

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

JÚLIA CRISTINA DE CARLI  
MATHEUS PAULMICHL HAHNEMANN

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS  
OPERACIONAIS EM PROCESSOS DE LIMPEZA USANDO  
O MÉTODO ULTRASSÔNICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

JÚLIA CRISTINA DE CARLI  
MATHEUS PAULMICHL HAHNEMANN

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS  
OPERACIONAIS EM PROCESSOS DE LIMPEZA USANDO  
O MÉTODO ULTRASSÔNICO**

Monografia de Projeto de Pesquisa apresentada à  
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do  
curso de Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná, como requisito para  
aprovação da disciplina

Orientador: Professor Dr. Moisés Alves Mar-  
celino Neto

**CURITIBA**

**2017**

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS OPERACIONAIS EM PROCESSOS DE LIMPEZA USANDO O MÉTODO ULTRASSÔNICO", realizado pelo aluno(s) Júlia Cristina De Carli e Matheus Paulmichl Hahnemann, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Moisés Alves Marcelino Neto  
Departamento de Mecânica, UTFPR  
Orientador

Prof. Phd Marcia Silva de Araújo  
Departamento de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Prof. Mestre. Rodrigo Ulisses Garbin da Rocha  
Departamento de Mecânica, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 05 de dezembro de 2017

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos queridos mestres, Professor Dr. Moisés Alves Marcelino Neto e Professor Dr. Julio Cesar Klein das Neves pela paciência e dedicação, em nos ensinar o melhor caminho para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecemos também aos nossos familiares, em especial aos nossos pais, por nos apoiarem, acreditarem no nosso potencial e nos darem forças nas intermináveis noites sem dormir e dias de ansiedade pré-prova.

Por último e não menos importante, agradecemos aos nossos amigos, companheiros de jornada e confidentes, em especial ao Guilherme Balvedi, Guilherme Barddal, Luciano Frose, Vinicius Sprada, Milene Rizzato, Nicolle Kuzmics e Filipe Casagrande.

## RESUMO

De Carli, Júlia e Hahnemann, Matheus. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS OPERACIONAIS EM PROCESSOS DE LIMPEZA USANDO O MÉTODO ULTRASSÔNICO. 2017. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O método ultrassônico é um dos métodos mais modernos de limpeza atualmente. As vantagens particulares são limpeza máxima das superfícies trabalhadas em tempo mínimo, sem trabalho manual adicional e sem danificar os itens a serem limpos. Esse método tem seu sucesso baseado em dois princípios físicos: piezeletricidade e cavitação. A Piezeletricidade é um fenômeno baseado em conversão de energia elétrica acumulada em energia mecânica e vice versa. A cavitação é a formação de bolhas de vapor ou de gás num líquido por efeito de uma redução da pressão local. Esses dois princípios físicos são relacionados por um transdutor, que consiste em um dispositivo que converte energia elétrica em mecânica ou vice-versa. Em sua forma construtiva, este possui pares de materiais piezoelétricos, que ao serem submetidos a uma corrente elétrica, vibram de forma a produzirem ondas ultrassônicas, gerando o efeito da cavitação. O objetivo do presente trabalho foi aprofundar os conhecimentos gerais sobre os fenômenos de cavitação e piezeletricidade aplicados à limpeza ultrassônica. Para isso utilizou-se o método da folha de alumínio que consistiu em imergir a mesma dentro do tanque de uma máquina de limpeza por ultrassom, para avaliar como os parâmetros de: temperatura, variação de frequência e variação de fluido de limpeza, influenciam na intensidade da cavitação. Como fluido de limpeza utilizou-se soluções ácidas e básicas de 3% de  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$ ,  $HOOC.CH(OH)CH(OH)COOH$ ,  $Na_2SiO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_3PO_4$ , a temperatura avaliada foi de  $50^\circ C$ , a frequência foi de 25kHz e 40kHz. Os experimentos mostraram que as soluções básicas a  $50^\circ C$  influenciam positivamente na cavitação, superando a intensidade da água pura na frequência de 40kHz, mostraram também que o método da folha de alumínio não deve ser utilizado em soluções de pH menor que 4 e maior que 9 devido a reação química que ocorre entre esses elementos .

**Palavras-chave:** Piezeletricidade, Cavitação, Limpeza por Ultrassom

## ABSTRACT

De Carli, Júlia and Hahnemann, Matheus. EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF OPERATIONAL PARAMETERS IN CLEANING PROCESSES USING THE ULTRASSONIC METHOD. 2017. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017

The ultrasonic method is one of the most modern methods of cleaning today. The particular advantages are maximum cleaning of the worked surfaces in minimum time, without additional manual work and without damaging items to be cleaning. This method has its success based on two physical principles: piezelectricity and cavitation. Piezelectricity is the electrical charge accumulated in solid materials (such as crystals, ceramics, biological material such as bones and proteins) in response to an applied mechanical force. Cavitation is the formation of vapor or gas bubbles in a liquid by the effect of a local pressure reduction. These two physical principles are related by a transducer, which consists of a device that converts mechanical energy in electrical energy or the oposite. In its constructive form, it has pairs of piezoelectric materials, which when subjected to an electric current, vibrate in order to produce ultrasonic waves, generating the effect of cavitation. The objective of the present work will be to deepen the general knowledge about the phenomena of cavitation and piezeletricidade applied to the ultrasonic cleaning.

**Keywords:** Piezelectricity, Cavitation, Ultrasonic Cleaning

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Transdutor do tipo Langevin - TPL .....	16
Figura 2.2	Transdutor do tipo Unimorpho .....	16
Figura 2.3	Transdutor do tipo Tubular ou Haste .....	17
Figura 2.4	Classificação do Efeito Piezoelétrico direto e inverso .....	20
Figura 2.5	Efeito Piezoelétrico direto e inverso .....	21
Figura 2.6	Resultado da folha teste .....	31
Figura 2.7	Armação para a folha .....	31
Figura 2.8	Exemplo de tanque de limpeza .....	32
Figura 2.9	Solubilidade do Oxigênio na Água .....	34
Figura 2.10	Curvas da primeira bateria de testes .....	35
Figura 2.11	Curvas da segunda bateria de testes .....	36
Figura 2.12	Cavitação da Água corrente a um nível de 200mm(Lado Esquerdo) e 180mm (Lado Direito) .....	37
Figura 2.13	Cavitação das soluções acidas de 3% a um nível de 200mm .....	38
Figura 2.14	Cavitação das soluções acidas de 3% a um nível de 180mm .....	38
Figura 2.15	Cavitação das soluções alcalinas de 3% a um nível de 180mm .....	39
Figura 2.16	Cavitação das soluções alcalinas de 3% a um nível de 200mm .....	39
Figura 3.1	Micrometro para aferição da espessura .....	45
Figura 3.2	Folha de Alumínio .....	45
Figura 3.3	Folha de Alumínio posicionada no interior do tanque .....	46
Figura 3.4	Máquina de Limpeza por ultrassom .....	47

Figura 3.5	Multímetro para aferição da temperatura .....	48
Figura 3.6	Balança de precisão Marte AL500 .....	49
Figura 4.1	Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da água corrente a $10^{\circ}C$ para 25 e 40kHz .....	52
Figura 4.2	Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da água corrente a $50^{\circ}C$ para 25 e 40kHz .....	53
Figura 4.3	Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da solução ácida de 3% de $H_3PO_4$ a $50^{\circ}C$ para 25 e 40kHz .....	55
Figura 4.4	Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da solução ácida de 0,3% de $NaOH$ a $50^{\circ}C$ para 25 e 40kHz .....	58
Figura 4.5	Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da solução ácida de 3% de $Na_2SiO_3$ a $50^{\circ}C$ para 25 e 40kHz .....	59



## LISTA DE SIGLAS

EPI	Equipamentos de Proteção Individual
MLUS	Máquina de limpeza por ultrassom
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
OMS	Organização Mundial da Saúde
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
$(HO^+)$	Radical de hidroxila
$(H^+)$	Radical dehidrogênio
$H_2O_2$	Peróxido de hidrogênio
$(HO)^{+6}$	hidróxido tereftalato fluorescente
TA	ácido tereftálico
THA	íons de hidroxietileno
PMT	Fotomultiplicadores
$H_2SO_4$	Acido Sulfúrico
$H_3PO_4$	Ácido fosfórico
$Na_2SiO_3$ ,	Metassilicato de Sódio
$Na_2CO_3$	Carbonato de Sódio
$Na_3PO_4$	Fosfato de Trissódico
Al	Alumínio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1 DEFINIÇÃO DE LIMPEZA POR ULTRASSOM	11
1.1.1 Utilização	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivos específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
<b>2 ESTADO DA ARTE</b>	<b>15</b>
2.1 TRANSDUTORES	15
2.2 PIEZOELETRICIDADE	17
2.2.1 Apanhado Histórico	18
2.2.2 Materiais Piezelétricos Para Transdutores	20
2.2.3 Princípios Físicos	21
2.3 SONOQUÍMICA	22
2.3.1 Apanhado Histórico	22
2.3.2 Teoria da Cavitação	23
2.3.3 Fatores que afetam a cavitação	24
2.3.4 Estimação de parâmetros	25
2.4 MÉTODOS DE AVERIGUAÇÃO	26
2.4.1 Averiguação da cavitação	27
2.4.2 Averiguação da frequência acústica	28
2.4.3 Averiguação da cavitação através da ótica	28
2.4.4 Averiguação da cavitação através de métodos químicos e físicos	29
2.4.5 Teste da folha de alumínio	30
2.4.6 Revisão Sistemática da Literatura	32
<b>3 MATERIAS E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>51</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>63</b>
Anexo A – TABELA DE COMPATIBILIDADE DO ALUMÍNIO COM OUTRAS SUBSTANCIAS	65
Anexo B – TABELA DE COMPATIBILIDADE DO ALUMÍNIO COM OUTRAS SUBSTANCIAS	66
Anexo C – TABELA DE RESULTADOS DO AUTOR Niemczewski (2010)	

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Padoveze e Monte (1999), a limpeza é uma ação mecânica de remoção de sujeira, esta pode ser realizada a partir de aplicação de energia mecânica na forma de fricção, a partir de produtos químicos como soluções detergentes, desencrostantes ou enzimas ou de forma térmica, e tem como objetivo remover matéria orgânica ou inorgânica presente no artigo a ser limpo, além de reduzir a concentração microbiana.

Em um ambiente hospitalar, é importantíssimo que a limpeza de instrumentos seja bem-feita, caso isso não ocorra, há grandes chances dos processos de esterilização e desinfecção, perderem sua eficácia (GRAZIANO et al., 2002).

Há dois métodos utilizados para a limpeza de instrumentos odontológicos, médicos e cirúrgicos: manual e automatizado. O primeiro depende do esforço humano, uso de escovas e soluções de limpeza para remover as sujidades por meio da fricção. O segundo é realizado por meio de máquinas automatizadas e de vários modelos como máquinas lavadoras ultrassônicas, esterilizadoras, termo desinfetadoras dentre outras. Todas elas atreladas a produtos enzimáticos em seu ciclo de limpeza (CIRURGICOS, 2009).

A limpeza manual coloca o ser humano em contato com materiais contaminados e perfurocortante, produtos químicos e tóxicos, portanto para evitar acidentes, é imprescindível o uso de (EPI) equipamentos de proteção individual. Além de ser mais demorada, não é tão precisa e eficaz como a limpeza feita por máquinas automatizadas. Para o método automatizado, dentre os vários equipamentos utilizadas para limpeza, destaca-se a MLUS máquinas de limpeza por ultrassom. As mesmas possuem maior produtividade, menor risco para o ser humano, possibilita a repetibilidade dos processos e o controle dos parâmetros de limpeza.

A importância da limpeza, esterilização e desinfecção de artigos utilizados nas áreas da saúde é tão grande que é abordada dentro das estratégias elaboradas pela Organização Pan-Americana da Saúde OPAS em parceria com a Organização Mundial da Saúde OMS para a segurança do paciente.

Essas estratégias estão baseadas em dois desafios globais: "Uma Assistência Limpa é uma Assistência Mais Segura" que está focado na importância da higienização das mãos em serviços de saúde e " Cirurgias Seguras Salvam Vidas " que está relacionado as práticas de melhorias nos procedimentos cirúrgicos OMS e OPAS (2010).

Com a proposta desses desafios, outra área que acabou ganhando atenção foi a da prevenção de resistência microbiana, a qual o gerente de prevenção e controle de doenças e desenvolvimento sustentável da OPAS/OMS, Dr. Enrique Gil ressaltou como parte do processo do ganho de qualidade na atenção ao paciente e ainda fez referência ao uso do "Manual de Esterilização para Centros de Saúde" elaborado pela OPAS, para conscientizar os países da região das Américas sobre o uso seguro do instrumental médico cirúrgico. Esse manual elaborado em 2008 possui um capítulo inteiro dedicado a limpeza de materiais hospitalares, tanto de forma manual como de forma automatizada OMS e OPAS (2010).

### 1.1 DEFINIÇÃO DE LIMPEZA POR ULTRASSOM

No conceito clássico da limpeza por ultrassom, o equipamento utiliza transdutores piezocerâmicos, que são acoplados na superfície externa de um tanque preenchido por uma solução de limpeza. Quando uma corrente elétrica é aplicada aos transdutores, estes se expandem e produzem vibrações com frequências específicas. Geralmente são utilizadas frequências entre  $20\text{ kHz}$  e  $40\text{ kHz}$ . As frequências em torno de  $20\text{ kHz}$  produzem bolhas de maior diâmetro, produzido uma limpeza mais agressiva, por outro lado frequências em torno de  $40\text{ kHz}$  são mais adequados para a limpeza intensiva e suave de superfícies (SHOH, 1975)

A faixa de frequência depende do tamanho da partícula a ser eliminada, o habitual para partículas com um diâmetro maior do que  $1\mu\text{m}$  é cerca de  $200\text{ kHz}$ . A frequência requerida é determinada pela menor cavidade da estrutura que deve ser limpa. O comprimento de onda na água deve ser inferior a metade do diâmetro da cavidade. Caso contrário, a onda ultrassônica não pode penetrar e a superfície seria lisa e fechada para os efeitos da ressonância.

O mínimo necessário para obter bons resultados de potência sonora é de cerca de  $10\text{-}20\text{ W}$  por litro de fluido de limpeza. Os transdutores necessitam de uma distância mínima de  $1\text{-}2\text{ cm}$ , de modo a formar um campo de ressonância homogêneo Messerli (2017).

A utilização de solventes, ácidos e alcalinos suporta significativamente o efeito de limpeza de banhos de ultrassom. Especificamente, a tensão superficial da água deve ser reduzida com um agente adequado para a limpeza ultrassônica eficaz. Não há líquidos inflamáveis utilizados como detergentes, já que o ultrassom gera calor e o transmite para o líquido, o que pode resultar na ultrapassagem da temperatura de ignição para a inflamação do líquido do banho. Banhos de ultrassom são também utilizados na preparação de amostras para quebrar substâncias biológicas no laboratório de análise. Utiliza-se também banhos de ultrassom para rompimento celular ou DNA.

O método ultrassônico é um dos métodos mais moderno de limpeza atualmente. As vantagens particulares são limpeza máxima das superfícies trabalhadas em tempo mínimo, sem trabalho manual adicional e sem danificar os itens a serem limpos. Os resultados obtidos com os dispositivos de limpeza de ultrassom não são os mesmos que os por métodos convencionais. Levando em consideração que até mesmo impurezas pesadas, entranhadas em ranhuras e cavidades são removidas dentro de segundos, este método é muito mais eficaz que o método de limpeza manual.

O princípio ativo de limpeza ultrassônica é a cavitação. A cavitação é a formação de bolhas de vapor ou de gás num líquido por efeito de uma redução da pressão local. A energia elétrica é conduzida através de um cabo para o transdutor. O transdutor converte a entrada elétrica em vibrações sônicas mecânicas. As vibrações produzem no líquido alternadamente uma pressão negativa e positiva. Neste momento, é provocado o efeito físico da cavitação. Em muitos casos, o aumento da bolha de cavitação com uma frequência de aproximadamente  $25\text{ kHz}$  leva à implosão.

Uma frequência ultrassônica de por exemplo  $25\text{ kHz}$ , gera brevemente temperaturas de mais de  $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (condições como na superfície solar) e pressões de até  $500\text{ bar}$ . Estas altas temperaturas e pressões podem destruir estruturas frágeis ou matar as bactérias menores. As bolhas de cavitação produzem, devido a implosões, elevadas pressões locais semelhantes a estalos, turbulência e correntes no líquido. (MESSERLI, 2017)

Estes fenômenos levam ao desprendimento de partículas de impurezas sobre a superfície do estrato. O campo ultrassônico existente no líquido produz ondas de pressão positiva e negativa. Forma-se uma onda de pressão negativa em um objeto (o objeto a ser limpo) para formar as pequenas bolhas de núcleos de vapor nas cavidades.

### 1.1.1 UTILIZAÇÃO

Shoh (1975) já explicava que o mercado mundial de ultrassom de alta potência movimentava cerca de cem milhões de dólares, e que havia crescido constantemente pelas duas décadas posteriores ao fim da segunda guerra mundial. Com isso, suas aplicações também cresceram e se diversificaram.

Entre as principais aplicações do ultrassom de alta potência, estão soldagem de plástico, soldagem de metal, brasagem, usinagem, no campo biológico algumas aplicações também são encontradas, como extração de fluidos de plantas, frutas e flores para produção de perfume, homogeneização de soluções químicas e atomização de substâncias, e, na saúde encontramos o ultrassom de alta potência aplicado nas operações de limpeza de artigos.

Dispositivos de limpeza de ultrassom são muitas vezes utilizados para a limpeza de peças pequenas, complexas e finamente estruturadas. Por exemplo, joalherias, ourives, técnicos dentários e relojoeiros utilizam banhos de limpeza de ultrassom em seus produtos. Na indústria médico-hospitalar os banhos de ultrassom são utilizados para o tratamento de instrumentos cirúrgicos, estes têm seu tempo de esterilização diminuído se a limpeza for bem feita. Na indústria automotiva, banhos ultrassônicos são utilizados para a limpeza de carburadores, velas de ignição e injetores. Grandes equipamentos de limpeza por ultrassom industrial são utilizados para a tratamento de matéria bruta, por exemplo, de acabamentos das superfícies.

## 1.2 OBJETIVOS

De maneira ampla, o presente trabalho tem como objetivo aprofundar os conhecimentos gerais sobre os fenômenos da cavitação e a piezeletricidade aplicados à limpeza ultrassônica. Possibilitando a realização de simulações físicas, em bancada de laboratório, para analisar a cavitação em condições distintas.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tendo em vista o objetivo geral, tem-se os objetivos específicos definidos como:

1. Realizar experimentos em máquinas de limpeza por ultrassom existentes no Laboratório de Metalografiada UTFPR, com soluções ácidas e alcalinas e parâmetros operacionais, como temperatura e frequência, distintos;

2. Efetuar levantamento bibliográfico a respeito dos fenômenos da cavitação e a piezoelectricidade;
3. Avaliar a influência de diferentes frequências acústicas no fenômeno físico da cavitação;
4. Analisar o comportamento de solutos distintos em solução para banho, em relação à cavitação;
5. Verificar o impacto da temperatura da solução para banho na cavitação;
6. Comparar com a literatura os resultados obtidos;
7. Compreender os parâmetros mais adequados para determinadas aplicações, com base na literatura e nos experimentos.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A empresa MEDISONICS, que possui sua matriz na cidade de Grafstal na Suíça, está iniciando suas operações no Brasil e terá como segmento inicial de atuação o ramo médico-hospitalar. Devido ao contínuo avanço nas normas de esterilização, no aumento do interesse por parte de hospitais, clínicas, fabricantes de próteses e implantes, na busca por eficiência e velocidade neste processo, notou-se um amplo mercado a ser explorado, utilizando a tecnologia ultrassônica para limpeza e com baixíssima concorrência no Brasil.

Esse amplo mercado pode ser caracterizado como o “oceano azul”, descrito pelos autores Kim e Mauborgne, no qual uma empresa possui um diferencial que torna o seu produto único no mercado. Apenas no Paraná, existem mais de 100 hospitais e clínicas com poder aquisitivo para adquirir tais máquinas, bem como os fabricantes de próteses e implantes, que são aproximadamente 5 empresas. Produzindo desta maneira um mercado com potencial superior a dez milhões de reais a ser explorado.

Com o resultado dos experimentos propostos, os autores desse trabalho ampliarão seus horizontes de conhecimento numa tecnologia pouco explorada atualmente, contribuindo com os conhecimentos de parâmetros e fatores que estão relacionados à limpeza ultrassônica e podem influenciar em sua efetividade e eficiência, principalmente no ramo industrial.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 TRANSDUTORES

Segundo Gautschi (2002), medição é a determinação experimental da magnitude de uma grandeza física, comparando-a com uma unidade de medida correspondente. No entanto, a maioria das medidas são feitas indiretamente, explorando os efeitos físicos em aparelhos de medição, como transdutores e sensores. Frequentemente a quantidade a ser medida é convertida por um sensor em uma quantidade de natureza diferente, que pode ser amplificada e gravada. Um tipo particular de sinal de saída é o elétrico.

As propriedades mecânicas que podem ser medidas eletricamente são: deslocamento, velocidade, força, torque, pressão, tensão, som, aceleração e emissões acústicas. Uma série de efeitos físicos podem servir para converter uma quantidade mecânica num sinal de saída elétrico. Os mais importantes são a mudança de resistência (extensômetros, sensores piezoresistivos e potenciométricos), uma mudança na capacitância ou na indutância, e uma mudança na polarização (efeito piezoelétrico). Outros efeitos utilizados para transdução são os efeitos ópticos e químicos.

De forma resumida, transdutores são dispositivos que convertem um tipo de energia em outra (GALLEGO-JUAREZ, 1989). Em sua forma construtiva, o principal elemento possui propriedades eletrostrictivas ou magnetostrictivas, que fazem com o que o material mude sua dimensão física em resposta a um campo elétrico ou magnético. Os transdutores mais modernos usam cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) devido a eficiência na conversão eletromecânica ser maior que 95% (SHOH, 1975).

Segundo Pereira (2010), para frequências na faixa de até 20kHz, os transdutores magnetostrictivos são mais robustos e eficientes, porém são mais caros devido aos materiais que compõem suas ligas metálicas, e ao tipo do gerador para alta potência/frequência e baixa impedância.



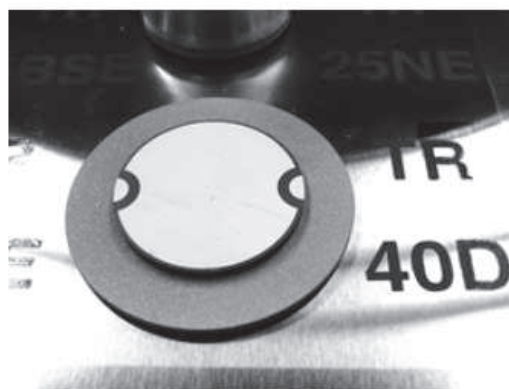
O transdutor do tipo Langevin consiste de um par de material cerâmico unido por um parafuso em um par de material metálico, conforme Figura 2.1, sendo o tipo mais difundido atualmente.



**Figura 2.1: Transdutor do tipo Langevin - TPL**

**Fonte: Clangsonic**

O transdutor *unimorpho* é o mais utilizado em equipamentos de baixo custo, por ser mais simples e barato. É constituído por um disco cerâmico acoplado a uma membrana metálica, conforme Figura 2.2.

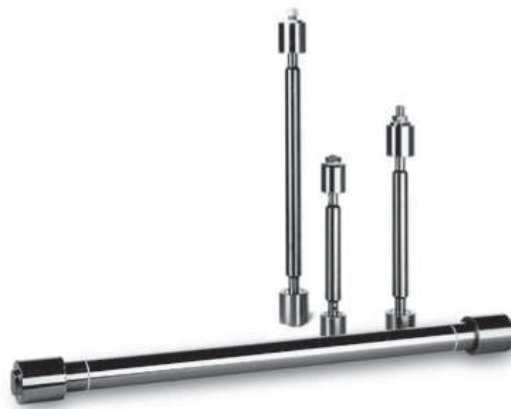


**Figura 2.2: Transdutor do tipo Unimorpho**

**Fonte: Pereira (2010)**

Por último, o transdutor tubular (ou de haste, conforme Figura 2.3) é o mais

utilizado em equipamentos de grande porte, necessita de uma alta tecnologia tanto para fabricação do transdutor em si quanto para o gerador de excitação elétrica (PEREIRA, 2010).



**Figura 2.3: Transdutor do tipo Tubular ou Haste**

**Fonte: Pereira (2010)**

Apesar dos transdutores piezoelétricos perderem eficiência devido à despolarização do material cerâmico com o tempo, este possui custo mais baixo que os magnetostrictivos. Além do custo, outras duas características fundamentais que tornam esse transdutor mais atrativo ao mercado, são a facilidade de fabricação e de excitação. Sua forma construtiva varia conforma a aplicação e ao custo, podendo ser o tipo Langevin (TPL), unimorphs e os tubulares (ou haste).

## 2.2 PIEZOELETRICIDADE

Piezeletricidade é a carga elétrica acumulada em materiais sólidos ( como cristais, cerâmica, material biológico como ossos e proteínas ) em resposta a uma força mecânica aplicada. A palavra piezeletricidade significada eletricidade resultante de pressão aplicada em determinado sólido. Foi descoberta em 1880 pelos físicos franceses Jacques e Pierre Curie.

O efeito piezoelétrico é entendido como a interação linear eletromecânica entre os estados mecânicos e elétricos em materiais cristalinos sem simetria de inversão. O efeito piezoelétrico é um processo reversível em que os materiais que exibem o efeito piezoelétrico direto (a geração interna de carga eléctrica resultante de uma força mecânica

aplicada) também exibem o efeito piezoelétrico inverso (a geração interna de uma tensão mecânica resultante de um campo elétrico aplicado) (GAUTSCHI, 2002).

### 2.2.1 APANHADO HISTÓRICO

O Efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos físicos franceses, Pierre Curie e Jacques Curie e anunciado pela primeira vez em uma sessão na Academia de Ciências de Paris em 02 de agosto deste mesmo ano. Eles falaram sobre a relação existente entre carga mecânica e polarização elétrica, porém sem usar o termo piezeletricidade.

O estudo baseou-se em cristais com um ou mais eixos cujas extremidades são assimétricas, isto é, cristais hemiedros com faces oblíquas que possuem a capacidade física de originar dois polos elétricos opostos, quando submetidos a mudanças de temperatura. Esse fenômeno é conhecido como piroeletricidade.

A partir desse estudo, eles encontraram um novo método para desenvolver eletricidade nesses mesmos cristais, que consistia em submetê-los a variações de pressão ao longo de seus eixos hemiédricos. Os testes foram feitos com zinco blende, clorato de sódio, boracita, turmalina, quartzo, calamina, topázio, ácido tartárico, açúcar de cana e sal de Rochelle (GALLEGO-JUAREZ, 1989).

Um ano após o anúncio da descoberta dos irmãos Curie, outro cientista abordou a existência do efeito piezoelétrico, Lippmann afirmou que, quando é aplicada corrente elétrica em faces opostas de um cristal, este se deformaria. Os irmãos Curie confirmaram a teoria de Lippmann com experimentos teóricos, porém foi com Hankel que o termo piezeletricidade surgiu pela primeira vez, nesse mesmo ano e foi imediatamente aceito.

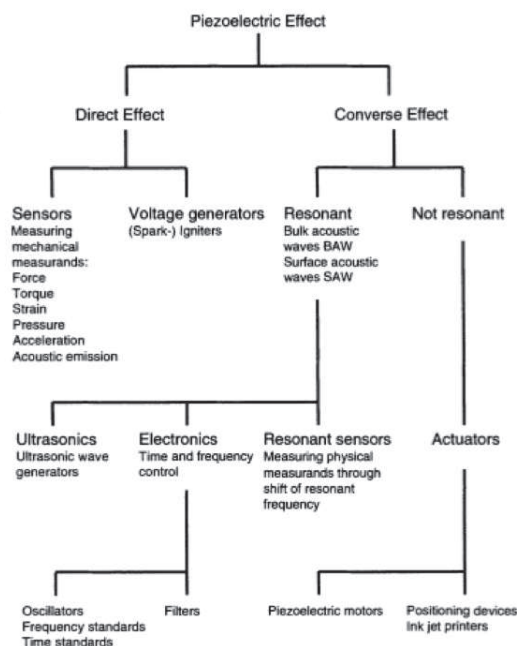
Entretanto, sua primeira aplicação prática aconteceu mais de 30 anos depois, com o advento da Primeira Guerra Mundial, quando Paul Langevin tentou utilizar cristais de quartzo para fazer a localização de submarinos alemães. O transdutor desenvolvido por Langevin, não ficou pronto até o final da guerra e acabou sendo usado posteriormente como dispositivo sonoro para identificação de profundidade. Por quase uma década, os cristais de quartzo foram a única fonte de ondas ultrassônicas, eles foram usados em interferômetro ultrassônico produzido por Pierce em 1925 e na primeira aplicação de ultrassons de alta potência (GALLEGO-JUAREZ, 1989).

Com a descoberta do efeito piezoelétrico e sua primeira aplicação prática comprovada, outros cientistas da época resolveram dedicar suas vidas ao estudo desse fenômeno, entre eles está Cady, que detém o título de “Pai da Piezeletricidade Moderna” (GAUTS-

CHI, 2002).

Em 1918, Cady identificou um comportamento elétrico particular em placas do sal Rochelle, para serem usadas como sinalizadores subaquáticos. Ele então descobriu o efeito piezoelétrico ressonante, e em 1921 sugeriu que esse sal poderia ser utilizado para estabilizar as frequências dos rádios transmissores e para os filtros de frequência. A aplicação do efeito piezoelétrico em ultrassom e técnicas de comunicação é baseado no simples princípio de deformar um material piezoelétrico com a aplicação alternada de um campo elétrico constituindo um conversor piezoelétrico eletromecânico. Se a frequência desse conversor é transformada em frequência natural mecânica do material piezoelétrico, este começará a ressonar em uma amplitude consideravelmente grande. Como os materiais piezoelétricos possuem um alto fator-Q em sua frequência mecânica de ressonância, essa frequência acaba sendo extremamente estável e definida.

Segundo Gautschi (2002), a faixa de frequência atingida através da piezeletricidade, gera ondas ultrassônicas perto da faixa de  $THz$ . Os correspondentes comprimentos de onda são medidos em micrometro, o que torna possível a aplicação de técnicas para medir a velocidade do som, da luz, determinação das propriedades elásticas dos materiais, técnicas para eliminar partículas de fumaça e poeira, transmissão de sinais, controle remoto de equipamentos, diagnóstico médico por ultrassom, terapias com ultrassom, técnicas que promovem a desgaseificação de líquidos, limpeza de materiais e até mesmo permite a investigação de processos moleculares. As diversas aplicações do efeito piezoelétrico são classificadas de acordo com o tipo do efeito, sendo ele direto ou inverso, conforme Figura 2.4.



**Figura 2.4: Classificação do Efeito Piezoelétrico direto e inverso**

**Fonte: Gautschi (2002)**

## 2.2.2 MATERIAIS PIEZELÉTRICOS PARA TRANSDUTORES

Entre os anos de 1941 e 1947, uma série de estudos com óxidos de bário e titânio, feitos pelos USA, USSR e Japão, resultaram na descoberta de propriedade piezométrica em cerâmicas polarizadas de Titanato de Bário. Esse foi o início de um desenvolvimento de materiais cerâmicos policristalinos, que perdura até hoje.

A característica básica desses materiais é a ferroeletricidade dos cristais, que permite que o momento elétrico desses, seja orientado em uma direção específica através da aplicação de um campo elétrico. Esse processo é denominado polarização e permite que materiais ferroelétricos se tornem piezoelétricos. Além disso, materiais ferroelétricos possuem alta constante dielétrica o que resulta em uma impedância elétrica baixa, sendo muito útil em transdutores ultrassônicos (GALLEGO-JUAREZ, 1989).

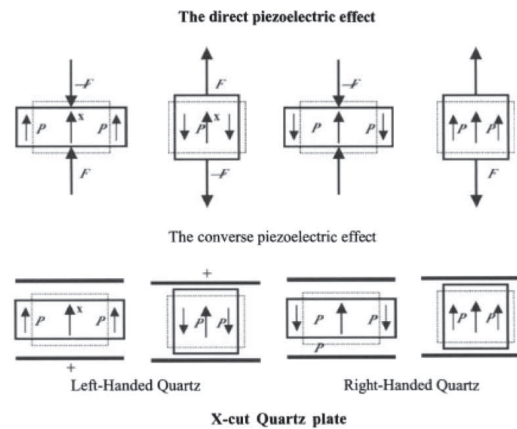
Essa descoberta foi só o início, Goodman (1952) começou seus estudos com nióbio e Jaffe et al. (1954) descobriram o Titanato Zirconato de Chumbo PZT, que foi um marco no desenvolvimento de cerâmicas piezoelétricas, devido às suas características físicas fortes e estáveis. Nos últimos 30 anos, PZT e materiais relacionados foram os principais constituintes de piezocerâmicas em aplicações ultrassônicas. Atualmente os estudos estão

voltados para um novo material cerâmico baseado em  $PbTiO_3$

### 2.2.3 PRINCÍPIOS FÍSICOS

O efeito piezoelétrico direto acontece quando uma deformação mecânica é aplicada no material e este responde produzindo uma mudança de polarização, consequentemente uma carga elétrica é produzida no sentido oposto a carga mecânica aplicada. Ao contrário do efeito piezoelétrico direto, o efeito inverso produz uma deformação mecânica quando o material é submetido a uma carga elétrica.

A Figura 2.5 representa os dois efeitos em uma placa de quartzo cortada no eixo X.  $F$  é a força aplicada no material e  $P$  é a polarização decorrente dessa deformação. É importante ressaltar que o efeito piezoelétrico só é possível em materiais cristalinos que não possuem centro de simetria (GAUTSCHI, 2002).



**Figura 2.5: Efeito Piezoelétrico direto e inverso**

**Fonte: Gautschi (2002)**

A relação entre forças mecânicas e elétricas é dada pelo fator de acoplamento, este pode ser expresso relacionando a deformação do material e sua permissividade ou a tensão do material e sua permissividade (RANSLEY, 2016).

Dependendo do material piezoelétrico e da forma geométrica deste, as propriedades mecânicas e elétricas podem ser relacionadas através de pares de Equações como as equações 2.1 e 2.2, ou as Equações 2.3 e 2.4

$$S = s^E T + d_t E \quad (2.1)$$

$$D = dT + \epsilon^t E \quad (2.2)$$

ou

$$T = c^E S - e_t E \quad (2.3)$$

$$D = eS + \epsilon^s E \quad (2.4)$$

Na qual:  $S$  corresponde a tensão,  $T$  a deformação,  $E$  a campo elétrico,  $D$  a deslocamento elétrico. Os parâmetros  $\beta$ ,  $\epsilon$  correspondem à impermeabilidade dielétrica e permissividade dielétrica,  $c$  corresponde a constante de rigidez elásticas.

As constantes dielétricas “ $d$ ,  $e$ ,  $g$   $h$ ” são utilizadas para uma série condições específicas, como por exemplo:  $d$  mede a tensão em um cristal no qual um determinado campo elétrico é aplicado,  $e$  mede a deformação devido a este campo aplicado,  $g$  mede a voltagem correspondente a uma deformação aplicada ao material e  $h$  mede a voltagem correspondente a uma tensão aplicada. (STANDARDS... , 1949) Elas se relacionam através das Equações 2.5 e 2.6

$$d = \epsilon^t g \quad (2.5)$$

$$e = \epsilon^s h \quad (2.6)$$

## 2.3 SONOQUÍMICA

### 2.3.1 APANHADO HISTÓRICO

O ultrassom é uma ferramenta poderosa para convergir, aumentar o campo e/ou modificar reações químicas, biológicas e eletroquímicas. De acordo com Thompson e Doraiswamy (1999) essa tecnologia permite trabalhar em condições mais suaves, elimina a necessidade de utilizar solventes caros e aumenta a atividade de catalises. Por isso o ultrassom se prova uma alternativa promissora em comparação a componentes químicos e farmacêuticos.

O estudo desse campo tem crescido muito nos últimos 30 anos, e recebeu o nome de Sonoquímica. Boa parte dos estudos foram feitos por químicos e físicos, estes concluíram que os efeitos químicos e mecânicos do ultrassom se devem a colapsos implisivos

de bolhas de cavitação.

O interesse na sonoquímica teve início ainda no século 19, quando em 1895, Thornycroft and Barnaby, publicaram o primeiro artigo sobre o tema. O documento relatava os danos causados no rotor de um submarino em decorrência de bolhas de cavitação.

Em 1917, Lord Rayleigh divulgou o primeiro modelo matemático descrevendo um evento de cavitação num fluido não compressível. O primeiro uso com o objetivo de potencializar reações químicas foi feito por Richards e Loomis em 1927, e para as primeiras reações biológicas por Wood e Loomis também em 1927. O tema teve um crescimento raso no ramo até a década de 70, porém a partir da década de 80 houve um crescimento, que inclusive levou Neppiras (1980) a criar o termo Sonoquímica.

Existem alguns tipos de métodos para produzir cavitação como: transdutores movidos a gás (como apitos para cachorro), transdutores movidos a líquido (como rotores de embarcações) e, finalmente, os mais comuns são os transdutores eletromecânicos. Este último pode ser obtido com materiais magnetostrictivos, ou com materiais piezoelétricos, sendo que este último é o foco deste estudo.

### 2.3.2 TEORIA DA CAVITAÇÃO

Segundo Fuchs (1995), em meios elásticos como ar e a alguns sólidos, existe uma transição contínua conforme as ondas sonoras são transmitidas. Já em meios não elástico como água e a maior parte dos líquidos, a transição só acontece quando a amplitude de som é baixa. Conforme a amplitude aumenta, a magnitude da pressão negativa da onda sonora em áreas de rarefação, é o suficiente para causar uma fratura no líquido, causando um fenômeno chamado de cavitação. Na cavitação, o líquido é separado em pontos de nucleação com alguma impureza gasosa, produzindo vazio, e suas bolhas geram efeitos mecânicos, químicos e físicos no meio em que se encontram (THOMPSON; DORAISWAMY, 1999)

Griffing (1952) afirma que efeitos químicos não podem ser observados em banhos de ultrassom em que não existem gases dissolvidos, ou quando a intensidade sonora não é superior ao limiar de cavitação do sistema, ou quando o reagente não for volátil suficiente para produzir bolhas.

Thompson e Doraiswamy (1999) explicam que os efeitos químicos e físicos do ultrassom são o resultado de eventos de cavitação estável e transientes, e existem duas teorias opostas que explicam esses eventos. A primeira teoria é denominada hot-spot, a



qual determina que, quando as bolhas cavitam produzem pontos de calor de 5.000 K e pressões superiores a 500 atm. A segunda teoria é a elétrica, que propõem a formação de um campo elétrico poderoso na superfície das bolhas. Após algumas décadas de debates, descartou-se totalmente a teoria elétrica.

Neppiras (1980) realizou um estudo bem detalhado da formação das bolhas e sua dinâmica. Começando por cavidades estáveis que são bolhas que oscilam, de forma não linear num tamanho de equilíbrio. Essas são permanentes e persistem por vários ciclos de ondas. Por outro lado, as transientes existem por menos de um ciclo, já que elas expandem para um tamanho superior ao dobro do inicial, até seu colapso que ocorre de forma violenta produzindo novas pequenas bolhas. Normalmente num campo de cavitação, a maioria das bolhas visíveis estarão oscilando de forma estável. Na maioria das situações essas bolhas contem ar, já que em apenas algumas circunstâncias as bolhas conseguem sustentar vapor em oscilação constante.

### 2.3.3 FATORES QUE AFETAM A CAVITAÇÃO

As condições ambientes e do banho influenciam de forma significativa a dinâmica da cavitação. Um dos fatores que podem afetar de forma significativa, é a presença e a natureza de gases dissolvidos. Os gases agem como pontos de nucleação, portanto conforme as bolhas implodem e liberam o gás para a atmosfera, o banho vai perdendo potência de cavitação. Thompson e Doraiswamy (1999) fala que de forma geral, quanto maior for o calor específico do gás, maior será seu poder de cavitação. Por exemplo, gases monoatômicos, como Hélio e Argônio convertem maior energia durante a cavitação, quando se compara com gases diatômicos, como oxigênio ou hidrogênio. Outro ponto importante é a solubilidade do gás, sendo que gases muito solúveis reduzem o poder da cavitação, porque acabam se redissolvendo antes do colapso da bolha, ou em outros casos a bolha cresce tanto que sobe a superfície e libera o gás para a atmosfera.

Outro fator importante é a temperatura ambiente, que diferentemente de reações químicas em geral, o aumento da temperatura acarreta numa redução do efeito sonoquímico. Isso se deve a uma série de eventos, como por exemplo, a pressão de equilíbrio do vapor que cresce com o aumento da temperatura e acabando formando bolhas mais facilmente. No entanto as bolhas formadas apresentam maior quantidade de vapor, e este reduz do ultrassom, já que amortece a implosão e usa a entalpia produzida para condensar (THOMPSON; DORAISWAMY, 1999).

Os mesmos autores afirmam que a pressão ambiente possui um papel na reação,

de forma que quanto maior a pressão, maior será o efeito da cavitação. Isso se deve ao fato de a pressão de vapor reduzir, conseqüentemente reduz a quantidade de vapor dentro da bolha e finalmente amplifica a potência da implosão. A escolha do solvente também apresenta uma função importante, de forma que as cavitações se beneficiam de solventes com baixa viscosidade, alta pressão de vapor e baixa tensão superficial.

Um dos aspectos que mais influenciam o poder de cavitação é a frequência do ultrassom, já que essa altera o tamanho crítico da bolha. De forma geral, frequências mais baixas entre 20 *kHz* e 50 *kHz*, produzem uma cavitação mais violenta que levam a maiores pressões e temperaturas localizadas. Por outro lado, frequências elevadas podem produzir um maior número de radicais livres que, apesar de menos violenta, produz um elevado número de eventos de cavitação. Thompson e Doraiswamy (1999) explica que, frequências elevadas reduzem o tempo de vida da bolha e por conseqüência aumentam o número de radicais livres.

O último fator que afeta a cavitação, é a potência acústica, que de acordo com Thompson e Doraiswamy (1999), vai crescendo na mistura conforme a potência do equipamento aumenta. Porém em determinado ponto atinge seu máximo, a partir daí começa a reduzir. Isso se explica, pois, uma nuvem de bolhas começa a se formar na saída do transdutor, e, portanto, bloqueia que a potência chegue ao banho. A potência ideal também é dependente da frequência aplicada.

#### 2.3.4 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Os modelos mais aceitos atualmente foram apresentados na revisão de Thompson e Doraiswamy (1999) e começam com a estimativa de  $C$ , que representa a velocidade de propagação de uma onda de ultrassom em fluidos puros, e está em função da temperatura do líquido  $T$  e número de carbonos  $C_n$ . Podemos concluir com a equação 2.7 que, a velocidade aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o número de carbonos.

$$C = a + \frac{b}{C_n} - \left( d + \frac{e}{C_n} \right) T \quad (2.7)$$

As outras constantes foram determinadas por Wang e Nur (1991), para n-alcanos e para 1-alcanos, e podem ser observadas na tabela 2.1. As unidades de medidas utilizadas na fórmula são *m/s* para a velocidade e °C para as temperaturas.

**Tabela 2.1: Constantes de Wang e Nur**

<i>Composto</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<b>Ref</b>
<i>n-alcanos</i>	1585.6	-2482.1	3.2594	7.4070	
<i>1-alcano</i>	1569.4	-2379.2	3.0804	8.8784	Wang e Nur (1991)

Outro parâmetro apresentado por Thompson e Doraiswamy (1999), é da potência acústica, que é referida como potência dissipada ( $P_{diss}$ ) e é calculada pela equação 2.8. Um dos métodos mais aceitos para realizar essa medição é através da calorimetria, que assume que toda a energia inserida no sistema é convertida em calor.

$$P_{diss} = \left( \frac{dT}{dt} \right) mC_p \quad (2.8)$$

A conclusão experimental dos autores foi de que um pouco mais de 50% da energia inserida era dissipada em forma de calor. O restante de energia pode dissipar através da parede do tanque, na conversão de energia elétrica em mecânica e entre outros fatores. Finalmente, o último aspecto explorado por Thompson e Doraiswamy (1999) é a intensidade ultrassônica. Num primeiro momento se faz necessário calcular a intensidade máxima, que é obtida através da equação 2.9.  $Pa$  representa a amplitude da pressão,  $\rho$  representa a densidade do meio líquido e  $C$  a velocidade do som no meio.

$$I_{max} = \frac{Pa^2}{2\rho C} \quad (2.9)$$

Quanto maior for a distância da fonte, menor será a intensidade. Com isso em mente, os autores chegaram na equação 2.10, onde  $dt$  é a distância da fonte e  $\alpha$  representa o coeficiente de atenuação do meio líquido

$$I = I_{max} e^{-2dt\alpha} \quad (2.10)$$

## 2.4 MÉTODOS DE AVERIGUAÇÃO

O uso de modelos diferentes de máquinas com fluidos diferentes em diversos tipos de materiais gera diferentes resultados de limpeza, portanto como se determina se o processo de limpeza está adequado? Verhaagen e Rivas (2016) apresentam em seu artigo diversos métodos para a averiguação da frequência acústica, poder de cavitação e de limpeza e a correlação entre eles. Sabe-se que há várias maneiras de gerar bolhas em

um fluido, dentre elas estão os raios lasers, ultrassom e efeitos hidrodinâmicos, entretanto o exato mecanismo de limpeza produzido por estas através de jatos, ondas de choque e outros fenômenos ainda não foi elucidado e continua em estudo.

A medição da intensidade da cavitação é um dos indicadores da efetividade de um sistema ultrassônico de limpeza, esta intensidade está diretamente relacionada com a velocidade e a minuciosidade da limpeza, e a distribuição está ligada a uniformidade da área a ser limpa.

Os autores definem “limpeza” como a remoção de contaminantes, que pode ser qualquer substância indesejada sob um objeto. Essa contaminação tem origem em pastas de polimento, resíduos de materiais de produção, material biológico ou simplesmente do pó. Pode se afirmar que um objeto está limpo quando a quantidade de contaminação foi reduzida a um nível aceitável, que por sua vez depende da aplicação da limpeza. Na área da saúde por exemplo, o nível aceitável de contaminantes em instrumentos cirúrgicos foi estabelecido pela norma ISO 15883, contudo a detecção do nível de contaminação depende da técnica de medição utilizada.(VERHAAGEN; RIVAS, 2016)

#### 2.4.1 AVERIGUAÇÃO DA CAVITAÇÃO

Verhaagen e Rivas apresentam como o teste mais simples para a detecção da cavitação o da folha de alumínio. Esse teste consiste na inserção de uma folha de alumínio em um banho ultrassônicos.

Ao ser imersa no banho, a folha começa a sofrer erosão e os padrões formados em sua superfície indicam os pontos de maior concentração da cavitação, consequentemente maior ação de limpeza. A erosão da folha leva minutos e é muito sensível aos parâmetros do banho como temperatura, gás dissolvidos, frequência acústica e também ao posicionamento desta no tanque.

Esse método foi especificado no relatório técnico da comissão internacional de eletrotécnica (IEC) número 60886:1987, é indicado para comparação de desempenho a longo do tempo entre diferentes tipos de banho ultrassônicos, obtendo-se assim uma estimativa das zonas de alta pressão. Outros métodos alternativos a esse são: erosão de pequenas amostras de chumbo ou superfície de vidro pintadas. (VERHAAGEN; RIVAS, 2016)

Um método de avaliar se há presença de atividade ultrassônica, consequentemente cavitação, recebe o nome de Sonocheck. Esse método que consiste em colocar no banho ultrassônicos uma ampola contendo uma solução de clorofórmio e tinta sensível ao pH.

Esse método foi desenvolvido pelo fabricante Healthmark.( citar site do fabricante )

Conforme a cavitação começa a surgir, a concentração de clorofórmio na solução da ampola começa a diminuir e o pH da solução é alterado, levando a mudança de cor da solução da ampola. Esse método também permite monitorar o desempenho do banho e relação ao tempo, porém como não são levados em conta parâmetros como temperatura, frequência acústica e gás dissolvido, a comparação entre banhos não pode ser determinada.

#### 2.4.2 AVERIGUAÇÃO DA FREQUÊNCIA ACÚSTICA

Quando as bolhas grandes de um fluido entram em colapso elas geram sinais acústicos de alta frequência, comumente chamados de ruídos brancos. Esses ruídos produzem um aumento na primeira sub-harmônica das ondas de frequência ultrassônicas e podem ser capturados por hidrofones. (VERHAAGEN; RIVAS, 2016)

Os hidrofones são transdutores elétricos constituídos de material piezoelétrico que captam vibrações sonoras produzidas por fluidos e transformam a frequência de vibração em sinal elétrico.

Para fazer o mapeamento da atividade ultrassônica perto de um transdutor dentro de um fluido, Verhaagen e Rivas fizeram um experimento juntando uma série de hidrofones e os posicionados de modo a criar diferença de fase entre os sinais recebidos.

Várias indústrias como CaviSensor, Ultrawave's Hygea, Sonic Metere e laboratórios como o National Physics Laboratory in the United Kingdom, desenvolveram sensores baseados na captação de sinais acústicos e pressões acústicas para identificar a presença da cavitação em um banho ultrassônico, entretanto os sensores que utilizam a pressão acústica como parâmetro de medição não são capazes de fazer o mapeamento da atividade, eles servem apenas como indicadores de presença de cavitação.

#### 2.4.3 AVERIGUAÇÃO DA CAVITAÇÃO ATRAVÉS DA ÓTICA

Embora a presença de aglomerado de bolhas em um banho ultrassônico possa ser visto a olho nu, a dinâmica rápida, o comportamento e a pequena dimensão das bolhas individuais deste aglomerado, necessitam de uma forma de estudo mais acurada e precisa, para isso imagens de alta velocidade podem ser usadas. Geralmente para a análise da dinâmica pode-se usar a aquisição de imagens na taxa de 100.000 *frames/s*.

Se o objetivo é estudar a distribuição de velocidade no fluido ao redor das bolhas

que colapsam perto de uma parede rígida, pode-se usar uma combinação de várias técnicas com lasers de luz pulsada, sombras e a alta taxa de captura de imagens.

Com esse método de averiguação é possível captar a interação das bolhas com as superfícies próximas, essa interação está diretamente relacionada à capacidade de limpeza da cavitação das bolhas. Para isso utiliza-se fotografias de alta velocidade ( em torno de 200 milhões de quadros por segundo), tempos de exposição de 5 *ns*, e resolução espacial de alguns micrômetros.

Com o resultado dessas fotografias é possível registrar dois tipos de emissão de ondas de choque: o colapso livre de uma bolha dentro da nuvem pela pressão ambiente no fluido e a interação da onda de choque induzida por colapso da nuvem com microbolhas existentes perto do local de colapso da nuvem. (VERHAAGEN; RIVAS, 2016)

#### 2.4.4 AVERIGUAÇÃO DA CAVITAÇÃO ATRAVÉS DE MÉTODOS QUÍMICOS E FÍSICOS

Ao ser irradiada por ondas ultrassônicas a água cavitava e libera radicais de hidroxila ( $HO^+$ ) e hidrogênio ( $H^+$ ). A quantificação desses radicais está diretamente relacionada a energia de cavitação do sistema, portanto monitorar esses radicais gera uma estimativa da quantidade de energia que está entrando no banho ultrassônico.(MASON et al., 1994)

Dentre os métodos de monitoramento de radicais, os mais utilizados são o Monitoramento de Peróxido de hidrogênio  $H_2O_2$  por iodimetria, ESR, Dosímetro de Fricke e a formação de íon de hidróxido tereftalato fluorescente ( $HO$ )<sup>+6</sup> considerado o método mais simples de execução.

Em soluções aquosas alcalinas, o ácido tereftálico *TA* produz ânions que reagem com os radicais de hidroxila, formando íons de hidroxietileno *THA* que são altamente fluorescentes. Essa reação fornece um método para estimar os radicais hidroxílicos que são liberados devido ao fenômeno da cavitação e permite estudar os efeitos que parâmetros como a intensidade, frequência, fonte geradora de ultrassom, concentração de reagentes e temperatura da reação, geram na produção desses radicais.

Segundo MASON et al., todos os experimentos que foram feitos utilizaram uma máquina de limpeza por ultrassom de 38kHz ( Kerry Pulsation 55 ) e uma máquina de limpeza por ultrassom de frequência variável entre 20 e 60 kHz ( Undatim Sonoreactor ).

Além do método químico para avaliação dos efeitos da cavitação em banhos ul-

trassônicos, é possível medir a sonoluminescência com câmeras e tubos fotomultiplicadores PMT. Os PMT's possuem uma alta sensibilidade e resolução temporal porém eles não transmitem informações espaciais precisas, já as câmeras são o oposto. A sonoluminescência pode ser induzida utilizando produtos químicos como o luminol, que reagem com os radicais OH que se formam após o colapso da bolha. Ao utilizar a associação de métodos físicos e químicos é possível associar o poder de cavitação de um banho ultrassônico com a limpeza. (VERHAAGEN; RIVAS, 2016)

#### 2.4.5 TESTE DA FOLHA DE ALUMÍNIO

Conforme apresentado anteriormente, o teste da folha de alumínio consiste na inserção de uma folha deste material no interior de um tanque para avaliar a intensidade e distribuição da cavitação em um banho ultrassônico.

A fabricante alemã de máquinas de limpeza por ultrassom, BANDELIN em um dos seus catálogos sugere o uso do teste para dar início a utilização de uma máquina nova, e para acompanhamento periódico, para verificar a qualidade do processo de limpeza. Para que o teste tenha repetibilidade é importante que alguns parâmetros sejam mantidos constantes, dentre eles estão: nível de solução dentro do tanque de limpeza, temperatura e concentração da solução, tempo de degaseificação da solução de limpeza de 5 a 30 min antes do uso desta, posicionamento das folhas de teste dentro do tanque, propriedades das folhas, tempo de atividade ultrassônica.

A fabricante ressalta que para efeito de comparação os resultados devem ser arquivados e mesmo que eles não sejam idênticos, as áreas perfuradas das amostras devem ter dimensão e distribuição bem parecidas. Como exemplo tem-se a 2.6

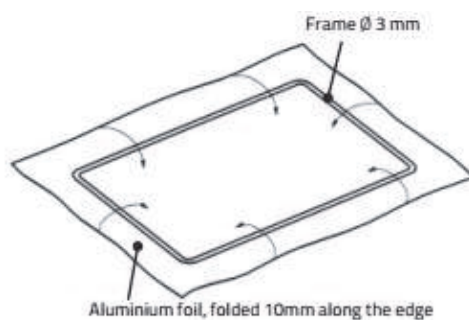


**Figura 2.6: Resultado da folha teste**

**Fonte: BANDELIN (2017)**

Para a execução do teste, a seguinte metodologia deve ser utilizada:

1. Encher dois terços do tanque de ultrassom com a solução desejada.
2. Realizar a degaseificação da solução. Para soluções com menos de 10l utiliza-se 10 min e para soluções acima utiliza-se 30 min.
3. Esticar a folha de alumínio, que deve ter entre 10 e 25 microns, sobre a armação, que deve ser de aço inoxidável, conforme 2.7

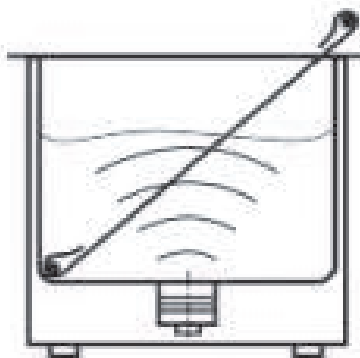


**Figura 2.7: Armação para a folha**

**Fonte: BANDELIN (2017)**

4. Com o ultrassom desligado, introduzir a armação de forma diagonal no tanque, conforme 2.8





**Figura 2.8: Exemplo de tanque de limpeza**

**Fonte: BANDELIN (2017)**

5. Ligue a máquina por pelo menos 1 min para que os efeitos da cavitação possam ser vistos. Para efeitos de estudo, os testes devem durar no mínimo 3 min
6. Desligue a máquina, remova a folha e deixe-a secar. Se a amostra não estiver perfurada, o fabricante da máquina deve ser contactado para manutenção. Arquive a folha e os resultados, e finalmente limpe os cavacos de alumínio que permanecerem no fundo do tanque.

#### 2.4.6 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Ao pesquisar sobre a limpeza por ultrassom e o fenômeno da cavitação na base do SCOPUS, os alunos utilizaram palavras chaves como *Piezelectricity*, *Cavitation*, *Ultrasonic Cleaning* e se depararam com uma coletânea de artigos do mesmo autor, Bogdan Niemczewski. Por ser um tema relativamente novo e pouco explorado, os alunos decidiram por seguir os caminhos apontados por este autor e desenvolver o presente trabalho baseado nos artigos desse autor.

O autor polonês Bogdan Niemczewski possui ao menos 8 artigos sobre experimentos realizados em máquinas de limpeza por ultrassom, com o objetivo de avaliar a relação de diversos parâmetros de um banho ultrassônico com o seu poder de cavitação. Em seus experimentos, o autor faz o uso de tecnologias avançadas para medir a atividade ultrassônica e a intensidade da cavitação, seus resultados são plotados em gráficos de temperatura x cavitação, porém a intensidade da cavitação apresentada por ele é um parâmetro adimensional.

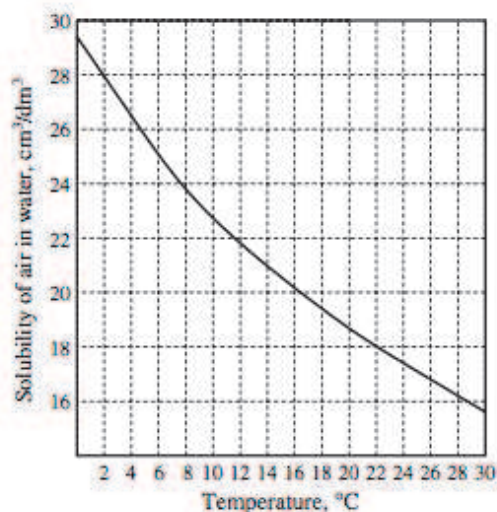
Em seu artigo “*Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions*”, o autor tem como objetivo investigar a influência da temperatura, nível da solução e a quantidade de gases dissolvidos, na intensidade da cavitação da água de torneira.

Niemczewski (2007) ressalta que a limpeza ultrassônica é decorrente de três mecanismos: reação química de impurezas com agentes da solução, dissolução de impurezas na solução e a cavitação, o objeto de estudo do artigo.

A efetividade da limpeza por cavitação depende do número de bolhas implodindo e da força de implosão destas. Essa força depende por sua vez do conteúdo gasoso presente em cada bolha, portanto quanto menos vapor e gás em uma bolha, mais poderosa é a implosão e conseqüentemente mais intensa é a cavitação, gerando uma limpeza mais eficaz.

Quando a temperatura do líquido sobe, o número de bolhas também deve subir tornando a cavitação mais intensa. Por outro lado, a pressão de vapor também se eleva, gerando um aumento da presença de gás que acaba por reduzir o poder de implosão. Essas duas tendências opostas levam o autor a presumir que existe uma temperatura ideal de trabalho que maximiza a cavitação.

Geralmente as soluções de limpeza utilizadas pelas indústrias usam água corrente. A solubilidade do ar na água varia de acordo com a temperatura da solução, sendo que esta diminui conforme a temperatura aumenta, então a eficácia da limpeza também irá depender da época do ano em que é feita. A figura 2.9 mostra a relação solubilidade x temperatura e com ela consegue-se concluir que a quantidade de ar dissolvida na água no verão é quase a metade da do inverno.(NIEMCZEWSKI, 2007)



**Figura 2.9: Solubilidade do Oxigênio na Água**

**Fonte: Niemczewski (2007)**

Para melhorar a relação de solubilidade do ar na água, o autor propõe métodos químicos com aditivos e ressalta que o melhor aditivo é o  $NA_2SO_3$  (0.05–0.1%). Como a proporção de oxigênio para nitrogênio na água é de 1:2, a  $0^\circ C$  a água possui aproximadamente 34.91% de oxigênio e a  $30^\circ C$  aproximadamente 33.60% , então a desgaseificação química remove cerca de  $\frac{1}{3}$  de gases da água.

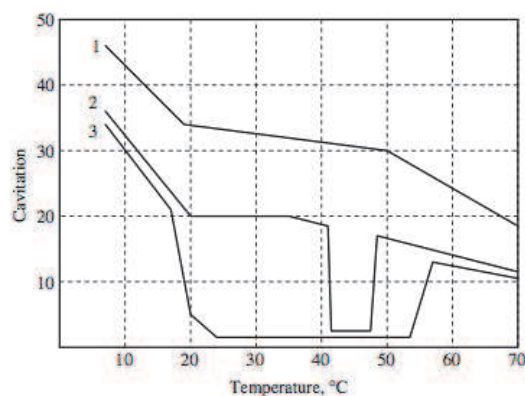
Outro fato já conhecido é da influência da altura da coluna da solução, sendo que as condições acústicas ideais são obtidas quando a altura da coluna é múltipla da metade do comprimento da onda acústica. Contudo, como o comprimento da onda também varia de acordo com a temperatura, se torna um pouco complicado de se encontrar a altura ideal.

Niemczewski (2007) lembra que devido a esses diversos aspectos a se levar em consideração, se torna extremamente complicado de se encontrar parâmetros ideais de operação. Ou seja, cada aplicação terá parâmetros de operação distintos.

Os experimentos desta pesquisa foram realizados num tanque de  $30dm^3$  contendo 14 transdutores tipo sanduíche. A frequência da máquina utilizada foi de  $37kHz$ , o gerador de energia possuía sintonização automática para a frequência de ressonância e a modulação de onda de  $100Hz$ . O sistema de aquecimento da água não foi detalhado pelo autor.

Para esse estudo os ensaios foram feitos com  $\frac{3}{4}$  da capacidade do tanque preenchido com água corrente em temperaturas que variaram de 0 a  $70^{\circ}C$ , a potência da fonte geradora de ultrassom variou entre  $530W$ ,  $570W$  e  $900W$  para a primeira bateria de testes e entre  $1120W$ ,  $840W$  e  $560W$  para a segunda.

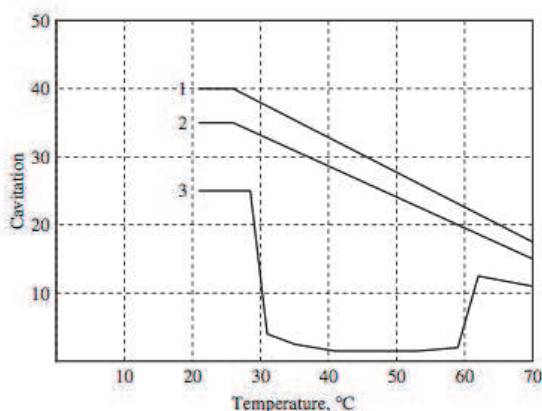
Na primeira bateria de testes, foi utilizada a água corrente com adição de  $0.1\%$   $Na_2SO_3$  para ajudar na desgaseificação e a partir dos resultados obtidos, pode-se observar que a menores temperaturas ( $7^{\circ}C$  aproximadamente) a cavitação foi mais intensa. Para  $900W$  a intensidade da cavitação diminuiu abruptamente ao chegar perto dos  $20^{\circ}C$ , acima disso ela diminuiu lentamente até estabilizar ao atingir  $30^{\circ}C$ , conforme curva 1 da figura 2.10. Para  $570W$  a intensidade diminuiu abruptamente somente quando a temperatura chegou perto dos  $40^{\circ}C$  porém a intensidade da cavitação voltou a subir perto dos  $48^{\circ}C$ , conforme curva 2 da figura 2.10. Com  $530W$  não houve uma queda abrupta na intensidade da cavitação, a queda se deu no intervalo entre  $18^{\circ}C$  e  $54^{\circ}C$  conforme curva 3 da figura 2.10.



**Figura 2.10: Curvas da primeira bateria de testes**

**Fonte: Niemczewski (2007)**

Para os testes da segunda bateria, não foi adicionado na água nenhum aditivo para ajudar na desgaseificação, a temperatura foi variada entre 20 e  $70^{\circ}C$ . Para as potências de  $840W$  e  $560W$  notou-se que o comportamento da intensidade da cavitação foi bem semelhante aos obtidos na primeira bateria de teste, conforme pode-se ver nas curvas 3 e 4 da figura 2.11. Mesmo para uma potência bem maior -  $1120W$ , o comportamento da intensidade da cavitação foi parecido, conforme curva 1 da figura 2.11.



**Figura 2.11: Curvas da segunda bateria de testes**

**Fonte: Niemczewski (2007)**

No artigo “*Cavitation intensity of water solutions used in ultrasonic cleaning in comparison with water cavitation intensity*”, Niemczewski (2006) realizou experimentos com ácidos e sais alcalinos na concentração de 3%, com base em estudos prévios que mostraram que a concentração dos aditivos usados na indústria não ultrapassam esse valor.

Os ácidos utilizados nos experimentos foram os ácidos sulfúrico  $H_2SO_4$ , fosfórico  $H_3PO_4$  e tartárico  $HOOC.CH(OH)CH(OH)COOH$ . Os sais utilizados foram os sais alcalinos metassilicato de sódio  $Na_2SiO_3$ , carbonato de sódio  $Na_2CO_3$  e fosfato de trissódico  $Na_3PO_4$ .

Para realizar os experimentos, foi utilizada uma máquina de  $30dm^3$  de volume, 14 transdutores estilo sanduíche ligados a um gerador de  $34kHz$  de frequência. Os testes foram feitos com variação de altura na coluna de líquido, a primeira bateria foi realizada com 200mm e a segunda com 180mm, aproximadamente  $\frac{3}{4}$  do volume do tanque.

Para que a solubilidade do ar na água corrente e nas soluções com os aditivos mencionados acima fosse semelhante em cada teste, o autor adotou um padrão de degaseificação que consistia em adicionar na máquina de limpeza por ultrassom água na temperatura de  $40^\circ C$ , aquecer até  $70^\circ C$  e deixar a máquina ligada por 1 hora. Após esse intervalo a água/solução ficava em um recipiente aberto, em uma sala relativamente fria por 24 horas. Os testes foram feitos no inverno e após o período de 24 horas, a água/solução voltava para a máquina de ultrassom e os testes eram de fatos iniciados em intervalos de 5 min.

Os testes realizados somente com água corrente mostraram que uma cavitação mais intensa, tanto durante o aquecimento quanto no resfriamento, foi observada a aproximadamente  $35^{\circ}\text{C}$  em 200mm conforme figura, curvas do lado esquerdo. Para o nível de 180mm foi observada uma cavitação mais intensa quando a temperatura atingiu aproximadamente  $47^{\circ}\text{C}$ , porém comparada com o teste a 200mm, a intensidade foi significativamente menor, conforme as curvas do lado direito da figura 2.12.

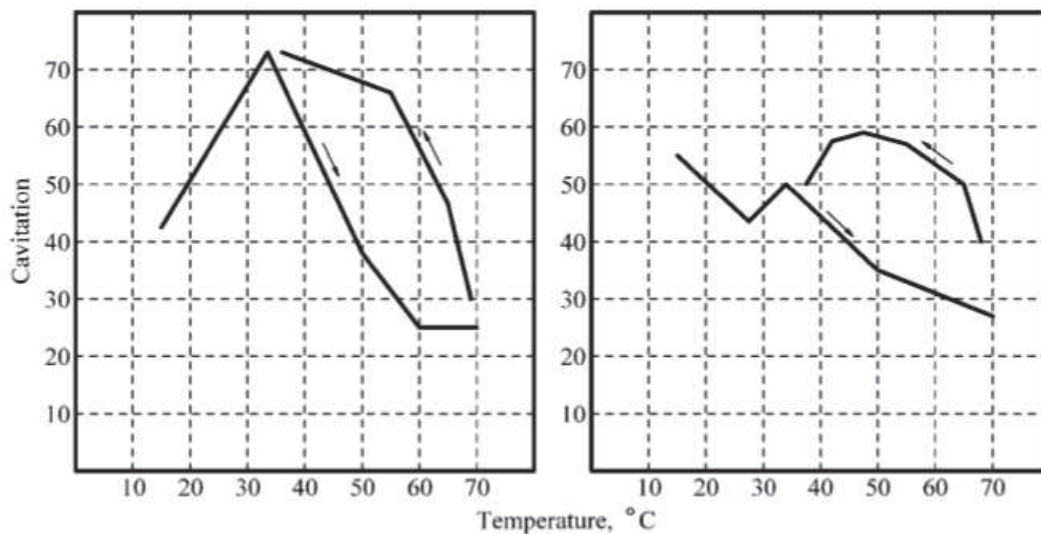


Figura 2.12: Cavitação da Água corrente a um nível de 200mm(Lado Esquerdo) e 180mm (Lado Direito)

Fonte: Niemczewski (2006)

Para as soluções de 3% de ácido a 200mm notou-se que a cavitação é mais intensa a  $35^{\circ}\text{C}$ , assim como na água. A cavitação máxima dos três ácidos é ligeiramente menor que a da água, sendo a diferença de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  muito pequena em relação aos outros dois, conforme figura 2.13. Para o nível de 180mm, as curvas das soluções ácidas também são muito semelhantes às da água, conforme figura 2.14. Durante o resfriamento, as maiores intensidades de cavitação para  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ocorreu a  $48^{\circ}\text{C}$ , para  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ocorreu a  $54 - 60^{\circ}\text{C}$  e para o ácido tartárico ocorreu a  $55^{\circ}\text{C}$ .

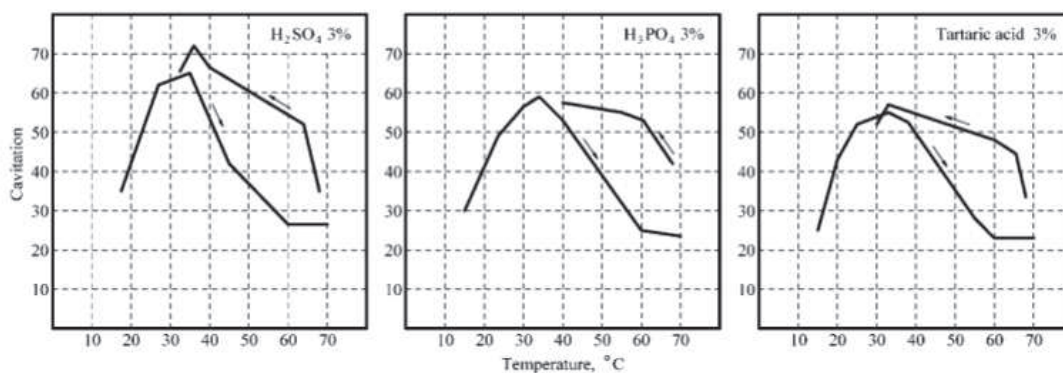


Figura 2.13: Cavitação das soluções ácidas de 3% a um nível de 200mm

Fonte: Niemczewski (2006)

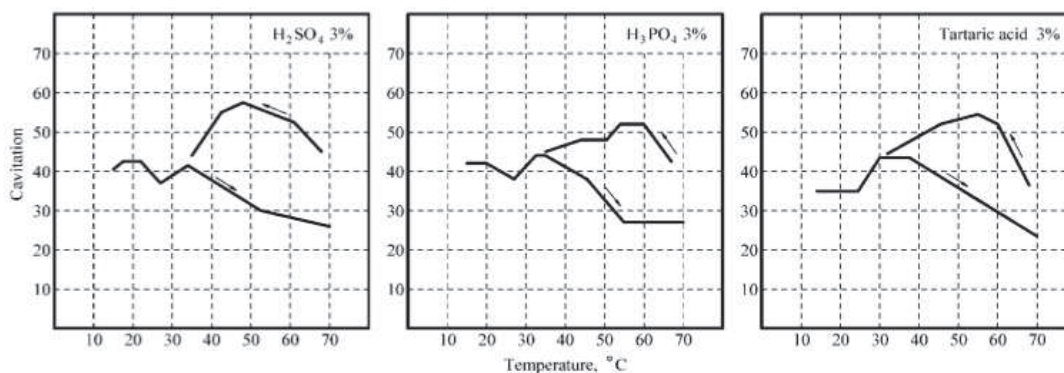


Figura 2.14: Cavitação das soluções ácidas de 3% a um nível de 180mm

Fonte: Niemczewski (2006)

Para as soluções alcalinas de 3%, as curvas resultantes foram bem diferentes das apresentadas para água pura e para as soluções ácidas a 3%, porém foram parecidas entre si para os níveis de 180mm e 200mm conforme figuras 2.15 e 2.16. O ponto de partida das medições foi de 15°C e o ponto de máximo se deu em torno de 28°C, depois de atingir este máximo, caiu abruptamente para um nível muito baixo de cavitação a 43-47°C. Em seguida, a cavitação permaneceu praticamente no mesmo nível. A cavitação a 60°C de soluções alcalinas aquecidas é muito baixa. As curvas de resfriamento para soluções de sais alcalinos são semelhantes às da água e dos ácidos. A intensidade da cavitação a 60°C é alta. A maior intensidade de cavitação durante o resfriamento foi observada para Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (53) e a menor para Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (35-43).

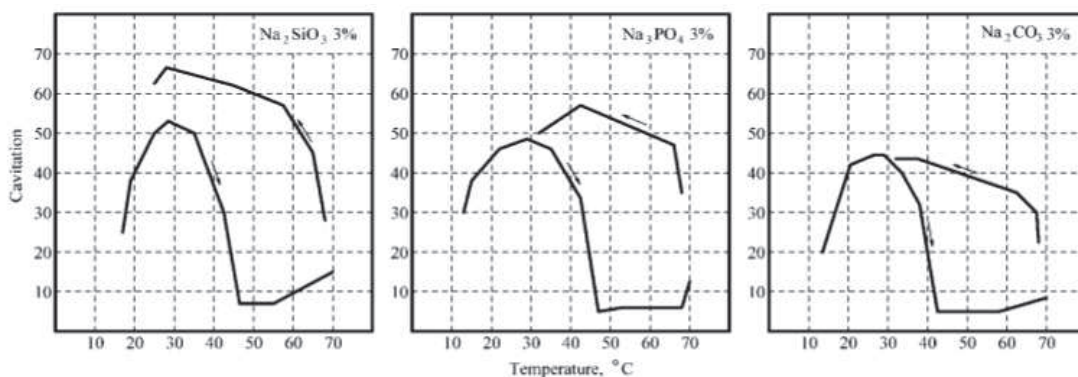


Figura 2.15: Cavitação das soluções alcalinas de 3% a um nível de 180mm

Fonte: Niemczewski (2006)

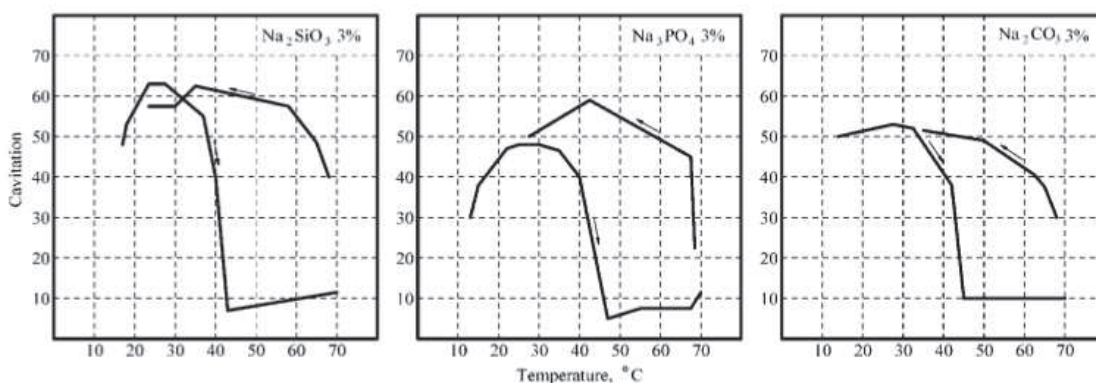


Figura 2.16: Cavitação das soluções alcalinas de 3% a um nível de 200mm

Fonte: Niemczewski (2006)

Niemczewski (2006) concluiu que, as curvas de cavitação e temperatura para 3% de soluções ácidas são muito semelhantes às da água e as intensidades máximas de cavitação são atingidas em torno de  $35^{\circ}\text{C}$  como para a água degaseificada nas mesmas condições. Tanto as soluções ácidas e alcalinas de 3%, quanto a água corrente cavitam menos intensamente durante o aquecimento do que durante o resfriamento.

As soluções de sal alcalino a 3% quando aquecidas cavitam de maneira bem diferente, suas curvas de cavitação-temperatura independentemente do nível de líquido, formam um máximo em torno dos  $28^{\circ}\text{C}$  e um mínimo em torno dos  $45^{\circ}\text{C}$ .

No terceiro artigo, denominado “Chemical activation of ultrasonic cavitation”, no qual Niemczewski (1999) aplica a mesma metodologia dos ensaios anteriores. O autor



propõe a possibilidade de acentuar a intensidade da cavitação com a fixação química de oxigênio dissolvido, pois afirma que a presença de ar em excesso prejudicará o desempenho da limpeza ultrassônica. Deste modo, faz-se necessária a gaseificação antes de desenvolver quaisquer experimentos.

O autor afirma que a partir de um determinado tempo de desgaseificação, a intensidade de cavitação estabiliza-se, e propõe que é possível intensificar a cavitação com a fixação química do oxigênio presente na água. Foram realizadas diversas soluções com reagentes químicos, os quais continham a presença de moléculas de oxigênio, assegurando concentração inferior à 1%, sendo adicionado água corrente para completar as soluções. Dentre tais compostos químicos encontra-se o hidróxido de sódio  $NaOH$ , que obteve resultados com maior eficiência no aumento do poder de cavitação. Sendo assim, o autor constatou que a inserção de radicais livres de oxigênio permite aumentar o poder de cavitação, bem como reduzir a perda de intensidade com o tempo

No artigo “*Dependence of cavitation intensity on ultrasound frequency in ultrasonic cleaning processes in alkaline solutions*”, apresenta uma pesquisa comparando o desempenho da cavitação em 3 soluções alcalinas usualmente utilizadas na indústria. Os testes foram realizados em duas máquinas com tanques idênticos, e com frequências diferentes. Niemczewski (2008) explica que as frequências entre 20 e 40kHz são recomendadas para a indústria, pois para induzir a cavitação em altas frequências, como 400kHz, faz-se necessário 10 vezes mais potência em comparação com 20kHz. Outra observação do autor refere-se que a frequência de 20kHz possui maior aplicabilidade para a remoção de impurezas fortemente aderidas, enquanto a frequência de 40kHz tem maior utilização na remoção de impurezas menos aderentes, como graxas e gorduras. Por essas razões, o autor optou em trabalhar com as frequências de 26 e 38kHz, assemelhando-se aos padrões industriais.

Este experimento realizado por Niemczewski (2008), iniciou com aquecimento de solução partindo de 20°C até 70°C, finalizando com o resfriamento até a temperatura inicial. As soluções selecionadas para o experimento foram: carbonato de sódio, metassilicato de sódio e fosfato de trissódico. O autor obteve algumas conclusões inesperadas dos resultados, como, os picos de cavitação atingidos pelas substâncias foram similares nos experimentos, inclusive com frequências diferentes. Uma vantagem observada na máquina com maior frequência, foi o consumo de energia drasticamente inferior em relação ao equipamento de menor frequência.

Niemczewski (2014) também escreveu o artigo “*Cavitation intensity of water un-*

*der practical ultrasonic cleaning conditions*". Para esse documento, foram realizados experimentos com o intuito de verificar o comportamento da curva temperatura-cavitação durante o resfriamento, e a influência da frequência, potência e percentual de ar presente na água, nesta curva. As frequências escolhidas foram 34, 36, 38 e 40kHz, sendo esta última a mais utilizada na indústria, enquanto as demais possuem ótimo desempenho de cavitação. Em relação a voltagem dos equipamentos, foram utilizados geradores com 180, 200, 220 e 260V. O artigo também explica como efetuou-se o método de medição da cavitação, utilizando o equipamento "*Branson Model 200 cavitation meter*". Esse equipamento tem como objetivo realizar a medição do "*White noise*", ou seja, o barulho resultante da implosão das bolhas, e apresentar os resultados numéricos adimensionais. Ao analisar tais resultados, o autor concluiu que não houve grande influência dos solutos, da frequência e da potência nesse sistema.

Um sexto artigo elaborado por Niemczewski (2009) tem como título "*Influence of concentration of substances used in ultrasonic cleaning in alkaline solutions on cavitation intensity*". Neste, o autor explica que soluções alcalinas geralmente aplicadas na indústria contém fosfato de sódio, metassilicato ou carbonetos, com concentrações raramente superiores à 3%. Isto se deve ao fato de que em outros experimentos foram provados que o aumento da concentração não reduz o tempo de limpeza, pelo contrário, eleva o tempo. Tal fato justifica-se pelo aumento na concentração reduzir o fenômeno da cavitação. Portanto, o autor propõe determinar o efeito real do aumento da concentração na cavitação, assim como verificar o comportamento das soluções em frequências distintas.

Para realização dos experimentos, Niemczewski (2009) empregou as mesmas metodologias utilizadas em outros ensaios. Os testes foram realizados em duas máquinas com o mesmo modelo de tanque, 30dm<sup>3</sup> e 14 transdutores, porém com frequências distintas de 25 e 40 kHz. As concentrações das soluções variaram de 0 a 10%, sendo a taxa de incremento igual a 1% em cada experimento.

Nos resultados, o autor constata que a partir de uma dada temperatura ocorria uma queda abrupta na intensidade da cavitação. Conforme a concentração das soluções aumentava, a temperatura de queda abrupta também aumentava, o que aponta um relativo benefício em elevar a concentração. Por outro lado, o aumento da concentração resultou na redução do pico de cavitação.

O artigo "*Chemical support of cavitation intensity in ultrasonic cleaning*" escrito por Niemczewski e Kołodziejczyk (2015) relata algumas conclusões de ensaios passados, como o fato de a indústria utilizar comumente altas temperaturas no processo de limpeza,

porém respeitando o limite máximo de  $60^{\circ}C$ , devido a perda de intensidade na cavitação. Também enfatiza novamente o fato de grande parte das aplicações utilizarem sais alcalinos com concentração de no máximo 3%, com o intuito de reduzir a perda de eficiência.

O autor afirma que a substância Hidroquinona é um eficiente fixador de oxigênio na solução, porém propõe que sulfeto de sódio também pode apresentar aumento na intensidade da cavitação. Para o experimento o autor utilizou uma solução comercial, composta pela mistura de metassilicato de sódio e carbonato de sódio, chamada de solução Rudwel.

Os experimentos foram realizados em uma máquina de 40 kHz de frequência, com soluções de concentração igual à 3% de Rudwel, com a adição posterior de 0,5% de sulfeto de sódio. Os resultados demonstraram que o acréscimo do sulfeto de sódio proporcionaram expansão da faixa de trabalho da solução para até  $70^{\circ}C$ , sendo que sem a inclusão de sulfeto de sódio a faixa de trabalho se limitava a no máximo  $60^{\circ}C$ , havendo a seguir uma queda abrupta na intensidade da cavitação.

O último artigo averiguado do autor Niemczewski (2010) denomina-se "*Cavitation intensity of solutions of chemicals used as components of media for ultrasonic cleaning in aqueous alkaline solutions*". O autor realizou neste experimento diversos ensaios com múltiplos e distintos solutos em solução aquosa, com o objetivo de averiguar qual destas soluções apresentaria maior intensidade de cavitação na temperatura de  $60^{\circ}C$ , pois esta é a temperatura utilizada com maior incidência nas indústrias.

Os experimentos foram realizados em tanques de 30 litros preenchidos com 25 litros de solução, com frequências de  $26kHz$  e  $38kHz$ , e coluna de líquido com 212mm. Primeiramente todas as soluções foram aquecidas até  $70^{\circ}C$  com sonificação, e na sequência foram mantidas em repouso por 24 horas. Após esse prazo as soluções foram reaquecidas até atingir a temperatura de  $70^{\circ}C$ , então cessou-se o aquecimento e iniciou a etapa de resfriamento. As medições da cavitação foram realizadas, com o auxílio de um sensor, durante a etapa de resfriamento, no momento que as soluções atingiram a temperatura de  $60^{\circ}C$ .

Nos resultados deste experimento constatou-se que 7 dos 11 solutos testados apresentaram maior cavitação na frequência de  $38kHz$ , enquanto os demais obtiveram maior cavitação na frequência de  $26kHz$ . Para os ensaios de  $26kHz$ , também constatou-se que as soluções de hidróxido de sódio e de metassilicato de sódio apresentaram intensidade de cavitação superior à água corrente. No Anexo C encontram-se as tabelas com os resultados obtidos pelo autor.

Os experimentos e artigos realizados por Bogdan Niemczewski, apresentados neste trabalho, foram de grande valia para auxiliar na interpretação dos resultados e conclusões dos experimentos desenvolvidos, pois diversos desses artigos demonstraram abrangente relação com os parâmetros avaliados nesse trabalho.

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

A escolha dos solutos usados no presente trabalho se deu com base nos artigos de Bogdan Niemczewski. Ao todo foram selecionados quatro solutos, dentre os quais, três são classificados como sais e um como ácido. Optou-se por utilizar apenas um soluto de característica ácida para os experimentos, pois conforme visto na literatura, soluções ácidas não possuem poder de cavitação maior que o da água corrente, diferentemente de soluções alcalinas. Tendo em vista tais requisitos iniciais, se determinou os seguintes solutos: com característica ácida  $H_3PO_4$ , e, as bases  $NaOH$ ,  $KOH$  e o sal  $Na_2SiO_3$ . Estas substâncias foram adquiridas gratuitamente com fornecedores de produtos químicos locais.

Para a averiguação da cavitação nos experimentos, escolheu-se a folha de alumínio com material mais adequado, pois os demais métodos citados na literatura são excessivamente onerosos e necessitavam de tecnologias indisponíveis no Laboratório de Metalografia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no momento da realização dos ensaios.

Vale ressaltar que as folhas de alumínio devem apresentar a mesma espessura para a realização dos testes. Com o intuito de averiguar este parâmetro, todas as amostras foram medidas em três pontos diferentes, com o auxílio de um micrômetro da marca Digimess, com precisão de 1 micron, conforme figura 3.1.



**Figura 3.1: Micrometro para aferição da espessura**

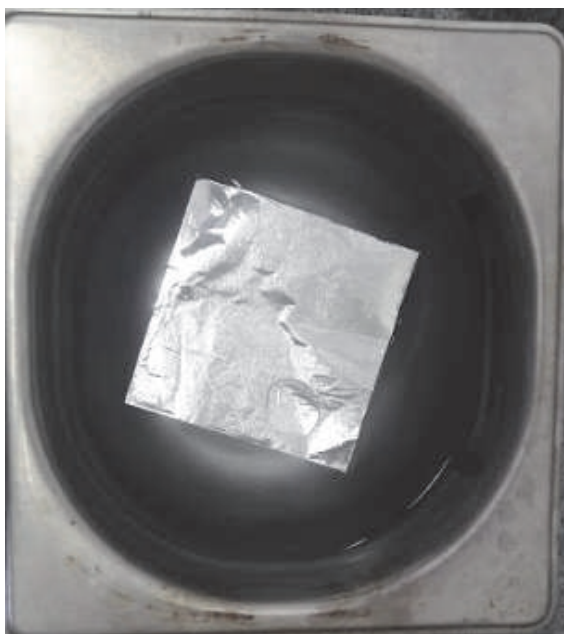
**Fonte: Autoria Propria**

As folhas de alumínio selecionadas foram do fabricante Hookah Blade, conforme figura 3.2. Originalmente cada folha possui 15x15cm, porém, devido às dimensões minimizadas dos tanques das máquinas disponíveis no Laboratório de Metalografia, as folhas foram recordadas para chegar à dimensão de 7,5x7,5cm. Com isto, as amostras ocupam vasta parcela da superfície inferior do tanque, conforme apresentado na figura 3.3



**Figura 3.2: Folha de Alumínio**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 3.3:** Folha de Alumínio posicionada no interior do tanque

**Fonte:** Autoria Própria

Para efeito de padronização, exigiu-se que parâmetros como, o volume de fluido do banho, tempo de degaseificação, posição da folha, tamanho da folha, tempo de limpeza por ultrassom e tempo de secagem da amostra permanecessem constantes.

As máquinas escolhidas para o experimento foram as do fabricante UNIQUE modelos USC-750 e USC-800, ambos equipamentos são de propriedade do Laboratório de Metalografia da UTFPR e são idênticos externamente, conforme figura 3.4. A diferença básica entre estes dois modelos é a frequência acústica, sendo a primeira de 25 kHz, contendo um transdutor Langevin (comumente conhecido com transdutor cônico), e a segunda de 40 kHz, com um transdutor Unimorpho (usualmente conhecido como transdutor tipo disco). O volume de fluido de trabalho dessas máquinas mantém-se no range de 1 e 1,5 litros, com o intuito de proporcionar a padronização, todos os experimentos foram realizados com 1 litro de solução.

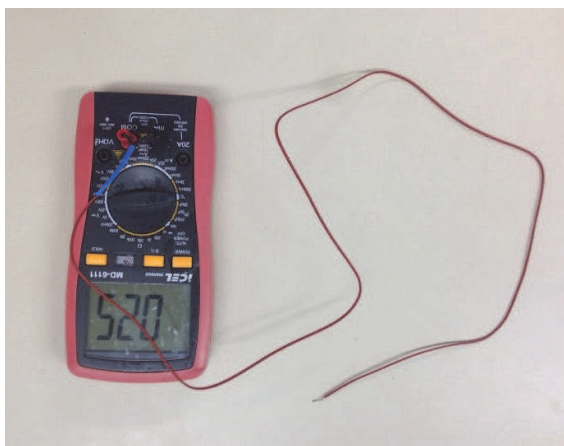


**Figura 3.4:** Máquina de Limpeza por ultrassom

**Fonte:** Autoria Própria

As temperaturas selecionadas para a execução dos ensaios foram  $10^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , pois conforme consta na literatura, a solubilidade do oxigênio para água corrente é maior a baixas temperaturas (entre  $7\text{-}20^{\circ}\text{C}$ ), enquanto que para soluções ácidas e alcalinas, o maior poder de cavitação se dá na faixa de  $50\text{-}55^{\circ}\text{C}$ . Por orientação do professor responsável do Laboratório de Metalografia da UTFPR, a temperatura máxima não deveria exceder  $50^{\circ}\text{C}$ , para não afetar negativamente a integridade dos equipamentos e não expor os alunos a riscos. Para atingir as temperaturas previamente determinadas, contou-se com o auxílio de pedras de gelo e uma chaleira elétrica. A aferição das temperaturas das soluções, foram efetuadas em um multímetro com termopar conforme figura 3.5, assim assegurando que, tanto as soluções quanto a água corrente, estavam nas temperaturas ideais de análise.

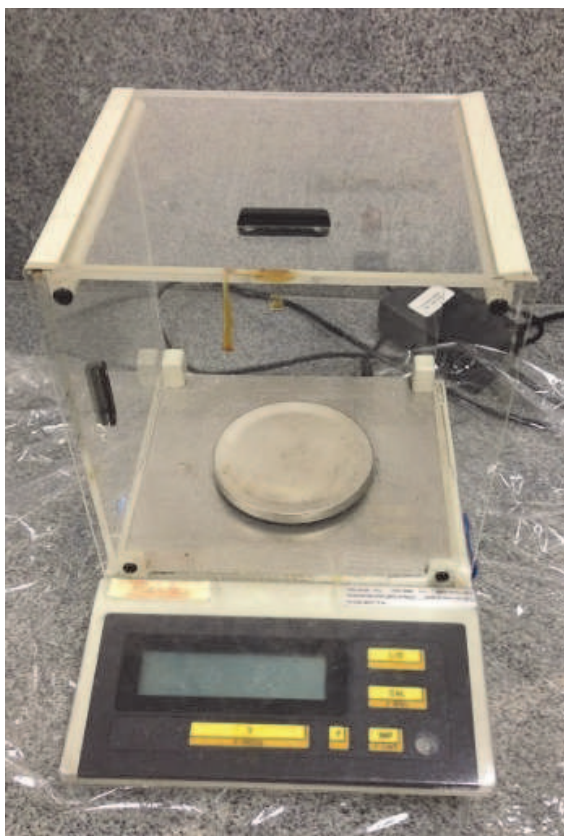




**Figura 3.5:** Multímetro para aferição da temperatura

**Fonte:** Autoria Propria

Afim de preparar as soluções com concentrações adequadas, foi utilizada uma balança de precisão para determinação da massa dos compostos químicos. Este equipamento é da marca Marte, do modelo AL500 conforme figura 3.6, sendo propriedade do Laboratório de Materiais da UTFPR. Esta balança possui precisão de  $0.001g$ , suporta carga máxima equivalente a  $500g$  e recomenda-se a utilização para massas superiores a  $0.02g$ . Este aparelho também foi utilizado para realizar a medição da massa inicial das amostras, bem como da massa final das mesmas.



**Figura 3.6: Balança de precisão Marte AL500**

**Fonte: Autoria Propria**

Após efetuarem todos os procedimentos de determinação de massa dos solutos, correção de temperatura e preparo das soluções, a água corrente ou as soluções foram inseridas ao tanque da máquina de limpeza por ultrassom. Optou-se pelo método de degaseificação que consiste em ligar a máquina contendo a solução, pelo período de 5 min antes da inclusão da folha de alumínio. Posteriormente ao processo de degaseificação, a folha de alumínio foi inserida no banho e ligou-se novamente a máquina de limpeza por ultrassom pelo tempo de 5 min. Ao fim deste procedimento, levou-se a amostra de alumínio até uma secadora, mantendo neste equipamento durante 5 min, na temperatura mínima. O experimento foi concluído com a pesagem final da amostra com a balança mostrada na figura 3.6

O Tabela 3.1 apresenta todos os parâmetros que foram avaliados pelos alunos

Tabela 3.1: Tabela demonstrativa da grade de testes

<i>Meio</i>	<i>Concentração%</i>	<i>Frequência (kHz)</i>	<i>Temperaturas (°C)</i>
$H_2O$	-	25	10
$H_2O$	-	40	50
$H_2O$	-	25	10
$H_2O$	-	40	50
<i>Solução Ácida <math>H_3PO_4</math></i>	3%	25	50
<i>Solução Ácida <math>H_3PO_4</math></i>	3%	40	50
<i>Solução Alcalina <math>NaOH</math></i>	3%	25	50
<i>Solução Alcalina <math>NaOH</math></i>	3%	40	50
<i>Solução Alcalina <math>NaOH</math></i>	0,3%	25	50
<i>Solução Alcalina <math>NaOH</math></i>	0,3%	40	50
<i>Solução Alcalina <math>KOH</math></i>	3%	25	50
<i>Solução Alcalina <math>KOH</math></i>	3%	40	50
<i>Solução Alcalina <math>Na_2SiO_3</math></i>	3%	25	50
<i>Solução Alcalina <math>Na_2SiO_3</math></i>	3%	40	50

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Griffing (1952) afirma que efeitos químicos não podem ser observados em banhos de ultrassom que não possuem gases dissolvidos, Thompson e Doraiswamy alegam que um dos fatores que afetam a cavitação é a presença e a natureza dos gases dissolvidos no banho, pois esses agem como pontos de nucleação e influenciam diretamente no comportamento das bolhas. Além da presença dos gases dissolvidos, ficou claro que frequências entre  $20kHz$  e  $50kHz$  são mais eficazes nos banhos de limpeza por ultrassom pois geram uma cavitação mais intensa.

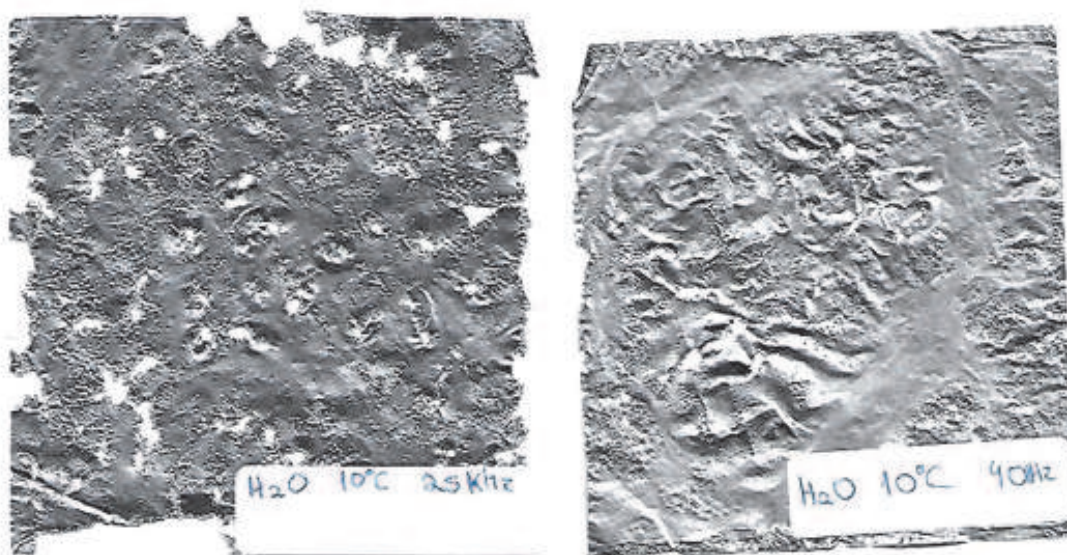
Tendo esses conceitos em mente, juntamente com os outros apresentados na revisão bibliográfica, os experimentos foram conduzidos de uma forma que, com as tecnologias disponíveis para os alunos, fosse possível maximizar os efeitos da cavitação.

A primeira bateria de testes foi realizada com a água corrente resfriada da temperatura ambiente ( $20^{\circ}C$  no dia do experimento) até  $10^{\circ}C$  com o auxílio de pedras de gelo. Sabe-se dos estudos prévios que uma das formas de se obter a fixação de gases em uma solução é através do resfriamento, portanto a solubilidade inicial dos gases presentes no ar era de  $18,5 \frac{cm^3}{dm^3}$ , cerca de 20% menor que a solubilidade do experimento a  $10^{\circ}C$ , aproximadamente  $23 \frac{cm^3}{dm^3}$  conforme dados do gráfico da figura 2.9. Além disso, conforme mencionado na metodologia, todas as amostras sofreram degaseificação previa de 5 min.

A partir da figura 4.1 observa-se a nítida diferença na intensidade da cavitação da frequência de  $25kHz$  para a de  $40kHz$ . A Tabela 4.1 mostra os valores das massas das amostras antes do efeito da cavitação e após os 5 min dentro do tanque de limpeza, juntamente com a perda percentual de massa.

**Tabela 4.1:** Tabela de massa das amostras de água corrente nas condições inicial e final para  $10^{\circ}C$

<i>Substancia</i>	<i>Massa Inicial (g)</i>	<i>Massa Final (g)</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>
$H_2O$ a $25kHz$	0,441	0,410	7,029
$H_2O$ a $40kHz$	0,446	0,441	1,12



**Figura 4.1:** Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da água corrente a  $10^{\circ}C$  para 25 e 40kHz

**Fonte:** Autoria Própria

Para a frequência de  $25kHz$  notou-se pontos perfuração concentrados nas bordas da folha de alumínio, o que representa um indicativo de maior intensidade da atividade de cavitação em relação ao meio da folha e justifica a maior perda de massa. Outro aspecto a ser levado em conta é a turbulência gerada pela frequência de  $25kHz$  que fez com que a folha de prova se movimentasse dentro do tanque de limpeza, passando por áreas onde os efeitos da cavitação são mais ou menos intensos.

Como os alunos não possuíam um medidor de intensidade da cavitação ou o SonoCheck para identificar a região do banho de maior atividade, não é possível afirmar com toda certeza que o ponto de cavitação é maior nas bordas do tanque do que no centro.

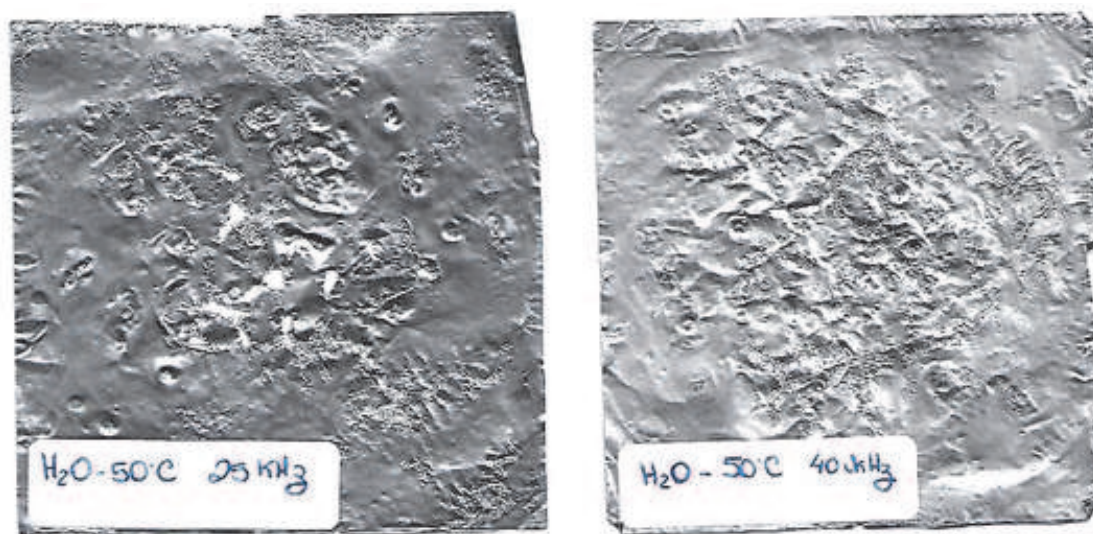
A folha de alumínio submetida a frequência de  $40kHz$  apresentou uma deterioração mais uniforme e não tão aparente quanto a folha submetida a  $25kHz$ , a comparação entre elas pode ser vista na figura 4.1, o que corrobora o fato de que limpezas mais delicadas necessitam de frequências um pouco mais altas. Não houveram pontos muito grandes de remoção de massa e a prova disso é a diferença percentual entre a massa inicial e final das amostras.

Para a segunda bateria de testes com a água corrente, foi utilizado uma chaleira elétrica para aquecer a água até a temperatura de  $50^{\circ}C$ . Os procedimentos seguintes foram os mesmos utilizados na primeira bateria de testes.

**Tabela 4.2:** Tabela de massa das amostras de água corrente nas condições inicial e final para  $50^{\circ}\text{C}$

<i>Substancia</i>	<i>Massa Inicial (g)</i>	<i>Massa Final (g)</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>
$\text{H}_2\text{O}$ a $25\text{kHz}$	0,432	0,425	1,62
$\text{H}_2\text{O}$ a $40\text{kHz}$	0,433	0,432	0,23

A figura 4.2 apresenta os resultados da atividade da cavitação na temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$  e nas frequências de  $25\text{kHz}$  e  $40\text{kHz}$ . Ao comparar os resultados, percebe-se uma leve remoção de material na parte superior da amostra de  $25\text{kHz}$ , além disso os pontos de nucleação foram maiores em relação a amostra de  $40\text{kHz}$ . Mesmo variando a temperatura, percebe-se que a atividade da cavitação a  $25\text{kHz}$  é mais intensa que a  $40\text{kHz}$ . A Tabela 4.2 apresenta os valores iniciais, finais da massa e perda percentual das amostras e comprova que novamente a intensidade da cavitação foi maior para a frequência mais baixa.



**Figura 4.2:** Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da água corrente a  $50^{\circ}\text{C}$  para 25 e  $40\text{kHz}$

**Fonte:** Autoria Própria

Ao comparar as figuras 4.1 e 4.2 percebe-se que o aumento de temperatura não contribuiu positivamente na cavitação. Conforme Niemczewski (2006) afirmou em seus artigos, quando a temperatura da solução sobe o número de bolhas aumenta, assim como a intensidade da cavitação, por outro lado, com o aumento da temperatura a pressão de vapor do fluido também sobe, e, portanto, o conteúdo gasoso aumenta o que pode afetar negativamente a cavitação. Essa dualidade sugere que há uma temperatura ótima em que

tanto temperatura quando solubilidade se equilibram e otimizam o efeito de cavitação e que os extremos não são o melhor caminho para essa otimização.

Como os experimentos seguintes foram feitos com os solutos ácidos e alcalinos a 3%, optou-se por analisar o efeito da cavitação somente na temperatura de  $50^{\circ}C$  pois conforme visto nos artigos do Niemczewski (2010) para baixas temperaturas e frequência de  $25kHz$  o poder de cavitação da água corrente superou o de qualquer mistura, entretanto para temperaturas acima de  $50^{\circ}C$ , indiferente da frequência em que a solução esta submetida, existem ácidos e sais como  $NaOH$ ,  $KOH$  e  $Na_2Si_3$  que superam o poder de cavitação da água corrente significativamente.

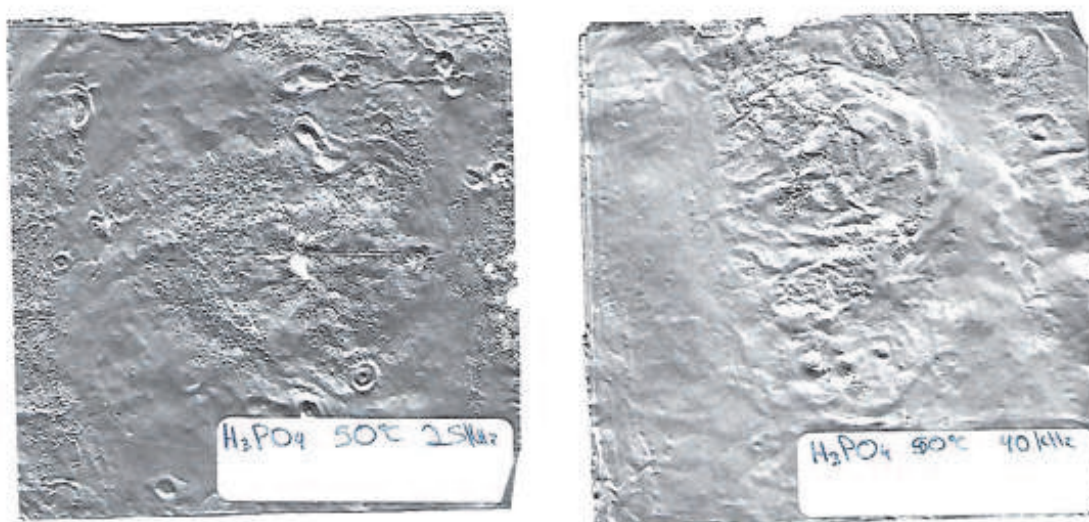
A terceira bateria de testes iniciou-se com o ácido fosfórico  $H_3PO_4$  a 85% por ser a concentração comercial deste ácido. O ácido fosfórico é um ácido de pH considerado médio.

Conforme visto na literatura, soluções ácidas com concentração de 3% são as mais utilizadas na indústria, com isso houve a necessidade de fazer um calculo rápido de quantas gramas de  $H_3PO_4$  a 85% era necessário para fazer uma solução ácida a 3%. Os cálculos mostraram que para uma solução 1000ml a 3% de  $H_3PO_4$  se faz necessário o uso de 35,3 gramas de ácido.

Conforme a figura 4.3 pode-se ver que a intensidade da cavitação para a frequência de  $25kHz$  foi sutilmente maior que para  $40kHz$ . As massas iniciais e finais das amostras assim como a perda percentual de massa encontram-se na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3:** Tabela de massa das amostras solução ácida de 3% de  $H_3PO_4$  nas condições inicial e final para  $50^{\circ}C$

<i>Substancia</i>	<i>Massa Inicial (g)</i>	<i>Massa Final (g)</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>
$H_3PO_4$ a $25kHz$	0,4326	0,429	1,605
$H_3PO_4$ a $40kHz$	0,440	0,435	1,136



**Figura 4.3:** Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da solução ácida de 3% de  $H_3PO_4$  a  $50^\circ C$  para 25 e 40kHz

**Fonte:** Autoria Própria

Ao comparar os resultados da Tabela 4.2 com a Tabela 4.3, percebe-se que para a frequência de 25kHz a perda percentual de massa tanto da solução ácida quanto da água foi idêntica corroborando o que foi visto na literatura, porém para a frequência de 40kHz, a perda de massa da solução ácida foi aproximadamente 5 vezes maior, indicando que a intensidade da cavitação da solução foi maior do que a da água corrente.

O comportamento da solução ácida de  $H_3PO_4$  submetido a frequência de 40kHz num banho a temperatura de  $50^\circ C$  não foi identificado na literatura. Todos os experimentos analisados pelos alunos, que foram feitos com esse ácido, utilizavam como parâmetro a ser variado a altura da coluna de líquido e a temperatura, porém a frequência da fonte ultrassônica era mantida constante. Em todos esses experimentos o poder de cavitação da água pura foi maior que da solução ácida.

Como possível pressuposto para o comportamento atípico identificado nos experimentos dos alunos, pode-se dizer para esse ácido em específico, frequências mais baixas podem gerar maiores turbulências que fazem com que as bolhas do banho oscilem de forma não estável e conforme Thompson e Doraiswamy (1999) estas oscilações fazem com que as bolhas implodam mais rapidamente, conseqüentemente maior quantidade de gás é liberado para a atmosfera, diminuindo o poder de cavitação do banho e a remoção de massa da amostra.



Tanto para a quarta quanto para a quinta bateria de testes, foram utilizados solutos alcalinos a  $50^{\circ}C$ , submetidos a frequência de 25kHz e 40kHz nos mesmos procedimentos descritos na metodologia.

A primeira solução alcalina a ser analisado foi a de hidróxido de sódio a 3%. Como o soluto fornecido aos alunos estava na concentração de 30%, foi necessário adequar a quantidade deste para que ao final a solução de 1000ml possuísse concentração de 3%. Através de cálculos simples de concentração, determinou-se que seriam necessários 100 gramas de  $NaOH$  na solução.

Ao posicionar a folha de alumínio na máquina de limpeza por ultrassom de 25kHz a  $50^{\circ}C$ , uma reação química entre esta e o banho começou a ocorrer antes mesmo da máquina ser ligada. Ao ligar a máquina essa reação se intensificou e rapidamente a folha de alumínio começou a derreter, soltando um cheiro muito forte e fazendo uma nevoa de vapor no banho. Em aproximadamente 3 minutos de experimento a folha estava completamente derretida dentro do banho e a atividade de cavitação não pode ser avaliada. Devido a esse comportamento, os alunos foram orientados a não repetir o teste utilizando a máquina de 40kHz pois a nevoa de vapor do  $NaOH$  é tóxica e prejudicial ao ser humano.

Dada essa reação da folha de alumínio com a solução alcalina, os alunos foram buscar na literatura uma possível explicação para o ocorrido. Conforme visto no livro do Schweitzer et al. (2003), o alumínio metálico é muito ativo termodinamicamente e procura retornar ao estado natural oxidado através do processo de corrosão e por mais que as ligas alumínio possuem uma alta resistência à corrosão pela maioria das atmosferas, água, produtos químicos e outros materiais, sua resistência depende da passividade de um filme de óxido protetor. A Tabela 19.14 presente nos anexos mostra a compatibilidade do Alumínio e suas ligas, com vários compostos químicos, indicando com um X aqueles onde esse filme protetor será totalmente destruído pois não há compatibilidade (SCHWEITZER et al., 2003).

As condições termodinâmicas sob as quais este filme se forma em soluções aquosas depende muito do pH da solução. Sabe-se que o  $Al$  é passivo apenas para uma faixa de soluções com pH entre 4 e 9, porém dependendo da composição da liga de alumínio e da temperatura da solução, essa faixa pode variar. Sabe-se também que para temperaturas mais altas o filme protetor é mais espesso.

Até o momento do experimento não se tinha conhecimento dessa interação entre o alumínio e a  $NaOH$ , muito menos que o pH da solução poderia alterar tanto o experimento, portanto este não foi medido, mas sabe-se que o  $NaOH$  pura possui um pH de

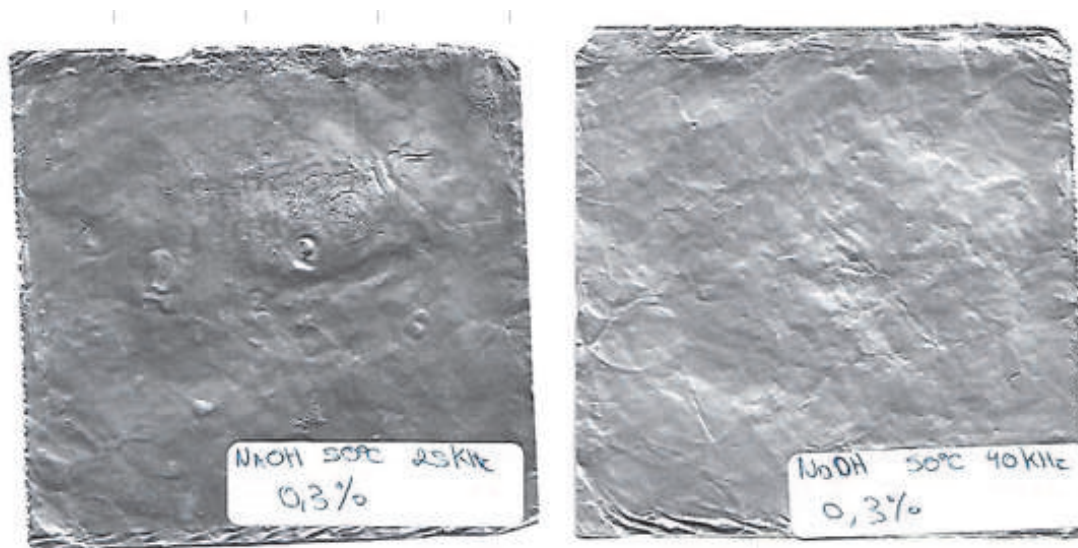
13.5 e mesmo em solução de 3% esse valor não ficaria abaixo de 9, o que já influencia negativamente na formação do filme protetor do alumínio e contribui para a sua corrosão.

Como foi visto nos artigos de Niemczewski (2008) uma solução aquosa de 3% de  $NaOH$  a  $60^{\circ}C$ , submetida a uma frequência ultrassônicas de  $38kHz$ , possuía um poder de cavitação de 49 unidades, enquanto somente a água nas mesmas condições possuía um poder de cavitação de 27 unidades. Para a frequência de  $25kHz$  o autor obteve o resultado de 32 unidades para a solução contra 38.5 para a água, corroborando o fato que para menores frequência o poder de cavitação para água pura é maior que de soluções. Os resultados obtidos pelo autor encontram-se no Anexo

O método utilizado pelo autor para medir a intensidade de cavitação foi utilizando um medidor de cavitação Branson e não folhas de alumínio, por isso os valores se deram em unidades. Na tentativa de avaliar visualmente o poder da cavitação com as folhas de alumínio, os alunos diluíram a solução em 10 vezes e refizeram os testes. Os resultados encontrados estão na Tabela 4.4 e na figura 4.4.

**Tabela 4.4:** Tabela de massa das amostras solução ácida de 0,3% de  $NaOH$  nas condições inicial e final para  $50^{\circ}C$

<i>Substancia</i>	<i>Massa Inicial (g)</i>	<i>Massa Final (g)</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>
<i>NaOH a 25kHz</i>	0,442	0,370	16,29
<i>NaOH a 40kHz</i>	0,435	0,372	14,48



**Figura 4.4:** Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da solução ácida de 0,3% de  $NaOH$  a  $50^{\circ}C$  para 25 e 40kHz

**Fonte:** Autoria Própria

Analisando as imagens, percebe-se que a perda de massa apresentada na Tabela 4.4 deve-se ao fato da reação química que ocorre entre o Alumínio e a solução, pois as marcas de cavitação não foram o suficiente para produzir uma perda de massa tão grande, se comparado as amostras da figura 4.1 do primeiro experimento que mostrou uma grande perda % de massa que foi o da água corrente a  $10^{\circ}C$ .

Como o hidróxido de potássio é considerado uma base forte da mesma família do hidróxido de sódio e possui pH de 13.5, foi orientado aos alunos que não fizessem os testes com essa base, devido a toxicidade da mesma em caso de reação com o alumínio. Pela literatura, sabe-se que para a frequência de  $40kHz$  e altas temperaturas, a solução dessa base apresenta uma maior intensidade na cavitação que somente a água e para altas temperaturas e frequência de  $25kHz$  a intensidade de cavitação da solução se aproxima muito a da água corrente.

A segunda solução alcalina a ser analisada foi a de  $Na_2SiO_3$  como o soluto fornecido aos alunos era na concentração de 100%, para fazer uma solução a 3% foi necessário a utilização de 100gramas destes.

Os resultados do último experimento realizado pelos alunos encontram-se na Tabela 4.5 e na figura 4.5.

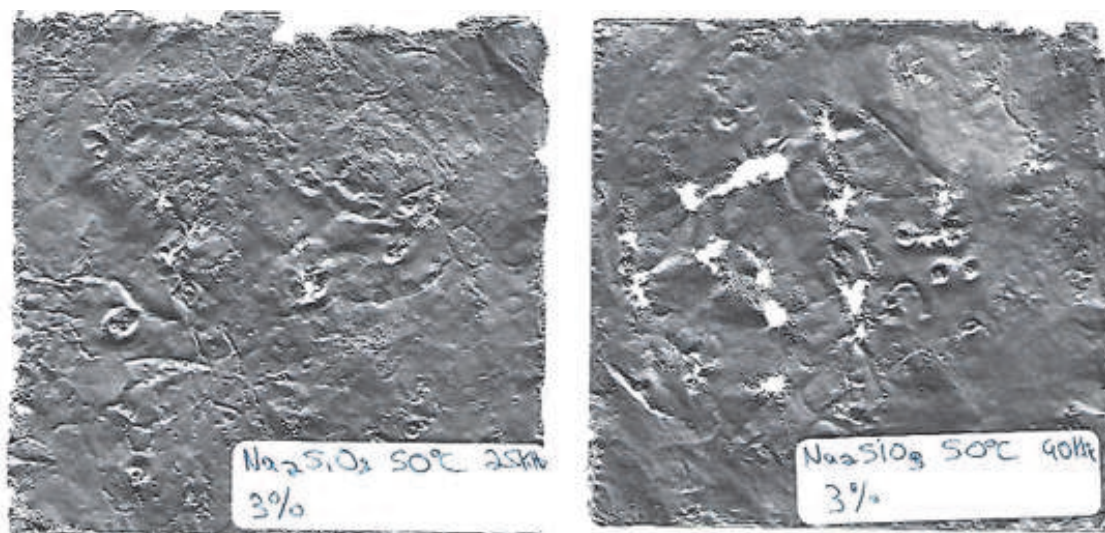


Figura 4.5: Amostras das folhas de alumínio submetidas a intensidade de cavitação da solução ácida de 3% de  $Na_2SiO_3$  a  $50^\circ C$  para 25 e 40kHz

Fonte: Autoria Própria

Tabela 4.5: Tabela de massa das amostras solução ácida de 3% de  $Na_2SiO_3$  nas condições inicial e final para  $50^\circ C$

<i>Substancia</i>	<i>Massa Inicial (g)</i>	<i>Massa Final (g)</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>
$Na_2SiO_3$ a 25kHz	0,436	0,425	2,523
$Na_2SiO_3$ a 40kHz	0,437	0,427	2,288

Para esse sal, frequências menores na mesma temperatura, geram um poder de cavitação maior, corroborando o que se viu na literatura. O Autor Niemczewski (2009) mostra que a intensidade de cavitação de uma solução de 3% de  $Na_2SiO_3$  em 25kHz a  $60^\circ C$  é de 33 unidades, contra 32 unidades a 40kHz. Entretanto ao comparar os valores da Tabela 4.5 com a Tabela 4.2 da água a  $50^\circ C$ , o percentual de perda de massa da solução alcalina submetida a 25kHz superou o percentual da água corrente a 25kHz, entrando em contradição com o visto na literatura de que nenhuma solução a 25kHz supera o poder de cavitação da água corrente.

A literatura diz que a maior intensidade de cavitação nem sempre existe em toda a faixa de temperatura e que é necessário avaliar todo o comportamento da curva temperatura x cavitação para se chegar a uma conclusão. Conforme dados do autor Niemczewski (2006) a maior intensidade de cavitação da água corrente se dá perto dos

$15^{\circ}C$  e novamente perto dos  $35^{\circ}C$  enquanto para a solução de 3% de  $Na_2SiO_3$  a maior intensidade de cavitação se dá perto dos  $53^{\circ}C$ .

Como os alunos conduziram os experimentos a  $50^{\circ}C$ , temperatura muito próxima da temperatura de maior pico de cavitação da solução de  $Na_2SiO_3$ , porém muito acima da temperatura de maior intensidade de cavitação da água, isso explicaria o fato de que a solução alcalina a 25kHz apresentou maior poder de cavitação do que a água corrente nas mesmas condições. No experimento dos alunos foi avaliada a variação de frequência e não a faixa de temperatura dos experimentos.

## 5 CONCLUSÃO

De maneira geral os objetivos específicos do presente trabalho foram cumpridos, os alunos conseguiram com base literatura, sugerir uma metodologia de experimentos que fosse adequada ao ambiente universitário e que desta forma, os diversos parâmetros que afetam a cavitação pudessem ser analisados.

Todos os experimentos analisados na literatura eram realizados em escala industrial com máquinas de limpeza 25 vezes maiores que as utilizadas no presente trabalho, portanto o fato dos resultados terem sido condizentes com a literatura indica que a metodologia utilizada pelos alunos foi bem sucedida.

Como as máquinas de limpeza por ultrassom eram exatamente idênticas em dimensão e volume, as folhas de alumínio utilizadas como amostra se mostraram idênticas em espessura ( todas as amostras medidas apresentaram 30 microns de espessura ) e tamanho, e todos os equipamentos utilizados para medição eram de precisão, pode-se afirmar que o experimento possui uma repetibilidade confiável.

Os parâmetros que afetam a cavitação devem ser analisados como um todo e não separadamente, pois combinações destes geram resultados totalmente diferentes. Como exemplo, pode-se citar o fato de muitas literaturas afirmarem que para baixas temperaturas ( 7 a 15°C ) a intensidade de cavitação da água corrente supera a de qualquer solução, devido ao fato da solubilidade do oxigênio ser mais alta. Entretanto os experimentos mostraram que para frequências maiores que 25 kHz essa afirmação entra em contradição.

Conforme apresentado nos resultados e discussões, para a frequência de 40kHz a 50°C tanto as soluções ácidas quanto as alcalinas, geraram uma intensidade de cavitação maior do que somente a água corrente na mesma frequência e a temperaturas baixas. Para a solução de 3% de  $H_3PO_4$  a perda de massa da amostra foi de 1,13%, para a solução alcalina a 3% de  $Na_2SiO_3$  a perda foi de 2,28%, enquanto a da água corrente a 10°C submetida a mesma faixa de frequência foi de 1,12%.

A proposta da temperatura influenciar na cavitação já havia sido apresentada nas fórmulas do documento escrito por Thompson e Doraiswamy (1999), de acordo com os autores, a temperatura interfere diretamente na velocidade de propagação das ondas acústicas. A fórmula da potência dissipada, também apresentada pelos autores, refere-se a potência acústica, nesta fórmula a potência está em função do calor específico do fluido, que por sua vez, sofre alterações de acordo com a temperatura, entretanto não se pode afirmar que somente a variação de temperatura é o suficiente para otimizar os efeitos da cavitação em um banho ultrassônico.

O resultado de aumento da intensidade de cavitação em frequências mais baixas, já era esperado, de acordo com o observado na literatura. Isso se deve ao fato de frequências menores, produzirem bolhas maiores, e conseqüentemente uma limpeza mais grosseira e pesada.

Outro aspecto condizente com a literatura é a influência da característica dos solutos na cavitação, ou seja, os ácidos e sais alcalinos proporcionam um suave aumento no poder da cavitação, em determinadas temperaturas. Isso ocorre devido ao oxigênio presente nos solventes se solubilizar na água, transformando-se em um radical livre. Com o aumento da presença do gás oxigênio, eleva-se o número de pontos de nucleação de novas bolhas de cavitação.

Não foi possível avaliar o efeito da cavitação da solução de 3% de NaOH devido ao escoamento da folha de alumínio, entretanto na literatura esta solução apresenta o maior poder de cavitação em relação a água corrente. Deste fato os alunos tiraram a conclusão de que além dos parâmetros do banho, também devem ser levadas em conta as propriedades dos materiais que serão submetidos a esse banho, para que a limpeza seja efetiva e que não haja danos ao material. Novamente tem-se que os parâmetros não podem ser analisados separadamente, tendo em vista que nem sempre compostos isolados agirão da mesma maneira do que quando combinados entre si para formar as ligas metálicas ou de alumínio.

Em relação ao fluido ideal, a água corrente pura apresentou cavitação similar em relação às outras soluções. Portanto, para uso geral, a água se torna o meio ideal, por apresentar custo inferior à todas as outras soluções utilizadas, e também por possuir maior acessibilidade. Contudo, as demais soluções também apresentaram bons resultados de cavitação, logo, em situações nas quais as amostras demandarem soluções ácidas ou básicas, os solutos testados podem ser aplicados com segurança da eficiência. Ressalta-se que o uso do hidróxido de sódio não é o mais adequado para materiais de alumínio.

## REFERÊNCIAS

- BANDELIN, E. **Checking of ultrasonic baths - The foil test**. [S.l.], abr. 2017.
- CIRURGICOS, R. A. e. C. d. M. e. E. SOBECC Sociedade Brasileira de Enfermeiros de C. **Práticas Recomendadas**. 5. ed. [S.l.]: SOBECC, 2009.
- FUCHS, J. F. *Ultrasonic cleaning: Fundamental theory and application*. 1995.
- GALLEGO-JUAREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 22, n. 10, p. 804, 1989.
- GAUTSCHI, G. **Piezoelectric Sensorics**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- GRAZIANO, K. U.; CASTRO, M. E. S.; MOURA, M. L. P. A. A importância do procedimento de limpeza nos processos de desinfecção e esterilização de artigos. **SOBECC**, v. 7, n. 3, p. 9–23, 2002.
- GRIFFING, V. The chemical effects of ultrasonics. **The Journal of Chemical Physics**, AIP, v. 20, n. 6, p. 939–942, 1952.
- JAFFE, B.; ROTH, R. S.; MARZULLO, S. Piezoelectric properties of lead zirconate-lead titanate solid-solution ceramics. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 25, n. 6, p. 809–810, jun 1954.
- KIM, W. C.; MAUBORGNE, R. A. **Blue ocean strategy, expanded edition: How to create uncontested market space and make the competition irrelevant**. [S.l.]: Harvard business review Press, 2014.
- MASON, T. et al. Dosimetry in sonochemistry: the use of aqueous terephthalate ion as a fluorescence monitor. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 1, n. 2, p. S91 – S95, 1994. ISSN 1350-4177.
- MESSERLI, F. W. **Ultraschall-Transducer Stabschwinger STS & Rohrschwinger RTS Multifrequenz- Stabschwinger-System**. Chaltenriet 2 • 8310 Grafstal • Switzerland, 2017.
- NEPPIRAS, E. A. **Acoustic cavitation**. [S.l.], 1980.
- NIEMCZEWSKI, B. Chemical activation of ultrasonic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 6, n. 4, p. 211 – 216, 1999. ISSN 1350-4177.
- NIEMCZEWSKI, B. Cavitation intensity of water solutions used in ultrasonic cleaning in comparison with water cavitation intensity. **Transactions of the IMF**, Taylor & Francis, v. 84, n. 5, p. 266–270, 2006.
- NIEMCZEWSKI, B. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 14, n. 1, p. 13 – 18, 2007. ISSN 1350-4177.



- NIEMCZEWSKI, B. Dependence of cavitation intensity on ultrasound frequency in ultrasonic cleaning processes in alkaline solutions. **Transactions of the IMF**, Taylor & Francis, v. 86, n. 6, p. 332–336, 2008.
- NIEMCZEWSKI, B. Influence of concentration of substances used in ultrasonic cleaning in alkaline solutions on cavitation intensity. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 16, n. 3, p. 402 – 407, 2009. ISSN 1350-4177.
- NIEMCZEWSKI, B. Cavitation intensity of solutions of chemicals used as components of media for ultrasonic cleaning in aqueous alkaline solutions. **Transactions of the IMF**, Taylor & Francis, v. 88, n. 3, p. 166–170, 2010.
- NIEMCZEWSKI, B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 1, p. 354 – 359, 2014. ISSN 1350-4177.
- NIEMCZEWSKI, B.; KOŁODZIEJCZYK, Z. Chemical support of cavitation intensity in ultrasonic cleaning. **Transactions of the IMF**, Taylor & Francis, v. 93, n. 4, p. 205–208, 2015.
- OMS; OPAS. Opas/oms e anvisa apresentam estratégias para segurança do paciente. abr. 2010. Disponível em: <[http://www.paho.org/bra/index.php?option=com\\_contentview=articleid=1106](http://www.paho.org/bra/index.php?option=com_contentview=articleid=1106)>
- PADOVEZE, M. C.; MONTE, M. C. C. D. Limpeza e desinfecção de artigos. **ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE ESTUDOS E CONTROLE DE INFECÇÃO HOSPITALAR**, p. 4–25, 1999.
- PEREIRA, A. H. A. **Limpeza ultra sônica: overview e estado da arte**. [S.l.], 2010.
- RANSLEY, J. Piezoelectric materials: Applying the standards. jan. 2016.
- SCHWEITZER, P. A. et al. **Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties**. [S.l.]: CRC Press, 2003.
- SHOH, A. Industrial applications of ultrasound - a review i. high-power ultrasound. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 22, n. 2, p. 60–70, mar 1975.
- STANDARDS on Piezoelectric Crystals, 1949. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), dec 1949. 1378–1395 p.
- THOMPSON, L. H.; DORAISWAMY, L. K. Sonochemistry: science and engineering. **Industrial & Engineering Chemistry Research** **38.4**, p. 1215–1249, mar. 1999.
- VERHAAGEN, B.; RIVAS, D. F. Measuring cavitation and its cleaning effect. **Ultrasonics sonochemistry**, Elsevier, v. 29, p. 619–628, 2016.
- WANG, Z.; NUR, A. Ultrasonic velocities in pure hydrocarbons and mixtures. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 89, n. 6, p. 2725–2730, 1991.

## ANEXO A – TABELA DE COMPATIBILIDADE DO ALUMÍNIO COM OUTRAS SUBSTANCIAS

596

Chapter 19

TABLE 19.14 Compatibility of Aluminum Alloys with Selected Corrodents<sup>a</sup>

Chemical	Maximum temp.		Chemical	Maximum temp.	
	°F	°C		°F	°C
Acetaldehyde	360	182	Barium sulfide		X
Acetamide	340	171	Benzaldehyde	120	49
Acetic acid, 10%	110	43	Benzene	210	99
Acetic acid, 50%	130	54	Benzene sulfonic acid, 10%		X
Acetic acid, 80%	90	32	Benzoic acid, 10%	400	204
Acetic acid, glacial	210	99	Benzyl alcohol	110	43
Acetic anhydride	350	177	Benzyl chloride		X
Acetone	500	260	Borax		X
Acetyl chloride		X	Boric acid	100	38
Acrylonitrile	210	99	Bromine gas, dry	60	16
Adipic acid	210	99	Bromine gas, moist		X
Allyl alcohol	150	66	Bromine liquid	210	99
Allyl chloride		X	Butadiene	110	43
Alum	110	43	Butyl acetate	110	43
Aluminum acetate	60	16	Butyl alcohol	210	99
Aluminum chloride, aqueous		X	<i>n</i> -Butylamine	90	32
Aluminum chloride, dry	60	16	Butyl phthalate		X
Aluminum fluoride	120	49	Butyric acid	180	82
Aluminum hydroxide	80	27	Calcium bisulfite		X
Aluminum nitrate	110	43	Calcium carbonate		X
Aluminum sulfate		X	Calcium chlorate	140	60
Ammonia gas		X	Calcium chloride, 20%	100	38
Ammonium carbonate	350	177	Calcium hydroxide, 10%		X
Ammonium chloride, 10%		X	Calcium hydroxide, sat.		X
Ammonium chloride, 50%		X	Calcium hypochlorite		X
Ammonium chloride, sat.		X	Calcium nitrate	170	77
Ammonium fluoride, 10%		X	Calcium oxide	90	32
Ammonium fluoride, 25%		X	Calcium sulfate <sup>b</sup>	210	99
Ammonium hydroxide, 25%	350	177	Caprylic acid	300	149
Ammonium hydroxide, sat.	350	177	Carbon bisulfide	210	99
Ammonium nitrate	350	177	Carbon dioxide, dry	570	299
Ammonium persulfate	350	177	Carbon dioxide, wet	170	77
Ammonium phosphate		X	Carbon disulfide	210	99
Ammonium sulfate, 10–40%		X	Carbon monoxide	570	299
Ammonium sulfide	170	77	Carbon tetrachloride		X
Ammonium sulfite		X	Carbonic acid	80	27
Amyl acetate	350	177	Cellosolve	210	99
Amyl alcohol	170	77	Chloracetic acid, 50% water		X
Amyl chloride	90	32	Chloracetic acid		X
Aniline <sup>b</sup>	350	177	Chlorine gas, dry	210	99
Antimony trichloride		X	Chlorine gas, wet		X
Aqua regia, 3:1		X	Chlorobenzene	150	66
Barium carbonate		X	Chloroform, dry	170	77
Barium chloride, 30%	180	82	Chlorosulfonic acid, dry	170	77
Barium hydroxide		X	Chromic acid, 10%	200	93
Barium sulfate	210	99	Chromic acid, 50%	100	38

Copyright © Marcel Dekker, Inc. All rights reserved.



ANEXO B – TABELA DE COMPATIBILIDADE DO ALUMÍNIO COM  
**OUTRAS SUBSTANCIAS**  
**Aluminum and Aluminum Alloys** 597

TABLE 19.14 Continued

Chemical	Maximum temp.		Chemical	Maximum temp.	
	°F	°C		°F	°C
Chromyl chloride	210	99	Muriatic acid		X
Citric acid, 15%	210	99	Nitric acid, 5%		X
Citric acid, conc.	70	21	Nitric acid, 20%		X
Copper acetate	X		Nitric acid, 70%		X
Copper carbonate, 10%	X		Nitric acid, anh	90	32
Copper chloride	X		Nitrous acid, conc.		X
Copper cyanide	X		Oleum	100	38
Copper sulfate	X		Perchloric acid, 10%		X
Cresol	150	66	Perchloric acid, 70%		X
Cupric chloride, 5%	X		Phenol	210	99
Cyclohexane	180	81	Phosphoric acid, 50–80%		X
Cyclohexanol	X		Picric acid	210	99
Dichloroethane (ethylene dichloride)	110	43	Potassium bromide, 30% <sup>b</sup>	80	27
Ethylene glycol	100	38	Salicylic acid	130	54
Ferric chloride	X		Silver bromide, 10%		X
Ferric chloride, 50% in water	X		Sodium carbonate		X
Ferric nitrate, 10–50%	X		Sodium chloride		X
Ferrous chloride	X		Sodium hydroxide, 10%		X
Fluorine gas, dry	470	243	Sodium hydroxide, 50%		X
Fluorine gas, moist	X		Sodium hydroxide, conc.		X
Hydrobromic acid, dilute	X		Sodium hypochlorite, 20%	80	27
Hydrobromic acid, 20%	X		Sodium hypochlorite, conc.		X
Hydrobromic acid, 50%	X		Sodium sulfide, to 50%		X
Hydrochloric acid, 20%	X		Stannic chloride		X
Hydrochloric acid, 38%	X		Stannous chloride, dry		X
Hydrocyanic acid, 10%	100	38	Sulfuric acid, 10%		X
Hydrofluoric acid, 30%	X		Sulfuric acid, 50%		X
Hydrofluoric acid, 70%	X		Sulfuric acid, 70%		X
Hydrofluoric acid, 100%	X		Sulfuric acid, 90%		X
Hypochlorous acid	X		Sulfuric acid, 98%		X
Iodine solution, 10%	X		Sulfuric acid, 100%		X
Ketones, general	100	38	Sulfuric acid, fuming	90	32
Lactic acid, 25%	80	27	Sulfurous acid	370	188
Lactic acid, conc. <sup>c</sup>	100	38	Thionyl chloride		X
Magnesium chloride	X		Toluene	210	99
Malic acid	210	99	Trichloroacetic acid		X
Methyl chloride	X		White liquor	100	38
Methyl ethyl ketone	150	66	Zinc chloride		X
Methyl isobutyl ketone	150	66			

<sup>a</sup>The chemicals listed are in the pure state or in a saturated solution unless otherwise indicated. Compatibility is shown to the maximum allowable temperature for which data are available. Incompatibility is shown by an X. When compatible, the corrosion rate is <20 mpy.

<sup>b</sup>Material subject to pitting.

<sup>c</sup>Material subject to intergranular corrosion.

Source: Ref. 2.



## ANEXO C – TABELA DE RESULTADOS DO AUTOR Niemczewski (2010)

**Table 1** Maximum cavitation intensities of 3% solutions of substances used in ultrasonic cleaning in aqueous alkaline solutions at 60°C measured at 26 kHz and 600 W (liquid volume 25 L, level 212 mm)

	Substance	Chemical formula	Max. cavitation at 60°C
1	Tap water	H <sub>2</sub> O	38.5
2	Potassium hydroxide	KOH	35.5
3	Sodium metasilicate	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	33
4	Disodium hydrogen phosphate	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	33
5	Trisodium phosphate	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	32
6	Sodium hydroxide	NaOH	32
7	Sodium carbonate	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	25.5
8	Pentasodium triphosphate	Na <sub>5</sub> P <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	20
9	Sodium polyphosphate	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>x</sub>	13.5
10	Sodium hexametaphosphate	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>	12.5
11	tetra-sodium pyrophosphate	Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	7
12	Sodium tetraborate	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	4

**Table 2** Maximum cavitation intensities of 3% solutions of substances used in ultrasonic cleaning in aqueous alkaline solutions at 60°C measured at 38 kHz and 430 W (liquid volume 25 L, level 212 mm)

	Substance	Chemical formula	Maximum cavitation at 60°C
1	Sodium hydroxide	NaOH	49
2	Disodium hydrogen phosphate	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	40
3	Potassium hydroxide	KOH	34
4	Trisodium phosphate	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	34
5	Sodium metasilicate	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	32
6	Pentasodium triphosphate	Na <sub>5</sub> P <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	31
7	Tap water	H <sub>2</sub> O	27
8	Sodium hexametaphosphate	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>	22
9	Tetrasodium pyrophosphate	Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	20
10	Sodium carbonate	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	17
11	Sodium tetraborate	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	15
12	Sodium polyphosphate	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>x</sub>	9