



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

**BRUNO MACIEL DO NASCIMENTO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA  
INIBIÇÃO DE INCRUSTAÇÃO EM TUBULAÇÃO DE  
ÁGUA DO MAR UTILIZANDO ONDAS  
ULTRASSÔNICAS**

**Recife**  
**2019**

**BRUNO MACIEL DO NASCIMENTO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA  
INIBIÇÃO DE INCRUSTAÇÃO EM TUBULAÇÃO DE  
ÁGUA DO MAR UTILIZANDO ONDAS  
ULTRASSÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Engenharia e Meio Ambiente/  
Modelagem, Simulação.

Orientador: **Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos**

**Recife  
2019**

NASCIMENTO, Bruno Maciel do

Desenvolvimento de um Método para Inibição de Incrustação em Tubulação de Água do Mar Utilizando Ondas Ultrassônicas / Bruno Maciel do Nascimento; Orientador: Valdemir Alexandre dos Santos, 2019. 76f: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2019.

1. Ultrassom, 2. Usina Termelétrica, 3. Proliferação de cracas, 4. Inibição de bioincrustação, 5. Água do mar, 6. Condensador.

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Centro de Ciências e Tecnologia.

# **DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA INIBIÇÃO DE INCRUSTAÇÃO EM TUBULAÇÃO DE ÁGUA DO MAR UTILIZANDO ONDAS ULTRASSÔNICAS**

**BRUNO MACIEL DO NASCIMENTO**

**Examinadores:**

---

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos  
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

---

Profa. Dra. Clarissa Daisy da Costa Albuquerque  
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

---

Profa. Dra. Rita de Cássia Freire Soares da Silva  
Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação - IATI

Dedico esta dissertação aos meus familiares e amigos. Em especial à minha mãe, minha avó Maria Correia de Lima Maciel (*In Memoriam*), meu irmão, todos os meus tios, tias e Tenório Paulo Maciel (*In Memoriam*) e minha namorada, Hilka Rafaela. Como diria Carl Sagan: diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com vocês.

*“Todavia não é nossa função controlar todas as marés do mundo, mas sim fazer o que pudermos para socorrer os tempos em que estamos inseridos, erradicando o mal dos campos que conhecemos, para que aqueles que viverem depois tenham terra limpa para cultivar”*

J. R. R. Tolkien (1892-1973)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos pelo apoio técnico e pessoal. Pelas conversas, amizade, paciência, por se mostrar um ser humano admirável e exemplar. Agradeço, também, por me dar a chance de me aprofundar mais na pesquisa científica e por todo o conhecimento que obtive sob sua orientação, muito obrigado.

Agradeço ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) e todos que fazem parte dele pelo apoio técnico e pessoal concedido. Meu muito obrigado à toda equipe do IATI – sem vocês nada disso teria acontecido.

Sou muito grato à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Termopernambuco S.A. (TERMOPE), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por todo o auxílio financeiro e educacional durante o Mestrado.

Agradeço ao Catamaran Tours pelo espaço cedido e por toda ajuda que nos foi dada. Por todo cuidado em não promoverem perturbações em nossos experimentos e, até mesmo, manifestarem votos de sucesso durante todo este período de trabalho.

Também agradeço à Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) e aos professores do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais pelo apoio técnico e pessoal durante o curso: Prof.<sup>a</sup> Dra. Clarissa D. C. Albuquerque, Prof.<sup>a</sup> Dra. Galba M. C. Takaki, Prof.<sup>a</sup> Dra. Leonie A. Sarubbo, Prof. Dr. Carlos A. A. Silva e Prof. Dr. Valdemir A. dos Santos.

Muito obrigado a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste projeto.

# SUMÁRIO

	Página
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>SUMÁRIO</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>RESUMO</b> .....	xi
<b>ABSTRACT</b> .....	xii
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1.1 Introdução</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	3
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	3
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	3
<b>1.3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	4
<b>1.3.1 Bioincrustação Marinha</b> .....	4
1.3.1.1 Micro-incrustação ou <i>Microfouling</i> .....	5
1.3.1.2 Macro-incrustação ou <i>Macrofouling</i> .....	6
<b>1.3.2 Métodos de Controle e Remoção de Bioincrustação Marinha</b> .....	6
1.3.2.1 Biocidas Sintéticos .....	6
1.3.2.2 Tintas de Baixa Adesão .....	7
1.3.2.3 Biocidas orgânicos .....	7
1.3.2.4 Ultrassom .....	7
<b>1.3.3 Propriedades do Ultrassom</b> .....	11
1.3.3.1 Pressão Acústica.....	11
1.3.3.2 Coeficiente de Atenuação .....	12
1.3.3.3 Dispersão .....	12

1.3.3.4 Intensidade da Onda .....	12
1.3.3.5 Impedância acústica.....	12
1.3.3.6 Velocidade do Som .....	13
<b>1.3.4 Elementos do Ultrassom .....</b>	<b>14</b>
1.3.4.1 Transdutor .....	14
1.3.4.2 Gerador do sinal de excitação .....	16
1.3.4.3 Focalização do ultrassom .....	16
<b>1.3.5 Diagrama de Fases e Cavitação Acústica .....</b>	<b>19</b>
1.3.5.1 Diagrama de fases .....	19
1.3.5.2 Cavitação.....	20
1.3.5.2.1 Cavitação acústica .....	21
1.3.5.3 Comportamento de colapso da bolha .....	24
<b>1.3.6 Limpeza por Ultrassom .....</b>	<b>24</b>
<b>1.3.7 Controle de Bioincrustações por Ultrassom .....</b>	<b>26</b>
<b>1.3.8 Modelos Físicos.....</b>	<b>34</b>
1.3.8.1 Razão de escala entre volumes.....	36
<b>1.4 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>

## **CAPÍTULO II**

<b>Resumo.....</b>	<b>44</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>44</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>45</b>
<b>2 Material e métodos .....</b>	<b>46</b>
2.1 Arranjo Experimental.....	46
2.1.1 Instalação Industrial .....	46
2.1.2 Protótipo de Bancada.....	47
<b>2.2 Propagação das ondas ultrassônicas .....</b>	<b>48</b>

2.2.1 Tipos de onda.....	48
2.2.2 Técnica do ultrassom na inibição de biofouling.....	50
<b>3 Resultados .....</b>	<b>53</b>
<b>4 Conclusões .....</b>	<b>57</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>57</b>
<b>Referências .....</b>	<b>58</b>
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	

# LISTA DE FIGURAS

Página

## CAPÍTULO I

Figura 1 – Onda plana compressiva longitudinal.....	8
Figura 2 – Esquema de uma onda unidimensional longitudinal.....	9
Figura 3 – corpo sólido vibrando imerso num meio de partículas.....	10
Figura 4 – Sinal de ondas ultrassônicas pulsantes. O tempo total.....	10
Figura 5 – Funcionamento do efeito piezométrico direto e inverso.....	15
Figura 6 – Transdutor esférico piezométrico.....	17
Figura 7 – Refletor de ondas.....	17
Figura 8 – Lente acústica.....	17
Figura 9 – Focalização eletrônica de ondas.....	18
Figura 10 – Lei de Snell-Descartes, ou lei da refração, descreve.....	18
Figura 11 – Modelo de diagrama de fases para uma substância.....	19
Figura 12 – Formação da bolha e colapso com jato.....	21
Figura 13 – Fenômeno da cavitação acústica.....	22
Figura 14 – Efeitos mecânicos da implosão da bolha.....	22
Figura 15 – Bolha inicial excitada por um campo ultrassônico.....	23
Figura 16 – Arranjo típico de limpeza por banho ultrassônico.....	25
Figura 17 – diagrama esquemático do sistema de tratamento.....	27
Figura 18 – Histograma do efeito da exposição de cípris.....	28
Figura 19 – Efeito da exposição do ultrassom e mortalidade.....	29
Figura 20 – configuração de teste de cavitação por ultrassom.....	30
Figura 21 – Interação das ondas ultrassônicas e as cracas.....	30
Figura 22 – Interação das ondas ultrassônicas nas cracas.....	31
Figura 23 – Colapso da bolha gerado por uma faísca atingindo.....	33

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos componentes básicos do sistema .....	46
Figura 2 – Isométrico do protótipo em escala de bancada .....	47
Figura 3 – Esquema ilustrativo da distribuição de moléculas em ondas .....	48
Figura 4 – Esquema ilustrativo da distribuição de moléculas em ondas .....	48
Figura 5 – Esquema com a forma de propagação elíptica .....	49
Figura 6 – Esquema com as formas de propagação de ondas de Lamb .....	50
Figura 7 – Vista parcial da parte superior da caixa de água de entrada .....	51
Figura 8 – Transdutores ultrassônicos instalados: um instalado na parede.....	52
Figura 9 – Placa testemunha submetida a um método de quantificação .....	53
Figura 10 – Placa que esteve conectada ao transdutor ultrassônico.....	54
Figura 11 – Placa submetida à uma infestação por cracas e vegetais .....	54
Figura 12 – Aspecto das paredes internas da caixa de entrada de águas.....	55
Figura 13 – Aspecto das paredes internas da caixa de entrada de águas.....	56

## RESUMO

O crescimento e reprodução de organismos vivos em superfícies artificiais é conhecido como bioincrustação, do inglês *biofouling*. Trata-se de um sério problema para estruturas submarinas, como dutos, cabos, cascos de embarcações e tubulações de sistemas de resfriamento de turbinas de usinas termelétricas (UTE). Um efeito adverso na tubulação de uma UTE é o aumento de resistência ao fluxo de água de resfriamento, aumentando gradativamente a resistência à troca de calor nos tubos dos condensadores e alterando a hidrodinâmica do projeto inicial, fazendo com que a temperatura de operação se eleve. Neste trabalho, uma estratégia para inibir a fixação de organismos sobre as superfícies metálicas em contato com as águas do mar foi investigada. Um protótipo, baseado em um condensador de uma UTE, para permitir a circulação de água do mar e a criação de ambientes favoráveis à proliferação de cracas foi desenvolvido. O protótipo foi confeccionado em tubos e chapas de aço carbono, revestidos com tintas especiais para evitar ataques corrosivos intensos, e foi instalado em um local nas proximidades do mar. Uma bomba centrífuga do tipo submersa foi utilizada para alimentar o protótipo com uma vazão de cerca de 1,5 m<sup>3</sup>/h, recalcando este fluxo de volta para o mar. Placas infestadas com larvas de cracas foram utilizadas para favorecer a proliferação de organismos incrustantes. Transdutores comerciais de 37 kHz e 50 W foram utilizados para promover um mecanismo singular de inibição de incrustação em placas testemunhas, ligadas a um transdutor, ou não, e a eficiência desse mecanismo singular de inibição alcançou 91%, comparando-se as áreas incrustadas pelos organismos marinhos, antes e após a atuação desses transdutores. Além do efeito nas placas, ficou constatado também o efeito inibitório do ultrassom no espelho do trocador próximo à placa e também nas paredes do protótipo, inibindo o crescimento no local, comprovando ser um mecanismo inovador e de alta eficiência na prevenção de bioincrustações.

**Palavras-Chave:** Ultrassom, Usina Termelétrica, Proliferação de cracas, Inibição de bioincrustação, Água do mar, Condensador.

## ABSTRACT

The growth and reproduction of living organisms on artificial surfaces is known as biofouling. This is a serious problem in underwater structures such as cables, boat hulls and pipelines of turbine cooling systems from thermoelectric power plants (TPP). An adverse effect on TPP pipelines is the rising resistance to the flow of cooling water, gradually increasing the resistance to heat exchange in the condenser tubes and changing the hydrodynamics of the initial design, causing increasing of operating temperature. In this work, a strategy to inhibit the fixation of organisms on the metallic surfaces in contact with the seawater was investigated. A prototype, based on a condenser of a TPP, allow the circulation of sea water and the creation of an environment favorable to the proliferation of barnacles was developed. The prototype was made from carbon steel tubes and plates, coated with special paints to prevent severe corrosive attacks, and was installed in a location near the sea. A submerged type centrifugal pump was used to feed the prototype with a flow rate of about 1.5 m<sup>3</sup>/h, returning this flow to the sea. Plates infested with barnacle larvae were used to promote the proliferation of fouling organisms. Commercial transducers of 37 kHz and 50 W were used to promote a unique fouling inhibition mechanism in control plates attached to a transducer or not, and the efficiency of this unique inhibition mechanism reached 91%, comparing the areas embedded by the marine organisms before and after the performance of these transducers. In addition to the effect on the plates, the inhibitory effect of the ultrasound on the mirror of the exchanger near the plate and also on the walls of the prototype, inhibiting the growth in the place, proving to be an innovative and high efficiency mechanism of biofouling inhibition.

**Key Words:** Ultrasonic transducer, Seawater, Ultrasound, Barnacles proliferation, Thermoelectric power plant, Condenser, Inhibition of biofouling

# **CAPÍTULO I**

## 1.1 INTRODUÇÃO

Usinas termelétricas (UTE) muitas vezes se localizam próximas ao mar, devido à grande disponibilidade de água para o resfriamento dos condensadores de suas turbinas. Estes ambientes promovem temperaturas médias da ordem de 40°C. Conseqüentemente, os organismos planctônicos, dentre eles, larvas de organismos incrustantes como as cracas, são atraídos para o circuito de refrigeração dessas usinas. Esses tipos de larvas geram um problema conhecido como bioincrustação (do Inglês, *biofouling*), que consiste na fixação de organismos em superfícies que estão submersas (GITTENS et al., 2013; FLEMMING, 2009).

Quando são desenvolvidas nos sistemas de resfriamento de usinas termelétricas as incrustações marinhas vão aos poucos dificultando a troca de calor nas serpentinas dos condensadores, por alterar a hidrodinâmica do projeto inicial, fazendo com que a temperatura de operação se eleve gradualmente (COUTINHO, 2009). Incrustações deste tipo causam danos milionários a empresas deste ramo, pois em cada parada não-programada (para limpeza) por raspagem dos organismos gera-se a perda tanto por danos materiais quanto por tempo de reparo do equipamento.

Alguns meios para inibir a bioincrustação têm sido utilizados, como revestir tubulações e superfície dos cascos de barcos e navios com materiais tóxicos (NELSON; LONG, 2012; KANG et al., 2006; WHOI, 1952; CALLOW, 1990). Atualmente utiliza-se tintas à base de metais nas superfícies e em ambientes fechados utiliza-se hipoclorito de sódio para diminuição da quantidade de larvas presentes na água (LI et al., 2011).

Entre os métodos químicos, o revestimento utilizado são resinas com princípios ativos capazes de liberar novas substâncias no meio aquoso por hidrólise e expor uma nova camada da substância ativa para ser submetida novamente ao mesmo mecanismo de liberação. Tais substâncias podem inibir ou ter ação biocida sob determinados tipos de organismos, prevenindo dessa forma a incrustação (FAY et al., 2005; SONG et al., 2005). O tributilestanho (TBT) é um agente químico muito eficiente no combate à incrustação que teve seu uso banido devido sua alta toxicidade no ambiente marinho (HO et al., 2006). É que seus íons na água do mar interagem com o grupo éster presente no composto, liberando na água um cátion de TBT capaz de inibir ou matar os organismos alvo. Também o PVC (policloreto de vinila), possui uma vida útil menor que às anteriores e têm seu conteúdo biocida decaindo exponencialmente com o decorrer do tempo (GÜNER et al., 2006). Nesse tipo, apenas o princípio ativo mais externo, aquele que se encontra em contato direto com a água é o que acaba sendo liberado no meio. Pelo fato de não ser solúvel e conseqüentemente não expor o princípio ativo mais interno é o que torna a eficiência desse produto cada vez menor com o passar do tempo (KANG et al., 2006).

Tintas de matriz solúvel apresentam uma solubilização contínua, o que acarreta em um tempo de vida útil reduzido (GÜNER et al., 2006; RANGARAJAN et al., 1995). O princípio ativo mais interno da camada da tinta acaba sendo exposto, ocorrendo a solubilização da matriz e esgotando o princípio ativo. Assim, na busca por substâncias de toxicidade reduzida para solucionar o problema da incrustação em superfícies, chamou a atenção aqueles organismos que desenvolveram defesas naturais para evitar a competição com espécies incrustantes. Desta forma, surge uma possibilidade de desenvolvimento de substâncias baseadas em compostos naturais. Talvez o maior impeditivo para uma aplicação direta de tais biocompostos seria a de conseguir suprir a larga demanda na produção de agentes anti-incrustantes comerciais (FUSETANI, 2011).

Organismos marinhos resistentes, tais como esponjas, corais, macroalgas entre outros foram estudados para produção de anti-incrustantes naturais e diversas pesquisas concluíram que a associação microbiana com esses seres marinhos atua como repelente de outros organismos incrustantes (SATHEESH; BA-AKDAH; AL-SOFYANI, 2016). Contudo, há preocupação com a exploração e extermínio de uma grande quantidade de organismos marinhos para obtenção destes compostos.

Métodos físicos de controle podem ser utilizados para remoção de incrustações biológicas, como no caso da raspagem dos organismos, porém, acarreta em um problema contínuo de reinfestação por serem as larvas de cracas indivíduos que utilizam um método de detecção química para identificar locais já incrustados anteriormente e assim, poder-se assentar-se novamente ali. O ultrassom não gera resíduos químicos reativos por ser um fenômeno essencialmente físico. Aplicado em um fluido é capaz de gerar microbolhas e, conseqüentemente, cavitação. Esta, quando controlada a frequência das ondas ultrassônicas e potência do equipamento gerador de onda (transdutor), pode ser utilizada no controle de bioincrustações para remoção e eliminação de organismos incrustantes no fluido (GUO, 2012).

O ultrassom é utilizado para limpeza de diversos objetos sensíveis à limpeza manual e também objetos de tamanho industrial. Esta técnica mostra-se eficiente em diversas aplicações de limpeza (GUO, 2011; GUO et al, 2012). Goodwiller e Chambers (*apud* LALIBERTE; HABER, 2014, p. 5) e Donskoy e Ludyanskiy (*apud* LALIBERTE; HABER, 2014) realizaram uma aplicação direta de ultrassom em um tanque numa frequência e potência constantes, atingindo 100% de eficiência no controle da incrustação. O presente trabalho de pesquisa desenvolveu experimentos com a utilização de ultrassom em busca de metodologias eco eficientes para o controle da bioincrustação.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver uma solução ambientalmente favorável e eficiente, baseada em técnica de ultrassom para inibir o processo de incrustação de cracas, no sistema de resfriamento de turbinas em UTEs que utilizam água do mar.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Definir condições operacionais utilizadas pelo sistema de resfriamento de uma UTE;
- Dimensionar e construir um protótipo de bancada para simular o sistema de resfriamento da UTE;
- Realizar experimentos com e sem a utilização do ultrassom para análise de condições de reprodução das cracas em um protótipo de bancada para identificar sua capacidade de inibição;
- Monitorar e quantificar a área do efeito de inibição da bioincrustação com a ação do ultrassom em um protótipo de bancada.

## 1.3 REVISÃO DA LITERATURA

### 1.3.1 Bioincrustação Marinha

Os organismos incrustantes que aderem estruturas construídas pelo homem são conhecidos pelo termo *fouling*, que representa, portanto, a comunidade marinha incrustante que ocupa desde a zona da região entremarés até o infra litoral, constituída por organismos sésseis, animais e vegetais, que competem entre si pelo uso do substrato disponível em seu *habitat*, aderindo em estruturas artificiais, rochas de enrocamento, casco de embarcações, pilastras, assim como estruturas naturais como conchas, recifes de corais e raízes de manguezais (WHOI, 1952; COLE et al, 2005; LEGG et al, 2015). Essa zona é conhecida por uma intensa competição por substrato que se dá principalmente pelo hábito alimentar destes organismos, sendo em maioria filtradores suspensívoros (LESSER et al, 1992; LOHSE, 2002; LEGG et al 2015).

Grande parte dos problemas da bioincrustação são causados por organismos macro incrustantes conhecidos como cracas, e são constituídas pelo grande grupo dos crustáceos cirrípedes, que podem habitar todos os oceanos em todos os climas. Se distribuem desde as zonas polares as zonas tropicais, podendo habitar desde áreas costeiras a grandes profundidades (FARRAPEIRA-ASSUNÇÃO, 1990; NEWMAN, ROSS, 1976; LEGG et al, 2015).

A bioincrustação na superfície de materiais é relatada como um dos principais problemas no ambiente marinho; afetando, particularmente, o setor dos transportes marítimos, devido ao aumento do consumo de combustível (GITTENS et al., 2013). O processo de bioincrustação é tipicamente desenvolvido em quatro fases: formação de uma camada de moléculas orgânicas; colonização primária por micro-organismos como bactérias e diatomáceas; colonização unicelular por esporos de algas e fixação de macro incrustantes multicelulares (MAGIN, COOPER, BRENNAN, 2010).

Tanto a competição por espaço quanto a predação fizeram com que os organismos que compõem essa comunidade desenvolvessem mecanismos químicos de defesa para permanecer na ocupação do espaço assim como aumentar sua cobertura nele (LOHSE, 2002).

Segundo Yebra *et al.* e Schultz *et al.* (apud GUO *et al.*, 2011, p. 2), devido à bioincrustação os gastos com combustíveis e a emissão de carbono aumentam em bilhões de dólares anualmente, apenas na indústria naval. Numa escala global, por ano, gasta-se cerca de 450 milhões de dólares para o controle da bioincrustação, e, se este controle não fosse feito, o prejuízo seria em torno de 7 bilhões de dólares (DA GAMA, 2009). O impacto causado estende-se desde o dano causado por tintas industriais que contém metais pesados em sua composição

em contato com a água do mar até a produção em larga escala de lixo orgânico durante o processo de limpeza (GUO, 2012).

Nota-se facilmente que o desgaste causado pela bioincrustação marinha é gigantesco. Tanto em instalações fixas quanto em tubulações marítimas, como as de resfriamento em usinas termelétricas, provocando entupimento e modificação da hidrodinâmica das tubulações gerando um desgaste acentuado nas paredes dos tubos. Um fator seria o da diversidade de organismos distintos causadores da bioincrustação, fator este, que dificulta o tratamento com métodos convencionais (COUTINHO, 2009).

Para reduzir os prejuízos causados, termelétricas precisam frequentemente aplicar biocidas na água de resfriamento que circula nos equipamentos para controlar o crescimento de microrganismos, algas e macro-organismos. O uso do cloro, geralmente como hipoclorito de sódio (NaOCl), é o tratamento biocida mais comumente utilizado em sistemas de resfriamento devido à sua alta eficiência e baixo custo (LI et al., 2011). Tipicamente, injeções contínuas ou intermitentes de cloro são utilizadas a fim de controlar o crescimento do biofilme em condensadores das centrais elétricas (CRISTIANI, PERBONI, DEBENEDETTI, 2008).

O foco na área dos anti-incrustantes está em tecnologias não-invasivas ou produtos não tóxicos que sejam ambientalmente neutros para que evite cada vez mais as paradas não-programadas e problemas de diminuição de eficiência térmica no condensador. Assim, com grandes consequências econômicas no capital da empresa causado por paradas e métodos que não são ecologicamente corretos, faz-se necessário um tratamento alternativo à dosagem de hipoclorito de sódio diretamente na água de resfriamento visando sempre evitar acidentes ambientais (MAGIN; COOPER; BRENNAN, 2010).

A descoberta de produtos para diminuir ou eliminar a bioincrustação é de elevada importância para todas as UTEs que fazem uso da água sem tratamento em seus sistemas de resfriamento, para que não ocorram paradas não programadas ou problemas de superaquecimento nas unidades geradoras e nos transformadores elevadores (DEGER, 2010).

#### 1.3.1.1 Micro-incrustação ou *Microfouling*

A micro-incrustação, constituída essencialmente por micro-organismos, pode ser dividida em seis etapas: adsorção de biopolímeros na superfície; atração química das bactérias; adsorção reversível das bactérias; adsorção irreversível por fibrilas macromoleculares das bactérias; aglomeração e formação de colônias; e, crescimento de população bacteriana secundária. Estas etapas são precursoras para o estabelecimento de macro-incrustação (DA GAMA, 2009).

A fixação dos micro-organismos depende do tipo e da rugosidade do substrato, iluminação, biofilme, existência de adultos de mesma espécie e outros fatores importantes como o hidrodinamismo próximo ao substrato (DA GAMA, 2009).

#### 1.3.1.2 Macro-incrustação ou *Macrofouling*

Macro-incrustação é a colonização de superfícies por organismos vivos macroscópicos. Wahl (*apud* LAGE, 2010, p. 26) demonstra que, na fase de colonização e sucessão, quando uma superfície está imersa no ambiente marinho atrai micróbios e a formação de filmes moleculares é o maior fator de adesão de organismos macro incrustantes. Schmid *et al.*; Khatoon *et al.*, Picioleanu *et al.* (*apud* LAGE, 2010, p. 26) mostraram que as larvas de invertebrados são atraídas, preferencialmente, para colonização em superfícies com presença de biofilmes. Porém, em outros estudos feitos por Roberts *et al.*, Maki *et al.*, Mary *et al.* e Gwyther e Fairweather (*apud* LAGE, 2010, p. 26) têm mostrado que o biofilme não é tão essencial para a macro-incrustação.

### 1.3.2 Métodos de Controle e Remoção de Bioincrustação Marinha

#### 1.3.2.1 Biocidas Sintéticos

Biocidas combatem a incrustação biológica por toxidez de seus compostos. E entre os compostos mais utilizados em biocidas está o cobre, o qual é utilizado em tintas para embarcações e/ou estruturas metálicas. Porém, um dos problemas mais onerosos deste procedimento é que as instalações precisam ser periodicamente raspadas, pintadas e monitoradas. Além disso, o cobre provoca séria corrosão em estruturas de aço ou alumínio (DA GAMA, 2009).

A busca por soluções capazes de combater as incrustações marinhas de barcos e construções litorâneas remontam historicamente de mais de 2000 anos atrás, quando o piche e revestimentos a base de cobre foram utilizados por civilizações antigas na mitigação de tal problemática. Podemos encontrar registros de outras misturas de compostos contendo arsênico, enxofre, alcatrão e chumbo utilizados pelos Fenícios, Gregos e *Vikings* (NELSON; LONG, 2012; KANG *et al.*, 2006; WHOI, 1952; CALLOW, 1990).

Madigan *et al.* e Paulus (*apud* V. N. SILVA, 2013, P. 28) dizem que a ação dos biocidas nos micro-organismos é influenciada por um processo físico que ocorre entre a superfície celular e princípio ativo dosado. Os produtos são considerados de acordo com sua toxicidade seletiva e são classificados em três diferentes espécies, são eles os bacteriostáticos, bactericidas e bacteriolíticos. Bacteriostáticos inibem a síntese proteica, e na sua ausência, os micro-

organismos voltam a ter atividade, bactericidas promovem a morte celular e os bacteriolíticos atuam na membrana, fazendo com que seu conteúdo plasmático seja liberado.

Um tipo de biocida que foi amplamente utilizado a partir da década de 50 foram os organoestânicos, como o caso do tributilestanho (TBT), que foi utilizado como aditivo em tintas anti-incrustantes por ser cerca de 5 vezes mais eficiente que tintas baseadas em óxido de cobre, e ainda tinha a vantagem de não causar corrosão em alumínio e aço. Sendo lipossolúvel, tem facilidade de penetração nas membranas vivas, o que torna um pesticida bastante potente. No entanto, na década de 70 foram evidenciados seus efeitos prejudiciais à biota marinha e foi substituído por tintas com matrizes de polímeros de auto polimento (DA GAMA, 2009).

#### 1.3.2.2 Tintas de Baixa Adesão

Já existem protótipos que utilizam tintas à base de Teflon®, por suas propriedades antiaderentes, porém, seu custo é bastante elevado e sua atividade em ambiente marinho ainda não é totalmente compreendida. Mas, ainda assim, existem outras tintas que utilizam siloxanos, de cadeia  $H_3Si[OSiH_2]_nOSiH_3$  (IUPAC, 2014), elas são mais caras que as convencionais, são de difícil aplicação e mecanicamente frágeis. Porém, podem ser limpas com mais facilidade por apresentar baixa adesão para organismos incrustantes (DA GAMA, 2009).

#### 1.3.2.3 Biocidas orgânicos

Existem diversos estudos e patentes registradas sobre substâncias biocidas produzidas por organismos marinhos sésseis que apresentam atividade anti-incrustante, embora a grande maioria tenha sido realizada apenas em escala laboratorial com larvas de cracas, os metabólitos têm mostrado atividade anti-incrustante (COUTINHO, 2009).

Um dos fatores, segundo Da Gama (2009), para utilização de anti-incrustantes naturais foi que as espécies sésseis, como corais e esponjas, são suscetíveis, também, à bioincrustação. Estas espécies desenvolveram mecanismos de defesa como a produção de substâncias anti-incrustantes naturais; E uma das grandes vantagens destas substâncias são que não geram dano ao meio ambiente e são degradados no próprio ambiente marinho; porém, Da Gama (2009) salienta que ainda não existem estudos suficientes para comprovar a toxicidade de produtos marinhos lançados em grande quantidade para a própria biota marinha.

#### 1.3.2.4 Ultrassom

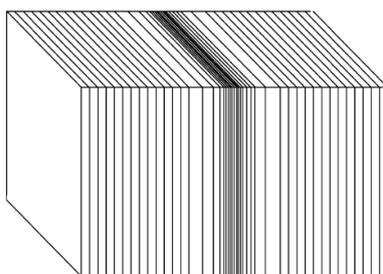
O ultrassom é um dos métodos físicos mais conhecidos e de aplicação variada, é definido como ondas mecânicas de frequência mais elevadas que a máxima frequência perceptível pelo

ouvido humano, logo, maiores que 16 kHz. De acordo com Mason, Lorimer e Luque-García, Castro (*apud* RONCHI, 2014, p. 43) o ultrassom se propaga em fluidos e sólidos e para que a transmissão ocorra, é necessário que o meio empregado tenha propriedades elásticas, podendo produzir efeitos químicos e mecânicos no meio.

As ondas ultrassônicas podem ser divididas em alta frequência (100 kHz até 1 MHz) e baixa potência (menor que 1 W/cm<sup>2</sup>), são geralmente utilizadas em análises não-destrutivas. Também existem as de baixa frequência (16 kHz até 100 kHz) e alta potência (10 W/cm<sup>2</sup> até 1 kW/cm<sup>2</sup>), estas são utilizadas para alterar propriedades físicas e químicas da matéria, geralmente utilizada na sonoquímica (RONCHI, 2014).

Leighton (2007) indica que as ondas acústicas podem existir em várias formas, e que a energia contida em uma forma de onda pode ser convertida em outra. Além de terem diferentes características de propagação (velocidade de fase e de grupo, dispersão, etc.), e ainda, segundo Leighton (2007), as formas mais comuns são as ondas compressíveis e longitudinais em que as partículas são deslocadas paralelamente na direção do movimento da onda (Figura 1). Também, vale salientar que as partículas são deslocadas localmente ou oscilam, ou seja: é a onda que viaja da fonte para o receptor, e não as partículas.

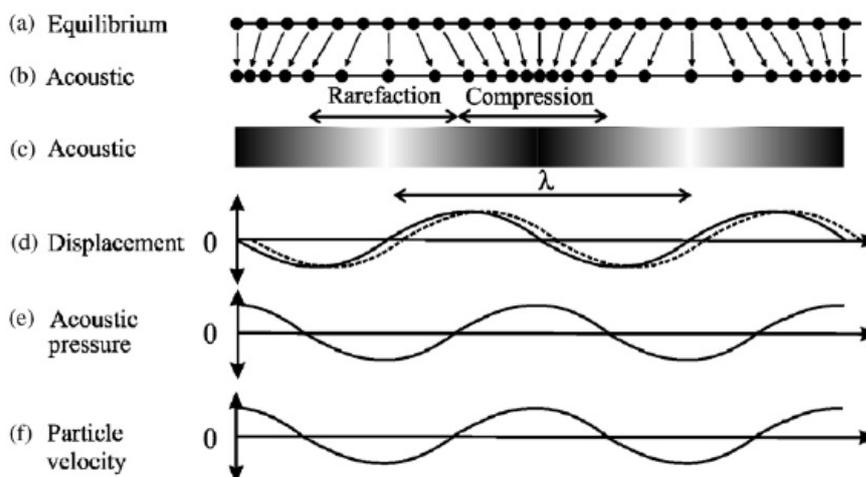
Figura 1 – Onda plana compressiva longitudinal



Fonte: LEIGHTON, 2007

Leighton (2007) mostra um modelo muito simples para entender as ondas longitudinais consiste em série de pequenas esferas de mesma massa conectadas linearmente por molas sem massa e sem perdas consideráveis (Figura 2). O modelo, portanto, compreende os dois elementos necessários de qualquer meio através do qual uma onda sonora vai passar: inércia (nas partículas) e elasticidade (nas molas).

Figura 2 – Esquema de uma onda unidimensional longitudinal se propagando da esquerda para a direita mostrando as esferas em equilíbrio (a); variando as posições e formando uma onda acústica unidimensional (b); variação de concentração de esferas (c); o deslocamento das esferas (d); variação de pressão acústica (e); variação na velocidade das partículas (f)



Fonte: LEIGHTON, 2007

A Figura 2 (a) mostra as esferas igualmente espaçadas em equilíbrio. Na Figura 2 (b) uma onda longitudinal unidimensional de frequência única está passando através do meio, e as esferas são mostradas em um instante no tempo. Quase todas são deslocadas para a esquerda ou para a direita, criando rarefações (*rarefaction*, no inglês) e compressões (*compression*, no inglês). O comprimento de onda é muito maior do que o espaçamento de partículas e, para plotar a velocidade da partícula a partir disto, a onda está viajando da esquerda para a direita com uma velocidade de fase única ( $c_f$ ). As setas entre (a) e (b) mostram como cada esfera foi deslocada. As esferas e as molas em (a) e (b) representam a inércia e a rigidez de um meio, e a interpolação entre estas esferas permite identificar as características desse meio através do qual a onda está passando. Portanto, na Fig. 2 (c) pode-se representar a concentração de partículas como uma mudança contínua na densidade, quanto mais escuras as regiões, maior a densidade. Regiões de alta pressão (compressões) na Fig. 2 (e) correspondem a pontos de alta densidade na Fig. 2 (c). Da mesma forma, regiões de baixa pressão (rarefações) ocorrem em pontos com baixas concentrações de partículas. (LEIGHTON, 2007).

Um outro exemplo mostrado por Cabral (2012) seria um corpo sólido imerso num meio de partículas vibrando constantemente. As partículas recebem o movimento deste e vão transmitir o seu movimento para a partícula mais próxima, que por sua vez transmite à seguinte

e assim sucessivamente, produzindo uma variação de pressão e densidade, na direção de propagação, provocando zonas de compressão e rarefação (Figura 3).

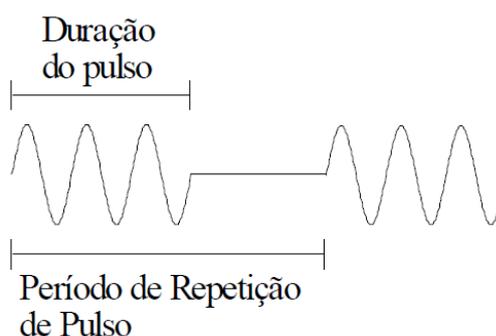
Figura 3 – Corpo sólido vibrando imerso num meio de partículas mostrando regiões de compressão e rarefação.



Fonte: CABRAL, 2012

As ondas ultrassônicas são propagadas de modo contínuo ou pulsante: no modo contínuo a onda é gerada sem interrupção, incidindo no meio de propagação; no modo pulsante a geração se dá por interrupções intermitentes, em intervalos de tempo definidos, gerando compressões e rarefações. O intervalo de tempo no qual ocorre este efeito é definido como a duração do pulso. No modo pulsante existem dois tipos de frequência: a frequência da onda e a de repetição do pulso (Figura 4). O fator de operação é determinado pela relação entre a duração do pulso e o período de repetição. O pulso pode ser único ou em série (ou trem) de pulsos (SILVA, 2011).

Figura 4 – Sinal de ondas ultrassônicas pulsantes. O tempo total do ciclo é a soma do pulso mais o tempo de espera.



Fonte: SILVA, 2011

As ondas são geradas por *transdutores*, que são conversores de energia elétrica em mecânica ou energia mecânica em energia elétrica. Estes transdutores são construídos a partir de metais piezoelétricos, que são materiais que apresentam variação de suas dimensões físicas quando sujeitos a correntes elétricas e também geram corrente elétrica quando sujeitos a pressões externas. Se a corrente elétrica for suficientemente alta e de frequência elevada, são geradas vibrações mecânicas do material de frequência elevada e, conseqüentemente, ondas ultrassônicas (ALBERNAZ, 2011).

### 1.3.3 Propriedades do Ultrassom

#### 1.3.3.1 Pressão Acústica

Comumente chamado de “som” é o que os ouvidos detectam, as variações de pressão acústica. Considerando um meio-espaço ( $x > 0$ ) preenchido com um fluido, em  $x=0$  existe um plano sólido e fino com dimensões laterais (perpendicular a  $x$ ) muito maior que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da onda sonora. Este plano está vibrando senoidalmente, em função do tempo, para frente e para trás no espaço em torno de sua posição inicial ( $x=0$ ), e esta vibração gera uma onda sonora na região  $x > 0$ . Este deslocamento pode ser descrito de acordo com a Equação 1 (RONCHI, 2014).

$$X(t) = A \cdot \cos(2\pi ft + \phi_0) \quad (1)$$

Onde  $f$  é a frequência de vibração,  $A$  é a amplitude da onda e  $\phi_0$  é a fase inicial. Esta fase inicial é quem determina as condições iniciais ( $t=0$ ) do plano da fonte (WU; NYBORG, 2008).

De acordo com Wu e Nyborg (2008), define-se a pressão acústica ( $P(x,t)$ ) como sendo o excesso da pressão total em relação à atmosférica, expressa pela Equação (2):

$$P(x,t) = P_0(x) \cos(kx - \omega t) = p_0 e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

Sendo  $P_0(x)$  a amplitude da pressão acústica;  $p_0 = P_0(0)$  a amplitude de pressão quando  $x=0$ ;  $k$  é o número de onda, inversamente proporcional ao comprimento de onda ( $\lambda$ );  $\omega$  é a frequência angular igual a frequência da onda ( $f$ ) multiplicada por  $2\pi$  (WU; NYBORG, 2008).

### 1.3.3.2 Coeficiente de Atenuação

O coeficiente de atenuação  $\alpha$ , presente na Equação (2), descreve a energia transferida pela onda sonora ao meio pelos processos de absorção e espalhamento. A absorção da energia pelo meio é convertida irreversivelmente em aquecimento por atrito viscoso (RONCHI, 2014). Na água, o coeficiente de atenuação  $\alpha$  é considerado frequentemente desprezível e o fator multiplicador  $e^{-\alpha x}$  pode ser considerado como unidade na Equação (2) (WU; NYBORG, 2008).

### 1.3.3.3 Dispersão

Dispersão é um processo que as não-homogeneidades reorientam energia sonora para regiões fora do caminho original de propagação de onda. Se a densidade da não-homogeneidade for alta o suficiente, pode ocorrer dispersão múltipla. Ou seja, a energia sônica pode dispersar-se entre várias heterogeneidades para frente e para trás várias vezes antes de ser absorvida (WU; NYBORG, 2008).

### 1.3.3.4 Intensidade da Onda

A intensidade é a energia sonora quantificada emitida pelas ondas. Também pode ser descrito como quantidade de energia transportada por segundo por unidade de área da onda (RONCHI, 2014). É normalmente compreendido de acordo com Lamminen *et al.* (*apud* RONCHI, 2014, p. 45) que se aumentando a intensidade, aumenta-se, a turbulência hidrodinâmica e também o número de bolhas de cavitação formadas e aumenta o tamanho da zona de cavitação devido à alta pressão de amplitude das ondas.

Martines, Davolos e Júnior. (2000) definem a intensidade ( $I$ ) da onda de acordo com a Equação 3:

$$I = \frac{P_0^2}{2\rho c} \quad (3)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do meio e  $c$  a velocidade do som no meio.

### 1.3.3.5 Impedância acústica

A impedância acústica pode ser caracterizada como a propagação de ondas em um meio, com determinadas características, para outro meio com características diferentes do primeiro meio. Diferença esta, que está diretamente relacionada com a energia refletida na interface destes meios.

A pressão acústica  $P_0$  (Figura 2 (e)) e a velocidade da partícula  $v$  (Figura 2 (f)) estão numa mesma fase, ou seja, a impedância acústica do meio  $Z$  é real (Equação 4). Para esta impedância  $Z$  é definido como sendo uma média entre a pressão acústica e a velocidade da partícula, para as demais ondas, define-se normalmente como sendo o produto da densidade do meio ( $\rho$ ) no equilíbrio e a velocidade de fase ( $c$ ) da onda (LEIGHTON, 2007):

$$Z = \frac{P}{v} = \rho c \quad (4)$$

Existem várias impedâncias em acústica, e a impedância acústica específica depende da utilização, por exemplo, da velocidade da partícula ou a velocidade do todo. E estas impedâncias descrevem como as ondas simples transmitem-se de um meio ( $Z=Z_1$ ) para outro ( $Z=Z_2$ ), uma vez que podem ser usadas para descrever as condições de contorno limitantes de uma forma muito simples (LEIGHTON, 2007). Leighton (2007, p. 11) exemplifica uma onda plana linear e compressiva que incide sobre uma fronteira plana entre dois meios, a continuidade da pressão dá a primeira condição de contorno e a continuidade da velocidade da partícula dá a segunda condição de contorno.

Destas condições de contorno, o coeficiente de reflexão (para onda plana compressiva de incidência normal) é definido como a razão  $R = P_r/P_i$  em que  $P_i$  é a amplitude da pressão acústica da onda incidente na fronteira, e  $P_r$  é a amplitude da pressão acústica da onda que é refletida fora dela,  $R$  também é definido pela Equação 5 (LEIGHTON, 2007):

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (5)$$

Ronchi (2014) mostra que quanto maior a diferença de impedância entre os meios, maior o coeficiente de reflexão ( $R$ ).

#### 1.3.3.6 Velocidade do Som

A velocidade do som depende do meio que se propaga. Está relacionada diretamente com a frequência ( $f$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) (Equação 6) (HANSEN, 2017).

$$c = f\lambda \quad (6)$$

Normalmente, a velocidade do som no ar é de 343 m/s a 20 °C e 1 atm. Em outra faixa de temperatura, pode-se ser calculado usando a Equação 7:

$$c = 332 + 0,6T_c \quad (7)$$

Com  $T_c$  sendo a temperatura em °C. E, de mesmo modo pode-se ser calculada a velocidade a qualquer temperatura e para qualquer gás utilizando-se a Equação 8:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT_k}{M}} \quad (8)$$

Com  $T_k$  sendo a temperatura em K; R a constante universal dos gases; M a massa molar do gás; e  $\gamma$  o coeficiente de expansão adiabático (HANSEN, 2017).

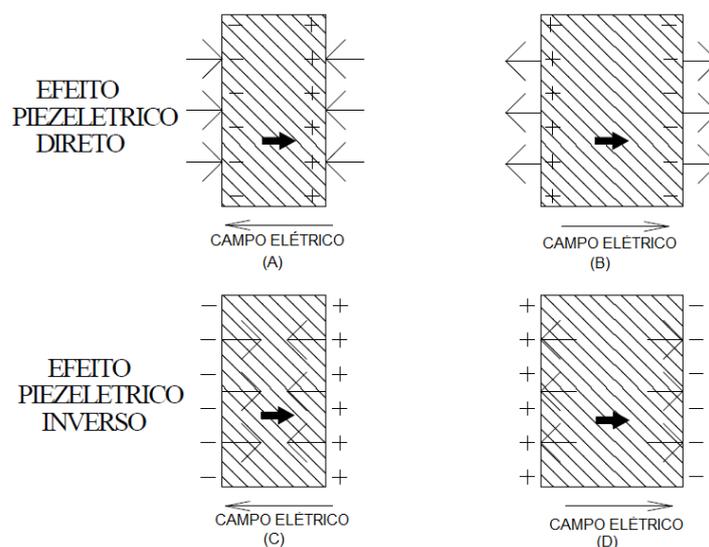
### 1.3.4 Elementos do Ultrassom

#### 1.3.4.1 Transdutor

O transdutor é a peça fundamental para geração das ondas ultrassônicas. Ele tem como função essencial converter a variação de uma grandeza física em outra. Tem várias funções: podendo converter energia elétrica em energia mecânica; converter energia mecânica em energia elétrica; converter variações de movimento em energia elétrica. O transdutor piezelétrico, que é composto normalmente de uma cerâmica (SILVA, 2011).

O transdutor piezelétrico mede a pressão através de cristais que produzem diferença de potencial ou carga elétrica quando tensionados (UNICAMP, 2017). As cargas livres nos eletrodos na superfície do cristal movimentam-se quando aplica-se uma pressão, e o caso contrário, quando aplica-se uma corrente no eletrodo a estrutura do cristal piezelétrico se deforma como mostra a Figura 5 (SILVA, 2011).

Figura 5 – Funcionamento do efeito piezoeétrico direto e inverso: (A) compressão do material no mesmo sentido de sua polarização (seta em negrito) gera um potencial no mesmo sentido. (B) Uma tração gera um potencial no sentido contrário à polarização do material. (C) Um campo elétrico aplicado no sentido inverso à polarização gera uma compressão do material. (D) Um campo elétrico no mesmo sentido da polarização gera uma expansão do material.



Fonte: SILVA, 2011 (modificado)

Os materiais naturais utilizados no mercado são o quartzo e a turmalina, e a partir da década de 40 surgiu o PZT, que continua sendo utilizado. Normalmente, para geração de ondas acústicas como as de ultrassom utiliza-se o efeito piezoeétrico inverso aplicando um sinal de excitação nos eletrodos e cria-se um campo elétrico no mesmo sentido da polarização do cristal, gerando ondas de compressão e rarefação. Para o ultrassom de alta potência, preferencialmente as cerâmicas piezoeétricas de alta potência, por ser utilizada com geradores de alta tensão por serem mais resistentes ao aquecimento (SILVA, 2011).

Gallego-Juárez (*apud* SILVA, 2011, p. 18) indica algumas das características das cerâmicas de alta potência:

- Baixa perda dielétrica: pouca energia é dissipada dentro do material quando submetida à alta tensão e perdendo pouco com o aquecimento;
- Alta constante dielétrica: são bem isolantes, pois armazenam pouca energia elétrica quando recebe uma diferença de potencial.
- Alto fator de acoplamento eletromecânico ( $K_{ef}$ ): quantidade de energia elétrica que pode ser convertida em mecânica e vice-versa. Sendo definido pela Equação 10, por Cheeke (*apud* SILVA, 2011, p. 19):

$$K_{ef} = \sqrt{\frac{f_r^2 - f_{ar}^2}{f_{ar}^2}} \quad (10)$$

Sendo  $f_r$  a frequência de ressonância e  $f_{ar}$  a frequência de antirressonância.

– Alto fator de qualidade (Q): Bom desempenho na transferência de energia acústica; relação entre energia armazenada e energia despreendida em forma de calor por ciclo de vibração;

– Estabilidade à temperatura.

Para cálculo da carga induzida (Q) sobre o cristal em função da pressão (P) aplicada encontra-se de acordo com a Equação 11, e a diferença de potencial (E) obtida em função da pressão aplicada está de acordo com a Equação 12 (UNICAMP, 2017).

$$Q = DP \quad (11)$$

Onde D é a sensibilidade de carga.

$$E = GIP \quad (12)$$

Em que I é a espessura do cristal e G é a sensibilidade da tensão.

#### 1.3.4.2 Gerador do sinal de excitação

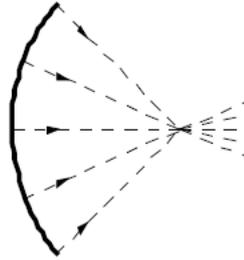
Um gerador de sinal de excitação é um circuito elétrico formado por um oscilador que opera à uma faixa de frequência de acordo com a ressonância do transdutor; um circuito modulador que por meio de uma chave modifica o sinal para contínuo ou descontínuo com intervalos e duração ajustáveis; um amplificador de potência capaz de excitar o transdutor e gerar campos acústicos; e um circuito de impedância elétrica (SILVA, 2011a).

#### 1.3.4.3 Focalização do ultrassom

Cortando-se axialmente um feixe ultrassônico será visualizado o tipo de feixe produzido pelo transdutor, podendo ser de três tipos: colimado, convergente e divergente. O feixe colimado contém ondas semiparalelas em torno de sua propagação; no feixe convergente as ondas diminuem de diâmetro progressivamente; enquanto que no feixe divergente ocorre um aumento de diâmetro das ondas. A focalização de um feixe ultrassônico muda a forma das ondas de várias

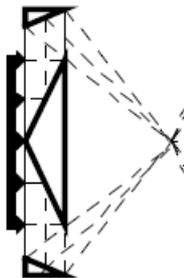
maneiras: transdutor esférico piezelétrico (Figura 6), refletores (Figura 7), lentes acústicas (Figura 8) ou focalização eletrônica (Figura 9) (SILVA, 2011b).

Figura 6 – Transdutor esférico piezelétrico



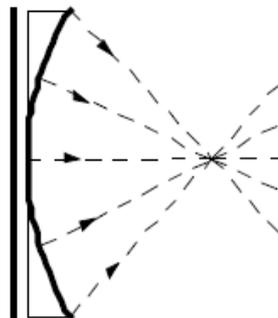
Fonte: SILVA, 2011b

Figura 7 – Refletor de ondas



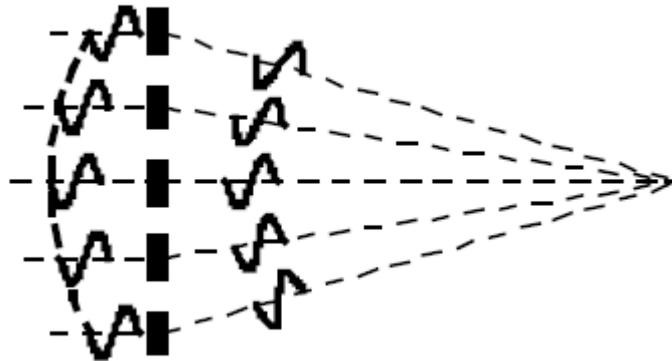
Fonte: SILVA, 2011b

Figura 8 – Lente acústica



Fonte: SILVA, 2011b

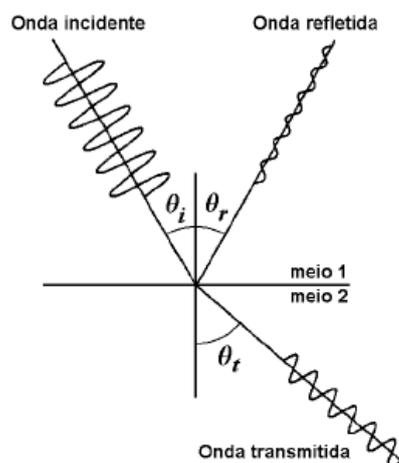
Figura 9 – Focalização eletrônica de ondas



Fonte: SILVA, 2011b

O uso de lentes tem vantagens nítidas diante do uso de transdutores esféricos ou curvados, pois utilizando-se as lentes pode-se utilizar um transdutor plano, apenas basta mudar o foco selecionando a lente necessária para a utilização. A Lei de Snell-Descartes diz que o desvio do feixe de ondas é dependente do ângulo de incidência e da diferença de velocidade do som entre os dois meios (SILVA, 2011b). Ainda de acordo com SILVA (2011b) quando uma onda encontra uma interface entre dois meios diferentes, parte da energia é refletida e parte é refratada. A onda refletida retorna ao meio incidente com mesma velocidade e a refratada propaga-se no novo meio com sua velocidade inicial modificada (Figura 10).

Figura 10 – Lei de Snell-Descartes, ou lei da refração, descreve a relação entre os ângulos de incidência e refração entre dois meios isotrópicos diferentes.



Fonte: SILVA, 2011b

Em outras palavras, se a velocidade do som no segundo meio ( $c_2$ ) for menor do que no primeiro meio ( $c_1$ ) numa interface plana, o feixe refratado se aproxima do normal e vice-versa de acordo com a Equação 13 (SILVA, 2011b).

$$\text{sen}(\theta_t)c_1 = \text{sen}(\theta_i)c_2 \quad (13)$$

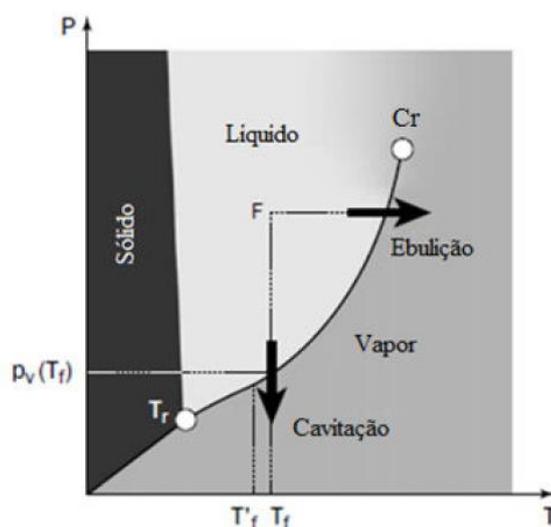
Sendo  $\theta_t$  o ângulo entre a onda transmitida e a normal;  $\theta_i$  o ângulo entre a onda incidente e a normal.

### 1.3.5 Diagrama de Fases e Cavitação Acústica

#### 1.3.5.1 Diagrama de fases

Fase em um sistema termodinâmico é denominado como uma parte do sistema que tenha propriedades físicas e composição uniforme. A mudança de fases de uma substância depende de dois fatores: pressão e temperatura. Nos líquidos, a mudança de estado para o gasoso depende diretamente da pressão de vapor ou temperatura de vapor (MORAN, SHAPIRO, 2011). Assim, surge uma necessidade de um diagrama que envolva tanto a pressão quanto a temperatura para determinação das fases de uma substância, esse diagrama é semelhante ao da Figura 11, conhecido como diagrama de fases da substância.

Figura 11 – Modelo de diagrama de fases para uma substância



Fonte: PEREIRA, 2014

No diagrama apresentado na Figura 11 pode-se notar a existência de três grandes áreas, as quais representam os três estados da matéria e suas relações com a pressão e temperatura. As linhas representam a intermediação dos estados entre si em equilíbrio, já o ponto de intersecção das três linhas ou *ponto triplo* ( $T_r$ ) no diagrama representa o ponto em que os três estados estão em equilíbrio entre si. O ponto mais afastado da linha entre *Líquido* e *Ebulição* ( $C_r$ ) é chamado de ponto crítico (MORAN, SHAPIRO, 2011) e segundo Pereira (2014) é “o ponto do diagrama de fases no qual os valores máximos e mínimos da isoterma teórica somem e a descontinuidade desaparece”, ou seja, caso aumente-se a pressão e temperatura, não haverá mais a curva de mudança de fases.

#### 1.3.5.2 Cavitação

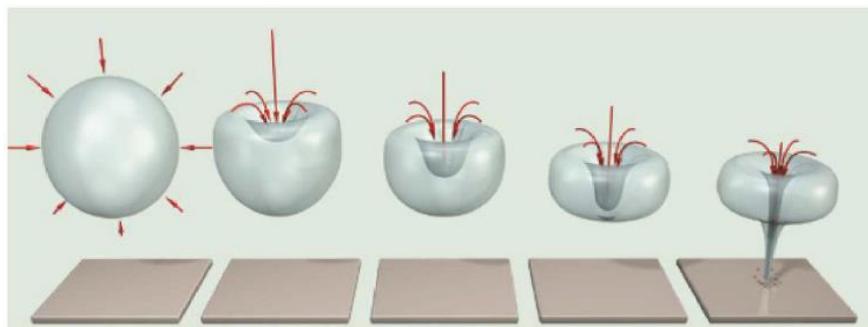
A cavitação em fluidos é gerada pela variação de pressão e temperatura de ebulição do líquido. Tomando como exemplo a água à baixa pressão e alta temperatura, forma-se uma rarefação ou cavidade/bolha por ebulição (PEREIRA, 2014). Em sistemas de escoamento de líquidos é comum o efeito da cavitação com efeitos hidrodinâmicos que possibilitam regiões em que a pressão é inferior que a pressão de vapor (ALBERNAZ, 2011).

Segundo Albernaz (2011) também comum o a cavitação próxima às fronteiras sólidas gerar efeitos erosivos. Com o entendimento de que o efeito da cavitação é dividido em formação das bolhas, desenvolvimento e colapso, pode-se determinar o limiar de cavitação, ou limiar de mudança de fase, para que possa evitar ou acelerá-lo (PEREIRA, 2014).

O mecanismo do colapso da bolha depende diretamente de certas circunstâncias, como as imediações ao redor da bolha (PEREIRA, 2014). De acordo com Frank e Michel (apud PEREIRA, 2014, p. 26) existem quatro casos bem conhecidos: a bolha num fluido em repouso; bolha próxima a uma fronteira sólida; bolha entre duas fronteiras sólidas; próxima a uma superfície livre.

No caso de uma bolha próxima a uma superfície, durante a fase de expansão, é repelida para longe. Enquanto na fase de implosão e colapso é atraída para próximo da superfície, gerando um jato de líquido de alta velocidade e pressão em seu interior, de acordo com a Figura 12 (ALBERNAZ, 2011).

Figura 12 – Formação da bolha e colapso com jato na superfície próxima



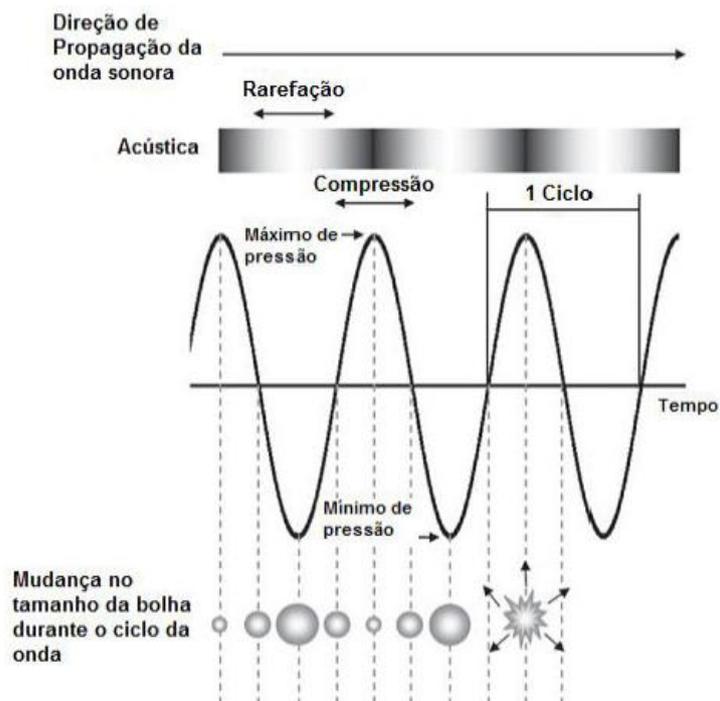
Fonte: ALBERNAZ, 2011

O controle e aplicação da cavitação é utilizado desde 1880. E envolve inúmeros exemplos, desde o controle de formação de bolhas em propulsores de submarinos para não-deteção; redução de arrasto através da injeção de bolhas perto de superfícies, alterando o fluxo no interior da camada limite turbulenta, reduzindo o consumo de combustível de embarcações (ALBERNAZ, 2011).

#### 1.3.5.2.1 Cavitação acústica

Um campo ultrassônico, produzido por um transdutor, imerso num meio líquido gera compressões e rarefações: comprimindo a estrutura molecular do meio com um aumento de pressão acústica e em seguida se expande por uma diminuição de pressão dispersando as moléculas. A rarefação produz bolhas ou cavidades contendo o próprio líquido em forma de vapor ou os gases dissolvidos no líquido, e na etapa de compressão ocorre o colapso violento destas bolhas gerando um ciclo (Figura 13) (RONCHI, 2014). Estas bolhas são geradas por um campo ultrassônico de frequência entre 20 a 100 kHz através de um fluido (HARVEY et al., 2014).

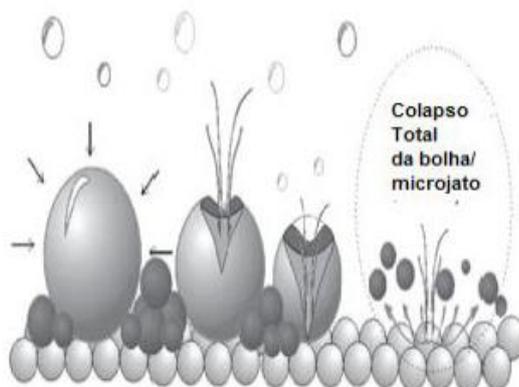
Figura 13 – Fenômeno da cavitação acústica



Fonte: RONCHI, 2014

Segundo Mason e Lorimer (*apud* RONCHI, 2014, p. 47) os efeitos químicos e mecânicos do colapso são absorvidos em duas regiões diferentes: dentro da bolha, com o aumento da temperatura e ao redor da bolha, que a onda de choque gera uma grande força de cisalhamento (Figura 14).

Figura 14 – Efeitos mecânicos da implosão da bolha



Fonte: RONCHI, 2014

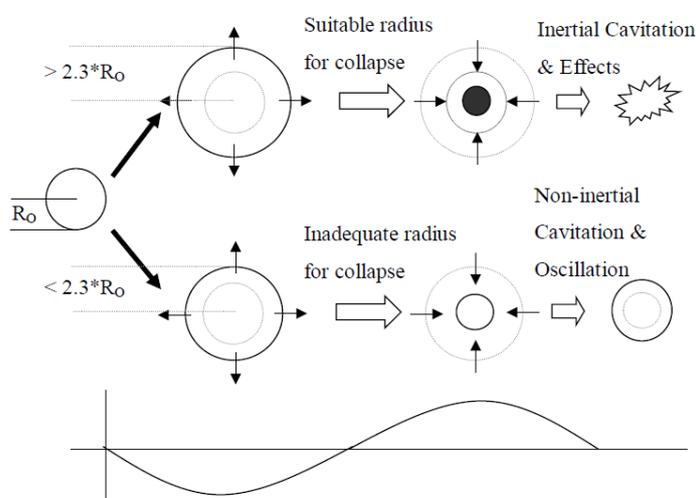
Se a amplitude da onda é suficiente, as bolhas sofrerão rápidas expansões antes de chegar a um raio crítico ( $R_{MAX}$ ) de acordo com a Equação 14 e a Figura 15. Referido como o

Limiar de Cavitação, define a intensidade acústica que deve ser excedida para que a cavitação seja suportada e é uma função da frequência operacional para a fonte acústica, a pressão hidrostática e a viscosidade do meio (HARVEY *et al.*, 2014).

$$R_{MAX} = 2,3R_0 \quad (14)$$

Em que  $R_0$  é o raio de equilíbrio da bolha.

Figura 15 – Bolha inicial excitada por um campo ultrassônico. A parte inferior ( $<2.3 R_0$ ) mostra o comportamento da bolha quando a amplitude acústica é relativamente baixa: cavitação não inercial (raio inadequado para colapso). A parte superior ( $>2.3 R_0$ ) quando a amplitude acústica é grande o suficiente para fazer com que a bolha se expanda após  $R_{MAX}$ : cavitação inercial (raio adequado para o colapso).



Fonte: HARVEY *et al.*, 2014

Os efeitos críticos são causados pelo colapso da bolha num volume muito menor que seu tamanho original. A cavidade transitória, ou bolha de formação, tem como "ciclo de vida": iniciação e nucleação, expansão e implosão. Como resultado desta implosão, surge-se ondas de choques de alta pressão causadas pela velocidade do fluido de até 1000 km/h e temperaturas de até 5.000 K. Durante a rarefação, as moléculas afastam-se cada vez mais, eventualmente formando-se uma cavidade ou vazio, atentando-se ao fato de que pontos de nucleação, que consistem em locais que incitam o gás a concentrar-se ao seu redor, e quando pré-existentes requerem menos energia para transformar-se em bolhas (HEATH, 2013).

### 1.3.5.3 Comportamento de colapso da bolha

O comportamento de colapso da bolha é determinado pela Equação de Rayleigh-Plesset, segundo Harvey et al. (2014) pode-se utilizar esta Equação para determinar o Limiar de Cavitação para a Cavitação Dinâmica Transiente. Equação esta, derivada das Equações de Navier-Stokes assumindo a simetria esférica (LIN; STOREY; SZERI, 2002).

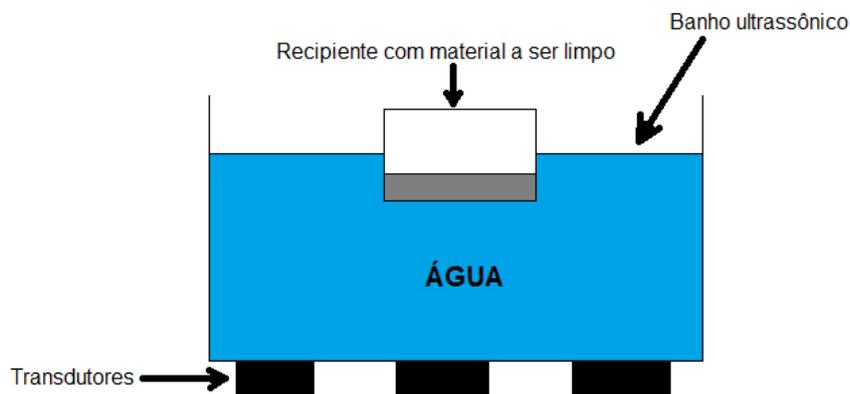
O movimento de bolhas desta natureza é chamado de Cavitação Transitória ou Cavitação Inercial e todo o ciclo pode ocorrer nas bolhas iniciais várias vezes antes delas se destruírem. Quando a amplitude da onda acústica está abaixo do limiar para induzir a Cavitação Inercial, o movimento alternativo da bolha é referido como Cavitação Estável ou Não-Inercial. Comparada à Cavitação Transiente ou Inercial, a Cavitação Não-Inercial é estável, não destrutiva e de longa duração. Apesar de não exibir nenhum dos impressionantes efeitos da Cavitação Inercial, a Cavitação Não-Inercial pode fornecer informações valiosas sobre as propriedades do líquido em que ela existe, além de revelar algumas das sutilezas associadas ao movimento da bolha se estudado adequadamente (HARVEY *et al.*, 2014).

### 1.3.6 Limpeza por Ultrassom

Consiste em um método moderno, a limpeza por ultrassom é uma tecnologia bem estabelecida e eficiente, especialmente para desalojar resíduos sólidos e remover-se incrustações biológicas (LALIBERTE, HABER, 2014). O método de limpeza por cavitação acústica, consiste na produção, atividade e controle de bolhas produzidas acusticamente principalmente para limpeza de partes difíceis sem danos às estruturas (HARVEY *et al.*, 2014).

Talvez, seja a aplicação industrial mais antiga do ultrassom, sendo utilizado para limpeza de peças delicadas como joias, lentes, placas eletrônicas, até bicos de injeção eletrônica, peças industriais como serpentinas de trocadores de calor (ALBERNAZ, 2014). E sua maior vantagem diante de outros processos de limpeza se deve à ausência de trabalho manual, que permite que cheguem a lugares normalmente inacessíveis em objetos com cavidades internas complexas que, de outra forma, seriam muito mais trabalhosas de limpar (HARVEY *et al.*, 2014). Um arranjo típico proposto por Harvey *et al.* (2014) seria o da Figura 16.

Figura 16 – Arranjo típico de limpeza por banho ultrassônico



Fonte: HARVEY *et al.*, 2014 (modificado)

A limpeza ultra-sônica é mais eficaz em materiais duros, como metais, vidro, cerâmica e plásticos, que têm uma impedância acústica muito maior em comparação com a água (HARVEY *et al.*, 2014). E, vale notar que o volume das bolhas em comparação com o volume de líquido é tão desprezível que não gera mudanças apreciáveis nas condições do meio devido à rápida dissipação do aquecimento, não gerando dano físico às peças (RONCHI, 2014). Ronchi (2014) indica, também, que em frequências altas o número de bolhas colapsando aumenta, porém, são menores e seu colapso é menos energético. Mason e Lorimer (*apud* RONCHI, 2014, p. 48) explicam que o aumento da frequência ultrassônica diminui a produção e a intensidade da cavitação em líquidos, logo, entende-se que baixas frequências são mais eficientes para limpeza.

Também é interessante notar, de acordo com Harvey *et al.* (2014) que a faixa mais utilizável do ultrassom está entre 20 e 50 kHz, a depender do trabalho de limpeza. Um ultrassom com frequência de 25 kHz tem mais capacidade de limpeza que um de 50 kHz, pois uma frequência de 50 kHz pode causar danos em peças delicadas (HARVEY *et al.*, 2014). De acordo com Albernaz (2014) é importante se ater a um controle da frequência do ultrassom para limpeza, pois quanto maior for a frequência escolhida, mais colapsos serão gerados, e conseqüentemente, desgastes na superfície a ser limpa.

Este tipo de limpeza pode ser utilizado também em materiais não-convencionais com estrutura porosa, como na indústria têxtil: o método utiliza um transdutor de placas muito próximo ou em contato com o material têxtil molhado para assegurar a cavitação dentro da estrutura. Além disso, verificou-se que, ao preparar certas condições para o processo, a limpeza ultrassônica de materiais têxteis num ambiente doméstico proporcionou uma vantagem de desempenho significativa à lavagem convencional. Além desta, existem várias aplicações

modernas da limpeza ultrassônica: desde à limpeza de cascos de navio até em barris de carvalho para produção de vinho (HARVEY *et al.*, 2014).

Heath (2012) propôs a utilização da cavitação ultrassônica para retirada de carbonato de cálcio de tubulações de trocadores de calor como alternativa à utilização de produtos químicos. O carbonato de cálcio é um sal de solubilidade reversa, ou seja, com o aumento da temperatura sua solubilidade decresce, exatamente como ocorre num trocador de calor, uma água com dureza elevada com uma presença considerável de cálcio dissolvido e temperatura elevada é fundamental para produção de depósitos de CaCO<sub>3</sub>. Porém, é importante notar que os fatores que influenciam a incrustação por CaCO<sub>3</sub> vão além de somente dureza e temperatura: a vazão, pH, rugosidade da tubulação e a tensão interfacial (HEATH, 2012).

O mecanismo de formação de carbonato de cálcio tem início quando o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) se dissolve em água formando um ácido fraco, conhecido como ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que dissociado em água forma o carbonato de hidrogênio (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e assim reage com os cátions de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) presentes na água como mostra a Equação 15. Dividindo em operações são elas o agrupamento de íons, crescimento de cristais, aglomeração de cristais e depósitos de cristais de CaCO<sub>3</sub> (HEATH, 2012).



De acordo com Brujan *et al.* (*apud* HEATH, 2012, p. 207) as bolhas atingem a camada de incrustação com pulsos de pressão de curta duração com pressão de aproximadamente 1,5 Gpa, fazendo com que a incrustação se desprenda da parede da tubulação por forças mecânicas. É importante frisar que, nesse processo, pulsos microscópicos de jatos não têm potencial para produzir erosão de metais, mas podem desempenhar um papel muito importante na fragmentação de materiais quebradiços, como as incrustações minerais, já que a resistência para o escoamento é muito menor do que para os materiais dúcteis (HEATH, 2012).

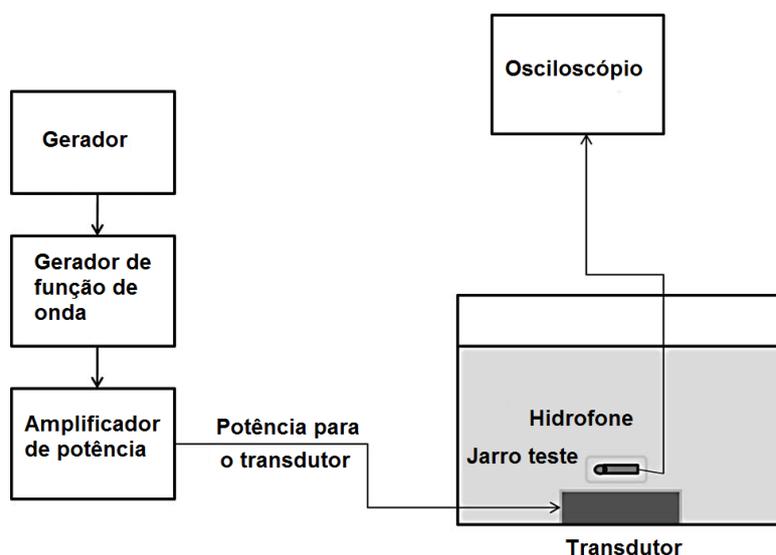
### **1.3.7 Controle de Bioincrustações por Ultrassom**

De acordo com Rajasekhar *et al.* (*apud* LALIBERTE, HABER, 2014, p. 5) o uso do ultrassom regulado pela frequência, intensidade e duração para eliminar bio-incrustações funciona com a utilização da vibração das ondas sonoras agindo nas vesículas de gás das células, fazendo-as ressoarem, expandir-se e contrair-se dentro dos micro-organismos, danificando-os internamente. E em recentes estudos o ultrassom mostrou-se muito eficaz no tratamento de cracas e moluscos em geral, e um destes estudos foi publicado por Goodwiller e

Chambers (*apud* LALIBERTE, HABER, 2014, p. 5) que se consistiu em aplicação direta de ultrassom num tanque numa frequência constante de 20 kHz e potência de até 89 kW, causando uma mortalidade de 100% dos moluscos entre 30 a 60 s. Enquanto Donskoy e Ludyanskiy (*apud* LALIBERTE, HABER, 2014) utilizaram ultrassom variando entre 20 a 380 kHz para induzir mortalidade por cavitação em mexilhões na fase larval à adulta para controle de bio-incrustação.

Guo *et al.* (2011) testou o efeito do ultra-som em larvas de cracas e cípris de *Amphibalanus amphritite* em um aquário marinho com recirculação diária de água do mar com temperatura entre 25 a 30 °C e com larvas de crustáceos do gênero *Artemia*. As larvas de cracas geradas dos adultos foram criadas numa mistura com algas de *Tetraselmis suecica* e *Chaetoceros muelleri* a 1:1 v/v a 25 °C numa concentração de  $5 \times 10^5$  células/ml. As larvas de cracas se desenvolveram em cípris num intervalo de 5 a 7 dias. O uso do ultrassom no trabalho de Guo *et al.* (2011) teve a montagem do aparato de acordo com a Figura 17. Uma onda senoidal foi enviada pelo gerador de função de onda para o amplificador de potência e este sinal foi usado para conduzir um transdutor piezelétrico de cerâmica de 80 mm nas frequências de 23, 63 e 102 kHz, respectivamente. O transdutor estava imerso no fundo do jarro teste de acrílico emitindo ondas no sentido perpendicular ao jarro teste.

Figura 17 – Diagrama esquemático do sistema de tratamento por ultrassom.

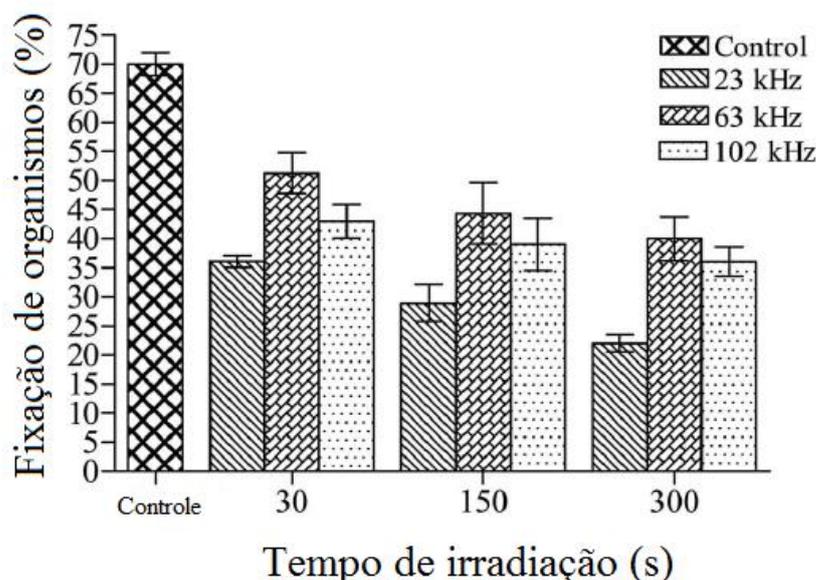


Fonte: GUO *et al.*, 2011 (modificado)

Foi observada a fixação dos cípris sob diferentes pressões acústicas, tempo de exposição e frequência de ultrassom. Variou-se a pressão em 9, 15 e 22 kPa; a frequência em 23, 63 e 102 kHz em um tempo de 30 s para observação do efeito da pressão na colonização. Para avaliar o

tempo de exposição, os cípris foram expostos a uma pressão de 20 kPa durante 30, 150 e 300 s. Este valor de pressão foi escolhido por Guo *et al.* (2011) com base no fato de que este nível de pressão seria suficientemente elevado para provocar uma resposta dos cíprídios, mas não tão elevada como para ser o fator dominante. Também realizou-se um teste do comportamento explorativo dos cípris com ultrassom com frequência entre 23 e 102 kHz com pressão de 20 kPa e cípris sem ultrassom. Os resultados mais satisfatórios da fixação com o controle do ultrassom foi, de acordo com a Figura 18, de que a 20 kPa de pressão acústica frequência de 23 kHz e 30 segundos de exposição ao ultrassom, os cípris diminuíram em 50% a quantidade de organismos fixados comparados com o grupo de controle. Enquanto que a 20 kPa de pressão acústica, 23 kHz e 300 segundos conseguiu-se diminuir em cerca de 70% a fixação dos cípris comparados com o grupo de controle (GUO *et al.*, 2011).

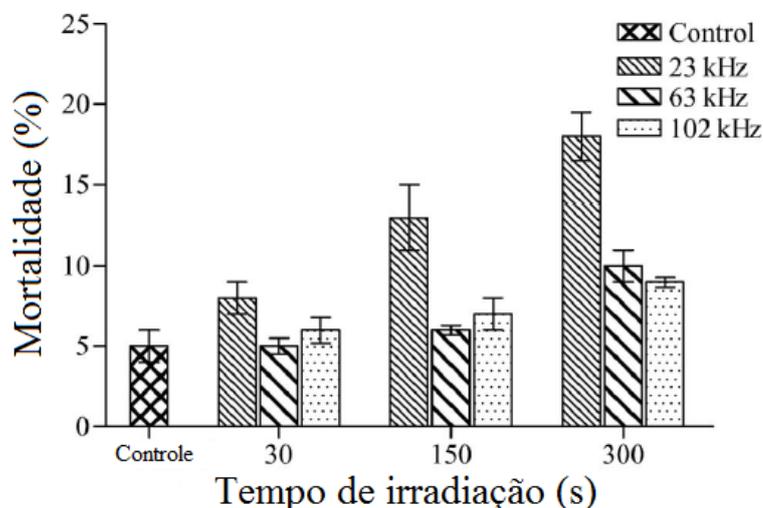
Figura 18 – Histograma do efeito da exposição de cípris ao ultrassom onde “control” é o elemento de controle.



Fonte: GUO *et al.*, 2011 (modificado)

A mortalidade dos cípris mostrou-se mais eficiente em 300 s ou mais de exposição ao ultrassom, e a configuração mais eficaz obteve-se com a aplicação de 23 kHz a 20 kPa durante 300 s, de acordo com as Figuras 18 e 19, respectivamente (GUO *et al.*, 2011). Estando de acordo com estudos de Kitamura *et al.*, Mori *et al.*, Suzuki e Kono (*apud* GUO *et al.*, 2011, p. 190) nos quais confirmou-se que a pressão acústica ideal é 19,5 kHz.

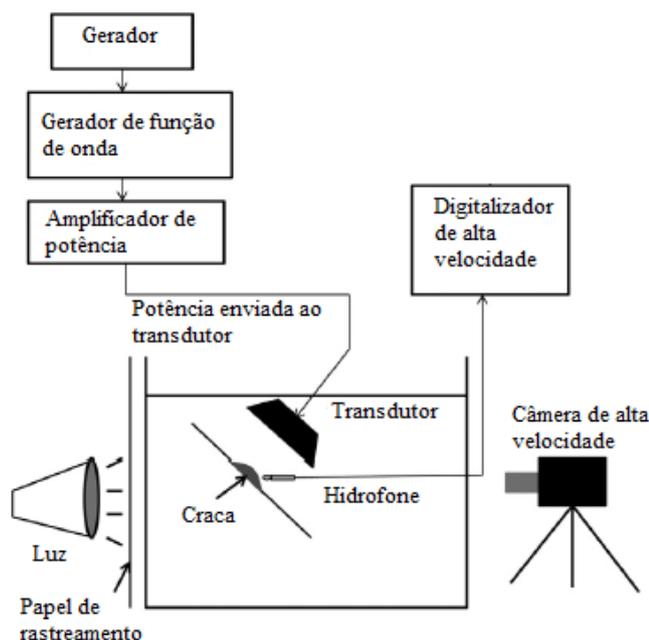
Figura 19 – Efeito da exposição do ultrassom e mortalidade dos cípris a 20 kPa, “control” é o elemento de controle.



Fonte: GUO *et al.*, 2011 (modificado)

Guo *et al.* (2013) afirmou que a limpeza por cavitação pode ser muito eficiente para remover cracas fixadas em seus estágios juvenis. O efeito de bolhas de cavitação na remoção de cracas juvenis foi eficiente porque destruiu as cracas antes de terem desenvolvido sua estrutura calcária mais dura. Observou-se os jatos gerados pelas bolhas em diferentes intensidades de impacto relacionado por uma relação entre a distância da formação da bolha e a parte superior da craca ( $H$ ) e o raio máximo da bolha ( $R_m$ ) obtendo-se uma constante ( $H'$ ) e notou-se que quanto menor fosse o  $H'$ , maior seria a pressão do jato. Esquemmatizou-se o experimento de acordo com a Figura 20: um tanque de vidro transparente de 180 mm x 190 mm x 200 mm cheio de água mineral, para evitar o efeito da cavitação no hidrofone, até uma altura de 140 mm; amplificou-se uma onda senoidal do gerador e entregue ao transdutor ultrassônico; fixou-se a craca em um substrato de vidro de frente ao transdutor com frequência de 27 kHz com sinal de ultrassom capturado pelo hidrofone. E, para evitar o efeito da cavitação no hidrofone, além da água mineral, capturou-se o sinal distante da cavitação, o qual acusou a pressão de 57 kPa. Instalou-se uma câmera de alta velocidade na parede atrás do transdutor e utilizou-se um papel de rastreamento para garantir a segurança no controle da luz; com dois grupos de cracas: um recentemente metamorfoseado com  $0,38 \pm 0,06$  mm e outro com 10 dias depois de metamorfoseado com  $2,3 \pm 0,13$  mm (GUO *et al.*, 2013).

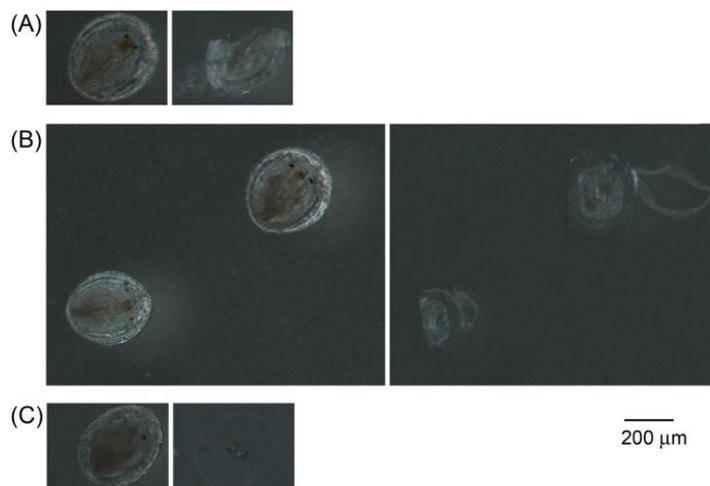
Figura 20 – Configuração de teste de cavitação por ultrassom em craca.



Fonte: GUO *et al.*, 2013 (modificado)

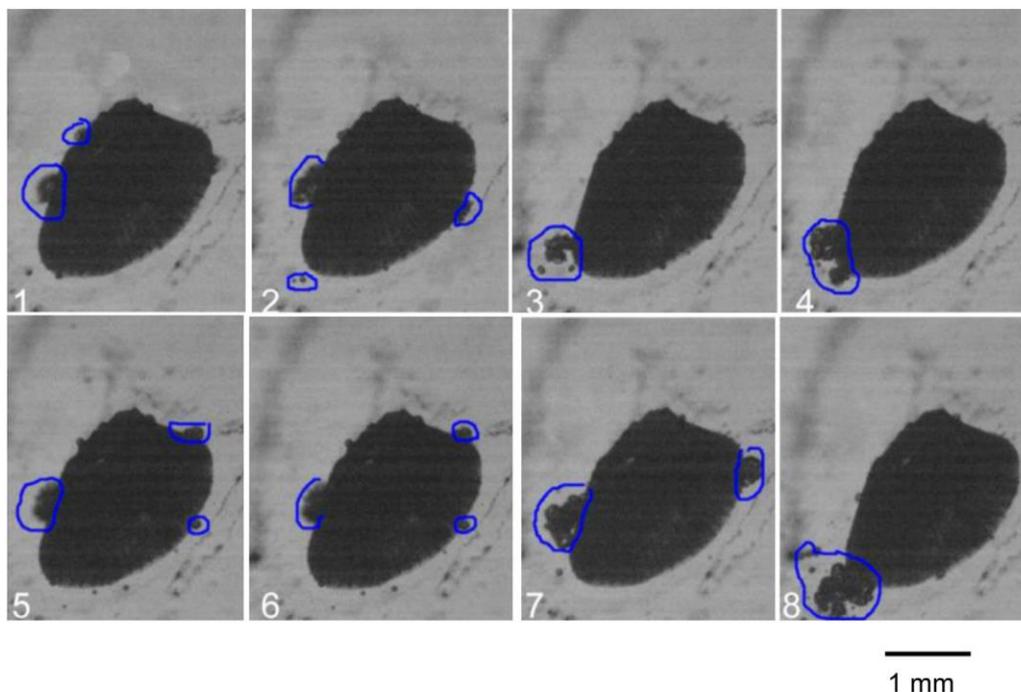
Guo *et al.* (2013) mostrou em uma análise microscópica a interação do ultrassom nas cracas juvenis com duração de 30, 60 e 150 s respectivamente, de acordo com a Figura 21. Enquanto a Figura 22 mostra a ação da cavitação nas cracas com 10 dias depois de metamorfoseadas.

Figura 21 – Interação das ondas ultrassônicas e as cracas juvenis. Na Figura (A) mostra os animais depois de 30 s de exposição; na Figura (B) com 60 s; e, na Figura (C) com 150 s.



Fonte: GUO *et al.*, 2013

Figura 22 – Interação das ondas ultrassônicas nas cracas com 10 dias. Os grupos de bolhas de cavitação foram circulado de azul impactando randomicamente a craca. Taxa de quadros de 20.000 FPS e o tamanho da craca com cerca de 2.73 mm.



Fonte: GUO et al., 2013

GUO et al. (2013) verificou-se a lesão induzida por bolhas de cavitação ultrassônica em cracas juvenis pela presença visível de aglomerados de bolhas que atingiam as conchas da craca, conforme registrado pela câmera de alta velocidade. Gerou uma única bolha para ter-se uma compreensão melhor da interação da bolha-craca, notou-se que a pressão de impacto do jato é muito afetada por  $H'$ . Quanto menor o  $H'$ , maior o impacto. A pressão de impacto, pode ser quantificada como pressão de martelo de água e está positivamente correlacionada com a velocidade do jato. Há uma distância de limiar que causou à craca de 10 dias de idade para manter algumas lesões (Figura 23). Com essencialmente o mesmo tamanho de bolha, o jato de líquido não gerou nenhum dano aparente na concha da craca com  $H' > 1$ . Quando  $H' \leq 1$ , o jato de líquido danificou a concha da craca e removeu completamente as cracas unidos quando  $H' \leq 0,5$ .

Analisando a Figura 23, de acordo com Guo et al. (2013):

Interação bolha-craca em  $H' = 2$ : A bolha atingiu seu raio máximo de 1,8 mm no Quadro 12 (0,293 ms). Subsequentemente, o jato foi formado e atingido na parte superior da craca no quadro 46 (1,2 ms). Entretanto, devido à distância relativamente longa entre o ponto inicial da

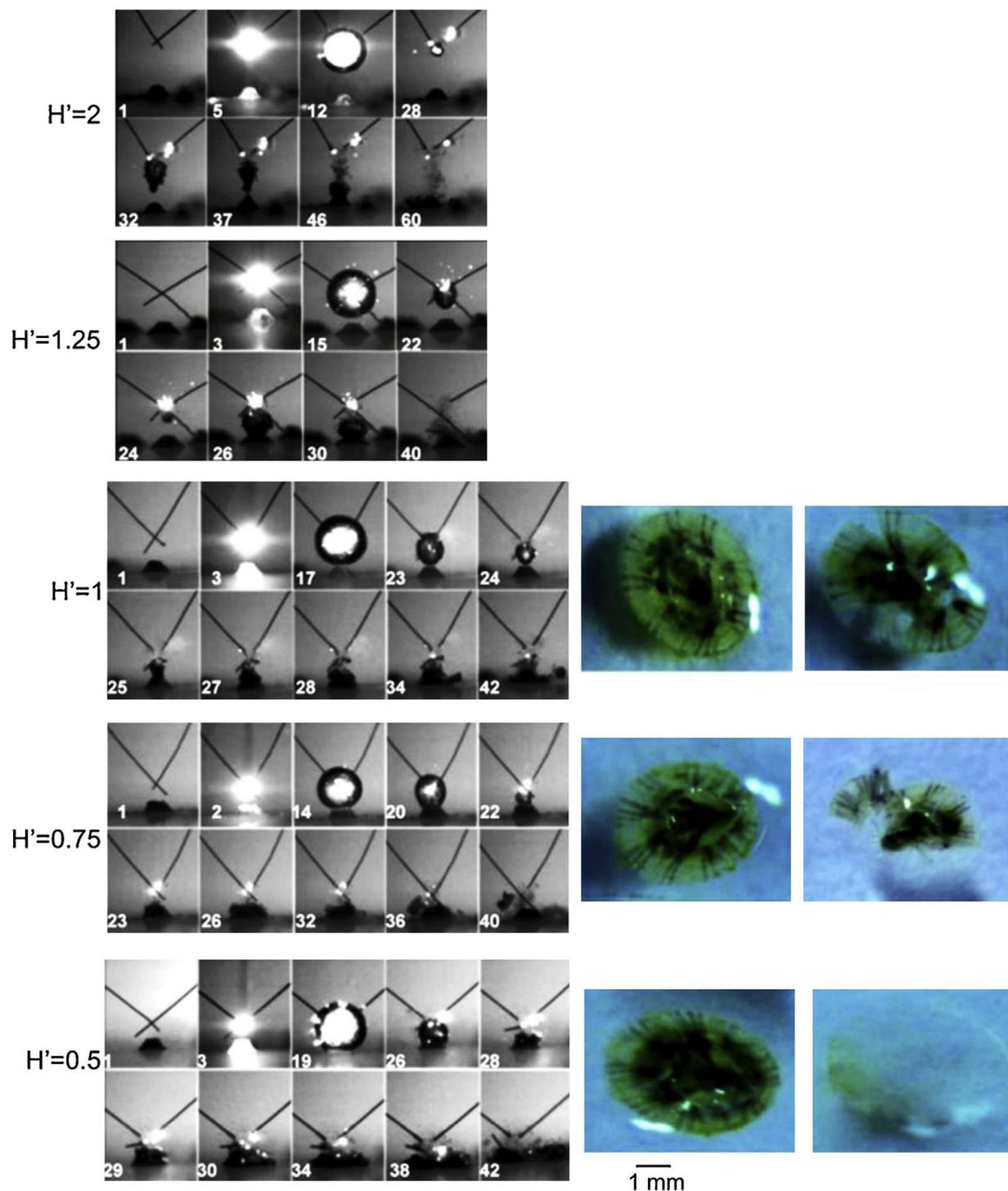
bolha e a craca, a velocidade do jato foi reduzida significativamente quando o impacto ocorreu. Como tal, não apareceu nenhum efeito observável sobre as cracas, como eles ainda estavam vivos no dia seguinte após o tratamento.

Interação bolha-craca em  $H' = 1,25$ : A distância adimensional  $H'$  foi ajustada para  $1,25 \pm 0,08$  e os experimentos foram conduzidos com um novo conjunto de cracas. Para o caso quando  $H' = 1,25$ , a bolha atingiu seu tamanho máximo no quadro 15 (0,373 ms) e o impacto sobre a craca ocorreu no quadro 26 (0,67 ms), conforme ilustrado na Figura 23. A velocidade de impacto na craca aumentou; No entanto, o impacto ainda não gerou nenhum efeito aparente, que permaneceu intacto e foi observado estar vivo e bem no dia seguinte.

Interação bolha-craca em  $H' = 1$ : Quando os experimentos foram conduzidos nos cracas com  $1,00 \pm 0,03$  mm, o fenômeno observado mudou drasticamente. Quando  $H' = 1$ , a bolha atingiu seu tamanho máximo no quadro 17 (0,43 ms) com o raio de 1,8 mm, e a bolha quase fez contato com o topo da craca (Figura 23). O jato de líquido incidiu sobre a craca no quadro 25 (0,64 ms) e o impacto foi observado para ser mais violento. Partes da concha da craca foram quebradas como observado no quadro 42.

Interação bolha-craca em  $H' = 0,75$  e  $H' = 0,5$ . Quando a distância foi ajustada para  $H' = 0,75$  o tamanho máximo da bolha foi atingido no quadro 14 (0,35 ms) (Figura 23). A bolha tocou a parte superior da craca e pareceu ser aplainada na seção inferior (quadro 14). Como a bolha não era esférica simétrica, o raio foi medido horizontalmente com o raio de 1,76 mm. A bolha então colapsou e o jato impactou na craca no quadro 22. Verificou-se que o impacto do jato de líquido era muito violento, uma vez que várias partes da concha da craca foram quebradas (quadros 36 e 40). Quando a distância foi mais reduzida para  $H' = 0,5$ , o fenômeno semelhante ao de  $H' = 0,75$  foi encontrado. A bolha atingiu o seu raio máximo no quadro 19 (0,48 ms) e atingiu a craca no Quadro 29. O impacto do jato de líquido foi mais forte que praticamente toda a concha da craca foi removida após o tratamento (GUO, *et al.* 2013).

Figura 23 – Colapso da bolha gerado por uma faísca atingindo uma craca de 10 dias com vários  $H'$  diferentes. A câmera operou a 37.500 FPS, as bolhas foram controladas com um raio máximo de  $1,8 \pm 0,2$  mm. A bolha iniciada no quadro 1 corresponde ao tempo de 0 ms, e os quadros foram numerados em ordem cronológica para cada caso. As imagens das cracas foram comparadas antes e depois da experiência com a bolha gerada por faísca.



Fonte: GUO *et al.*, 2013

Segundo Guo et al. (2013), a interação da bolha-craca foi explicitamente investigada e a pressão do martelo de água foi estimada. As pressões em  $H' = 2$ ,  $H' = 1,25$  e  $H' = 1$  foram estimadas em 7,64, 13,9 e 18,6 MPa, respectivamente. Contudo, apenas a pressão acima de 18,6 MPa mostrou a capacidade de danificar a concha das cracas fixas de 10 dias. Os cípris adultos usam carbonato de cálcio para formar seus exoesqueletos e os valores de dureza e módulo elástico da concha estão dentro de um intervalo de aproximadamente 2-3 e 50-70 GPa, respectivamente. O valor encontrado no trabalho pode ser utilizado nas cracas juvenis, por serem parcialmente calcificadas e relativamente frágeis. O microjato formado durante o colapso da bolha de cavitação é afetado pela propriedade da superfície contra a qual ele está em colapso. As superfícies "mais suaves" levam a um colapso menos violento e a uma menor erosividade. Isto pode proporcionar um mecanismo possível para remover a incrustação marinha por cavitação sem causar danos nos revestimentos dos materiais. Os valores de módulo de dureza dos revestimentos poliméricos estão dentro do intervalo de aproximadamente 0,3-0,6 e 3-7 GPa, respectivamente. Estes valores estavam muito além do valor de 16,8 MPa que poderia danificar as conchas das cracas de 10 dias; Portanto, refuta-se um possível dano do jato aos revestimentos anti-incrustantes. Além disso, para remover cracas menores de 10 dias de idade, muito menos impacto será necessário e o perigo para o revestimento será significativamente reduzido.

Neste estudo, a craca é mais fácil e completamente removida em um estágio mais jovem. Em cracas mais velhas, o impacto do jato de líquido só poderia remover seu revestimento, deixando para trás a placa de base de cimento na superfície. Este estudo indica que a cavitação ultra-sônica seria ideal se for aplicada a estágios iniciais de incrustação, como um método de controle, antes da formação de estruturas calcárias duras (GUO *et al.*, 2013).

### **1.3.8 Modelos Físicos**

Modelos físicos são representações escalonadas de um sistema físico (HUGHES, 1993). O uso de modelos físicos está bem estabelecido, oferecendo uma alternativa de abordagem ao que pode ser simulado, utilizando modelos numéricos ou observados e medidos através de experimentação (FROSTICK et al., 2014). Modelos físicos têm sido aplicados para compreender, avaliar e informar decisões das partes interessadas em experimentos, desde os aspectos biológicos e ambientais como para a indústria aeronáutica e a engenharia de infraestrutura. Esse tipo de modelo fornece uma técnica de pesquisa respeitável, permitindo a reprodução de fenômenos e uma compreensão de processos de interações a serem geradas nas formas visual e informativa (SUTHERLAND; BARFUSS, 2011).

Os modelos físicos podem ser vagamente divididos em Modelo em escala 1:1, ou réplica; Modelo em escala reduzida por semelhança dinâmica (números adimensionais de Froude, Reynolds, Mach) e; Modelos distorcidos. A escolha do tipo de modelo físico depende dos propósitos e objetivos do estudo que se pretende realizar (HUGHES, 1993). Essas vantagens incluem a capacidade de:

- (i). Isolar variáveis dentro de um laboratório;
- (ii). Incorporar processos físicos reais em vez de simplificações;
- (iii). Estudo cenários pouco frequentes ou hipotéticos e;
- (iv). Extrair dados qualitativos e quantitativos.

Um modelo físico deve ser cauteloso quanto às possíveis falhas de seu uso, como por exemplo, devido à escala e aos efeitos laboratoriais. Apesar dessas deficiências, os modelos físicos fornecem uma técnica para observar, visualizar e medir interações processo-forma. Isto permite uma compreensão de relações complexas que outras metodologias de modelagem podem não ser capazes de simular.

Para que os resultados de grandezas hidráulicas medidas em um modelo tenham valores equivalentes aos da estrutura de maior escala (protótipo), certas condições deverão ser estabelecidas (ZLOKARNICK, 2002):

- Entre modelo e protótipo deve existir semelhança geométrica, ou seja, o modelo e o protótipo poderão ter dimensões diferentes, mas o formato deverá ser o mesmo. Em outras palavras, suas dimensões lineares deverão ser proporcionais;

- Entre modelo e protótipo deve existir semelhança cinemática, ou seja, as velocidades das partículas dos fluidos envolvidos deverão manter uma razão constante;

- Entre modelo e protótipo deve existir semelhança dinâmica, ou seja, as forças que agem ao longo do modelo devem guardar perfis semelhantes para os respectivos pontos das estruturas físicas. Neste caso deve também existir semelhanças cinemática e geométrica entre modelo e protótipo.

Como critério que garante a existência de uma semelhança dinâmica, iguala-se números adimensionais como Reynolds (Re), Froude (Fr), Euler (Eu) e Mach (M). Por exemplo utilizando o número de Reynolds (STREETER, 1998) na Equação 16:

$$Re_m = Re_p \quad \text{Ou} \quad \frac{V_m \cdot L_m \cdot \rho_m}{\mu_m} = \frac{V_p \cdot L_p \cdot \rho_p}{\mu_p} \quad (16)$$

Os subíndices m e p representam modelo e protótipo, respectivamente.

### 1.3.8.1 Razão de escala entre volumes

Para o estudo do volume, utiliza-se o comprimento do projeto ( $L$ ); na cinemática, o estudo das velocidades ( $V$ ); na dinâmica, o estudo das forças ( $F$ ). De acordo com Chanson (1999) semelhança geométrica implica dizer que existe uma razão entre o comprimento característico do protótipo e o modelo e será igual à Equação 17:

$$L_R = \frac{l_p}{l_m} = \frac{d_p}{d_m} = \frac{H_p}{H_m} \quad (17)$$

O  $m$  e o  $p$  subscrito significa protótipo (full-scale) e parâmetros do modelo, respectivamente, e o subscrito  $r$  significa a razão do protótipo para o modelo. O comprimento, área e volume são dependentes da semelhança geométrica. A semelhança geométrica não é o suficiente para indicar que o padrão de fluxo é similar tanto no modelo quanto no protótipo (por exemplo, similitude cinemática).

E que semelhança cinemática envolve a razão de velocidade no protótipo e no modelo, e está de acordo com a equação 18:

$$V_R = \frac{v_p}{v_m} = \frac{(V_1)_p}{(V_1)_m} = \frac{(V_2)_p}{(V_2)_m} \quad 18$$

A combinação entre similitudes geométrica e cinemática dá as razões entre tempo, aceleração, vazão e velocidade angular do protótipo e modelo. Ainda, a semelhança dinâmica envolve a razão de forças no protótipo e no modelo, segundo a Equação 19:

$$F_R = \frac{(F_1)_p}{(F_1)_m} = \frac{(F_2)_p}{(F_2)_m} \quad 19$$

O trabalho e a potência são parâmetros também envolvidos em semelhança dinâmica.

Chanson (1999) também mostra um método de construção de modelos físicos, e nele, mostra que deve-se primeiro questionar qual o efeito dominante (por exemplo: viscosidade, tensão superficial, ...). Também, na maioria dos casos, deve-se escolher uma escala geométrica adequada, muitas vezes selecionado por processo iterativo.

1. Selecionar a menor razão de escala geométrica ( $L_r$ ) que caiba dentro das instalações do laboratório;
2. Para  $L_r$ , e o critério de semelhança (Reynolds, Froude, etc.), verificar se a vazão pode ser dimensionada adequadamente no modelo com base na vazão máxima

do modelo ( $Q_{max}$ ); Por exemplo: Para  $L_r$  e o critério de semelhança, a vazão no modelo é grande o suficiente para modelar a condição de fluxo do protótipo?

3. Verificar se a escala de resistência ao fluxo é possível de se atingir no modelo; Por exemplo: é possível alcançar o fator de atrito de Darcy para o modelo,  $f_m$ , no modelo?
4. Verificar no modelo se o número de Reynolds,  $Re_m$ , para a menor vazão; Por exemplo: para  $(Q_p)_{min}$ , quais são as condições de fluxo no modelo: laminar ou turbulento? Caso o protótipo seja turbulento, no modelo também deve ser.
5. Escolher a escala mais conveniente.

O escopo principal deste projeto será analisar a eficiência do controle físico por ultrassom, analisar sua eficiência na diminuição das incrustações causadas por cracas, comprovando que utilizando um método físico existe menos risco de ocorrer acidentes químicos que vão alterar as condições do ecossistema marinho, como no caso da utilização do hipoclorito de sódio, que pode gerar resíduos tóxicos.

Assim, dividindo-se em três etapas: caracterização e dimensionamento do sistema de resfriamento de um sistema de condensação de uma usina termoelétrica (UTE), construção de um modelo físico similar ao condensador, testes de bancada com transdutores ultrassônicos para análise de parâmetros (distância, tempo de exposição, potência e frequência ideais), realização de análise estatística e otimização dos testes de bancada, testes em modelo físico para análise do controle de bioincrustações por cavitação ultrassônica e proposição de um modelo estatístico para aplicação piloto.

## 1.4 REFERÊNCIAS

CABRAL, C. M.. **Acústica Industrial: aplicação da análise de vibrações e ruído à identificação de fontes de ruído em ambiente industrial**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

CALLOW, M., Ship fouling: problems and solutions. **Chemistry Industry**. v. 5 p. 123–127, 1990.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHANSON, Hubert. **The Hydraulics of Open Channel Flow: Physical modelling of hydraulics**. London: Arnold, 1999. 650 p.

COLE, V. J.; GLASBY, T. M.; HOLLOWAY, M. G. Extending the generality of ecological models to artificial floating habitats. **Marine Environmental Research** v. 60, p. 195–210, 2005.

COUTINHO, R. **Ecologia marinha aplicada: a bioincrustação em estruturas construídas pelo homem e como vetor de introdução de espécies**. 2009. Disponível em: <[http://www.seb-ecologia.org.br/2009/resumos\\_professores/ricardo\\_coutinho.pdf](http://www.seb-ecologia.org.br/2009/resumos_professores/ricardo_coutinho.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2017.

CRISTIANI, P.; PERBONI, G.; DEBENEDETTI, A. Effect of chlorination on the corrosion of Cu/Ni 70/30 condenser tubing. **Electrochimica Acta**, v.54, n.1, 100–107, 2008.

DA GAMA, B.A.P., PEREIRA, R.C., COUTINHO, R.. 2009. Bio-incrustação marinha. *In*: Pereira, R.C. & Soares-Gomes, A. (orgs.) **Biologia Marinha**. 2ª edição, editora Interciência, Rio de Janeiro, pp. 299-318.

ALBERNAZ, D. L. (2011). **Dinâmica de Bolhas em Líquidos Elásticos e Anisotrópicos. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas**. Publicação ENM.DM - 160 A/11, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 278p.

FARRAPEIRA-ASSUNÇÃO, C.M. **Taxonomia e considerações ecológicas dos Cirripedia Balanomorpha do estuário do Rio Paripe (Ilha de Itamaracá-PE Brasil)**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. 1990. 379 f.

FARRAPEIRA, Cristiane Maria Rocha; CALADO, Tereza Cristina dos Santos. Biological features on epibiosis of Amphibalanus improvisus (Cirripedia) on Macrobrachium acanthurus (Decapoda). **Brazilian Journal Of Oceanography**, [s.l.], v. 58, n. 3, p.15-22, jun. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1679-87592010000700003>.

FAY F.; LINOSSIER, I.; LANGLOIS, V.; HARAS, D.; VALLEE-REHEL, K. SEM and EDX analysis: Two powerful techniques for the study of antifouling paints. **Progress in Organic Coatings**, v. 54, p. 216, 2005.

FLEMMING, H. C. **Marine and Industrial Biofouling**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. 2009.

FROSTICK LE, THOMAS RE, JOHNSON MF, RICE SP, MCLELLAND SJ. 2011. **Users Guide to Ecohydraulic Modelling and Experimentation**: Experience of the Ecohydraulic Research Team (PISCES) of the HYDRALAB Network. CRC Press, Leiden, The Netherlands: 228.

FUSETANI, N., Antifouling marine natural products. **Natural Product Reports**, v. 28, 2, p. 400-410, 2011.

GITTENS, J. E. et al. Current and emerging environmentally-friendly systems for fouling control in the marine environment. **Biotechnology Advances**, v. 31, n. 8, p. 1738–1753, dez. 2013.

GÜNER, F.S.; YAGCI, T.; TUNCER ERCIYES, A., Polymers from triglyceride oils. **Progress in Polymer Science**, v. 31, 7, p. 633-670, 2006.

GUO, S.F. **A STUDY OF ULTRASONIC EFFECTS ON THE MARINE BIOFOULING ORGANISM OF BARNACLE, AMPHIBALANUS AMPHITRITE**. 2012. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Nacional de Singapura, Singapura, 2012.

GUO, S. F., KHOO, B. C., TEO, S. L. M., LEE, H. P..The effect of cavitation bubbles on the removal of juvenile cracas. **Colloids And Surfaces B: Biointerfaces**, [s.l.], v. 109, p.219-227, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.03.046>.

GUO, S.F., LEE, H. P.; CHAW, K. C.; MIKLAS, J.; TEO, S. L. M.; DICKINSON, G. H.; BIRCH, W. R.; KHOO, B. C.. Effect of ultrasound on cyprids and juvenile barnacles. **Biofouling**, [s.l.], v. 27, n. 2, p.185-192, 24 jan. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08927014.2010.551535>.

HANSEN, Colin H. **FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS**. Disponível em: <[http://www.who.int/occupational\\_health/publications/noise1.pdf?ua=1](http://www.who.int/occupational_health/publications/noise1.pdf?ua=1)>. Acesso em: 19 mar. 2017.

HARVEY, Gerald; GACHAGAN, Anthony; MUTASA, Tapiwa. Review of high-power ultrasound-industrial applications and measurement methods. **Ieee Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control**, [s.l.], v. 61, n. 3, p.481-495, mar. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tuffc.2014.2932>.

HEATH, D.; SIROK, B.; HOCEVAR, M.; BOSTJAN, P.. The Use of the Cavitation Effect in the Mitigation. **Strojniški Vestnik – Journal Of Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 59, n. 4, p.203-215, 15 abr. 2013. Faculty of Mechanical Engineering. <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2012.732>. Heidelberg, 2009. v. 4.

HO, S.M.; TANG, W.Y.; DE FRAUSTO, J.B.; PRINGS, G. S. Developmental exposure to estradiol and bisphenol A increases susceptibility to prostate carcinogenesis and epigenetically regulates phosphodiesterase type 4 variant 4, **Cancer research**, v. 66, 11, p. 5624-5632, 2006.

HUGHES, S. A. 1993. **Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering**. World Scientific Publishing Co., Singapore: 568.

IUPAC. International Union Of Pure And Applied Chemistry. **Compendium of Chemical Terminology: Gold Book**. 2014. Disponível em: <<https://goldbook.iupac.org/PDF/goldbook.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

KANG, J. H.; KONDO, F; KATAYAMA, Y., Human exposure to bisphenol A, **Toxicology**, v. 226, 2, p. 79-89, 2006.

LAGE, L. M.. **Colonização e Sucessão de Nemátodes Marinhos em Substrato Artificial Consolidado**. 2010. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ecologia e Recursos Naturais, Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2010.

LALIBERTE, G.; HABER, E.. Wisconsin Department Of Natural Resources. Literature Review of the Effects of Ultrasonic Waves on Cyanobacteria, Other Aquatic Organisms, and Water Quality. **Research Report**, Wisconsin, v. 195, p.1-16, mar. 2014.

LEGG, M.; YUCEL, M.; CARELLAN, I.; KAPPATOS, V.; SELCUK, C.; GAN, T. H.. (2015). Acoustic methods for biofouling control: A review. **Ocean Engineering**. 103. 10.1016/j.oceaneng.2015.04.070.

LEIGHTON, T. What is ultrasound? **Progress In Biophysics And Molecular Biology**, [s.l.], v. 93, n. 1-3, p.3-83, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026>.

LESSER, M. P.; SHUMWAY, S. E.; CUCCI, T.; SMITH, J. Impact of fouling organisms on mussel rope culture: interspecific competition for food among suspension-feeding invertebrates. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**. V. 165, Issue1, p. 91-102, 1992.

LI, H.; CHIEN, S. H.; HSIEH, M. K.; DZOMBAK, D. A.; VIDIC, R. D.. Escalating Water Demand for Energy Production and the Potential for Use of Treated Municipal Wastewater. **Environmental science & technology**, p. 4195-4200, 2011.

LIN, Hao; STOREY, Brian D.; SZERI, Andrew J.. Inertially driven inhomogeneities in violently collapsing bubbles: the validity of the Rayleigh–Plesset equation. **Journal Of Fluid Mechanics**, [s.l.], v. 452, p.145-162, fev. 2002. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112001006693>.

LOHSE, D. P. **Relative Strengths of Competition for Space and Food in a Sessile Filter Feeder**. Biol. Bull. 203: 173–180, 2002.

MAGIN, C. M.; COOPER, S. P.; BRENNAN, A. B. Non-toxic antifouling strategies. **Materials Today**, v. 13, n. 4, p. 36–44, 2010.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

NASER, M. D.; RAINBOW, P. S.; CLARK, P. F.; YASSER, A. G.; JONES, D.S. The barnacle *Amphibalanus improvisus* (Darwin, 1854), and the mitten crab *Eriocheir*: one invasive species getting off on another! **BioInvasions Records** (2015) Volume 4, Issue 3: 205–209.

NELSON, A. M.; LONG, T. E., A perspective on emerging polymer Technologies for bisphenol-A replacement. **Polymer International**, v. 61, 10, p. 1485-1491, 2012.

NEWMAN, W.A.; ROSS, A. Revision of the balanomorph cracas; including a catalog of the species. **Memoir of San Diego Society of Natural History**, San Diego, 1976. v. 9, p. 1-108.

PEREIRA, Pedro Augusto Fernandes. **Estudo do Fenômeno de Formação e Colapso de Macro Cavidades em Líquidos**. 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

RANGARAJAN, B.; HAVEY, A.; GRULKE, E. A.; CULNAN, P. D., Kinetic parameters of a two-phase model for in situ epoxidation of soybean oil, **Journal of the American Oil Chemists Society**, v. 72, 10, p. 1161-1169, 1995.

RONCHI, R.P. **Avaliação da eficiência do ultrassom no processo de separação de fases em água produzida e em emulsões sintéticas do tipo o/a**. 164f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2014.

SATHEESH, S.; BA-AKDAH, M. A.; AL-SOFYANI, A. A. Natural antifouling compound production by microbes associated with marine macroorganisms - A review. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 21, p. 26–35, maio 2016.

SILVA, B. P. **Avaliação de falhas em revestimentos anticorrosivos pelo método não destrutivo por ultrassom**. TCC (82 p.), Curso de Graduação em Engenharia de Metalurgia da Escola Politécnica da USP, 2011.

SILVA, G. de L. M.. **CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TRANSDUTOR FOCALIZADO PARA APLICAÇÃO EM TERAPIA ULTRASSÔNICA DE BAIXA INTENSIDADE**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Biomédica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011a.

SILVA, V.N. **Biocidas Alternativos em Sistemas de Resfriamento Industrial**. 78 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013b.

SONG, Y.C.; WOO, J.H.; PARK, S. H.; KIM, I. S. A study on the treatment of antifouling paint waste from shipyard. **Marine Pollution Bulletin**, v. 51, p. 1084, 2005.

STREETER, V.L.; WYLIE, E.B.; BEDFORD, K.W., Fluid Mechanics, 9Th Edition, Boston: McGraw Hill, 1998.

SUTHERLAND J, BARFUSS SL. 2011. Composite modelling: combining physical and numerical models. Proceedings of the 34th IAHR World Congress, June 2011, Brisbane, Australia. **Modelling Geomorphic Systems: Scaled Physical Models**. Acessível em: [https://www.researchgate.net/publication/308888559\\_Modelling\\_Geomorphic\\_Systems\\_Scaled\\_Physical\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/308888559_Modelling_Geomorphic_Systems_Scaled_Physical_Models) [acessado em 15 de Jun de 2018].

UNICAMP (Org.). **Transdutor Piezo-elétrico**. Elaborada pela Faculdade de Engenharia Mecânica. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~instrumentacao/pressao/transdutores08.html>. Acesso em: 19 mar. 2017.

Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), **US Naval Institute, Annapolis**, Iselin, COD, 1952

WU, J.; NYBORG, W. L.. Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells. **Advanced Drug Delivery Reviews**, [s.l.], v. 60, n. 10, p.1103-1116, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2008.03.009>.

ZLOKARNICK, M., **Scale-up in Chemical Engineering**. Germany: Wiley-VCH, 2002.

# **CAPÍTULO II**

## USO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM PARA INIBIÇÃO DE BIOFOULING EM ESCALA DE BANCADA

Nascimento, B.M.; Banja, M.; Carvalho, E.F.; Santos, V.A.

**Resumo** – A ação de ondas ultrassônicas sobre animais e vegetais marinhos, foi constatada e notificada em um protótipo de bancada simulando um sistema de resfriamento de turbina de uma usina termelétrica. O protótipo foi construído para proporcionar a proliferação de bioincrustação (do inglês, *biofouling*) no espelho de fixação dos tubos do condensador do protótipo. Os experimentos foram realizados com placas submersas na caixa de entrada de água do mar no protótipo e com observações sobre as paredes internas da referida caixa de entrada. A instalação de um transdutor ultrassônico na parte externa da caixa também permitiu observações sobre a ação inibitória do ultrassom. A quantificação do efeito do ultrassom sobre a bioincrustação, durante 31 dias, produziu uma eficiência de inibição de aproximadamente 91,0% da área total da placa. A adequação da técnica ultrassônica às normas ambientais de preservação da fauna e flora marinha recomenda a continuidade de trabalhos na referida área.

Palavras-chave: Bioincrustação, Ondas ultrassônicas, Propagação superficial, Água do mar; Superfícies metálicas, Modelo físico.

**Abstract** – The action of ultrasonic waves on marine animals and seaweeds was verified and quantified in a bench model of cooling system of a turbine in thermoelectric power plant (TPP). The prototype was built to provide biofouling proliferation in the condenser tube attachment mirror. The experiments were performed with submerged plates in the seawater inlet box in the prototype and with observations on the inner walls of said inlet box. The installation of an ultrasonic transducer outside of the box allowed observations on the inhibitory action of the ultrasound. The quantification of the action of ultrasound inhibition on biofouling, for about 31 days, allowed an efficiency value of about 91.0% in total area of the plate. The suitability of the ultrasonic technique to the environmental norms for the preservation of marine fauna and flora recommends the continuity of work in this area.

**Keywords:** Biofouling, Ultrasonic Radiation, Surface propagation, Ocean waters, Metal surfaces, Physical model.

## 1. Introdução

A incrustação biológica, também chamada de *biofouling*, é a formação indesejável de organismos e vegetais marinhos numa superfície imersa em água. O acúmulo de incrustação aumenta o arraste causado pela água que passa pela superfície. Este fenômeno pode causar o bloqueio de tubos de entrada e trocadores de calor, e pode resultar em biocorrosão (LINDHOLDT et al, 2015). A incrustação biológica é um problema significativo para todas as estruturas marinhas, como navios, plataformas costeiras, trocadores de calor e sensores oceanográficos (GUO, 2012).

Para os setores industrial e marítimo, a bioincrustação é o estabelecimento/acumulação indesejável de uma comunidade macroscópica de organismos vivos em uma superfície artificial submersa ou em contato com águas oceânicas, geralmente precedida da formação de biofilmes microbianos (FLEMMING, 2009). A bioincrustação, que representa, portanto, a comunidade marinha incrustante que ocupa desde a zona da região entre marés até o infra litoral. Esta comunidade é constituída por organismos sésseis, animais e vegetais, que competem entre si pelo uso do substrato disponível em seu *habitat*, aderindo a estruturas artificiais, rochas para barragens de enrocamento, casco de embarcações, pilastras, assim como estruturas naturais, como conchas, recifes de corais e raízes de manguezais (WHOI, 1952; COLE et al, 2005). A superfície de fixação desses organismos é denominada de substrato e conhecida por uma intensa competição que ocorre principalmente pelo hábito alimentar destes organismos, sendo em maioria filtradores suspensívoros (LESSER et al, 1992; LOHSE, 2002).

O processo de macro-incrustação é tipicamente desenvolvido em quatro fases, sobre um substrato: formação de uma camada de moléculas orgânicas; colonização primária por micro-organismos como bactérias e diatomáceas; colonização unicelular por esporos de algas e fixação de macro-incrustantes multicelulares (MAGIN; COOPER; BRENNAN, 2010). Dessa forma, a atuação de qualquer fenômeno, químico, biológico ou físico, que impeça o desenvolvimento de qualquer desses processos, deverá causar uma inibição da bioincrustação.

Uma vez que o ultrassom não gera resíduos químicos reativos por ser um fenômeno essencialmente físico, esse tipo de onda pode ser aplicado a um fluido e ser capaz de gerar microbolhas/cavitação, ou vibrações mecânicas capazes de inibir a bioincrustação. Quando controlada a frequência das ondas ultrassônicas e potência do equipamento gerador dessas ondas (transdutor), pode-se controlar a intensidade dos efeitos de uma onda ultrassônica (GUO, 2012). O presente trabalho desenvolveu ações para testar a inibição do bioincrustação sobre a superfície de paredes internas de um protótipo em escala de bancada. O referido protótipo simula um sistema de resfriamento das partes internas da turbina em uma termelétrica instalada em um local que favorece a utilização de água do mar.

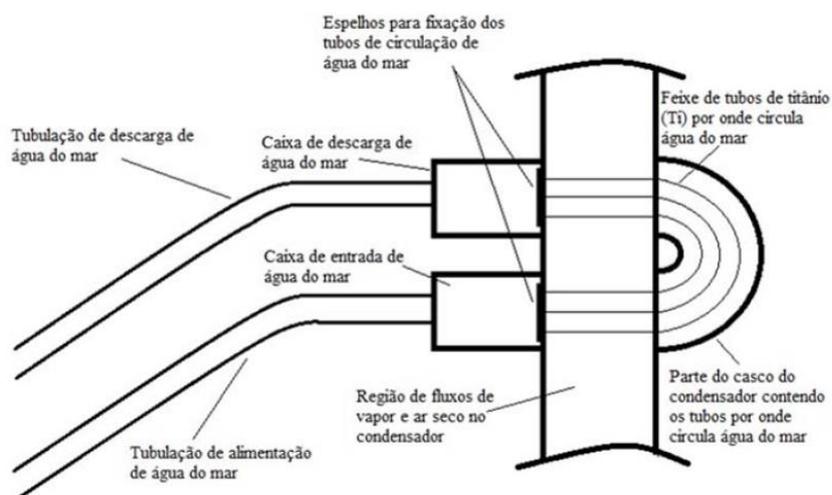
## 2. Material e Métodos

### 2.1 Arranjo experimental

#### 2.1.1 Instalação Industrial

A construção do protótipo de bancada foi baseada no esquema de funcionamento do sistema de resfriamento das partes internas das turbinas da usina termelétrica utilizada para estudo de caso. A Figura 1 mostra o esquema de funcionamento do referido sistema de resfriamento. A água do mar é coletada e recalçada por uma bomba centrífuga através de uma tubulação até uma câmara que serve como caixa de entrada de água e onde encontra-se localizado o espelho que suporta o feixe de tubos por onde deve passar a água de resfriamento do vapor que passa através do condensador. O referido condensador é um trocador de calor do tipo fluxos cruzados, onde o vapor troca calor com a água do mar. A água do mar entra no condensador com cerca de 30 °C e sai a cerca de 35 °C. Na região próxima ao espelho de entrada do condensador a temperatura é de cerca de 39 °C. Esta temperatura favorece a fixação de organismos planctônicos, dentre eles, larvas de organismos incrustantes, os quais são atraídos para o circuito de refrigeração da usina. Quando a bioincrustação ocorre, são desenvolvidas no sistema de resfriamento, especificamente na entrada ou no interior das tubulações do trocador de calor do condensador, as cracas, que vão aos poucos dificultando a troca de calor nas serpentinas do condensador, por alterar a hidrodinâmica do projeto inicial, fazendo com que a temperatura de operação se eleve gradualmente (COUTINHO, 2009).

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos componentes básico do sistema de resfriamento das turbinas da usina termelétrica usada para estudo de caso

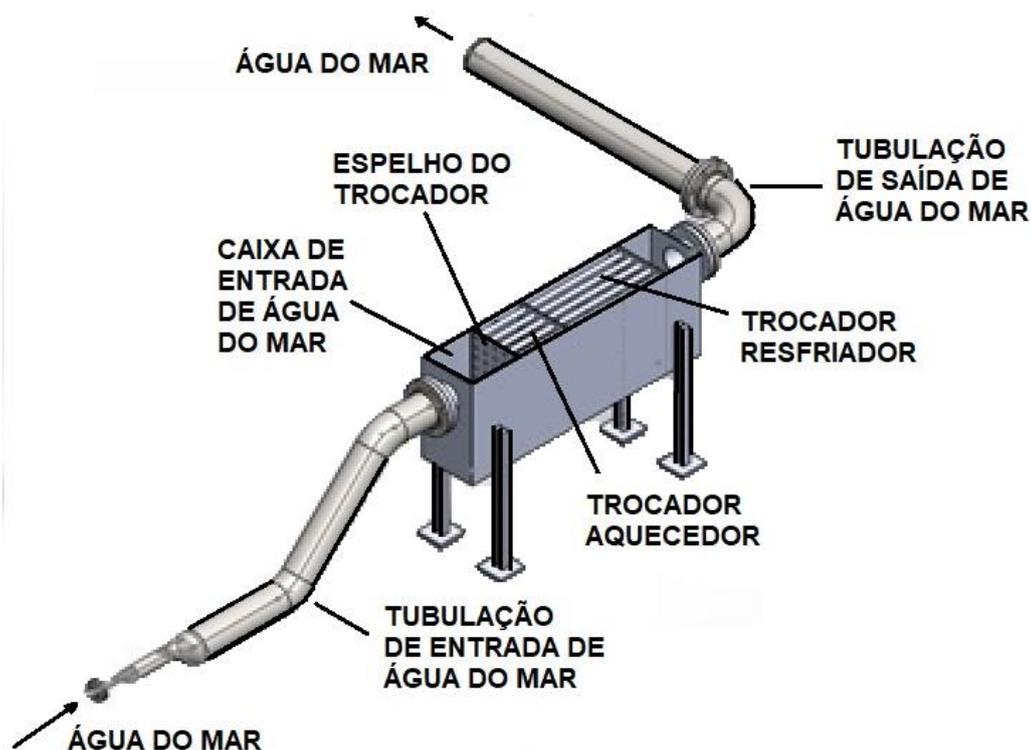


### 2.1.2 Protótipo de bancada

Para reproduzir as condições de bioincrustação por proliferação de cracas foi elaborado um protótipo em escala reduzida, de bancada, para permitir a circulação de água do mar e permitir a realização de experimentos no seu interior com o uso de radiações ultrassônicas (VASCONCELOS, et al., 2015). A Figura 2 apresenta uma vista isométrica do referido protótipo. Uma bomba centrífuga submersa é encarregada de recalcar água do mar através do protótipo, composto de uma tubulação de entrada, uma caixa de entrada de água, um trocador de calor casco-tubo para aquecer a água do mar, simulando um condensador de vapor; um trocador de calor casco-tubo para resfriar a água na saída do protótipo e; uma tubulação de saída. Na confecção da tubulação de entrada teve-se o cuidado de se reproduzir trechos com curvaturas semelhantes à instalação em escala industrial. Dentro da caixa de entrada de água no trocador teve-se a preocupação de se instalar um dispositivo de aquecimento de água, visando a obtenção de condições de temperatura para a reprodução de cracas.

Este protótipo de bancada foi instalado em um local às margens do oceano Atlântico, numa região praieira na cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco – Brasil.

Figura 2 – Isométrico do protótipo em escala de bancada utilizado para simular as condições de reprodução de cracas e realização de testes com técnicas ultrassônicas



## 2.2 Propagação das ondas ultrassônicas

### 2.2.1 Tipos de ondas

Entender como as ondas sonoras são criadas e como elas se propagam através dos materiais é importante para a compreensão dos princípios básicos de aplicação do ultrassom (HOSKINS, P.; MARTIN, K.; THRUSH, 2010). O som é criado por vibrações em um material que faz as partículas do material oscilarem. Essas vibrações podem ser transferidas para materiais adjacentes, como o ar, causando as mesmas oscilações nesse material. Isso cria uma onda sonora que continua a viajar até que a energia se dissipe totalmente

As partículas de um meio onde as ondas sonoras propagam-se oscilam na direção do deslocamento longitudinal da onda sonora (Figura 3), ou perpendicularmente à direção do percurso, dando origem a uma onda transversal (Figura 4). A propagação de ondas através de um material causa oscilações das partículas no material e, ao fazê-lo, as partículas em uma área se moverão em direção, uma à outra, causando uma região de compressão - aumento da pressão e, em outra área as partículas terão afastando-se, causando uma região de rarefação - pressão reduzida.

Figura 3 – Esquema ilustrativo da distribuição de moléculas em ondas longitudinais

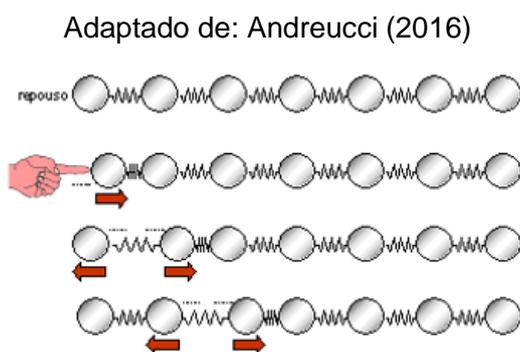
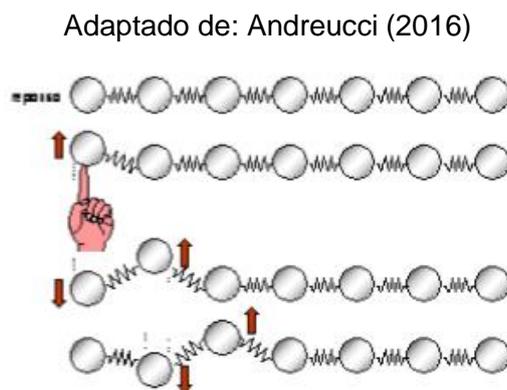


Figura 4 – Esquema ilustrativo da distribuição de moléculas em ondas transversais



As zonas de compressão e de diluição movem-se através do corpo de prova com uma certa velocidade denominada longitudinal, de acordo com a Equação (1):

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho \cdot (1-\mu) \cdot (1-2\mu)}} \quad (1)$$

Em que E é o módulo de elasticidade de Young e  $V_L$  é a constante de Poisson (TROMBINI, 2015).

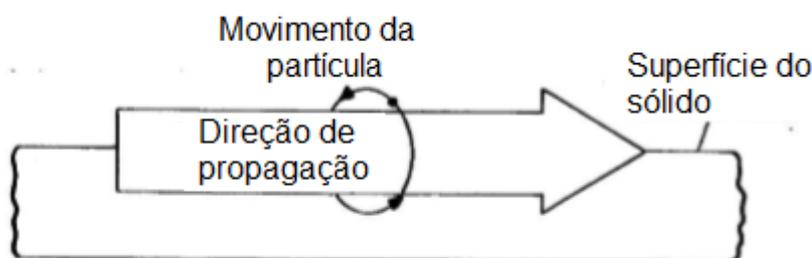
A velocidade de onda transversal é aquela na qual as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação longitudinal. Neste caso, observa-se que os planos das partículas se mantêm na mesma distância um do outro, movendo-se apenas perpendicularmente à direção longitudinal. A velocidade transversal do som também é uma constante do material. Da mesma forma anterior, a velocidade de propagação de uma onda transversal pode ser calculada em função das características físicas de um material, de acordo com a Equação 2 (SANTIN, 2003):

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{2\rho \cdot (1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

Em que G é o módulo de cisalhamento.

Outros tipos ondas, consideradas secundárias, mas muito importante para o controle de incrustações em chapas metálicas são as ondas superficiais. São assim chamadas, pela característica de se propagarem na superfície dos materiais. Sua vibração é uma combinação dos modos de vibração longitudinal e transversal. Segundo Andrino (2007) elas dividem-se em: **Ondas de Rayleigh** - As quais se apresentam em movimento elíptico e se propagam exclusivamente na superfície do sólido em movimento elíptico (Figura 5), cuja espessura é maior que o próprio comprimento de onda. A velocidade de propagação das ondas de Raleigh é aproximadamente 10% inferior a velocidade de uma onda transversal, considerando o mesmo material de ensaio.

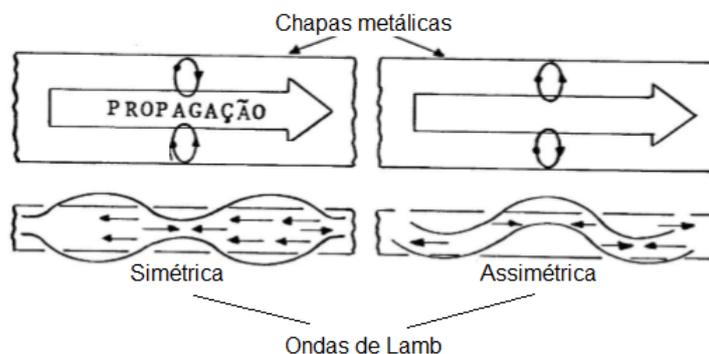
Figura 5 – Esquema com a forma de propagação elíptica das ondas superficiais de Rayleigh



**Ondas de Love** - Propagam-se na superfície do material, sem componente normal. Apresentam um movimento paralelo à superfície, e transversal em relação à direção de propagação do feixe de ondas longitudinais. São uma espécie de ondas transversais de superfície. Sua aplicação restringe-se à inspeção de camadas finas de materiais que recobrem outros materiais (por exemplo, chapas galvanizadas ou com eletrodeposição).

**Ondas de Lamb** - Quando a espessura do material é igual ou aproximadamente igual ao comprimento de onda, tem-se as ondas de Lamb. Elas também podem ser responsáveis pelo movimento perpendicular à superfície do material, podendo ser simétrica ou assimétrica conforme mostra a Figura 6:

Figura 6 – Esquema com as formas de propagação de ondas de Lamb simétricas e assimétricas



Num ensaio ultrassônico de materiais com ondas superficiais, como é o de um possível controle de incrustações, a propagação das ondas principais, como as longitudinais ou transversais, devem surgir paralelas às superfícies expostas à bioincrustação. Deve-se ajustar as condições de comprimento e espessura da chapa metálica para o de propagação máxima das ondas pelos transdutores. Somente assim, as ondas superficiais poderão atuar em uma área maior e proporcionar uma maior razão potência elétrica/área sem bioincrustação. Portanto, deve-se atentar para a associação das ondas longitudinais e ondas superficiais.

### 2.2.2 Técnica de ultrassom na inibição de *biofouling*

Foram realizados testes para comprovar e quantificar os efeitos de inibição da bioincrustação sobre as superfícies metálicas em contato com água do mar no interior do protótipo. O referido protótipo foi instalado em um local às margens do oceano Atlântico, numa região praieira localizada na cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco – Brasil. Uma

temperatura média de 31°, associada ao aquecimento das águas durante o bombeamento e a troca de calor das águas com o próprio meio ambiente permitiram dispensar os circuitos de aquecimento e resfriamento das águas para a obtenção de um ambiente favorável à manutenção de bioincrustação.

Os testes realizados com o auxílio do protótipo foram de dois tipos. Numa primeira fase procurou-se constatar o efeito de inibição das ondas ultrassônicas sobre a bioincrustação visualmente e com auxílio de um microscópio. Para isto, manteve-se dentro da caixa de entrada de água do mar, do protótipo, duas placas recém-infestadas de cracas, para aumentar a produção de larvas, e uma placa livre para servir de testemunha. Também foi instalada, nesta caixa de entrada de água, uma placa conectada a um transdutor ultrassônico normal (comercial) de 50 W (Figura 7). Todas as placas foram mantidas submersas por 30 dias.

Figura 7 – Vista parcial da parte superior da caixa de água de entrada do protótipo instalado no Catamaran: 1) placa testemunha; 2) placa conectada a um transdutor ultrassônico; 3) placas infestadas de larvas de cracas



Numa segunda fase foi realizado um teste para avaliar a relação entre a potência elétrica utilizada na alimentação do transdutor e a área protegida da incrustação ( $W/m^2$ ), pela ação do transdutor. Um transdutor ultrassônico normal de 37 kHz e 50 W (GAN et al., 2016; GUO, 2012; BRANSCOMB; RITTSCHOF, 1984) foi instalado externamente às paredes da caixa de entrada

de água do mar do protótipo (Figura 8). Nesta fase também foi mantido o teste da placa testemunha juntamente com placas infestadas e uma placa conectada a um transdutor ultrassônico. A ação protetora das ondas ultrassônicas foi observada pela comparação das áreas livres de *biofouling* nas paredes internas do protótipo.

Figura 8 – Transdutores ultrassônicos instalados: um instalado na parede externa da caixa de entrada de água do mar no protótipo de bancada instalado no Catamaran; outro na placa metálica na parte superior da caixa de entrada de água



### 3 Resultados

Nesta etapa dos experimentos precisou-se quantificar por área total da placa os efeitos da radiação ultrassônica sobre a infestação de cracas e animais marinhos nas placas colocadas na caixa de entrada do protótipo, para que os resultados destes experimentos não tivessem tantas dificuldades de serem avaliados como os de Gan e colaboradores (2016). Foi confeccionada uma moldura para uma malha quadriculada a qual permitiu quantificar a área ocupada pelas cracas e animais marinhos sobre as placas testemunha e ligada ao transdutor, como se pode observar nas Figuras 9 e 10. Na Figura 9 observa-se a placa testemunha cujo grau de infestação foi alto, ocupando praticamente toda a área disponível. Na Figura 10 observa-se a placa que esteve ligada permanentemente ao transdutor ultrassônico. A referida placa mostra uma área infestada por cracas e animais marinhos menor que na placa testemunha.

Figura 9 – Placa testemunha submetida a um método de quantificação de sua área infestada de cracas e vegetais com auxílio de um quadro com tela graduada

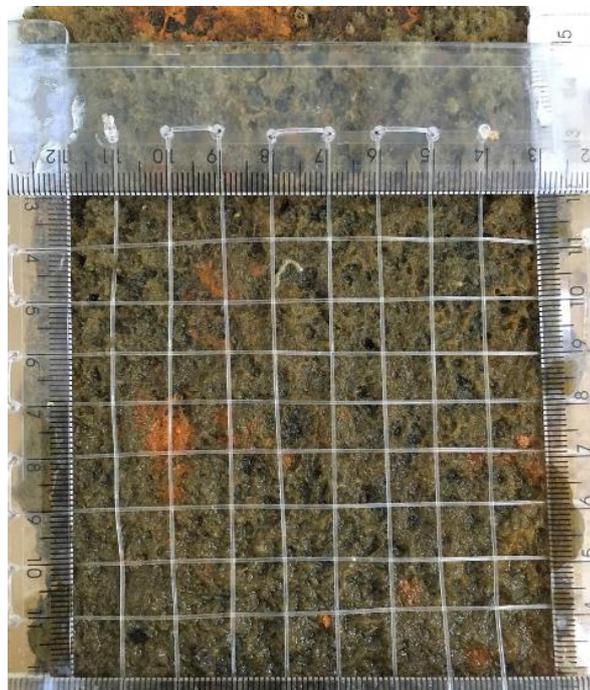
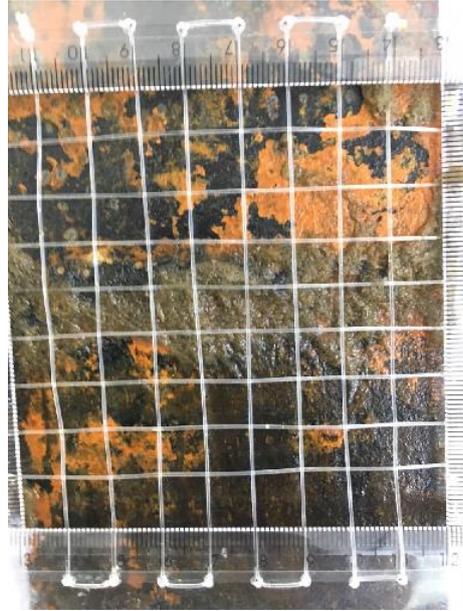
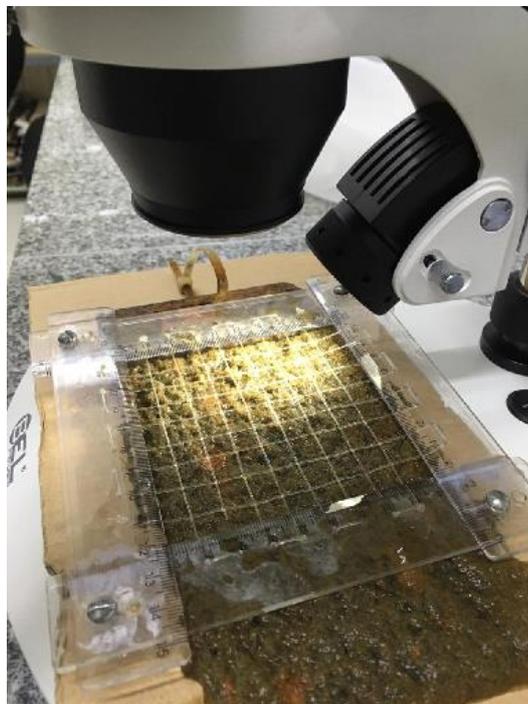


Figura 10 – Placa que esteve conectada ao transdutor ultrassônico e submetida à técnica de quantificação de sua área infestada por cracas e vegetais marinhos



As placas submetidas à quantificação também foram levadas ao microscópio para serem observadas com maior nitidez. A Figura 11 ilustra uma das placas submetidas à quantificação sob as lentes de um microscópio.

Figura 11 – Uma das placas submetidas à uma infestação por cracas e vegetais marinhos sendo analisadas por microscópio



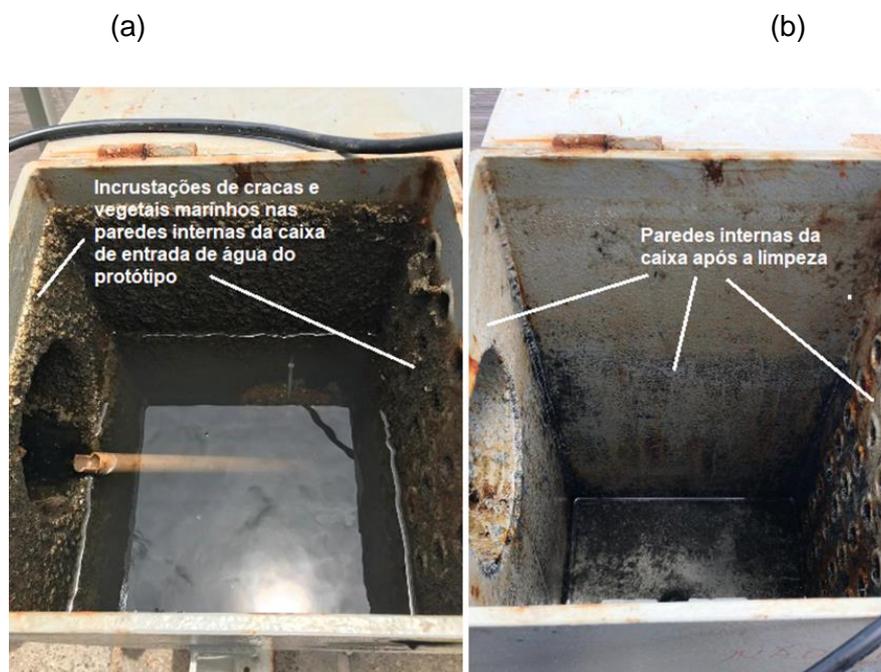
Quanto aos resultados da quantificação da incrustação na área total das placas observou-se os seguintes percentuais das áreas infestadas:

- Lado A da placa testemunha: 94%
- Lado B da placa testemunha: 83%
- Um único lado da placa conectada ao transdutor ultrassônico sendo de 9,09% de infestação de sua área estimando-se uma eficiência de proteção de 90,9%.

Nesta segunda etapa dos experimentos, para auxiliar na ocorrência de uma possível incrustação de cracas sobre as paredes internas da caixa d'água do protótipo, foram colocadas duas placas metálicas previamente incrustadas no interior da caixa d'água.

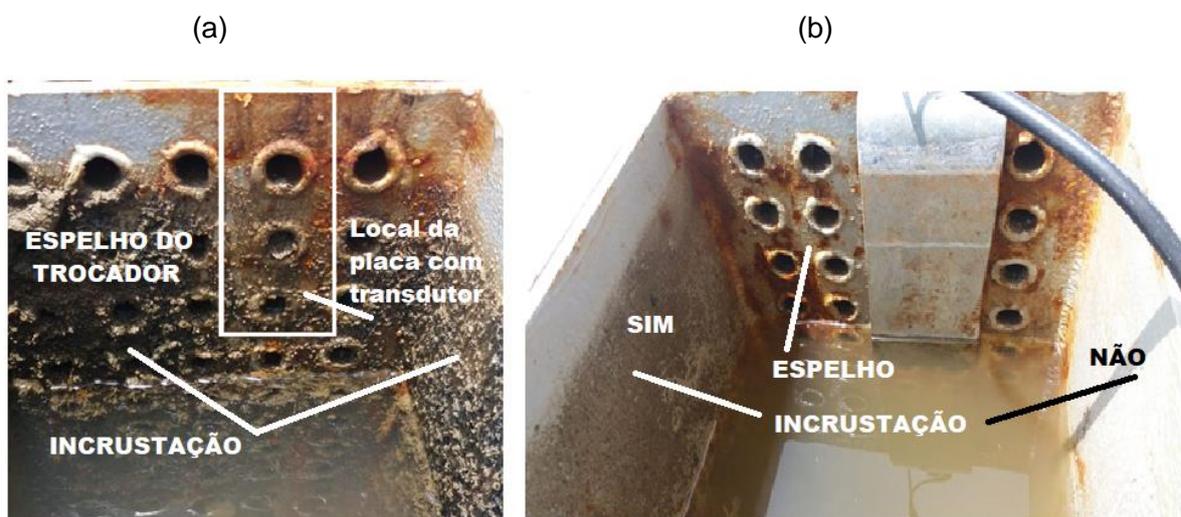
A Figura 12 mostra a caixa de entrada de águas oceânicas do protótipo de bancada, instalado no Catamaran, antes e após a limpeza da mesma para iniciar os experimentos nesta segunda fase. A Figura 12(a) mostra uma vista parcial da caixa de entrada de águas oceânicas do protótipo de bancada, após a realização dos experimentos anteriores, sem a instalação de um transdutor nas paredes externas da referida caixa. A Figura 12(b) mostra a mesma caixa apresentada pela Figura 12(a), após a realização da segunda fase dos experimentos, quando foi instalado um transdutor de 50 W e 30 kHz na parede externa da mesma. Conforme mostram as referidas figuras pode-se observar uma considerável diferença entre os níveis de incrustações nas duas diferentes condições da caixa.

Figura 12 – Aspecto das paredes internas da caixa de entrada de águas oceânicas do protótipo de bancada: (a) Após os experimentos da primeira fase do protótipo no Catamaran; (b) Após a limpeza para início da segunda fase dos experimentos



A Figura 13 faz uma apresentação de como ficou o espelho do trocador de calor que simulou o condensador da usina termelétrica nos experimentos.

Figura 13 – Aspecto das paredes internas da caixa de entrada de águas oceânicas do protótipo de bancada e em especial para o espelho do condensador: (a) após a realização dos experimentos na primeira fase quando não tinha sido instalado o transdutor ultrassônico; (b) após a realização da segunda fase dos experimentos e com a instalação do transdutor na parede externa do protótipo



A Figura 13(a) mostra o lado da caixa de entrada de água na parte do espelho do feixe de tubos do trocador após os experimentos da primeira fase. Observa-se que a camada espessa de cracas e vegetação marinha apresentou-se reduzida neste local do espelho, local onde se encontrava a placa ligada ao transdutor ultrassônico. A Figura 13(b) mostra o espelho do trocador com a placa ligada ao transdutor, após esta segunda fase dos experimentos. Do lado direito, no plano da figura, o que se observa é uma infestação mínima de cracas e vegetais marinhos. Do lado esquerdo, ainda no plano da figura, não existe praticamente incrustação. Deve-se observar, ainda, que este lado é o lado onde se encontra instalado o transdutor ultrassônico no protótipo de bancada.

## 4 Conclusões

As condições de funcionamento do protótipo responderam de acordo com o dimensionamento feito utilizando a similaridade hidrodinâmica de um condensador de uma UTE. Notou-se que grande parte das bioincrustações por cracas ocorreram nos mesmos locais que o condensador de uma UTE: no espelho e caixa de entrada de água, em harmonia com a realidade. O efeito inibitório do ultrassom foi monitorado e obteve-se resultados além do esperado, tanto na placa com transdutor quanto no espelho do condensador, onde a placa estava próxima.

A técnica de ultrassom exerceu uma ação benéfica na inibição de bioincrustações em superfícies metálicas em contato com água do mar circulando em um protótipo de bancada, com transdutores de 37 kHz e 50 W. A quantificação da ação inibitória pode ser realizada em comparação entre área incrustada e área não incrustada do equipamento e placas de teste. Entre as vantagens que essa técnica apresenta destaca-se sua atuação sobre flora e fauna marinhas, mas fora do ambiente marinho, não agredindo outros animais e vegetais existentes nos oceanos.

**Agradecimentos:** Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação; NEOENERGIA; Termopernameuco; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; Universidade Católica de Pernambuco; Catamaran Tours.

## Referências

ANDRINO, M. H.. **Aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas para a medição de tensões em dutos** / Marcilio Haddad Andrino. Campinas, SP: [s.n.], 2007.

BRANSCOMB, E.F.; RITTSCHOF, D., An investigation of low frequency sound waves as a means of inhibiting barnacle settlement. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.**, 1984, Vol. 19, pp.149-154.

COLE, V. J.; GLASBY, T. M.; HOLLOWAY, M. G. Extending the generality of ecological models to artificial floating habitats. **Marine Environmental Research** v. 60, p. 195–210, 2005.

COUTINHO, R. **Ecologia marinha aplicada: a bioincrustação em estruturas construídas pelo homem e como vetor de introdução de espécies.** 2009. Disponível em: <[http://www.seb-ecologia.org.br/2009/resumos\\_professores/ricardo\\_coutinho.pdf](http://www.seb-ecologia.org.br/2009/resumos_professores/ricardo_coutinho.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2017.

FLEMMING, H. C. **Marine and Industrial Biofouling.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. 2009.

GAN, T.H.; Habibi, H.; Legg, M.; Garcia de Carellan, I.; Kappatos, V.; Tzitzilonis, V.; Selcuk, C., An acoustic antifouling study in sea environment for ship hulls using ultrasoni guided waves. **International Journal of Engineering Technologies and Management Research**, Vol. 3, No. 4(2016)14-30.

GUO, S F. **A STUDY OF ULTRASONIC EFFECTS ON THE MARINE BIOFOULING ORGANISM OF BARNACLE, AMPHIBALANUS AMPHITRITE.** 2012. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Nacional de Singapura, Singapura, 2012.

LESSER, M. P.; SHUMWAY, S. E.; CUCCI, T.; SMITH, J. Impact of fouling organisms on mussel rope culture: interspecific competition for food among suspension-feeding invertebrates. **Journal of Experimental Marine Abiology and Ecology.** V. 165, Issue1, p. 91-102, 1992.

LINDHOLDT, A.; DAM-JOHANSEN, K.; YEBRA, D.M.; OLSEN, S.M.; KIIL, S. (2015). Estimation of long-term drag performance of fouling control coatings using an ocean-placed raft with multiple dynamic rotors. **Journal of Coatings Technology Research.** 12. 975-995. 10.1007/s11998-015-9713-0.

LOHSE, D. P. Relative Strengths of Competition for Space and Food in a Sessile Filter Feeder. **The Biological Bulletin.** 203: 173–180, 2002.

MAGIN, C. M.; COOPER, S. P.; BRENNAN, A. B. Non-toxic antifouling strategies. **Materials Today**, v. 13, n. 4, p. 36–44, 2010.

Trombini, M.. **Avaliação da técnica de ultrassom phased array para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados** / Mauricio Trombini. – Campinas, SP : [s.n.],2015.

REEVE, D. M. Diagnostic Ultrasound: Physics and Equipment. **Journal of Nuclear Medicine**, v. 53, n. 6, p. 1004-1004, 2012. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/225095678\\_Diagnostic\\_Ultrasound\\_Physics\\_and\\_Equipment](https://www.researchgate.net/publication/225095678_Diagnostic_Ultrasound_Physics_and_Equipment)>. Acesso em: 19 fev. 2019.

SANTIN, J. L., **Ultrassom, Técnica e aplicação**. Proend. 2003.

VASCONCELOS, R.S.; HENAUH, R. C. S.; MOURA, A.E.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A., Strategy for a scale-up correlation in a dissolved air flotation chamber. **Chemical Engineering & Technology**, 2015, 38 (5), 813-818. DOI: 10.1002/ceat.201400665

Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), **US Naval Institute, Annapolis**, Iselin, COD, 1952

# **CAPÍTULO III**

## CONCLUSÕES GERAIS

Com base no desenvolvimento deste trabalho foi possível se chegar às seguintes conclusões gerais:

- O uso do modelo físico reduzido hidráulico para observação do comportamento dos fenômenos físicos demonstrou ser uma ferramenta de grande utilidade na solução de diversos problemas em Engenharia e Biotecnologia.

- A compreensão dos mecanismos de fixação das cracas, sobre as superfícies metálicas em contato com águas do mar, permitiu o desenvolvimento de outros mecanismos de inibição de bioincrustação pelo uso de ondas ultrassônicas, além da destruição das larvas de cracas com auxílio do fenômeno de cavitação sônica.

- A compreensão da propagação das ondas ultrassônicas através de diferentes meios (gás, líquido e sólido), principalmente em sólido, permitiu o desenvolvimento do presente trabalho, por atuarem dificultando o assentamento de organismos marinhos nas superfícies metálicas. As ondas superficiais aparentaram ser as responsáveis diretas pelos mecanismos ultrassônicos de inibição de incrustação de larvas de organismos marinhos servindo como uma solução preventiva de alta eficiência no controle de incrustações.

- Os transdutores, responsáveis pela geração de ondas ultrassônicas, devem ser otimizados em trabalhos futuros, para permitir um aumento de fluxo ultrassônico superficial, com consequente aumento de eficiência inibitória.

- Um novo modelo físico (protótipo) deverá ser elaborado para permitir, com mais precisão, a obtenção de uma correlação de potência dos transdutores por área de superfície metálica do tipo  $W/m^2$ , para o alcance dos transdutores utilizados, base para um *scale-up* do processo; assim como cálculos de dimensionamento e custo para instalação em uma estação piloto e, possivelmente, a aplicação em um condensador de UTE para observação de seu funcionamento na prática em um projeto de doutorado.