



MAIARA PEREIRA ASSIS

**AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTO TIPO JATO
CAVITANTE PARA INATIVAÇÃO DE *Escherichia coli*
EMPREGANDO MÚLTIPLOS JATOS**

**CAMPINAS
2014**



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

MAIARA PEREIRA ASSIS

**AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTO TIPO JATO
CAVITANTE PARA INATIVAÇÃO DE *Escherichia coli*
EMPREGANDO MÚLTIPLOS JATOS**

**Orientador: Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho
Co-orientadora: Profa. Dra. Ana Inés Borri Genovez**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA MAIARA PEREIRA ASSIS E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOSÉ GILBERTO DALFRÉ FILHO.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Si38s Assis, Maiara Pereira, 1987-
Avaliação de equipamento tipo jato cavitante para inativação de *Escherichia Coli* empregando múltiplos jatos / Maiara Pereira Assis. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: José Gilberto Dalfré Filho.
Coorientador: Ana Inés Borri Genovez.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Cavitação. 2. Desinfecção. 3. Tratamento de água. I. Dalfré Filho, José Gilberto, 1976-. II. Genovez, Ana Inés Borri, 1953-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of a cavitating jet apparatus for inactivation of *Escherichia coli* using multiple jets

Palavras-chave em inglês:

Cavitation

Disinfection

Water treatment

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

José Gilberto Dalfré Filho [Orientador]

José Roberto Guimarães

Harry Edmar Schulz

Data de defesa: 06-05-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTO TIPO JATO CAVITANTE PARA
INATIVAÇÃO DE *Escherichia Coli* EMPREGANDO MÚLTIPLOS
JATOS

Maiara Pereira Assis

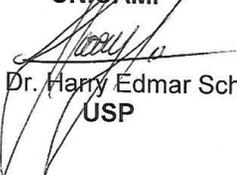
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho
Presidente e Orientador/UNICAMP



Prof. Dr. José Roberto Guimarães
UNICAMP



Prof. Dr. Harry Edmar Schulz
USP

Campinas, 06 de maio de 2014.

RESUMO

Assis, Maiara Pereira. *Avaliação de equipamento tipo jato cavitante para inativação de Escherichia coli empregando múltiplos jatos*. 2014. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

As discussões acerca da escassez de água e da sua qualidade para consumo humano são primordiais no contexto da gestão dos recursos hídricos. A água lançada na forma de esgoto doméstico e industrial nos corpos hídricos representa uma ameaça à saúde pública. Contudo, a qualidade da água pode ser melhorada controlando-se a poluição e aprimorando-se as técnicas de inativação de microrganismos e de degradação de compostos, que consistem na destruição de microrganismos e de compostos químicos excedentes. Uma das técnicas alternativas de inativação e degradação é empregar o fenômeno da cavitação. A cavitação desenvolve altas tensões de cisalhamento no interior do fluido e, além do mais, pode envolver a liberação de radical hidroxila, que auxiliam na oxidação de compostos presentes na água. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento tipo jato cavitante para a inativação de *Escherichia coli*, empregando uma nova configuração com múltiplos jatos. A nova configuração do equipamento foi testada e comparada com a configuração existente no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, na busca de uma eficiência ótima. Os resultados indicam uma dependência da inativação com a pressão do equipamento e a configuração de bocais. Um bocal com orifício único e pressões menores (até 15,00 MPa) ou um sistema de bocais tridimensional e pressões maiores (em torno de 30,00 MPa) obtiveram as melhores taxas de inativação. As eficiências energéticas do equipamento tipo jato cavitante para cada taxa de inativação foram verificadas. Neste caso, as melhores alternativas dependem do tempo de inativação requerido. O equipamento tipo jato cavitante mostrou-se como uma alternativa viável para a inativação de *Escherichia coli* e que pode ser empregado com outras técnicas de inativação.

Palavras-chave:

Cavitação; Desinfecção; Tratamento de água.

ABSTRACT

Assis, Maiara Pereira. *Evaluation of a cavitating jet apparatus for inactivation of Escherichia coli using multiple jets*. 2014. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

Discussions on the scarcity of water and its quality for human consumption are keys for the water resources management. The water released as domestic and industrial sewage in water bodies poses a threat to public health. However, the water quality can be improved by controlling pollution and by improving the techniques of inactivation of microorganisms and degradation of compounds, which consists of destruction of microorganisms and degradation of chemicals. One of the alternative techniques for inactivation and degradation is to employ the phenomenon of cavitation. Cavitation develops shear stress within the fluid and, besides, may involve the release of hydroxyl radicals, which assist the oxidation of the compounds present in the water. The objective of this study was to develop a cavitating jet apparatus to inactivate *Escherichia coli*, using a new configuration with multiple jets. The new configuration of the equipment was tested and compared with the existing configuration at the Laboratory of Hydraulics and Fluid Mechanics in the search for the optimal efficiency. The results indicated a dependence of inactivation with the pressure of the equipment and the configuration of nozzles. A single orifice nozzle and lower pressures (up to 15.00 MPa) or a system of three-dimensional nozzles and higher pressures (around 30.00 MPa) obtained the best inactivation rates. The energy efficiency of the cavitating jet apparatus in the rate of inactivation was verified. In this case, the best alternatives depend on the time required for inactivation. The cavitating jet apparatus proved to be a viable alternative to the inactivation of *Escherichia coli* and can be used along with other inactivation techniques.

Key words:

Cavitation; Disinfection; Water treatment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. CONTAMINANTES HÍDRICOS	5
3.2. TRATAMENTO DE ÁGUA	7
3.3. O FENÔMENO DA CAVITAÇÃO	10
3.3.1. FUNDAMENTOS.....	10
3.3.2. A CAVITAÇÃO.....	11
3.3.3. CAVITAÇÃO E A INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS	16
3.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
4.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO.....	45
4.2. ENSAIOS DE INATIVAÇÃO	54
4.3. MÉTODO DE ENSAIO	56
4.3.1. TESTES HIDRÁULICOS	56
4.3.2. PREPARO DE MATERIAIS	56
4.3.3. ENSAIOS.....	57
4.4. DIMENSIONAMENTOS.....	57
4.4.1. DIMENSIONAMENTOS DOS SISTEMAS DE BOCAIS	57
4.4.2. DIMENSIONAMENTOS DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS	60
4.4.3. DIMENSIONAMENTO DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO	61
4.4.4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	61
4.5. PROBLEMAS ENCONTRADOS	63
4.5.1. ENTREGA DO QUADRO ELÉTRICO	63
4.5.2. CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DA VÁLVULA REGULADORA E DE ALÍVIO PARA CONTROLE E REGULAGEM DA PRESSÃO.....	63

4.5.3. PROBLEMAS COM AS GAXETAS DA BOMBA ALTERNATIVA DE ALTA PRESSÃO	64
4.5.4. PROBLEMAS NA ESTRUTURA DE MÚLTIPLOS JATOS	66
5. RESULTADOS E ANÁLISE	69
5.1. ENSAIOS DE INATIVAÇÃO	69
5.2. RESULTADOS E ANÁLISE DOS TESTES FÍSICO-QUÍMICOS	74
5.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	76
5.4. CONCLUSÕES.....	78
6. CONCLUSÕES	79
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	79
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS	89
ANEXO A – Projeto do dimensionamento do reservatório e da tampa para permitir os ensaios com e sem serpentina de resfriamento.....	90
ANEXO B – Construção da bancada de ensaios.....	93
ANEXO C – Resultados das análises do sistema de resfriamento.	98
ANEXO D – Resultados das análises físico-químicas.....	100
ANEXO E – Resultados dos ensaios microbiológicos.....	102

*Aos meus pais (Antonio Sergio de Jesus Assis e Marcia Nunes Pereira Assis), a eles
devo tudo o que sou.*

*A meu irmão (Renato Pereira Assis, in memoriam), a quem devo orgulhar pelo resto da
minha vida.*

A meu noivo (Prof. Dr. Diego Rossi Gratieri), que me faz continuar.

Agradecimentos

- À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo) pelo financiamento desta pesquisa, concedendo a Bolsa de Mestrado (Proc. 2011/16347-4) e Auxílio à Pesquisa (Proc. 2012/09843-8).
- À instituição UNICAMP pela oportunidade de permitir o meu desenvolvimento profissional.
- Ao professor José Gilberto Dalfré Filho, por acreditar no meu trabalho, pela atenção e muita paciência com a minha pessoa. E a professora Ana Inés Borri Genovez pela dedicação ao trabalho e empenho na orientação.
- Aos docentes da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC UNICAMP: Edson Aparecido Abdul Nour e José Roberto Guimarães.
- Aos técnicos dos Laboratórios de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos e do Laboratório de Hidrologia – FEC. Carlos Alberto Alcaide, José Luiz Trinchinato, Marcelo Balbino da Silva e Jefferson Cutrim Rocha.
- Aos os técnicos do Laboratório de Saneamento - FEC, Ligia Maria Domingues, Enelton Fagnani e Fernando Pena Candello.
- Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo que da forma mais complexa ou simples possível me ajudaram em tudo que podiam.
- Aos colegas de pós-graduação, Ricardo Manca, Amanda Marchi, Francisco Schroder, Jorge Barbarotto, Leticia Paixão, Thalita Rissi, Patrícia Martins, Maria Clara Moreira, Marcela Peres, Caio Rodrigues pela amizade, risadas, conselhos e companheirismo no decorrer do curso.
- Aos alunos de iniciação científica Jr: Jefferson Almeida, Jonathan da Silva, Victor Martins e a aluna de iniciação científica Thais Omido, obrigada por todo o apoio.
- À equipe da MVCS Comércio de Válvulas e Conexões Ltda e ao Eng. Jackson Barboza, por toda a atenção dedicada as minhas perguntas e problemas relacionados às válvulas hidráulicas.
- Aos meus pais, meu irmão (em memória) e ao meu noivo pelo amor incondicional.

“Existem durante nossa vida, sempre dois caminhos a seguir: aquele que todo mundo segue, e aquele que a nossa imaginação nos leva a seguir. O primeiro pode ser mais seguro, o mais confiável, o menos crítico, o que você encontrará mais amigos... mas, você será apenas mais um a caminhar. O segundo, com certeza vai ser o mais difícil, mais solitário, o que você terá maiores críticas; mas também, o mais criativo, o mais original possível. Não importa o que você seja, quem você seja, ou que deseje na vida, a ousadia em ser diferente reflete na sua personalidade, no seu caráter, naquilo que você é. E é assim que as pessoas lembrarão de você um dia.”

Ayrton Senna da Silva

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Formação de um jato cavitante.	15
Figura 3.2. Esquema de jato hidráulico.	17
Figura 3.3. Esquema do CAV-OX [®] Cavitation Oxidation Process (Processo de Oxidação por Cavitação).	19
Figura 3.4. Configuração experimental do equipamento utilizada para cavitação hidrodinâmica. Nota: B defletores, C bomba centrífuga, J reservatório de tratamento, V1-3 válvulas esferas.	20
Figura 3.5. Configuração experimental do equipamento para cavitação ultrassônica.	21
Figura 3.6. Esquema do equipamento para cavitação hidrodinâmica.	22
Figura 3.7. (A) Configuração do equipamento do homogeneizador de alta velocidade; (B) Homogeneizador de alta pressão.	24
Figura 3.8. Configuração do tratamento por cavitação hidrodinâmica.	25
Figura 3.9. Esquema do reator ultrassônico de lodo.	26
Figura 3.10. Configuração experimental do equipamento para cavitação hidrodinâmica.	28
Figura 3.11. Desenho esquemático do reator de cavitação hidrodinâmica.	30
Figura 3.12. A- Circuito experimental do jato cavitante. B- Seção de teste com dois bocais (diâmetros: 0,1 – 0,31 mm (móveis))	31
Figura 3.13. Representação esquemática da combinação de cavitação hidrodinâmica e Fenton..	34
Figura 3.14. Configuração experimental do reator de cavitação.	35
Figura 3.15. (a) Configuração Experimental por cavitação hidrodinâmica e sistema eletrolítico. Nota: (1) Reator; (2) Entrada da água de resfriamento; (3) Saída da água de resfriamento; (4) Bomba centrífuga; (5,6) Válvulas de controle; (7) Manômetro; (8) Tubo de cavitação; (9) Ânodo; (10); Cátodo; (11) Termômetro; e (12) Linha de potência de corrente (b) Geometria do tubo de cavitação.	36
Figura 3.16. Variação do espectro UV-vis da solução de Brilliant Red X-3B, com os tratamentos simultâneos de eletrólise com a cavitação hidrodinâmica.	36

Figura 3.17. (a) Configuração experimental do equipamento para cavitação hidrodinâmica e fotocatalise. Nota: 1 tanque, 2 entrada de água de refrigeração, 3 saída da água de resfriamento, 4 bomba, 6 e 6 válvulas de controle, 7 manômetro, 8 tubo de cavitação, 9 lâmpada UV, 10 termômetro. (b) geometria do tubo de cavitação: L comprimento do tubo de cavitação, l comprimento da garganta do tubo, d interior do diâmetro do tubo.	37
Figura 3.18. Resultado da variação do espectro UV-vis da solução de RR2, com os tratamentos simultâneos de fotocatalise e cavitação hidrodinâmica.	38
Figura 3.19. Esquema do equipamento de inativação usando o jato cavitante.	40
Figura 3.20. Resultados de degradação do azul de metileno a pressão de 14 MPa.	41
Figura 3.21. Resultado para inativação de <i>E. coli</i> com diferentes geometrias de bocais: circular, cônico de 20° e cônico de 132°.	42
Figura 3.22. Resultado para inativação de <i>E. coli</i> com bocal cônico de 132°, nas pressões de 4,8, 10 e 12 MPa.	42
Figura 4.1. Esquema da bancada de tratamento.	46
Figura 4.2. Dimensões características do projeto do reservatório de reação em aço inox.	47
Figura 4.3. Reservatório de reação em aço inox: (a) montagem sem a serpentina de resfriamento; (b) montagem com a serpentina de resfriamento.	47
Figura 4.4. Fotografia da bancada de tratamento.	48
Figura 4.5. Esquema do sistema de bocais tridimensional.	51
Figura 4.6. Esquema do sistema de bocais com múltiplos jatos.	51
Figura 4.7. Esquema do bocal cônico de 132°.	52
Figura 4.8. Dimensões da serpentina de resfriamento em aço inox.	53
Figura 4.9. Fotografia da serpentina em aço inox.	53
Figura 4.10. Esquemática das etapas de ensaios.	55
Figura 4.11. Plaqueta de identificação da bomba alternativa.	58
Figura 4.12. Indicada pela seta vermelha a válvula de segurança e pela seta azul a válvula reguladora.	64
Figura 4.13. Bocal orifício 0,5 mm com entupimento.	65

Figura 4.14. Particulado causador do entupimento e a gaxeta da bomba de alta pressão danificada.	65
Figura 4.15. Avarias na estrutura de múltiplos jatos.	66
Figura 4.16. Suporte dos bocais novo e reforçados.	66
Figura 5.1. Resultados de inativação a 15 MPa nas duas configurações.	70
Figura 5.2. Resultados de inativação a 20 MPa nas duas configurações.	70
Figura 5.3. Resultados de inativação a 30 MPa nas duas configurações.	71
Figura 5.4. Resultados de inativação com a configuração tridimensional.	72
Figura 5.5. Resultados de inativação com o bocal único.	72
Figura 5.6. Porcentagem de inativação de todas as faixas de pressão e configurações de bocais ensaiadas.	73
Figura A01. Dimensões do reservatório, braço de força e suporte.	90
Figura A02. Braço de força e suporte.	91
Figura A03. Detalhes da serpentina e da tampa, para intercambialidade entre reservatório sem sistema de refrigeração e com sistema de refrigeração.	92
Figura B01. Bomba de alta pressão.	94
Figura B02. Construção da base de concreto para a bomba de alta pressão.	94
Figura B03. Instalação dos chumbadores e concretagem final.	95
Figura B04. Alinhamento e posicionamento do skid da bomba de alta pressão.	95
Figura B05. Instalações elétricas e quadro de força para a bancada de tratamento.	95
Figura B06. Instalações hidráulicas (a) de alta pressão; (b) baixa pressão.	96
Figura B07. Válvula reguladora de pressão (a esquerda) e válvula de segurança de alta pressão (a direita).	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Legislações Federais e Estaduais para enquadramento da água e índice de potabilidade.	6
Tabela 4.1. Componentes dos equipamentos adquiridos e suas características.	49
Tabela 4.2. Equipamentos dos testes físico-químicos empregados.	54
Tabela 4.3. Tabela Pressão x Vazão em função do diâmetro do bocal (PROMINAS)	59
Tabela 4.4. Adimensionais importantes para o equipamento tipo jato cavitante.	61
Tabela 4.5. Temperaturas finais do sistema de resfriamento projetado.	62
Tabela 5.1. Resultados físico-químicos finais dos ensaios de inativação.	74
Tabela 5.2. Variação dos parâmetros físico-químicos resultantes dos ensaios de inativação.	75
Tabela 5.3. Cálculo da eficiência energética com a configuração tridimensional.	77
Tabela 5.4. Cálculo da eficiência energética com a configuração bocal único.	77
Tabela 5.5. Resultados da eficiência energética de inativação.	78
Tabela B01. Equipamentos, materiais e serviços adquiridos para a pesquisa.	93
Tabela C01. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 15 MPa.	98
Tabela C02. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 15 MPa.	98
Tabela C03. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 30 MPa.	98
Tabela C04. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 30 MPa.	99
Tabela C05. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 20 MPa.	99
Tabela C06. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 20 MPa.	99
Tabela D01. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 15 MPa.	100
Tabela D02. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 15 MPa.	100
Tabela D03. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 30 MPa.	100

Tabela D04. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 30 MPa.....	100
Tabela D05. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 20 MPa.....	101
Tabela D06. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 20 MPa.	101
Tabela E01. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 15 MPa.	102
Tabela E02. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 15 MPa.....	102
Tabela E03. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 30 MPa.....	103
Tabela E04. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 30 MPa.	103
Tabela E05. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 20 MPa.	104
Tabela E06. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 20 MPa.....	104

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

COT - Carbono Orgânico Total

COV - Composto Orgânico Volátil

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

EDTA - ácido etilenodiamino tetra-acético (*Ethylenediaminetetraacetic acid*)

FEC - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

LABSAN - Laboratório de Saneamento

LHMF - Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos

NMP - Número Mais Provável

OMS - Organização Mundial da Saúde (WHO - World Health Organization)

pH - potencial hidrogeniônico

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

POA - Processo Oxidativo Avançado (advanced oxidation processes)

UFC - Unidades formadoras de colônia (colony-forming unit)

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

UV - ultravioleta

USEPA - United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

A : área $(M)^0 (L)^2 (T)^0$

c : celeridade $(M)^0 (L) (T)^{-2}$

C_f : Concentração Final de *E. coli* (UFC/mL)

C_i : Concentração Inicial de *E. coli* (UFC/mL)

D : diâmetro do orifício $(M)^0 (L) (T)^0$

D_{embolo} : diâmetro do êmbolo $(M)^0 (L) (T)^0$

EE : Eficiência energética (UFC/J)

P : Potência do equipamento (W)

P_d : pressão a jusante $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

P_e : representa a pressão no interior do núcleo do jato $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

P_{max} : pressão máxima $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

P_u : pressão montante $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

P_v : pressão relativa de vapor $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

Q : vazão $(M)^0 (L)^3 (T)^{-1}$

Q_f : vazão final $(M)^0 (L)^3 (T)^{-1}$

Q_{max} : vazão máxima $(M)^0 (L)^3 (T)^{-1}$

T : temperatura $(M)^0 (L)^0 (T)^0 (K)$

T : Tempo de tratamento $(M)^0 (L)^0 (T)$

Ma : número de Mach $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

N_{max} : potência máxima no eixo da bomba $(M) (L)^2 (L)^{-3}$

V : velocidade média $(M)^0 (L) (T)^{-2}$

V_e : velocidade no interior do jato $(M)^0 (L) (T)^{-2}$

∇ : Volume tratado $(M)^0 (L)^3 (T)^{-1}$

η_{max} : rotação máxima no eixo da bomba

ρ : massa específica $(M) (L)^{-3} (T)^0$

σ : índice de cavitação $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

1. INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2011) relata que o desafio para a saúde global é a prevenção de doenças relacionadas à qualidade da água. Dois milhões de mortes anuais são atribuídas às más condições da água, de saneamento e de higiene no mundo, de acordo com o órgão. Ainda, 4% dos casos mundiais de doenças poderiam ser evitados com ações de melhoria em saneamento básico.

O Relatório sobre Desenvolvimento Humano do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2006) aponta que, 1,2 bilhões de pessoas eram atingidas diretamente pela escassez de água e 2,6 bilhões não contavam com saneamento básico. Ainda, de acordo com o Relatório, até 2025, 2,7 bilhões de pessoas devem ser atingidas pela escassez de água.

O consumo de água de qualidade é primordial para a sobrevivência do homem. Frente ao cenário atual de escassez e de má qualidade da água disponível, desenvolver tecnologias adequadas para tratamento é um grande desafio. Uma técnica alternativa de tratamento, que se mostrou eficaz de acordo com Kalumuck *et al.* (2003), Jyoti e Pandit (2001 e 2003), Balasundaram e Harrison (2006), Abdala Neto (2006), Azuma *et al.* (2007), Gaines *et al.* (2007), Wang *et al.* (2011a e 2011b), Assis *et al.* (2013) é o emprego do fenômeno da cavitação. A cavitação é um fenômeno de vaporização do líquido análogo à ebulição, porém que ocorre devido ao abaixamento da pressão do escoamento, atingindo o valor da pressão de vapor, mantendo a temperatura constante. A implosão das bolhas ou cavidades que são formadas gera altas tensões de cisalhamento no líquido e pode, também, gerar radicais hidroxila, que auxiliam na oxidação de compostos presentes na água.

Uma das formas de gerar a cavitação é com o emprego do equipamento tipo jato cavitante, de acordo com Dalfré Filho (2002), Dalfré Filho (2005) e Dalfré Filho e Genovez (2009). O equipamento tipo jato cavitante utiliza uma bomba de alta pressão e bocais especialmente projetados para a formação de um jato cavitante de alta velocidade.

Com o aprimoramento das configurações de bocais e o aumento das pressões que geram o jato cavitante de alta velocidade, pode-se reduzir o tempo para a inativação das bactérias, ao mesmo tempo em que se se pode obter um consumo eficiente de energia elétrica.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é desenvolver um equipamento tipo jato cavitante com múltiplos jatos para a inativação de microrganismos presentes em água. Para tanto, os parâmetros que definem a formação do jato cavitante, a saber, pressão, velocidade e configurações de bocais serão estudados e testados em bancada. Para os testes de inativação será empregada a bactéria *Escherichia coli*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as condições para o desenvolvimento do fenômeno da cavitação e o processo de inativação quando uma massa de água contaminada é submetida ao jato cavitante e os equipamentos que podem viabilizar este tratamento.

3.1. CONTAMINANTES HÍDRICOS

Richter e Netto (1991) citam que a água é uma substância complexa, assim como as impurezas que se apresentam nas águas naturais, várias delas inócuas, poucas desejáveis e algumas extremamente perigosas. Entre as impurezas nocivas encontram-se vírus, bactérias, parasitas, substâncias tóxicas e, até mesmo, elementos radioativos, causando doenças relacionadas com a água.

Segundo a Lei 6.938/81 que dispõe sobre a política nacional de meio ambiente, a poluição é definida como toda alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas que possa constituir prejuízo à saúde, à segurança e ao bem-estar das populações e, ainda, possa comprometer a biota e a utilização dos recursos para fins comerciais, industriais e recreativos.

As formas de tratamento tradicionais para tornar a água potável muitas vezes também geram resíduos que são prejudiciais à saúde. Assim, a nível federal, os contaminantes previstos nas legislações devem ser controlados, analisados e enquadrados em relação à potabilidade na PORTARIA MS Nº 2914/2011 e em termos de lançamento de efluentes segundo a CONAMA 357/2005 e 430/2011. A Portaria 2914 do Ministério da Saúde estabelece os procedimentos e as responsabilidades relativos ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (requisitos necessários para a água ser potável). As Resoluções do CONAMA dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. O Decreto 8.468/1976, dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Para a variável química da condutividade elétrica é seguido o padrão da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), onde valores superiores a 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ indicam ambientes

impactados. Na Tabela 3.1 é possível observar alguns parâmetros de qualidade da água contidos nas legislações federais e estaduais para o enquadramento do corpo d'água.

Tabela 3.1. Legislações Federais e Estaduais para enquadramento da água e índice de potabilidade.

LEGISLAÇÕES VARIÁVEIS	PORTARIA 2914 2011	CONAMA 430/2011				8468/1976
		classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	
<i>Temperatura</i>	nc	<40°C**	nc	nc	nc	<40°C
<i>Oxigênio Dissolvido</i>	nc	>6 mg/L O ₂	>5 mg/L O ₂	>4 mg/L O ₂	>2 mg/L O ₂	>5 mg/L O ₂
<i>pH</i>	6 a 9,5	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	5 a 9
<i>Turbidez</i>	<5 NTU	<40 NTU	<100 NTU	<100 NTU	nc	nc
<i>Condutividade</i>	nc	nc	nc	nc	nc	nc
<i>E. coli (VMP)***</i>	Ausência em 100 mL	nc	nc	nc	nc	nc

Notas: * Valores considerados para águas doces.

** Valor considerado para lançamento de efluentes.

*** Valor máximo permitido.

nc = Nada Consta.

A importância de um tratamento adequado da água está nas doenças e contaminantes químicos relacionadas ao abastecimento de água, sendo assim de grande importância para a saúde pública. A falta de abastecimento de água potável e a falta de coleta segura de esgotos causam muitas doenças que geram e agravam problemas sérios de saúde pública.

3.2. TRATAMENTO DE ÁGUA

A água para consumo, no Brasil, precisa de algum método de tratamento que adeque as suas características aos padrões de potabilidade estabelecidos pela PORTARIA MS N° 2914/2011. Os processos de tratamento a serem empregados dependem da qualidade, da quantidade de água a ser tratada e qual será a sua destinação e uso.

Libânio (2008) define que o tratamento de água consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias que venham a trazer riscos à saúde humana, que estejam presentes nas águas naturais, com uma instalação, operação e manutenção de baixo custo, gerando o menor impacto ambiental às áreas circunvizinhas.

As formas de tratamento de água se apresentam das mais simples às mais complexas. Uma estação do tipo convencional de tratamento de água compreende geralmente os seguintes processos de tratamento: desinfecção, coagulação, floculação, decantação, filtração, correção do pH, fluoretação, adição de produtos químicos auxiliares, reservação e distribuição. Podem variar de uma estação de tratamento para outra as suas etapas e tecnologias de tratamento empregadas.

As vantagens e desvantagens de um sistema de tratamento convencional dependem, segundo Di Bernardo e Di Bernardo (2005a), das características da comunidade de consumo, condição importantíssima em países em desenvolvimento, pois há restrições à utilização das tecnologias de tratamento. A sustentabilidade do sistema como um todo passa a desempenhar papel importantíssimo para que seja continuamente produzida água com qualidade satisfatória e em quantidade compatível com as necessidades durante o período de projeto para o qual o sistema será construído. Ainda segundo os autores citados, é função de vários fatores, destacando-se a cultura e os costumes da população, capacidade de endividamento da comunidade, existência de mão-de-obra qualificada, disponibilidade de materiais de construção e de produtos químicos na região, vazão de água a ser tratada, confiabilidade na operação e manutenção, padrão de potabilidade, etc.

Além do processo de tratamento convencional, no qual a desinfecção da água é realizada por cloração, existem os tratamentos de água não convencionais, destacando-se os tratamentos de água por: ozonização, sonólise, eletrólise, fotólise e membrana filtrante, que podem ser

compostos de um processo único, ou podem ser interativos, gerando um efeito sinérgico com outros tipos de tratamento, também alternativos.

Segundo Daniel *et al.* (2001) o desinfetante químico mais utilizado na desinfecção para a produção de água potável é o cloro (Cl_2), líquido ou gasoso. Ele tem sido empregado como desinfetante primário na vasta maioria das estações que trata água superficial ou subterrânea, tanto como pré-desinfetante ou como pós-desinfetante (manutenção residual na rede). Outros desinfetantes químicos são considerados alternativos, destacando-se hipoclorito de sódio ou de cálcio, o ozônio (O_3), o dióxido de cloro (Cl_2), o permanganato de potássio (KMnO_4), a mistura ozônio/peróxido de hidrogênio ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$), o íon ferrato (FeO_4^{2-}), o ácido peracético (CH_3COOOH) e outros agentes em fase de pesquisa e desenvolvimento, como sais de prata, sais de cobre, detergentes, etc.

Ainda segundo Daniel *et al.* (2001), o ozônio não tem sido muito empregado no Brasil, mas é bastante empregado na Europa e em muitos pequenos sistemas de tratamento de água nos Estados Unidos, para desinfecção e oxidação. Em conjunto com a água oxigenada, é chamado de processo peroxônio. O ozônio é um potente oxidante, capaz de oxidar compostos orgânicos e inorgânicos na água, os quais exercerão uma demanda do oxidante antes de ocorrer a desinfecção. Decompõe-se na água, espontaneamente, por meio de mecanismos complexos que envolvem a geração de radical hidroxila.

Segundo Santiago Neto (2006) no caso do emprego da técnica de ultrassons, estes são ondas mecânicas que se propagam através de qualquer meio material com frequência maior que 16 kHz. Os ultrassons respondem por uma região do espectro acústico, o qual é subdividido em três regiões principais: a faixa dos infrassons (menores que 16 Hz; a faixa dos sons (maiores que 16 Hz e menores que 16 kHz); e de alta frequência (maiores que 16 kHz). Os efeitos químicos provocados pelos ultrassons ocorrem devido ao fenômeno da cavitação acústica, o qual engloba a nucleação, crescimento e colapso e bolhas transientes em líquidos expostos à irradiação com ondas ultrassônicas de baixa frequência.

Korn *et al.* (2003) cita que a potencialidade de geração de espécies muito reativas em soluções submetidas a ultrassons pode resultar em impedimentos para aplicação de banhos de ultrassom em procedimentos de tratamento de amostras, principalmente quando é desejada a determinação da concentração de compostos orgânicos e de ânions nestas amostras. Dada a

elevada reatividade dos radicais livres, esses podem interagir com compostos orgânicos, gerando novas espécies que dificultariam a interpretação dos resultados.

Segundo Rodrigues *et al.* (2001), a eletrólise é um processo no qual dois eletrodos (condutores metálicos ou de primeira classe) são introduzidos numa solução (eletrólito ou condutor de segunda classe) e neste sistema é aplicada uma corrente elétrica contínua, que age ocasionando a decomposição química deste eletrólito. Ao eletrodo que cede elétrons dá-se o nome de ânodo, onde ocorre a oxidação, e àquele que recebe elétrons, cátodo, onde ocorre a redução. As vantagens dos tratamentos por eletrólise são que requerem equipamentos simples e de fácil operação, aumentam a capacidade de tratamento do processo físico-químico tradicional, possibilitando o tratamento de compostos complexos e permite o atendimento à legislação ambiental com equipamentos de pequeno porte, utilizando área reduzida. Já as desvantagens são: a necessidade do uso da eletricidade e a substituição regular dos eletrodos consumidos.

Segundo Di Bernardo e Di Bernardo (2005b), a radiação ultravioleta (UV) inativa microorganismos pela adsorção da luz, pois causa uma reação fotoquímica que altera os componentes moleculares essenciais às funções celulares. Assim que a UV penetra a parede celular dos microrganismos, a energia presente reage com ácidos nucléicos e outros componentes vitais das células, causando prejuízo ou morte das células. Há evidências de que a UV é eficaz na inativação de pequenos microrganismos (vírus e bactérias); porém, as dosagens requeridas para inativação de protozoários, como *Giardia* e *Cryptosporidium*, são várias vezes maiores que aquelas necessárias para a inativação de bactérias e vírus. Por isso, na maioria das aplicações, a radiação UV é usada em conjunto com o ozônio ou o peróxido de hidrogênio.

Segundo Philippi JR *et al.* (2005), o processo de separação por membranas consiste em fazer a água passar por uma membrana mediante a aplicação de pressão externa ou potencial elétrico. É um processo físico. Não ocorrem reações químicas ou biológicas. As membranas filtrantes têm substituído sistemas convencionais de tratamento nos países desenvolvidos, tendo em vista os limites mais rígidos estabelecidos pela legislação, quanto à presença de patógenos e de contaminantes químicos na água de abastecimento. O maior problema do sistema de separação por membrana é a redução da vazão de entrada, em torno de 30%, causada pelos sólidos removidos. Nos projetos essa redução precisa ser considerada.

Segundo Richter e Netto (1991), seja qual for a forma de tratamento utilizada para melhorar a qualidade da água bruta, é sempre desejável a construção e operação de instalações-piloto, tanto para escolher o tipo de tecnologia a ser utilizada quanto para definir parâmetros operacionais e de projeto. A capacitação dos operadores do tipo tratamento é indispensável para garantir o seu funcionamento adequado. Ademais, deve-se realizar estudos de tratabilidade para ajustar os parâmetros de projeto e de operação sempre que for observado que a água não atende ao padrão de potabilidade.

3.3. O FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

3.3.1. FUNDAMENTOS

A mecânica dos fluidos é a ciência que estuda o comportamento dos fluidos em repouso e em movimento. Fluido é toda substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento.

Os tipos de força que agem sobre as partículas fluidas são forças de superfície (pressão, tensão de cisalhamento), que são geradas pelo contato com outras partículas ou com superfícies sólidas, e forças de campo (gravidade e eletromagnética), que independem do contato.

Para a compreensão e aplicação da mecânica dos fluidos, segundo Fox et al. (2006), são necessárias as seguintes leis básicas:

1. A conservação da massa;
2. A conservação da quantidade de movimento;
3. A conservação da quantidade de movimento angular;
4. A primeira lei da termodinâmica;
5. A segunda lei da termodinâmica.

Também é necessário definir algumas propriedades dos fluidos para que o fenômeno da cavitação seja compreendido. Fox *et al.* (2006) citam que a massa específica (que é a quantidade de massa de uma substância por uma unidade de volume), é uma função da temperatura. Para a maioria dos líquidos a massa específica diminui com o aumento da temperatura.

Outra propriedade necessária é a pressão de vapor de um líquido, que é a pressão parcial do vapor em contato com o líquido saturado, a uma dada temperatura. Quando a pressão em um líquido é reduzida abaixo da pressão de vapor, o líquido pode passar abruptamente para a fase vapor.

3.3.2. A CAVITAÇÃO

Segundo Fox *et al.* (2006) a cavitação ocorre quando bolhas ou bolsas de vapor se formam em um escoamento líquido como consequência de reduções locais de pressão (por exemplo, nas extremidades das pás da hélice de um barco a motor). Dependendo do número e da distribuição de partículas no líquido aos quais pequenas bolhas de gás ou de ar não dissolvido podem se agregar, a pressão no local de início da cavitação pode ser igual ou menor que a pressão de vapor do líquido. Essas partículas agem como pontos de nucleação para iniciar a vaporização.

Líquidos puros podem suportar grandes pressões negativas. Por exemplo, em água destilada um valor de pressão de $-6,08$ MPa pode ser suportada antes que as “rupturas” e a vaporização do líquido ocorram. Ar não dissolvido está invariavelmente presente próximo à superfície livre da água doce ou da água do mar, de forma que a cavitação ocorre quando a pressão total local é próxima da pressão de vapor.

Segundo Wylie e Streeter (1982), as bolhas de vapor são arrastadas pelo líquido até que atinjam uma região de pressão mais elevada onde entram em colapso quase instantaneamente. O crescimento e o colapso ou implosão de bolhas de vapor em regiões adjacentes a superfícies sólidas podem causar sérios danos por erosão das superfícies do material.

Desta forma, a cavitação em máquinas hidráulicas deve ser evitada. Por exemplo, numa bomba a cavitação tende a iniciar na seção onde o escoamento é acelerado para dentro do rotor. A cavitação numa turbina se inicia onde a pressão é mais baixa. A tendência à cavitação aumenta à medida que a velocidade do escoamento local aumenta: isso ocorre sempre que a vazão ou a velocidade de operação da máquina é aumentada. A cavitação pode ser evitada se a pressão em todos os pontos da máquina for mantida acima da pressão de vapor do líquido de trabalho. Em uma bomba, devido às perdas de pressão na tubulação de entrada, a pressão de sucção pode estar

abaixo da atmosférica. Por isso, é importante limitar cuidadosamente a queda de pressão na tubulação de sucção.

De acordo com Tullis (1982), existem dois tipos de cavitação: a cavitação gasosa e a cavitação vaporosa. A cavitação gasosa ocorre quando ou existe uma considerável quantidade de ar em suspensão na água ou quando o processo de cavitação é suficientemente lento permitindo o aumento da quantidade de ar no interior da cavidade de vapor em decorrência da de gaseificação do líquido. A taxa de crescimento e colapso da bolha é muito mais lenta para a cavitação gasosa devido à presença de ar livre. Conseqüentemente, o processo não é tão violento e normalmente não deverá criar uma situação de algum interesse.

Se existir pouco ar no líquido, de forma que a cavidade consiste quase exclusivamente de vapor, as taxas de crescimento e de colapso e as pressões geradas devido ao colapso da cavidade serão muito elevadas e poderão causar danos consideráveis. Este caso é denominado cavitação vaporosa e se constitui no tipo de cavitação que deverá ser de interesse prático aos profissionais da engenharia. Para que a formação e implosão de bolhas a baixa pressão ocorra é necessária a existência de três requisitos fundamentais:

- 1° - deverão existir núcleos no sistema que servem de base para a vaporização do líquido;
- 2° - a pressão em algum ponto no líquido deverá cair bruscamente para, ou próximo, à pressão de vapor;
- 3° - a pressão do ambiente em volta da cavidade do vapor deverá ser superior à pressão do vapor de forma a provocar sua implosão.

Knapp *et al.* (1970) citam que existem estágios da cavitação:

- 1) a cavitação incipiente, que se refere ao estágio inicial da cavitação. A intensidade da cavitação nessas condições consiste em estouros leves e intermitentes;
- 2) a crítica, que é um nível de cavitação mais elevado, com ruído estacionário, porém leve.

Além dos estágios observados durante o fenômeno, a cavitação pode apresentar-se de quatro formas:

1. Cavitação móvel (ou por bolhas), que existe quando bolhas ou cavidades de vapor são formadas, arrastadas na corrente a jusante e sofrem colapso.

2. Cavitação fixa, que existe quando uma cavidade fixa de vapor aparece como uma região separada. Essa região pode-se religar ao corpo ou pode envolver a parte posterior do corpo e ser fechada pelo escoamento principal; esse caso é conhecido como supercavitação.

3. Cavitação por vórtice, encontrada no núcleo de alta velocidade e, portanto, de baixa pressão, de um vórtice. Normalmente observada no vórtice de extremidade que sai de um propulsor.

4. Cavitação vibratória, que pode existir quando uma onda de pressão se propaga em um líquido. Uma onda de pressão alterna alta pressão seguida de baixa pressão. Dependendo do valor da baixa pressão da onda, pode resultar em cavitação.

Tullis (1989) cita que os efeitos da cavitação em sistemas hidráulicos quase sempre são prejudiciais. Existem cinco problemas básicos criados pela cavitação: o ruído, as vibrações, as flutuações da pressão, os danos causados por erosão e a perda da eficiência.

O tipo e, particularmente, a intensidade do ruído dependem das condições do sistema. Por exemplo, a cavitação em uma válvula pequena é ouvida como um leve som de crepitação. Em uma válvula grande o ruído pode se assemelhar a uma explosão. A descrição que segue é característica do som gerado por uma válvula com diâmetro da ordem de 150 a 300 mm. Nos estágios iniciais da cavitação ela é normalmente ouvida como um leve som intermitente crepitante. É apenas ligeiramente mais alto que o ruído básico de turbulência gerado pelo escoamento. Conforme o nível da cavitação aumenta, a intensidade e o ruído aumentam de forma que será fácil ouvir a cavitação além do nível de operação do sistema. Se a válvula estiver operando a um nível moderado de cavitação, o som poderá ser ligeiramente caracterizado como ruído gerado por cascalho passando por uma tubulação. À medida que o nível de cavitação se aproxima do que pode ser chamado de cavitação intensa, ela consistirá de um estrondo alto e algumas vezes se assemelhando a estalidos altos e intermitentes similares a pequenas explosões. Nestas condições é quase impossível, conversar próximo à válvula, podendo inclusive ameaçar a saúde de um observador exposto por longo tempo ao ruído. As ondas de choque geradas pelo estouro das bolhas produzem flutuações de pressão fazendo com que o sistema tenda a vibrar. Mesmo em válvulas grandes, bem fixadas pode-se observar que o tubo e a válvula se movimentam quando operam com cavitação intensa. Tais vibrações podem afrouxar parafusos, causar fadiga do material das conexões e resultar em falhas na estrutura. Se as bolhas romperem

próximo a um contorno sólido, poderá ocorrer erosão no contorno. Nos estágios avançados de cavitação formam-se grandes bolhas de vapor, que poderão alternar a hidrodinâmica do escoamento no sistema e reduzir a eficiência do dispositivo. Nesse caso, as bombas recalcam um volume menor e as válvulas não veiculam mais a mesma vazão. As bolhas que colapsam perto de contornos sólidos, segundo Potter e Wiggert (2004) podem enfraquecer a superfície sólida.

Um parâmetro ou índice básico é o número de Thoma, adimensional definido de acordo com a equação (3.1). Ele é usado para representar os estágios da cavitação desprezando a turbulência, conteúdo de ar, contaminantes e tensão superficial.

$$\sigma = 2(P_u - P_v) / \rho V^2 \quad (3.1)$$

P_u indica a pressão a montante; P_v é a pressão de vapor, V é a velocidade média e ρ é a massa específica.

Pode-se gerar a cavitação com a formação de um jato de água submerso de alta velocidade, como se verifica na Figura 3.1. 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.

Tullis (1989) cita que quando o jato deixa o orifício, forma-se uma intensa camada de cisalhamento entre o jato de alta velocidade e a água que o circunda (cuja velocidade pode ser considerada próxima de zero). Como consequência, surgem vórtices. A pressão dentro dos vórtices é significativamente menor que a pressão exterior a ele, devido às altas velocidades rotacionais do vórtice. Se um núcleo é capturado por um desses vórtices, o núcleo se expande devido às pressões menores. Se a pressão estiver próximo ao valor da pressão de vapor àquela temperatura, o núcleo se torna explosivo pela vaporização. À medida que o tamanho do núcleo aumenta, a velocidade rotacional do vórtice diminui e a pressão circundante à bolha se torna maior que a pressão de vapor. Assim, o núcleo se torna instável e implode.

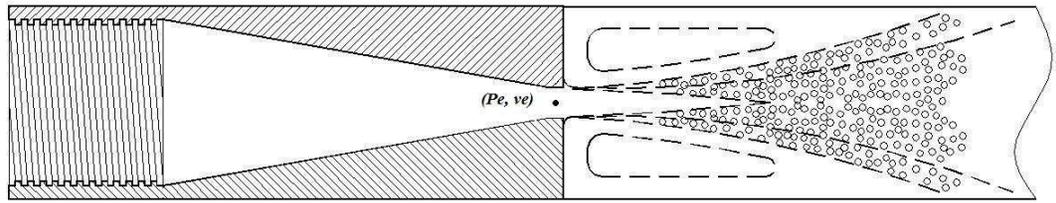


Figura 3.1. Formação de um jato cavitante.

Fonte: **Dalfré Filho e Genovez (2009)**.

O colapso destas cavidades gera ondas de alta pressão. Estas pressões foram estimadas como sendo da ordem de 69 GPa pressão suficiente para danificar os materiais atingidos de acordo com Tullis (1989). 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 à superfície adquire uma velocidade de redução de tamanho muito maior, formando um micro jato através do centro da mesma. De acordo com Lohrberg e Stoffel (2001), o jato se desloca com velocidade acima de 100 m/s, capaz de deformar um material sólido.

Reescrevendo o índice de cavitação para um jato submerso, como observado na Figura 3.1, baseado nestas condições de referência, a equação (3.1) é expressa como na equação (3.2):

$$\sigma = 2(Pe - Pv) / \rho Ve^2 \quad (3.2)$$

Pe representa a pressão no interior do núcleo do jato, Pv é a pressão de vapor e Ve é a velocidade no interior do jato.

Isto significa que o índice de cavitação, σ , pode ser usado para designar a resistência relativa de uma determinada forma de hidrofólio, bem como designar um equipamento hidráulico inteiro, como no caso do equipamento tipo jato cavitante. Isto é feito associando-se o equipamento ao valor do índice de cavitação medido. Quanto menor esse valor, maior pode ser a queda de pressão antes de se iniciar o fenômeno e, por consequência, menor a probabilidade de ocorrência da cavitação.

Como o equipamento tipo jato cavitante desenvolve um jato de alta velocidade, é importante obter o número de Mach (Ma), adimensional, que indica se o líquido tem comportamento compressível ou incompressível. De acordo com Fox *et al.* (2006) os valores de Ma menores de 0,20 indicam o comportamento incompressível, ou seja, o escoamento ocorre com massa específica constante. O número de Mach é descrito na equação (3.3).

$$Ma = \frac{V_e}{c} \quad (3.3)$$

Sendo:

V_e : velocidade no interior do jato (m/s);

c : celeridade ou a velocidade do som no fluido (m/s).

3.3.3. CAVITAÇÃO E A INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS

A presença de patógenos impõe um problema premente no tratamento de águas. Estes microrganismos 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).

Recentemente, pesquisas empregando o fenômeno da cavitação para a inativação de líquidos vêm sendo realizadas em várias partes do mundo, como: EUA, Rússia, Índia, China, Japão, Reino Unido, África do Sul, França, México, entre outras. Diferentes equipamentos para simular a cavitação, bem como diferentes métodos e finalidades são empregados. Cada autor ou grupo de pesquisadores adota uma substância a ser degradada ou uma bactéria a ser eliminada por exemplos.

Dempsey *et al.* (1993) adaptaram jatos hidráulicos, como ilustrado na Figura 3.2, que inicialmente eram usados para extração de minérios nas minas, para o tratamento de água contaminada. Os jatos cavitantes foram gerados através de um jato de alta velocidade, fazendo com que a água recirculasse. As condições de turbulência dos jatos permitiam que os COV (Compostos Orgânicos Voláteis) passassem da fase líquida para a fase gasosa. Os compostos

liberados na fase gasosa foram então, removidos por adsorção em carvão ativado ou por outras tecnologias. Segundo os autores, as concentrações de compostos orgânicos voláteis, como o benzeno, o tolueno e o xileno (BTEX), tricloroetileno (TCE) e o tetracloroetileno (PCE) foram reduzidos a níveis aceitáveis utilizando os jatos. Os jatos hidráulicos requerem mais energia para a remoção de benzeno e tetracloroetileno do que outros métodos. No entanto, os jatos hidráulicos são resistentes ao alto teor de ferro ou à proliferação de crescimentos microbiológicos nas águas. Os ensaios foram realizados, variando-se o número de jatos em série, no total de 9 jatos, 3500 litros à pressão de 200 Pa a 25 °C durante 114000 segundos. O percentual de remoção dos compostos orgânico voláteis ficou entre de 90 e 99,99%. O consumo de energia estimada do equipamento ficou entre 0,041-0,779 kWh/m³ indicando assim um custo operacional baixo, com 80% de eficiência a uma pressão de 117,24 Pa de operação.

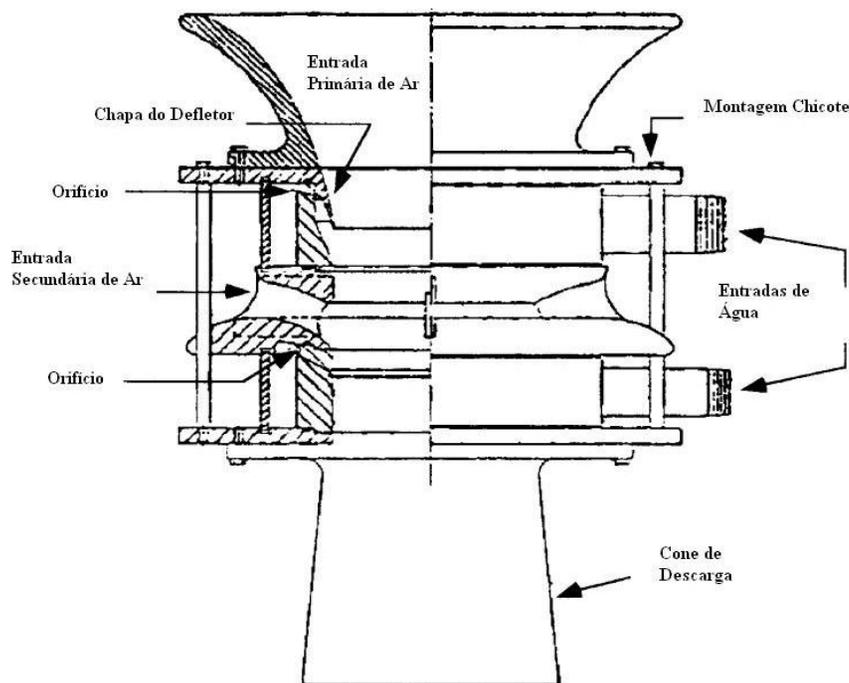


Figura 3.2. Esquema de jato hidráulico.

Fonte: **DEMPSEY et al. (1993)**

A USEPA (1994) descreve um sistema desenvolvido pela empresa *Magnum Water Technology* (EUA), ilustrado na Figura 3.3, para tratamento de águas contaminadas por COV (Compostos Orgânicos Voláteis) utilizando-se radiação ultravioleta, peróxido de hidrogênio como oxidante e um sistema para produção de cavitação hidrodinâmica. Durante o processo de cavitação a água é decomposta em átomos de hidrogênio e radical de hidroxila. A água contaminada de COV, como o TCE, benzeno, tolueno, etilbenzeno e o xileno são bombeados para uma câmara de cavitação e por intermédio da luz ultravioleta, produzida por lâmpadas de vapor de mercúrio. O equipamento denominado CAV-OX[®], foi testado em 2 configurações diferentes. Ele utiliza uma bomba de 448,2 MPa e outra de bomba e 41,4 MPa para tratamento. O equipamento CAV-OX[®] I, com processo de baixa energia (5 kW), trata 1,89 litros a 5,67 litros por minuto a temperatura sobe em 1,31 °C por minuto. O CAV-OX[®] II, com processo de altas energias (10 kW), trata de 3,78 litros a 15,12 litros por minuto, com o aumento de temperatura de 2,38 °C por minuto. As taxas de degradação relatado dependeram do nível de peróxido de hidrogênio. O CAV-OX[®] I e o CAV-OX[®] II apresentaram taxas de 99,7% e 99,8% de remoção de COV respectivamente. Os equipamentos atendem assim, aos padrões de água potável da para COV da legislação do estado da Califórnia e também os níveis federais dos Estados Unidos que impõe a remoção de 95% para os BTEX. O sistema CAV-OX[®] I, portanto, mostra-se eficiente, tanto em termos de degradação como em termos de eficiência energética.

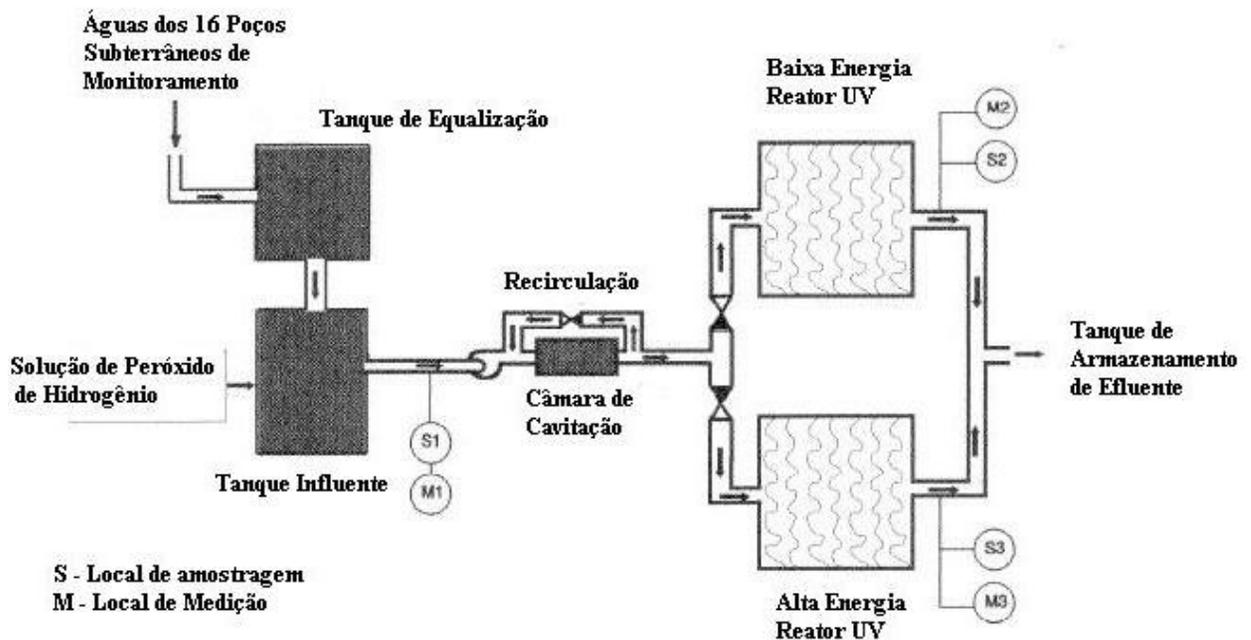


Figura 3.3. Esquema do CAV-OX[®] *Cavitation Oxidation Process* (Processo de Oxidação por Cavitação).

Fonte: USEPA (1994)

Pétrier e Francony (1997) utilizam a cavitação ultrassônica para degradar fenol e tetracloreto de carbono. O fenol é um composto hidrofílico com uma considerada baixa pressão de vapor comparado com o tetracloreto de carbono que é uma molécula volátil e hidrofóbica.

Utilizando as frequências de 20, 200, 500 e 800 kHz, potência de 0,03 kW, ao longo de um tempo de 90 minutos a 180 minutos, todos com a temperatura de 20 °C, volume de 300 mL, os autores relataram a formação de peróxido de hidrogênio que ajudou da degradação do fenol, obtendo-se seu maior valor na frequência de 200 kHz. O melhor resultado de degradação do fenol foi também observado a 200 kHz. Talvez a maior eficiência foi obtida devido à geração de um número maior de radical hidroxila do que bolhas da cavitação. A taxa de degradação para o tetracloreto de carbono, a qual decompôs com as bolhas de cavitação aumentou com a frequência. No cálculo da taxa de reação para o ultrassom, o período mostra que a eficiência da cavitação ultrassônica decresce enquanto a frequência aumenta.

Save *et al.* (1997) estudaram o efeito dos parâmetros relacionados à cavitação sobre células de levedura tais como: altas pressões, número de cavitação, o estágio de crescimento da célula e a ruptura da célula de levedura. Além do equipamento hidrodinâmico, a levedura também foi submetida a testes com cavitação acústica e altas velocidades. A energia relacionada à eficiência da cavitação hidrodinâmica foi comparada com outras técnicas já estabelecidas, como a cavitação ultrassônica e métodos de mistura com altas velocidades (*mixer-blender methods*), e foi observado que a cavitação hidrodinâmica é a configuração com uma ordem de grandeza mais eficiente do que as outras técnicas testadas. Os autores utilizaram duas configurações de equipamento, conforme a Figura 3.4, para gerar a cavitação hidrodinâmica, uma com capacidade para processar cerca de 50 litros e outra com 200 litros. A pressão de teste foi de 28 kPa e o tempo de ensaio de 3600 segundos.

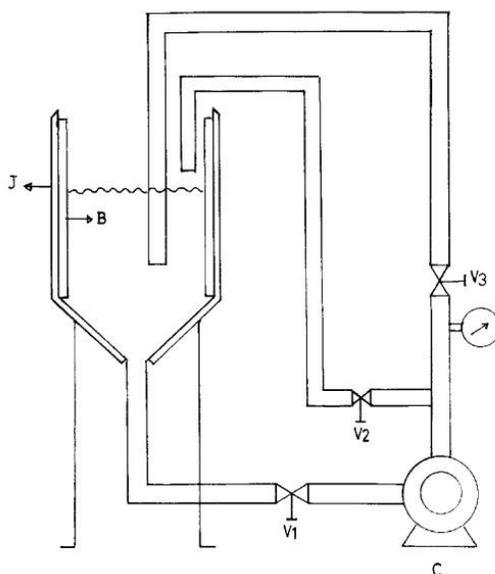


Figura 3.4. Configuração experimental do equipamento utilizada para cavitação hidrodinâmica. Nota: B defletores, C bomba centrífuga, J reservatório de tratamento, V1-3 válvulas esferas.

Fonte: Save *et al.* (1997)

Suslick *et al.* (1997) utilizaram a cavitação hidrodinâmica com o objetivo de evidenciar as reações químicas por ela gerada, para um volume de 60 mL de água contendo 1 mol de iodeto de potássio (KI) e com água saturada com tetracloreto de carbono a pressão de 124 MPa. Em 90

segundos de tratamento a temperatura aumentou de 10 °C para 12 °C até a sua estabilização. Os resultados avaliaram a formação de tri iodeto na água (I_3). Comparada a formação de I_3 provenientes da cavitação acústica, a produção foi de 20 vezes maior.

Kalumuck e Chahine (2000) indicaram que a incidência da cavitação ultrassônica, Figura 3.5, em compostos orgânicos produz a oxidação destes compostos à frequência de 15,7 kHz. Os autores aplicaram a técnica da cavitação hidrodinâmica (Figura 3.6) em água contaminada para induzir a oxidação da solução. A substância degradada foi p-nitrofenol (PNP) com concentração conhecida. O circuito de tratamento para cavitação hidrodinâmica teve capacidade de 6,5 litros. A variação da temperatura, pH, as pressões do jato cavitante e o fluxo foram controlados. Os experimentos foram realizados em paralelo com um sistema de cavitação ultrassônica para comparação dos sistemas. A temperatura influenciou na eficiência de oxidação, o melhor desempenho ocorreu na faixa de 42 °C Para a cavitação hidrodinâmica o melhor resultado foi observado em 41,67 °C, durante 90 minutos. O mesmo resultado para a cavitação ultrassônica foi registrado em 1800 minutos. A eficiência da cavitação hidrodinamica foi duas vezes maior que a cavitação ultrassônica.

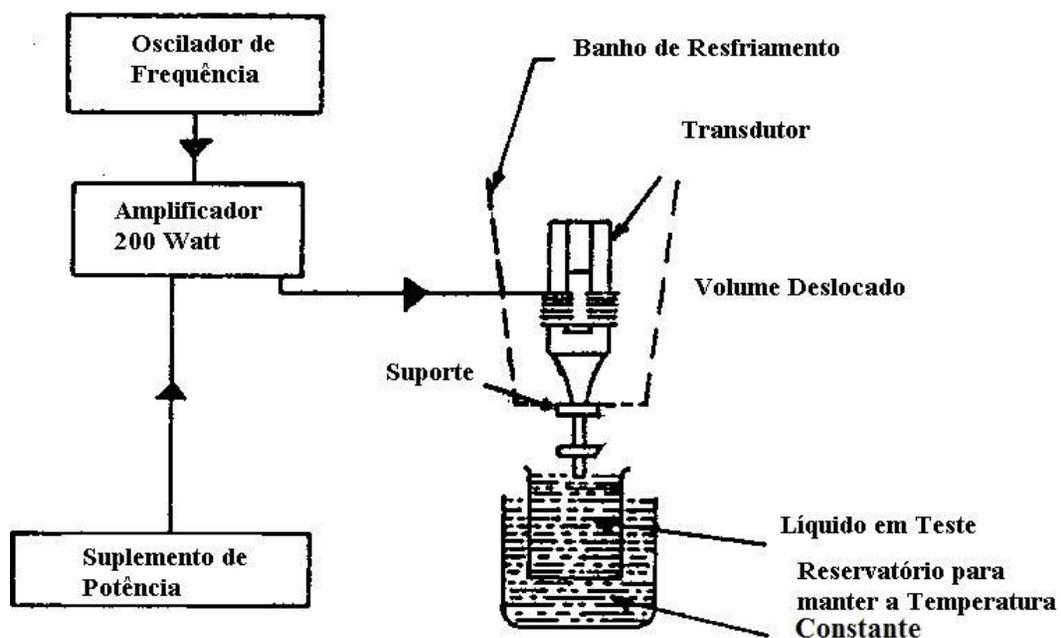


Figura 3.5. Configuração experimental do equipamento para cavitação ultrassônica.

Fonte: Kalumuck *et al.* (2000)

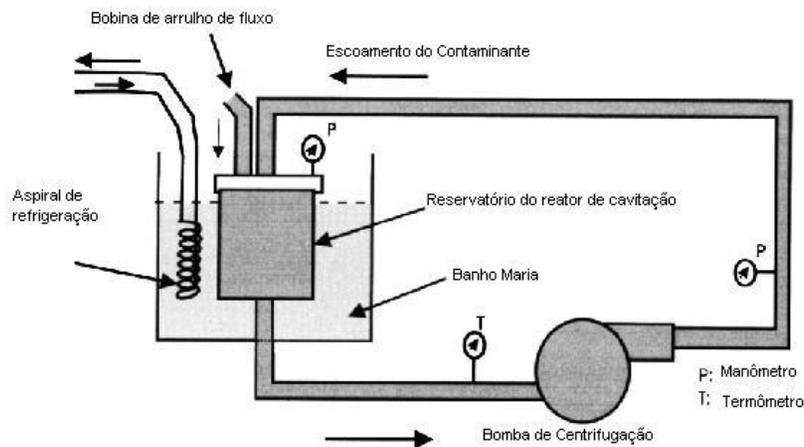


Figura 3.6. Esquema do equipamento para cavitação hidrodinâmica.

Fonte: **Kalumuck *et al.* (2000)**

Kumar *et al.* (2000) e Vichare *et al.* (2000) estudaram o comportamento da cavitação usando múltiplos orifícios. Kumar *et al.* (2000) utilizaram a cavitação ultrassônica e a cavitação hidrodinâmica para a degradação do iodeto de potássio (KI). Na configuração hidrodinâmica os autores testaram a degradação usando dois tipos de bocais, um deles com configuração de 8 orifícios de 5 mm de diâmetro e outra de 33 orifícios de 5 mm de diâmetro. Vichare *et al.* (2000) também realizaram testes de degradação com o iodeto de potássio (KI). A pressão de operação foi de 0,5 MPa, com 6 tipos de configurações de orifícios, a saber 33 orifícios de 1 mm de diâmetro; 8 orifícios de 2 mm de diâmetro; 33 orifícios de 2 mm de diâmetro; 16 orifícios de 3 mm de diâmetro; 20 orifícios de 3 mm de diâmetro; 8 orifícios de 5 mm de diâmetro. Os resultados demonstraram que é necessário aumentar o valor da pressão para uma degradação do iodeto de potássio (KI) mais eficaz.

Jyoti e Pandit (2001) compararam quatro métodos de desinfecção que utilizam a cavitação: o método ultrassônico, a homogeneização a alta velocidade, a homogeneização a alta pressão (Figura 3.7) e a cavitação hidrodinâmica (Figura 3.8). 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 0,172 MPa a 55,2 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, aumentou-se a taxa de desinfecção, isto não foi constatado como sendo uma regra. Considerando-se o método de homogeneização a alta pressão, na faixa de pressões de 6,9 a 13,8 MPa, não foi verificada desinfecção. Para os valores entre 20,7 a 27,6 MPa verificou-se o início da desinfecção com o máximo verificado à pressão de 34,5 MPa. A taxa de desinfecção diminuiu, ao aumentar-se a pressão para além deste valor. Tal comportamento foi explicado, como resultado do aumento da pressão e conseqüente aumento da velocidade no sistema. Nesse caso, o tempo de residência (tempo ao qual o microrganismo fica exposto na zona de cavitação) também diminuiu. Outra possibilidade foi que com o aparecimento da supercavitação, as cavidades geradas não colapsam e não produzem pulsos de pressão desejados para destruir os microorganismos. Comparando-se os métodos, o homogeneizador de alta pressão apresentou uma taxa de desinfecção de 79% a pressão de 34,5 MPa. A cavitação hidrodinâmica apresentou uma taxa de desinfecção de 23% com uma pressão de apenas 0,5 MPa. Comparando-se os quatro equipamentos construídos, 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 representou a melhor técnica, de acordo com os autores.

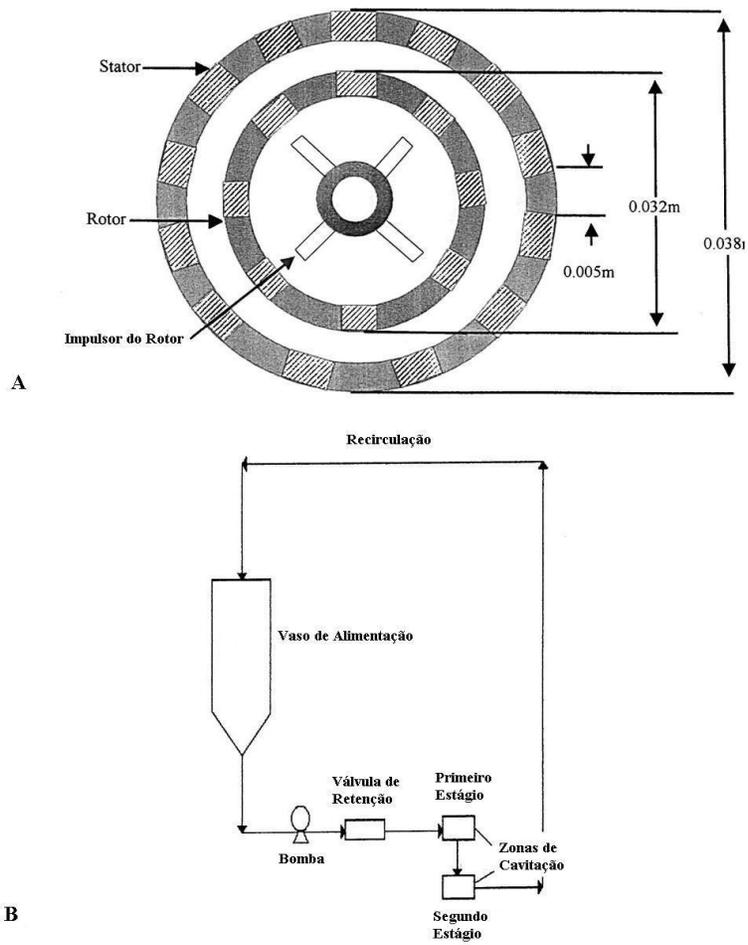


Figura 3.7. (A) Configuração do equipamento do homogeneizador de alta velocidade; (B) Homogeneizador de alta pressão.

Fonte: **Jyoti e Pandit (2001)**

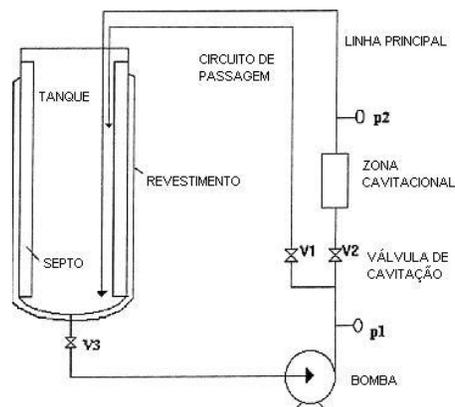


Figura 3.8. Configuração do tratamento por cavitação hidrodinâmica.

Fonte: **Jyoti e Pandit (2001)**

Tiehm *et al.* (2001) analisaram os efeitos da cavitação ultrassônica na degradação de esgoto proveniente da estabilização anaeróbia de uma estação de tratamento de esgoto da Alemanha. As frequências utilizadas variaram de 41 a 3217 kHz. O impacto do tratamento e as intensidades de frequência foram examinadas. A temperatura foi controlada em torno de 25 °C, com uma variação de 3 °C acima ou abaixo. Os tempos de ensaio foram de 450, 1800, 3600 e 9000 segundos, com taxas de degradação (sem levar em consideração o tempo de 450 segundos onde não houve lise celular) de respectivamente 4,7, 13,1, e 23,7%. A degradação de 800 mL do lodo foi realizada em um reator (Figura 3.9), com 800 mL de lodo. A eficiência de degradação do lodo foi observada em altas frequências e atribuída à formação das pequenas bolhas de cavitação. No decorrer do tratamento houve a quebra da parede celular e a parte sólida do lodo foi degradada e dissolvida em compostos orgânicos, que podem ser utilizadas na produção de biogás. Quando se aumenta a degradação dos compostos orgânicos voláteis, aumenta também a produção de biogás. A digestão anaeróbia gerada pelo processo de cavitação ultrassônica pode ser aperfeiçoada, sendo o aumento da eficiência de digestão proporcional à degradação do lodo, tornando o custo viável.

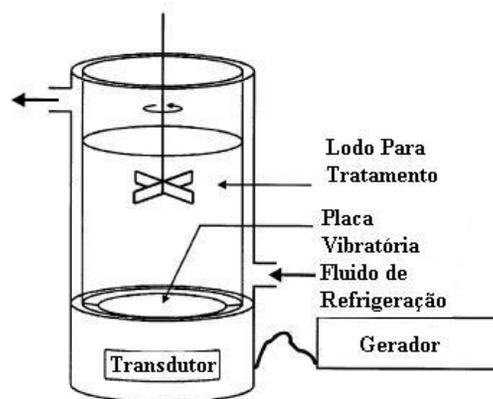


Figura 3.9. Esquema do reator ultrassônico de lodo.

Fonte: **Tiehm et al. (2001)**

Gogate (2002) relata em seu estudo uma avaliação criteriosa e recomendações acerca da cavitação acústica e hidrodinâmica para aplicações das tecnologias de cavitação em termos de eficiência energética. Em geral, o autor cita que a cavitação pode ser efetivamente aplicada para a degradação de produtos químicos nas águas residuais como um sistema de tratamento, onde a maioria das técnicas convencionais não eliminam substancialmente o poluente. Porém para a aplicação em larga escala há poucos dados sendo a maioria dos estudos na área relativos à escala laboratorial e, portanto, muito mais precisa ser feito antes que esse objetivo seja concretizado.

Sivakumar e Pandit (2002) compararam o processo de cavitação hidrodinâmica com a acústica como métodos para a remoção do complexo rodamina B, que é um corante. Relataram que a configuração do equipamento para cavitação hidrodinâmica pode ser usada para a destruição do complexo rodamina B de forma eficiente, em comparação à cavitação acústica.

A eficiência energética da cavitação hidrodinâmica foi aproximadamente 150% maior em comparação com os melhores equipamentos de cavitação acústica. Além disso, a cavitação hidrodinâmica é capaz de degradar aproximadamente 50 litros de efluente em uma única operação, em comparação com alguns mililitros no caso do ultrassom.

Jyoti e Pandit (2003) demonstraram em seu estudo a eficácia potencial das técnicas de desinfecção de água por meio da cavitação hidrodinâmica, cavitação ultrassônica e o tratamento com peróxido de hidrogênio. Os métodos foram avaliados individualmente e em combinação para

se avaliar a taxa de desinfecção, a eficiência energética e o custo. A combinação da cavitação hidrodinâmica, da cavitação ultrassônica e do peróxido de hidrogênio se mostra uma alternativa viável, como uma técnica única para a redução de bactérias heterotróficas, indicadores como os coliformes totais, fecais e estreptococos fecais. Para a cavitação ultrassônica foi utilizada a frequência de 22 kHz, em 900 segundos. Um volume de 100 mL foi tratado e a potência foi de 240 W. Inicialmente a concentração de 200 coliformes/100 mL foi testada e ao final 90 coliformes/100 mL foram detectados.

Já para a cavitação hidrodinâmica a potência utilizada foi de 5,5 kW, as pressões testadas foram de 0,172 MPa a 55,2 MPa e o tempo de teste de 3600 segundos ou 7200 segundos. A temperatura foi mantida entre 35 e 37 °C.

Kalumuck *et al.* (2003) relatam a utilização de um jato cavitante para a remoção, pelo princípio da oxidação, de vários microrganismos em um fluxo em circuito fechado, como ilustrado na Figura 3.10. O material do equipamento era 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® pode aumentar o desempenho de diversas reações químicas, oxidar compostos e eliminar microrganismos. No que diz respeito aos contaminantes químicos houve a destruição de uma vasta gama de contaminantes, incluindo pesticidas, tais como Malathion, 2,4-D e Alacloro; o biocida Clorexidina, e o clorofórmio. Estes foram medidos por amostragem periódica. Os contaminantes foram transformados em compostos intermediários antes da completa oxidação dos componentes, em vapor d'água e em vários compostos inorgânicos simples. Já a medição dos compostos orgânicos foi realizada 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 pelos autores. Foi verificada a redução de COT de 220 ppm para 30 ppm em 3600 segundos e para menos de 1 ppm em mais 3600 segundos. O equipamento teve as pressões dos fluxos que entram na câmara monitorados e controlados. A temperatura foi mantida constante para um dado ensaio, com o emprego de um tanque de resfriamento. Também, o pH foi mantido constante. Para investigar a destruição dos microrganismos foi utilizado um pequeno volume de água de aproximadamente 1,5 litros, recirculando no circuito de teste. Antes dos testes, a desinfecção do

sistema foi comprovada nas amostras de água, e foi assegurada a não formação de colônias viáveis. A eficiência para desinfecção do equipamento também foi confirmada.

Para testar a inativação de microrganismos foi utilizada uma cepa não patogênica de *Escherichia coli* (MC4100), a qual foi colocada em cultura até alcançar a concentração desejada. Foi inoculada no circuito uma parte e outra mantida fora do circuito, como controle.

O líquido foi distribuído no circuito. Inicialmente, as amostras foram colhidas periodicamente e medidas as concentrações de bactérias em placas com Agar e incubadas durante à noite. As colônias formadas foram contadas, utilizando-se sempre amostras duplicadas. Os dados foram analisados através de curvas de concentração pelo tempo. A temperatura do sistema foi controlada. A redução de *Escherichia coli* em relação a quantidade inicial ficou na ordem de 5 logs de inativação em 1800 segundos de tratamento.

Foi verificada a influência da pressão. Diminuindo-se a pressão aumentou-se a eficiência, atingindo a maior eficiência de remoção a 0,1034 MPa. Contudo, o início da remoção mais rápida foi atingida com a pressão de 0,5516 MPa. Com relação à influência do volume, verificou-se que quanto maior o volume, melhor foi a eficiência verificada da desinfecção.

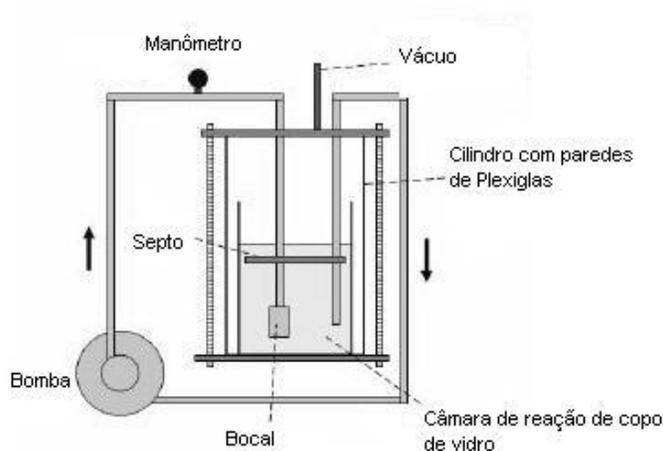


Figura 3.10. Configuração experimental do equipamento para cavitação hidrodinâmica.

Fonte: **Kalumuck et al. (2003)**

Hao et al. (2004), para evitar a eutrofização causada pelo crescimento de cianobactérias, utilizaram o método da cavitação ultrassônica. As irradiações ultrassônicas foram testadas

avaliando diferentes parâmetros para inibição do crescimento de *Spirulina platensis*. Foram testados 800 litros de água no equipamento com duração de no máximo 1200 segundos. Os resultados experimentais mostraram que a radiação ultrassônica inibe efetivamente a proliferação das cianobactérias. Ademais, a efetivação da inibição ocorreu em 40% a 40 W, 42% para 60 W e 44% para 80 W de potência, respectivamente. Os resultados sugeriram que com 40 W a eficiência de tratamento é a mais econômica com potência ultrassônica da radiação de 20 kHz.

Jyoti e Pandit (2004) estudaram a viabilidade do processo de desinfecção por cavitação utilizando-se da cavitação hidrodinâmica e ultrassônica como um processo adicional ao processo de desinfecção por ozônio. A ozonização é amplamente utilizada para a desinfecção da água e produz derivados menos tóxicos do que a desinfecção por cloro. Contudo, seu uso produz derivados, como os aldeídos, que causam mutagenicidade e outros compostos produzidos durante a ozonização. Com a sinergia da ozonização com os dois processos por cavitação, a redução e a eliminação dos subprodutos tóxicos foram ser observadas. Os processos sinérgicos reduzem pela metade ou um terço a concentração necessária de ozônio para a desinfecção. Foram testados, na cavitação hidrodinâmica, 10 litros de água, a pressão de 0,172, 0,344 e 0,517 Mpa. Na cavitação ultra-sônica foram usados 100 mL, na frequência de 22 kHz e com potência de 240 W. Na ozonização foi usado 1 litro de água. O tempo de tratamento ficou em 900 segundos. Concluiu-se que processos sinérgicos parecem ser promissores para a desinfecção da água. O estudo efetuou a contagem de bactérias heterotróficas e de bactérias e microrganismos indicadores (coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais).

Abdala Neto (2006) relata o uso da cavitação hidrodinâmica como alternativa para a desinfecção de água para o abastecimento humano. O autor em sua pesquisa construiu protótipos para produção de água desinfetada através da cavitação hidrodinâmica. Avaliou o potencial de geração de cavitação hidrodinâmica através da eficiência térmica apresentada no protótipo e estudou os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos das águas utilizadas no experimento. O melhor protótipo revelou a possível inativação total dos microrganismos observados, coliformes totais e coliformes fecais, presentes na água de alimentação do reator que teve como vazão de alimentação o valor de 60 L/h e potência motriz de 30 kW. O potencial de inativação do uso individual da cavitação hidrodinâmica foi próxima dos 100%. A pressão de tratamento foi de 15 MPa. O sistema (Figura 3.11) apresentou-se como alternativa de desinfecção, caracterizada pela

possibilidade de adoção em plantas de abastecimento de água individual ou em comunidades de pequeno porte, devido principalmente a não geração de subprodutos no sistema e o não uso de produtos químicos. Vale destacar que o autor não se preocupou em controlar a temperatura do sistema e sim agregar o aumento da temperatura a eficiência de desinfecção.

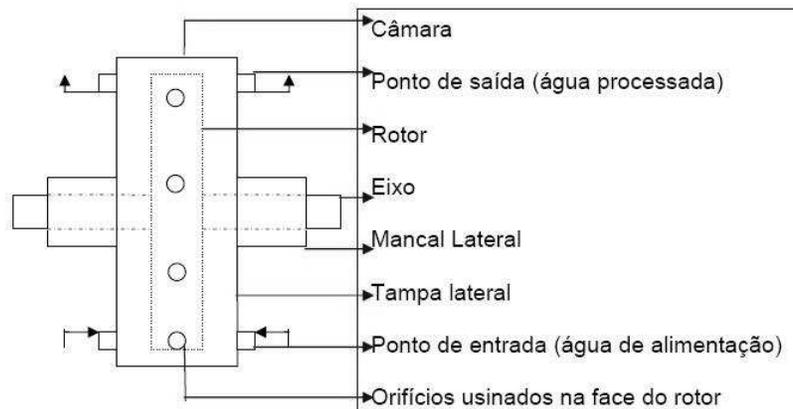


Figura 3.11. Desenho esquemático do reator de cavitação hidrodinâmica.

Fonte: **Abdala Neto (2006)**

Balasundaram e Harrison (2006) indicam resultados da cavitação hidrodinâmica que podem ser aproveitadas para gerar danos na célula microbiana de *Escherichia coli*. A cavitação hidrodinâmica foi empregada para a ruptura parcial de *Escherichia coli* e a liberação seletiva de proteínas específicas em relação ao total de proteínas solúveis. O volume tratado foi de 18 litros em 600 segundos. A temperatura foi mantida em 32 °C. Chegaram a conclusão de que o número de cavitação ideal é de 0,17 para a configuração experimental utilizada. 48% do total de proteínas solúveis, 88% da fosfatase ácida, e 67% de beta-galactosidase foram liberados por conta da cavitação hidrodinâmica. A maior liberação da fosfatase ácida na proteína solúvel total sugeriu liberação de compostos periplásmico. As células de *E. coli* cultivadas com uma maior taxa de crescimento específico foram rompidas mais facilmente do que as células cultivadas com uma taxa de crescimento lenta. A seletividade oferecida indica o potencial de liberação de enzima por cavitação hidrodinâmica para facilitar a purificação no tratamento posterior.

No trabalho de Azuma *et al.* (2007) foi empregado o princípio da cavitação gerada por jato de alta velocidade para desinfecção de água (Figura 3.12). Para tanto, comparou-se dois tipos de bactérias a *E. coli*, como típicas bactérias gram-negativas e *Bacillus subtilis* JCM1465T (*B. subtilis*), como as típicas bactérias gram-positivas. Testes adicionais foram realizados com *Pseudomonas putida* JCM13063T, bactérias gram-negativas e *Bacillus halodurans* JCTM9153, bactérias gram-positivas. A taxa de inativação 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 do que as bactérias gram-negativas. Esta pode ser a razão pela qual a *B. subtilis* é mais resistente à cavitação. Os testes foram realizados a pressão de 105 MPa. As velocidades dos jatos variaram de 176 m/s a 384 m/s e as amostras foram analisadas subdividindo o tratamento em 10 tempos.

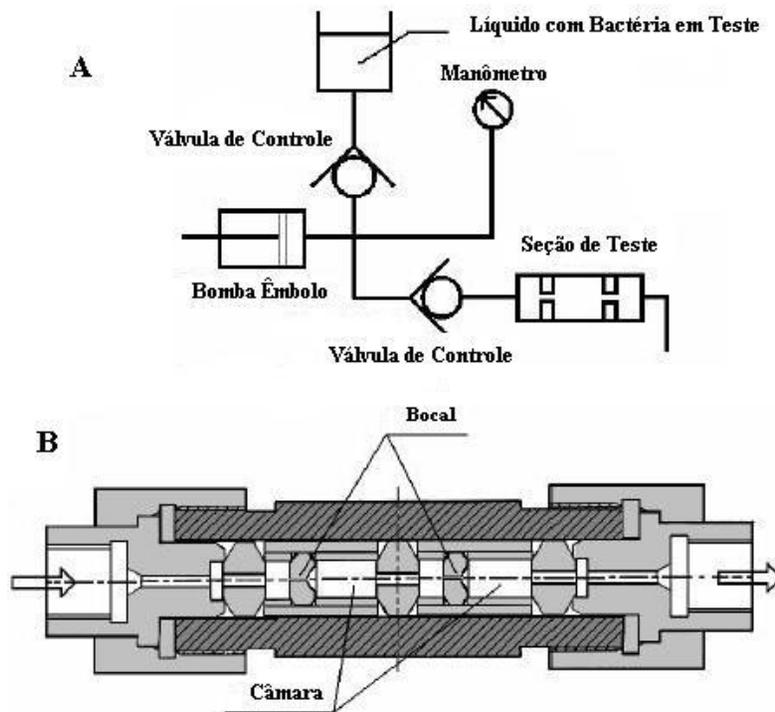


Figura 3.12. A- Circuito experimental do jato cavitante. B- Seção de teste com dois bocais (diâmetros: 0,1 – 0,31 mm (móveis))

Fonte: Azuma *et al.* (2007)

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 ou corrosão. Todos os testes empregaram a *Legionella* e revelaram que a sua população foi inferior ao método de detecção limite (1 UFC/mL). Um volume de água de aproximadamente 41,64 litros foram tratados. Não foi observada corrosão localizada. Durante o período de ensaio as estimativas baseadas em ciclos de concentração mostraram, aproximadamente, 10% de redução no consumo de água e 40% de redução de água residual, além de eliminar o uso de produtos químicos.

Chakinala *et al.* (2008) citam pela primeira vez a cavitação hidrodinâmica em conjunto com o processo Fenton para o tratamento de efluentes industriais. Foram tratadas 4 litros de amostra de efluentes industriais, por 9000 e 18000 segundos. As pressões investigadas foram de 4825 a 10340 kPa e a temperatura foi mantida entre os 32,00 e 38,00 °C. O efeito de diferentes parâmetros operacionais tais como pressão, concentração de H₂O₂ e da concentração inicial das amostras de efluentes industriais, medida pela presença de carbono orgânico total (COT) foi estudado com o objetivo de maximizar o grau de degradação. Observou-se que nas pressões mais elevadas, além da maior geração de peróxido de hidrogênio, as cargas do efluente com maiores e menor concentração foram mais favoráveis para uma rápida mineralização do COT. Em geral, com a nova combinação de cavitação hidrodinâmica com o processo Fenton obtiveram cerca de 60-80% de remoção de COT em condições otimizadas, dependendo do tipo de amostras de efluentes industriais. A combinação descrita é mais útil para o tratamento onde a diminuição da toxicidade pode ser alcançada até certo nível e, em seguida, a oxidação biológica convencional pode ser utilizada para o tratamento final.

Gogate (2008) mostrou que a cavitação pode ser usada na decomposição de compostos fenólicos. Os compostos fenólicos, incluindo os seus derivados clorados e nitrogenados, contribuem significativamente para os riscos ambientais devido ao elevado grau de toxicidade. O fenômeno da cavitação pode ser intensificado pelo uso de aditivos e/ou combinações da cavitação com outros processos de oxidação. Com isso o autor afirma que diferentes configurações de reatores de cavitação proporcionam um funcionamento ideal para a decomposição de compostos. O autor indica para futuros trabalhos o que seria necessário para uma maior eficiência e para facilitar a operação em grande escala.

Sawant *et al.* (2008) relataram a influência da cavitação hidrodinâmica na morte do zooplâncton em água do mar. Os resultados experimentais indicaram que os fenômenos que geram a cavitação são ferramentas eficazes para a desinfecção da água do mar. Mais de 80% do zooplâncton presente na água do mar foi morto. Também foi observado que as ondas de choque geradas devido à cavitação não são a única causa para o rompimento do zooplâncton. A turbulência e o cisalhamento, gerados a partir da oscilação da cavidade, contribuem significativamente para o rompimento das células dos organismos. Um aperfeiçoamento do modelo apresentado pelos autores servirá de base para atingir um maior grau de desinfecção e fornecer um instrumento prático para a desinfecção da água do mar.

Chakinala *et al.* (2009) indicam a combinação de cavitação hidrodinâmica e o processo Fenton baseado no uso de ferro como catalisador, ilustrado na Figura 3.13. Para maior eficiência de degradação foram estudados os efeitos de diferentes parâmetros operacionais tais como pressão de entrada, temperatura e presença de cobre, medida pela presença de COT. Os resultados indicaram que com o aumento da pressão houve aumento da temperatura do sistema e que a presença do cobre produz efeitos favoráveis à mineralização do COT. Outro fator investigado foi a utilização da cavitação hidrodinâmica como pré-tratamento, com o objetivo de reduzir o custo total da degradação de poluentes. Os resultados revelaram cerca de 50 a 60 % de remoção de COT, utilizando-se apenas o tratamento inicial com a mínima cavitação hidrodinâmica.

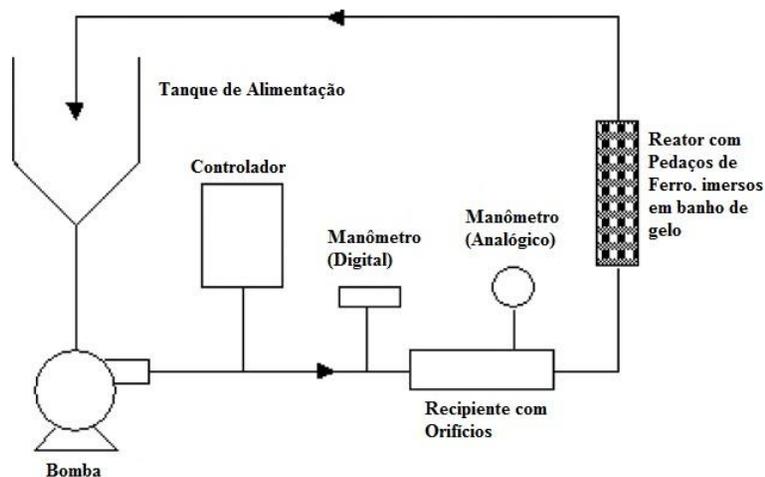


Figura 3.13. Representação esquemática da combinação de cavitação hidrodinâmica e Fenton.

Fonte: **Chakinala *et al.* (2009)**

Wang e Zhang (2009), por meio da cavitação hidrodinâmica, avaliaram a degradação do herbicida Alachlor. O volume tratado foi de 40 litros por 6000 segundos, as pressões testadas foram de 0,2, 0,4 e 0,6 MPa. A concentração inicial de Alachlor foi de 50 mg/L e a temperatura foi mantida nos 40°C. A configuração do equipamento está esquematizada na Figura 3.14. Os efeitos de operação como os parâmetros de pressão do fluido, temperatura da solução, concentração inicial de Alachlor e média do pH relacionadas com a taxa de degradação foram discutidos. Os resultados apontam que a taxa de degradação do Alachlor aumenta conforme o aumento da pressão e diminuindo a concentração inicial do herbicida. A temperatura ótima para o sistema foi de 40°C, e a taxa de degradação teve uma insignificante dependência do pH.

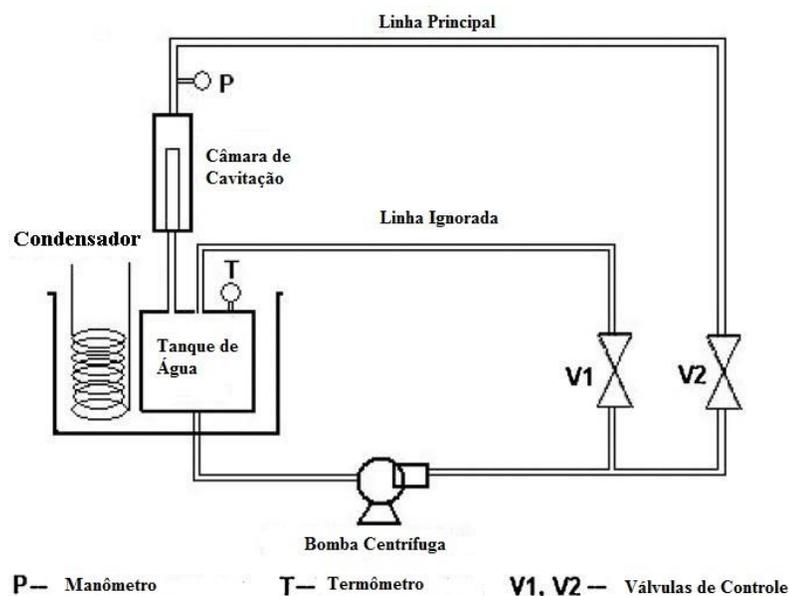


Figura 3.14. Configuração experimental do reator de cavitação.

Fonte: **Wang e Zhang (2009)**

Wang *et al.* (2010) estudaram a influência da eletrólise com a cavitação hidrodinâmica (Figura 3.15) na degradação do corante *Brilliant Red X-3B*. O experimento utilizou 4,5 litros de solução aquosa contendo de 40 a 120 mg/L de corante, aplicando a dupla Ti – IrO₂ como cátodo. Compararam assim, a cavitação hidrodinâmica e a eletrólise separadamente e a combinação dos dois métodos para otimizar a remoção do corante X-3B, mostrando um efeito sinérgico. O composto do corante foi degradado e transformado em múltiplas substâncias benzênicas durante a combinação dos processos. A taxa de degradação aumentou com o acréscimo da concentração. A condição ácida favoreceu a reação de descoloração. O uso do TiO₂ revestido de IrO₂ como ânodo e a grafita como cátodo revelou-se a melhor metodologia para a melhor eficiência de remoção, comparado com outros pares de eletrodos. A adição de SO₄²⁻, NO₃⁻, e especialmente íons de Cl⁻ na solução aumentaram a degradação. Contudo, o CO₃²⁻ inibe a degradação do corante. O resultado ilustrado da variação do espectro UV-vis da solução de *Brilliant Red X-3B*, com os tratamentos simultâneos de eletrólise com a cavitação hidrodinâmica estão ilustrados na Figura 3.16.

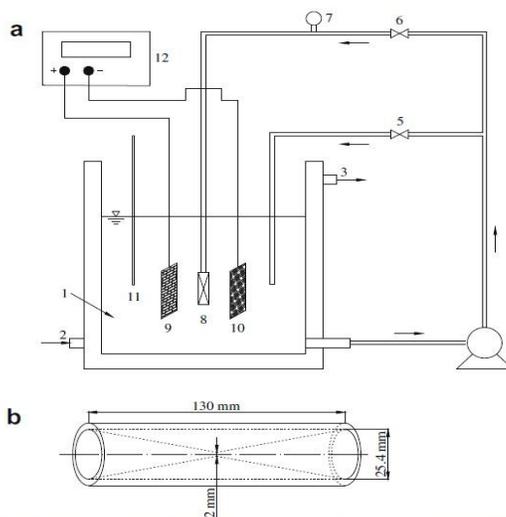


Figura 3.15. (a) Configuração Experimental por cavitação hidrodinâmica e sistema eletrolítico. Nota: (1) Reator; (2) Entrada da água de resfriamento; (3) Saída da água de resfriamento; (4) Bomba centrífuga; (5,6) Válvulas de controle; (7) Manômetro; (8) Tubo de cavitação; (9) Ânodo; (10); Cátodo; (11) Termômetro; e (12) Linha de potência de corrente (b) Geometria do tubo de cavitação.

Fonte: Wang *et al.* (2010)

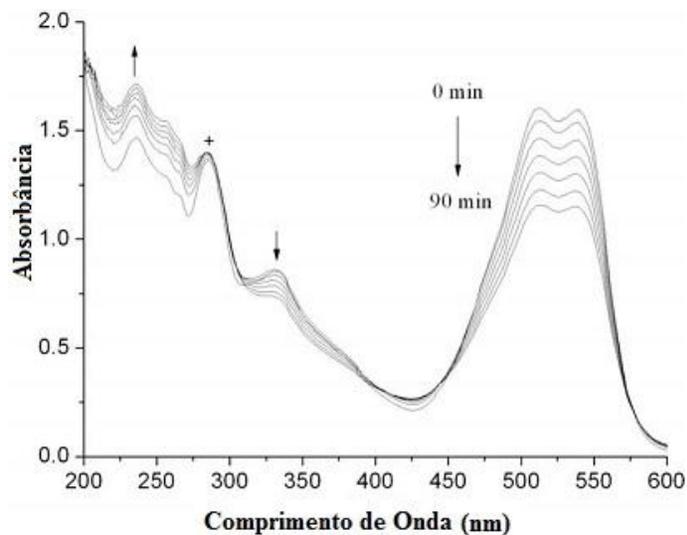


Figura 3.16. Variação do espectro UV-vis da solução de *Brilliant Red X-3B*, com os tratamentos simultâneos de eletrólise com a cavitação hidrodinâmica.

Fonte: Wang *et al.* (2010)

Wang *et al.* (2011a) avaliaram a degradação do corante *C.I Reactive Red 2* utilizando a fotocatalise do dióxido de titânio (TiO_2) em conjunto com um jato hidráulico cavitante, Figura 3.17. Os experimentos foram realizados com um volume de 4 litros com uma lâmpada ultravioleta de 9W durante 5400 segundos. Os efeitos da carga de TiO_2 , concentração inicial do corante, pH, geometria do tubo de cavitação e a adição de ânions da degradação foram avaliados. O processo de fotocatalise com o jato cavitante elevaram a degradação do corante em 136%, mostrando a sinergia, comparado com os tratamentos por fotocatalise e por cavitação hidrodinâmica. Os resultados (Figura 3.18) indicam que a associação entre o tratamento por fotocatalise e da cavitação hidrodinâmica na degradação de águas residuais contendo corante proporciona uma alternativa promissora para tratamentos de águas residuais contaminadas com corante em larga escala.

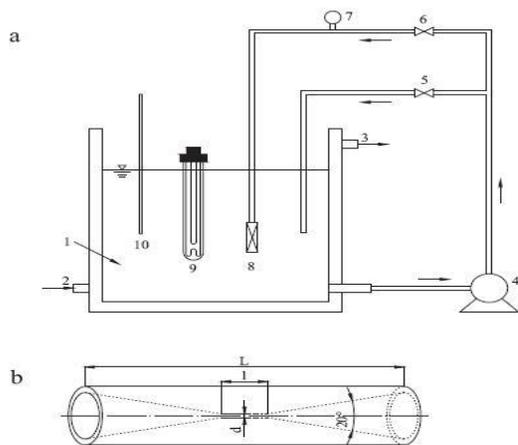


Figura 3.17. (a) Configuração experimental do equipamento para cavitação hidrodinâmica e fotocatalise. Nota: 1 tanque, 2 entrada de água de refrigeração, 3 saída da água de resfriamento, 4 bomba, 5 e 6 válvulas de controle, 7 manômetro, 8 tubo de cavitação, 9 lâmpada UV, 10 termômetro. (b) geometria do tubo de cavitação: L comprimento do tubo de cavitação, l comprimento da garganta do tubo, d interior do diâmetro do tubo.

Fonte: Wang *et al.* (2011a)

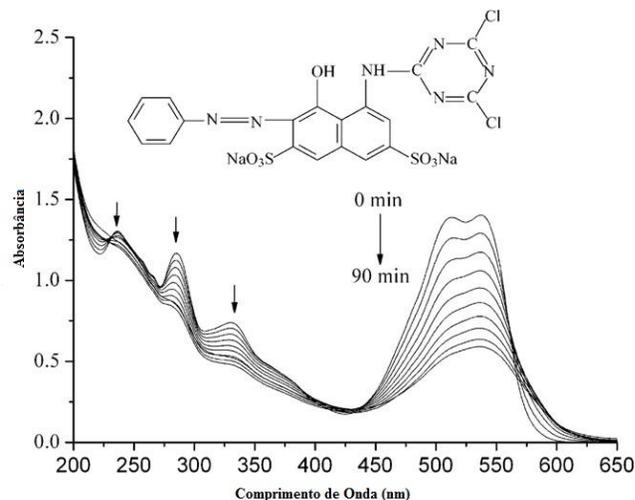


Figura 3.18. Resultado da variação do espectro UV-vis da solução de RR2, com os tratamentos simultâneos de fotocatalise e cavitação hidrodinâmica.

Fonte: Wang *et al.* (2011a)

Wang *et al.* (2011b) testaram a degradação do corante K-2BP com a cavitação heterodinâmica, a cavitação ultrassônica, cavitação hidrodinâmica combinada da adição de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e cavitação ultrassônica combinada com a adição de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O sistema possuía um tanque de 40 litros, o tempo de tratamento foi de 7200 segundos a pressão de 0,6 MPa, a temperatura de 49,85 °C. Após os 7200 segundos de ensaio a degradação do K-BP foi de 92,2% para uma concentração inicial de 10 mg L⁻¹ do corante e de 24,7% para uma concentração de 50 mg L⁻¹. Um evidente efeito sinérgico entre a cavitação hidrodinâmica e o peróxido de hidrogênio foi verificado e uma variedade de parâmetros de reação foram investigados para a degradação do K-2BP.

Saharan *et al.* (2011) utilizaram a cavitação hidrodinâmica através de um tubo Venturi de metal e a adição de H_2O_2 externamente ao fluido tratado em concentrações que variam de 0 a 3400 μ M. O objetivo do estudo foi efetuar a degradação do corante Red 120 em concentração inicial constante em 50 ppm. A pressão de operação foi de 3,5 bar (0,35 MPa) e o volume tratado foi de 6 litros por 3 horas de ensaio. A temperatura variou durante os ensaios de 30 a 35 °C. As análises de absorbância do corante Red 120 foram monitoradas em Espectrofotômetro UV, calculadas em comprimento de onda de 513 nm. A mineralização foi analisada com auxílio de

equipamento que mede o Carbono Orgânico Total. A pressão de entrada e número de cavitação C_v versus a taxa de fluxo do equipamento foram utilizadas para a otimização dos efeitos da cavitação. Os autores também se preocuparam com o estudo fotográfico de dentro do tubo Venturi, utilizando outra estrutura em acrílico com uma câmera da Canon EOS 1000D model para otimizar as condições de operação do equipamento.

Braeutigam *et al.* (2012) utilizaram um equipamento que possibilitou o tratamento de água por dois métodos de cavitação, o hidrodinâmico e o acústico. No trabalho os autores testaram a degradação do fármaco carbamazepina que é um anti-epilético, nas concentrações de (1-50 μgL^{-1}). A degradação em 15 minutos em condições otimizadas de 5 μgL^{-1} de carbamazepina chegou a 96%. Além disso, a sinergia entre a cavitação hidrodinâmica e a acústica somou 63% com base nos métodos individuais, devido ao aumento na geração de radicais OH. As concentrações de carbamazepina foram monitorados e depois de 60 minutos, sem metabolitos conhecidos foram detectáveis por espectrometria LC-MS/MS.

A partir do equipamento tipo jato cavitante para avaliação de erosão por cavitação em concretos, desenvolvido por Dalfré Filho (2005), Assis *et al.* (2014) implementaram adaptações para usar o equipamento como técnica alternativa para inativação de microrganismos na água. A bomba de deslocamento positivo de alta pressão (em torno de 14,0 MPa) e baixa vazão foi adaptada no circuito para recircular 40 litros de água a ser tratada. Uma tubulação flexível conduziu a água contaminada até a bomba de alta pressão. Na saída da bomba colocou-se uma tubulação que suporta altas pressões e que conduzia a água até um bocal com orifício de 0,02 m de diâmetro (Figura 3.19).

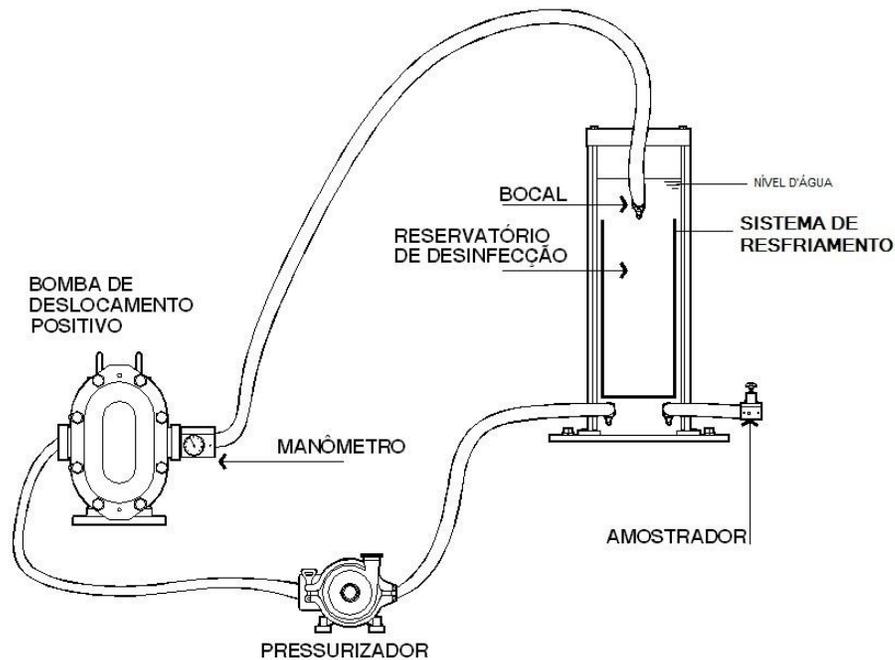


Figura 3.19. Esquema do equipamento de inativação usando o jato cavitante.

Fonte: Assis, *et al.* (2014).

Assis *et al.* (2010) verificaram a degradação do corante azul de metileno através da cavitação hidrodinâmica. Os experimentos foram realizados em diferentes pressões, a citar, 4, 8, 12 e 14 MPa.

Na maioria dos resultados, pôde-se observar aumento da absorbância no tempo seguinte ao tempo inicial. Contudo, detecta-se nos tempos finais diminuição da absorbância em relação ao tempo inicial. O melhor resultado da degradação foi à pressão de 14 MPa (Figura 3.20). Nesta pressão, notou-se que a maior diferença de absorbância ocorreu na faixa visível, com redução de 11%; já na faixa do ultravioleta, a diferença de absorbância não foi significativa, atingindo menos que 0,35%. A temperatura final no tratamento foi de 72 °C.

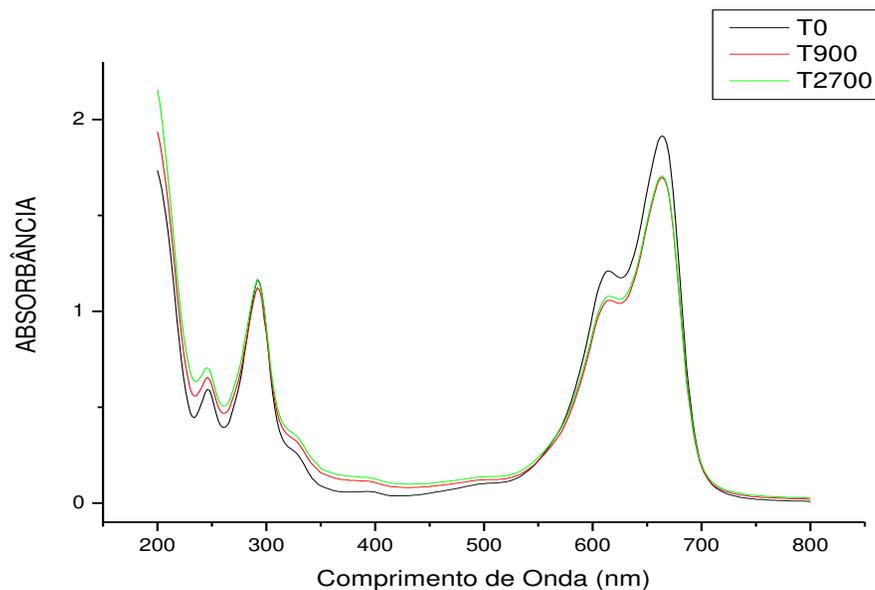


Figura 3.20. Resultados de degradação do azul de metileno a pressão de 14 MPa.

Fonte: Assis, *et al.* (2010).

Ensaio realizado por Assis *et al.* (2014) mostraram a inativação de *Escherichia coli* com diferentes geometrias de bocais: circular, cônico de 20° e cônico de 132° (Figura 3.21). A Figura 3.22, apresenta o resultado para inativação de *E. coli* com bocal cônico de 132°, nas pressões de 4,8, 10 e 12 MPa. Verificou-se redução, ao longo do tempo, do número de células viáveis. Esta redução, no fim dos testes com a pressão de 12 MPa, ficou em torno de 4 log. A temperatura do tratamento não ultrapassou 40 °C.

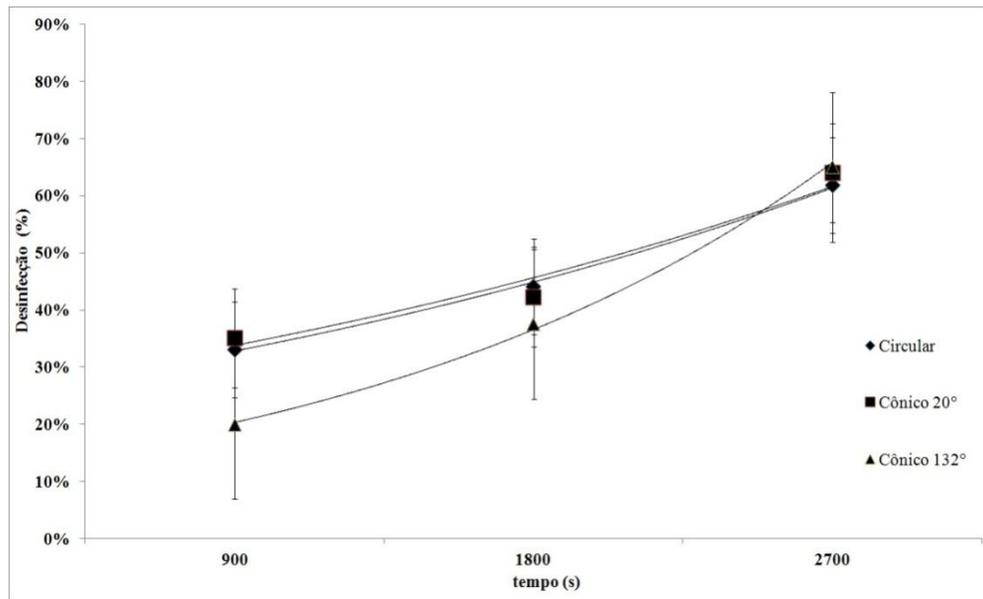


Figura 3.21. Resultado para inativação de *E. coli* com diferentes geometrias de bocais: circular, cônico de 20° e cônico de 132°.

Fonte: Assis, *et al.* (2014).

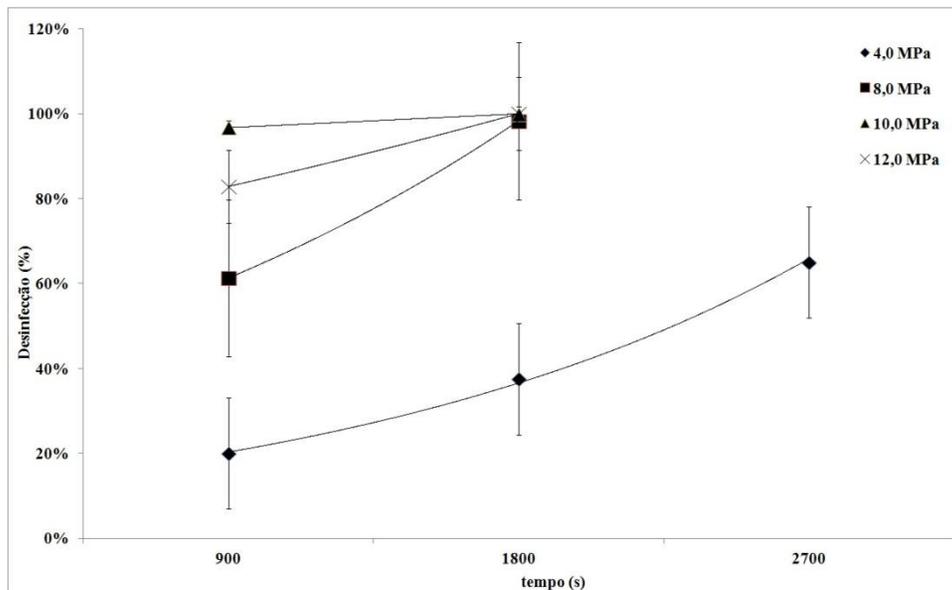


Figura 3.22. Resultado para inativação de *E. coli* com bocal cônico de 132°, nas pressões de 4,8, 10 e 12 MPa.

Fonte: Assis, *et al.* (2014).

Assis *et al.* (2013), avaliaram as condições de testes como pressão, tempo e material componente da serpentina do sistema de refrigeração do sistema de jato cavitante. O trabalho foi apresentado no 35th IAHR World Congress, considerando a variável pressão de testes e mantendo-se o material cobre como componente da serpentina de refrigeração. Obteve-se mais de 90% de inativação dos microrganismos, com pressões de 10,00 e 5,00 MPa. Para ambas as situações, a inativação é evidente, já nos primeiros 900 segundos de ensaio. Para a pressão de 0,80 MPa, ela é observada a partir de 1800 segundos de ensaio, alcançando-se a taxa de 90% de inativação. Todos os testes foram realizados com águas naturais. Evidencia-se que baixas pressões são suficientes para inativar as bactérias dos grupos *Escherichia coli* e coliformes totais, em tempo de testes relativamente curtos.

Considerando o material componente da serpentina, para águas naturais e pressão de 0,00 MPa (sem bocal), a eficiência de 90% foi alcançada em 2700 segundos. Para a cepa de *Escherichia coli* (ATCC 25922) preparada em laboratório e inoculada no equipamento tipo jato cavitante, na operação com pressão de 0,00 MPa e com serpentina têxtil, a inativação foi de 11% em 2700 segundos. Já para a serpentina de cobre alcançou-se 100% em 2700 segundos (no tempo final dos testes).

Como resultado observou-se que o equipamento tipo jato cavitante com o sistema de resfriamento em serpentina de cobre é mais eficiente que com a serpentina têxtil, na inativação de bactérias. O custo do material têxtil é 68,75% mais baixo que o uso do cobre, além da fácil instalação. Porém, deve-se ressaltar que a serpentina têxtil mostrou-se ineficiente para controlar as temperaturas dos testes abaixo de 30°C e para pressões superiores a 4,00 MPa. Dependendo do orçamento disponível e do tempo requerido pode-se configurá-lo de formas diversas para atender a uma necessidade específica.

3.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há um número crescente de pesquisas que utilizam o fenômeno da cavitação para a desinfecção de água. Desta revisão, nota-se que, dentre os métodos para tratamento da água por cavitação, a cavitação hidrodinâmica é a mais estudada e difundida. Isto porque apresenta melhores resultados de tratamento, sendo considerada a mais eficiente. O equipamento tipo jato cavitante é uma destas técnicas. Porém, atualmente não existe um método padronizado para proceder a desinfecção com esta técnica, no que diz respeito às pressões e velocidades de testes. A sinergia entre o processo de cavitação e os processos oxidativos é um tema atual e relevante de pesquisa. Aproveitando-se da evidência da formação de radicais hidroxila pelo sistema cavitante, o aprofundamento nesta questão mostra-se promissor. Os artigos recentes têm enfoque na degradação de poluentes persistentes, como os fármacos, corantes, efluentes industriais, pesticidas, além das pesquisas com microrganismos.

É visível, na maioria dos trabalhos, uma necessária projeção dos reatores cavitacionais para operarem em grande escala, com as recomendações dos estudos teóricos e experimentais.

Verifica-se que os trabalhos de Kumar *et al.* (2000) e Vichare *et al.* (2000) Balasundaram e Harrison (2006), todos oriundos de um mesmo grupo de pesquisa, estudaram a cavitação hidrodinâmica com um bocal tipo “prato” com quantidade de orifícios intercambiáveis. Os resultados, contudo, não evidenciam correlação entre geometria dos bocais e a taxa de desinfecção ou decomposição de compostos. Também não fica clara a obtenção de cada configuração e o índice de cavitação e sua consequente correlação com o tratamento da água. Estudos de imagem também vêm sendo utilizados para a otimização das condições de operação. Considerando todos os trabalhos estudados e os trabalhos desenvolvidos no âmbito do grupo de pesquisa da FEC-UNICAMP, pode-se concluir que o fenômeno da cavitação torna-se relevante na aplicação para o tratamento de água. O estudo para o aprimoramento de técnicas de tratamento, seja em termos de aplicação ao saneamento, seja em termos de eficiência energética e de economia é importante para a sustentabilidade das atividades humanas relacionadas à água. Há muitos métodos disponíveis para auxiliar os processos de tratamento, com diferentes abordagens. Assim, dentre os métodos que podem ser empregados, os técnicos e empresas de saneamento devem ter uma clara definição do objetivo do tratamento, para sua definição.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são abordados os materiais utilizados para o desenvolvimento do equipamento tipo jato cavitante usando múltiplos jatos, descrevendo os componentes empregados para a montagem da bancada de testes e, por fim, os métodos de ensaio para obtenção dos resultados de inativação da bactéria *Escherichia coli*.

4.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi construído o assim denominado equipamento tipo jato cavitante usando múltiplos jatos. O equipamento pode ser visualizado esquematicamente na Figura 4.1. O equipamento construído é descrito na sequência. Uma bomba de deslocamento positivo de alta pressão de 35,00 MPa e vazão de 29,00 L/min ($4,83 \times 10^{-4}$ m³/s) recircula a água a ser tratada. Uma bomba centrífuga garante a pressão mínima de operação na entrada da tubulação de sucção da bomba de deslocamento direto, que é de 10,00 mca (0,98 MPa), tendo sido instalada entre o reservatório de reação e a bomba de deslocamento positivo. O reservatório de reação é de geometria cilíndrica de 0,68 m de diâmetro e 0,75 m de altura, confeccionado em aço inox, e reserva a água que circula pelo sistema de tratamento, em circuito fechado, totalizando 0,246 m³.

Na tubulação de recalque da bomba de deslocamento positivo foram instalados uma válvula reguladora de pressão (de maneira a controlar as pressões desenvolvidas nos testes), um manômetro e uma válvula de alívio (para garantir a segurança da operação do equipamento, caso ocorra aumento súbito da pressão da bomba de deslocamento direto). Na Tabela 4.1 são listados todos os componentes do equipamento desenvolvido e instalado. Todos os componentes hidráulicos foram adquiridos para suportar 35,00 MPa de pressão.

Na Figura 4.2 é apresentado o detalhamento do projeto do reservatório de reação. Já na Figura 4.3 está detalhado o reservatório de reação construído e que permite duas configurações, (a) para ensaios sem sistema de resfriamento, que permite o estudo de visualização de jatos cavitantes rápidos sem a interferência da serpentina sobre o jato, e (b) para ensaios com sistema de resfriamento, que permite o estudo da inativação das bactérias sem a interferência do aumento

da temperatura. Finalmente, na Figura 4.4 pode-se ver a foto do equipamento construído e instalado no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

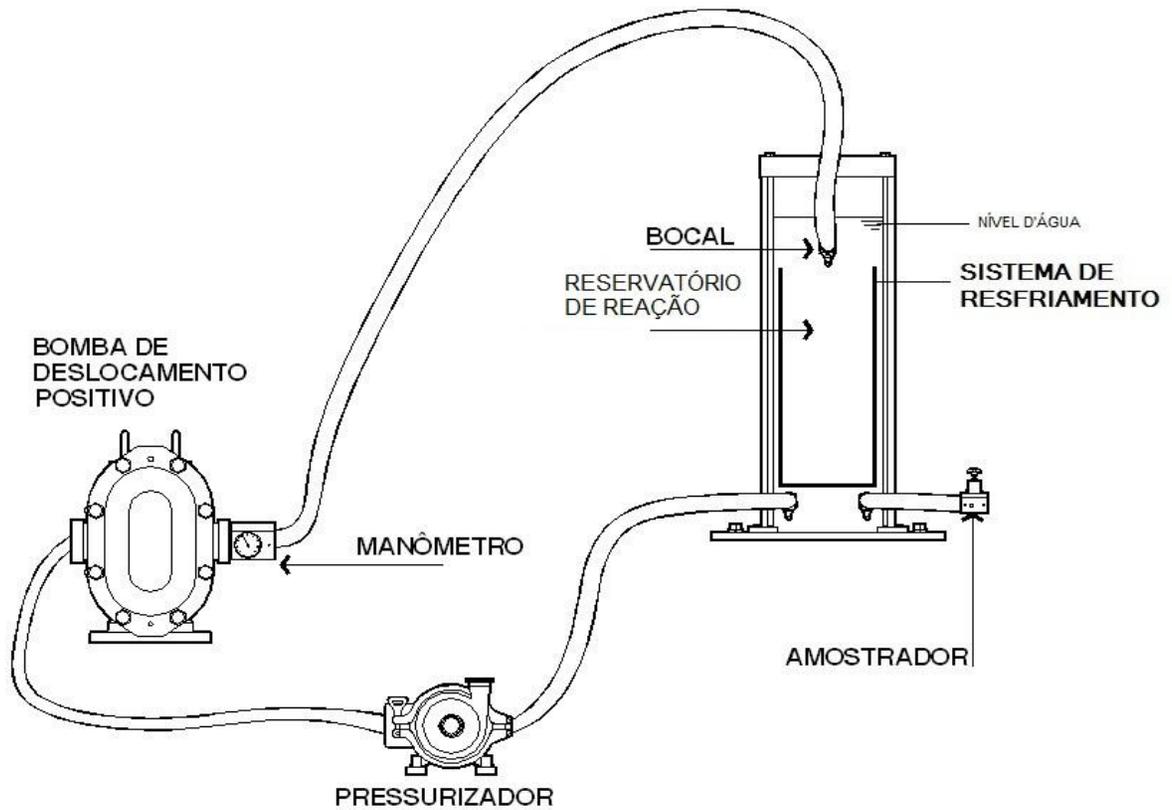


Figura 4.1. Esquema da bancada de tratamento.

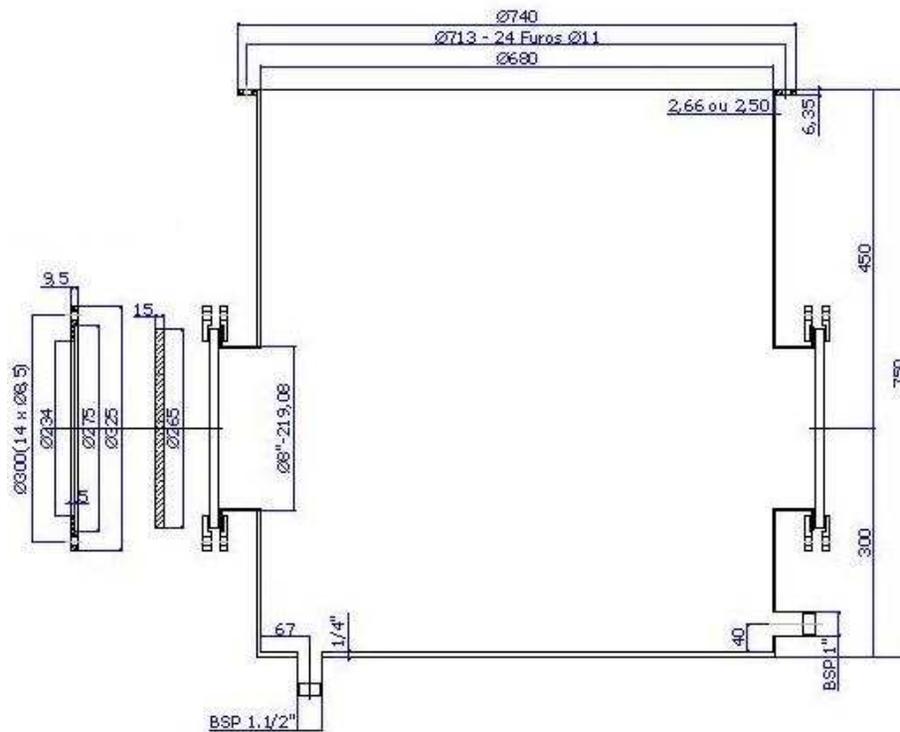


Figura 4.2. Dimensões características do projeto do reservatório de reação em aço inox.

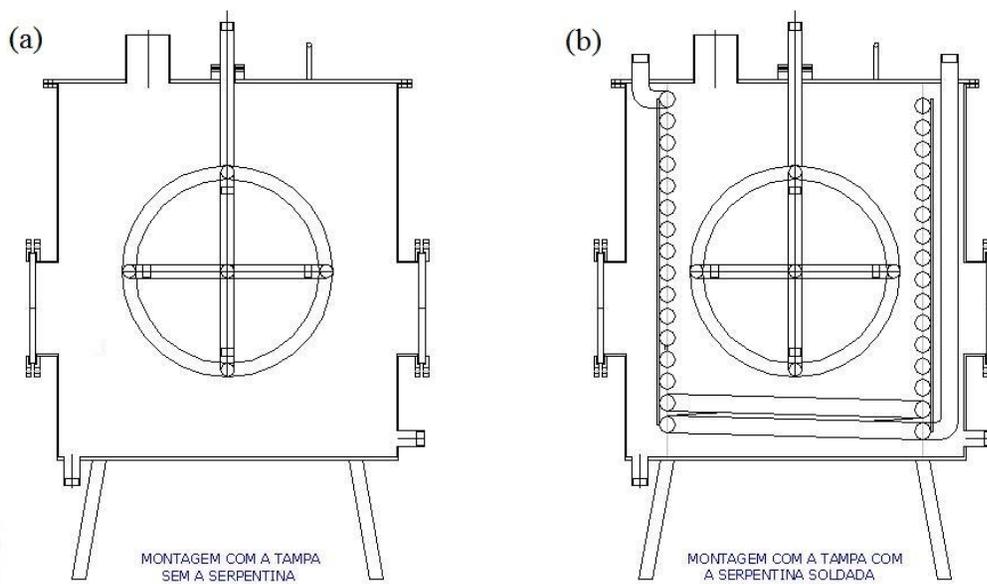


Figura 4.3. Reservatório de reação em aço inox: (a) montagem sem a serpentina de resfriamento; (b) montagem com a serpentina de resfriamento.



Figura 4.4. Fotografia da bancada de tratamento.

Tabela 4.1. Componentes dos equipamentos adquiridos e suas características.

Componente	Marca	Características
Bomba Alternativa Triplex de Simples Efeito	PROMINAS	modelo BPS-328-025. $4,83 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (29 L/min). 30 cv a 600 rpm, 220/380/440 VOLTS, 60 Hz, trifásico.
2 Bombas Centrífugas	Thebe	motobomba TH-16NR 1,0 cv 220/380 Trifásica, Vazão Bomba $15 \text{ m}^3/\text{h}$ pressão máx requerida de 0,30 MPa (30,00 mca)
Reservatório de Reação	Aço inox 304	0,68 m de diâmetro e 0,75 m altura (246 L)
Pedestal com braço de força e suporte	Aço carbono	2,62 m de altura 0,71 m guincho
Serpentina Aço	Aço inox 304	$1,9 \times 10^{-2} \text{ m}$ (3/4") de diâmetro e 25,84 m de comprimento
Tampa	Aço inox 304	0,74 m de diâmetro
Bocal tridimensional	Aço inox 304	6 saídas
Múltiplos jatos	Aço inox 420	8 saídas (0,15 m (6") diâmetro por $5,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ (2") de espessura)
1 Bocal	Aço inox 304	cônico 132° orifício $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
10 Bocais	Aço inox 304	cônicos 132° orifício $5,0 \times 10^{-4} \text{ m}$
Mangueira hidráulica alta pressão	Parker	flexível 180° (35 MPa)
Válvula direcional	Parker	RAH101S30 MÉXICO 1307
Mangueira hidráulica	Parker	L3,50 m $\varnothing 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/2") (35,00 MPa)
2 Mangueiras hidráulicas	Parker	L5,00 m $\varnothing 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/2") (35,00 MPa)
Válvula redutora de pressão	Parker	PRH101S30
Manômetro vertical c/ glicerina	MVG-400/63	0-40,00 MPa
Válvula limitadora de pressão	Rexroth	DBDS10G 1X/400 13W36 – 7362 – P4101416 – 3 400 bar 120 L/MIN
Válvula para segurança do sistema	Rexroth	DBDS 8 G1A/315
Tubulação PVC	Aquaterm	Sucção 1 1/2 – Recalque 1"

Na saída da tubulação de recalque, dentro do reservatório de reação, foram instalados os bocais. Foram utilizadas duas configurações inovadoras de múltiplos bocais em aço inox, especialmente projetadas para esta pesquisa (ver esquema das Figuras 4.5. e 4.6).

A geometria interna de todos os bocais é cônica de 132° (Dalfré Filho, 2005). O diâmetro do orifício varia de acordo com a composição do número de bocais na instalação, uma vez que são intercambiáveis. Para esta pesquisa, foram utilizadas 3 configurações diferentes de bocais, a saber:

1. Um sistema de bocais tridimensional com 6 orifícios (Figura 4.5);
2. Um sistema de bocais de múltiplos jatos, com 8 orifícios, intercambiáveis, que foram combinados de 3 até 8 orifícios, tendo como base a variação da pressão dos testes. Para tanto, foi desenvolvida uma peça maciça de “aço inox 420” com $1,5 \times 10^{-1}$ m (6”) de diâmetro por $5,0 \times 10^{-2}$ m (2”) de espessura. Os orifícios dos bocais foram confeccionados na própria peça (Figura 4.6);
3. Um bocal único com o orifício $1,5 \times 10^{-3}$ m (Figura 4.7). (Dalfré Filho (2005)).

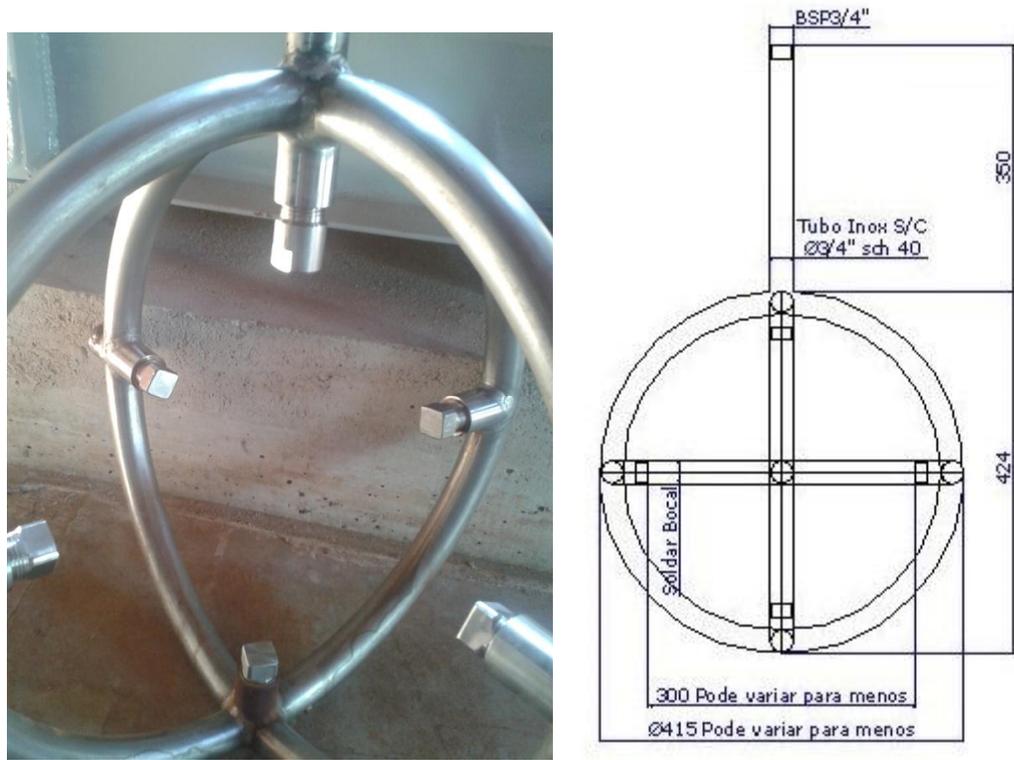


Figura 4.5. Esquema do sistema de bocais tridimensional.

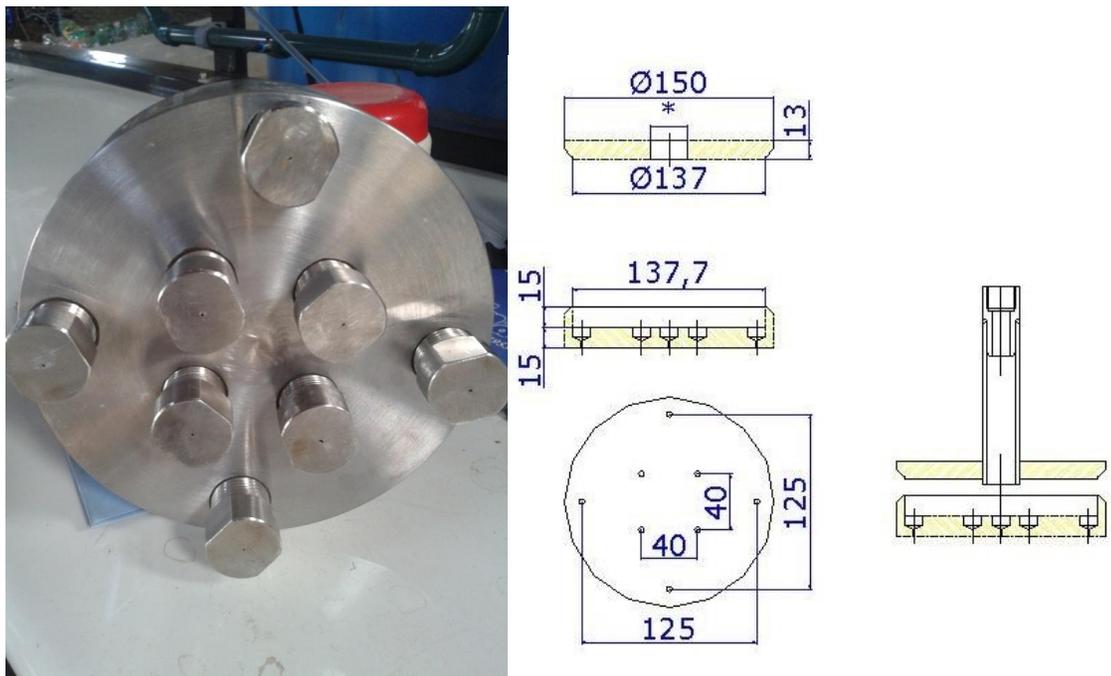


Figura 4.6. Esquema do sistema de bocais com múltiplos jatos.

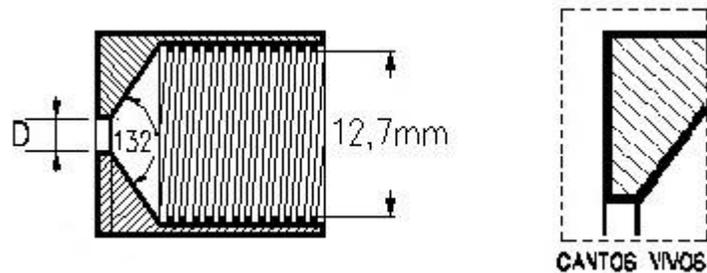


Figura 4.7. Esquema do bocal cônico de 132°.

Fonte: **Dalfré Filho (2005).**

No esquema da Figura 4.8, pode-se observar o projeto com detalhes do sistema de refrigeração projetado para manter a temperatura do líquido em tratamento constante, podendo-se verificar a eficiência da cavitação propriamente dita para tratamento sem a interferência do aumento da temperatura nos testes.

Este sistema (Figura 4.9) foi confeccionado em aço inox, evitando a interferência do material nos testes como verificado por Assis *et al.* (2013). Uma bomba centrífuga instalada no circuito garantiu a recirculação da água que resfria o sistema. Essa água foi abastecida a partir de um reservatório de água limpa com $0,750 \text{ m}^3$ de volume.

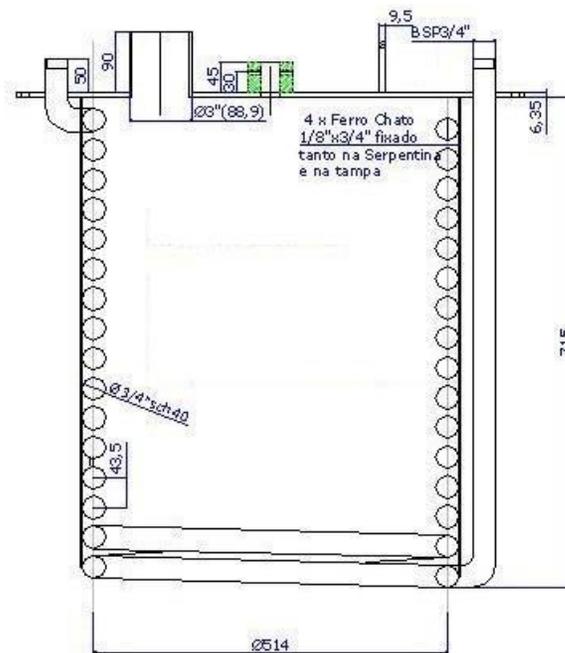


Figura 4.8. Dimensões da serpentina de resfriamento em aço inox.



Figura 4.9. Fotografia da serpentina em aço inox.

4.2. ENSAIOS DE INATIVAÇÃO

Para a verificação das células viáveis ao longo do tempo, nas condições de testes, foi estabelecido o seguinte procedimento de ensaio. A temperatura da água contaminada foi monitorada com um termômetro em cada amostragem. Assim como, foi monitorada a temperatura ambiente e a do reservatório do sistema de resfriamento. Para a verificação da eficiência de remoção do equipamento com relação ao consumo de energia, a corrente elétrica consumida pela instalação foi medida e registrada.

Para a contagem de células viáveis da cepa de bactéria *Escherichia coli* (ATCC 25922) não patogênica, antes e depois dos testes, empregaram-se as Cartelas de Colilert[®]. Para cada teste microbiológico, testes físico-químicos adicionais foram realizados, a saber, condutividade elétrica, turbidez, pH e oxigênio dissolvido. Para cada teste físico-químico foi empregado um equipamento específico, como se verifica da Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Equipamentos dos testes físico-químicos empregados.

Análises	Equipamento	Marca
Condutividade	Condutivímetro	Micronal Condutivímetro B330
Turbidez	Turbidímetro	HACH 2100N Turbidimeter
pH	pHmetro	Thermo Orion pH meter model 410A+
Oxigênio Dissolvido	Oxímetro Portátil	Alfa Kit
Amperagem	Alicate Amperímetro	Minipa ET-3200A
Temperatura	Termômetro Digital	Minipa MT-600

Os testes foram realizados em etapas, de maneira a buscar o ponto de máxima eficiência de funcionamento do equipamento. Primeiramente foram testadas as diferentes configurações de bocais na pressão máxima de operação da bomba, 30,00 MPa. Em seguida reduziu-se a pressão de teste para a metade da pressão máxima de operação, ou seja, 15,00 MPa. Comparando-se os resultados das três configurações de bocais nas pressões de 30,00 MPa e 15,00 MPa, realizou-se uma última etapa de testes, para uma pressão intermediária, obtida a partir da análise dos resultados anteriores. Neste caso, 20,00 MPa. Na Figura 4.10, pode-se observar o esquema dos ensaios realizados.

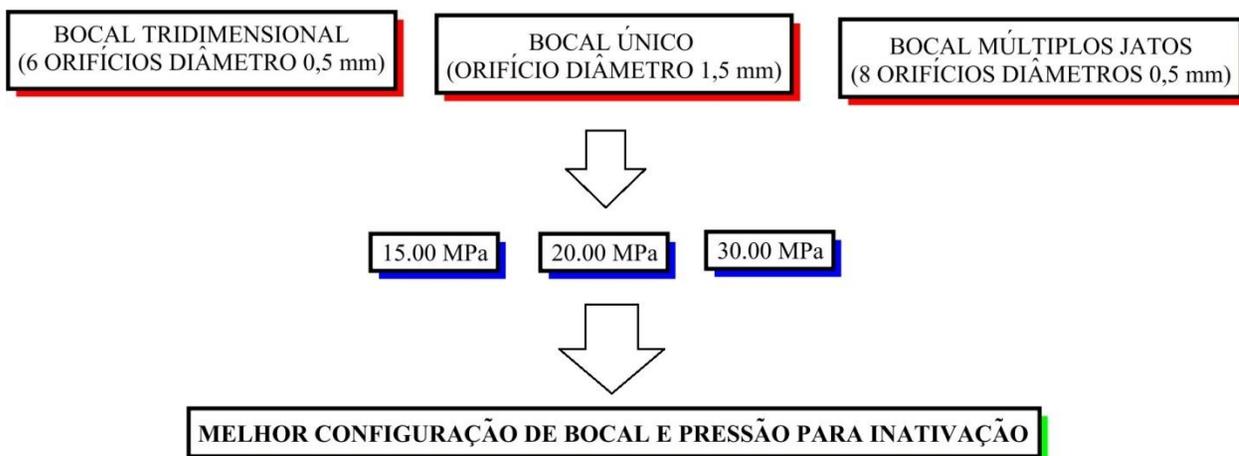


Figura 4.10. Esquemática das etapas de ensaios.

Ao final das análises, foram realizados cálculos da eficiência energética do equipamento em relação a concentração final e inicial de bactéria, o cálculo foi realizado de acordo com a equação 4.1.

$$EE = \frac{(C_i - C_f) \cdot \nabla}{P \cdot T} \quad (4.1)$$

Sendo:

EE: Eficiência energética (UFC/J)

C_f: Concentração Final de *E. coli* (UFC/mL);

C_i: Concentração Inicial de *E. coli* (UFC/mL);

∇ : Volume tratado (mL);

P: Potência do equipamento (W); e

T: Tempo de tratamento (s).

Os ensaios com o equipamento tipo jato cavitante foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos (LHMF). As análises das amostras de água em tratamento foram realizadas nos Laboratório de Saneamento. O desenvolvimento do projeto contou com o apoio dos técnicos dos laboratórios da FEC-UNICAMP. O descarte de todo o resíduo obedeceu aos padrões do laboratório de Saneamento da FEC-UNICAMP.

4.3. MÉTODO DE ENSAIO

4.3.1. TESTES HIDRÁULICOS

Antes da realização dos ensaios de inativação, foram realizados testes hidráulicos para certificação do adequado funcionamento do sistema hidráulico da bancada de testes. Foi dada especial atenção a eventuais vazamentos de água, que poderiam contaminar o ambiente do LHMF. Também corrigiu-se a existência de vazamentos de óleo da bomba de alta pressão. As pressões da bomba em diferentes pressões foram aferidas, para averiguação da manutenção da pressão constante durante uma batelada de testes. Os bocais eram mantidos limpos, livre de particulados que pudessem entupi-los. Todo o sistema hidráulico foi igualmente mantido limpo, sem adição de qualquer interferente químico (desinfetantes). Esse procedimento evita interferente físico que obstrua os bocais ou prejudique o correto funcionamento do sistema.

4.3.2. PREPARO DE MATERIAIS

No Laboratório de Saneamento eram preparados os frascos para as amostragens microbiológicas com 5 gotas de EDTA 15% (ácido etilenodiamino tetra-acético), o qual é um sequestrante para metais, adiciona-se o EDTA no frasco de coleta para sequestrar estes ions e não interferir na análise, pois alguns metais são tóxicos aos microrganismos. Águas de diluição e caldo nutriente eram previamente preparados, levando em consideração a quantidade a ser utilizada nos ensaios, com uma margem de frascos extras. Juntamente com as ponteiras microbiológicas, todo o material era esterilizado na autoclave do LABSAN.

A bactéria *Escherichia coli* (ATCC 25922) seguiu o mesmo padrão de preparo, sendo repicada previamente, para que no dia do ensaio fosse obtida sempre uma concentração inicial semelhante de bactéria. Os cálculos de diluição foram feitos para se obter concentração inicial de 10^4 UFC/mL ou, no máximo, 10^5 UFC/mL. Para o cálculo da concentração inicial de bactéria foram considerado um volume de 246 litros de água a ser tratada. Para tanto, 25 mL de caldo nutriente contendo suspensão bacteriana eram inoculados em cada ensaio.

4.3.3. ENSAIOS

Para o preparo da água a ser tratada para a inoculação de *Escherichia coli* (ATCC 25922), foi utilizado o desclorificante (Seachem Prime). Após a completa desclorificação, aferida pelo teste de cloro residual (Atlantys), os 25 mL de caldo nutriente contendo bactéria eram adicionados aos 246 litros de água desclorificada no reservatório de reação do equipamento e, após 3 minutos de recirculação sem pressurização da bomba, o ensaio era iniciado.

As amostras foram retiradas no tempo zero de teste e, após, de 15 em 15 minutos, até o tempo de 45 minutos de ensaio. A pressão foi mantida constante e, a cada 15 minutos de testes, foram medidas a temperatura da amostra e do sistema de resfriamento, bem como o oxigênio dissolvido.

Após o encerramento do ensaio de inativação, os frascos de amostras microbiológicas e os testes físico-químicos de condutividade, pH e turbidez foram realizadas no Laboratório de Saneamento.

4.4. DIMENSIONAMENTOS

4.4.1. DIMENSIONAMENTOS DOS SISTEMAS DE BOCAIS

Para projeto da estrutura dos bocais tridimensionais, foi empregada uma distância que não causasse interferência entre os jatos em oposição, o que poderia diminuir a capacidade de inativação. Dalfré Filho (2005) verificou que para além de uma distância de 15 cm entre a saída de um bocal e uma amostra de alumínio, esta amostra não sofria danos de cavitação. Assim, foi adotada uma distância de 30 cm entre os dois bocais em oposição, evitando-se interferência entre os jatos gerados por cada bocal.

Para o cálculo dos diâmetros dos orifícios dos sistemas de bocais, foi empregada a Tabela 4.3, que relaciona a pressão em função da vazão pelo diâmetro do bocal, que é a curva de operação desta bomba de deslocamento positivo. Por exemplo, para um bocal com um orifício de $2,00 \times 10^{-3}$ m de diâmetro, a pressão máxima de operação para a vazão de $4,83 \times 10^{-4}$ m³/s (29,00 L/min) será de 20,00 MPa.

De acordo com as condições de pressão solicitadas ao fabricante da bomba PROMINAS Modelo BSP-328-025 (Figura 4.11) e considerando-se o catálogo de especificação desta bomba, com a curva (Tabela 4.3), o diâmetro dos êmbolos, a potência máxima no eixo da bomba (N_{max}) e a rotação máxima no eixo da bomba (η_{max}), tem-se:

$$D_{\text{êmbolo}}: \frac{3}{4}'' (1,90 \times 10^{-2} \text{ m})$$

$$N_{max}: 25,00 \text{ cv};$$

$$\eta_{max}: 600,00 \text{ rpm};$$

$$Q_{max}: 4,83 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} (29,00 \text{ L}/\text{min})$$

$$P_{max}: 35,00 \text{ MPa} (350,00 \text{ bar})$$

O método de cálculo foi seguido, segundo documento de dimensionamento “PROMINAS de Bocais para Limpeza e Desobstrução” (2013). Os cálculos estão descritos na sequência.

		INDÚSTRIA BRASILEIRA	
		SÃO CARLOS – SÃO PAULO – BRASIL	
		VENDAS-ASSISTÊNCIA TÉCNICA	
		TEL:(16) 3375-9111 FAX:(16) 3375-9110	
BOMBA ALTERNATIVA	ANO 2012	A.FAB. 120964	
MODELO	N° DE CONTROLE	PESO (Kg)	
BPS-328-025-MP	328-024	200	
DIÂMETRO (POL)	3/4	ATENÇÃO O FABRICANTE NÃO SE RESPONSABILIZA SE AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO FOREM ULTRAPASSADAS. A DESCARGA DEVE SER EQUIPADA COM VÁLVULA DE SEGURANÇA. LEIA O MANUAL DE OPERAÇÃO.	
PRESSÃO OPERAÇÃO (Kgf/cm ²)	350		
VAZÃO (L/Min)	29		
ROTAÇÃO OPERAÇÃO (RPM)	600		
POTÊNCIA CONSUMIDA (CV)	26,5		
ABERT.VALV.SEG. (Kgf/cm ²)	385		
POTÊNCIA ABERTURA VALV.SEG.(CV)	29,2		
LÍQUIDO: ÁGUA		TEMP. 30	(°C)
TRANSM.: 1:1,92	OLEO CARTER: SAE 40	VOL.: 4	(L)

Figura 4.11. Plaqueta de identificação da bomba alternativa.

Tabela 4.3. Tabela Pressão x Vazão em função do diâmetro do bocal (PROMINAS)

Pressão (bar)	Pressão X Vazão em Função do Diâmetro do Bocal									
	Diâmetro dos Bocais (mm)									
	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min	L/min
100	1,67	4,27	6,67	9,60	15,00	21,60	26,68	60,22	82,26	108,00
150	2,04	5,22	8,16	11,75	18,34	32,67	51,11	73,76	100,70	132,30
200	2,36	6,03	9,43	13,57	21,21	37,73	59,02	85,17	116,30	152,76
250	2,63	6,74	10,54	15,18	23,72	42,18	65,99	95,22	130,10	170,79
300	2,88	7,40	11,54	16,62	26,00	46,21	72,28	104,30	142,50	187,10
350	3,12	7,98	12,47	17,96	28,06	49,91	78,08	112,70	153,90	202,09
400	3,33	8,53	13,33	19,19	30,00	53,35	83,47	120,40	164,50	216,04
450	3,53	9,05	14,14	20,36	31,82	56,59	88,53	127,80	174,50	229,15
500	3,72	9,54	14,90	21,46	33,54	59,65	93,32	134,70	183,90	241,54
550	3,91	10,00	15,63	22,50	35,18	62,57	97,89	141,20	192,90	253,33
600	4,08	10,45	16,33	23,51	36,74	65,35	102,20	147,50	201,50	264,59
650	4,25	10,87	17,00	24,47	38,24	68,02	106,40	153,50	209,70	275,40
700	4,41	11,29	17,63	25,40	39,68	70,58	110,40	159,60	217,60	285,80

Fonte: PROMINAS.

Considerando-se 5% do valor da vazão máxima (solicitada) como reserva para compensar o desgaste dos furos dos bocais, tem-se para o dimensionamento o valor de vazão de 27,60 L/min.

- Para o sistema de bocais de múltiplos jatos (Figura 4.6), como o máximo possível de 8 diâmetros de orifícios, logo, para cada orifício (Qf):

$$Q_f = 27,6 \text{ L/min} / 8 \text{ orifícios} = 3,45 \text{ L/min}$$

A partir da Tabela 4.3, para a pressão de 35,00 MPa (350,00 bar) e do valor da vazão individual para cada orifício, o diâmetro do orifício para este modelo de bomba resulta entre os valores de 0,50 e 0,80 mm. Assim, interpolando-se, tem-se 0,52 mm. Foi adotado, então, o valor de 0,50 mm para este sistema.

- Para o sistema de bocais tridimensional, tem-se o máximo de possível de 6 diâmetros de orifícios, logo, para cada orifício (Qf):

$$Q_f = 27,6 \text{ L/min} / 6 \text{ orifícios} = 4,60 \text{ L/min}$$

A partir da Tabela 4.3, para a pressão de 35,00 MPa (350,00 bar) e do valor da vazão individual para cada orifício, o diâmetro do orifício para este modelo de bomba resulta entre os valores de diâmetros de 0,50 e 0,80 mm. Assim, interpolando-se, tem-se 0,59 mm.

Para evitar trocas de bocais com diâmetros de orifícios diferentes, que poderiam originar erros nos testes, optou-se pelo diâmetro padronizado de 0,50 mm. Verificando-se os valores de pressão e de vazão, no sentido inverso do cálculo, ou seja, partindo-se do diâmetro de 0,5 mm, não se verificou sobrecarga significativa que gere problema de segurança ou de diferenças significativas de resultado. Foi adotado, então, o valor de 0,50 mm de diâmetro para todos os bocais.

- Para o bocal único, ou seja, com apenas 1 diâmetro de orifício, pelo cálculo análogo, obteve-se o valor de 1,5 mm de diâmetro de orifício.

4.4.2. DIMENSIONAMENTOS DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Como se trata de uma bomba de deslocamento direto em que a vazão e a pressão são proporcionais para um determinado diâmetro de bocal, verifica-se que para cada bocal, tem-se um índice de cavitação.

Para os cálculos hidráulicos da vazão, velocidade, número de Mach e o sigma do índice de cavitação, para todas as pressões de ensaio com o bocal de diâmetro de $1,50 \times 10^{-3}$ m e para o bocal de diâmetro de $0,05 \times 10^{-3}$ m, para a temperatura foram consideradas a média das amostras de 35,00 °C, a massa específica da água (ρ) de 993,96 kg/m³, a pressão de vapor (p_v) de 5849,00 Pa e celeridade conservadora de 1496 m/s. A pressão atmosférica do local considerada nos cálculos foi de 0,095117 MPa a 25°C.

Os cálculos do índice de cavitação (σ) e do número de Mach (Ma) foram realizados de acordo com as equações (3.2) e (3.3) e descritas no Capítulo 3. Para o cálculo da vazão de cada diâmetro de orifício, foi utilizada a Tabela 4.3. Os resultados são observados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Adimensionais importantes para o equipamento tipo jato cavitante.

Diâmetro	Pressão	Vazão	Velocidade	Mach	sigma
mm	MPa	(x10 ⁻⁴) m ³ /s	m/s	Ma	σ
1,5	15,095	3,06	172,97	0,116	1,01
	20,095	3,54	200,04	0,134	1,01
	30,095	4,33	245,22	0,164	1,01
0,5	15,095	0,34	173,16	0,116	1,01
	20,095	0,39	200,32	0,134	1,01
	30,095	0,48	244,46	0,163	1,01

Os resultados da Tabela 4.4 indicam que o líquido pode considerado incompressível, pois os valores do número de Mach não ultrapassaram o valor limite de $Ma = 0,2$. No que diz respeito ao valor do índice de cavitação, o valor calculado de $\sigma = 1,01$ designa o equipamento tipo jato cavitante construído. Este valor pode ser comparado com equipamentos de funcionamento análogo, indicando a suscetibilidade do equipamento para dar início ao fenômeno.

4.4.3. DIMENSIONAMENTO DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO

O número de ciclos (de recirculação) da bancada de testes sem pressão foi assim calculado:

Sabe-se que vazão corresponde à divisão do volume pelo tempo. O volume neste caso é o volume do reservatório de reação ($246 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) e o tempo, é aquele de recirculação. Considerando-se que a vazão de projeto de é de 262,33 L/min (que se refer a somatória da vazão da bomba de deslocamento positivo mais a vazão da bomba centrífuga), o tempo de recirculação é de 56,27 s, ou seja, aproximadamente 1 min. Assim, para completar 1 ciclo de 246 litros, o equipamento leva aproximadamente 1 minuto.

4.4.4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Para o dimensionamento do sistema de refrigeração foram realizados testes onde foi verificada a inativação das bactérias dos grupos coliforme total e *Escherichia coli* em meio natural. Verificou-se que o equipamento permite diferentes configurações de testes, com diferentes eficiências de inativação.

Foi empregado o material aço inox como serpentina de resfriamento, para que não houvesse nenhuma influência do material da serpentina na inativação, nem da temperatura do líquido contaminado durante os testes. O sistema de refrigeração em aço inox foi dimensionado de maneira análoga ao do equipamento tipo jato cavitante existente em cobre (Assis *et al.* 2013). Assim, obteve-se o diâmetro de tubo de $1,90 \times 10^{-2}$ m. Para o comprimento total da serpentina, foi usada a altura total disponível do reservatório de reação. Obteve-se, então, 16 círculos de espirais, com comprimento total de 25,84 m.

Para a verificação da eficiência do sistema de refrigeração, durante a realização dos ensaios, a temperatura do sistema de resfriamento foi monitorada, sendo assim possível analisar a eficiência do mesmo durante os ensaios, com as diferentes pressões e as configurações de bocais utilizadas. A seguir, na Tabela 4.5, é possível analisar a eficiência térmica do equipamento, em que a temperatura máxima final atingida no sistema de resfriamento foi de 34,10 °C e a mínima foi de 31,20 °C, de acordo com as Tabelas do Anexo C.

Tabela 4.5. Temperaturas finais do sistema de resfriamento projetado.

Temperaturas Finais	Sistema de Resfriamento	Amostras	Aquecimento
	°C	°C	°C
15 MPa	31,20	32,90	1,70
20 MPa	34,00	35,90	1,90
30 MPa	34,10	37,00	2,90
1 bocal	32,43	34,00	1,57
6 bocais	33,77	35,90	2,13
Média Geral	33,10	34,95	1,85

Em termos de eficiência, o sistema possui um bom desempenho, comparando as temperaturas médias finais. Conforme se aumentou a pressão de ensaio, aumentou-se, também, o aquecimento da água, como era esperado. Esta mesma tendência foi verificada conforme se aumentou o número de bocais. Comparando-se as médias finais de temperatura do sistema de resfriamento com a média final da temperatura das amostras, a maior variação de temperatura entre as médias foi à maior pressão de 30,00 MPa, (2,90 °C). Já a menor variação entre as médias

foi de 1,57 °C, quando se utilizou o bocal único. No Anexo C encontram-se os dados tabelados de todos os testes de resfriamentos realizados.

4.5. PROBLEMAS ENCONTRADOS

4.5.1. ENTREGA DO QUADRO ELÉTRICO

Antes da sua instalação do quadro elétrico, foram verificados erros no projeto solicitado para este trabalho. Ele foi subdimensionado, considerando-se todos os equipamentos elétricos necessários para a bancada de testes, além de falta de aterramento da porta do quadro e erros de dimensionamento quanto a tensão no projeto. Após a revisão no projeto para as instalações do quadro elétrico, ele pôde ser instalado e as bombas foram acionadas.

4.5.2. CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DA VÁLVULA REGULADORA E DE ALÍVIO PARA CONTROLE E REGULAGEM DA PRESSÃO.

Juntamente com a compra das peças hidráulicas em alta pressão, foram adquiridas duas válvulas para suprirem a função de válvula reguladora da pressão de ensaio e de válvula de alívio, para segurança.

Após a instalação e o teste em alta pressão foi verificada a entrega de duas válvulas idênticas que não tinham funcionalidade no sistema proposto, nem como válvula reguladora, nem como válvula de alívio, após averiguação no equipamento construído. Com isso, foram realizadas buscas intensas no mercado de válvulas para troca por válvulas adequadas. As válvulas mais adequadas, que atendessem as exigências de operação e segurança em alta pressão, foram conseguidas após meses de busca, o que gerou atrasos para realização dos testes.

As válvulas adquiridas foram a válvula DBDS8 G1A/315 (Rexroth) que tem a função de válvula de alívio no sistema e a válvula DBOS10 G 1X/400 (Rexroth) que tem a função de regular a pressão de operação do sistema, Figura 4.12. Para a instalação correta do sistema foi eliminado uma saída de dreno da válvula reguladora e mantido apenas o dreno da válvula de segurança.



Figura 4.12. Indicada pela seta vermelha a válvula de segurança e pela seta azul a válvula reguladora.

4.5.3. PROBLEMAS COM AS GAXETAS DA BOMBA ALTERNATIVA DE ALTA PRESSÃO

Durante os testes hidráulicos, detectou-se a presença de partículas na água que não pertenciam a nenhum componente hidráulico instalado, nem relacionadas à origem da água de abastecimento do sistema. Chegou-se a conclusão então que essas partículas viriam da bomba de alta pressão. Ao entrar em contato com a equipe técnica da PROMINAS, e após algumas visitas técnicas, as 3 gaxetas foram finalmente trocadas, pois elas eram a fonte das partículas que obstruíam os bocais de 0,5 mm durante os ensaios com alta pressão. Nas Figuras 4.13 e 4.14 nota-se o entupimento dos bocais e a gaxeta danificada, a qual gerava os materiais particulados. O particulado existente na água causou vários problemas para os testes, que tiveram de ser descartados e, para sua completa eliminação, foi necessário longo tempo de limpeza.



Figura 4.13. Bocal orifício 0,5 mm com entupimento.



Figura 4.14. Particulado causador do entupimento e a gaxeta da bomba de alta pressão danificada.

4.5.4. PROBLEMAS NA ESTRUTURA DE MÚLTIPLOS JATOS

No primeiro teste hidráulico com a configuração de bocais na estrutura de múltiplos jatos, houve a ruptura da solda, inviabilizando a continuidade de testes (ver figura 4.15).



Figura 4.15. Avarias na estrutura de múltiplos jatos.

Outra estrutura em aço inox, com nova e reforçada adaptação de suporte de bocais foi refeita (Figura 4.16).



Figura 4.16. Suporte dos bocais novo e reforçados.

Após todos os ajustes no equipamento, foram reiniciados os testes com esta configuração. Contudo, não se conseguiu atingir a pressão máxima necessária para os testes com esta configuração. A máxima pressão atingida com os 8 bocais foi de aproximadamente 10,00 MPa. Assim, foram retirados dois bocais simetricamente. Nesta condição, a máxima pressão atingida foi de 13,00 MPa.

Este problema pode ter sido gerado pela dificuldade de manterem-se bem vedadas as roscas entre os bocais e a estrutura de fixação. Também, esta configuração, pela existência dos canalículos construídos no interior da peça maciça de aço inox, gera uma grande perda de carga, diminuindo substancialmente a pressão de operação da bancada de testes. Desta forma, esta configuração não foi adequada aos objetivos deste trabalho.

5. RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados microbiológicos e físico-químicos foram analisados segundo a Portaria 2914 do Ministério da Saúde (12/12/11), as Resoluções CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 357 (17/03/2005) e 420 (13/05/2011), e o Decreto Estadual 8.468 (08/09/1976). Para a variável química de condutividade segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), valores superiores a 100 $\mu\text{s/cm}$ indicam ambientes impactados.

5.1. ENSAIOS DE INATIVAÇÃO

Conforme descrito no Capítulo 4. Material e Métodos do subitem 4.2, procedeu-se ensaios com duas configurações distintas (bocal único e sistema tridimensional), com 3 faixas de pressão cada. Ou seja, com a configuração tridimensional (6 bocais) nas pressões de 15, 20 e 30,00 MPa e com um bocal único nas pressões de 15, 20 e 30,00 MPa.

A seguir, nos gráficos das Figuras 5.1 a 5.6, para os três valores de pressão (15, 20 e 30,00 MPa) são comparados o potencial de inativação para o bocal único e o sistema tridimensional.

Para a pressão de 15,00 MPa, no tempo de 2700 s (45 minutos), houve inativação de 93,54% de *Escherichia coli* quando utilizado apenas o bocal único de diâmetro de orifício de 1,5 mm. Já para o sistema tridimensional (com 6 bocais de diâmetro de orifício de 0,5 mm), houve uma inativação de 64,09% de *Escherichia coli*, conforme a Figura 5.1.

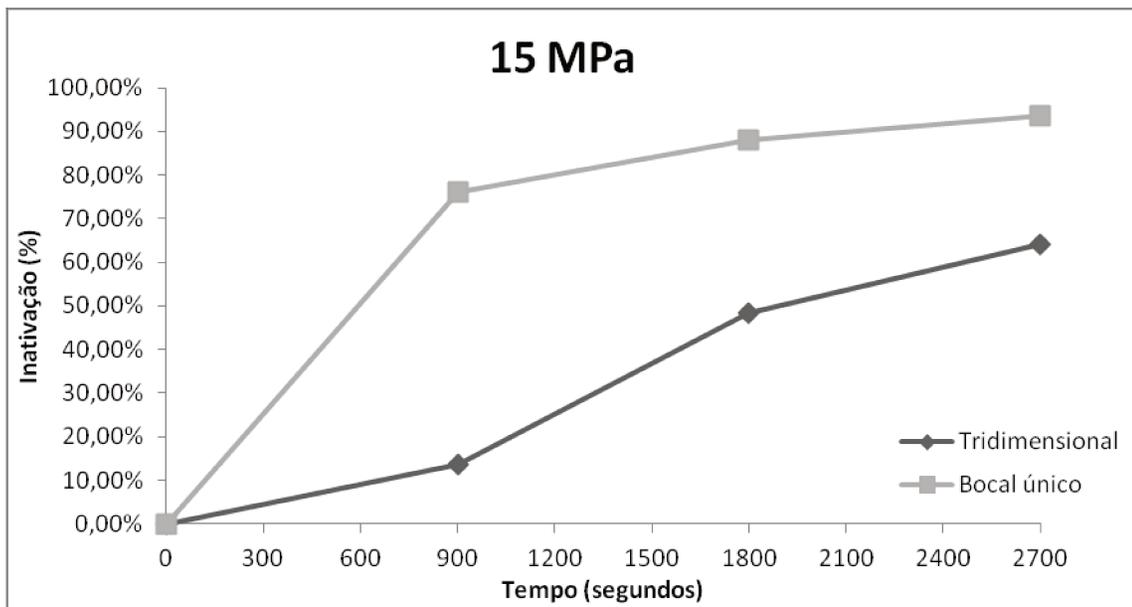


Figura 5.1. Resultados de inativação a 15 MPa nas duas configurações.

Para a pressão de 20,00 MPa houve inativação de 30,66% de *Escherichia coli* quando utilizado apenas o bocal único de 1,5 mm. Já para o sistema tridimensional houve uma inativação de 91,70% de *Escherichia coli*.

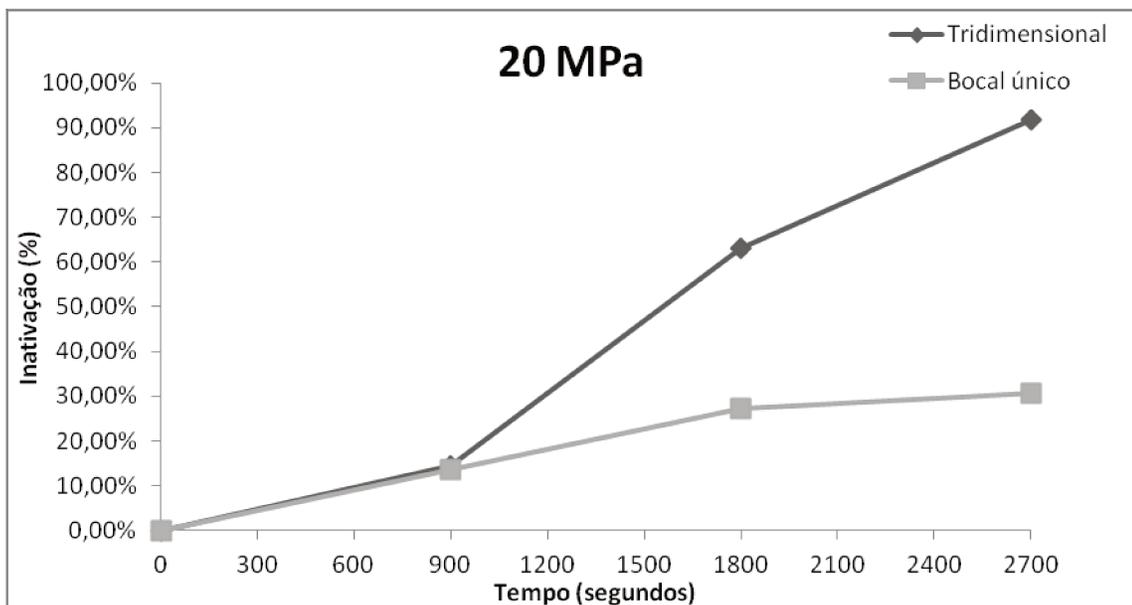


Figura 5.2. Resultados de inativação a 20 MPa nas duas configurações.

Para a pressão de 30,00 MPa houve inativação de 44,11% de *Escherichia coli* quando utilizado o bocal único para o sistema tridimensional, houve inativação de 76,35% de *Escherichia coli*.

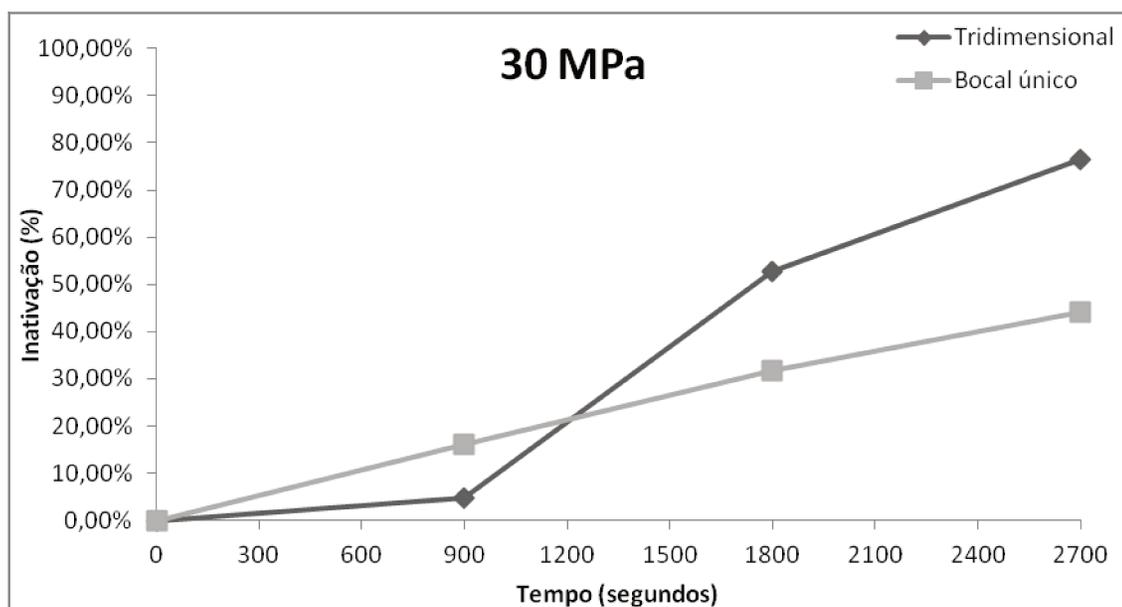


Figura 5.3. Resultados de inativação a 30 MPa nas duas configurações.

Comparando-se os resultados obtidos com 15, 20 e 30,00 MPa na configuração tridimensional com 6 bocais de diâmetro de orifício 0,5 mm, verifica-se a inativação de 91,70% a 20,00 MPa, 76,35% a 30,00 MPa e de 64,09% a 15,00 MPa, conforme o gráfico sintético dos resultados na Figura 5.4.

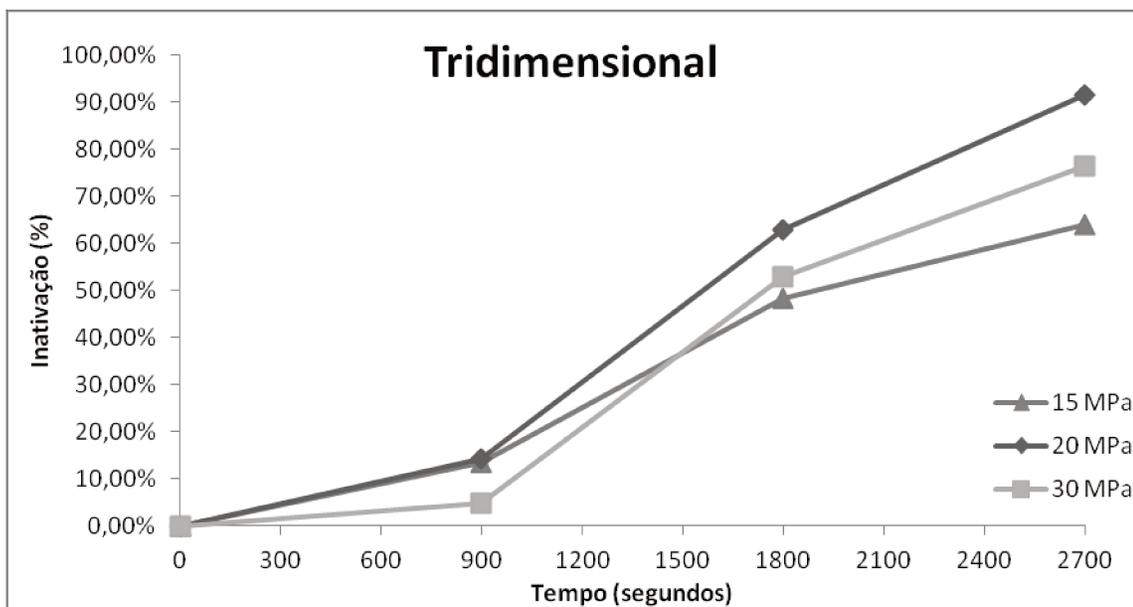


Figura 5.4. Resultados de inativação com a configuração tridimensional.

Comparando-se os resultados obtidos com 15, 20 e 30,00 MPa na configuração do bocal único de diâmetro de orifício de 1,5 mm, verifica-se a inativação de 93,54% a 15,00 MPa, 44,11% a 30,00 MPa e de 30,66% a 20,00 MPa.

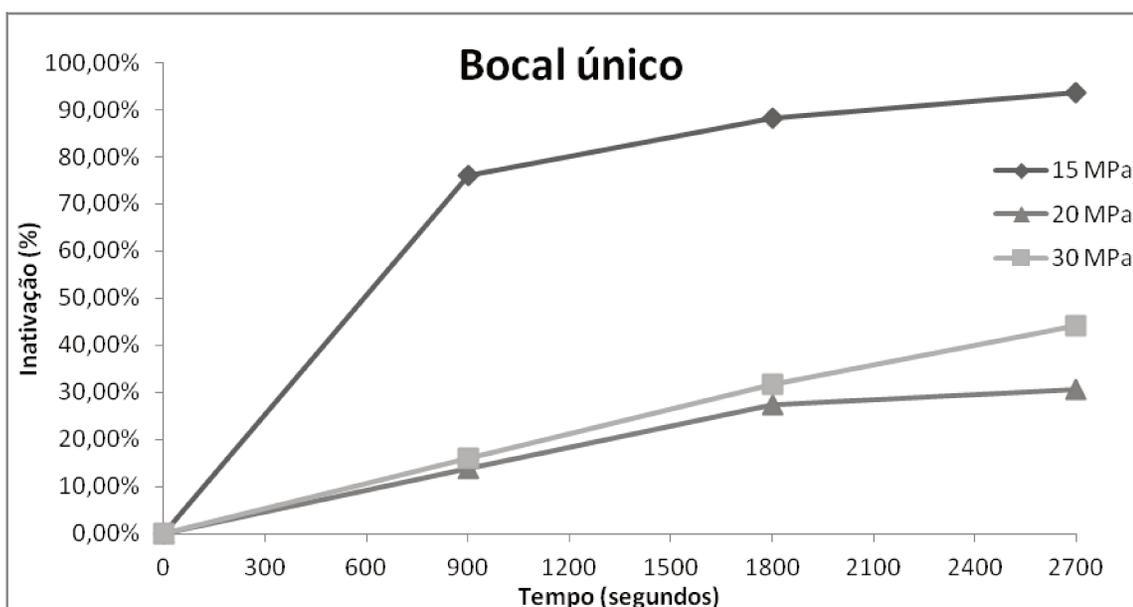


Figura 5.5. Resultados de inativação com o bocal único.

O gráfico da Figura 5.6 ordena da maior taxa de inativação para a menor taxa, cada condição de teste.

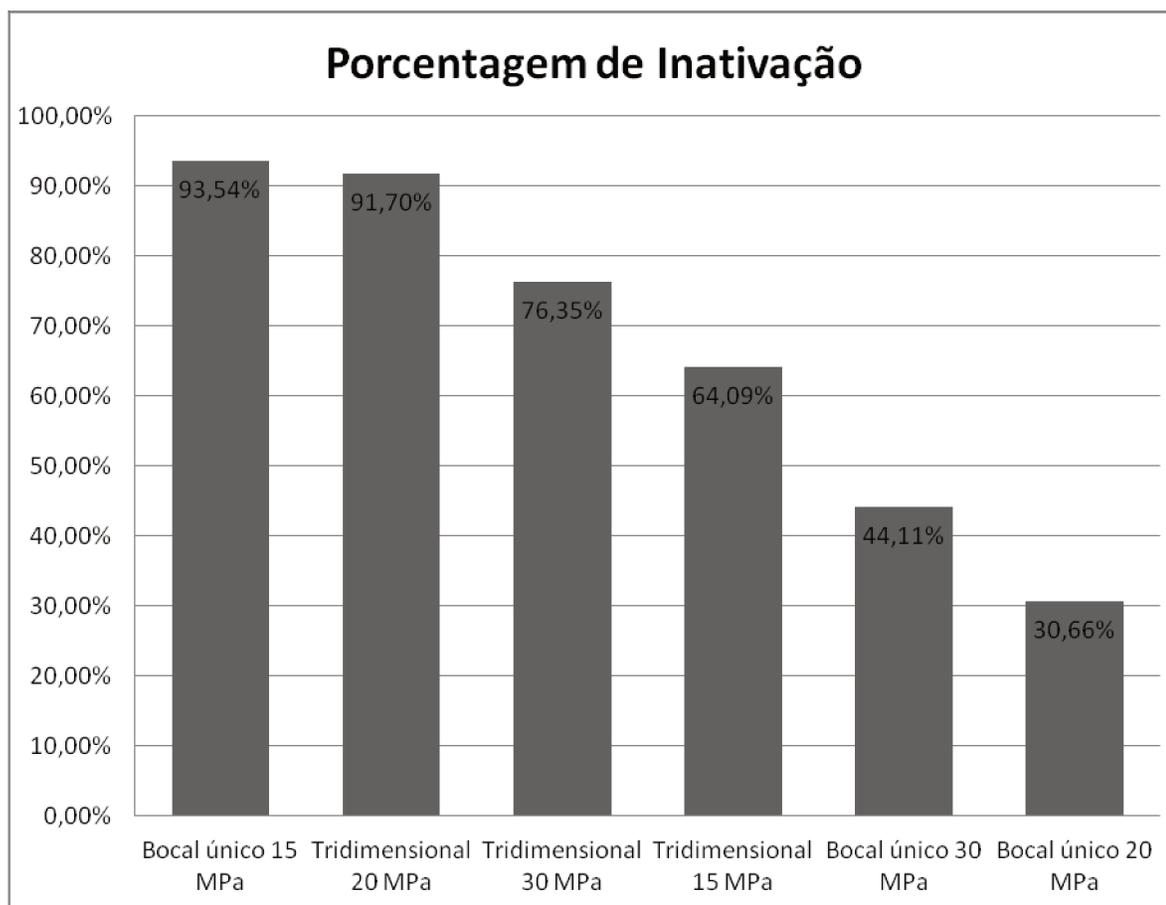


Figura 5.6. Porcentagem de inativação de todas as faixas de pressão e configurações de bocais ensaiadas.

A maior porcentagem de inativação da bactéria *Escherichia coli* foi obtida com o bocal único à pressão de 15,00 MPa com 93,54%, seguido com uma diferença de apenas 1,84% do sistema tridimensional à pressão de 20,00 MPa, com 91,70%.

O sistema tridimensional obteve uma porcentagem de inativação de 76,35% e 64,09% nas pressões de 30,00 e 15,00 MPa. Por fim, as piores porcentagens de inativação, com 44,11% e

30,66% foram verificadas para o bocal único, respectivamente, nas pressões de 30,00 e 20,00 MPa.

Verificou-se tendência de que os resultados de inativação são melhores à maiores pressões com um sistema tridimensional de bocais. Já, para pressões menores, uma eficiência melhor é verificada com o bocal único. Destes testes, nota-se que seria suficiente uma pressão intermediária como de 15,00 MPa e um bocal único, de confecção simples, para atingir maior potencial de inativação.

5.2. RESULTADOS E ANÁLISE DOS TESTES FÍSICO-QUÍMICOS

Para cada ensaio de inativação eram aferidas as propriedades físico-químicas da água, as análises foram realizadas para cada tempo de amostragem, sempre de 15 em 15 minutos de ensaio. Ao tempo final, ou seja, após 45 minutos de cada condição de ensaio, retirou-se 4 frascos de amostras para as análises físico-químicas. Os resultados de cada teste individual podem ser analisados no Anexo E, onde estão apresentados na ordem cronológica de ensaios.

Para análise dos dados foram realizadas as médias de cada propriedade, para cada faixa de pressão e número de bocais testados, e ao final, calculou-se a média geral de todos os testes para cada variável analisada. A Tabela 5.1. indica os resultados finais obtidos e a Tabela 5.2 a variação da propriedade físico-química entre as análises finais e iniciais e de ensaio. Para a análise dos resultados quanto à legislação vigente foram utilizados os parâmetros da Tabela 3.1.

Tabela 5.1. Resultados físico-químicos finais dos ensaios de inativação.

Final	Pressões			N° bocais		Média Geral
	15 MPa	20 MPa	30 MPa	1 bocal	6 bocais	
Temperatura (°C)	32,90	35,90	37,00	34,00	35,90	34,95
OD (mg O ₂ /L)	6,64	7,47	6,67	7,09	6,92	7,01
Condutividade (µS/cm)	280,00	290,00	275,00	290,00	290,00	290,00
pH	7,59	6,83	7,36	7,45	7,07	7,26
Trubidez (UT)	2,85	3,50	3,04	3,10	3,15	3,13

Tabela 5.2. Variação dos parâmetros físico-químicos resultantes dos ensaios de inativação.

Variação (Δ)	Pressões			N° bocais		Média Geral
	15 MPa	20 MPa	30 MPa	1 bocal	6 bocais	
Temperatura ($^{\circ}$ C)	4,95	8,15	10,70	7,43	8,43	7,93
OD (mg O ₂ /L)	-0,24	0,72	-0,15	0,08	0,14	0,11
Condutividade (μ S/cm)	60,00	50,00	55,00	50,00	60,00	55,00
pH	0,11	0,18	0,48	0,20	0,31	0,26
Trubidez (UT)	1,37	1,27	1,65	1,73	1,13	1,43

A Resolução CONAMA 430/2011 e o Decreto 8468/1976 indicam a temperatura de 40°C como limite para emissão de efluentes. A maior temperatura atingida durante os ensaios foi de 39,4 °C, garantindo que a inativação das bactérias termotolerantes testadas não foi ocasionada pelo aquecimento da água. Também, comprova que o sistema de resfriamento utilizado pôde controlar a temperatura do processo. A média da temperatura final de todos os ensaios foi de 34,95 °C. Quanto maior foi a pressão, maior foi a temperatura das amostras. Também para o maior número de bocais, maior a temperatura das amostras. Como a cavitação é um fenômeno exotérmico, o aumento da temperatura nos ensaios onde ocorre cavitação é esperado.

O oxigênio dissolvido aumentou ligeiramente durante os ensaios com a pressão de 20,00 MPa para ambas configurações de bocais, tridimensional e único. Porém, para as pressões de 15,00 e 30,00 MPa não se constatou tendência, independentemente do bocal nestes testes. Assim, não se pode identificar uma relação entre tipo de bocal, pressão de teste e oxigênio dissolvido. A maior concentração de oxigênio dissolvido ao final dos ensaios foi de 7,91 mg O₂/L e a menor foi de 6,24 mg O₂/L. A média de oxigênio dissolvido final foi de 7,01 mg O₂/L. De maneira geral, verificou-se aumento da concentração de oxigênio dissolvido em torno de 0,11 mg O₂/L. A legislação CONAMA 430/2011 indica para a classe 1 de padrão de água, valor maior que 6 mg O₂/L. Todos os testes estiveram acima deste limite inferior. A alta turbulência gerada pelos jatos aumenta a incorporação de ar e, provavelmente, do oxigênio dissolvido no líquido.

A condutividade apresentou um pequeno aumento em todos os ensaios, independentemente da pressão e número de bocais utilizados. Ao final do ensaio a menor condutividade foi de 250 μ S/cm e a maior de 310 μ S/cm e a média final foi de 290 μ S/cm. Quanto a legislação a condutividade não se enquadrou dentro dos padrões da legislação, pois seus

valores ultrapassaram os 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que indica ambientes impactados. Esse aumento pode ser gerado pelo contato com o material do equipamento e do reservatório de reação que é composto de aço inox.

O pH aumentou durante o processo em todos os ensaios, assim como a temperatura. Quanto maior a pressão de teste e o número de bocais empregados o pH aumentou. Ao final do ensaio, o menor pH foi de 6,7 e o maior de 7,87, estando a média em 7,26. Quanto a legislação, o pH está dentro dos parâmetros de potabilidade, que é entre a faixa de 6,0 a 9,5. O aumento do pH é esperado por causa da liberação de radicais de hidroxila, que são gerados devido ao fenômeno da cavitação.

A turbidez aumentou em todos os ensaios, porém não há uma relação direta com o aumento de pressão nem com o número de bocais. Ao final do ensaio a menor turbidez foi de 2,65 UT e a maior de 4,11 UT, sendo a média de 3,13 UT. Quanto à legislação a turbidez se enquadra nos padrões da Portaria 2914/2011, pois se manteve em todos os ensaios uma turbidez menor que 5 UT e contempla todas as classes do CONAMA 430/2011. O aumento da turbidez é provavelmente devido à adição da bactéria na água.

5.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para o cálculo da eficiência energética, foi empregada a equação 4.1, que relaciona a taxa de inativação de cada condição de ensaio com a energia requerida, a seguir, constam os resultados dos cálculos de eficiência energética com a configuração tridimensional (Tabela 5.3) e com a configuração bocal único (Tabela 5.4).

Tabela 5.3. Cálculo da eficiência energética com a configuração tridimensional.

<i>Escherichia coli</i>	ATCC 25922		
Eficiência Energética	15 MPa	20 MPa	30 MPa
T (s)	2700,00	2700,00	2700,00
V (mL)	2460000,00	2460000,00	2460000,00
i (A)	45,45	50,00	56,70
U (V)	220,00	220,00	220,00
P (W)	9999,00	11000,00	12474,00
Ci (UFC/mL)	79400,00	75900,00	72300,00
Cf (UFC/mL)	28510,00	6300,00	17100,00
Ci-Cf (UFC/mL)	50890,00	69600,00	55200,00
(Ci - Cf)/P (UFC/ml)/(W)	5,09	6,33	4,43
EE (UFC/J)	4637,11	5764,85	4031,85

Tabela 5.4. Cálculo da eficiência energética com a configuração bocal único.

<i>Escherichia coli</i>	ATCC 25922		
Eficiência Energética	15 MPa	20 MPa	30 MPa
T (s)	2700,00	2700,00	2700,00
V (mL)	2460000,00	2460000,00	2460000,00
i (A)	45,77	50,70	59,00
U (V)	220,00	220,00	220,00
P (W)	10069,40	11154,00	12980,00
Ci (UFC/mL)	173290,00	114500,00	78900,00
Cf (UFC/mL)	11190,00	79400,00	44100,00
Ci-Cf (UFC/mL)	162100,00	35100,00	34800,00
(Ci - Cf)/P (UFC/ml)/(W)	16,10	3,15	2,68
EE (UFC/J)	14667,32	2867,13	2442,73

Os resultados obtidos indicam que a pressão de 15,00 MPa com o bocal único é a mais eficiente na configuração do equipamento projetado, seguido da pressão de 20,00 MPa, 15,00 MPa e 30,00 MPa com a configuração tridimensional. Finalmente segue a configuração de bocal único nas pressões de 20,00 e 30,00 MPa. Na análise global dos gráficos, podemos elencar os melhores resultados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Resultados da eficiência energética de inativação.

Eficiência Energética na inativação <i>E. coli</i> (UFC/J)	Configuração	Pressão
14667,32	Bocal único	15 MPa
5764,85	Tridimensional	20 MPa
4637,11	Tridimensional	15 MPa
4031,85	Tridimensional	30 MPa
2867,13	Bocal único	20 MPa
2442,73	Bocal único	30 MPa

5.4. CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que o bocal único operado a uma pressão de 15,00 MPa foi o mais eficiente, tanto em termos de inativação do microrganismo, como em termos de eficiência energética do sistema projetado.

Na sequência, tanto para inativação, como na eficiência energética de inativação, tem-se o sistema tridimensional nas pressões de 20,00 e 30,00 MPa em termos de inativação e nas pressões de 20,00 e 15 MPa para eficiência energética de inativação.

Por último, dois níveis de pressão de 20,00 e 30,00 MPa com o bocal único tiveram os piores resultados de inativação e de eficiência energética.

As análises físico-químicas estão dentro dos padrões solicitados pela legislação. Apenas a condutividade elétrica apresentou padrões acima do recomendado o padrão da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

6. CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

No desenvolvimento do projeto do equipamento tipo jato cavitante para a inativação de bactérias com múltiplos jatos, a nova bancada de tratamento foi projetada e construída. Paralelamente à construção da bancada de tratamento atual, a bancada protótipo anteriormente desenvolvida no LHMF foi utilizada para estudos sobre o sistema de resfriamento, as pressões de testes e tempos de ensaios para a inativação das bactérias *Escherichia coli* e coliformes totais. Estes estudos ajudaram a embasar a construção da bancada de tratamento atual.

O sistema plano de múltiplos bocais não funcionou adequadamente neste equipamento, não atingindo os níveis de pressão necessários para a comparação entre os diferentes ensaios desta pesquisa. Também trata-se do bocal com maior dificuldade de execução pela construção dos canalículos no interior da peça maciça de aço inox, que dá suporte aos bocais. Comparando-se o bocal único e o bocal tridimensional, pode-se concluir que o bocal único operado a uma pressão de 15,00 MPa é o mais eficiente, tanto em termos de inativação do microrganismo, como em termos de eficiência energética do sistema projetado. Em seguida, em termos de eficiência, tem-se a configuração tridimensional nos três níveis de pressão, a saber, 20,00 MPa, 30,00 MPa e 15,00 MPa e, por último, os 2 níveis de pressão com o bocal único, a saber, 30,00 MPa e 20,00 MPa. Assim, a tendência foi de os resultados de inativação serem melhores às maiores pressões com um sistema tridimensional de bocais. Menores pressões podem indicar o uso do bocal único para esta finalidade.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho, outros projetos estão sendo viabilizados, como a análise visual dos jatos empregando uma câmera de alta velocidade e relacionando-os à capacidade de inativação, bem como a capacidade de erosão do jato cavitante. O equipamento tipo jato cavitante possibilita, também, ensaios com outros índices de cavitação, alterando-se o diâmetro dos orifícios. Além disso, outros microrganismos podem ser ensaiados, bem como testes de decomposição de

compostos persistentes, toxinas, cianobactérias e fármacos que são, atualmente, grande ameaça à saúde pública e que podem encontrar uma solução rápida com um sistema simples, a partir do jato cavitante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA NETO, E.F. **O uso da cavitação hidrodinâmica como alternativa para a desinfecção de águas para abastecimento humano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Apresentada na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 177p, 2006.

ASSIS, M.P.; GENOVEZ, A.I.B.; DALFRÉ FILHO, J.G. Equipamento tipo jato cavitante para degradação de compostos persistentes. **In: XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica.** Anais...Punta Del Leste, Uruguai, nov., 5f480. 2010.

ASSIS, M.P.; DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B. Bacteria Inactivation by means of Cavitation Blasting Equipment in Freshwater Systems. **In: IAHR World 35th Congress.** Anais...Chengdu, China, set., 2013.

ASSIS, M.P.; GENOVEZ, A.I.B.; DALFRÉ FILHO, J.G. “**Water disinfection using a cavitating jet apparatus**”. (Trabalho em elaboração para submissão na Journal of Environmental Engineering), 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Informação e Documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação: NBR 14724.** Rio de Janeiro, 2005.

AZUMA, Y. *et al.* Bacterial sterilization using cavitating jet. **Journal of Fluid Science And Technology**, v. 2, n. 1, 2007.

BALASUNDARAM, B.; HARRISON, S.T. Study of physical and biological factors involved in the disruption of e. coli by hydrodynamic cavitation. **Biotechnology Progress**, v. 22, n 3, pp. 907-913, 2006.

BRAEUTIGAM, P. *et al.* Degradation of carbamazepine in environmentally relevant concentrations in water by Hydrodynamic-Acoustic-Cavitation (HAC). **Water Research**. v.46, pp. 2469-2477, 2012.

BRASIL PORTARIA MS N° 2914/2011. **Ministério Da Saúde, Secretaria De Vigilância Em Saúde, Coordenação-Geral De Vigilância Em Saúde Ambiental.** Disponível em <http://www.caern.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/caern/arquivos/pdf/portaria-ms-2914.pdf>.

Acessado em 14/08/2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. LEI DA POLÍTICA NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Lei N° 6.938, De 31 De Agosto De 1981.** 1981.

DECRETO ESTADUAL n° 8.468, de 08 de setembro de 1976 que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/>>.

CHAKINALA, A.G. *et al.* Treatment Of Industrial Wastewater Effluents Using Hydrodynamic Cavitation And The Advanced Fenton Process. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.15, pp.49-54, 2008.

CHAKINALA, A.G. *et al.* Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced fenton processing. **Chemical Engineering Journal**, v. 152. pp. 498-502, 2009.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiental. Resolução N°. 430 de 13 de maio de 2011. Definição critérios para classificação das águas, doces, salobras e salinas do território nacional. Disponível: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>.

DALFRÉ FILHO, J.G. **Desenvolvimento de equipamento para avaliação de erosão por cavitação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 97p, 2002.

DALFRÉ FILHO, J.G. **Equipamento tipo jato cavitante para avaliação de desgaste por cavitação.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 122p, 2005.

DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B.. Efficiency evaluation of cavitating jet apparatus. **Proc. 2nd Int. Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, IAHR,** Pisa, Italy 1, 107-112. 2008.

DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B. Alternative apparatus to evaluate cavitation damage. **Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, ASCE**. n. 12. v.21, 2009.

DALFRÉ FILHO, J.G. GENOVEZ, A.I.B. (Pesquisadores responsáveis) **Desenvolvimento de equipamento tipo jato cavitante com múltiplos jatos para a desinfecção de água**. Relatório Científico Auxílio à Pesquisa FAPESP (01/08/2012 – 31/07/2013). 85p. 2013.

DANIEL, A.L. (Org.) *et al.* **Métodos alternativos de desinfecção da água**. Rede Cooperativa De Pesquisas – PROSAB, Instituições Participantes: EESC-USP, UFRGS, UnB, Unicamp e UFMG. São Carlos, 2001.

DEMPSEY, B.A.; LEE, A.P.; KIM, B. Removal of volatile organic chemicals from water using hydraulic jets. **Hazardous Waste and Hazardous Materials**, v. 10, n. 3, pp. 323-333, 1993.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO D.A. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RIMA. v. 1, 2005a, 1565p.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO D.A. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RIMA. v. 2, 2005b, 1565p.

EPPINGA, H. Cooling water treatment system free of chemicals. **Water And Waste Water International**, v. 20, issue 11, nov, 2005.

FUNASA – Fundação Nacional De Saúde. **Manual de saneamento**. 3ª ed. Brasília. 1999.

GAINES, W. A. *et al.* Controlling cooling water quality by hydrodynamic cavitation. **ASHRAE Transactions**, Detroit, USA, 2007.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006, 798p.

GOGATE, P. R. Cavitation: An Auxiliary Technique In Wastewater Treatment Schemes. **Advances In Environmental Research**, n. 6, pp. 335-358, 2002.

GOGATE, P. R. Treatment of wastewater streams containing phenolic compounds using hybrid techniques based on cavitation: a review of the current status and the way forward. **Ultrasonics Sonochemistry**, n. 15, pp. 1-15, 2008.

HAO, H. *et al.* Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, n. 33, pp. 151-156, 2004.

JYOTI, K.K.; PANDIT A.B. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 7. pp. 201-212, 2001.

JYOTI, K. K.; PANDIT, A. B. Hybrid cavitation methods for water disinfection. **Biochemical Engineering Journal**, n.14, pp. 9-17, 2003.

JYOTI, K. K.; PANDIT, A. B. Ozone and cavitation for water desinfection. **Biochemical Engineering Journal**, n. 18, pp. 9-19, 2004.

KALUMUCK, K. M; CHAHINE, G. L. The use of cavitating jets to oxidize organic compounds in water. **Journal of Engineering**, ASME, v. 122, pp. 465-470, 2000.

KALUMUCK, K. M. *et al.* Remediation and disinfection of water using jet generated cavitation. **In: 5th International Symposium on Cavitation**, Osaka, Japan, Nov. 1-4, 2003.

KNAPP, R. T.; DAILY, J. W.; HAMMITT, F. G. **Cavitation**. Engineering Societies Monographs. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970. 578p.

KORN, M.; ANDRADE, M.V.A.S.; BORGES, S.S. Procedimentos analíticos assistidos por ultrassom. **Revista Analytica**, n. 3, pp.34-39, 2003.

KUMAR, P. S.; KUMAR, M. S.; PANDIT, A. B. Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation. **Chemical Engineering Science**. n. 55, 1633-1639, 2000.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2ª Ed. Campinas: Átomo, 2008.

PÉTRIER, C.; FRANCONY, N. Ultrasonic waste-water treatment: incidence of ultrasonic frequency on the rate of phenol and carbon tetrachloride degradation. **Ultrasonics Sonochemistry**, n. 4, pp. 295-300, 1997.

PNUD - Programa Das Nações Unidas Para O Desenvolvimento - Relatório Do Desenvolvimento Humano 2006. **A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água**, 2006.

PHILIPPI JR, A. (Ed.) *et al.* **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Coleção Ambiental 2. São Paulo: Manole, 2005. 842p.

POTTER, C. M.; WIGGERT, D. C. **Mecânica Dos fluidos**. 3ª Ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água – tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991. 332p.

RODRIGUES, M. C. *et al.* Tratamento eletrolítico de efluentes de reatores anaeróbios. **In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. ABES, **Anais...** Rio de Janeiro, 2001. II-087.

SAHARAN, V. K.; BADVE, M. P.; PANDIT, A. B. Degradation of reactive Red 120 dye using hydrodynamic cavitation. **Chemical Engineering Journal**, n. 178, pp. 100-107, 2011.

SANTIAGO NETO, A. I. **Exploração da degradação de sulfito assistida por ultrassom para a determinação indireta de açúcares redutores empregando análise por injeção sequencial**. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais - Química). Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 64p, 2006.

SAWANT, S. S. *et al.* Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: a tool for disinfection. **Biochemical Engineering Journal**, n. 42, pp. 320-328, 2008.

SAVE, S. S.; PANDIT A. B.; JOSHI, J. B. Use Of Hydrodynamic Cavitation For Large Scale Microbial Cell Disruption. **Institution Of Chemical Engineers**, n. 119, pp. 9303-9304, 1997.

SIVAKUMAR, M.; PANDIT, A. B. Hydrodynamic cavitation assisted degradation of rhodamine b: a technologically viable waste-water treatment technique. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.9, n. 3, pp.123-131, 2002.

SUSLICK, K. S.; MDLELENI, M. M.; RIES, J. T. Chemistry induced by hydrodynamic cavitation. **J. Am. Chem. Soc**, n. 119, pp. 9303-9304, 1997.

TIEHM, A. *et al.* Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. **Wat. Res**, v. 35, n.. 8, pp. 2003-2009, 2001.

TULLIS, J.P. **Cavitation In Hydraulic Systems**. International institute on hydraulic transients and cavitation. Cavitation – Congresses. São Paulo, 1982.

TULLIS, J.P. **Hydraulics of pipelines - Pumps, Valves, Cavitation, Transients**. 1. ed. Ed. John Wiley and Sons. 1989. 266p.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Report EPA/540/AR-93/520**, 82p. 1994.

VICHARE, N. P.; GOGATE, P. R.; PANDIT, A. B. Optimization of Hydrodynamic Cavitation Using a Model Reaction. **Chemical Engineering Technology**. n. 23, v. 8. 2000.

WANG, X.; ZHANG, Y. Degradation of alachlor in aqueous solution by using hydrodynamic cavitation. **Journal of Hazardous Materials**, n. 161, pp. 202-207, 2009.

WANG, X.; JIA, J.; WANG, Y. Electrochemical degradation of reactive dye in the presence of water jet cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**, n. 17, pp. 515-520, 2010.

WANG, X.; JIA, J.; WANG, Y. Degradation of C.I. reactive Red 2 through photocatalysis coupled with water jet cavitation. **Journal of Hazardous Materials**, n. 185. pp. 315-321. 2011a.

WANG, J. *et al.* Degradation of reactive brilliant red K-2BP in aqueous solution using swirling jet-induced cavitation combined with H₂O₂. **Ultrasonics Sonochemistry**, n. 18. pp. 494-500. 2011b.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION – Water Sanitation and Health (WSH). **Facts and figures on water quality and health.** 2011. Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/facts_figures/en/index.html. Acessado em: 22/07/2011.

WYLIE E. B; STREETER V. L. **Mecânica Dos Fluidos.** 7ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. 585p.

ANEXOS

ANEXO A – Projeto do dimensionamento do reservatório e da tampa para permitir os ensaios com e sem serpentina de resfriamento.

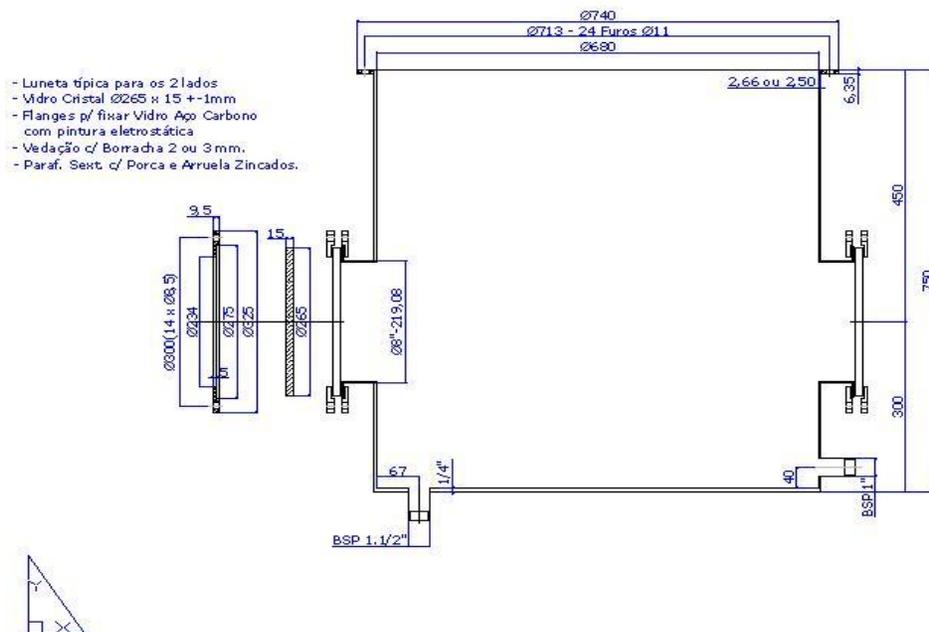
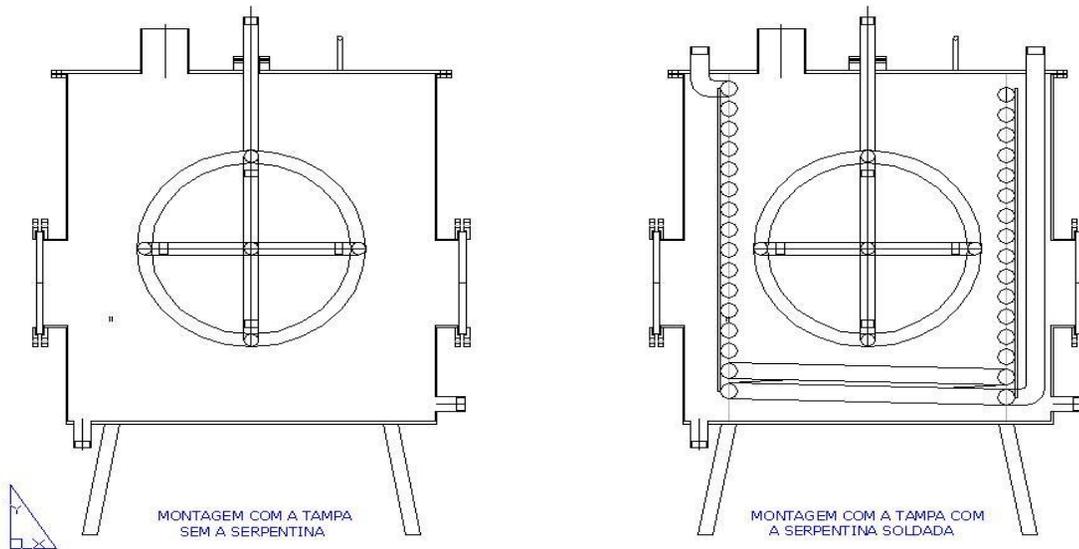


Figura A01. Dimensões do reservatório, braço de força e suporte.

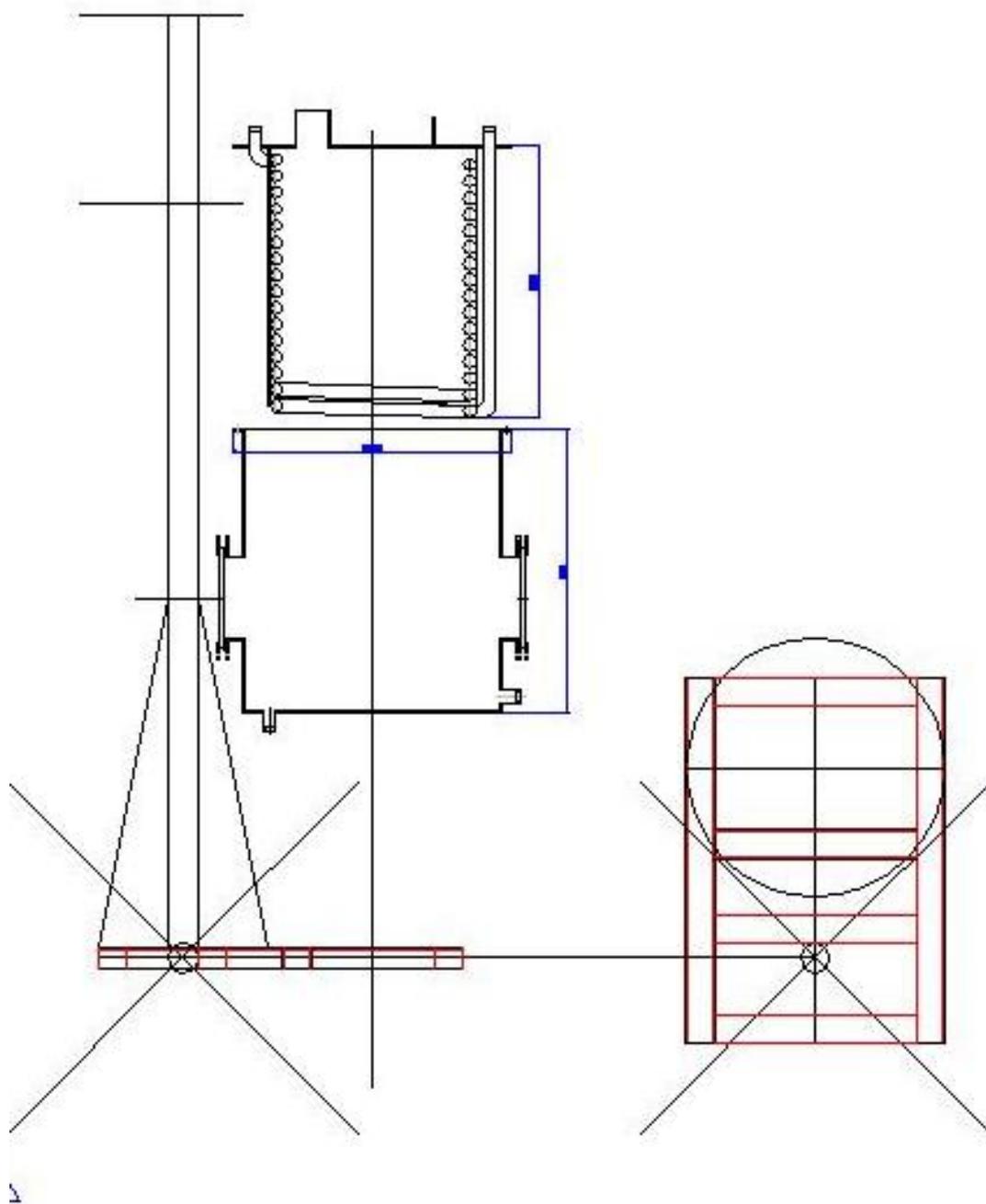


Figura A02. Braço de força e suporte.

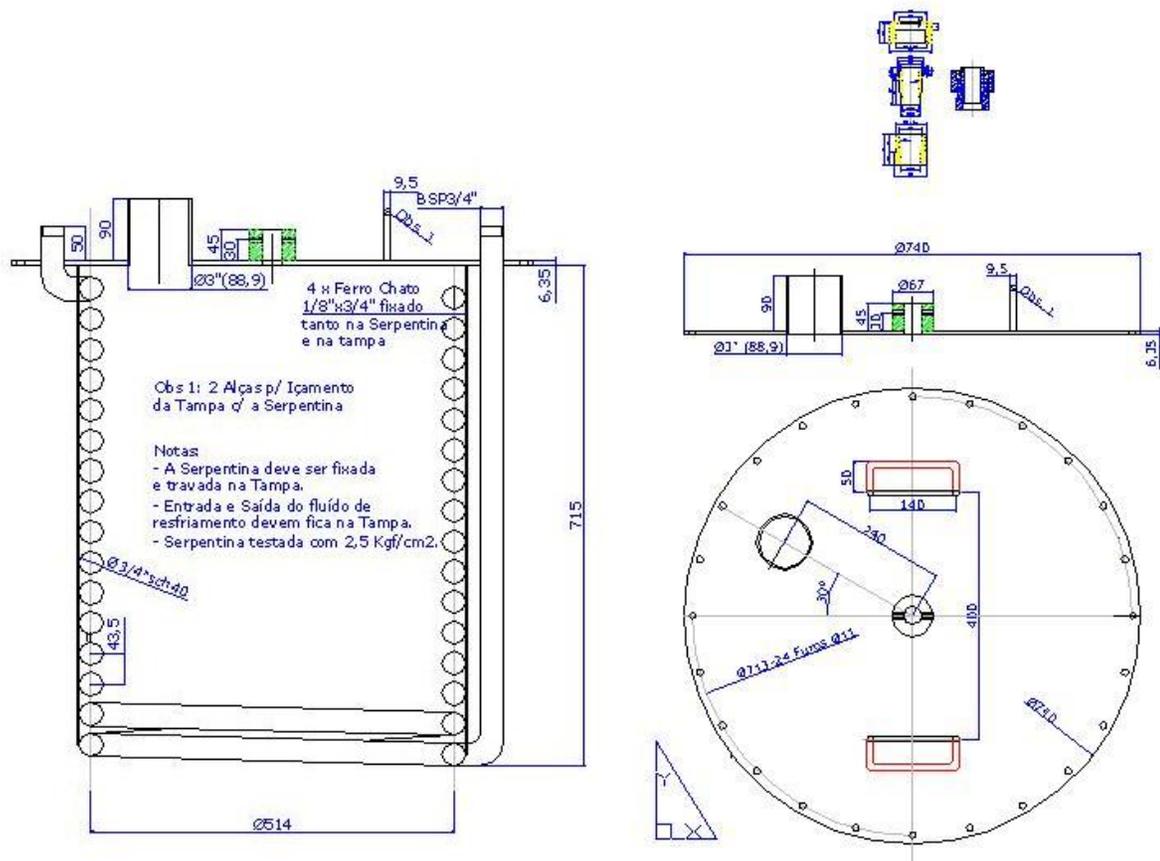


Figura A03. Detalhes da serpentina e da tampa, para intercambialidade entre reservatório sem sistema de refrigeração e com sistema de refrigeração.

ANEXO B – Construção da bancada de ensaios.

A seguir os equipamentos utilizados para a construção da bancada de ensaios são descritos na Tabela B01. Em seguida é apresentada uma sequência de fotos que apresenta passos da (Figura B01 a Figura B07), construção da bancada de ensaios a partir da Bomba Alternativa de Alta Pressão, modelo PROMINAS BPS-328-025.

Tabela B01. Equipamentos, materiais e serviços adquiridos para a pesquisa.

Equipamento	Fornecedor
Bomba Alternativa de Alta Pressão BPS-328-025	PROMINAS BRASIL EQUIPAMENTOS LTDA.
Peças hidráulicas alta pressão Parker e outras válvulas de alta pressão	TRION COMPONENTES INDUSTRIAIS LTDA.
Base de concreto para BPS-328-025	Prefeitura do Campus UNICAMP
4 chumbadores fixação da BPS-328-025 UNC 1,5 x10⁻² m (5/8") X 670 c/ chapa metálica	USISERV ARARAS – USINAGEM E FABRICAÇÃO DE PEÇAS LTDA – ME.
Reagentes Colilert® IDEXX	DANPIE COMÉRCIO DE PRODUTOS PARA LABORATÓRIOS LTDA – ME.
Micropipeta monocanal variável 1000-10000UL HTL e Ponteira 1000-10000 UL incolor tipo universal (200 unidades)	FRL SUPRIMENTOS PARA LABORATÓRIO LTDA. – E
10 Bombonas Plásticas 20 litros Incepi Top/2080	O SERINGUEIRO
Materiais elétricos	JMRB CONSTRUÇÕES LTDA ME.
Fixação da Bomba	WKL COMERCIAL DE BOMBAS E EQUIPAMENTOS LTDA.
Instalação hidráulica alta pressão	TRION COMPONENTES INDUSTRIAIS LTDA.
2 Bombas Centrífugas WEG Motobomba Thebe TH-16NR 1,0 cv 220/380 trif.	DISMOTOR COMÉRCIO DE MOTORES ELÉTRICOS LTDA.
Equipamento para Ensaio em Aço Inox 304	USISERV ARARAS – USINAGEM E FABRICAÇÃO DE PEÇAS LTDA – ME.
Válvulas Segurança e Reguladora	HRV AUTOMAÇÃO HIDRÁULICA E ELETRÔNICA LTDA.
Cartelas Colilert® IDEXX	DANPIE COMÉRCIO DE PRODUTOS PARA LABORATÓRIOS LTDA – ME.



Figura B01. Bomba de alta pressão.



Figura B02. Construção da base de concreto para a bomba de alta pressão.



Figura B03. Instalação dos chumbadores e concretagem final.



Figura B04. Alinhamento e posicionamento do skid da bomba de alta pressão.



Figura B05. Instalações elétricas e quadro de força para a bancada de tratamento.



Figura B06. Instalações hidráulicas (a) de alta pressão; (b) baixa pressão.

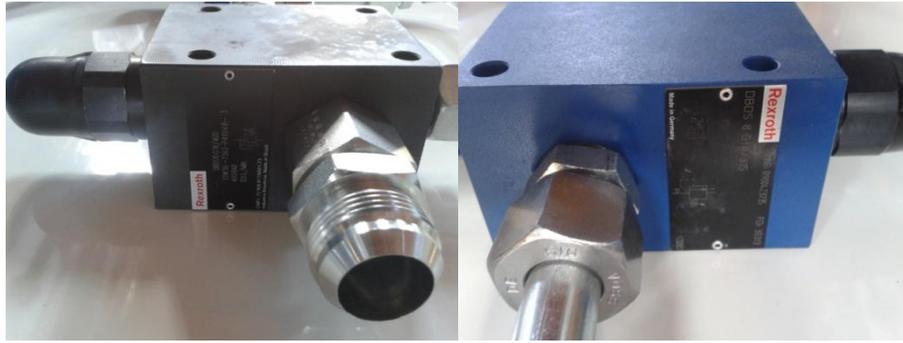


Figura B07. Válvula reguladora de pressão (a esquerda) e válvula de segurança de alta pressão (a direita).

ANEXO C – Resultados das análises do sistema de resfriamento.

Tabela C01. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 15 MPa.

15 MPa	Horário	Pressão	Saída Serpentina 750L	
			MPa	T (°C)
0	08:33	0	26,9	26,6
900	08:48	15	27,5	30,7
1800	09:03	15	29,8	31,7
2700	09:18	15	31,2	32,7

Tabela C02. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 15 MPa.

15 MPa	Horário	Pressão	Saída Serpentina 750L	
			MPa	T (°C)
0	08:20	0	27,4	27,4
900	08:35	15	28,1	28,1
1800	08:50	15	29,6	29,6
2700	09:05	15	31,2	31,2

Tabela C03. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 30 MPa.

30 MPa	Horário	Pressão	Saída Serpentina 750L	
			MPa	T (°C)
0	08:15	0	25	24,3
900	08:30	30	26,5	29,2
1800	08:45	30	29,6	32,3
2700	09:00	30	31,8	34,6

Tabela C04. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 30 MPa.

30 MPa	Horário	Pressão	Saída Serpentina 750L	
			MPa	T (°C)
0	08:20	0	29,6	28,3
900	08:35	30	30,8	33,6
1800	08:50	30	33,5	37,6
2700	09:05	30	36,4	39,4

Tabela C05. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 20 MPa.

20 MPa	Horário	Pressão	Saída Serpentina 750L	
			MPa	T (°C)
0	08:30	0	28,3	27,5
900	08:45	20	29	30,8
1800	09:00	20	31,2	33,5
2700	09:15	20	33,7	35,6

Tabela C06. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 20 MPa.

20 MPa	Horário	Pressão	Saída Serpentina 750L	
			MPa	T (°C)
0	08:50	0	29,3	28
900	09:05	20	30	32,5
1800	09:20	20	32	34,7
2700	09:35	20	34,3	36,2

ANEXO D – Resultados das análises físico-químicas.

Tabela D01. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 15 MPa.

15 MPa	Horário	Temperatura	OD		Condutividade	pH	Turbidez
		T (°C)	mg O ₂ /L	°C	µ.S/cm	25°C	UT
0	08:33	26,6	7,37	-	240	7,58	1,3
900	08:48	30,7	7,3	-	240	7,31	1,92
1800	09:03	31,7	6,96	-	280	7,53	2,33
2700	09:18	32,7	6,64	-	300	7,65	2,65

Tabela D02. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 15 MPa.

15 MPa	Horário	Temperatura	OD		Condutividade	pH	Turbidez
		T (°C)	mg O ₂ /L	°C	µ.S/cm	25°C	UT
0	08:20	27,4	6,87	27,3	250	7,38	1,66
900	08:35	28,1	6,3	26,7	280	7,61	2,62
1800	08:50	29,6	6,88	28,1	290	7,68	2,89
2700	09:05	31,2	7,13	28	310	7,53	3,04

Tabela D03. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 30 MPa.

30 MPa	Horário	Temperatura	OD		Condutividade	pH	Turbidez
		T (°C)	mg O ₂ /L	°C	µ.S/cm	25°C	UT
0	08:15	24,3	7,46	22,5	210	7,66	1,1
900	08:30	29,2	6,84	22,4	230	7,6	2,49
1800	08:45	32,3	6,63	23,4	250	7,85	2,83
2700	09:00	34,6	6,24	23,5	250	7,87	3,38

Tabela D04. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 30 MPa.

30 MPa	Horário	Temperatura	OD		Condutividade	pH	Turbidez
		T (°C)	mg O ₂ /L	°C	µ.S/cm	25°C	UT
0	08:20	28,3	6,18	28,9	230	6,1	1,68
900	08:35	33,6	6,65	28,2	260	6,22	2,17
1800	08:50	37,6	7,08	28,4	290	6,47	2,72
2700	09:05	39,4	7,1	28,3	300	6,85	2,7

Tabela D05. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 20 MPa.

20 MPa	Horário	Temperatura	OD		Condutividade	pH	Turbidez
		T (°C)	mg O₂/L	°C	µ.S/cm	25°C	UT
0	08:30	27,5	6,8	27,1	220	6,6	3,09
900	08:45	30,8	6,72	26	240	6,66	3,72
1800	09:00	33,5	7,09	25,8	250	6,7	4,12
2700	09:15	35,6	7,03	26,5	270	6,7	4,11

Tabela D06. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 20 MPa.

20 MPa	Horário	Temperatura	OD		Condutividade	pH	Turbidez
		T (°C)	mg O₂/L	°C	µ.S/cm	25°C	UT
0	08:50	28	6,7	28,1	260	6,7	1,36
900	09:05	32,5	6,82	27,7	290	6,73	2,44
1800	09:20	34,7	7,14	27,7	300	6,83	2,66
2700	09:35	36,2	7,91	28,3	310	6,95	2,88

ANEXO E – Resultados dos ensaios microbiológicos.

Tabela E01. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 15 MPa.

TEMPO (segundos)		Quantificação de Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>			
Coliformes Totais	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7540000	75400	100,00%	0,00%	0
900	6867000	68670	91,07%	8,93%	
1800	4106000	41060	54,46%	45,54%	
2700	2851000	28510	37,81%	62,19%	
<i>Escherichia coli</i>	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7940000	79400	100,00%	0,00%	0
900	6867000	68670	86,49%	13,51%	
1800	4106000	41060	51,71%	48,29%	
2700	2851000	28510	35,91%	64,09%	

Tabela E02. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 15 MPa.

TEMPO (segundos)		Quantificação de Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>			
Coliformes Totais	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	17329000	173290	100,00%	0,00%	0
900	3968000	39680	22,90%	77,10%	
1800	2064000	20640	11,91%	88,09%	
2700	1119000	11190	6,46%	93,54%	
<i>Escherichia coli</i>	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	17329000	173290	100,00%	0,00%	0
900	4160000	41600	24,01%	75,99%	
1800	2064000	20640	11,91%	88,09%	
2700	1119000	11190	6,46%	93,54%	

Tabela E03. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 30 MPa.

TEMPO (segundos)		Quantificação de Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>			
Coliformes Totais	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7890000	78900	100,00%	0,00%	0
900	6630000	66300	84,03%	15,97%	
1800	5380000	53800	68,19%	31,81%	
2700	4410000	44100	55,89%	44,11%	
<i>Escherichia coli</i>	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7890000	78900	100,00%	0,00%	0
900	6630000	66300	84,03%	15,97%	
1800	5380000	53800	68,19%	31,81%	
2700	4410000	44100	55,89%	44,11%	

Tabela E04. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 30 MPa.

TEMPO (segundos)		Quantificação de Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>			
Coliformes Totais	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7380000	73800	100,00%	0,00%	0
900	6500000	65000	88,08%	11,92%	
1800	3410000	34100	46,21%	53,79%	
2700	1580000	15800	21,41%	78,59%	
<i>Escherichia coli</i>	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7230000	72300	100,00%	0,00%	0
900	6890000	68900	95,30%	4,70%	
1800	3410000	34100	47,16%	52,84%	
2700	1710000	17100	23,65%	76,35%	

Tabela E05. Configuração tridimensional com 6 bocais de 0,5 mm - 20 MPa.

TEMPO (segundos)	Quantificação de Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>				
Coliformes Totais	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7380000	73800	100,00%	0,00%	0
900	6020000	60200	81,57%	18,43%	
1800	2810000	28100	38,08%	61,92%	
2700	630000	6300	8,54%	91,46%	
<i>Escherichia coli</i>	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	7590000	75900	100,00%	0,00%	0
900	6500000	65000	85,64%	14,36%	
1800	2810000	28100	37,02%	62,98%	
2700	630000	6300	8,30%	91,70%	

Tabela E06. Configuração tridimensional com bocal de 1,5 mm - 20 MPa.

TEMPO (segundos)	Quantificação de Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>				
Coliformes Totais	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	11450000	114500	100,00%	0,00%	0
900	9880000	98800	86,29%	13,71%	
1800	8330000	83300	72,75%	27,25%	
2700	7710000	77100	67,34%	32,66%	
<i>Escherichia coli</i>	(NMP/100 mL)	(UFC/mL)	%	% Inativação	Log
0	11450000	114500	100,00%	0,00%	0
900	9880000	98800	86,29%	13,71%	
1800	8330000	83300	72,75%	27,25%	
2700	7940000	79400	69,34%	30,66%	