 • tipo BCS/20 • máxima vazão 80 l/min (em 2900 rpm) • pressão máxima 13.3 m H₂O • Motor corrente contínua com dois eixos de saída • Regime 160 V - 4.5 A • Partida 190 V - 0.2 A • Power 0.5 kW • velocidade de rotação 2900 rpm

Descrição do experimento

Figura 7: Desenho esquemático da bancada configurada para o experimento.



Fonte: DIDACTA ITALIA, 2009

Para determinar o valor do NPSH da bomba, em condições de trabalho constante, devem-se seguir as instruções do manual do usuário, fornecido pelo fabricante da bancada. Seguem as instruções de forma resumida:

- Fechar todas as válvulas, deixando aberta apenas as válvulas 10-15-16;
- Ligar a bomba na velocidade desejada;
- Estrangular a sucção da bomba (válvula 16, figura 7), para criar certo valor de contrapressão no lado da sucção, de modo a obter as leituras subsequentes para valores inferiores a um conjunto inicial de valores;

- Medir a pressão de recalque e de sucção e o valor da vazão nessas condições;
- Estrangular sucção na válvula 10 (Figura 7) para obter uma diminuição gradual do valor da pressão de sucção e ajustando a válvula 16 (figura 5) para obter valores da pressão de recalque que manterá:

$$H_u = H_m - H_a - H_a = \text{Constante}$$

- Ler os valores de vazão da bomba para cada valor de H_m obtido;
- Proceder com os valores sucessivos até achar um valor onde a vazão caia repentinamente e o barulho característico de cavitação comesse a ser ouvido. Tentar medir uma série de valores ao redor deste ponto. Inserido todos esses valores na tabela, vamos plotar um gráfico de $Q = f(H_a)$ para H_u constante;
- O teste pode ser feito para diferentes valores de vazão e rotação.

O valor de NPSH será representado por cada curva na razão de H_a/γ .

Explicação teórica do experimento.

Para simular o fenômeno de cavitação na bancada de teste, tem-se que alterar o valor do NPSH, como o NPSH requerido depende apenas da bomba, com referido no capítulo anterior, não é possível alterar o valor desta constante, logo, temos que alterar o valor do NPSH disponível.

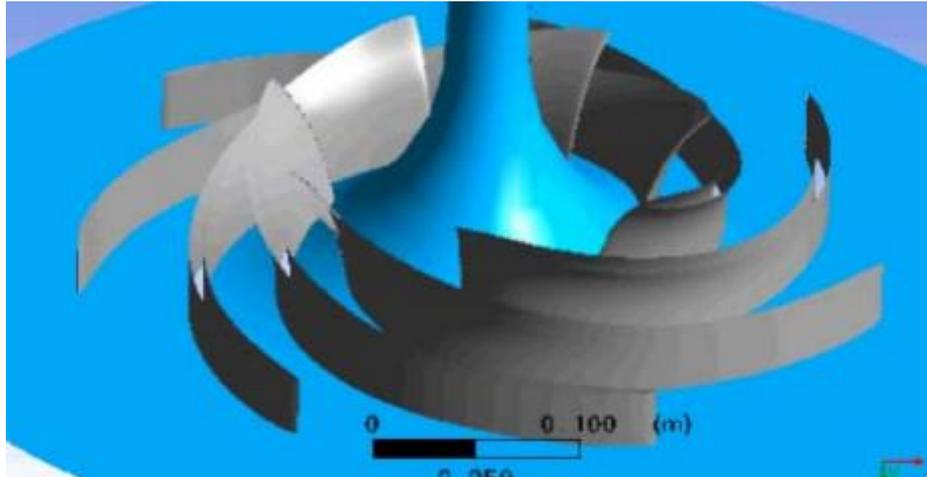
Para alterar o valor do NPSH disponível, estrangula-se a válvula de sucção.

Descrição da análise CFD.

Agora será retratado os aspectos da simulação CFD, como foi feita a simulação assim como os seus parâmetros de entradas que foram colocadas no software.

“A análise de CFD pode ajudar os projetistas na predição de possíveis zonas de cavitação, através da observação dos contornos de pressão, o projetista pode identificar regiões onde a pressão do líquido encontra-se abaixo da pressão de vapor...” (ESSS)

Figura 8 – Geometria da bomba a ser simulada



Fonte: ANSYS 2016

Parâmetros da simulação:

Fluido: Água a 25C

Rotação: 1260rpm

Vazão mássica: 16 kg/s

Pressão de evaporação: 3574 Pa

Pressão de entrada: 1 atm

Foi feita uma simulação com a pressão de entrada variando de 17500Pa até 60000Pa para obter o gráfico de altura manométrica por NPSH.

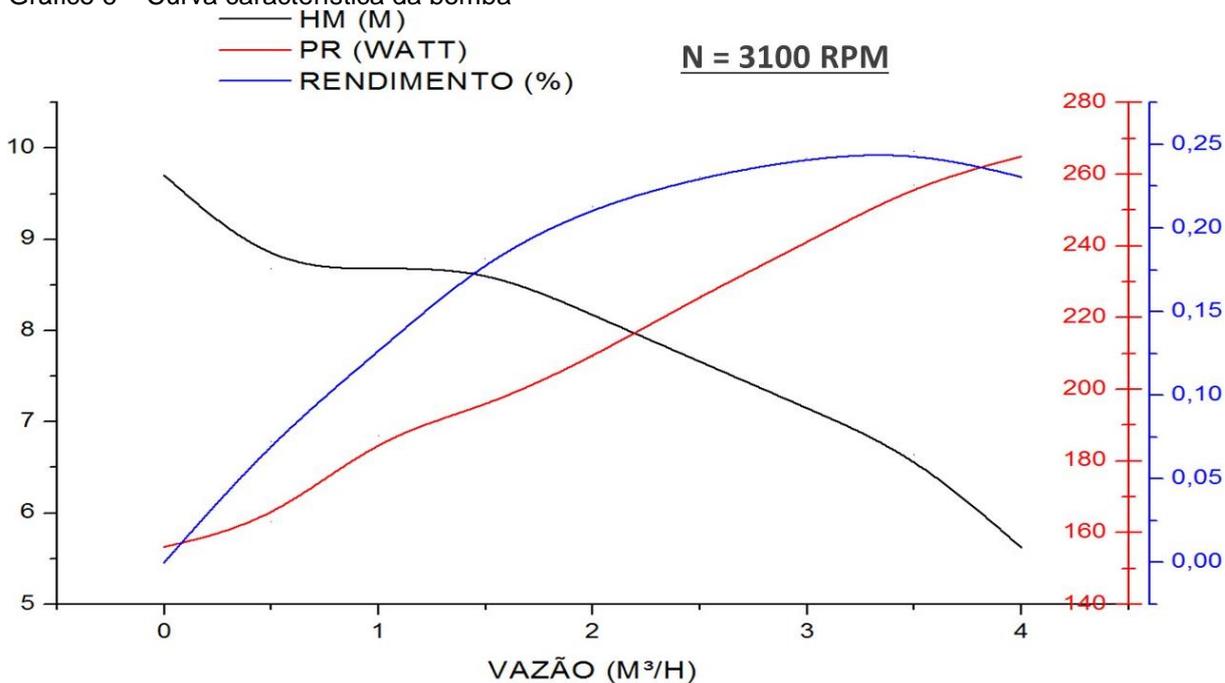
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante um ano de iniciação, foram feitas algumas experiências na banca de hidráulica, foi obtido as curvas características da bomba, porém a experiência onde se obtém a curva de NPSH não foi possível realizar.

Por ser uma experiência difícil e que nunca tinha sido feita, era necessário mais tempo de teste, porém, a bancada foi desativa por questão de reforma no laboratório de hidráulica.

O gráfico 6 foi obtido nos testes, onde conseguimos obter as curvas características da bomba

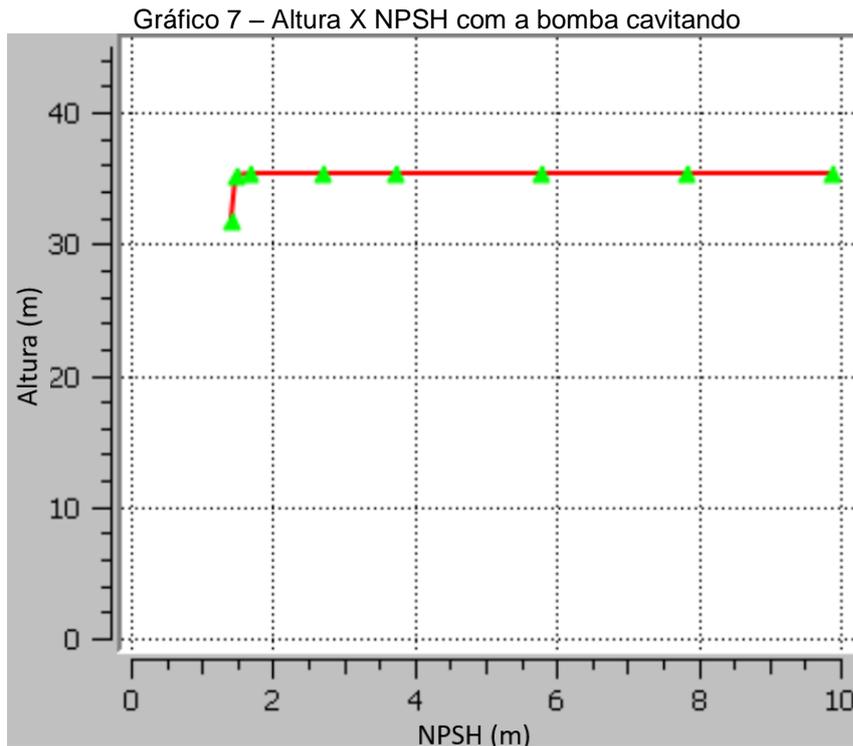
Gráfico 6 – Curva característica da bomba



Fonte: AUTORIA PROPRIA.

No gráfico 6 obtido através da experiência é permitido observar que se assemelha muito com os gráficos encontrados na literatura, logo, a experiência foi bem realizada, seguindo todos os procedimentos padrões.

Com a experiência CFD foi possível obter o gráfico de Altura X NPSH, o resultado foi o gráfico 7, que se assemelha muito com a curva encontrada na literatura, portando podemos concluir que a simulação foi bem feita, com as condições de contorno coerente.



Fonte: AUTORIA PRORPIA.

Com o gráfico 7 podemos determinar qual seria o $NPSH_{requerido}$ que o fornecedor deveria colocar no seu catalogo, temos que apenas pegar o primeiro valor de NPSH que tenho um valor de Altura constante e tirar 3%, que neste caso o NPSH seria em torno de 1,85m

REFERÊNCIAS

COELHO, WELINGTON R., Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga. Rio de Janeiro, 2006.

DIDACTA, **User's Manual H23.8D SU Centrifugal Pumps Testing Unit Version 2 – (code 930351)**. Torino: Didacta Italia Srl. Tradução própria.

ESSS, **Predição numérica do fenômeno da cavitação via CFD**. São Paulo: Engineering Simulation and Scientific Software.

FEDUMENTI, N. **Efeito da cavitação sobre a corrosão em aços inoxidáveis utilizados em turbinas hidráulicas**. Florianópolis, 2010

GREIN, H. WYSS, E. Cavitation – an overview. Sulzer Research Number, Zurich, 1974.

HART, ROBERT J. **Cavitation – A dangerous enemy to pumps**. 1993

KARASSIK, IGOR J. et al. **Pump Handbook 3. ed.** New York: McGraw-Hill, 2001.

KSB, **Selecting Centrifugal Pumps**. Frankenthal: KSB aktiengesellschaft Communications (V5).

LEITE, JOÃO, **Cavitação em bombas centrifugas**. Portugal, 2012.

MACINTYRE, ARCHIBALD J., **Bombas e Instalações de bombeamento 2. ed.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1997.

MATTOS, EDSON E. DE, **Bombas Industriais 3. ed.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1998.

NETTO, JOSÉ M. DE AZEVEDO, **Manual de Hidráulica 8. ed.** São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

OLIVEIRA, ROSALVO J. Cavitação: como entender este fenômeno?

CONTATO: vinidilinskir99@hotmail.com (IC) e antonio.mello@mackenzie.br (Orientador).