Unisanta Science and Technology, **2018, 3, December**
Published Online 2018 Vol.7 N°2 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Teste de cavitação envolvendo o Projeto, Construção e Uso de um *E*quipamento - visando a Análise, o Desgaste e a formação *Pittings*

Rafael de Souza Pereira, Willy Ank de Morais, Carlos alberto Amaral Moino e Dorotéa Vilanova Garcia

Unisanta - Universidade Santa Cecília
Programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia Mecânica – PPGEMEc
Rua Oswaldo Cruz, 266- Santos-SP, Brasil

E-mail*:* r-pereira10@hotmail.com
Received august, 2018

Resumo: O objetivo deste trabalho foi construir um protótipo para teste de cavitação e usá-lo para analisar o dano criado pelo fenômeno de cavitação em uma amostra. Ao longo deste trabalho, um protótipo foi proposto, montado e ajustado para permitir avaliar os efeitos da cavitação em meio hidráulico (água). Este protótipo foi utilizado tanto para testar pequenas amostras de materiais de engenharia, focando na aplicação com metais, e para obter parâmetros para a construção do equipamento de teste final. Comparando os resultados antes e depois dos testes de cavitação, tornou-se possível uma discussão e quantificação do impacto da cavitação sobre a integridade do material, bem como o seu desempenho no uso.

Palavras chave: Cavitação erosiva, máquinas hidráulicas, desempenho dos materiais.

Cavitation test involving the Design, Construction and Use of a Equipment - Aiming at the Analysis, Wear and Training Pittings

Abstract: The objective of this work was to construct a prototype for cavitation test and use it to analyses the damage created by the cavitation phenomenon on a test piece. Throughout this work, a prototype was proposed, assembled and adjusted in order to allow evaluate the effects of cavitation in hydraulic (water) medium. This prototype was used both to test small samples of engineering materials, focusing on metals, and to obtain parameters for the construction of the final test equipment. Comparing the results before and after the cavitation tests, became possible a discussion and quantification of cavitation impact on the material integrity as well its performance on usage.

Keywords: Cavitation erosion, Hydraulic machines, Materials performance.
.

1. Introdução

A cavitação é um fenômeno hidráulico associado à formação e colapso de bolhas de vapor em um líquido, conforme ilustrado na Figura 1. Segundo Macintyre (2008), altos valores de pressões são alcançados nas superfícies ou pela ação da percussão das partículas condensadas ou pelas ondas de choque causadas pelo auto colapso das bolhas.

Embora não seja intensa o suficiente para produzir uma ruptura imediata, a cavitação produz a erosão de partes internas de sistemas hidráulicos, como impulsores de bombas, que podem levar à falha.

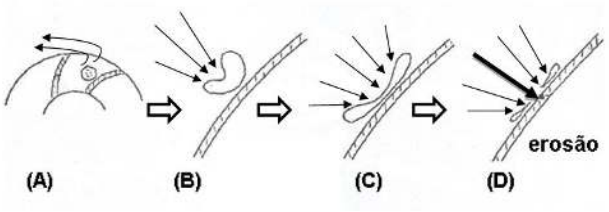


Figura 1. Formato da bolha. A) bolha no rotor; B) local com alta pressão; C) condensação da bolha; D) bolha implodindo. (SANTOS, 2007).

Copyright © 2018 ISESC.

Santos, (2007), destaca que a cavitação é uma preocupação recorrente na área de máquinas hidráulicas, podendo ocorrer na entrada de bombas centrífugas, na saída dos rotores de turbinas hidráulicas e outras situações que envolvem o manuseio de fluidos em espaços confinados.

Para os engenheiros e operadores, é de grande importância obter informações precisas sobre os efeitos da cavitação nos materiais, para que seus efeitos sejam devidamente considerados na prática, especialmente durante as fases de projeto e operação dos equipamentos hidráulicos. Portanto, neste cenário o objetivo deste trabalho é construir um protótipo de um módulo de teste de cavitação para analisar o desgaste e as uniões causadas pelo fenômeno em uma peça de teste instalada dentro de um tubo hidráulico.

Após o funcionamento do módulo em um determinado tempo, o corpo de prova pode ser coletado para análises, como metalografia, rugosidade e ensaios de tração, permitindo a discussão dos resultados.

Brunetti, (2008), define que se a pressão de uma corrente for igual ou inferior à pressão de vapor do líquido na temperatura de fluxo, haverá formação de vapor e esse fenômeno de formação de vapor em tubulações ou máquinas hidráulicas é chamado de cavitação. A cavitação é prejudicial como bolhas de vapor, como mostrado na Figura 1, atingindo pontos de pressão mais elevados, condensando abruptamente e implodindo com grande liberação de energia.

Este colapso com a respectiva liberação de energia, pode causar vibrações e uma erosão particular devido à agitação e choques das partículas do líquido nas paredes sólidas gerando dano local, conforme ilustrado pela última parte da Figura 1.

Santos, (2007), considera a cavitação como a vaporização do fluido que ocorre quando a pressão de um fluxo diminui, por qualquer motivo, e atinge a pressão de vapor correspondente à sua temperatura. Muitos interpretam as consequências da cavitação como uma erosão severa das partes internas da bomba.

A vaporização do fluido pode ser abortada pelo conceito de pressão de vapor. O fluido vaporiza quando a pressão de um fluxo diminui, por qualquer motivo, e atinge a pressão de vapor, correspondente à sua temperatura.

A equação apresentada por Brunetti (2008), tendo a condição necessária para ocorrer o fenômeno é:

$$P_e \leq P_v \qquad (1)$$

Onde:

P_e – Pressão de entrada na Bomba;

P_v – Pressão de vapor do fluido.

A Figura 2 mostra um gráfico da pressão versus velocidade com mudança de temperatura.

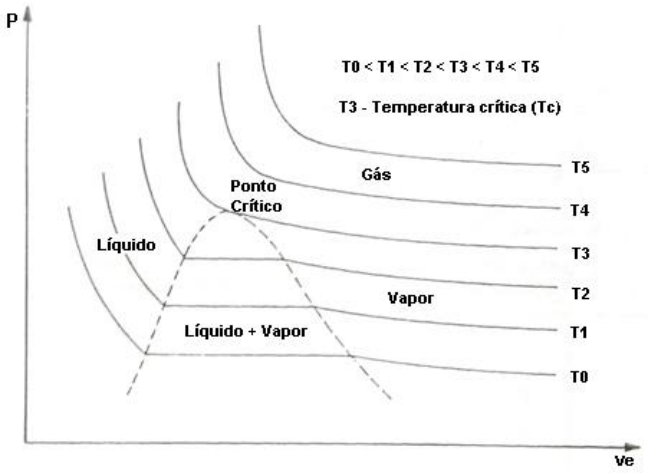


Figura 2. Condições de variação de temperatura (T), pressão (P) e velocidade (ve) para formação de vapor (MATTOS, FALCO, 1998).

Para melhor compreensão e a Tabela 1 mostra a variação da pressão de vapor (Pv) com a temperatura, no caso da água.

T [°C]	0	10	20	30	50	100
P_v [kPa]	0,617	1,225	2,313	4,204	12,25	101,2

Tabela 1. Variação de Pv em função da temperatura (BRUNETTI, 2008).

Se a pressão absoluta do líquido, em qualquer ponto do sistema de bombeamento, for menor ou igual à sua pressão de vapor, à temperatura de bombeamento (Figura 2), parte desse líquido irá vaporizar, formando cavidades dentro da massa líquida. O processo de cavitação começará aí (Figura 1).

1.1 Sintomas de cavitação.

Os sintomas característicos da cavitação são todos devidos ao colapso das bolhas do fluido vaporizado dentro da bomba (Figura 1).

Primeiro sintoma é o ruído característico: a cavitação produz um ruído semelhante à passagem de grãos de areia ou pedras pela bomba. O nível de ruído é menor ou maior de acordo com uma cavitação mais ou menos grave, respectivamente. É o sintoma principal;

Segundo sintoma é a vibração característica: o colapso da bolha produz as chamadas excitações aleatórias que

Copyright © 2018 ISESC

se caracterizam por excitar as frequências naturais da estrutura de suporte da bomba;

Terceiro sintoma é a queda na eficiência, mudança na curva característica da bomba: a mudança no desempenho deve-se à diferença de volume específica entre o líquido e o vapor, como mostrado na Figura 3, dado um exemplo de uma bomba centrífuga o estado de cavitação;

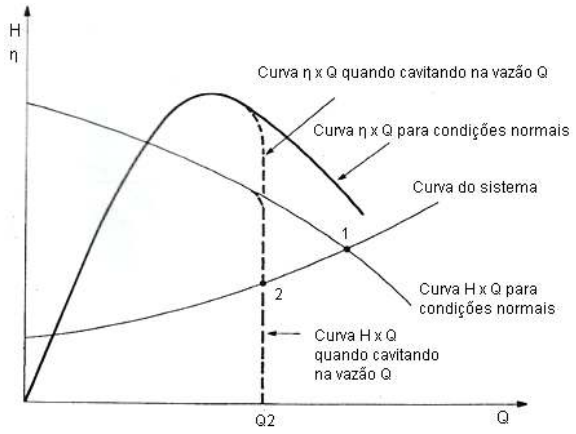


Figura 3. Curva característica alterada pelo fenômeno (MATTOS, FALCO, 1998).

Quarto sintoma é a necessidade de aumentar a potência do eixo da bomba para compensar sua grande perda de desempenho devido à cavitação.

A. Consequências da cavitação.

Os efeitos da cavitação são visíveis a longo prazo e a curto prazo, sendo ambos mensuráveis. A curto prazo, o fenômeno da cavitação compromete o desempenho da bomba, com a queda na eficiência da bomba, vibração não característica da bomba e ruídos, causada pela "implosão" do líquido (Figura 1). A longo prazo, as partes móveis do sistema hidráulico, tipicamente os rotores, apresentam consideráveis perdas de massa, comprometendo o desempenho do sistema como um todo, principalmente a bomba que pode levar à sua ruptura.

Cavitação ocorre em adição ao rotor. Pode manifestar-se na entrada da bomba, na linha de sucção, na voluta e nas lâminas direcionais do difusor.

A operação contínua de uma bomba na condição de cavitação resulta em sérios danos ou até mesmo destruição de seus componentes devido à formação e colapso de bolhas de vapor em suas superfícies internas. O choque das bolhas e seu colapso (Figura 1) desintegram a superfície dos materiais localizados, formando buracos que, com a continuidade do fenômeno, evoluirão em um aspecto de erosão severa. Este tipo de desgaste pode progredir até a desintegração das peças do rotor, como mostra a Figura 4.



Figura 4. Impulsor após danos severos à cavitação (PRICAST, 2009).

Danos ao rolamento também ocorrerão: vibrações de alta frequência causadas por cavitação, se persistirem por um longo período, produzirão choques resultantes do colapso das bolhas no rolamento da bomba que produzirão cargas de ponto alto que levarão os rolamentos a desgaste prematuro. Com o passar do tempo, os mancais também podem sofrer danos graves, como rachaduras (pequenas cavidades), arrancamento de materiais, etc.

E nos selos mecânicos: a forte instabilidade gerada pelo colapso da bolha e as vibrações resultantes produzirão impactos entre as faces estacionária e rotativa do selo mecânico.

Devido às características de dureza exigidas, essas faces tendem a ser frágeis, não resistindo às forças de impacto que as provocam a quebra e, consequentemente, vazando as vedações mecânicas.

1.2 Condições práticas para ocorrência de cavitação

Segundo Mattos, Falco (1998), modificar algumas variáveis pode alterar completamente a ocorrência de cavitação e seu efeito consequentemente. Portanto, é importante analisar a influência dos seguintes fatores:

a) Altura de sucção estática;
b) Altitude do local de instalação;
c) Temperatura de bombeamento do líquido;
d) Tipo de líquido bombeado;
e) Quociente de vazão;
f) Pressão no vaso de sucção;
g) Comprimento do tubo de sucção;
h) A rugosidade das paredes do tubo das perdas de carga localizadas devido a peças inseridas na instalação.

A presença de cavitação é evitada através do design adequado da linha de sucção minimizando o aparecimento de baixas pressões.

Copyright © 2018 ISESC

A altura geométrica de sucção ou sucção de uma bomba é definida como a distância vertical do centro do eixo da bomba e o nível do líquido no tanque de sucção. Tipicamente, em bombas afogadas, isto é, onde a altura de sucção está localizada acima do eixo da bomba, a cavitação é praticamente eliminada.

A linha de sucção de uma bomba é onde as pressões são geralmente baixas. Portanto, é exatamente na linha de sucção ou sucção que deve ser tomado cuidado para que, durante o bombeamento de líquidos, a pressão não atinja a pressão de vaporização na temperatura em que o líquido está.

2. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados: pesquisa bibliográfica baseada em livros de bombas centrífugas, instalações hidráulicas, hidráulica industrial; análise de artigos científicos; uso da antiga norma ABNT NBR 6400 MB 1032: 1989; programa MATLAB R2016a; e consultas com especialistas em montagem hidráulica e mecânica.

A Norma ABNT NBR 6400 MB 1032: 1989 prescreve métodos de testes de desempenho e cavitação para bombas hidráulicas (centrífugas, axiais e mistas), sendo que seu método de ensaio é válido para um tubo Venturi, cuja construção é especificada por esta norma. Mas, a parte interna do tubo de Venturi, na qual o fluido está sob condições de cavitação, pode ser usada para expor amostras para análise de resistência à cavitação.

Assim, com base na ABNT NBR 6400 MB 1032: 1989 e no uso da parte interna do tubo de Venturi, foi projetado um protótipo, cujo diagrama é apresentado na Figura 5.

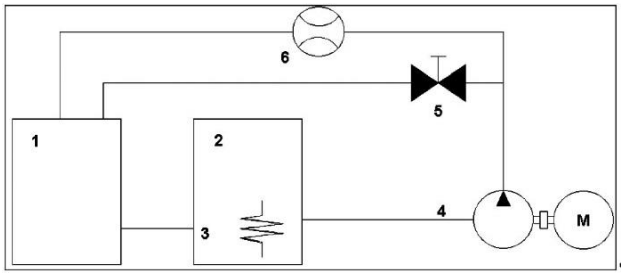
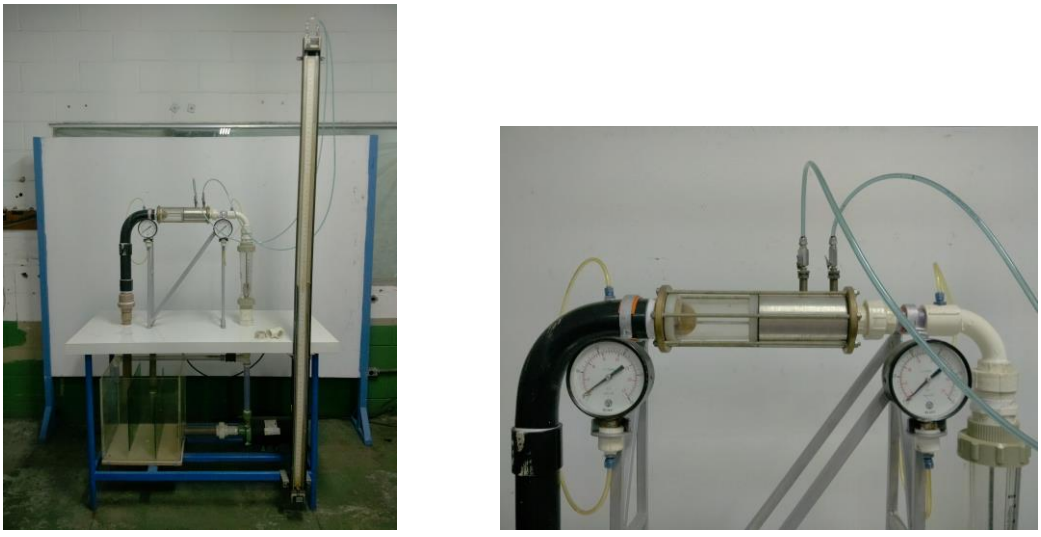


Figura 5. Desenho esquemático de protótipo.
(1) tanque de descarga; (2) tanque de sucção;
(3) resistência elétrica; (4) bomba centrífuga;
(5) válvula de controle de fluxo;
(6) tubo de Venturi.

Além disso, na Figura 6 é mostrada uma fotografia do protótipo montado (a) com o detalhe de medição (b) conforme projetado na fase de projeto deste trabalho.



(a) (b)

Figura 6. a) Protótipo montado. B) detalhe da montagem.

Copyright © 2018 ISESC

No equipamento, a cavitação é induzida pela combinação de um tubo de Venturi, que varia pressão e velocidade, com uma resistência elétrica, que aquece o fluido. Estes dois acessórios combinados tornam-se possíveis para induzir uma combinação adequada de temperatura e pressão que leva a gerar bolhas. Estas bolhas serão colapsadas contra a superfície da amostra de teste, posicionadas em uma câmara transparente na saída do tubo de Venturi, como mostrado pela Figura 7.

B. Cálculos do tubo Venturi.

Os cálculos para a construção do tubo Venturi foram feitos através do programa de computador MATLAB R2016a, para agilizar os cálculos, e de acordo com as características da bomba e do fluido (água) utilizado no equipamento. A bomba centrífuga escolhida apresenta as seguintes características: vazão de 7,6 m³ / h, pressão máxima de 2,4 kgf / cm² e saída de 1 polegada de diâmetro.

Considerando os seguintes dados da figura 8 e aplicando equações de design relevantes, conforme descrito por Macintyre (2008), Santos (2007) e ABNT NBR 6400 MB 1032: 1989, é possível calcular a velocidade do fluido na entrada de Venturi mostrado na figura 9.

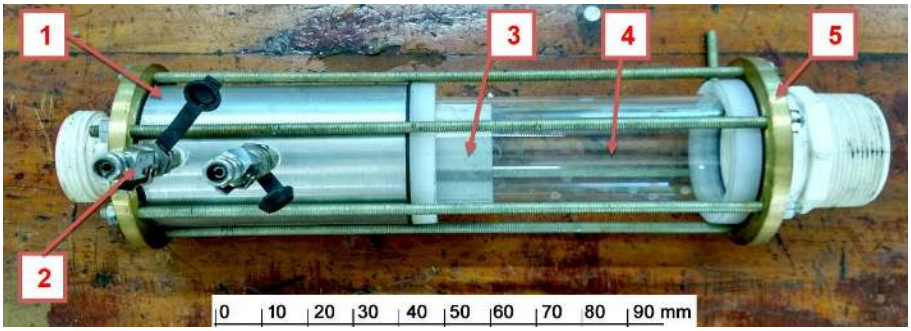


Figura 7. Câmara de ensaio do protótipo: (1) tubo de Venturi de alumínio; (2) saída de pressão; (3) posição da amostra; 4) tubo acrílico; 5) junta de latão.

```
+-------------------------------------------------------+
|            CONSTRUÇÃO DO TUBO VENTURI                 |
+-------------------------------------------------------+
| Dados da Bomba centrifuga escolhida                   |
| Vazão = 7.6 m³/h                                      |
| Pressão máxima = 2.4 Kgf/cm²                          |
| Saída para Tubulação = 1 polegada                     |
+-------------------------------------------------------+
| Considerando os seguintes dados                       |
| Temperatura solicitada = 40°C                         |
| Pressão de vapor:                                     |
| Pv = 752.92 Kgf/m² = 7386.14 N/m²                     |
| Pressão máxima = Pressão de entrada                   |
| Pe = 2.4 Kgf/cm² = 235440 N/m²                        |
| Diametro de entrada = De = 0.0254 m                   |
| Vazão = Vazão de projeto = Qp                         |
| Qp = 7.6 m³/h = 0,00211 m³/s                          |
+-------------------------------------------------------+
| Utilizando a equação da velocidade                    |
| Velocidade de entrada em m/s = va                     |
| va = (Qp * 4)/(pi * De²)                              |
+-------------------------------------------------------+
```

Figura 8. Dados feito no programa MATLAB R2016a.

```
+-------------------------------------------------------+
Velocidade de entrada em [m/s]= 4.164138
+-------------------------------------------------------+
```

Figura 9. Cálculo feito no programa MATLAB R2016a.

Copyright © 2018 ISESC

Com a velocidade de entrada, a equação de Bernoulli para fluidos estáveis perfeitos foi usada para encontrar a velocidade na garganta do Venturi. Na figura 10 está mostrada esta aplicação.

Como as dimensões estão no mesmo plano, Zj cancela Zk, assim:

A velocidade da garganta de Venturi (vk = 21,55 m/s) foi calculada, e com o fluxo da bomba (Qp = 0,00211 m³/s), o diâmetro da garganta (Dg) foi calculado conforme é mostrado na figura 11.

Com estes dados foi consultada a ABNT NBR ISO 5167-1 para obter o dimensionamento completo do tubo de Venturi:

a) O ângulo usado na entrada do Venturi é de 21°;
b) O ângulo de saída é de 7° a 15°, adotou-se 9°;
c) A seção reta de entrada, o comprimento é igual a 1D;
d) O comprimento do pescoço é igual a 1D também;

O diâmetro de saída do Venturi (D3) será igual ao diâmetro de entrada (D1).

Finalmente, os pontos de tomadas de pressão também são definidos no Padrão:

a) O buraco deve ser feito no meio da seção reta da entrada e da garganta;
b) O diâmetro da linha de drenagem deve ser de 0,01D com um comprimento de 2,5 D do furo (macho).

Com todos os dados analisados, adotou-se para o Tubo Venturi as medidas apresentadas na Tabela 2.

```
+-----------------------------------------------------+
| Equação de Bernoulli                                |
| ((Pj/Y)+(vj^2/(2*g))+(Zj))=((Pk/Y)+(vk^2/(2*g))+(Zk)) |
+-----------------------------------------------------+
| Onde:                                               |
| Pj = Pe                                             |
| Pk = Pv                                             |
| vj = va => ENCONTRADO                               |
| vk => SERÁ CALCULADO                                |
| Zj e Zk serão anulados, mesmo nível                 |
| Peso específico do fluido, Y = 10000 N/m³           |
| Aceleração da gravidade, g = 9.81 m/s²              |
+-----------------------------------------------------+
+-----------------------------------------------------+
| Isolando o vb na equação de Bernoulli               |
| vk = sqrt(((Pe/Y)+((va^2)/(2*g))-(Pv/Y))*(2*g))     |
+-----------------------------------------------------+
Velocidade da garganta do Venturi em [m/s]= 21.558797
+-----------------------------------------------------+
```

Figura 10. Cálculo de Bernoulli.

```
+-----------------------------------------------------+
| Calculado a velocidade na garganta do Tubo Venturi, |
| vamos calcular o diametro da garganta do venturi.   |
+-----------------------------------------------------+
| Onde:                                               |
| Diametro da garganta = Dg = sqrt((Qp*4)/(pi*vk))    |
+-----------------------------------------------------+
Diametro da garganta do Venturi em [m]= 0.011163
```

Figura 11. Cálculo do diâmetro da garganta do tubo Venturi.

Diametro (mm)			Angle	
Entrada	Garganta	Saída	Convergente	Divergente
29	10	28	21°	9°

Tabela 2. Dimensões calculadas e usadas para o Tubo Venturi usado neste trabalho (ver Figura 7).

Copyright © 2018 ISESC

Para a fabricação do tubo Venturi, foi utilizado um torno mecânico "Romi Imor - 3" da Oficina Mecânica da UNISANTA, para usinar um tarugo de alumínio para as dimensões e geometria calculadas do tubo Venturi. A Figura 12 mostra o desenho final do Tubo Venturi adotado para o equipamento de teste.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 3 mostra os materiais e suas condições iniciais, bem como algumas condições e resultados de teste. A figura 13 ilustra um dos pontos de uma peça de teste com desgaste em uma área circular sem sinal de corrosão.

Esta imagem mostra uma superfície típica formada pela erosão causada pelo colapso da bolha de vapor durante o teste de cavitação com o protótipo.

De acordo com os dados da Tabela 2, o protótipo conseguiu induzir um dano de cavitação quantificável na amostra.

Isto pode ser observado durante 9 horas por uma perda quantificável de massa. Além disso, nota-se que as medidas de rugosidade foram bem sensíveis à atuação da cavitação, tornando-se um parâmetro importante para quantificar o teste de cavitação.

. O exame microscópico pode ser usado para descrever melhor o tipo de dano na superfície da amostra, como mostrado na Figura 4.

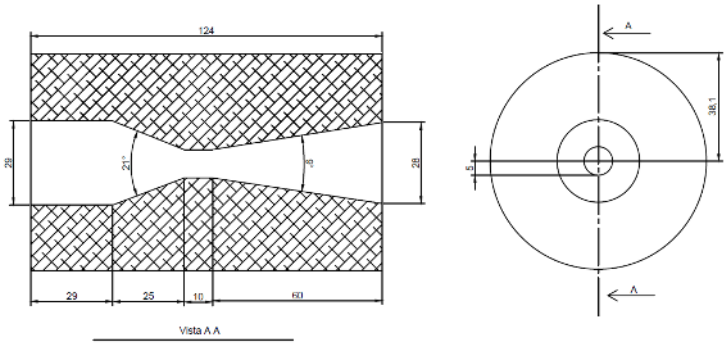


Figura 12. Desenho do Tubo Venturi usinado adotado no equipamento de teste desenvolvido.

Bronze (espessura inicial 1.96 mm)			0 a 9h	9 a 15 h	Resultado final
Composição química (%)	Dureza Brinell	Rugosidade (dois lados)	Vazão total	Vazão reduzida	Rugosidade (dois lados)
70%Cu; 20%Pb; 9%Zn; 4%Sn	76HB	1.51±0,5 μm 0.50±0,1 μm	Sem perda de massa	0,0097% perda de massa	2.09±1,0 μm 0.65±0,2 μm

Tabela 3. Amostra e condições de teste e alguns resultados.



Figura 13. Dano de cavitação em uma superfície de amostra após o teste. Ampliação óptica: 50X.

Copyright © 2018 ISESC

4. Conclusões

Variando a pressão pela válvula de controle de fluxo e a temperatura pela resistência elétrica, é possível induzir vários níveis de cavitação e, assim, submeter a amostra a várias condições de teste. O teste do equipamento protótipo mostrou sua vocação ajudando a realizar importantes pesquisas sobre a quantificação da resistência à cavitação oferecida por diferentes materiais.

Agradecimentos.

Os autores gostariam de agradecer especialmente a Irineu da Penha Ressurreição e Sérgio Giangiulio, dos laboratórios da UNISANTA, pela sua contribuição vital durante a construção do protótipo.

Referências

ABNT NBR ISO 5167-1, **Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular - Parte 1: Princípios e requisitos gerais.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 2008.

ABNT NBR 6400 MB 1032, **Bombas hidráulicas de fluxo (Classe C) - Ensaios de Desempenho e de Cavitação**, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1989.

BRUNETTI, F.. **Mecânica dos fluidos.** 2. ed. rev. - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

PRICAST. **Cavitación en el bombeo de fluidos**. Artigo publicado 07 out. 2009. Disponível em: <https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html>. Acesso em: 16 dez. 2016.

MACINTYRE, A.J., **Bombas e Instalações de Bombeamento**, 2. ed. Livros Técnicos e Científicos (LTC), Rio de Janeiro, 2008.

MATTOS, E.E; FALCO, R. **Bombas Industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998

SANTOS, S.L., **Bombas & Instalações Hidráulicas**, Livraria Ciência Tecnologia Editora (LCTE), São Paulo, 2007.

Copyright © 2018 ISESC