

# EQUIPAMENTO TIPO JATO CAVITANTE PARA A DESINFECÇÃO DE ÁGUA

*Maiara Pereira Assis<sup>1</sup>, José Gilberto Dalfré Filho<sup>2</sup>, Ana I.B. Genovez<sup>3</sup>*

**RESUMO** - A qualidade da água potável é um tema da maior importância, pois vem se deteriorando ao longo dos anos. Uma das grandes preocupações é a poluição da água pelo lançamento de esgotos. Isto leva a introdução de microorganismos patogênicos que podem causar várias doenças, algumas das quais podem ser fatais. A qualidade da água para fins de consumo humano pode ser melhorada controlando a poluição e com o aprimoramento das técnicas de desinfecção, que consistem da destruição de patógenos presentes na água. Esta é, portanto, uma etapa extremamente importante do ponto de vista da saúde pública. O emprego do fenômeno da cavitação como alternativa para desinfecção da água tem despertado a atenção. Isso porque o método que utiliza a cavitação elimina grande parte, ou totalmente, o uso de reagentes químicos utilizados nos tratamentos tradicionais. O objetivo deste trabalho é adaptar o equipamento tipo jato cavitante para testar a viabilidade na desinfecção de água. A instalação permitiu a desinfecção em tempos curtos de exposição, mostrando-se um método de tratamento rápido e eficiente.

**ABSTRACT** - The quality of drinking water is an issue of major importance, because it has been deteriorating over the years. A major concern is water pollution by sewage release. This leads to the introduction of pathogenic microorganisms that can cause various diseases, some of which can be fatal. The quality of water for human consumption can be improved by controlling pollution and improving the techniques for disinfection, which consists of destroying pathogens present in water. This is therefore an extremely important step in terms of public health. The use of the phenomenon of cavitation as an alternative for disinfection of water has attracted attention. This is due to the fact that it eliminates largely, or entirely, the use of chemical reagents commonly used for water disinfection. The objective of this work is to adapt the cavitating jet apparatus to test the viability for water disinfection. The installation permitted water disinfection in a short time of exposure. Thus, it can be considered an efficient method for water disinfection.

**Palavras-chave:** jato cavitante, cavitação, desinfecção de água.

1) Aluna da Faculdade de Tecnologia de Limeira – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) –R. Paschoal Marmo, 1888 - CEP:13484-332 - Jd. Nova Itália - Limeira, Estado de São Paulo - Brasil Fax: 55(19)96283267, e-mail: maiara\_pa@yahoo.com.br, 2) Professor Doutor FEC-UNICAMP, e-mail: dalfre@fec.unicamp.br, 3) Professora livre docente FEC-UNICAMP, e-mail:bgenovez@fec.unicamp.br.

## **INTRODUÇÃO**

Atualmente, a qualidade da água potável é um tema da maior relevância. Isso porque a sua qualidade vem se deteriorando ao longo dos anos devido à poluição de indústrias, de atividades de agricultura e do aumento do esgoto doméstico gerado pelo aumento populacional. Uma das grandes preocupações é a poluição da água pelo lançamento de esgotos. Isto leva a introdução de microorganismos patogênicos, que podem causar várias doenças, algumas das quais podem ser fatais.

Com o aumento da população mundial - as estatísticas apontam um número por volta dos 9 bilhões para 2050 (ONU, 2005), aumentará também a preocupação com a água em quantidade e qualidade.

No Brasil, de acordo com Pereira (2002), o setor de saneamento básico é um dos principais usuários de recursos hídricos representando cerca de 22% do total dos usos das águas superficiais, cujo principal insumo é a água bruta. A condição privilegiada do Brasil em quantidade disponível de recursos hídricos levou, durante muito tempo, à idéia de abundância deste recurso natural, o que gerou uma cultura de uso abusivo de rios e lagos, sobretudo quanto a captar água bruta e devolvê-la para os corpos hídricos na grande maioria dos casos, sem tratamento adequado.

A qualidade da água para fins de consumo humano pode ser melhorada controlando a poluição e também o aprimoramento das técnicas de desinfecção, que consistem da destruição de microorganismos presentes na água e é, portanto, uma etapa extremamente importante do ponto de vista da saúde pública.

O uso do fenômeno da cavitação para desinfecção da água tem despertado a atenção como citado no trabalho de Kalumuck et al (2003). Isso porque o método que utiliza a cavitação elimina grande parte do uso de reagentes químicos utilizados nos tratamentos tradicionais, podendo, até mesmo, eliminar o uso destas substâncias.

O uso de equipamentos ultra-sônicos para promover a cavitação tem possibilitado a produção de reações na água, resultante do processo de oxidação. Com este procedimento, o feixe acústico excita as micro-cavidades que são produzidas e que desenvolvem o processo de reação química. Segundo Kalumuck et al (2003) este método tem suas limitações, pois atua somente na camada superficial do líquido. Desta forma o uso de outro tipo de equipamento seria adequado. Jyoti e Pandit (2001) compararam quatro métodos de desinfecção que utilizam a cavitação e concluíram que a cavitação hidrodinâmica e o homogeneizador de alta velocidade se mostraram eficientes.

Assim, surge a idéia de usar o equipamento tipo jato cavitante. O colapso das cavidades formadas pelo jato gera ondas de alta pressão e micro-jatos de altíssima velocidade (acima de 100 m/s) que tem um grande poder destrutivo (Dalfré Filho e Genovez, 2008). As ondas de pressão e micro-jatos serão os responsáveis pela degradação dos microorganismos presentes na água. Como, neste caso, o sistema usa bombas de alta performance, deverá ser uma alternativa mais eficiente que no caso da cavitação acústica.

A utilização do fenômeno da cavitação para desinfecção de águas residuais se mostra promissor. Como se trata de um método de desinfecção não químico, não gera quaisquer compostos tóxicos, como ocorre nos tratamentos com cloro. É um processo de baixo consumo de energia relativamente à taxa de desinfecção e poderá ser considerado para tratamento em larga escala.

## **OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é adaptar o equipamento tipo jato cavitante para testar a viabilidade para a desinfecção de água.

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O processo da cavitação pode ser considerado análogo ao da ebulição, de acordo com Tullis (1989). No caso da ebulição, cavidades de vapor são formadas elevando-se a temperatura do líquido

à pressão constante. A cavitação, por outro lado, ocorre quando a pressão em um líquido, à temperatura constante, decresce à pressão de vapor e, desde que haja núcleos (bolhas de ar ou vazios) no líquido, cavidades de vapor são formadas. A queda de pressão pode ser ocasionada por turbulência ou vorticidade no escoamento. Se a pressão no fluido permanecer no valor da pressão de vapor e as cavidades atingirem um diâmetro crítico, estas continuarão a crescer rapidamente. Porém, se a pressão aumentar a um valor maior que a pressão de vapor, as bolhas tornam-se instáveis e colapsam. O colapso pode ser violento e acompanhado de ruído, vibração e possível erosão das superfícies.

Assim, a presença de núcleos no líquido, como gases dissolvidos e contaminantes, é essencial para ocorrer a cavitação. As águas residuais contêm impurezas e contaminantes, como sólidos dissolvidos, gases dissolvidos, compostos orgânicos, sólidos suspensos e microorganismos. Dessa maneira, há a condição básica para o desenvolvimento do fenômeno da cavitação. A presença de patógenos impõe um problema premente para o tratamento da água. Estes microorganismos podem ser erradicados por uma combinação da vaporização do líquido, das altas pressões geradas no momento da implosão das cavidades, do impacto do micro-jato e das altas tensões de cisalhamento geradas em um líquido, de acordo com Eppinga (2005).

Uma maneira de gerar cavitação é através da formação de um jato de água submerso de alta velocidade, como se verifica na Figura 1. De acordo com Tullis (1989), a velocidade na tubulação de aproximação do orifício é relativamente baixa e a pressão relativamente alta. Ao aproximar-se ao orifício a velocidade aumenta e a pressão diminui. Quando o jato deixa o orifício, uma intensa camada de cisalhamento é criada ao longo da região de separação do jato e a vizinhança. Os gradientes de velocidade nesta região criam redemoinhos. A pressão na região de separação próxima ao jato é aproximadamente a mesma dentro do jato. Entretanto, a pressão dentro dos redemoinhos é significativamente menor devido às altas velocidades rotacionais. Se um núcleo é capturado em um desses redemoinhos, e a pressão dentro dele atinge a pressão de vapor, o núcleo expande-se. Se a pressão mantiver-se próxima à pressão de vapor por um período suficiente para que o núcleo alcance um diâmetro crítico, a cavidade torna-se explosiva pela vaporização. À medida que o tamanho da cavidade de vapor aumenta, a resistência do redemoinho diminui, a velocidade rotacional diminui e a pressão circundante à bolha não é mais a pressão de vapor. Como a pressão ambiente está acima da pressão de vapor e, internamente, a pressão é a de vapor, a cavidade torna-se instável e colapsa internamente.

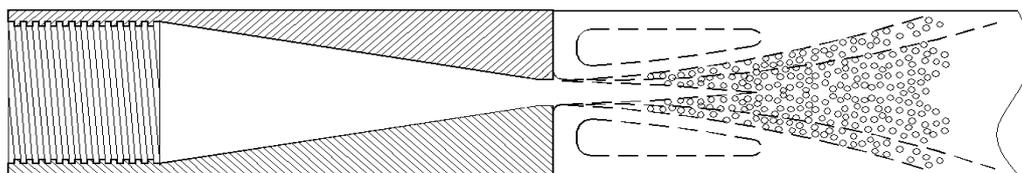


Figura 1. Formação de um jato cavitante.

O colapso destas cavidades gera ondas de alta pressão. Estas pressões foram estimadas como sendo da ordem de 69 GPa, de acordo com Tullis (1989), pressão suficiente para danificar qualquer material. Outro efeito decorrente da implosão das bolhas é o que se chama de micro-jatos. Quando uma bolha colapsa próxima a uma superfície, a distribuição de pressão em torno da cavidade é assimétrica devido à presença da superfície. À medida que o núcleo colapsa, a porção dele oposta a superfície adquire uma velocidade muito maior e a bolha colapsa internamente, formando um micro-jato através do centro da mesma. Este micro-jato possui alta velocidade. De acordo com Lohrberg e Stoffel (2001), o jato se desloca com velocidade acima de 100 m/s, capaz de deformar um material sólido.

No caso do desenvolvimento de um jato submerso, conforme se visualiza na Figura 2, o índice de cavitação ( $\sigma_j$ ) proposto para este caso é dado pela Equação 1.

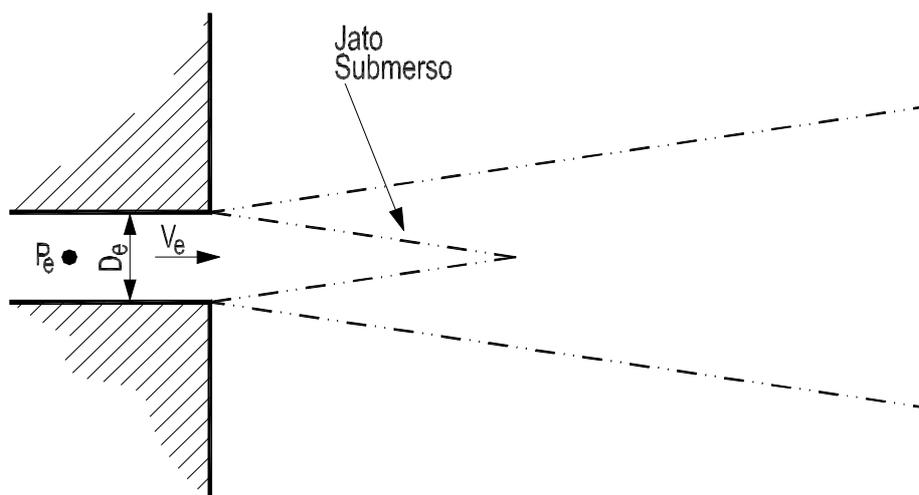


Figura 2. Identificação do local de referência para cálculo do índice de cavitação.

Fonte: Falvey (1990).

$$\sigma_j = \frac{P_e - P_v}{\rho v_e^2 / 2} \quad (1)$$

Em que  $P_e$  é a pressão no centro do jato,  $P_v$  é a pressão de vapor do líquido,  $\rho$  é a massa específica do líquido e  $v_e$  é a velocidade média do jato.

Dalfré Filho (2005) desenvolveu um equipamento tipo jato cavitante para avaliação de erosão por cavitação em concretos. Este equipamento utiliza uma bomba de altíssima pressão (em torno de 14 MPa), além de um bocal especialmente desenvolvido para gerar cavitação. Este bocal possui um orifício de estreito diâmetro e pode-se detectar erosões severas em amostras de concreto, que possuíam resistência a compressão axial de 50 a 80 MPa, em um minuto.

Jyoti e Pandita (2001) realizaram um estudo em que equipamentos foram utilizados para a ruptura da célula microbiana. O estudo compara quatro métodos de desinfecção que utilizam a cavitação, a saber, o método ultra-sônico, a homogeneização a alta velocidade, a homogeneização a alta pressão e a cavitação hidrodinâmica (Figura 3). Cada uma destas técnicas emprega um princípio diferente e diferentes combinações de velocidades de escoamento e pressões para surgimento da cavitação. As pressões empregadas variaram de 0,17 MPa a 55,20 MPa. A desinfecção apresentou taxas que variaram de 11% até 92%, comparando-se as amostras antes e depois dos ensaios. Apesar de uma tendência verificada de que com o aumento da pressão, aumenta-se a taxa de desinfecção, isto não é uma regra. Considerando-se o método de homogeneização a alta pressão, na faixa de pressões de 6,90 a 13,80 MPa, não foi verificada desinfecção. De 20,70 a 27,60 MPa verificou-se o início da desinfecção com o máximo obtido quando a pressão foi de 34,50 MPa. A taxa de desinfecção diminuiu, ao aumentar-se para além deste valor. Tal comportamento foi explicado, pois, com o aumento da pressão e conseqüente aumento da velocidade no sistema, o tempo de residência (tempo o qual o microrganismo fica exposto na zona de cavitação) também diminui. Outra possibilidade é que com o aparecimento da supercavitação, as cavidades geradas não colapsam e assim não produzem pulsos de pressão desejados para destruir os microorganismos na zona cavitacional. Comparando-se os métodos, o homogeneizador de alta pressão apresentou uma taxa de desinfecção de 79% à pressão de 34,50 MPa. A cavitação hidrodinâmica apresentou uma taxa de desinfecção de 23% com uma pressão de apenas 0,50 MPa. Comparando-se os quatro equipamentos testados, utilizando-se o critério de taxa de desinfecção por energia dissipada, a cavitação hidrodinâmica e o homogeneizador de alta velocidade se mostraram métodos mais eficientes de desinfecção. Em se levando em conta o emprego em larga escala, a cavitação hidrodinâmica representaria a melhor técnica, de acordo com os autores.

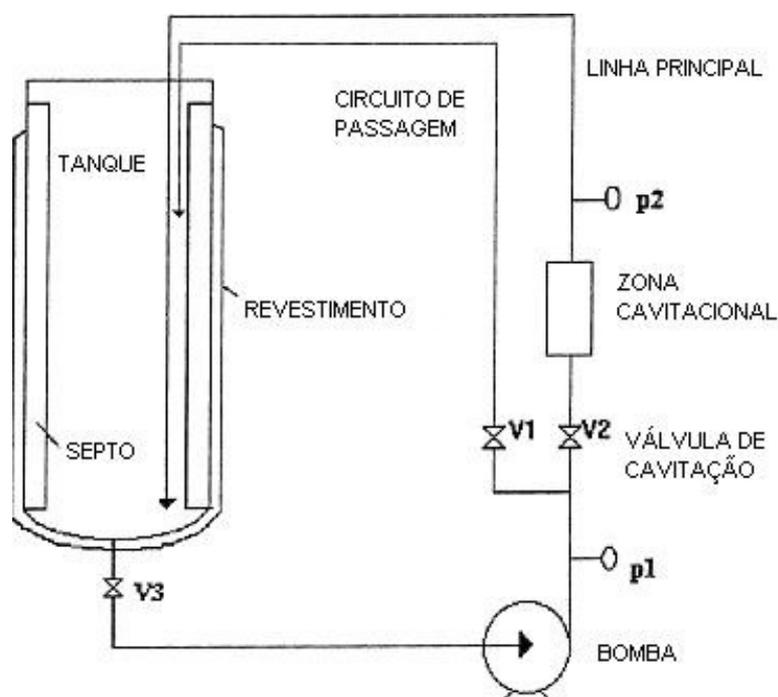


Figura 3. Esquema do sistema de vavitação hidrodinâmica de Jyoti e Pandita (2001). As válvulas V1, V2 e V3 são válvulas de comando; P1 e P2 são válvulas de pressão.

O sistema utilizado para induzir a cavitação hidrodinâmica, mostrado na Figura 3, constitui-se essencialmente de um circuito fechado com um tanque, uma bomba centrífuga de potência 5.5 kW e rotação 2900 rpm, além de válvula reguladora. O tanque tem uma capacidade de  $80 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>, um diâmetro de 390 mm e altura de 610 mm. Dois septos de 50 mm de largura foram colocados dentro do tanque para melhor homogeneização. A descarga da bomba é ramificada em duas linhas. A linha principal consiste de uma válvula V2 (Válvula de esfera), que atua como um dispositivo de cavitação devido a sua capacidade para regular o fluxo. O lado de sucção da bomba está ligado ao fundo do reservatório. Um tubo rígido de vidro ao lado desta válvula torna a observação mais fácil. Uma derivação da linha está prevista para controlar o fluxo líquido através da linha principal. As válvulas de controle (V1 e V3) são posicionadas em locais adequados para controlar as taxas de fluxos através da linha principal. O tanque é resfriado para controlar a temperatura do líquido. Os manômetros são usados para medir a pressão (P1) e (P2). As válvulas são abertas e a água circulou por uma hora, para que o valor da população bacteriana ficasse constante. Na experiência, a primeira válvula foi deixada aberta até a bomba atingir sua velocidade máxima, e depois era parcialmente ou totalmente fechada, de maneira a obter uma situação mais eficiente. A segunda válvula foi regulada para obter as diferentes pressões de ensaio. Os experimentos foram realizados às pressões de 0,17, 0,35 e 0,52 MPa. As amostras foram retiradas em intervalos de tempo regulares a partir do topo do reservatório, que foi bem homogeneizado devido à circulação do líquido pelo jato. Quando a água foi submetida ao tratamento ultra-sônico a população bacteriana diminuiu com o aumento do tempo de tratamento. No final de 1200 segundos de tratamento, 85% da desinfecção foi alcançada. Para todos os ensaios, a contagem de bactérias foi feita pelo método de contagem de placas. Como conclusão, Jyoti e Pandita (2001) relatam que a cavitação hidrodinâmica é a técnica mais eficiente em termos de desempenho energético e economia, em comparação com outras técnicas não-convencionais de desinfecção das águas.

Kalumuck e Chahine (2001) mostraram que o jato de cavitação é duas vezes mais eficiente em comparação aos dispositivos ultra-sônicos. A Figura 4 mostra um esquema da configuração funcional do circuito de teste. A água circula através de uma bomba centrífuga até uma câmara de cavitação, onde diferentes configurações de jatos podem ser testadas. A temperatura dentro da câmara foi mantida envolvendo-a num dispositivo de resfriamento, como se observa na Figura 4. Os

autores verificaram que com o controle da temperatura e um pH baixo houve uma melhora na taxa de oxidação por cavitação.

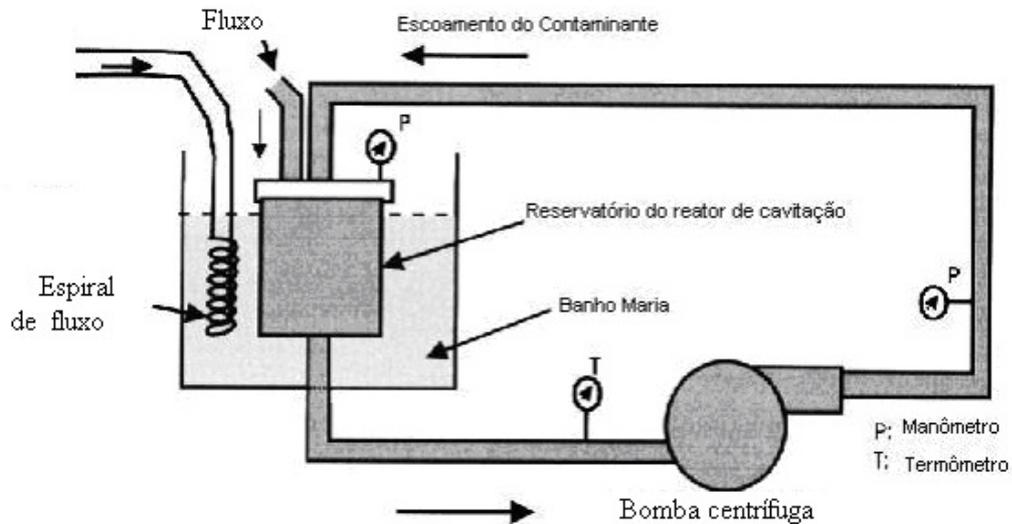


Figura 4. Esquema do circuito de desinfecção de Kalumuck e Chahine (2001).

No trabalho são discutidas as pressões empregadas, de maneira a maximizar o poder de desinfecção da cavitação. De acordo com os autores, um sistema pode funcionar com uma bomba centrífuga convencional, operando a pressões modestas. Para aplicações práticas, este é um processo mais simples, mais flexível, e facilmente escalonada ao longo de um vasto leque de vazões.

Contudo, a cavitação pode ser desenvolvida para ser muito mais intensa e agressiva. Para este caso, a utilização de bombas de maiores capacidades associadas ao desenvolvimento de jatos cavitantes induz a um elevado grau de mistura. Os resultados sugeriram um grande potencial para a utilização de cavitação em escala prática para sistemas de tratamento de resíduos e saneamento.

Kalumuck et al (2003) relatam a utilização de um jato cavitante para a remoção pelo princípio da oxidação de vários microrganismos e componentes químicos em um fluxo em circuito fechado, conforme a Figura 5. O material do equipamento é de aço inoxidável e foram utilizados vários bocais a fim de controlar a pressão do jato. De acordo com os autores, a cavitação gerada pelo jato de cavitação DYNAJET<sup>®</sup> pode aumentar o desempenho de diversas reações químicas, oxidar compostos e eliminar microorganismos.

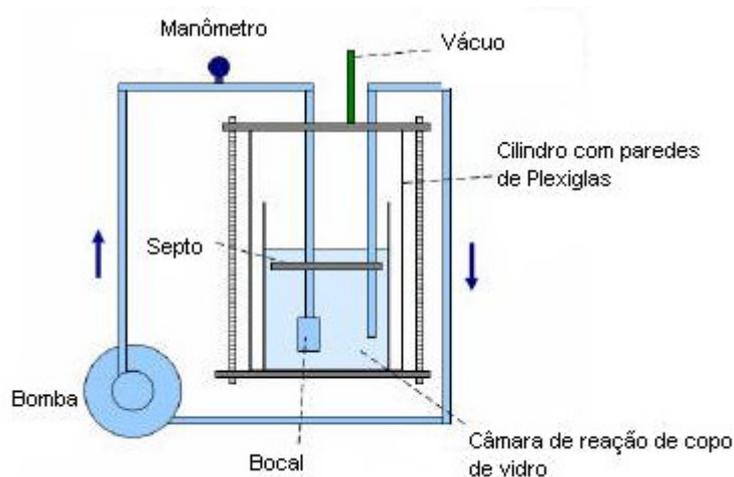


Figura 5. Esquema do banco de ensaios de Kalumuck et al (2003).

As pressões dos fluxos que entram na câmara são monitorados e controlados. A temperatura é mantida constante para um dado ensaio, com o emprego de um tanque de resfriamento. Também, o pH é mantido constante. Para pesquisar a destruição dos microrganismos foi utilizado um pequeno volume de aproximadamente  $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , recirculando no circuito de teste. A desinfecção do sistema foi comprovada através de amostras de água e foi assegurada a não formação de colônias viáveis. A desinfecção do equipamento também foi realizada.

Para testar a desinfecção de microrganismos, foi utilizada uma cepa não patogênica de *E. Coli*, a qual foi colocada em cultura até alcançar a concentração desejada. Foi inoculada no circuito uma parte e outra mantida fora do circuito para servir de controle. O líquido é distribuído no circuito. Inicialmente as amostras são colhidas periodicamente e medidas as concentrações de bactérias em placas com agar. Em seguida, incuba-se durante à noite. As colônias formadas são contadas, utilizando sempre amostras duplicadas e os dados foram analisados através de curvas de concentração pelo tempo. A influência da pressão foi testada. Diminuindo-se a pressão, aumentou-se a eficiência, tendo uma maior eficiência de remoção a 0,11 MPa (tempo de residência maior), porém o início da remoção mais rápida foi atingida com uma pressão de 0,55 MPa. Com relação à influência do volume, quanto maior o volume, melhor foi a eficiência verificada da desinfecção.

No que diz respeito aos contaminantes químicos, estes foram medidos por amostragem periódica. Os contaminantes foram transformados em compostos intermediários antes da completa oxidação dos componentes, do vapor d'água e de vários compostos inorgânicos simples. Já a medição dos contaminantes orgânicos foram feitos pela medição do Carbono Orgânico Total (COT). Quanto à influência da oxidação de substâncias, uma variedade de substâncias químicas de várias composições e classes foram oxidadas com sucesso. Foi verificada a redução de COT a partir de 220 ppm para 30 ppm em 3600 segundos e para menos de 1 ppm em mais 3600 segundos. Uma solução de 10 ppm de cloro foi exposta ao jato cavitante à pressão de 0,21 MPa. O resultado mostrou um decréscimo a partir de 11 ppm para 5 ppm em 900 segundos e uma nova redução para 2 ppm, em um total de 3600 segundos. Para o caso da oxidação do arsênio, o jato cavitante foi testado em amostras de água contendo 100 ppb de arsênio AS (III) e quantidades significativas de oxidação foram verificadas: 44% do AS (III) foi oxidado; 44% do AS (V) em 60 segundos de funcionamento, 79% em 300 segundos, e 99% em 1200 segundos.

Os autores verificaram que o jato de cavitante DYNAJET<sup>®</sup> foi mais eficiente que a ultrassônica em relação ao tempo necessário para realizar a desinfecção e a energia requerida. O DYNAJET<sup>®</sup> mostrou-se eficiente para remover uma vasta gama de contaminantes químicos da água operando com uma simples bomba de pressão. Também, reduziu rapidamente concentrações de *E. Coli* a partir de concentrações iniciais de 107 a 109 UFC/ml.

Segundo Guimarães e Barreto (2003) a presença de microrganismos e a produção de produtos tóxicos no processo tradicional de cloração para a desinfecção de água potável são considerados graves problemas. Métodos alternativos a cloração estão sendo desenvolvidos, principalmente, numa tentativa de reduzir a formação de trihalometanos e de qualquer outro produto que apresente uma ameaça para a saúde humana.

Walt e Grundlingh (2008) citam que a qualidade da água potável deve ser tal que não dê origem aos perigos para a saúde. Os contaminantes podem ser químicos ou microbiológicos. A desinfecção da água com a radiação ultravioleta UV possui potencial para ser uma alternativa à utilização de produtos químicos como o cloro, pois é eficaz para a inativação de uma variedade de microrganismos. Atualmente, o ozônio e o UV são considerados excelentes alternativas para inativar microrganismos como a *Giardia* e *Cryptosporidium spp.* Contudo essa tecnologia é muito cara, tanto para instalar quanto operar, principalmente para países subdesenvolvidos e, por conseguinte, a maioria dos tratamentos de água depende quase totalmente da cloração e da desinfecção por cloração, para que assim fique em condições de consumo. O sistema Lazur-M3 de SVAROG (Rússia) foi utilizado no projeto de Walt e Grundlingh (2008). Este sistema consiste de três partes principais que podem ser utilizadas separadamente ou em combinação uns com os outros. As três partes principais são uma unidade de cavitação hidrodinâmica, uma lâmpada ultravioleta e um gerador de ultra-som. O sistema foi posto em operação. A água que continha o

estoque de microrganismos era bombeada e o fluxo era controlado. O sistema foi concebido de maneira que era possível desligar ou remover uma ou mais das unidades de tratamento. Para testar o nível de contaminação por patógenos da água foi utilizado um rato de laboratório, cujos exames eram supervisionados por um veterinário. Os autores obtiveram melhores resultados com o tratamento UV e o ultra-som, que utilizando a cavitação hidrodinâmica. Um fator importante que deve ser levado em conta é que a cavitação hidrodinâmica, o UV e o ultra-som foram operados sob condições experimentais pré-determinadas. A cavitação hidrodinâmica operando sozinha não foi bem sucedida na inativação de bacteriófagos. Contudo, a operação em conjunto deste método com o UV ou ultra-som apresentou bons resultados, de acordo com os autores. De todos os organismos testados o *Clostridium* foi o mais resistente ao tratamento experimental testado. Isto pode ser devido ao esporo formado. As melhores reduções foram observadas após tratamento com a combinação UV e ultra-som. Todos os tipos de tratamento que incluíram UV querem isoladamente e/ou em combinação com cavitação/ultra-som apresentaram maiores reduções na contagem bacteriana do que as opções de cavitação somente ou esta em combinação com ultra-som.

Gaines et al (2007) avaliaram o desempenho de um equipamento VRTX (cavitação hidrodinâmica) numa torre de sistema de refrigeração automotiva, sem o uso de tratamento químico e sem produzir escamação, corrosão e transferência de calor. O sistema de arrefecimento é constituído por um reservatório paralelamente com dois permutadores de calor, e uma torre de resfriamento. O volume total do sistema é de aproximadamente 40 m<sup>3</sup>. A torre de resfriamento utiliza uma série de contra-fluxo de células em PVC em forma de “favo” destinada a refrigerar 8,84 m<sup>3</sup>/s de água de recirculação de 41°C para 25°C de temperatura. No programa de tratamento químico foi usado um oxidante biocida (12,5% solução de hipoclorito de sódio), um inibidor de corrosão e um não-oxidante (Isothiazolinone). Os produtos foram dosados individualmente e colocados no circuito. O controle de bactérias foi feito manualmente por análise de ATP. O limite superior de contagem de bactérias foi fixado em 100.000 UFC/ml. O tratamento por cavitação hidrodinâmica (VRTX) consiste em uma câmara de equalização de pressão de cavitação. Dentro desta câmara de cavitação, bocais são posicionados frente uns aos outros com distâncias, comprimentos e ângulos específicos. A água é bombeada para a câmara de equalização de pressão com aproximadamente 0,6481 MPa e depois canalizado para a câmara cavitação. Dentro da câmara cavitação, a água é forçada a girar em velocidades elevadas através dos orifícios. A rotação cria um alto vácuo, resultando nas micro-bolhas. A água que passa através dos bocais é fortemente acelerada girando em direções opostas. Ao sair do orifício, os fluxos opostos colidem gerando a implosão das cavidades onde a pressão aumenta. A cavitação mostrou eficácia na desinfecção da *Legionella pneumophila*. A corrosão é controlada pela manutenção do pH alcalino da água, controlando a atividade bacteriana, e eliminando substâncias químicas corrosivas. A capacidade de tratamento do VRTX é de 5x10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/s. Uma unidade de filtração também foi instalada em baixas temperaturas bem ao lado, independente do fluxo, para remover CaCO<sub>3</sub> e outros sólidos suspensos a partir da recirculação de água de refrigeração.

No trabalho de Azuma et al (2007) é apresentado um método de esterilização por jato cavitante. Água que continha bactéria foi pressurizada até a uma pressão de 105,00 MPa, através de dois bocais muito pequenos com orifícios de 0.10-0.31 mm de diâmetro. A jusante do orifício ocorria o jato cavitante. Primeiro, os efeitos das velocidades do jato e do número de cavitação sobre a taxa de esterilização da *Escherichia coli* (*E. coli*) foram examinados. Verificou-se o aumento da taxa de esterilização com a velocidade do jato. A taxa foi proporcional à terceira potência da velocidade. Todas as células de *E. coli* foram mortas por três tratamentos sucessivos em uma velocidade do jato de 355,70 m/s e a índice de cavitação  $\sigma = 0,154$ . Também, foi realizado um experimento para comparar dois tipos de bactérias *E. coli*, como típicas bactérias gram-negativas e *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*), como as típicas bactérias gram-positivas. Testes adicionais foram realizados com *Pseudomonas putida*, bactérias gram-negativas e *Bacillus halodurans*, bactérias gram-positivas. A taxa de esterilização das bactérias gram-positivas foi muito menor do que o das bactérias gram-negativas, nas mesmas condições experimentais. Bactérias gram-positivas têm uma

camada mais espessa do peptídioglicano que as bactérias gram-negativas. Esta pode ser a razão pela qual a *B. subtilis* é mais resistente ao estresse mecânico provocado pelo fluxo de cavitação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para simular o fenômeno da cavitação para o tratamento de águas residuais foi adaptado um equipamento de ensaio tipo jato cavitante mostrado na Figura 6. Até a configuração final foram feitas três adaptações para obter o melhor desempenho do equipamento.

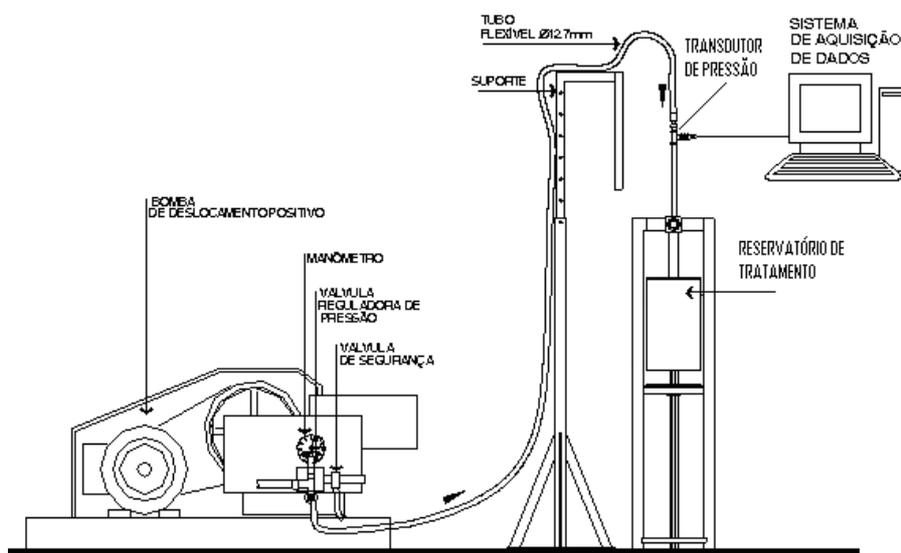


Figura 6. Esquema da bancada inicial do jato cavitante.

Fonte: Dalfré Filho (2005).

A primeira adaptação da bancada era composta de um reservatório de desinfecção, um pressurizador (necessário para manter a pressão mínima na entrada da bomba de deslocamento positivo), uma bomba de deslocamento positivo, três tubulações flexíveis, um manômetro, uma válvula de segurança e um bocal.

O reservatório é a câmara onde se produz o jato cavitante e, portanto, a desinfecção pelo fenômeno de implosão das cavidades formadas. Uma tubulação flexível conduz a água infectada da saída superior do reservatório até a entrada do pressurizador. Da saída do pressurizador até a entrada da bomba de deslocamento positivo de altíssima pressão encontra-se a segunda tubulação. Na saída da bomba de deslocamento e, portanto, na região de alta pressão, encontra-se um manômetro, uma válvula reguladora de pressão e uma válvula de segurança. A tubulação flexível de alta pressão é sustentada por um suporte. Na saída da tubulação, encontra-se um bocal de geometria cônica de  $132^\circ$  e orifício de 1,50 mm (Figura 7), determinado como de melhor eficiência por Dalfré Filho (2005). Constitui-se, portanto, de um sistema fechado, em que a água contaminada é recirculada.

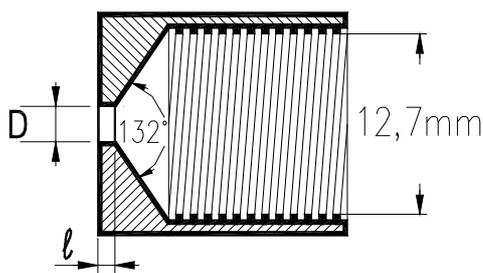


Figura 7. Corte esquemático do bocal empregado e detalhe da saída.

Fonte: Dalfré Filho (2005).

Após a adaptação e a montagem do equipamento foi feito o primeiro ensaio com água limpa com a saída de água do reservatório de desinfecção na parte superior. Houve a formação de bolsas de ar na tubulação, assim, as tubulações foram encurtadas e foi alterada a saída do reservatório. Na Figura 8 encontra-se a configuração final do equipamento. Foi adotada uma pressão de trabalho de, no máximo, 4,00 MPa, pois a configuração em sistema fechado do equipamento obrigou a diminuição da pressão aplicada ao sistema.

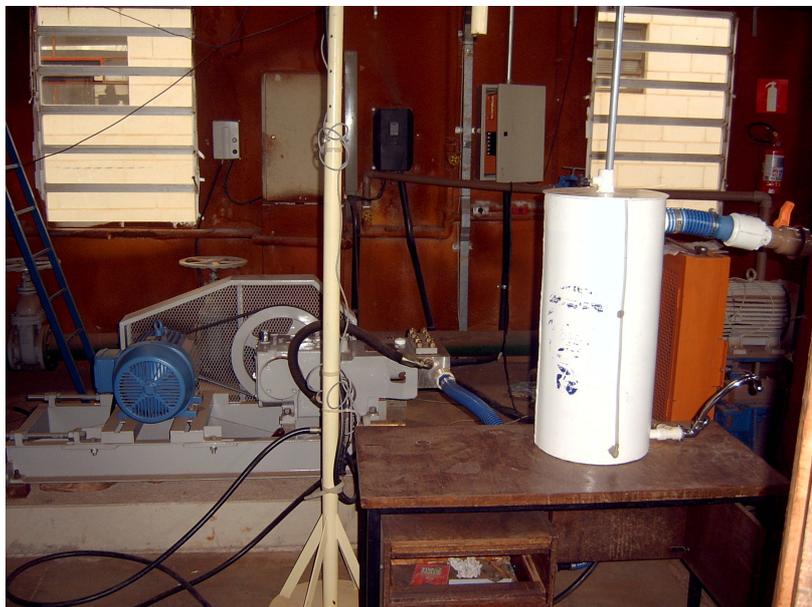


Figura 8. Configuração final do equipamento.

A Figura 9 apresenta um esquema do equipamento. A tubulação flexível de 50,80 mm conduz a água infectada da saída inferior do reservatório até a entrada do pressurizador. Da saída do pressurizador para a entrada da bomba de deslocamento positivo de altíssima pressão encontra-se a segunda tubulação de 20,40 mm. Na saída da bomba de deslocamento e, portanto, na região de alta pressão, encontra-se um manômetro, uma válvula reguladora de pressão e uma válvula de segurança. A tubulação flexível de alta pressão de 12,70 mm é sustentada por um suporte. Na saída da tubulação, encontra-se o bocal (Figura 7).

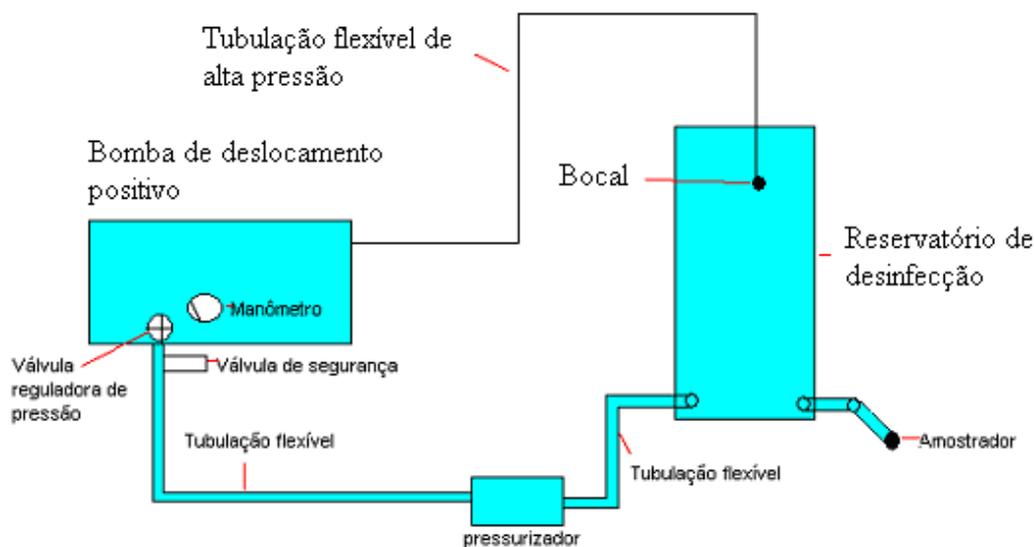


Figura 9. Esquema da bancada de testes utilizada neste trabalho.

Utilizando-se o sistema apresentado na Figura 9, realizaram-se os ensaios de desinfecção. Para os ensaios de desinfecção, foi utilizada a contagem de células viáveis da *E. coli* não patogênica, antes e depois dos testes, empregando-se as Cartelas de Colilert®. Este sistema reagente apresenta uma formulação específica que otimiza o desenvolvimento rápido dos microrganismos. Esta formulação é específica para o desenvolvimento da bactéria *E. coli* em água doce e tratada. Foram realizados dois testes microbiológicos para cada tempo de ensaio, sendo o resultado apresentado como a média dos resultados individuais.

Para cada teste microbiológico, testes físico-químicos adicionais eram feitos. As amostras físico-químicas foram analisadas empregando termômetro, condutivímetro, turbidímetro, pHmetro, oxímetro e alcalinidade. Assim, verificaram-se nos diferentes tempos de testes a temperatura, a turbidez, o oxigênio dissolvido e a alcalinidade.

Inicialmente, procedeu-se a decloração da água limpa retirada da instalação hidráulica predial de água fria do Laboratório. Em seguida, as cepas da *E. coli* eram introduzidas na água isenta de cloro. Adicionava-se, então, a água contaminada dos galões ao reservatório de desinfecção dos ensaios. O equipamento era ligado e a cada novecentos segundos, as amostras eram retiradas para as análises físico-químicas e biológicas. Naturalmente, antes de se realizar os testes, as amostras tiveram as primeiras análises (tempo 0). A eficiência do equipamento era verificada comparando-se a contagem das células viáveis antes e depois dos testes.

Procedeu-se, então a retirada de amostras. Retirou-se 2 amostras no tempo zero (T0), uma de 100ml para análise microbiológica e uma outra para a análise físico-química. Mediu-se a temperatura da amostra T0, o oxigênio dissolvido e o pH do frasco para a análise físico-química. Ligou-se a bomba de pressurização; ligou-se a bomba de deslocamento positivo de altíssima pressão, aumentando-se a pressão lentamente para 4,00 MPa.

Após 900 segundos de funcionamento, retirou-se através do amostrador um frasco de 100ml para análise microbiológica e um frasco para a análise físico-química. Mediu-se a temperatura, o oxigênio dissolvido e o pH da amostra T1 do frasco para a análise físico-química. Realizou-se o mesmo procedimento para os tempos T2 e T3.

## RESULTADOS E ANÁLISE

O parâmetro ou índice de cavitação é definido pela Equação (1). Considerando-se um valor da temperatura da água de 20°C como referência, obtém-se pressão de vapor  $P_v$  igual a 3250 Pa e massa específica da água  $\rho$  igual a 997 Kg/m<sup>3</sup>. Foi adotado um valor de pressão de referência máxima no transdutor de 4,00 MPa para realização dos ensaios, pois este valor está próximo ao máximo da pressão de operação da bomba na condição de circuito fechado. A vazão foi calculada em 1,47x10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s. Calculando-se o valor da velocidade do jato de 46,82 m/s, resulta em um índice de cavitação  $\sigma$  igual a 2,58.

### Análises microbiológicas e físico-químicas

Os resultados obtidos estão no Quadro 1. Nota-se que houve uma redução, ao longo do tempo, do número de células viáveis. Esta redução, no fim dos tempos dos testes, ficou em torno de 1 log. Para fins de desinfecção, de acordo com os procedimentos do LABSAN, o valor ideal seria em torno de 2 log. Uma porcentagem maior de remoção deverá ser conseguida aumentando as pressões de ensaio e aumentando-se o tempo de ensaio. Dada a inviabilidade, nesta etapa, de aumentarem-se as pressões disponíveis do equipamento, devido à configuração do sistema fechado, novos testes com um tempo maior de ensaios foram realizados.

No Quadro 2 são apresentados os resultados nos diferentes tempos de ensaio. Nota-se que houve alteração da temperatura, turbidez e cor, ao longo dos testes com o equipamento tipo jato cavitante.

Quadro 1. Resultados do teste microbiológico.

<b>Tempo</b> (segundos)	<b>Quantificação de <i>Escherichia coli</i> *</b> (NMP – Número Mais Provável / 100 ml de água)
0	1,1 x 10 <sup>8</sup> NMP / 100 ml
900	9,8 x 10 <sup>7</sup> NMP / 100 ml
1800	6,8 x 10 <sup>7</sup> NMP / 100 ml
2700	2,5 x 10 <sup>7</sup> NMP / 100 ml

\* Segundo metodologia do substrato cromogênico – Sistema Colilert®

Quadro 2. Resultado dos testes físico-químicos.

<b>Teste</b>	<b>T0</b>	<b>T900</b>	<b>T1800</b>	<b>T2700</b>
<b>Temperatura</b>	24°C	28°C	34°C	40°C
<b>Condutividade</b>	188 µs	204 µs	218 µs	244 µs
<b>OD</b>	7,29 mgO <sub>2</sub> /l	6,35 mgO <sub>2</sub> /l	5,20 mgO <sub>2</sub> /l	4,75 mgO <sub>2</sub> /l
<b>Turbidez</b>	1,39 NTU	22,0 NTU	22,8 NTU	23,3 NTU
<b>Cor</b>	30 Pt-Co	195 Pt-Co	200 Pt-Co	214 Pt-Co
<b>pH</b>	7,94	7,80	7,81	7,86
<b>Alcalinidade</b>	25,3 mgCaCO <sub>3</sub> /l	29,9mgCaCO <sub>3</sub> /l	27,6 mgCaCO <sub>3</sub> /l	25,3 mgCaCO <sub>3</sub> /l

Verifica-se, no processo, uma grande quantidade de energia liberada na forma de calor, pois houve um aumento de temperatura de 24°C para 40°C. Tal variação não influenciou os resultados de remoção pelo fenômeno da cavitação, pois as bactérias tipo *E. coli* são termotolerantes até 45°C.

Os parâmetros de cor e turbidez foram afetados, pois o recipiente de ensaios foi produzido em ferro-fundido, revestido em epóxi. Com o surgimento de alguns pontos de ferrugem houve alteração destes parâmetros. De toda forma, não há influencia destes parâmetros no que se refere a remoção pelo fenômeno da cavitação. Na seqüência dos ensaios, procedeu-se aos testes, com até duas horas de duração.

No Quadro 3, podem-se visualizar os resultados obtidos do tratamento de desinfecção da com o emprego do equipamento tipo jato cavitante, para os teste com duração de até 2 horas (7200 s).

Quadro 3. Resultado dos testes microbiológicos.

<b>Tempo</b> (segundos)	<b>Quantificação de <i>Escherichia coli</i> *</b> (NMP – Número Mais Provável / 100 ml de água)
0	6,015 x 10 <sup>7</sup> NMP / 100 ml
3600	6,31 x 10 <sup>6</sup> NMP / 100 ml
5400	2,0 NMP / 100 ml
7200	<1 NMP / 100 ml

\* Segundo metodologia do substrato cromogênico – Sistema Colilert®

Da mesma maneira, houve redução gradual da *E. coli* até o tempo de 3600 s. A partir daí, verifica-se uma remoção brusca da bactéria presente. É necessário verificar, contudo, os resultados das análises físico-químicas para as conclusões. No Quadro 4 constam os resultados das análises físico-químicas.

De acordo com os resultados do Quadro 4, houve um aumento muito alto da temperatura ao longo dos testes. Como a *E. coli* é termotolerante apenas até 45° C, a remoção, a partir de 5400s de ensaio, pode ser considerada, também, como devida ao aumento da temperatura.

Quadro 4. Resultado dos testes físico-químicos.

Teste	T0	T3600	T5400	T7200
Temperatura	25°C	43°C	49°C	56°C
Condutividade	203µs	207µs	211µs	216µs
OD	7,22 mgO <sub>2</sub> /l	2,98 mgO <sub>2</sub> /l	2,57 mgO <sub>2</sub> /l	2,16 mgO <sub>2</sub> /l
Turbidez	7,39 NTU	18,1 NTU	16,9 NTU	19,6 NTU
Cor	68 Pt-Co	181 Pt-Co	185 Pt-Co	203 Pt-Co
pH	7,71	7,59	7,49	7,58
Alcalinidade	25,3 mgCaCO <sub>3</sub> /l	23 mgCaCO <sub>3</sub> /l	24,45 mgCaCO <sub>3</sub> /l	23 mgCaCO <sub>3</sub> /l

Assim, procedeu-se a ensaio adicional, de maneira a confirmar a remoção da bactéria pelo aumento da temperatura. Os resultados são encontrados no Quadro 5.

Quadro 5. Resultado da resistência da *E. coli* pela temperatura.

TEMPO (segundos)	Quantificação de <i>Escherichia coli</i> * (NMP – Número Mais Provável / 100 ml de água)
0 – 24°C	2,142 x 10 <sup>7</sup> NMP / 100 ml
3600 – 44°C	< 1 x 10 <sup>5</sup> NMP / 100 ml
5400 – 49°C	> 2,4192 x 10 <sup>3</sup> NMP / 100 ml
7200 – 56°C	<1 NMP / 100 ml

\* Segundo metodologia do substrato cromogênico – Sistema Colilert®

Comparando-se os Quadros 3 e 5, pode-se concluir que a remoção da bactéria é devida, principalmente, ao aumento da temperatura, a partir do momento que esta atinge, aproximadamente, 50° C. Para antes deste valor, pode-se afirmar que o jato cavitante, como tratamento alternativo de desinfecção da água, elimina as células viáveis da *E. coli*. A incorporação de um sistema de refrigeração do reservatório de desinfecção eliminará a interferência da temperatura nos testes.

Uma câmara de refrigeração deve ser construída em série com o reservatório de desinfecção ou mesmo, envolvendo-o. Possivelmente, houve interferência da temperatura para os ensaios com tempo maior que 3600 segundos. A incorporação do sistema de refrigeração eliminará a interferência da temperatura nos testes.

Constata-se que não existe uma padronização para proceder a desinfecção, no que diz respeito as pressões e velocidades que devem ser empregadas, bem como o tipo e geometria do bocal empregados. Estes parâmetros influenciam fortemente o desempenho do equipamento tipo jato cavitante como verificaram Dalfré Filho e Genovez (2008). Deve-se buscar uma combinação ótima que, inclusive, deverá variar em função do tipo de patógeno presente na água. Assim, testes com diferentes patógenos devem ser realizados.

## CONCLUSÕES

Verifica-se um número crescente de pesquisas que utilizam o fenômeno da cavitação para a desinfecção de água, sendo estas pesquisas bastante atuais. Através da revisão da literatura do assunto, observa-se que este tratamento alternativo é bastante promissor. Porém, atualmente, não existe uma padronização para proceder a desinfecção, no que diz respeito as pressões e velocidades que devem ser empregadas, bem como o tipo e geometria do bocal empregados. Estes parâmetros influenciam fortemente o desempenho do equipamento tipo jato cavitante. Deve-se buscar uma combinação ótima que, inclusive, deverá variar em função do tipo de patógeno presente na água. Assim, testes com diferentes patógenos devem ser realizados.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o equipamento é viável para realizar ensaios de desinfecção. Contudo, outras adaptações são necessárias. Como o equipamento não foi, originalmente, projetado para funcionar em um sistema fechado, faz necessário trocar a configuração da válvula reguladora de pressão e da válvula de segurança, pois a nova configuração em sistema fechado inviabiliza a utilização de pressões maiores. Com estas alterações, poder-se-á utilizar pressões maiores e, então, aumentar-se a eficiência do sistema. A partir de uma gama maior de pressões, será possível determinar o tempo de residência que leve a máxima capacidade de desinfecção.

A *E. coli* é termotolerante até 45°C, passando desta temperatura o meio não é propício a sua sobrevivência. Assim, faz necessário um estudo mais detalhado do efeito da temperatura e do jato cavitante na remoção da *E. coli*, quando se emprega o jato cavitante como tratamento alternativo.

Como conclusão final, verifica-se que o equipamento tipo jato cavitante pode ser utilizado como um tratamento alternativo para a desinfecção da água. Este método evita o uso de produtos químicos como o cloro. Isso significa redução de custos na compra do produto, estoque e manuseio. Além disso, o material não é lançado para o meio ambiente. A cavitação, portanto, é um sistema “limpo” para realizar a desinfecção.

Como trabalhos futuros, a partir dos ajustes complementares, será possível verificar com o mesmo equipamento a remoção de compostos orgânicos e compostos químicos que são lançados nos corpos de água. O tratamento alternativo da água através da cavitação é um método promissor.

## AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio à pesquisa, proc. 02/10348-0 e ao Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAPEX) por auxílio à pesquisa, Programa Auxílio à Pesquisa para Docente em Início de Carreira PAPDIC, proc. 51607.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZUMA, Y.; KATO H.; USAMI, R.; FUKUSHIMA, T. (2007). *Bacterial sterilization using cavitating jet*. Journal of fluid science and technology, vol. 2, n. 1, pp.270-281, 2007.
- DALFRÉ FILHO, J.G. (2005). *Equipamento tipo jato cavitante para avaliação de desgaste por cavitação*. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. 122p. 2005.
- DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B. (2008). *Efficiency Evaluation of Cavitating Jet Apparatus*. Proc., In: 2<sup>nd</sup> International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, IAHR, Pisa, Italy, 2008.
- EPPINGA, H. (2005). *Cooling water treatment system free of chemicals*. Water and waste water International. vol 20, issue 11, nov. 2005.
- FALVEY, H.T. (1990). *Cavitation in Chutes and Spillways*. 1.ed. Denver: United States Bureau of Reclamation, 1990. 145p.
- GAINES, W. A.; KIM, B. R.; DREWS, A. R.; BAILEY, C.; LOCH, T.; FRENETTE, S.; KOONTZ, D.; WANG, W. (2007). *Controlling cooling water quality by hydrodynamic cavitation*. ASHRAE Transactions, Detroit, USA, 2007.
- GUIMARÃES, J. R.; BARRETTO, A. S. (2003). *Photocatalytic inactivation of Clostridium prefringens and Coliphages in water*. Brazilian journal of chemical engineering. Vol. 20, n.04, pp. 403 – 411, oct – dec, 2003.
- JYOTTI, K.K. and PANDIT A.B. (2001) *Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation*. Biochemical engineering journal. vol 7, p.201-212. 2001.
- KALUMUCK, K., CHAHINE, G. (2001). *The Use of Cavitating Jets to Oxidize Organic Compounds in Water*, In: 4th International Symposium on Cavitation, CAV2001, Pasadena , CA , 2001.

- KALAMUCK, K.M.; CHAHINE,G.L.; HISIAO, C. T. e CHIO, J. K. (2003). *Remediation and disinfection of water using jet generated cavitation*. Proc,. In: 5<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, 2003.
- LOHRBERG, H. and STOFFEL, B. (2001). *Measurement of cavitation erosive aggressiveness by means of structure born noise*. In: International Symposium on Cavitation (CAV2001), 4°. Session: A3.003. 2001.
- ONU. World's population reaches 6.5 billion this year, could reach 7 billion by 2012,2005, in:<http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=13379&Cr=population&Cr1=development>
- PEREIRA, D. S. P. (2002). *A directiva quadro da água: realidade e futuro*. In: III Congresso Ibérico sobre gestão e planeamento da água. 2002.
- TULLIS, J.P. (1989). *Hydraulics of pipelines - pumps, valves, cavitation, transients*. 1. ed. Ed. John Wiley and Sons. 266p. 1989.
- WALT E. V. D.; GRUNDLINGH M. (2008). *The use of UV combination with physical unit processes for the treatment of raw water in small or rural communities*. 2008, in: <http://www.svarog-uv.ru/English/vander.htm>.