



Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Computação / Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**FERRAMENTA ASSISTIDA POR  
ULTRASSOM DE ALTA POTÊNCIA PARA A  
PREVENÇÃO DE INCRUSTAÇÃO DE  
CARBONATO DE CÁLCIO**

Lorena Leal de Oliveira Soares

TESE DE DOUTORADO

Salvador  
18 de agosto de 2023



LORENA LEAL DE OLIVEIRA SOARES

**FERRAMENTA ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE ALTA  
POTÊNCIA PARA A PREVENÇÃO DE INCRUSTAÇÃO DE  
CARBONATO DE CÁLCIO**

Esta Tese de Doutorado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe  
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Simões Soares Júnior

Salvador  
18 de agosto de 2023

---

S676 Soares, Lorena Leal de Oliveira.

Ferramenta assistida por ultrassom de alta potência para a prevenção de incrustação de carbonato de cálcio/ Lorena Leal de Oliveira Soares. – Salvador, 2023.

104f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Simões Soares Júnior.

Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Computação/Escola Politécnica, 2023.

1. Carbonato de cálcio. 2. Incrustação - controle. 3. Ultrassom. 4. Inibidor físico. I. Pepe, Iuri Muniz. II. Soares Júnior, Luiz Carlos Simões. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

---

CDD: 621.382 2



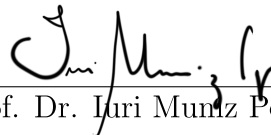
# TERMO DE APROVAÇÃO

LORENA LEAL DE OLIVEIRA SOARES

## FERRAMENTA ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE ALTA POTÊNCIA PARA A PREVENÇÃO DE INCRUSTAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada à obtenção do título de Doutor em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia.

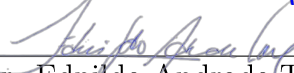
Salvador, 18 de agosto de 2023



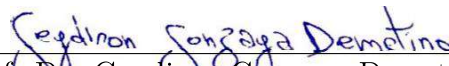
Prof. Dr. Juri Muniz Pepe



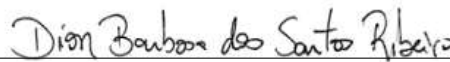
Prof. Dr. Germano Pinto Guedes



Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres



Prof. Dr. Geydison Gonzaga Demetino



Prof. Dr. Dion Barbosa dos Santos Ribeiro



## RESUMO

As incrustações de sais inorgânicos podem causar diversos danos às instalações da indústria do petróleo. Existem várias maneiras que já são empregadas para evitá-las, por exemplo, inibidores químicos e físicos. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um inibidor físico de incrustação de carbonato de cálcio assistido por ultrassom. Duas abordagens foram realizadas no trabalho: (i) pastilhas piezoelétricas coladas diretamente em um trecho de tubo e (ii) transdutores ultrassônicos do tipo Langevin acoplados em um trecho de tubo. Inicialmente foi feita uma investigação do uso de uma cerâmica piezoelétrica acoplada na parede externa de um trecho de duto preenchido com água. Nesta configuração, foram realizados testes para determinação de zonas de pressão e de condutividade com soluções de cloreto de cálcio e carbonato de sódio como precursores. Tais testes foram importantes para o estudo, pois mostraram: (i) a existência de zonas de pressão acústica, confirmando que há ação ultrassônica no trecho de tubo e (ii) a influência do ultrassom na precipitação de carbonato de cálcio, através da diminuição do tempo de indução. Apesar da baixa potência utilizada, o ultrassom foi capaz de promover a aceleração da precipitação dos cristais de carbonato de cálcio. Além disso, foram realizadas a modelagem e a simulação do arranjo montado, no *software* COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup>, de forma a confirmar o resultado obtido nos testes com a cerâmica piezoelétrica colada na parede do tubo. Na segunda abordagem, uma ferramenta ultrassônica foi desenvolvida com transdutores do tipo Langevin. Através de modelagem e simulação no *software* COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup> chegou-se à configuração de 56 transdutores distribuídos em grupos de oito por sete anéis de aço, num tubo de um metro de comprimento e 1 1/2" de diâmetro, padrão *Schedule* com 48,26 mm de diâmetro externo. Foram realizados testes com folhas de alumínio e ensaios com carbonato de cálcio em laboratório, para tal a ferramenta foi montada com três anéis. Os testes em laboratório foram realizados na linha de alta pressão do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos – NIDF, com pressões iniciais de 8 e 20 bar e com pressão final de 80 bar. Além da curva de pressão, mediu-se o tamanho médio das partículas e as massas dos corpos de prova. O material incrustado nos corpos de prova foi analisado no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Apesar da ferramenta ter sido testada com três dos sete anéis, os testes demonstraram que existe viabilidade do uso da ferramenta em poços de petróleo.

**Palavras-chave:** INCRUSTAÇÃO, CARBONATO DE CÁLCIO, INIBIDOR FÍSICO, ULTRASSOM.



## ABSTRACT

Inorganic salt scale can cause extensive damage to oil industry installations. There are several ways that are already used to avoid them, for example, chemical and physical inhibitors. This paper proposes a calcium carbonate scale physical inhibitor assisted by ultrasound. Two approaches have been taken: (i) bonded piezoelectric ceramics directly into a tube section and (ii) Langevin ultrasonic transducers coupled to a pipe section. Initially, an investigation was made of the piezoelectric ceramic use a coupled to a section external wall of pipeline filled with water. In this configuration, tests were carried out to determine pressure zones and conductivity with solutions of calcium chloride and sodium carbonate as precursors. Such tests were important for the study, as they showed: (i) the existence of acoustic pressure zones, confirming that there is ultrasonic action in the pipe section and (ii) the influence of ultrasound on calcium carbonate precipitation, by decreasing the induction time. Despite the low power used, ultrasound was able to promote the calcium carbonate crystals precipitation acceleration. In addition, assembled arrangement modeling and simulation were carried out in order to confirm the result obtained in the tests with piezoelectric ceramics glued to the tube wall. In the second approach, an ultrasonic tool was developed with Langevin-type transducers. Through modeling and simulation in the COMSOL Multiphysics® software, the configuration of 56 transducers distributed in groups of eight by seven steel rings was achieved, in a tube measuring one meter and 1 1/2" in diameter, Schedule pattern with 48.26 mm outside diameter. Tests were carried out with aluminum sheets and tests with calcium carbonate in the laboratory, for which the tool was assembled with three rings. The laboratory tests were carried out in the high-pressure line of the Interdisciplinary Center of Fluid Dynamics - NIDF, with initial pressures of 8 and 20 bar and final pressure of 80 bar. In addition to the pressure curve, the average particle size and the test specimen masses were measured. The material embedded in the specimens was analyzed using a scanning electron microscope (SEM). Despite the tool having been tested with three of the seven rings, the tests demonstrated that there is feasibility of using the tool in oil wells.

**Keywords:** SCALE, CALCIUM CARBONATE, PHYSICAL INHIBITOR, ULTRASOUND.



# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1—Introdução</b>	1
<b>Capítulo 2—Revisão Bibliográfica</b>	5
2.1 INCRUSTAÇÃO . . . . .	5
2.2 CARBONATO DE CÁLCIO . . . . .	8
2.2.1 Formação do carbonato de cálcio . . . . .	9
2.2.2 Polimorfos . . . . .	9
2.2.3 Incrustação por carbonato de cálcio . . . . .	11
2.2.4 Métodos de monitoramento do período de indução . . . . .	15
2.3 CONTROLE DE INCRUSTAÇÕES . . . . .	16
2.3.1 Inibidores químicos . . . . .	16
2.3.2 Inibidores físicos . . . . .	18
2.3.2.1 Inibidor Magnético . . . . .	18
2.3.2.2 Inibidor Eletromagnético . . . . .	19
2.3.2.3 Inibidor Ultrassônico . . . . .	21
2.4 ULTRASSOM . . . . .	22
2.4.1 Cavitação . . . . .	25
2.4.2 Ferramentas ultrassônicas . . . . .	28
2.5 POÇOS DE PETRÓLEO . . . . .	31
2.6 BOMBEIO MECÂNICO . . . . .	32
<b>Capítulo 3—Investigação do uso da cerâmica PZT acoplada em um trecho de duto</b>	35
3.1 METODOLOGIA . . . . .	35
3.1.1 Teste de conceito com hidrofone . . . . .	35
3.1.2 Teste de precipitação . . . . .	38
3.1.3 Modelagem e Simulação . . . . .	39
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	41
3.2.1 Teste de conceito com hidrofone . . . . .	41
3.2.2 Teste de precipitação . . . . .	43
3.2.3 Modelagem e simulação . . . . .	44
3.3 CONSIDERAÇÕES . . . . .	45

<b>Capítulo 4—Investigação do uso de transdutores ultrassônicos acoplados em um trecho de duto</b>	<b>47</b>
4.1 METODOLOGIA . . . . .	47
4.1.1 Modelagem e simulação . . . . .	47
4.1.2 Teste de conceito com folhas de alumínio . . . . .	51
4.1.3 Teste de conceito em laboratório de teste . . . . .	54
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	57
4.2.1 Modelagem e simulação . . . . .	57
4.2.2 Teste de conceito com folhas de alumínio . . . . .	62
4.2.3 Teste de conceito em laboratório . . . . .	64
4.2.3.1 Curvas de pressão . . . . .	64
4.2.3.2 Tamanho médio e número de partículas . . . . .	67
4.2.3.3 Análise de massa dos anéis . . . . .	70
4.2.3.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura - MEV . . . . .	72
<b>Capítulo 5—Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>75</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS . . . . .	76



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama com as principais etapas e parâmetros compreendidos na formação da incrustação. . . . .	6
2.2	Diagrama dos tipos de nucleação. . . . .	7
2.3	Nucleação homogênea. . . . .	7
2.4	Nucleação heterogênea. . . . .	8
2.5	Amostra de incrustação de carbonato de cálcio retirada de uma tubulação. . . . .	9
2.6	Polimorfos cristalinos anidros do carbonato de cálcio: (a) aragonita, (b) calcita e (c) vaterita. . . . .	10
2.7	Esquema do mecanismo da formação da incrustação do carbonato de cálcio. . . . .	12
2.8	Processo de formação da incrustação numa tubulação. . . . .	13
2.9	Incrustação de carbonato de cálcio em uma curva com 3” de diâmetro. . . . .	13
2.10	Efeito da temperatura na solubilidade do $CaCO_3$ , $P = 40$ bar. . . . .	14
2.11	Efeito do $pH$ na solubilidade do $CaCO_3$ , à $25^\circ C$ e 1 bar. . . . .	15
2.12	Resultados experimentais do método da condutividade elétrica realizado por: (a) Muryanto et al. (2012) e (b) (SHIRSATH et al., 2015). . . . .	16
2.13	Configurações de circuitos magnéticos utilizados como inibidores físicos: (a) Utilização de anel magnético em circuito aberto, (b) Utilização de dois ímãs cilíndricos em circuito aberto e (c) Utilização de ímãs de quatro blocos em circuito fechado. . . . .	18
2.14	Oleoduto: (a) sem o tratamento com campo magnético e (b) após a inserção do dispositivo magnético . . . . .	19
2.15	Diagrama de um dispositivo eletromagnético do tipo solenóide utilizado como inibidor físico. . . . .	20
2.16	Imagens da estrutura das partículas (a) sem tratamento eletromagnético e (b) com tratamento eletromagnético. . . . .	20
2.17	Imagens da estrutura das partículas (a) sem tratamento ultrassônico e (b) com tratamento ultrassônico. . . . .	22
2.18	Espectro sonoro. . . . .	23
2.19	Transdutor de alta potência composto por duas cerâmicas piezoelétricas em paralelo. . . . .	24
2.20	Diagrama em corte do transdutor de Langevin. . . . .	24
2.21	Cavitação ultrassônica. . . . .	26
2.22	Ilustração do teste com folha de alumínio. . . . .	26
2.23	Ilustração do teste com anéis cerâmicos cobertos com grafite de lápis. . . . .	27
2.24	Modelos de hidrofones comerciais: (a) Pb-502 PPB Megasonics e (b) HNR-series <i>Needle Hydrophone</i> . . . . .	28

2.25	Diagrama da ferramenta desenvolvida por Mullakaev, Abramov e Abramova (2015). . . . .	30
2.26	Diagrama da ferramenta desenvolvida por Jr e Sharma (1997). . . . .	30
2.27	Diagrama do poço identificando as partes da ferramenta desenvolvida por Lehman et al. (2007). . . . .	31
2.28	Esquema das camadas de revestimento de um poço de petróleo característico.	32
2.29	Composição do bombeio mecânico com hastes. . . . .	33
3.1	Projeto com várias cerâmicas piezoelétricas fixadas na parede do tubo. . .	35
3.2	Trecho de tubo de aço carbono com a cerâmica piezoelétrica acoplada. . .	36
3.3	Sensor de pressão acústica utilizado. . . . .	37
3.4	Ilustração do procedimento de testes de mapeamento da pressão acústica no interior do tubo (a) em frente e (b) perpendicular à cerâmica piezoelétrica. . . . .	37
3.5	Suporte de deslocamento do sensor com régua centimétrica fixada. . . . .	38
3.6	(a) condutivímetro e (b) arranjo experimental dos testes de condutividade	39
3.7	Desenho tridimensional da ferramenta com a cerâmica PZT acoplada. . .	40
3.8	Sinal de US medido com hidrofone sem tratamento prévio obtido utilizando o osciloscópio (a) e sua transformada de Fourier (b). . . . .	41
3.9	Curva com dados brutos, em azul, e função senoidal ajustada, em vermelho.	42
3.10	Valores RMS das medidas realizadas ao longo dos eixos do tubo. . . . .	42
3.11	Resultados dos testes de condutividade. . . . .	43
3.12	Curva da frequência de ressonância obtida pelo ensaio no COMSOL Multiphysics®. . . . .	44
3.13	Perfil de pressão acústica na seção transversal do tubo. . . . .	45
4.1	Imagem do transdutor adquirido (a) e modelo no COMSOL Multiphysics® (b) . . . . .	48
4.2	Ferramenta projetada no <i>software</i> COMSOL Multiphysics®. . . . .	49
4.3	Disposição dos transdutores nos anéis de fixação da ferramenta. . . . .	50
4.4	Projeto da ferramenta para investigação da distância entre os anéis. . . .	50
4.5	Projeto final da ferramenta ultrassônica de aceleração de precipitação. . .	51
4.6	<i>Setup</i> experimental para teste com folha de alumínio da ferramenta ultrassônica: (a) Vista superior da ferramenta. e (b) Disposição das amostras de folha de alumínio. . . . .	52
4.7	Fita erodida após ensaio e área pintada da região erodida pelo ultrassom.	53
4.8	Linha de alta pressão do NIDF, com destaques para a ferramenta ultrassônica e o ponto de mistura dos reagentes. . . . .	54
4.9	Válvula agulha (seta vermelha) utilizada para pressurizar a linha e transdutores de pressão (setas verde e azul). . . . .	55
4.10	Ferramenta ultrassônica: (a) com três anéis centrais montados e (b) com destaque para os flanges de acoplamento na linha. . . . .	55
4.11	Anéis utilizados como corpos de prova (a) e posicionamento dos anéis na linha (b). . . . .	56

4.12	Curva de impedância do transdutor ultrassônico no COMSOL Multiphysics® <sup>®</sup> , em vermelho, e curva de impedância experimental do transdutor ultrassônico com TRZ, em azul. . . . .	58
4.13	Gráficos de zonas de pressão referente às seis simulações realizadas para diferentes espessuras de parede. . . . .	59
4.14	Gráficos de zonas de pressão da ferramenta com (a) 1 a 4 transdutores e (b) 5 a 8 transdutores. . . . .	60
4.15	Gráficos de zonas de pressão referente às oito simulações realizadas para diferentes distâncias entre os anéis. . . . .	61
4.16	Gráfico de zonas de pressão referente ao resultado da simulação da ferramenta. . . . .	62
4.17	Protótipo de ferramenta de prevenção de incrustação. . . . .	62
4.18	Resultados após testes de erosão. . . . .	63
4.19	Gráfico com as curvas de erosão das folhas de alumínio. . . . .	64
4.20	Gráfico com as curvas do diferencial da pressão na válvula em cada um dos ensaios. . . . .	65
4.21	Entrada da válvula agulha após ensaio com ultrassom. . . . .	66
4.22	Gráfico da contagem de partículas para os ensaios com pressão inicial de 20 e 8 bar com e sem ultrassom. . . . .	67
4.23	Distribuição do tamanho médio das partículas para os ensaios realizados a uma pressão inicial de 20 bar. . . . .	68
4.24	Distribuição do médio tamanho das partículas para os ensaios realizados a uma pressão inicial de 8 bar. . . . .	69
4.25	Massa média depositada nos corpos de prova da linha para os ensaios com e sem ultrassom e com pressões iniciais de 20 e 8 bar. . . . .	71
4.26	Imagens de MEV dos anéis 1,3 e 6 da linha nos ensaios realizados com pressão inicial de 20 Bar na presença do ultrassom ( <i>a</i> , <i>c</i> e <i>e</i> ) e na ausência ultrassom ( <i>b</i> , <i>d</i> e <i>f</i> ) . . . . .	72
4.27	Imagens de MEV dos anéis 1,3 e 6 da linha nos ensaios realizados com pressão inicial de 8 Bar na presença do ultrassom ( <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i> ). . . . .	73



## LISTA DE TABELAS

2.1	Constantes de solubilidade dos polimorfos do carbonato de cálcio à temperatura de 25°C. . . . .	11
2.2	Exemplos de incrustações e seus inibidores químico. . . . .	17
4.1	Simulações realizadas variando a espessura da parede do tubo e do anel de fixação dos transdutores. . . . .	49
4.2	Dados a serem coletados nos testes com folha de alumínio. . . . .	53
4.3	Nomenclatura dos ensaios realizados na linha de alta pressão. . . . .	57
4.4	Resultados dos testes de erosão da folha de alumínio. . . . .	63
4.5	Taxa de crescimento da pressão entre 60 e 80 bar. . . . .	66
4.6	Massa depositada em cada anel da linha para os experimentos E3US20, E4US20, E5NUS20, E6US8 e E7NUS8. . . . .	70
4.7	Massa média acumulada nos pontos de análise para 20 bar de pressão inicial. . . . .	70
4.8	Massa média acumulada nos pontos de análise para 8 bar de pressão inicial. . . . .	71



## LISTA DE ABREVIATURAS

BM	bombeio mecânico
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DETPMP	diethylene triamine penta (ácido dietilenotriamina pentametileno fosfônico)
EDTA	ethylenediamine tetraacetic acid (ácido etilenodiamina tetra-acético)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NIDF	Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos
PML	Perfectly Matched Layer
PPCA	polyphosphino carboxylic acid (ácido fosfino policarboxílico)
PUT	Power Ultrasonics Transducers (Transdutores Ultrassônicos de Potência)
PZT	titanato zirconato de chumbo
RMS	root mean square (valor quadrático médio)
SEM	Scanning Electron Microscope
SHMP	sodium hexametaphosphate (hexametáfosfato de sódio)
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
US	ultrassom





## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu m$	micrômetro
$cm$	centímetro
$c^E$	constante de rigidez mecânica
$D$	densidade de carga elétrica
$e$	matriz do coeficiente piezelétrico
$e^t$	transposta da matriz do coeficiente piezelétrico
$E$	campo elétrico
$\epsilon^S$	permissividade elétrica
$g$	gramas
$h$	horas
$HCl$	ácido clorídrico
$HF$	ácido fluorídrico
$Hz$	Hertz
$kHz$	kiloHertz
$L$	litro
$m$	metro
$mg$	miligrama
$mL$	mililitro
$mm$	milímetro
$\mu m$	micrômetro
$\omega$	Ohm
$s$	segundo
$S$	deformação mecânica
$T$	tensão mecânica
$t_{ind}$	tempo de indução
$t_{tr}$	tempo necessário para atingir a nucleação de estado estacionário
$t_n$	tempo de nucleação
$t_\sigma$	tempo necessário para o núcleo crítico se tornar experimentalmente detectável
$W$	Watt
$W_o$	ângulo de fase



## Capítulo

# 1

## INTRODUÇÃO

É sabido que as incrustações inorgânicas que ocorrem na indústria petrolífera trazem diversos malefícios ao setor. Muitos são os locais onde elas podem se depositar, tais como tubulações de produção, bombas, válvulas, equipamentos de fundo de poço ou na própria rocha reservatório (próximo ao poço produtor). Esta situação gera problemas que vão de bloqueios do fluxo na linha (reduzindo a produção de óleo) a paradas para intervenções, causando perdas sensíveis de capital (ABIB, 2015; KAMAL et al., 2018; MORAIS et al., 2020).

As incrustações mais comuns são: sulfato de bário, sulfato de cálcio, sulfato de estrôncio, carbonato de cálcio e carbonato de magnésio. Elas ocorrem devido à baixa solubilidade destes sais em água.

Muito tem-se pesquisado a respeito de incrustações por carbonato de cálcio e esses estudos geram interesse nas empresas que exploram os campos do pré-sal no Brasil, já que o mesmo é formado por rochas-reservatório predominantemente carbonáticas (VIANA et al., 2015). A precipitação do carbonato é diretamente influenciada pela mudança de temperatura, pressão e pH do sistema.

O controle de incrustação pode ser feito de forma preventiva através de inibidores químicos ou físicos. O custo da prevenção é mais baixo, quando comparado ao custo de remediar no momento em que já existe a incrustação, pois as medidas corretivas necessitam de paradas da linha. De acordo com Crabtree et al. (1999), os custos para a indústria, referentes à correção de incrustação, ultrapassam centenas de milhões de dólares, então, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de prevenção, de forma a inibirem as incrustações, que sejam eficazes. Os inibidores químicos são bastante difundidos, entretanto o uso de substâncias químicas altera de forma significativa as propriedades químicas e físicas da solução (XIAOKAI; CHONGFANG; YONGCHANG, 2005). A vantagem do uso de inibidores físicos, com relação aos químicos, se dá pela eliminação do uso de ácidos ou substâncias perigosas, reduzindo custo de operação e trazendo benefício para o meio

ambiente (HELAL et al., 2018).

Dentre os inibidores físicos, o ultrassônico tem sido bastante difundido e age, principalmente, na fase da nucleação e do crescimento dos cristais. Apesar do ultrassom ser um inibidor de incrustação promissor, muitas pesquisas ainda estão sendo desenvolvidas no âmbito laboratorial. Além disso, os equipamentos quando desenvolvidos são voltados principalmente para limpeza, ou seja, desincrustação.

Neste contexto, pressupõe-se que é possível, utilizando uma ferramenta ultrassônica no fundo do poço, com potência e características adequadas, prevenir a formação de incrustação em toda a coluna de produção. Esta ferramenta seria capaz de proteger tanto a coluna quanto todas as demais ferramentas que possibilitam a produção do petróleo.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral projetar e desenvolver uma ferramenta assistida por ultrassom de alta potência para a prevenção de incrustação de carbonato de cálcio que pode ser utilizado em poços de petróleo.

Duas abordagens de sistemas para precipitação de carbonato de cálcio assistido por ultrassom foram avaliadas: uma delas baseada em cerâmicas piezoelétricas acopladas no tubo e a outra baseada no uso de transdutores ultrassônicos do tipo Langevin acoplados ao tubo. Sendo assim, os objetivos específicos foram subdivididos de acordo com as abordagens utilizadas.

Cerâmicas acopladas no tubo:

- Modelagem e simulação no COMSOL Multiphysics®;
- Montagem do protótipo da ferramenta;
- Determinação das zonas de pressão com hidrofone;
- Ensaio de precipitação de carbonato de cálcio.

Transdutores do tipo Langevin acoplados no tubo:

- Modelagem e simulação no COMSOL Multiphysics®;
- Montagem do protótipo da ferramenta;
- Determinação das zonas de pressão com folhas de alumínio;
- Ensaio de precipitação de carbonato de cálcio.

Este trabalho consta de cinco capítulos, o primeiro é a presente introdução, onde foi possível apresentar uma visão geral do problema a ser abordado e dos objetivos do trabalho.

No segundo capítulo está a revisão bibliográfica. Nele foram abordados os pontos mais importantes para entendimento do tema proposto. Iniciou-se o capítulo explanando sobre a formação de incrustações e uma revisão sobre o carbonato de cálcio. Em seguida, discorreu-se sobre os métodos utilizados para prevenir incrustação, uma breve explanação sobre transdutores ultrassônicos e ferramentas ultrassônicas e, por fim, poços de petróleo e bombeio mecânico.

O terceiro capítulo se refere à primeira abordagem utilizada no trabalho: Investigação do uso de cerâmica piezoelétrica acoplada em um trecho de duto. Este capítulo é subdividido em metodologia, resultados e discussões e considerações.

O quarto capítulo se refere à segunda abordagem utilizada no trabalho: Investigação do uso de transdutores ultrassônicos acoplados em um trecho de duto. Este capítulo é subdividido em metodologia e resultados e discussões.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões dos experimentos realizados e os próximos passos do trabalho.



*Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica. Nele serão abordados os pontos mais importantes para entendimento do tema proposto e uma pequena discussão sobre ferramentas ultrassônicas.*

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INCRUSTAÇÃO

A incrustação é o processo de deposição e posterior adesão de materiais sólidos e insolúveis na parede da tubulação ou em equipamentos. Essas incrustações ocorrem após mudanças nas condições ambientais: pressão, temperatura e química da água. Um problema relacionado à incrustação, na indústria do petróleo, é a redução da área da seção transversal da tubulação, o que posteriormente pode vir a ocasionar bloqueio da linha. Para resolver a baixa na produção ou mesmo interrupção da mesma devido a esse bloqueio, faz-se necessário uma intervenção na linha e isso demanda altos custos.

Incrustações inorgânicas ocorrem quando sais inorgânicos precipitam da solução devido a uma supersaturação de íons após águas incompatíveis serem misturadas. Um exemplo dessa mistura é a água de formação e a água de injeção. Alterações físicas e químicas também podem fazer com que a precipitação ocorra, pois alteram o equilíbrio da água de formação e muitas vezes a formação de incrustação também está associada com o aumento da água de produção (MARQUES et al., 2001; KALFAYAN, 2008).

Frota et al. (2013), compilou informações que mostram que a água de formação associada à produção de petróleo contém uma grande concentração de íons cloreto ( $Cl^-$ ), íons sódio ( $Na^+$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), íons cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ), bário ( $Ba^{2+}$ ), potássio ( $K^+$ ) e estrôncio ( $Sr^{2+}$ ). As incrustações mais comuns encontradas durante a produção de petróleo são sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), sulfato de bário ( $BaSO_4$ ), Sulfato de estrôncio ( $SrSO_4$ ), carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ).

As incrustações inorgânicas da indústria do petróleo podem ser divididas em independentes do pH (já que não dependem tanto do pH da salmoura), como as incrustações

de sulfato de bário ( $BaSO_4$ ) e de sulfato de estrôncio ( $SrSO_4$ ), e sensíveis ao pH (a tendência de incrustar é influenciada pelo pH da salmoura), tais como as de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e as de carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ) (KAN; TOMSON, 2012).

De acordo com ABIB (2015), para que a incrustação ocorra, existem três passos: (i) supersaturação da solução, (ii) nucleação e (iii) crescimento dos cristais e adesão. Esses passos são influenciados por fatores termodinâmicos como temperatura, pressão e pH, sendo que deve haver um tempo de contato entre a solução e os núcleos formados. A Figura 2.1 apresenta um diagrama com as principais etapas e parâmetros compreendidos na formação da incrustação.

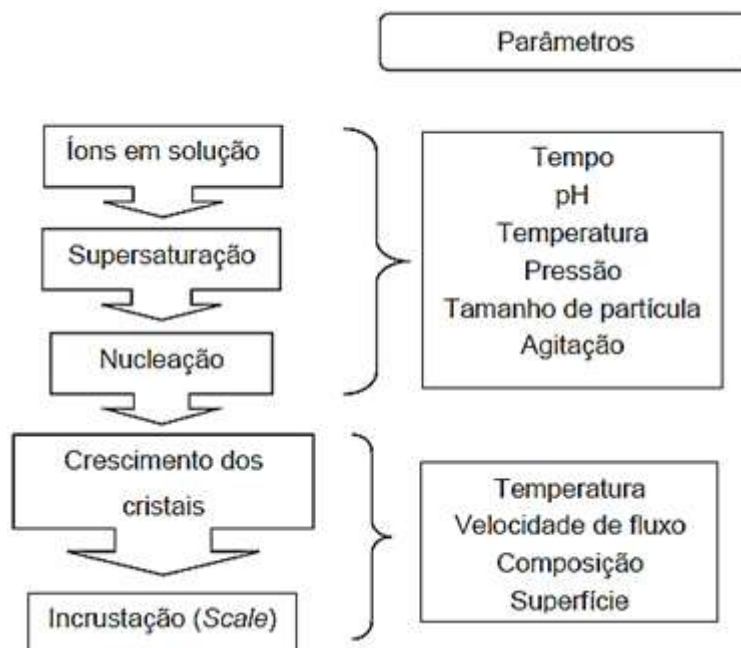


Figura 2.1: Diagrama com as principais etapas e parâmetros compreendidos na formação da incrustação.

Fonte: (ABIB, 2015)

A solubilidade de um soluto é a sua dissolução em um solvente à uma determinada temperatura. Para que ocorra uma supersaturação, o soluto deve estar dissolvido no solvente acima da sua capacidade de solubilidade, tornando-se uma solução instável. Além disso, deve haver agitação da solução, associada à variação de temperatura, pressão e pH.

Na formação de incrustações, a supersaturação é a primeira causa e ocorre por mudanças na temperatura, pressão, pH ou na concentração de íons na solução. O aumento da supersaturação faz com que o sistema passe a ser termodinamicamente instável e a precipitação ocorra.



A partir de uma solução supersaturada ocorre a nucleação, fenômeno que permite a formação de material cristalizado capaz de sustentar a fase de crescimento dos cristais.

A nucleação é dividida em duas partes: (i) nucleação primária, que independe da formação anterior de material cristalino, e (ii) nucleação secundária, que utiliza um cristal pré-existente para a formação de novos cristais. Um diagrama com os dois tipos de nucleação pode ser observado na Figura 2.2.

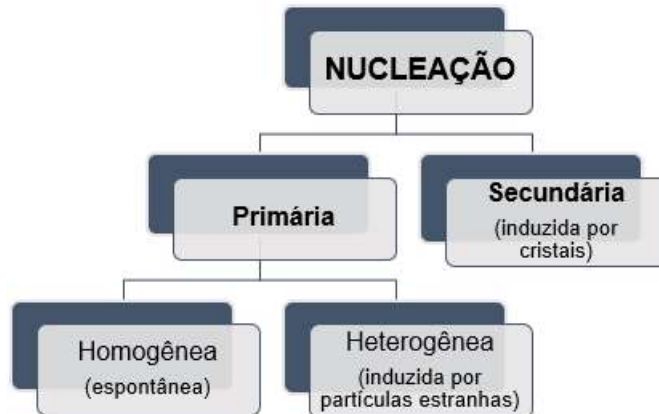


Figura 2.2: Diagrama dos tipos de nucleação.  
Fonte: (MULLIN, 2001)

A nucleação primária, como dito anteriormente, ocorre independente de cristais pré-existentes na solução e é subdividida em: (i) homogênea e (ii) heterogênea.

De acordo com Crabtree et al. (1999), a nucleação homogênea (Figura 2.3) ocorre espontaneamente a partir da formação de aglomerados instáveis de átomos. Pequenos grãos de cristais vão sendo formados e aumentam de tamanho conforme novos íons são atraídos para imperfeições em superfície através de adsorção. Em seguida esses cristais depositam-se numa superfície. Um alto grau de supersaturação faz com que a formação de um grão de cristal estimule o crescimento da incrustação, tal qual um catalisador.

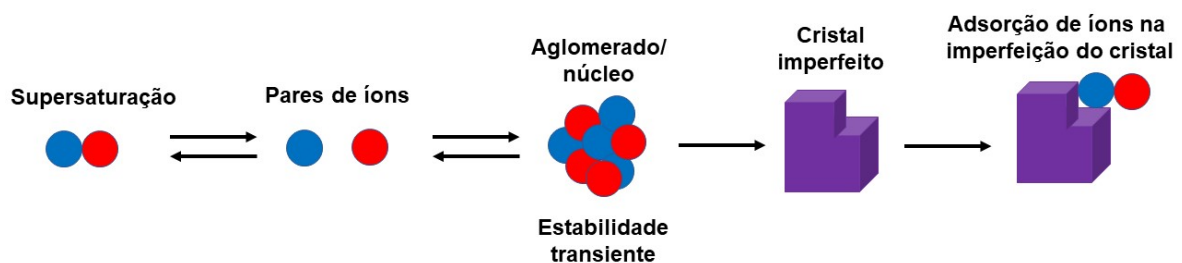


Figura 2.3: Nucleação homogênea.  
Fonte: Adaptado de (CRABTREE et al., 1999)

Já na nucleação heterogênea (Figura 2.4) o crescimento dos cristais se inicia numa superfície limite já existente, tais como defeitos da superfície, rugosidade da tubulação ou perfurações nos revestimentos de produção. Além disso, o regime turbulento também é um ótimo catalisador de depósitos de incrustações.

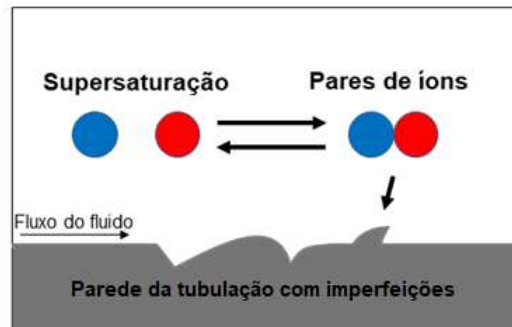


Figura 2.4: Nucleação heterogênea.  
Fonte: Adaptado de (CRABTREE et al., 1999)

A nucleação secundária é induzida pela presença de partículas ou cristais da própria substância na solução e necessita de um menor grau de supersaturação.

Após os núcleos ultrapassarem um tamanho crítico, ou seja, tornarem-se estáveis, começam a crescer a tamanhos visíveis. Este se dá a partir da adição de novos íons no arranjo cristalino, formando um macrocristal. E por fim, os macrocristais formam um filme e depositam na superfície, formando uma incrustação (BELLO, 2017; MPELWA; TANG, 2019).

## 2.2 CARBONATO DE CÁLCIO

O carbonato de cálcio é um sal inorgânico responsável por uma das incrustações mais recorrentes na indústria do petróleo. Durante a produção de petróleo, é natural ocorrer perda de pressão, essa perda faz com que o  $CO_2$  da mistura seja liberado e na solução haja a formação do carbonato de cálcio (DUARTE, 2010; ROSTRON, 2018).

Na Figura 2.5 pode ser visto uma amostra de incrustação de carbonato cálcio retirada de uma tubulação.

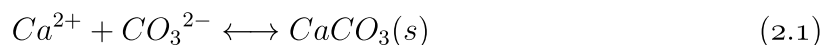


Figura 2.5: Amostra de incrustação de carbonato de cálcio retirada de uma tubulação.  
Fonte: (KALFAYAN, 2008)

### 2.2.1 Formação do carbonato de cálcio

O carbonato de cálcio é um sal inorgânico, cuja fórmula é  $CaCO_3$ , e está presente em rochas calcárias, conchas de corais e moluscos. Sedimentos ricos em carbonato ( $> 30\% CaCO_3$ ) formam cerca de 55% dos depósitos nas encostas continentais e no fundo do mar (SCHNEIDER; SCHULZ; HENSEN, 2006).

Para que o carbonato de cálcio seja formado, ânions carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e cátions cálcio ( $Ca^{2+}$ ) devem estar saturados em meio aquoso, Equação 2.1.



Essa equação é formada a partir das equações de equilíbrio do sistema de carbonatos (Equações 2.2, 2.3 e 2.4), que rege a maior parte do carbono nos oceanos (MILLERO, 2013).



### 2.2.2 Polimorfos

O  $CaCO_3$  apresenta modificações minerais divididas em dois grupos: polimorfos cristalinos anidros (calcita, aragonita e vaterita) e polimorfos metaestáveis (carbonato de cálcio amorfo, carbonato de cálcio monohidratado e carbonato de cálcio hexahidratado)

(PERIĆ et al., 1996).

A aragonita é o polimorfo do carbonato de cálcio que possui o sistema cristalino ortorrômbico e densidade  $2,95 \text{ g/cm}^{-3}$ . Nehrke (2007) pontua que este mineral é estável, porém se transforma espontaneamente em calcita com o aumento da temperatura, aproximadamente  $400^\circ\text{C}$ . A calcita é o mais comum dos polimorfos, é a forma mais estável do carbonato de cálcio e possui o sistema cristalino trigonal ou romboédrico, sua densidade é  $2,71 \text{ g/cm}^{-3}$ . A vaterita é o polimorfo mais solúvel dentre os polimorfos anidros do carbonato de cálcio e possui o sistema cristalino hexagonal, sua densidade é  $2,54 \text{ g/cm}^{-3}$ . Além disso, não é estável e se transforma em aragonita, em alta temperatura, e calcita, em baixa temperatura, num curto período de tempo, tornando-se um mineral escasso na superfície terrestre.

A Figura 2.6 apresenta os três polimorfos cristalinos anidros do carbonato de cálcio.

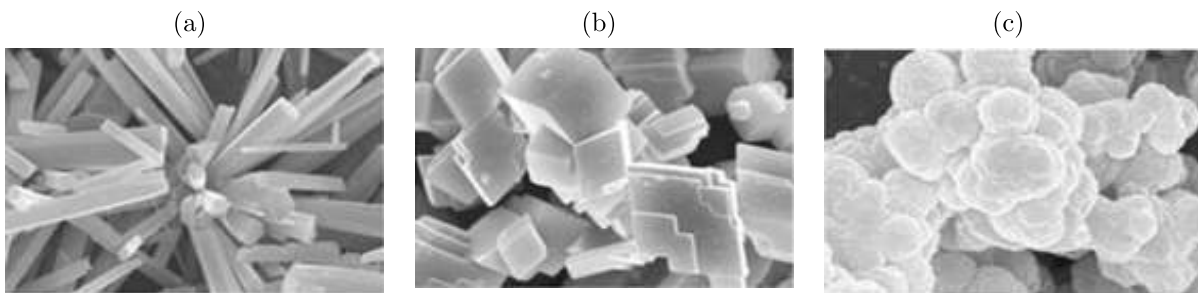


Figura 2.6: Polimorfos cristalinos anidros do carbonato de cálcio: (a) aragonita, (b) calcita e (c) vaterita.

Fonte: (BELLO, 2017)

O carbonato de cálcio amorfo (CCA) em sua forma pura, por ser altamente instável e solúvel, transforma-se espontaneamente em aragonita, calcita ou vaterita (ADDADI; RAZ; WEINER, 2003; CHOTOLI et al., 2017). O carbonato de cálcio monohidratado (CCM),  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , é um mineral raro e é formado a partir do CCA e rapidamente se transforma em aragonita e/ou calcita (FUKUSHI et al., 2011). O carbonato de cálcio hexahidratado (CCH),  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , também nomeado de Ikaite, cristaliza a temperaturas próximas a zero, porém em temperaturas elevadas, decompõe-se em polimorfos anidros (BISCHOFF; FITZPATRICK; ROSENBAUER, 1993).

Na Tabela 2.1 são apresentadas as constantes de solubilidade dos polimorfos do carbonato de cálcio à temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Tabela 2.1: Constantes de solubilidade dos polimorfos do carbonato de cálcio à temperatura de 25°C.

Polimorfo	pK (25 °C)	log K (t em °C e T em K)
Carbonato de cálcio amorfo (CCA)	6,28	$10 < t < 55$ $6,1987 + 0,00053369t$ $+ 0,001096t^2$
Carbonato da cálcio hexahidratado (CCH)	6,59	$0 < t < 25$ $0,1598 - 2011,1/t$
Carbonato de cálcio monohidratado (CCM)	7,15	$15 < t < 50$ $7,050 + 0,000159t^2$
Vaterita	7,9130,020	$0 < t < 90$ $-172,1295 - 0,077993T$ $+ 3074,688/T$ $+ 71,595 \log T$
Aragonita	$8,336 \pm 0,020$	$0 < t < 90$ $-171,9773 - 0,077993T$ $+ 2903,293/T$ $+ 71,595 \log T$
Calcita	$8,480 \pm 0,020$	$0 < t < 90$ $-171,9065 - 0,077993T$ $+ 2839,319/T$ $+ 71,595 \log T$

Fonte: (NEHRKE, 2007)

### 2.2.3 Incrustação por carbonato de cálcio

De acordo com Davies e Scott (2006), a solubilidade do carbonato de cálcio, em água destilada, é 0,053 g/1000 g de água, o que é considerado muito baixa (temperatura de 25°C e pressão parcial de dióxido de carbono de  $3,2 \times 10^{-4}$  atm). Porém essa solubilidade é muito influenciada pela pressão parcial do  $CO_2$ , pela temperatura e pela concentração de outros sais na solução.

O primeiro passo na formação da incrustação do carbonato de cálcio é a supersaturação que promove o encontro dos íons de cálcio  $Ca^{2+}$  e carbonato  $CO_3^{2-}$  (Equação 2.1), dando origem a micro agregados que crescem para se tornar microcristais, estes por sua vez se aglomeram e também crescem formando microcristais maiores dando forma assim aos macrocristais (DUGGIRALA, 2005). Os macrocristais continuam a crescer por adsorção de íons da solução, formando assim um filme de incrustação na superfície. A Figura 2.7 ilustra a formação da incrustação do carbonato de cálcio.

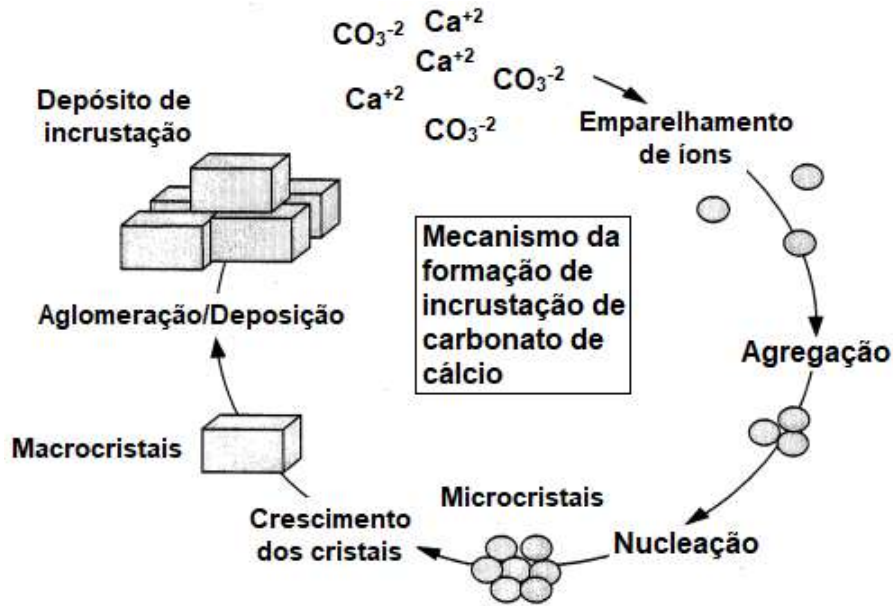


Figura 2.7: Esquema do mecanismo da formação da incrustação do carbonato de cálcio.  
 Fonte: Adaptado de (DUGGIRALA, 2005)

Segundo Muryanto et al. (2012), durante a cristalização, há um intervalo de tempo entre a supersaturação e a nucleação, que indica a formação do cristal. Esse intervalo é chamado de tempo ou período de indução e é composto por duas partes consecutivas: (i) o período necessário para os núcleos de cristal chegarem a um tamanho crítico e (ii) o tempo necessário para esses núcleos crescerem até um tamanho detectável.

O tempo de indução  $t_{ind}$  é a soma do tempo necessário para atingir a nucleação de estado estacionário  $t_{tr}$ , o tempo de nucleação  $t_n$  e o tempo necessário para o núcleo crítico crescer até um tamanho grande o suficiente para ser experimentalmente detectado  $t_g$ , portanto, de acordo com a Equação 2.5:

$$t_{ind} = t_{tr} + t_n + t_g \quad (2.5)$$

Porém, o período transiente não é importante em soluções aquosas de supersaturações e viscosidades moderadas, neste caso o tempo de indução é função dos tempos de nucleação e crescimento (MYERSON; ERDEMIR; LEE, 2019).

A Figura 2.8 representa o processo de formação da incrustação numa tubulação. Já a Figura 2.9 apresenta uma curva completamente bloqueada pela incrustação de carbonato de cálcio.

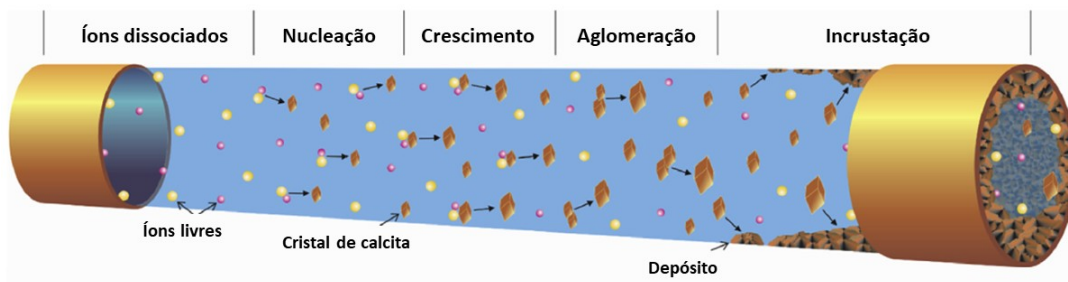


Figura 2.8: Processo de formação da incrustação numa tubulação.

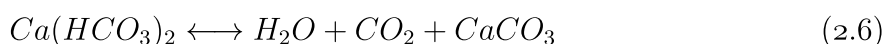
Fonte: Adaptado de (COSMO et al., 2019)



Figura 2.9: Incrustação de carbonato de cálcio em uma curva com 3" de diâmetro.

Fonte: (COWAN; WEINTRITT, 1976)

A Equação 2.6 expressa a equação da precipitação do carbonato de cálcio (DAVIES; SCOTT, 2006).



Percebe-se, pelo sistema em equilíbrio, que um aumento na concentração do dióxido de carbono  $CO_2$  resulta em aumento de bicarbonato de cálcio  $Ca(HCO_3)_2$ , porém a diminuição no teor de  $CO_2$  favoreceria a formação do  $CaCO_3$ . Sendo assim, conclui-se que o teor  $CO_2$  da água (pressão parcial do gás de dióxido de carbono sobre a água) tem influência significativa na solubilidade do carbonato de cálcio. Esse fenômeno ocorre em poços de produção de petróleo, devido a despressurização da água presente no reservatório. Isso perturba o equilíbrio químico e os depósitos de incrustações (DAVIES; SCOTT, 2006; ABIB, 2015). Cosmo et al. (2019) chegaram à conclusão, em sua pesquisa, que o  $CO_2$  chega a contribuir com 60 a 90% na precipitação de calcita, podendo ser, desta forma, mais eficaz manter o  $CO_2$  dissolvido ao invés de impedir alguma das etapas de formação de incrustação.

A solubilidade do carbonato de cálcio também é influenciada pela temperatura e são inversamente proporcionais, conforme pode ser visto na Figura 2.10, retirado do experimento de Coto et al. (2012), onde ele comparou seus resultados com dados da literatura.

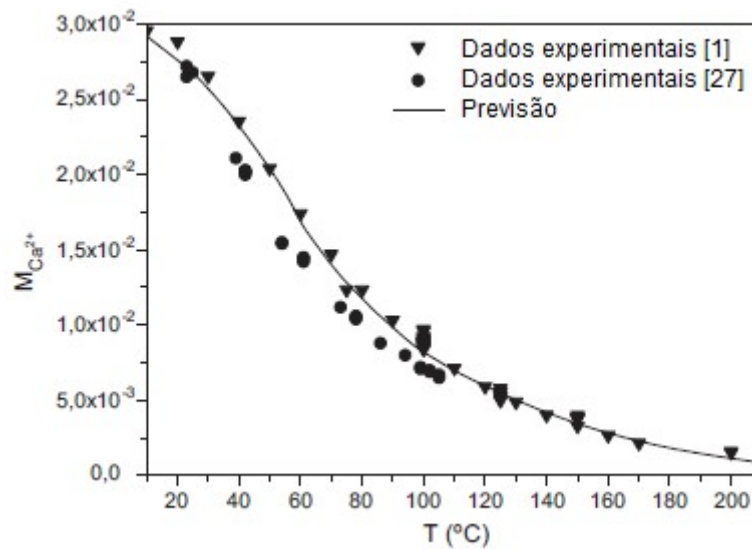


Figura 2.10: Efeito da temperatura na solubilidade do  $CaCO_3$ ,  $P = 40$  bar.

Fonte:(COTO et al., 2012)

Dyer e Graham (2002) realizaram testes dinâmicos de bloqueio de tubos que, dentre outros, mostraram os efeitos da temperatura e da pressão na incrustação de carbonato de cálcio. À medida que a temperatura aumentou, a tendência de incrustar o carbonato de cálcio também aumentou. Já a pressão teve efeito inverso, à medida que a pressão aumentava a tendência de incrustar o carbonato de cálcio diminuía.

O pH da solução afeta a solubilidade do  $CaCO_3$  de forma significativa, já que pode modificar a quantidade de espécies iônicas presentes na solução (COTO et al., 2012). O meio menos ácido reduz a solubilidade do carbonato de cálcio. A Figura 2.11 apresenta um gráfico elaborado num experimento de Coto et al. (2012), onde ele comparou seus resultados com dados da literatura.



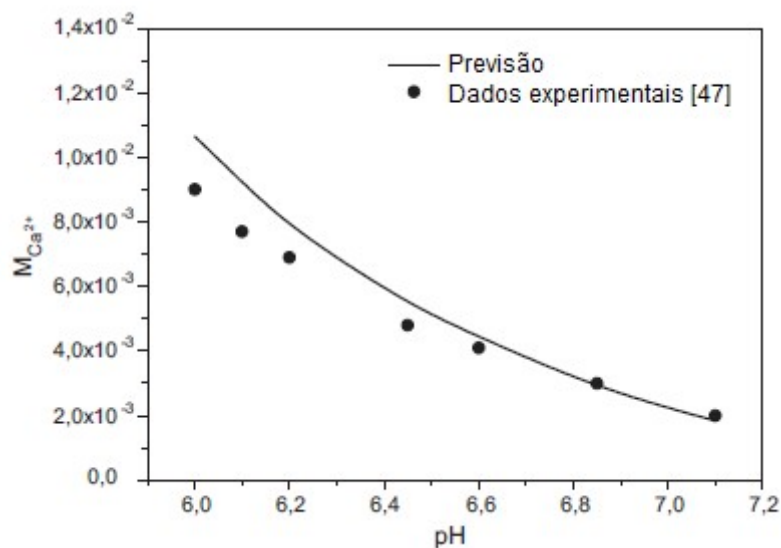


Figura 2.11: Efeito do  $pH$  na solubilidade do  $CaCO_3$ , à  $25^\circ C$  e 1 bar.  
Fonte:(COTO et al., 2012)

#### 2.2.4 Métodos de monitoramento do período de indução

Como dito anteriormente, o período de indução é o instante de tempo de aparecimento dos primeiros cristais. E monitorar esse tempo é o mesmo que monitorar a nucleação. A importância desse monitoramento está no fato de poder estimar parâmetros termodinâmicos, como a tensão interfacial entre os cristais. E esse monitoramento ajuda na escolha do melhor inibidor de incrustação (MURYANTO et al., 2012; SHIRSATH et al., 2015; CELSO et al., 2017).

Em trabalhos realizados por Muryanto et al. (2012) e Shirsath et al. (2015), o período de indução foi determinado pelo monitoramento da condutividade elétrica da solução, após a reação do cloreto de cálcio e do carbonato de sódio, já que após a reação a presença dos íons (que conduzem eletricidade) é reduzida. Segundo Muryanto et al. (2012), este é um método confiável para determinar o período de indução e tem sido utilizado para monitorar a nucleação, bem como o crescimento de gipsita na ausência e na presença de inibidores de incrustações. Shirsath et al. (2015) estudou o progresso da reação e os fenômenos de nucleação e crescimento do cristal através da condutividade elétrica, utilizando ultrassom e agitação mecânica. A Figura 2.12 (a) apresenta os resultados obtidos por Muryanto et al. (2012) e a Figura 2.12 (b) apresenta os resultados obtidos por Shirsath et al. (2015).

Observa-se uma queda drástica no valor da condutividade ao longo do tempo nos gráficos da Figura 2.12. A queda na condutividade ocorre devido à redução de íons livres, que acabaram de se ligar e formaram micro cristais (MURYANTO et al., 2012; SHIRSATH et al., 2015).

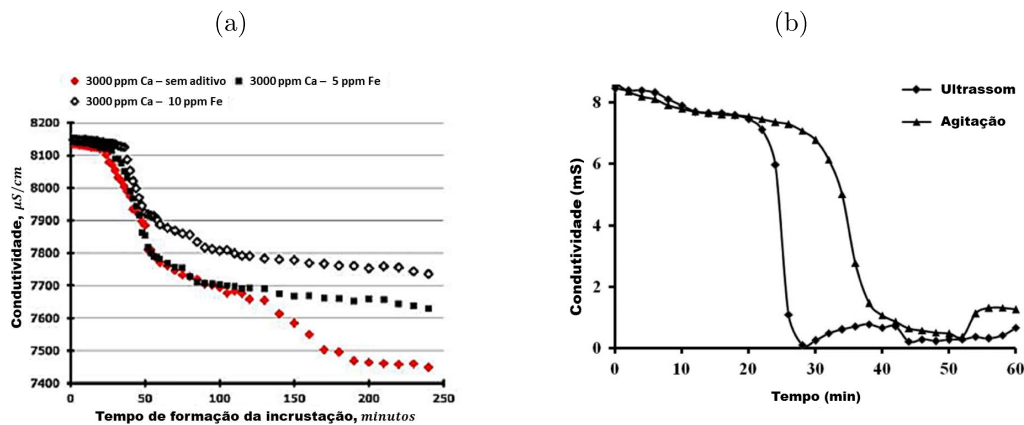


Figura 2.12: Resultados experimentais do método da condutividade elétrica realizado por: (a) Muryanto et al. (2012) e (b) (SHIRSATH et al., 2015).

Fonte: (a) Adaptado de (MURYANTO et al., 2012) e (b) Adaptado de (SHIRSATH et al., 2015)

## 2.3 CONTROLE DE INCRUSTAÇÕES

Algumas estratégias são adotadas na tentativa de evitar a incrustação durante o processo de produção de petróleo. Gerenciar a incrustação desde a fase de planejamento e exploração de campo tornou-se imprescindível. Nesse contexto está incluso a análise de risco de incrustações, onde é avaliado a tendência de incrustação e as dificuldades que podem ser encontradas durante intervenções no poço (BEZERRA et al., 2013).

Durante a produção do poço, medidas preventivas podem ser tomadas de forma a evitar a deposição de incrustações. Em seus estudos, Marques et al. (2001) realizaram experimentos laboratoriais que mostraram a incompatibilidade da água do mar com a água de formação dos campos. Desta forma, os autores puderam simular técnicas de aumento de incrustações a partir de proporções de água do mar injetadas nos poços.

As medidas preventivas costumam ter um custo mais baixo, quando comparadas às medidas corretivas, já que garantem a continuidade da produção, e consistem no bloqueio ou retardo da formação de incrustação. Essas técnicas podem atuar em uma das etapas da formação da incrustação: (i) nucleação, (ii) crescimento ou (iii) adesão dos cristais. Para tal, utiliza-se inibidores químicos ou físicos que promovem a dispersão de cristais de forma a dificultar seu crescimento e fixação (MARQUES et al., 2001; ACHY, 2018; MPELWA; TANG, 2019).

### 2.3.1 Inibidores químicos

Os inibidores químicos são usados em locais de difícil acesso e são substâncias que reagem com os cátions ou interferem dificultando algumas das etapas de formação da incrustação (REIS et al., 2011).

Os inibidores podem ter características quelantes, que agem formando ligações de complexação estáveis com íons presentes na incrustação e podem atuar modificando o crescimento do cristal, impedindo que esse cristal cresça de forma ordenada e, também, tenha sua forma alterada (ROSA et al., 2015).

Muitas são as substâncias químicas utilizadas para a inibição de incrustações e suas escolhas dependem do tipo de incrustante e de sua quantidade (KALFAYAN, 2008). Alguns exemplos de incrustantes e seus inibidores podem ser visualizados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Exemplos de incrustações e seus inibidores químico.

<b>Incrustação</b>	<b>Inibidor</b>
Carbonatos (carbonato de cálcio ou calcita)	ácido clorídrico (HCl) a temperaturas inferiores a 121°C.
Sulfatos (anidrita)	ácido etilenodiamina tetra-acético (EDTA).
Cloretos (cloreto de sódio)	água doce ou soluções ácidas fracas, incluindo HCl ou ácido acético.
Ferro (sulfeto de ferro ou óxido de ferro)	HCl com agentes sequestrantes ou redutores para evitar a precipitação de subprodutos, por exemplo, hidróxidos de ferro e enxofre elementar.
Sílica (depósitos cristalizados de calcedônia ou opala amorfa)	ácido fluorídrico (HF).

Fonte: Adaptado de (SCHLUMBERGER, 2020)

Nem todos os métodos químicos são úteis para todo e qualquer tipo de incrustação inorgânica. O carbonato de cálcio é o mais compatível com inibidores ácidos (KALFAYAN, 2008).

Em sua pesquisa, Sousa, Signorelli e Bertran (2016) avaliaram dois inibidores de incrustação para carbonato de cálcio: (i) ácido fosfínico policarboxílico (PPCA) e (ii) ácido dietilenotriamina pentametileno fosfônico (DETPMP), ambos comerciais. O PPCA age inibindo a fase de nucleação, já o DETPMP, atua na inibição do crescimento do cristal. Durante os testes o DETPMP apresentou os melhores resultados, nas mesmas condições de avaliação.

Outro inibidor comercial de incrustação de carbonato de cálcio utilizado pela indústria de petróleo é o hexametáfosfato de sódio (SHMP). Em seus estudos, Morais et al. (2020) investigaram a ação deste inibidor em função do *pH* e em condições de alta concentração simultânea de íons de incrustação, alta temperatura e alta pressão.

### 2.3.2 Inibidores físicos

Os inibidores físicos de incrustação fazem uso de algum equipamento que atenua a formação do incrustante. Da mesma forma que os inibidores químicos, os físicos agem em uma das etapas de formação da incrustação, como a nucleação e o crescimento dos cristais.

Os inibidores físicos mais comuns são: magnéticos, eletromagnéticos e ultrassônicos.

**2.3.2.1 Inibidor Magnético** O tratamento magnético faz com que o carbonato de cálcio seja formado na solução e não precipite na parede da tubulação ou em equipamentos, já que será levado pelo fluido. Gabrielli et al. (2001) fez uma pequena revisão, onde alguns autores afirmaram que esse efeito se dá pela supressão da nucleação e posterior aceleração do crescimento dos cristais e outros autores afirmaram que houve um aumento na nucleação homogênea, que fez com que os cristais ficassem menores, porém em maior número. Já Helal et al. (2018)), em seu estudo, atribuiu a inibição da incrustação à separação intermolecular das espécies iônicas de cálcio e bicarbonato geradas pela força de Lorentz.

Os dispositivos magnéticos, em sua maioria, são baseados em ímãs permanentes, que produzem campos intensos, como as ligas de alnico, ferrita ou terras raras. Porém os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) são mais resistentes à desmagnetização, magnetização de alta saturação e à quebra, quando comparados a outros materiais magnéticos (FARSHAD et al., 2002).

Os circuitos magnéticos podem ser abertos ou fechados. A Figura 2.13 apresenta algumas configurações possíveis de serem feitas.

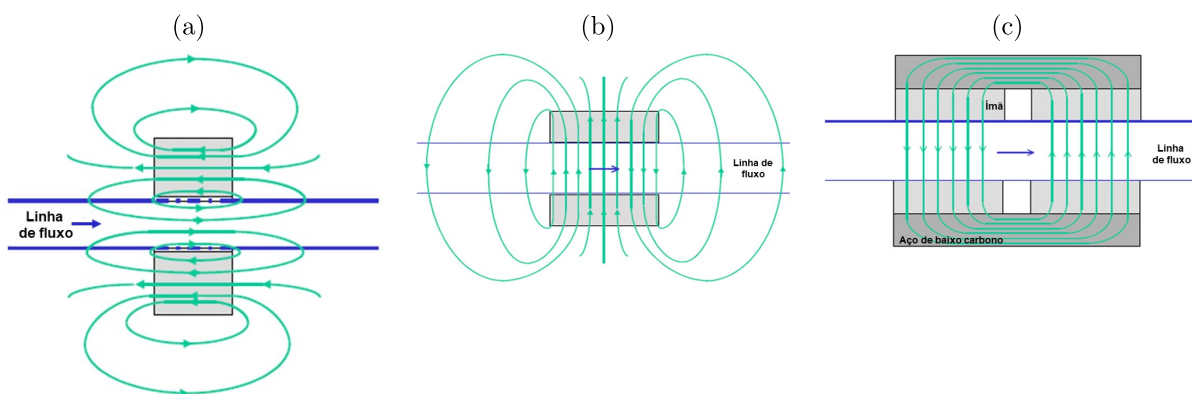


Figura 2.13: Configurações de circuitos magnéticos utilizados como inibidores físicos: (a) Utilização de anel magnético em circuito aberto, (b) Utilização de dois ímãs cilíndricos em circuito aberto e (c) Utilização de ímãs de quatro blocos em circuito fechado.

Fonte: Adaptado de (FARSHAD et al., 2002)

Após a realização de testes com o dispositivo magnético no tratamento da água injetada no campo petrolífero, Meng et al. (2019) chegou à conclusão que, após comparar a

água não tratada com a água tratada, verificou-se um aumento na concentração de íons de cálcio, magnésio, carbonato e sulfato. Essa concentração maior de íons livres indica uma menor formação de incrustação na parede do tubo. Os resultados dos testes na tubulação podem ser observados na Figura 2.14.



Figura 2.14: Oleoduto: (a) sem o tratamento com campo magnético e (b) após a inserção do dispositivo magnético

Fonte: (MENG et al., 2019)

**2.3.2.2 Inibidor Eletromagnético** Similar aos dispositivos magnéticos, os dispositivos eletromagnéticos previnem a incrustação, conforme evitam a deposição de material particulado nas paredes da tubulação ou em equipamentos.

Ao submeter os íons a um campo eletromagnético variável e em movimento rápido, a nucleação homogênea é induzida na fase líquida e os cristais não crescem muito, como são pouco solúveis, não depositam na tubulação, pois são arrastados pelo fluxo (KRAG et al., 2014).

O dispositivo eletromagnético, normalmente, é do tipo solenóide, que consiste, basicamente, num fio enrolado num tubo que alimenta a seção de teste ou num equipamento, como pode ser visto na Figura 2.15. Os eletroímãs produzem campos magnéticos de grande intensidade. Uma corrente pulsante é criada pelo controlador que gera os campos magnéticos variáveis no tempo dentro da seção, fornecendo energia suficiente para que a nucleação homogênea ocorra (FARSHAD et al., 2002; XIAOKAI; CHONGFANG; YONGCHANG, 2005; MARQUES, 2015).

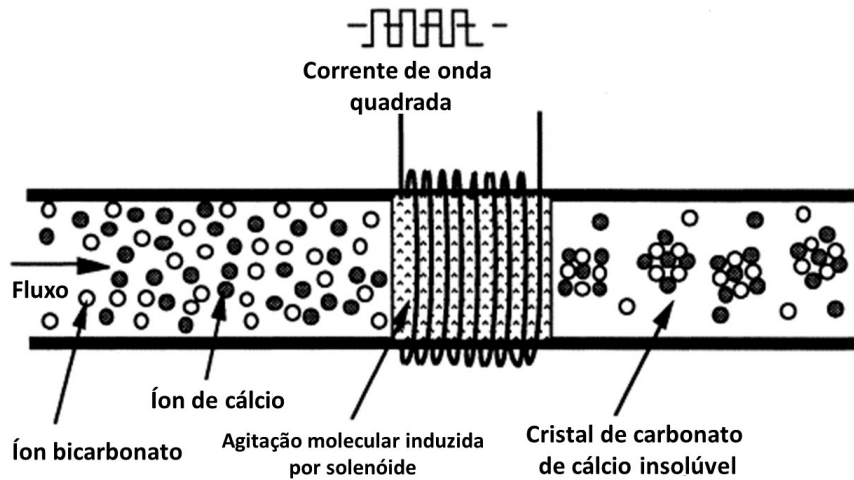


Figura 2.15: Diagrama de um dispositivo eletromagnético do tipo solenóide utilizado como inibidor físico.

Fonte: Adaptado de (CHO; FAN; CHOI, 1997)

Em sua pesquisa, Xuefei et al. (2013) induziram campos eletromagnéticos em água de resfriamento para prevenir incrustação de carbonato de cálcio e chegaram à conclusão que as estruturas das partículas ficaram mais soltas, comparadas ao sistema sem tratamento, onde as estruturas das partículas estava em blocos, esses resultados podem ser vistos na Figura 2.16.

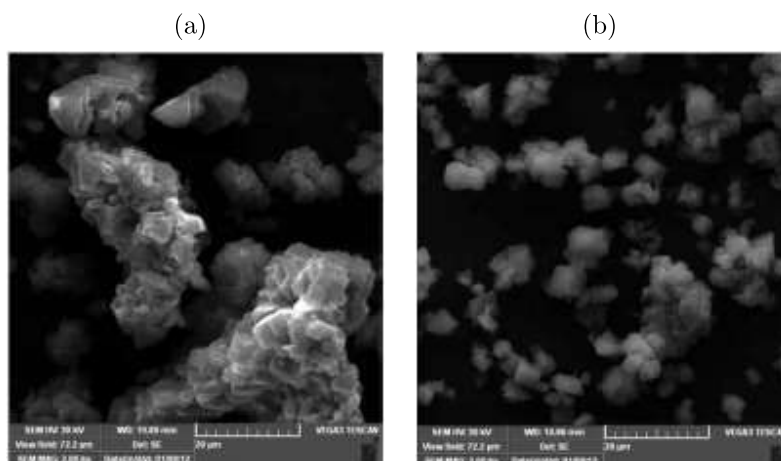


Figura 2.16: Imagens da estrutura das partículas (a) sem tratamento eletromagnético e (b) com tratamento eletromagnético.

Fonte: (XUEFEI et al., 2013)

**2.3.2.3 Inibidor Ultrassônico** No campo da sonoquímica, o ultrassom é utilizado para: reduzir o tempo de indução e acelerar a nucleação, aumentar a taxa de crescimento do cristal, reduzir a largura da zona metaestável, acelerar (ou retardar) a precipitação, acelerar a reação, mudar a distribuição do tamanho ou da forma dos cristais, reduzir (ou promover) a aglomeração, alterar o caráter do cristal e as partículas do aglomerado (NISHIDA, 2004; MYERSON; ERDEMIR; LEE, 2019).

O ultrassom fornece ao meio líquido energia vibracional em alta frequência, que gera ondas alternadas de alta e baixa pressão que criam bolhas no líquido. As bolhas crescem e absorvem energia até atingir um limite crítico onde ocorre implosão liberando energia, a este processo é dado o nome de cavitação. Os efeitos da cavitação promovem choque de partículas, mudanças químicas na solução e permitem a excitação de barreiras de energia de nucleação (FUCHS, 2002; RUECROFT et al., 2005; MYERSON; ERDEMIR; LEE, 2019).

O uso do ultrassom vem sendo cada vez mais difundido como inibidor de incrustação de carbonato de cálcio e diversos autores têm pesquisado as formas que o ultrassom inibe a sua deposição e incrustação.

Em seus experimentos, Dalas (2001) aplicou uma metodologia que utiliza uma solução supersaturada para estudar as etapas de crescimento do cristal e chegou à conclusão que o ultrassom retardou a cristalização dos cristais em 62%, afetando assim os depósitos de carbonato de cálcio. Porém, Nishida (2004) utilizou uma região de precipitação menos espontânea e observou que a irradiação ultrassônica acelerou a etapa de nucleação, desta forma, aumentou a taxa de precipitação.

Kojima, Yamaguchi e Nishimiya (2010) estudaram o efeito do ultrassom na morfologia do carbonato de cálcio, mostrando que houve uma redução no tamanho das partículas, além da formação de vaterita.

Um experimento um pouco mais completo foi realizado por Su et al. (2015), onde alguns parâmetros foram investigados: nucleação, crescimento, forma cristalina e morfologia do  $CaCO_3$ . O ultrassom acelerou a nucleação em 60-85%, inibiu o crescimento dos cristais no estágio inicial de crescimento dos cristais e houve formação da vaterita que precipitou em formato esférico. Além disso, os autores chegaram à conclusão que o ultrassom tornou os cristais agregados frágeis e quebradiços.

Basheer et al. (2021) realizaram experimentos em laboratório com carbonato de cálcio e em seus resultados o ultrassom influenciou na morfologia dos cristais e houve uma diminuição de deposição nas membranas utilizadas nos testes.

Nas Figuras 2.17 (a) e (b) podem ser observados os resultados de um teste em laboratório com ultrassom e sem ultrassom. Percebe-se pelas imagens que as partículas do teste sem ultrassom são maiores, comparadas às do teste com ultrassom. Além disso, sem



ultrassom o polimorfo calcita esteve mais presente, após o teste formou-se mais vaterita.

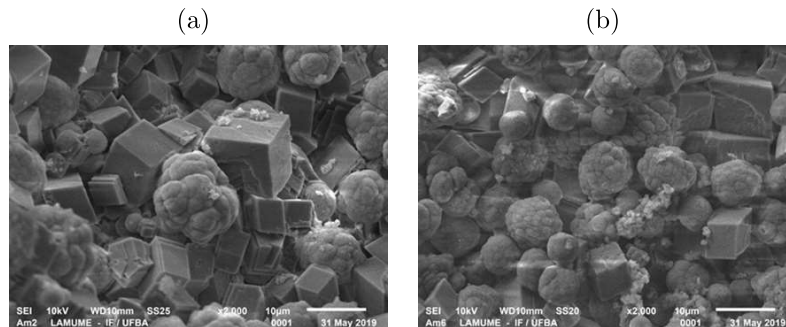


Figura 2.17: Imagens da estrutura das partículas (a) sem tratamento ultrassônico e (b) com tratamento ultrassônico.

Fonte: (SILVA, 2022)

Quando uma fase da formação de incrustação é afetada, da mesma forma que os métodos magnéticos e eletromagnéticos, o fluido se encarrega de levar os cristais em suspensão e os mesmos não chegam a se depositarem e incrustarem na parede da tubulação.

Em sua pesquisa, Marques (2015) realizou testes de inibição de incrustação de carbonato de cálcio, em condições laboratoriais, com os três dispositivos citados aqui (magnético, eletromagnético e ultrassônico) e chegou à conclusão que o dispositivo ultrassônico demonstrou ser o mais eficaz na prevenção, comparando as massas depositadas por trecho. Apesar desses resultados serem positivos, a ferramenta utilizada pelo autor não é aplicável em condições de poço. Desta maneira, há necessidade de mais estudos para desenvolvimento de um dispositivo que possa ser aplicado em condições reais.

## 2.4 ULTRASSOM

O Ultrassom é uma onda sonora com frequência acima da faixa audível pelo ser humano, 20 kHz, e que tem sido utilizado para diversas funcionalidades como: limpeza, medição, testes não destrutivos, aceleração de troca térmica, mistura de soluções e tratamento de superfícies. Na Figura 2.18, pode ser observado o espectro sonoro e a faixa de frequência do ultrassom.



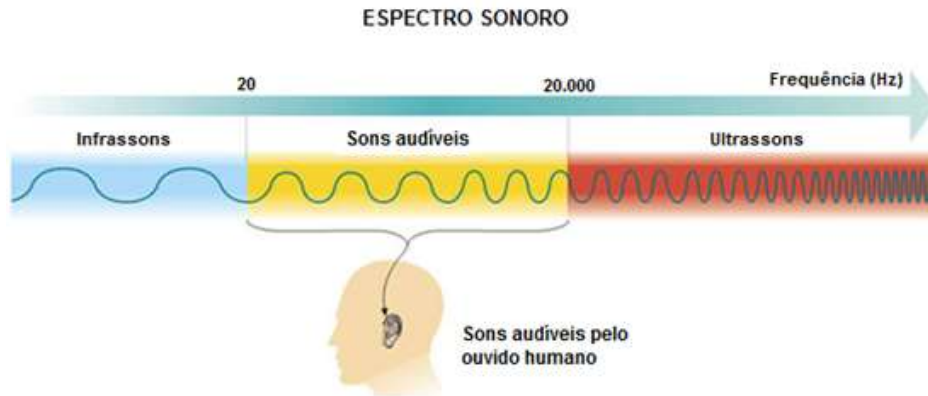


Figura 2.18: Espectro sonoro.  
Fonte: (CAVALEIRO; BELEZA, 2006)

As ondas ultrassônicas podem ser produzidas por transdutores ultrassônicos, que convertem a energia elétrica em vibrações mecânicas. Os transdutores ultrassônicos são compostos, em sua maioria, por materiais piezoelétricos. De forma direta, ao aplicar uma carga elétrica nestes materiais é gerado uma deformação mecânica. E de forma inversa, ao aplicar uma tensão mecânica, é gerado um acúmulo de carga elétrica (TAYRA, 2014).

A deformação mecânica e o acúmulo de carga elétrica são geridos, respectivamente, pelas Equações constitutivas 2.7 e 2.8:

$$D = eS + \varepsilon^S E \quad (2.7)$$

$$T = c^E S - e^t E \quad (2.8)$$

onde  $D$  é a densidade de carga elétrica,  $e$  é a matriz do coeficiente piezelétrico,  $S$  é a deformação mecânica,  $\varepsilon^S$  é a permissividade elétrica,  $E$  é o campo elétrico,  $T$  é a tensão mecânica,  $c^E$  é a constante de rigidez mecânica e  $e^t$  é a transposta da matriz do coeficiente piezelétrico.

O material piezoelétrico mais utilizado para compor os transdutores ultrassônicos é o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), cuja fórmula química é  $Pb(ZrTi)O_3$  (GALLEGO-JUAREZ, 1989; GASPAROTTO et al., 2003). Um transdutor bastante utilizado é do tipo Langevin, composto por cerâmicas piezoelétricas em formato de anel que, a partir de sua excitação com um sinal elétrico variável, sofre deformação mecânica de tensão e compressão.

O transdutor Langevin tem um arranjo que lembra um sanduíche, sendo formado por dois blocos de material metálico (um na parte da frente, chamado de *horn* e um na

parte trazeira) e cerâmicas piezoelétricas no centro, ligadas em paralelo (Figura 2.19). Os metais utilizados nos blocos do transdutor, geralmente, são alumínio, aço e titânio.

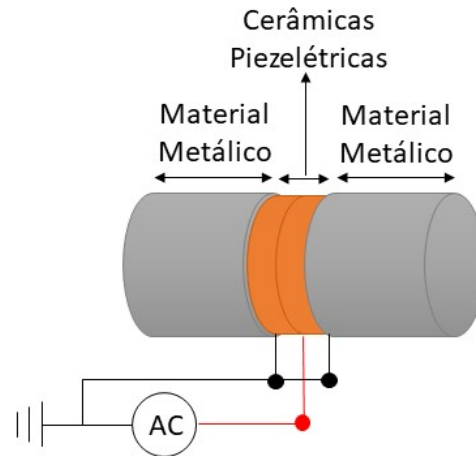


Figura 2.19: Transdutor de alta potência composto por duas cerâmicas piezoelétricas em paralelo.

Fonte: adaptado de (TAYRA, 2014)

Smith (1997) comenta que para obter máxima eficiência do transdutor, seu comprimento é projetado para ter metade do comprimento de onda ( $\lambda/2$ ), desta forma a ressonância é produzida na frequência necessária. O transdutor resultante tem uma pequena largura de banda operacional e uma eficiência de até 95%. Na Figura 2.20 pode ser visto o diagrama em corte do transdutor e o parafuso de alta resistência que é utilizado para unir todo o arranjo. A senóide apresenta os deslocamentos axiais que são máximos nas extremidades e nulo ao centro (TAYRA, 2014).

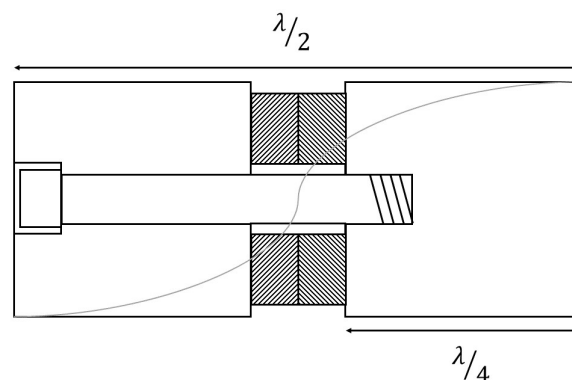


Figura 2.20: Diagrama em corte do transdutor de Langevin.

Fonte: adaptado de (TAYRA, 2014)

E sua frequência fundamental de ressonância é definida pela Equação 2.9 (CHILIBON; WEVERS; LAFAUT, 2005).

$$\frac{wl_c}{v_c} + \arctg\left[\frac{A_1\rho_1v_1}{A_c\rho_c v_c} \operatorname{tg}\left(\frac{wl_1}{v_1}\right)\right] + \arctg\left[\frac{A_2\rho_2v_2}{A_c\rho_c v_c} \operatorname{tg}\left(\frac{wl_2}{v_2}\right)\right] = \pi \quad (2.9)$$

sendo:

- $l_1, l_2, l_c$ : comprimento do bloco traseiro, bloco dianteiro e conjunto de cerâmicas piezoelétricas;
- $v_1, v_2, v_c$ : velocidade do som no bloco traseiro, bloco dianteiro e conjunto de cerâmicas piezoelétricas;
- $A_1, A_2, A_c$ : sessão transversal do bloco traseiro, bloco dianteiro e conjunto de cerâmicas piezoelétricas;
- $\rho_1, \rho_2, \rho_c$ : densidade do bloco traseiro, bloco dianteiro e conjunto de cerâmicas piezoelétricas.

### 2.4.1 Cavitação

Como explicitado anteriormente, a cavitação é um fenômeno que se inicia com a energia fornecida pelo ultrassom ao líquido, favorecendo a formação de bolhas através de ciclos alternados de alta e baixa pressão. As bolhas crescem e retraem absorvendo energia até chegar a um tamanho instável, no qual não conseguem absorver mais energia e implodem de maneira violenta (HIELSCHER, 2020). Esse fenômeno pode ser visto na Figura 2.21, que mostra um diagrama ilustrando o processo de formação de bolhas. No local onde há a cavitação, ou seja, onde as bolhas implodem são produzidos pontos de calor, *hot spot*, com intensa temperatura de aproximadamente 5000 K, pressão de até 2000 atm e rápida taxa de aquecimento e resfriamento, além da produção de ondas de choque.

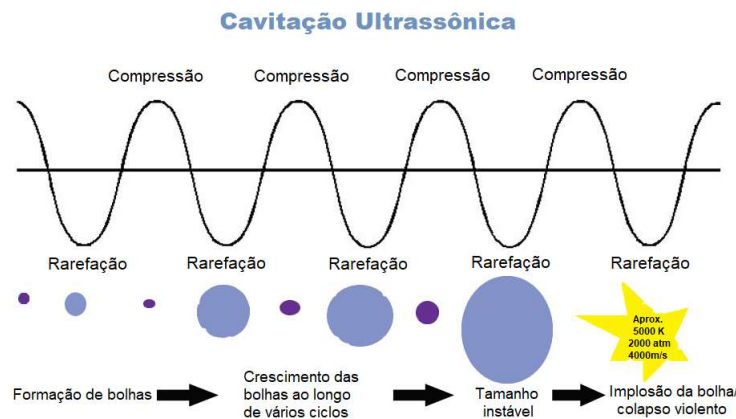


Figura 2.21: Cavitação ultrassônica.  
Fonte: adaptado de (HIELSCHER, 2020)

Existem alguns métodos que são utilizados para medir e avaliar a intensidade ultrassônica, ou seja, a cavitação no fluido. O método mais utilizado, por ser mais simples e apresentar resultado satisfatório, é realizado com uma folha de alumínio. A folha é posta na vertical, ao centro do local onde será realizada a cavitação e após o tempo de realização do teste, avalia-se a erosão na folha, Figura 2.22. A energia distribuída pelo ultrassom no líquido é percebida através do padrão de erosão da folha, já o dano e a deformação da folha indicam o campo de cavitação. As desvantagens do uso desse tipo de método estão associadas à contaminação do fluido de teste pela erosão da folha, impossibilitando sua reutilização, e, por ser um método subjetivo, sua avaliação é mais qualitativa (FUCHS, 2002).

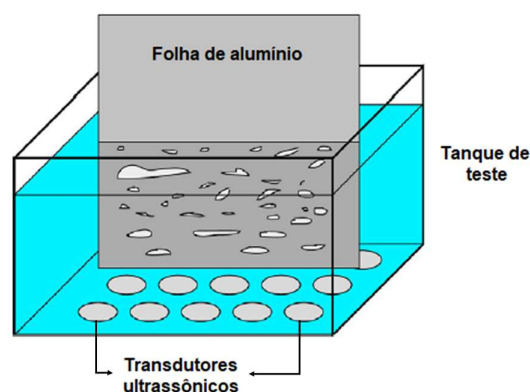


Figura 2.22: Ilustração do teste com folha de alumínio.  
Fonte: adaptado de (FUCHS, 2002)

Outra forma de avaliar a cavitação no fluido é através do uso de anéis de cerâmica cobertos com grafite de lápis. Esse método foi utilizado por Liu (1965) que revestiu os anéis cerâmicos com grafite e os submergiu em um banho ultrassônico por 5 segundos. A avaliação do teste, assim como no método com a folha de alumínio, é feita de forma subjetiva, analisando a quantidade de grafite que permanece aderida à superfície do anel. O desempenho da cavitação é proporcional à limpeza da cerâmica, já que essa remoção somente acontece quando a cavitação ultrassônica com implosão está presente, fora isso a grafite não é removida. A ilustração deste método pode ser visualizada na Figura 2.23.

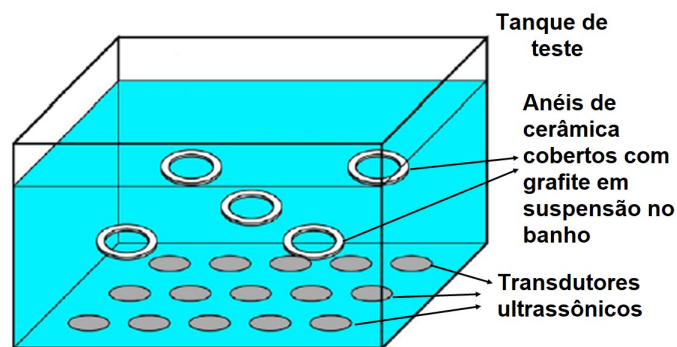


Figura 2.23: Ilustração do teste com anéis cerâmicos cobertos com grafite de lápis.  
Fonte: adaptado de (FUCHS, 2002)

Uma forma de diminuir a subjetividade na análise da folha de alumínio e do anel cerâmico é utilizar uma metrologia automatizada, para isso, uma alternativa é o uso do hidrofone.

O hidrofone, geralmente, é composto por um sensor piezoelétrico que capta as vibrações acústicas no meio líquido e as transforma em um sinal elétrico que é coletado e posteriormente analisado. Na Figura 2.24 pode-se observar alguns modelos de hidrofones.

Os sinais vindos do hidrofone devem ser filtrados eletronicamente para separar as características próprias do meio das que se deseja observar, no caso, a cavitação. O meio produz ruídos de fundo e sinais ligados à propagação da onda. Apesar de ser um método muito utilizado, o uso de hidrofones tem a desvantagem de apresentar uma baixa repetibilidade, pois fatores como temperatura, viscosidade, sólidos e gases influenciam nas medidas (RODOWANSKI, 2016).



Figura 2.24: Modelos de hidrofones comerciais: (a) Pb-502 PPB Megasonics e (b) HNR-series *Needle Hydrophone*.

Fonte: (FUCHS, 2002; ONDA, 2020)

### 2.4.2 Ferramentas ultrassônicas

O Ultrassom tem sido bastante utilizado na indústria de petróleo e gás para limpeza de incrustações. Rodowanski (2016), em seu trabalho, desenvolveu um PIG para limpeza de dutos assistido por ultrassom, Achy (2018) desenvolveu um banho químico assistido por ultrassom de alta potência para a remoção de incrustações em hidrociclones e Lais et al. (2018) propõe a aplicação de ultrassons de alta potência na remoção de incrustações de carbonato de cálcio em uma estrutura durante a operação.

Todos esses trabalhos e pesquisas reportam ferramentas ultrassônicas que têm em comum o fato de parte de seu objetivo ser a remoção da incrustação, ou seja, a limpeza do local que já estará incrustado. Esse objetivo é diferente do aqui proposto, que é o uso do ultrassom para inibir a incrustação.

Na subseção 2.3.2.3 (Inibidores Ultrassônicos), alguns trabalhos sobre inibição de incrustação por ultrassom foram citados, como:

- Dalas (2001) que realizou seu experimento em um vaso Pyrex de parede dupla, utilizou um volume de solução de 200 ml e o dispositivo ultrassônico foi colocado sob a tampa do vaso;
- Nishida (2004) que utilizou um aparato experimental para realização de seus testes. A irradiação ultrassônica foi realizada por três tipos de *horns* que eram alternados e o volume da solução de reação foi de 1 L;
- Kojima, Yamaguchi e Nishimiya (2010) também utilizaram um aparato ultrassônico no formato de *horn*, porém com duas frequências diferentes;
- Su et al. (2015) também utilizou um aparato experimental, um homogeneizador ultrassônico no formato de *horn* e o volume de solução foi 200 ml.

- Basheer et al. (2021) utilizou um *horn* imerso no centro de uma solução. Foi utilizado um recipiente com 13 cm de diâmetro e 14 cm de altura.

Os pesquisadores citados realizaram seus experimentos com dispositivos ultrassônicos em uma escala laboratorial e suas pesquisas tinham o objetivo de observar a influência do ultrassom em suas soluções, como inibidor de incrustação. Seus trabalhos não tinham o foco em montar uma ferramenta ultrassônica.

O *Brunel Innovation Centre*, é um centro de pesquisa situado na *Brunel University London* que tem diversas linhas de pesquisa. Uma das linhas de pesquisa é a *Power Ultrasonics (PUT - Power Ultrasonics Transducers, Transdutores Ultrassônicos de Potência)*, onde são desenvolvidos alguns projetos utilizando ultrassom. O projeto ligado à indústria de petróleo e gás encontra-se em andamento e propõe desenvolver uma tecnologia para detectar, limpar e inibir incrustações em dutos de óleo em plataformas de petróleo e dutos submarinos (HITCLEAN, 2016).

Marques (2015) realizou sua pesquisa em laboratório, porém em uma escala que reproduz um sistema real de produção. O pesquisador utilizou dispositivos ultrassônicos acoplados a um circuito aberto de forma a analisar sua influência sobre a formação de incrustação de carbonato de cálcio. Apesar de ter sido um trabalho relevante no que se refere às informações sobre a deposição de carbonato de cálcio, o dispositivo utilizado não é uma ferramenta apta para ser utilizada em tubulações de maiores dimensões e regiões com pouco espaço disponível para uso da ferramenta, como é o caso de poços de petróleo.

Outro trabalho relevante foi realizado por Silva (2022) que desenvolveu um reator ultrassônico de alta potência com objetivo de prevenir incrustação de carbonato de cálcio em instalações da indústria do petróleo. Os testes foram realizados em laboratório e demonstraram que houve uma aceleração da precipitação do carbonato de cálcio e redução do tamanho de suas partículas, em consequência houve redução da espessura da incrustação ao longo da linha.

Mullakaev, Abramov e Abramova (2015) desenvolveram uma ferramenta de fundo de poço baseada em ultrassom que tem por objetivo o estímulo do poço e recuperação de óleo. Ou seja, a ferramenta é destinada, dentre outras características, à limpeza de incrustações minerais e desparafinação. Os testes foram realizados em dois campos de petróleo na Rússia, *Western Siberia* e *Samara Region*. Após os testes, houve um aumento, em média, do índice de produtividade dos poços de 33%. A Figura 2.25 apresenta um diagrama da ferramenta desenvolvida por Mullakaev, Abramov e Abramova (2015).

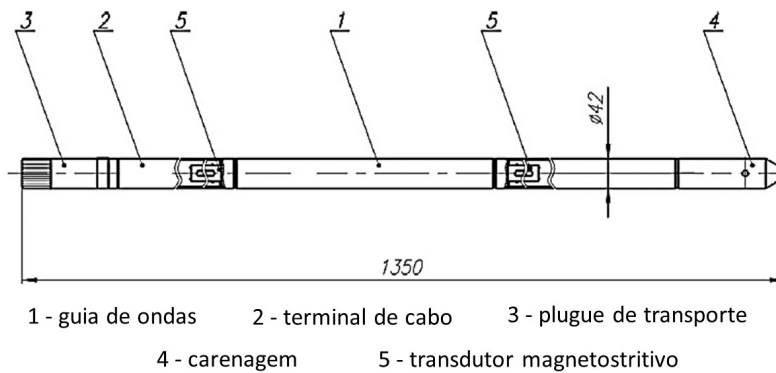


Figura 2.25: Diagrama da ferramenta desenvolvida por Mullakaev, Abramov e Abramova (2015).

Fonte: adaptado de (MULLAKAEV; ABRAMOV; ABRAMOVA, 2015)

A patente número 5,595,243 (JR; SHARMA, 1997) se refere a um limpador de poços acústico (Figura 2.26) para fundo de poço e destina-se à limpeza de poços de petróleo, gás e água. O objetivo principal da ferramenta é gerar ondas acústicas de alta energia de forma a remover incrustações e depósitos orgânicos tanto dentro como ao redor do poço.

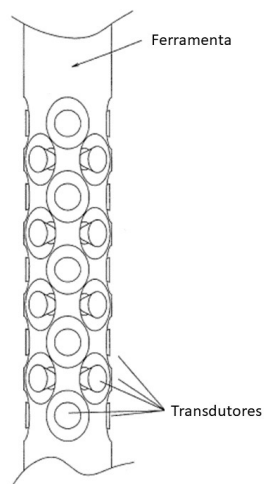


Figura 2.26: Diagrama da ferramenta desenvolvida por Jr e Sharma (1997).

Fonte: adaptado de (JR; SHARMA, 1997)



Lehman et al. (2007) patentaram um dispositivo vibratório para uso no controle de areia e estimulação da formação na operação de recuperação de óleo e gás (patente número US 7,213,650 B2). O sistema tem um sensor que emite um sinal caso haja incrustação. Os *drivers* acionam os transdutores que vibram com o intuito de remover a incrustação da tela do *gravel pack*. A Figura 2.27 apresenta o diagrama do poço identificando as partes da ferramenta desenvolvida.

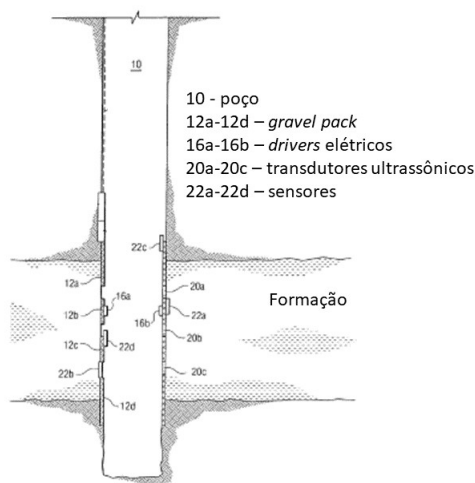


Figura 2.27: Diagrama do poço identificando as partes da ferramenta desenvolvida por Lehman et al. (2007).

Fonte: adaptado de (LEHMAN et al., 2007)

Estes três últimos dispositivos têm o mesmo objetivo que é a limpeza do depósito já incrustado. Diferente do aqui proposto que tem por objetivo acelerar a precipitação, produzindo então cristais menores e com formatos esféricos de forma a serem levados pelo fluxo. Dificultando assim a adesão nas paredes internas da tubulação e dos equipamentos. Vale ressaltar que o efeito da cavitação produzido pela ferramenta também poderá agir como agente de limpeza no momento em que estiver atuando.

## 2.5 POÇOS DE PETRÓLEO

O poço de petróleo é o responsável por fazer a ligação entre a rocha reservatório e a superfície. Os poços são divididos em trechos, conhecidos como fases, e cada fase tem a profundidade e o revestimento diferente entre si. Na Figura 2.28 pode-se observar os diâmetros e os revestimentos correspondentes de algumas fases de um poço característico.

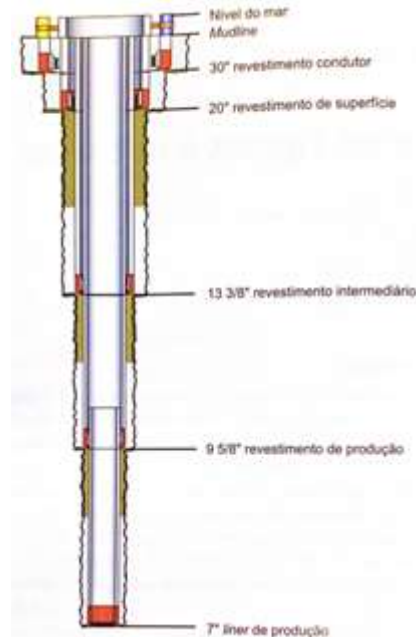


Figura 2.28: Esquema das camadas de revestimento de um poço de petróleo característico.  
 Fonte: (ROCHA; AZEVEDO, 2009)

Como pode ser visto na Figura 2.28, os tipos de revestimento que compõem um poço de petróleo são: Revestimento condutor, Revestimento de superfície, Revestimento intermediário, Revestimento de produção e *liner* de produção. O revestimento de produção abriga a coluna de produção, que pode ser abrigada também pelo *liner*, que passa a ser chamado de *liner* de produção. O menor valor de diâmetro da camada de produção é 5 1/2" (ROCHA; AZEVEDO, 2009).

A tubulação que compõe a coluna de produção tem um diâmetro menor e desce pelo interior do revestimento, cujo principal objetivo é conduzir o fluido produzido do fundo do poço até a superfície. De acordo com Thomas et al. (2004), ao escolher uma tubulação de produção deve-se levar em consideração alguns critérios: diâmetro do revestimento, vazão de produção esperada, tipo de fluido a ser produzido e esforços mecânicos a serem suportados. Este último definirá o grau do aço, a espessura da parede requerida e seu peso por metro. Os tubos de produção mais comuns possuem diâmetros externos: 2 7/8", 3 1/2" e 4 1/2".

## 2.6 BOMBEIO MECÂNICO

Quando o poço de petróleo deixa de ser surgente, ou seja, deixa de produzir de forma natural, há a necessidade de um método de elevação artificial para que o mesmo continue com a produção. O método comumente utilizado de elevação artificial é o Bombeio

Mecânico por Hastes (BM) (THOMAS et al., 2004).

O bombeio mecânico é composto por unidade de bombeio, motor, haste e bomba de subsuperfície. As partes do BM podem ser observadas na Figura 2.29

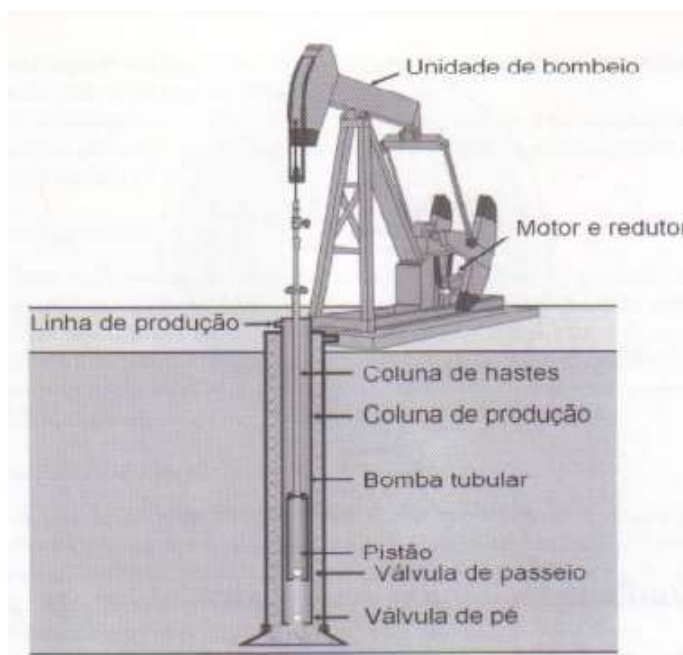


Figura 2.29: Composição do bombeio mecânico com hastes.

Fonte: (THOMAS et al., 2004)

A produção de petróleo ocorre devido aos ciclos ascendentes (*upstroke*) e descendentes (*downstroke*) feitos pela bomba. Quando o pistão da bomba está no ciclo ascendente, o peso do fluido mantém a válvula de passeio fechada e o fluido é produzido, nesse momento a válvula de pé se abre por baixa pressão permitindo que o fluido entre na bomba. Em seguida, quando o pistão está no ciclo descendente faz com que o fluido dentro da camisa seja comprimido, fechando a válvula de pé. Neste momento a válvula de passeio se abre (devida à igualdade de pressão acima e abaixo dela) o que permite que o fluido passe para a parte superior do pistão. Em seguida um novo ciclo ascendente se inicia.

No BM, a incrustação de carbonatos ocorre geralmente na bomba e na haste. Cunha et al. (2015) realizaram um estudo de caso num bombeio mecânico. Para tal, coletaram amostras de incrustações presentes na válvula de passeio e, após análise, chegaram à conclusão de que era incrustação de carbonato de cálcio.



*Este capítulo se refere à primeira abordagem proposta no trabalho e nele serão apresentados a metodologia utilizada, os resultados dos testes realizados e suas devidas discussões.*

## INVESTIGAÇÃO DO USO DA CERÂMICA PZT ACOPLADA EM UM TRECHO DE DUTO

### 3.1 METODOLOGIA

#### 3.1.1 Teste de conceito com hidrofone

Em situações em que existe restrição de espaço e não pode haver interferência nas condições de escoamento, como nos poços de petróleo, onde tem-se por objetivo o uso da ferramenta de prevenção de incrustação de carbonato de cálcio, seria inviável a utilização de transdutores comerciais. A solução proposta foi o uso de cerâmicas piezoelétricas, de pequenas dimensões, acopladas diretamente na parede externa de um trecho de duto. A Figura 3.1 apresenta o projeto do que seria uma ferramenta ultrassônica com cerâmicas piezoelétricas coladas diretamente num tubo.

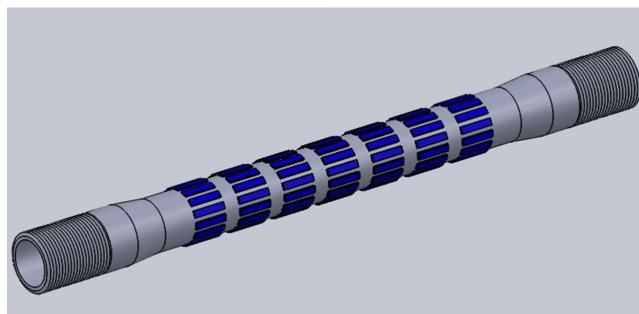


Figura 3.1: Projeto com várias cerâmicas piezoelétricas fixadas na parede do tubo.

Inicialmente, a investigação foi feita a partir do acoplamento com adesivo de massa epóxi de somente uma cerâmica piezoelétrica circular (50 mm de diâmetro, 2,6 mm de espessura, 40 kHz de frequência de ressonância e 35 W de potência) na parede externa de um trecho de tubo de aço carbono, com 300 mm de comprimento, 154 mm de diâmetro interno e com espessura de parede de 6 mm. A Figura 3.2 apresenta uma imagem do tubo com a cerâmica acoplada.



Figura 3.2: Trecho de tubo de aço carbono com a cerâmica piezoelétrica acoplada.

Os experimentos foram realizados com o objetivo de determinar as regiões e intensidades de pressão acústica no interior do tubo, o que é um indicativo de zona de cavitação. Foram realizados dois testes com intuito de mapear as zonas de pressão acústica no tubo, para isso foram utilizados um sensor de pressão acústica piezoelétrico (Figura 3.3) e um sistema para seu deslocamento no interior do duto.



Figura 3.3: Sensor de pressão acústica utilizado.

O primeiro teste foi feito medindo a região frontal à cerâmica até a parede do duto na outra extremidade e o segundo teste, com o sensor perpendicular à cerâmica. Na Figura 3.4 pode ser visto uma ilustração do procedimento de realização dos testes.

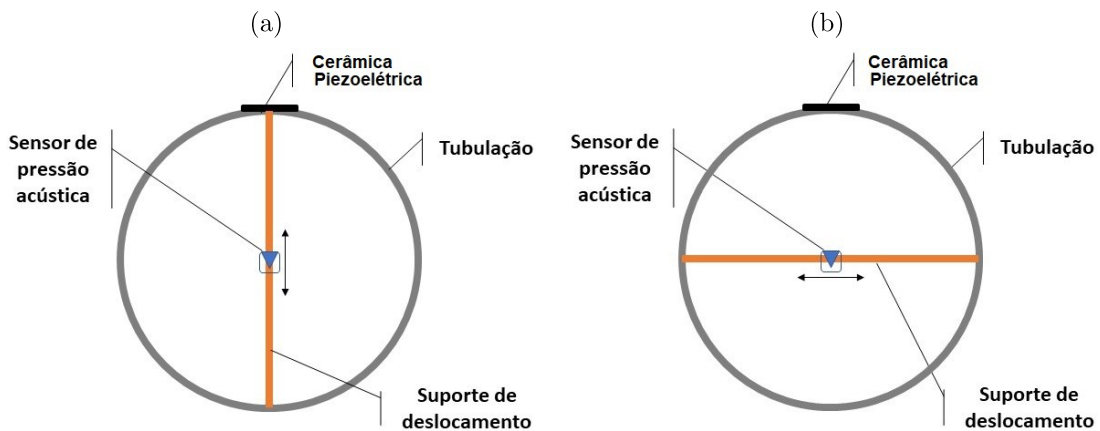


Figura 3.4: Ilustração do procedimento de testes de mapeamento da pressão acústica no interior do tubo (a) em frente e (b) perpendicular à cerâmica piezoelétrica.

A cerâmica piezoelétrica foi acionada utilizando um gerador ultrassônico com frequência de 43,90 kHz (apesar da frequência de ressonância da cerâmica ser 40 kHz, foi utilizado esse valor por ter sido nessa frequência onde foi observado a maior amplitude de vibração no fluido) e potência de 18,75 W. O sinal elétrico do sensor de pressão acústica foi adquirido utilizando um osciloscópio.

A varredura deveria ser feita em intervalos iguais, então foi fixado uma régua centimétrica ao suporte de deslocamento do sensor (Figura 3.5). A régua permitiu que o

sensor fosse deslocado a cada milímetro e a medida foi então tomada, totalizando uma média de 120 medidas. Esse padrão de intervalo foi adotado tanto no ensaio perpendicular à cerâmica, quanto frontal.



Figura 3.5: Suporte de deslocamento do sensor com régua centimétrica fixada.

### 3.1.2 Teste de precipitação

A avaliação da influência da cerâmica piezoelétrica acoplada ao tubo sobre a precipitação do carbonato de cálcio (período de indução) foi monitorada através da condutividade da solução.

Para a realização dos testes em laboratório, houve a necessidade de preparar uma solução de carbonato de cálcio. A metodologia utilizada na preparação dos reagentes foi baseada nos estudos de (MURYANTO et al., 2014), que utilizou, para a síntese de carbonato de cálcio, os reagentes carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) e cloreto de cálcio di-hidratado  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ . A Equação 3.1 apresenta a reação da solução.



Seguindo a metodologia de Muryanto et al. (2014), a concentração de íons  $Ca^{2+}$  na solução final deveria ser de 3500 ppm. Para tanto, utilizou-se uma massa de 9,26 g de  $Na_2CO_3$  e, 12,84 g de  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  para preparar 1 litro de solução.

Foram preparados 300 ml de cada reagente, para a realização dos teste de precipitação, totalizando 600 ml de solução após a mistura. Primeiramente colocava-se a solução de cloreto de cálcio no recipiente, em seguida o carbonato de sódio. Assim que o carbonato de sódio era inserido o teste era inicializado e tinha duração de 15 minutos. Os testes



foram realizados com e sem ultrassom.

As condições de realização dos testes foram as mesmas da seção 3.1.1 (Teste de conceito com hidrofone), sendo que para esse teste o tubo estava preenchido com 3750 ml de água.

A medida de condutividade foi realizada utilizando um sensor de condutividade comercial, da marca Quimis, com célula de medição em vidro com placas de platina e constante  $1\mu S/cm^2$ , conforme Figura 3.6 (a) e o arranjo experimental pode ser observado na Figura 3.6 (b).

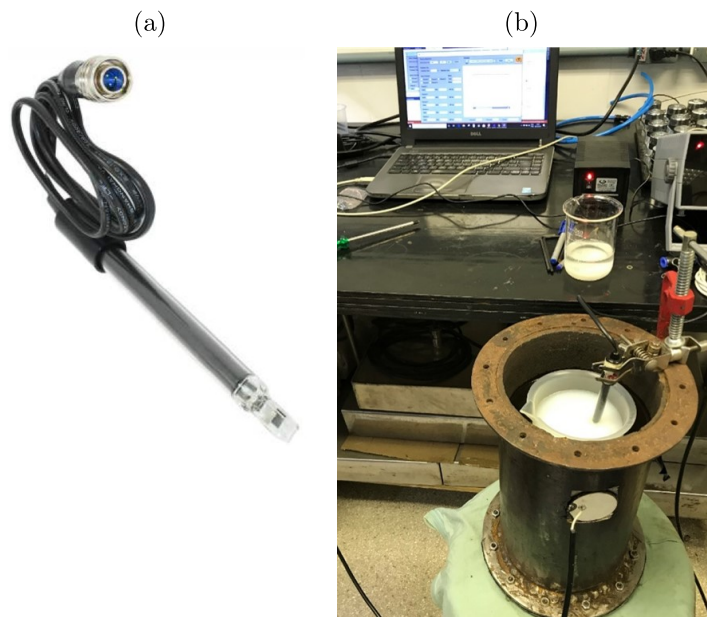


Figura 3.6: (a) condutivímetro e (b) arranjo experimental dos testes de condutividade

### 3.1.3 Modelagem e Simulação

Modelar e simular como primeira etapa no desenvolvimento de um projeto reduz custos de elaboração e montagem, além de economia de tempo, já que o modelo é simulado em diferentes combinações, possibilitando reduzir falhas. Porém, neste projeto, trabalhou-se de forma invertida. Inicialmente, montou-se uma ferramenta, que foi testada e, posteriormente, a mesma foi modelada e simulada. Desta forma o modelo foi elaborado para que pudesse confrontar os resultados experimentais obtidos.

O *software* utilizado para modelagem e simulação do teste utilizando a cerâmica piezoelétrica colada diretamente na parede de um trecho de tubo foi o COMSOL Multiphysics®. Este *software* tem sido utilizado por alguns autores para modelagem e simulação de seus projetos com dispositivos ultrassônicos e através deste terem conhecimento da frequência de ressonância e da distribuição de pressão acústica no fluido (SUTKAR; GO-

GATE; CSOKA, 2010; LAIS et al., 2019).

O primeiro passo foi elaborar, diretamente no *software*, a geometria da ferramenta já montada. A Figura 3.7 apresenta o desenho tridimensional da ferramenta, onde pode ser visto a cerâmica acoplada ao tubo.

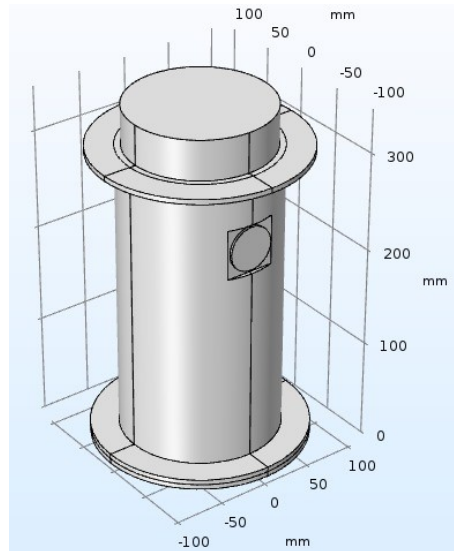


Figura 3.7: Desenho tridimensional da ferramenta com a cerâmica PZT acoplada.

Após o desenho pronto, nas configurações do *software* foram feitas as definições dos domínios:

- Sólidos – foram definidas as partes sólidas do projeto: a tubulação e a cerâmica piezoelétrica e em seguida estes sólidos foram atribuídos ao módulo *Solid Mechanics*;
- Fluido – o fluido utilizado no interior do tubo foi água, que foi atribuída ao módulo *Pressure Acoustics, Frequency Domains*;
- Piezoelétrico – a cerâmica piezoelétrica é definida como sólido e atribuída aos módulos *Solid Mechanics e Electrostatics*, devido às suas características mecânicas e elétricas;
- *PML (Perfectly Matched Layer)* – é uma parte do domínio do fluido onde a equação de onda é artificialmente amortecida, que neste projeto também será água.
- *Piezoelectric Effect* – este módulo é responsável por fazer o acoplamento dos componentes elétricos com os componentes mecânicos.
- *Acoustic-Structure Boundary* - este módulo é responsável pela interface entre a parede interna do tubo e o fluido.

## 3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.2.1 Teste de conceito com hidrofone

Os dados coletados utilizando o osciloscópio não receberam nenhum tipo de tratamento prévio. Então, o sinal medido possuía além da frequência de 43,90 kHz uma série de outros harmônicos e ruídos, como apresentado na Figura 3.8.

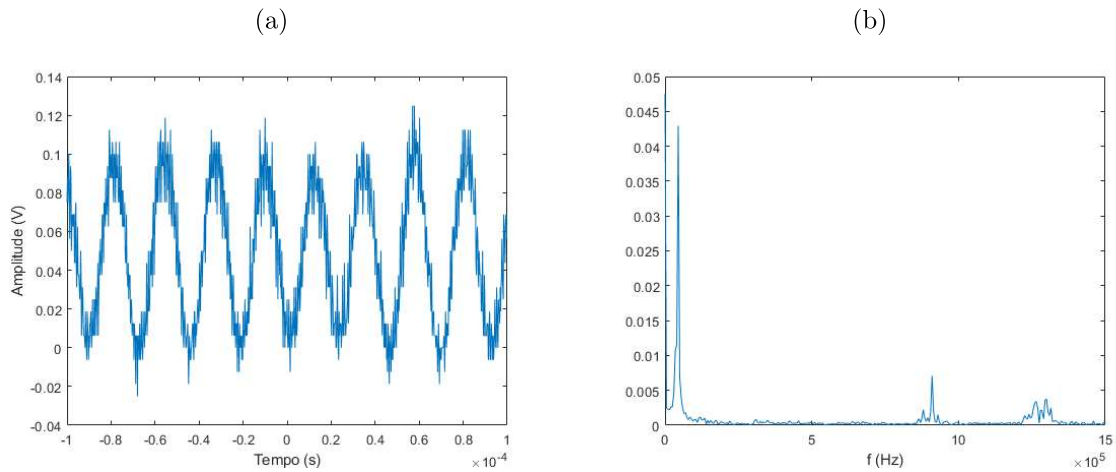


Figura 3.8: Sinal de US medido com hidrofone sem tratamento prévio obtido utilizando o osciloscópio (a) e sua transformada de Fourier (b).

Para avaliar o efeito da cerâmica piezoelétrica no meio, foi realizado o tratamento dos dados medidos no Matlab®. O tratamento consistiu em realizar o ajuste de uma função do tipo senoidal, como apresentado na Equação 3.2, aos pontos.

$$Y(t) = A \sin(2\pi \cdot 43960t + W_o) + B \quad (3.2)$$

Após o ajuste, são determinados o valor de pico,  $A$ , o ângulo de fase,  $W_o$ , e o *offset*,  $B$ . De posse destes dados foi determinado o valor RMS (*root mean square*) do sinal para cada curva. A Figura 3.9 apresenta os dados brutos e a senóide que melhor se ajustou a estes dados.

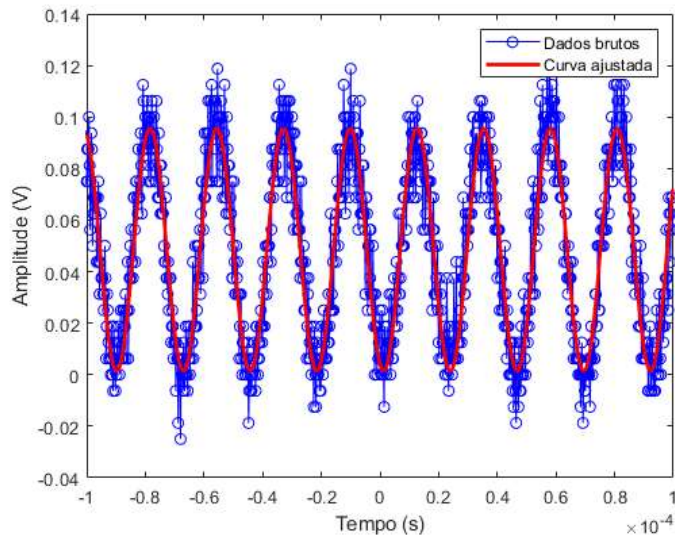


Figura 3.9: Curva com dados brutos, em azul, e função senoidal ajustada, em vermelho.

A partir dos valores RMS para cada ponto, foi elaborado o gráfico da Figura 3.10 onde é apresentado o valor RMS, todos os valores foram medidos ao longo do perfil do duto. O eixo X do gráfico coincide como eixo frontal à cerâmica, já o eixo Y, é perpendicular ao eixo x. Os dois eixos encontram-se no centro do tubo.

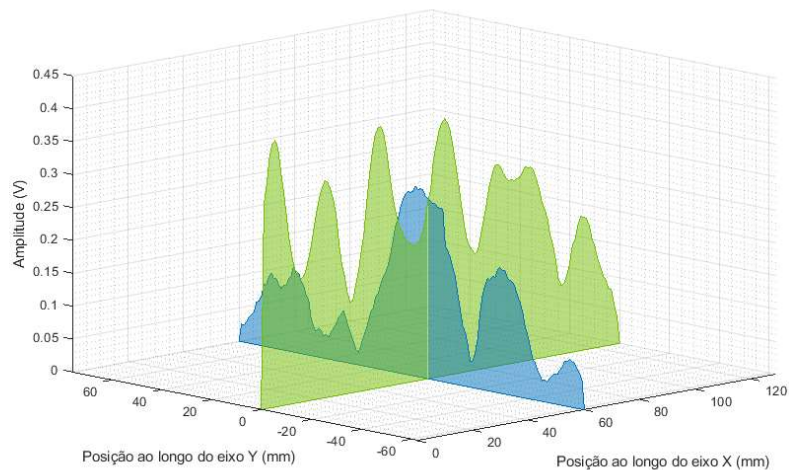


Figura 3.10: Valores RMS das medidas realizadas ao longo dos eixos do tubo.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 3.10 existem pontos onde a amplitude da onda apresenta valores mais elevados e outros onde a ação do US diminui significa-

tivamente. A região central do duto, por exemplo, apresentou grandes intensidades de pressão acústica. Percebe-se também que ao longo do eixo X a amplitude do sinal reduz devido ao fato do sensor estar se afastando da fonte de ultrassom.

A partir da distribuição da pressão acústica nos dois eixos do tubo de teste, pode-se inferir que houve incidência de ultrassom em toda a seção transversal do tubo, apesar da baixa potência da cerâmica piezoelétrica utilizada.

### 3.2.2 Teste de precipitação

Os resultados dos testes de condutividade determinam a duração do tempo de indução. Uma redução abrupta na condutividade da solução indica que íons deixaram a solução e formaram cristais. Sendo assim, esse marco no gráfico indica o momento na nucleação.

Os testes sem ultrassom indicaram um tempo de indução de aproximadamente 5 minutos (curva azul do gráfico da Figura 3.11). Com a presença do ultrassom, o tempo de indução diminuiu para, aproximadamente, 2 minutos (curva em vermelho no gráfico da Figura 3.11).

Esses testes indicaram que a presença do ultrassom fez com que a reação fosse acelerada e os cristais se formaram antes do previsto, acelerando a nucleação, comparado ao teste sem ultrassom. Esses resultados corroboram com os resultados nos experimentos de Nishida (2004), Su et al. (2015), que também tiveram a fase de nucleação acelerada, sendo que no experimento de Su et al. (2015) a aceleração foi de 60-85%.

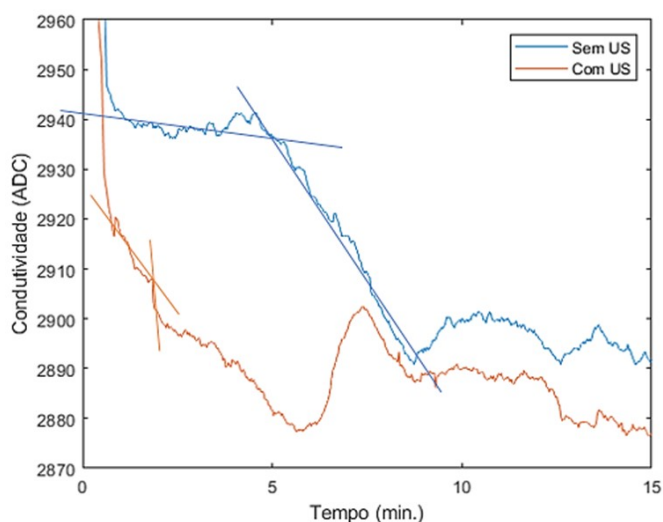


Figura 3.11: Resultados dos testes de condutividade.

### 3.2.3 Modelagem e simulação

Após a modelagem COMSOL Multiphysics® foi realizada a simulação da ferramenta e obtido a curva de impedância (Figura 3.12), e desta curva obtém-se a frequência de ressonância.

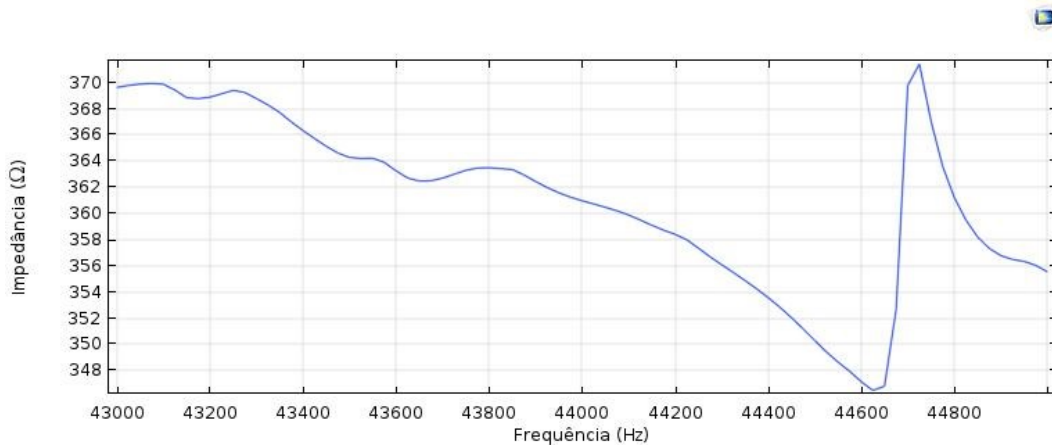


Figura 3.12: Curva da frequência de ressonância obtida pelo ensaio no COMSOL Multiphysics®.

A frequência de ressonância é identificada no gráfico como o ponto da curva onde a impedância é mínima, que neste caso foi 44,62 kHz, neste ponto a corrente é máxima. O ponto da curva onde a impedância é alta é chamado de frequência de antirressonância, cujo valor é 44,72 kHz, neste ponto a corrente é mínima. O usual é utilizar a frequência de ressonância para caracterizar o transdutor, pois nela que ocorre a maior intensidade de vibração.

O valor da frequência de ressonância simulada foi 44,62 kHz e o valor dos testes foi de 43,90 kHz. A discrepância nesses valores foi de 1,64%, o que demonstra que o modelo possui uma boa representatividade do sistema real.

A distribuição de pressão acústica foi simulada e pode ser vista através pela Figura 3.13. A pressão é aferida em bar. Os tons tendendo para o azul escuro indicam regiões de baixa pressão, já os tons tendendo para o vermelho escuro indicam regiões com pressão mais alta.



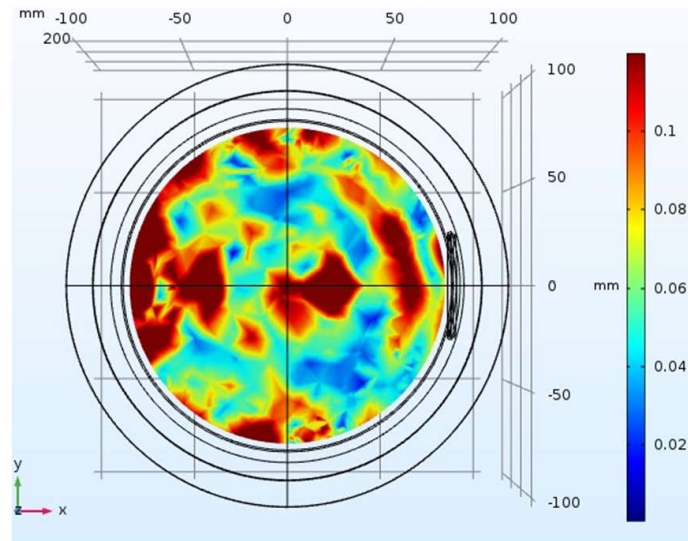


Figura 3.13: Perfil de pressão acústica na seção transversal do tubo.

O perfil de pressão acústica mostra que há zonas de alta e baixa pressão acústica distribuídas em toda a seção transversal do tubo e tais zonas se assemelham aos gráficos do teste feito em laboratório. Desta forma, esse resultado corrobora com o resultado da seção 3.2.1, que indica haver incidência de ultrassom em toda a seção transversal do tubo.

Essa comparação pode ser percebida, principalmente pelas áreas escuras que foram determinadas pela alta intensidade de pressão acústica. Percebe-se a alta intensidade no centro do tubo e picos ao longo do eixo frontal às cerâmicas e tais picos também podem ser observados na Figura 3.10. O mesmo ocorre com o eixo transversal à cerâmica.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES

A investigação da cerâmica piezoelétrica acoplada em um trecho de duto foi importante para o desenvolvimento inicial do projeto, pois permitiu uma melhor compreensão de como as ondas sonoras agem no centro da tubulação. As teorias e testes foram importantes para a etapa seguinte que utilizou transdutores ultrassônicos do tipo Langevin acoplados em um trecho de duto. No início do projeto havia o objetivo de acoplar várias cerâmicas diretamente na face externa de um trecho de tubo, como foi apresentado na Figura 3.1, porém as características do poço onde a ferramenta poderia ser testada foram definidas, o que possibilitou uma readequação no projeto da ferramenta. Detalhes desta nova proposta foram discutidos no Capítulo 4: Investigação do uso de transdutores ultrassônicos acoplados em um trecho de duto.





*Este capítulo se refere à segunda abordagem proposta no trabalho e nele serão apresentados a metodologia, os resultados dos testes realizados e suas devidas discussões.*

## **INVESTIGAÇÃO DO USO DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS ACOPLADOS EM UM TRECHO DE DUTO**

### **4.1 METODOLOGIA**

#### **4.1.1 Modelagem e simulação**

Para que a ferramenta de aceleração de precipitação fosse projetada, inicialmente realizou-se a modelagem e a simulação no *software* COMSOL Multiphysics®. As informações geradas no *software* são importantes para o desenvolvimento da ferramenta de forma a obter um desempenho ótimo em relação à entrega de potência e capacidade de aceleração de precipitação.

A ferramenta será instalada em um poço com bombeio mecânico, antes da válvula de pé, e diâmetro de revestimento de 5 1/2". Devido a estas características foi definido o diâmetro máximo da ferramenta de 4,825". O transdutor adquirido cujas características eram compatíveis com a restrição imposta para a ferramenta final tem as seguintes dimensões: (i) comprimento: 58 mm, (ii) diâmetro: 20 mm e (iii) frequência: 40 kHz. O transdutor é composto por pastilhas piezoelétricas em PZT, do tipo 4, com massa traseira e massa dianteira em alumínio e parafuso de fixação das partes em aço.

Após a aquisição dos transdutores, Figura 4.1 (a), foi feita uma modelagem e simulação do mesmo no COMSOL Multiphysics® a fim de obter a sua frequência de ressonância, Figura 4.1 (b).

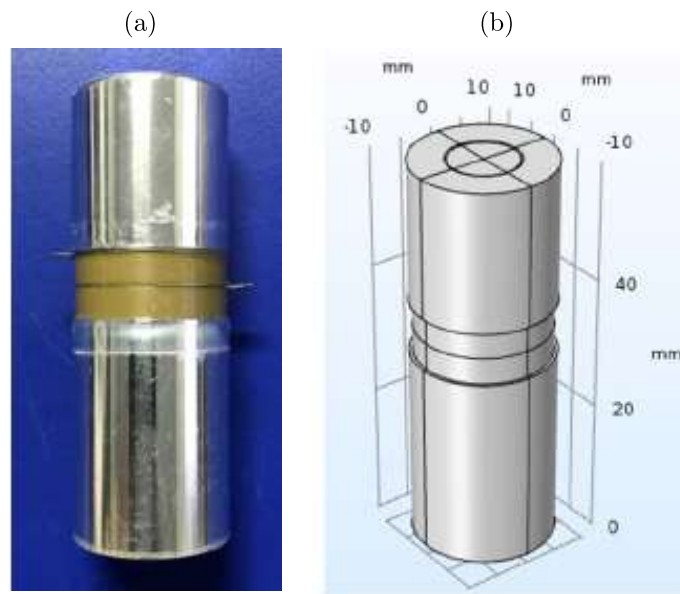


Figura 4.1: Imagem do transdutor adquirido (a) e modelo no COMSOL Multiphysics® (b)

Considerando as dimensões do transdutor e as restrições de espaço no poço, o tubo escolhido foi de 1 1/2" de diâmetro, padrão *Schedule* com 48,26 mm de diâmetro externo. O material utilizado na ferramenta foi o aço inoxidável por ser um material já utilizado em aplicações de ultrassom e apresentar boa resistência à corrosão. O comprimento do tubo é de 1 metro.

A espessura de parede do tubo padrão *Schedule* foram investigadas: (i) 5S tem espessura de parede de 1,65 mm, (ii) 10S, 2,77 mm, (iii) 40S, 3,68 mm, bem como a espessura dos anéis utilizados para a fixação dos transdutores no tubo. A Tabela 4.1 apresenta as configurações das simulações realizadas variando espessura de parede do tubo e do anel de fixação dos transdutores. A Figura 4.2 apresenta a ferramenta projetada no *software* COMSOL Multiphysics®.

Tabela 4.1: Simulações realizadas variando a espessura da parede do tubo e do anel de fixação dos transdutores.

Simulação	Espessura da parede (mm)	Espessura do anel (mm)
1	1,65	1
2	1,65	1,5
3	2,77	1
4	2,77	1,5
5	3,65	1
6	3,65	1,5

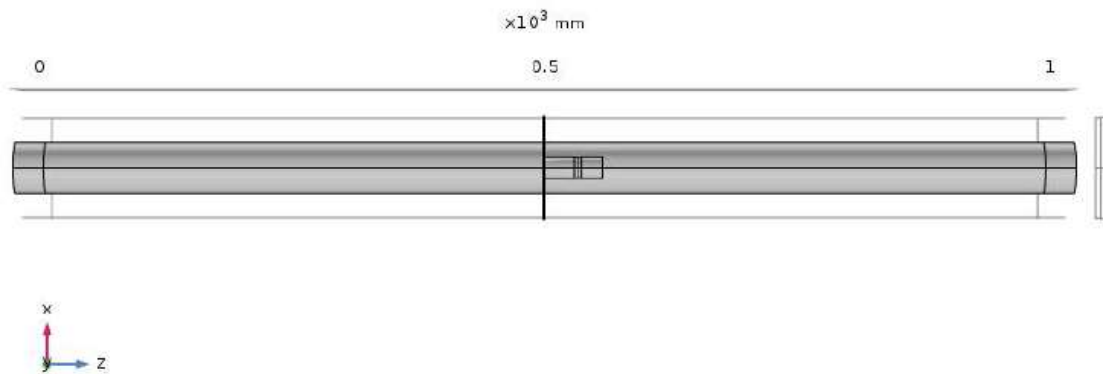


Figura 4.2: Ferramenta projetada no *software* COMSOL Multiphysics®.

Uma vez definida a espessura ideal da parede e do anel, foram então realizadas simulações para definir a quantidade de transdutores por anel que apresenta o melhor perfil de pressão no interior do tubo, isto é, maiores intensidades de pressão e distribuição ao longo do comprimento do tubo. Essa quantidade variou de um transdutor por anel até oito transdutores por anel. Oito transdutores foi o máximo investigado, pois um número maior de transdutores impossibilitaria a cablagem elétrica dos transdutores e também prejudicaria a dissipação térmica. A Figura 4.3 apresenta as disposições dos transdutores utilizadas nas simulações realizadas variando o número de transdutores por anel de fixação.

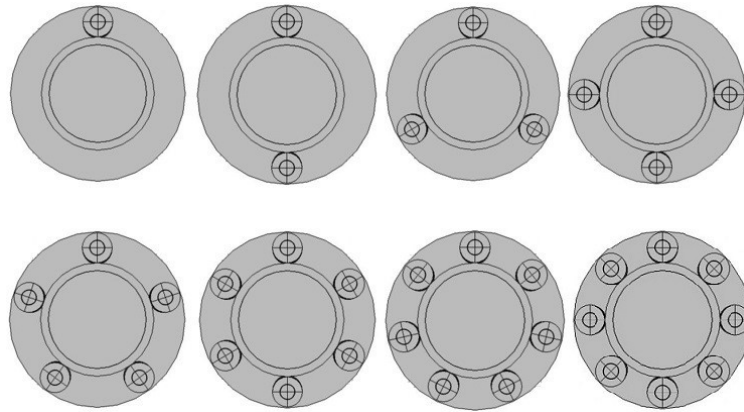


Figura 4.3: Disposição dos transdutores nos anéis de fixação da ferramenta.

Após ser determinado o número ideal de transdutores por anel, foi investigado a distância ideal entre os anéis, para qual é obtida uma interferência construtiva entre eles. Para tal, foram investigadas oito distâncias começando em 75 mm com passos de 10 mm, isto é, de 75 mm a 145 mm. As distâncias foram investigadas a partir de dois anéis. Na Figura 4.4 pode ser visto o projeto utilizado nas simulações de distâncias entre os anéis.

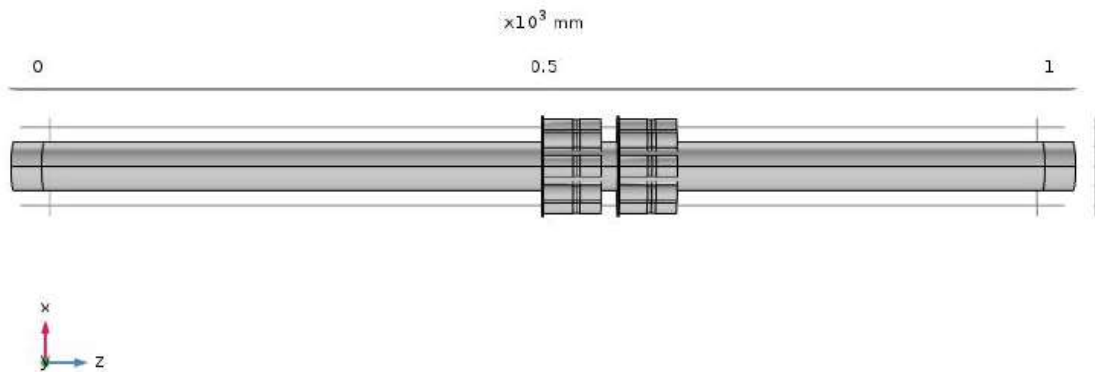


Figura 4.4: Projeto da ferramenta para investigação da distância entre os anéis.

Uma vez avaliados os parâmetros ideais, foi feita uma simulação com o número total de sete anéis de fixação dos transdutores ao longo do comprimento do tubo. O projeto final da ferramenta com todos os parâmetros ideais investigados pode ser visto na Figura 4.5.

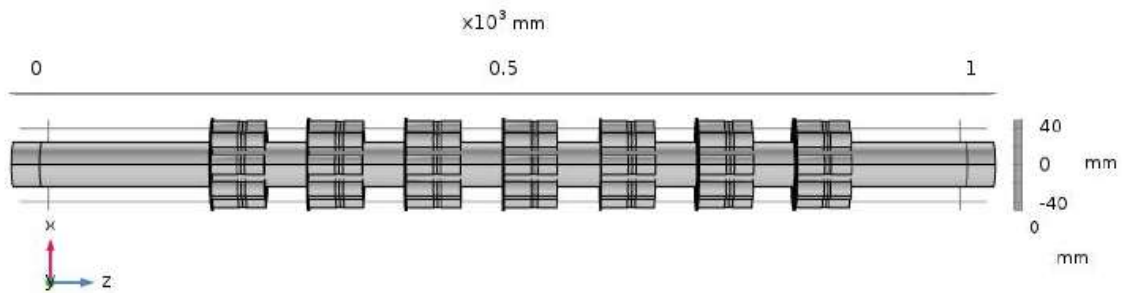


Figura 4.5: Projeto final da ferramenta ultrassônica de aceleração de precipitação.

#### 4.1.2 Teste de conceito com folhas de alumínio

Os primeiros testes realizados com a ferramenta montada serviram para comprovar a eficiência da mesma através do método da erosão da folha de alumínio. Quanto maior a intensidade do ultrassom e o tempo de exposição, maior será o dano causado na folha, sendo assim possível avaliar tanto a existência de cavitação, quanto a sua intensidade (Lewis, 2007).

A ferramenta montada foi avaliada utilizando uma potência de 400 W e tempos de ensaio de 30 (amostras A), 45 (amostras B) e 60 (amostras C) segundos. Além disso, os testes foram realizados com um anel acionado, posteriormente dois anéis e por fim, os três anéis (na nomenclatura das amostras, os números se referem à quantidade de anéis). As frequências foram ajustadas de acordo com o ponto de maior intensidade de cavitação.

O tubo foi fechado em uma de suas extremidades e foi preenchido com água, a cada ensaio a água foi substituída para evitar a interferência por efeitos térmicos.

Para realização dos testes de erosão, foram utilizadas tiras de fita de alumínio com 50 cm de comprimento e 3 cm de largura. As folhas eram posicionadas no centro do tubo da ferramenta, como pode ser observado na Figura 4.6(a). A Figura 4.6(b) apresenta a disposição da folha de alumínio com relação aos anéis com os transdutores, com destaque para a marcação das amostras na folha de alumínio que seriam erodidas. A amostra é a parte da folha que será erodida e corresponde a 30 cm da folha total, parte clara da folha de alumínio na Figura 4.6(b).

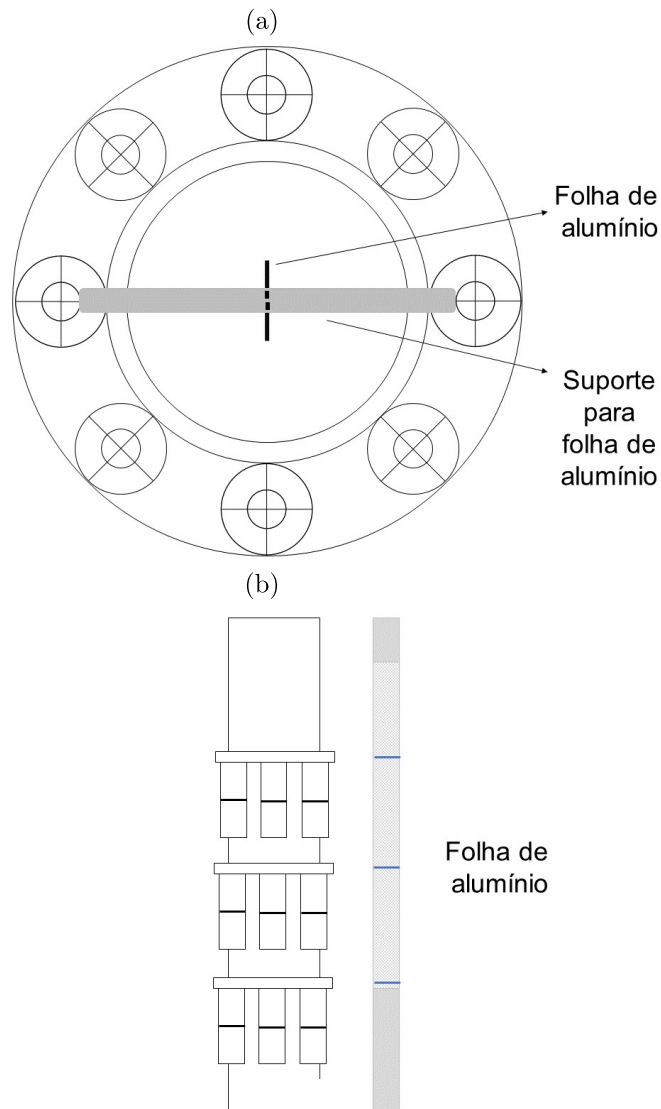


Figura 4.6: *Setup* experimental para teste com folha de alumínio da ferramenta ultrassônica: (a) Vista superior da ferramenta. e (b) Disposição das amostras de folha de alumínio.

Ao final de cada ensaio a fita foi pintada de preto sobre uma folha de papel em branco. Desta forma, nas regiões onde a fita foi erodida o papel ficava marcado, como pode ser observado na Figura 4.7. Através de um *Script* desenvolvido na plataforma Matlab<sup>®</sup>, essa área pintada do papel foi mensurada e desta maneira foi estabelecido o método para métrica da ação do ultrassom, sendo o percentual de erosão a razão entre a área total pintada e a área da fita nova.

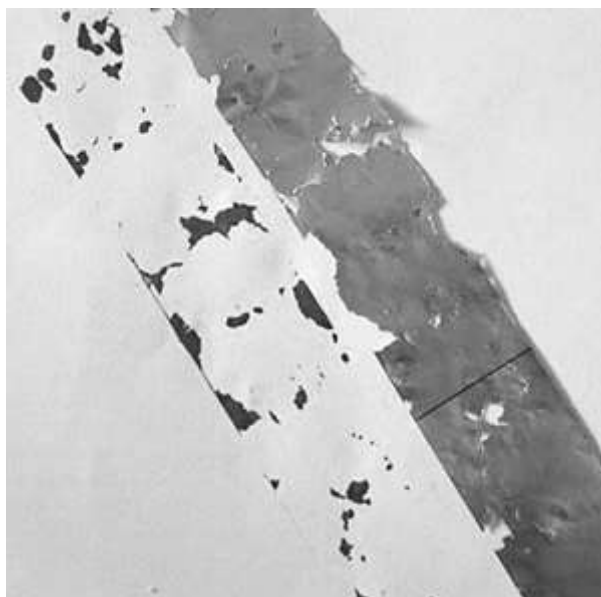


Figura 4.7: Fita erodida após ensaio e área pintada da região erodida pelo ultrassom.

A Tabela 4.2 apresenta os dados a serem coletados e mensurados com os testes com folhas de alumínio.

Tabela 4.2: Dados a serem coletados nos testes com folha de alumínio.

Amostra	Qtd de anéis	Freq. (kHz)	Corrente por anel (A)	Tempo (s)	Temp (°C)		Taxa de erosão (%)
					Inicial	Final	
A1	1	38,3	0,40	30			
B1				45			
C1				60			
A2	2	36	0,45	30			
B2				45			
C2				60			
A3	3	40,4	0,37	30			
B3				45			
C3				60			

### 4.1.3 Teste de conceito em laboratório de teste

Os testes realizados em laboratório tiveram o objetivo de testar a ferramenta em condições de alta pressão e vazão. Para tanto, utilizou-se a linha de alta pressão do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos - NIDF, que fica localizado no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. A linha possui 80 m de comprimento com tubulação de aço inox de 1" de diâmetro, padrão SCH120, e é composta por duas bombas de alta pressão com vazão controlada. Ao longo da linha existem cinco pontos de medida de pressão absoluta, sendo quatro antes da válvula tipo agulha (utilizada para pressurizar a linha) e um logo após. A Figura 4.8 apresenta a linha de alta pressão e nela pode ser observado a ferramenta ultrassônica instalada e o ponto de mistura dos reagentes.



Figura 4.8: Linha de alta pressão do NIDF, com destaques para a ferramenta ultrassônica e o ponto de mistura dos reagentes.

Os testes foram realizados com a vazão de 1200 L/h. A Figura 4.9 apresenta a válvula do tipo agulha (seta vermelha) que foi utilizada para pressurizar a linha. Nesta figura também podem ser observados os transdutores de pressão (setas verde e azul) presentes antes e após a válvula, o transdutor com *display* (seta azul) foi utilizado para ajuste da pressão inicial dos ensaios.

Os reagentes utilizados para formação do carbonato de cálcio foram o cloreto de cálcio



e o bicarbonato de sódio a uma concentração de 7,35 g/L e 12,6 g/L, respectivamente. Após serem acondicionados em tanques, os reagentes são mantidos sob agitação para que fiquem homogêneos e estabilizados, esse processo dura 5 dias. A ferramenta foi instalada à distância de 1,75 m do ponto de mistura dos reagentes.

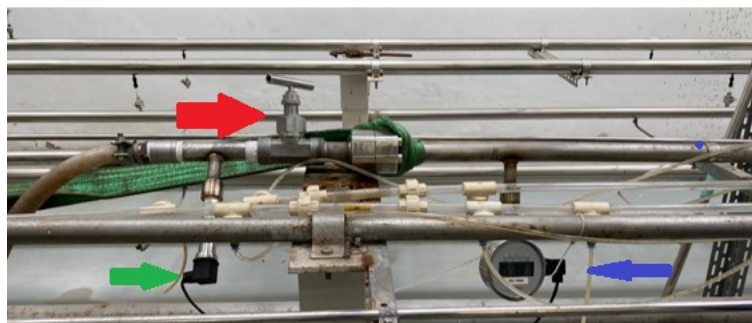


Figura 4.9: Válvula agulha (seta vermelha) utilizada para pressurizar a linha e transdutores de pressão (setas verde e azul).

A ferramenta ultrassônica foi enviada de Salvador para o Rio de Janeiro desmontada e no NIDF foi remontada utilizando os três anéis centrais, conforme pode ser observado na Figura 4.10(a). A escolha de tais anéis se deu para evitar a rigidez mecânica proveniente dos flanges utilizados para fixar a ferramenta na linha, Figura 4.10(b).

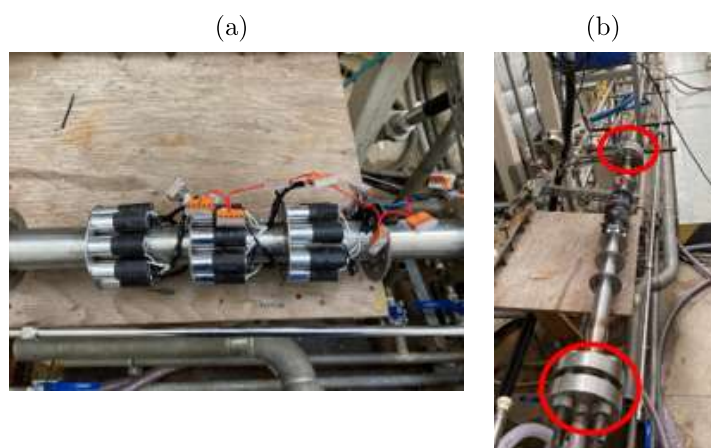


Figura 4.10: Ferramenta ultrassônica: (a) com três anéis centrais montados e (b) com destaque para os flanges de acoplamento na linha.

A incrustação de carbonato de cálcio é avaliada através da análise de corpos de prova, que são anéis de aço e podem ser vistos na Figura 4.11(a). Os anéis foram pesados antes de iniciar os testes e após a finalização dos mesmos. A linha dispõe de três pontos de amostragem posicionados a 4,80 m (ponto 1), a 32,5 m (ponto 2) e a 41 m (ponto 3) do

ponto de mistura. Em cada um destes pontos são acondicionados 2 anéis. No ponto 1 são acondicionados os anéis 1 e 2, no ponto 2, os anéis 3 e 4 e no ponto 3, os anéis 5 e 6. A Figura 4.11(b) apresenta a maneira que estes anéis são posicionados na linha, dentro do flange, de modo a não interferirem na vazão do fluido da linha.

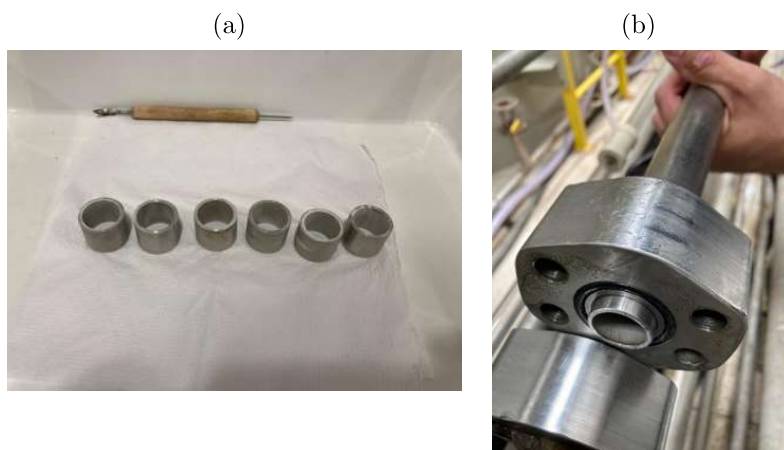


Figura 4.11: Anéis utilizados como corpos de prova (a) e posicionamento dos anéis na linha (b).

Após montagem e ajustes da linha, foi estabelecido o *setpoint* de pressão com água através do ajuste da válvula agulha. Após a estabilização da pressão na linha, as duas válvulas de três vias fazem o chaveamento entre a água e os reagentes. O ensaio é iniciado com monitoramento constante da pressão. A pressão de 80 bar na linha foi definida como o critério de parada.

A Tabela 4.3 apresenta a nomenclatura para os ensaios realizados na linha de incrustação e as pressões iniciais e finais de cada ensaio. O nome onde tem a sigla US indica que tais testes foram realizados com ultrassom e onde tem a sigla NUS indica que não foi utilizado ultrassom. Desta forma pode-se comparar os testes com e sem a atuação do ultrassom para as duas pressões iniciais, 20 e 8 bar.

Tabela 4.3: Nomenclatura dos ensaios realizados na linha de alta pressão.

Ensaio	Pressão Inicial (bar)	Pressão Final (bar)
E1US20	20	80
E2US20	20	80
E3US20	20	80
E4US20	20	80
E5NUS20	20	80
E6US8	8	80
E7NUS8	8	80

Durante os experimentos, o perfil das partículas dispersas no fluido foi analisado em um contador de partículas. Para tanto, no décimo minuto de ensaio um volume de 200 ml de líquido foi coletado no ponto de descarte da linha. Após a finalização dos testes, os corpos de prova eram retirados dos flanges e postos para secar em um dessecador por duas horas. Após a secagem, os anéis eram pesados e o material incrustado em sua superfície interna analisado em um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.2.1 Modelagem e simulação

As simulações feitas no COMSOL Multiphysics® do transdutor ultrassônico foram realizadas para a faixa de frequência de 30 kHz até 50 kHz com passos de 100 Hz, a Figura 4.12 apresenta a curva de impedância do modelo do transdutor em vermelho e, em azul, a curva de impedância do transdutor real através do uso do equipamento TRZ, que é utilizado especificamente para este tipo de medida.

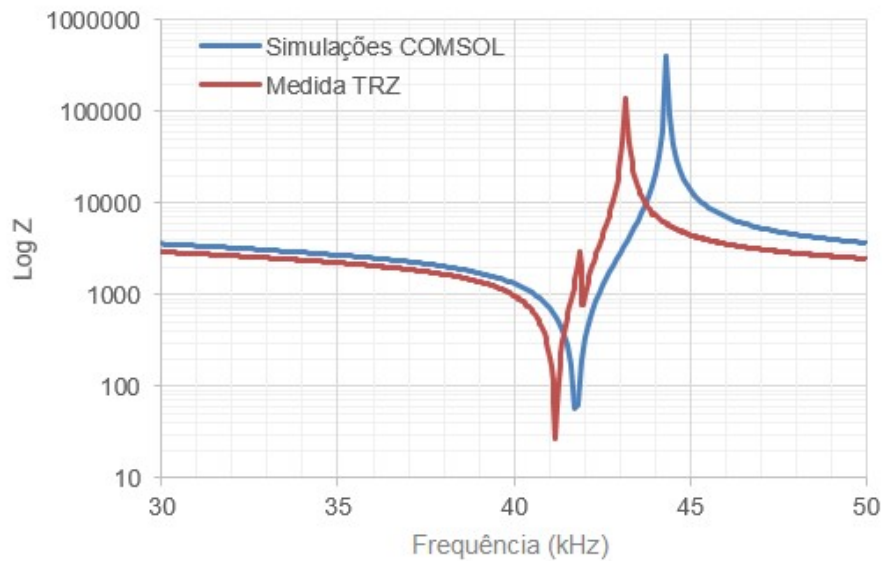


Figura 4.12: Curva de impedância do transdutor ultrassônico no COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup>, em vermelho, e curva de impedância experimental do transdutor ultrassônico com TRZ, em azul.

A partir das curvas foi possível observar que a frequência de ressonância experimental do transdutor foi de 41,2 kHz, onde foi obtida uma impedância de 26,8  $\Omega$ . Já a frequência de ressonância do transdutor simulado no COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup> foi de 41,7 kHz com impedância mínima de 58,3  $\Omega$ . A discrepância entre a frequência de ressonância experimental e a simulada foi de 1,2%. Isso mostra que o modelo do transdutor no COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup> é fidedigno ao transdutor real.

A etapa seguinte das simulações no COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup> foi realizada para desenvolvimento da ferramenta com tubo com 1 1/2". A faixa de frequência utilizada foi de 35 kHz até 45 kHz com passos de 100 Hz, mesma faixa de frequência do gerador de ultrassom disponível em laboratório para acionamento dos transdutores.

Inicialmente, investigou-se a espessura de parede do tubo e a espessura do anel de fixação dos transdutores ultrassônicos. Na Figura 4.13 pode ser visto os resultados das zonas de pressão referentes às configurações de espessura de parede para cada espessura de anel de fixação.

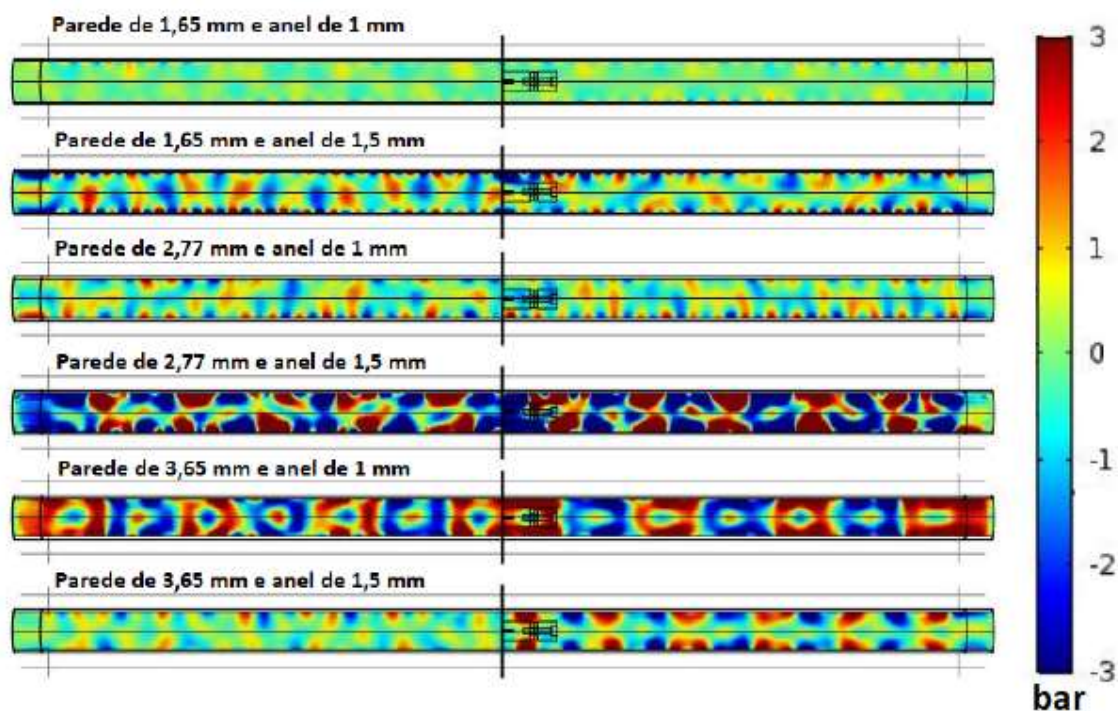


Figura 4.13: Gráficos de zonas de pressão referente às seis simulações realizadas para diferentes espessuras de parede.

A partir dos gráficos de zonas de pressão é possível observar que a melhor configuração foi com espessura de parede de 2,77 mm, padrão Schedule 10S, e espessura do anel de fixação dos transdutores de 1,5 mm. Nessa configuração as zonas de pressão são mais intensas (em vermelho e azul) do que as outras configurações, além de manter essa intensidade ao longo do comprimento do tubo.

Após a determinação das espessuras, o passo seguinte foi determinar a quantidade de transdutores que melhor se configura no anel. A Figura 4.14 (a) apresenta os gráficos das zonas de pressão para as configurações de 1 a 4 transdutores ultrassônicos por anel, enquanto que a Figura 4.14 (b) apresenta, de 5 a 8 transdutores.



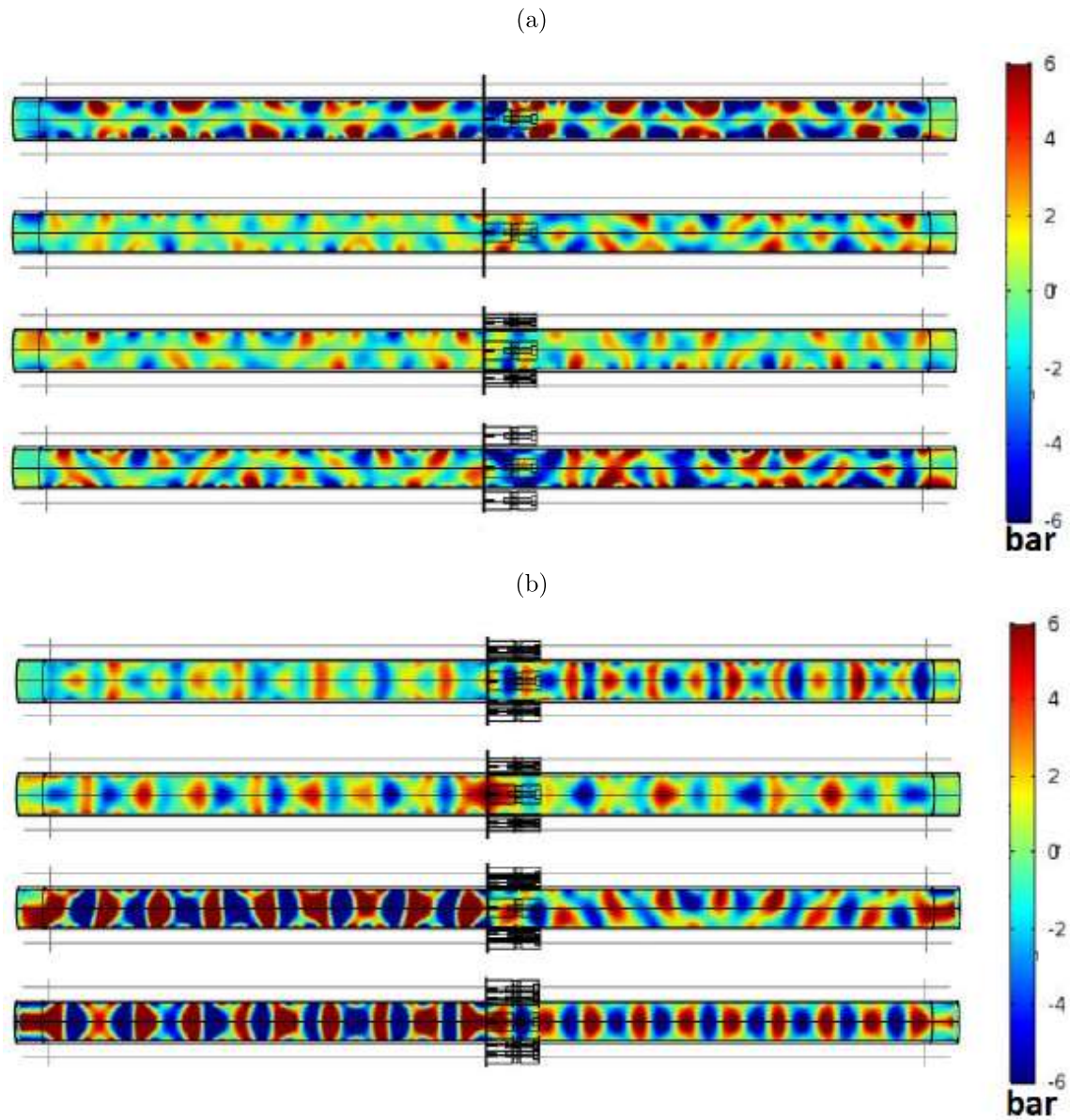


Figura 4.14: Gráficos de zonas de pressão da ferramenta com (a) 1 a 4 transdutores e (b) 5 a 8 transdutores.

A partir dos gráficos de zonas de pressão é possível observar que para a configuração com oito transdutores por anel foram obtidas as maiores amplitudes de pressão e estas apresentaram-se melhor distribuídas ao longo do tubo. Nesta configuração as zonas com vermelho e azul intensos, níveis de pressão 6 e -6 bar respectivamente, obtêm predominância ao longo do comprimento do tubo quando comparado com as outras configurações com número menor de transdutores.

Uma vez determinada a quantidade ideal de transdutores, foi então avaliada a distância

ideal entre os anéis. Esta distância variou entre 75 mm e 145 mm com passos de 10 mm. A Figura 4.15 apresenta os gráficos de zonas de pressão ao longo do tubo com as distâncias entre os dois anéis investigadas.

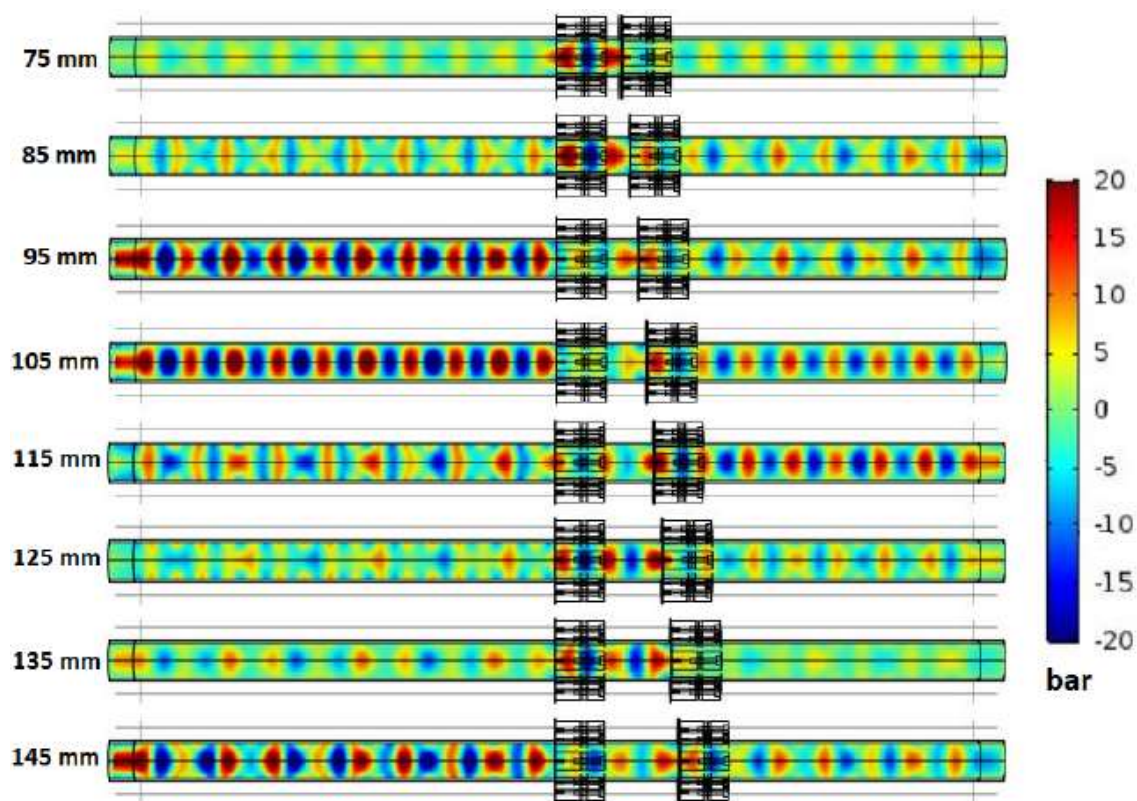


Figura 4.15: Gráficos de zonas de pressão referente às oito simulações realizadas para diferentes distâncias entre os anéis.

A partir dos gráficos de zonas de pressão no interior do tubo, é possível observar que as melhores distâncias entre os anéis, do ponto de vista de maior intensidade de pressão, são 95 mm, 105 mm e 145 mm. E entre estas, a distância de 105 mm é a melhor devido à uniformidade da distribuição de pressão ao longo do comprimento do tubo.

Após os resultados das simulações, a determinação dos parâmetros foi concluída e foi realizado uma simulação da ferramenta em versão final com 7 anéis e total de 56 transdutores. Seus resultados podem ser vistos na Figura 4.16.

Parâmetros simulados e determinados:

- Espessura da parede: 2,77 mm;
- Espessura do anel: 1,5 mm;

- Quantidade de transdutores por anel: 8 transdutores;
- Distância entre anéis: 105 mm (totalizando sete anéis).

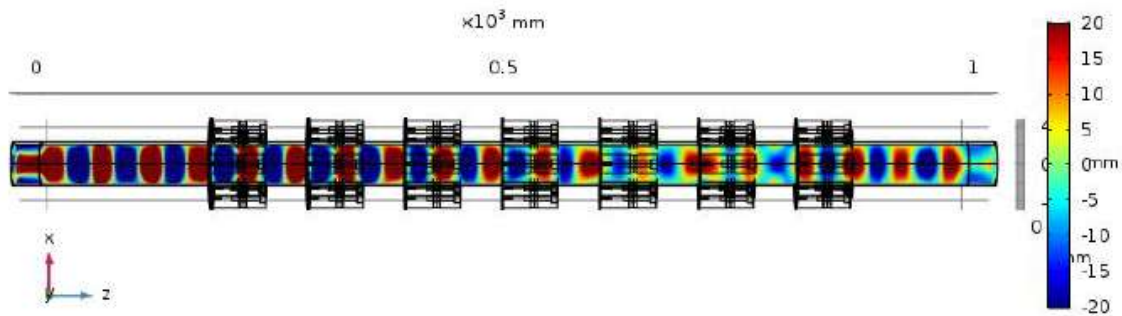


Figura 4.16: Gráfico de zonas de pressão referente ao resultado da simulação da ferramenta.

A frequência de ressonância para a ferramenta com sete anéis e oito transdutores por anel foi de 37,3 kHz. A partir do gráfico é possível observar que os valores de pressão variam de -20 bar a 20 bar e existem zonas de pressão por todo o comprimento do tubo. Apesar da pressão teórica necessária para que ocorra cavitação na água seja de 1500 Bar, em termos práticos este valor é bem menor e pressões inferiores 5 Bar já são capazes de ocasionar cavitação (MOHOLKAR; NIERSTRASZ; WARMOESKERKEN, 2003). Então, magnitudes de pressão como estas obtidas na simulação são um indicativo da existência de cavitação no interior do tubo e por sua vez indicativo de aceleração de precipitação de cristais.

Na Figura 4.17 pode-se observar o protótipo da ferramenta de prevenção de incrustação com três dos sete anéis montados com seus oito transdutores do tipo Langevin.



Figura 4.17: Protótipo de ferramenta de prevenção de incrustação.

#### 4.2.2 Teste de conceito com folhas de alumínio

Ao final dos testes, pode-se observar os resultados da erosão nas folhas de alumínio na Figura 4.18. Após a análise de porcentagem de erosão no Matlab, os resultados foram para a Tabela 4.4, da mesma forma que os valores das temperaturas antes e após os testes.



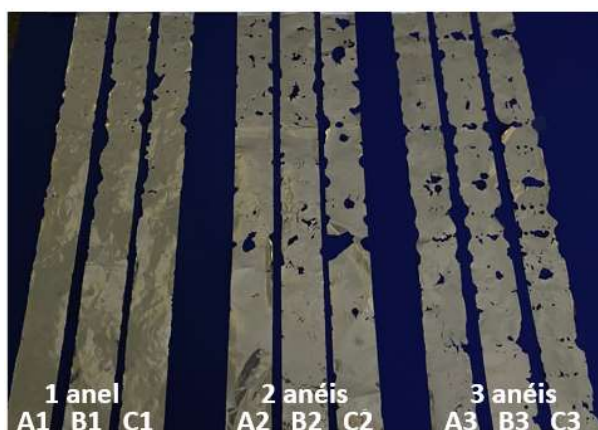


Figura 4.18: Resultados após testes de erosão.

Tabela 4.4: Resultados dos testes de erosão da folha de alumínio.

Amostra	Qtd de anéis	Freq. (kHz)	Corrente por anel (A)	Tempo (s)	Temp (°C)		Taxa de erosão (%)
					Inicial	Final	
A1	1	38,3	0,40	30	24,4	24,8	3,21
B1				45	23,3	24,7	5,25
C1				60	24,5	25,3	6,96
A2	2	36	0,45	30	23,8	24,3	4,95
B2				45	23,8	24,5	6,90
C2				60	24,0	24,9	13,84
A3	3	40,4	0,37	30	23,2	23,6	9,91
B3				45	23,2	23,6	12,71
C3				60	23,5	24,1	16,75

Além da tabela, os resultados da erosão da folha de alumínio, podem ser observados no gráfico da Figura 4.19. Percebe-se pelo gráfico que a taxa de erosão foi maior tanto quando aumentou-se o tempo de exposição da folha de alumínio ao ultrassom, tanto quando aumentou-se a quantidade de anéis ativos.

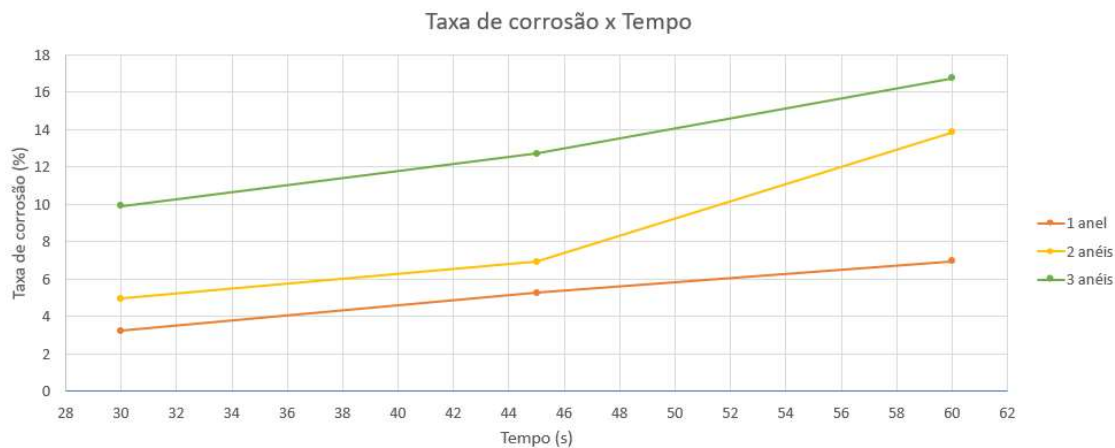


Figura 4.19: Gráfico com as curvas de erosão das folhas de alumínio.

### 4.2.3 Teste de conceito em laboratório

**4.2.3.1 Curvas de pressão** O critério de parada dos testes realizados na linha de alta pressão do NIDF era o diferencial de pressão na válvula. Ou seja, caso a pressão na linha chegasse a 80 bar, por segurança, o ensaio era finalizado. A Figura 4.20 apresenta o gráfico com as curvas de pressão para os ensaios que tiveram pressão inicial de 8 bar e 20 bar.

Percebe-se, no gráfico, que para os ensaios com US e pressão inicial de 20 bar o limiar de 80 bar foi atingido em um tempo médio de 737 s (ensaos E1US20, E2US20 e E3US20). Já o teste sem a ação do ultrassom, ensaio E5NUS20, para o mesmo diferencial de pressão, o limiar de parada foi atingido após 761 s.

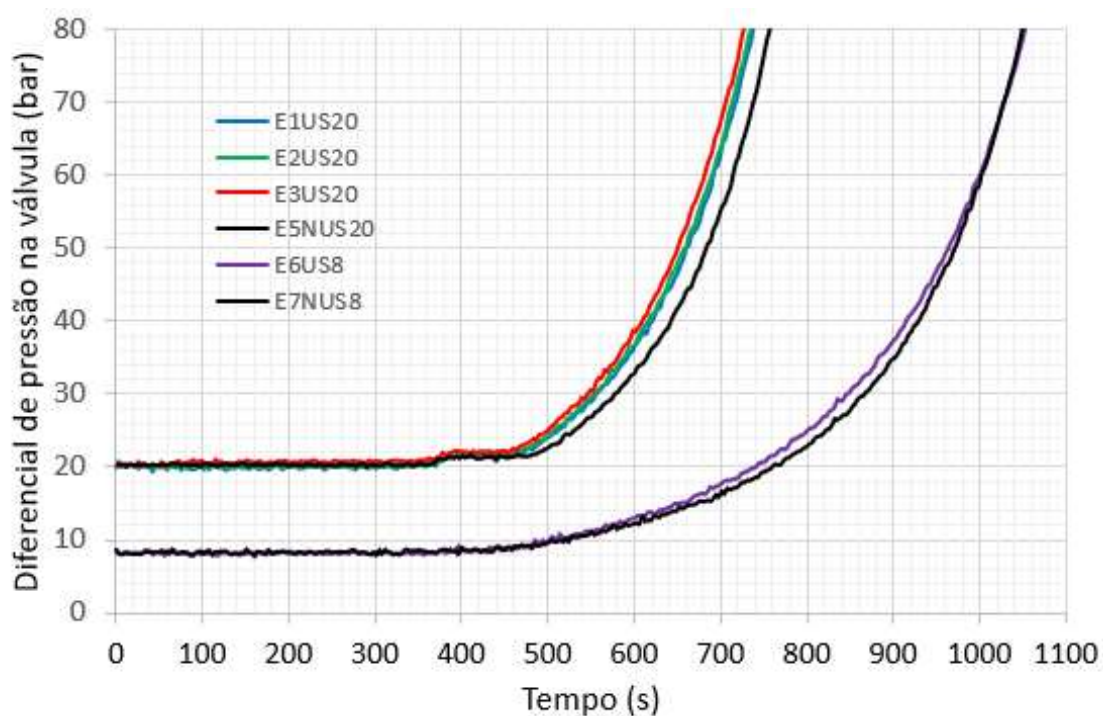


Figura 4.20: Gráfico com as curvas do diferencial da pressão na válvula em cada um dos ensaios.

Os ensaios com ultrassom para uma pressão inicial de 20 bar tiveram uma duração menor que os ensaios sem ultrassom devido às características inerentes ao *setup* experimental. Como dito anteriormente, o diferencial de pressão na linha é obtido pelo ajuste de uma válvula do tipo agulha. Para que este limiar seja alcançado, a sessão de passagem da válvula é diminuta e o excesso de material particulado produzido pelo método ultrassônico acaba por obstruir esta passagem. No entanto, este excesso de material particulado não se reflete na forma de incrustação em sua superfície interna, como pode ser observado na Figura 4.21. A quantidade de material depositado não foi suficiente para ser coletado e analisado.

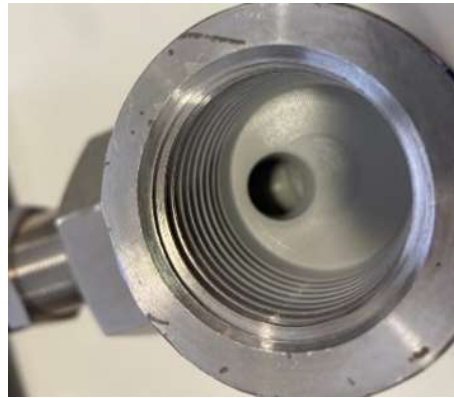


Figura 4.21: Entrada da válvula agulha após ensaio com ultrassom.

Os ensaios com pressão inicial de 8 bar tiveram duração de 1055 s sob a ação do ultrassom (E6US8) e duração 1054 s sem ultrassom (E7NUS8). Nesta condição a duração dos ensaios com e sem ultrassom se tornaram iguais, pois a sessão livre na válvula para o limiar de 8 bar é maior que para 20 bar facilitando a passagem do excesso de material particulado gerado pelo ultrassom.

Uma análise pode ser feita a partir da avaliação da taxa de crescimento das curvas entre 60 e 80 bar. Os valores são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Taxa de crescimento da pressão entre 60 e 80 bar.

Ensaio	Tempo (s) 60 bar	Tempo (s) 80 bar	$\Delta t$ (s)	Taxa de crescimento (bar/s)
E1US20	692,24	738,73	46,49	0,430
E2US20	789,66	735,71	46,05	0,434
E3US20	679,74	725,72	45,97	0.435
E5NUS20	715,21	757,73	42,52	0.470
E6US8	999,30	1051,72	52,42	0.382
E7NUS8	1001,63	1047,45	45,83	0.436

Como dito, o tempo entre o início do ensaio e a parada a 80 bar foi maior sem a presença do ultrassom, quando a pressão inicial foi de 20 bar. Para a pressão inicial de 8 bar estes tempos se tornaram iguais. No entanto, observando na Figura 4.20 apenas o intervalo entre 60 e 80 bar, apresentados na Tabela 4.5, a taxa de crescimento da pressão com ultrassom neste intervalo é menor em ambas as condições de início. Isto indica que se o experimento tivesse um critério de parada maior as curvas se cruzariam e o ensaio com ultrassom teria uma duração maior. Este resultado reforça a justificativa de que o excesso de material particulado gerado pelo ultrassom interferiu no crescimento inicial da

curva.

**4.2.3.2 Tamanho médio e número de partículas** Após dez minutos de testes, um volume de 200 ml de fluido foi coletado no ponto de descarte da linha e as partículas em suspensão foram analisadas. A Figura 4.22 apresenta os resultados da contagem do número de partículas nos ensaios com ultrassom a uma pressão inicial de 20 bar, E3US20 e E4US20, assim como o branco para essa condição, E5NUS20. Além disso, também apresenta os testes conduzidos a 8 bar, E6US8 e E7NUS8, com e sem ultrassom respectivamente.

Após análise dos gráficos, percebe-se que, tanto para os testes de pressão inicial de 20 bar quanto para os testes de 8 bar, o número de partículas em suspensão nos testes com ultrassom foi maior comparado ao teste sem ultrassom. Para os testes a uma pressão inicial de 20 bar esta diferença foi de  $18 \times 10^6$  partículas, número 64% superior, já para a condição inicial de 8 bar de pressão, a diferença foi de  $21 \times 10^6$  de partículas, 55% superior.

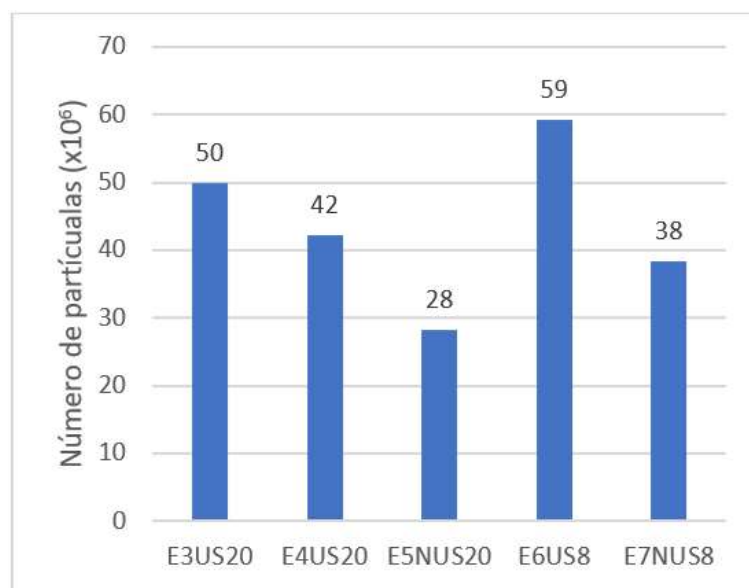


Figura 4.22: Gráfico da contagem de partículas para os ensaios com pressão inicial de 20 e 8 bar com e sem ultrassom.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam a dispersão do tamanho médio das partículas coletadas. Para o ensaio realizado a 20 bar de pressão inicial, o percentual das partículas com tamanho médio abaixo de 26  $\mu\text{m}$  é maior do que sem a ação do ultrassom.

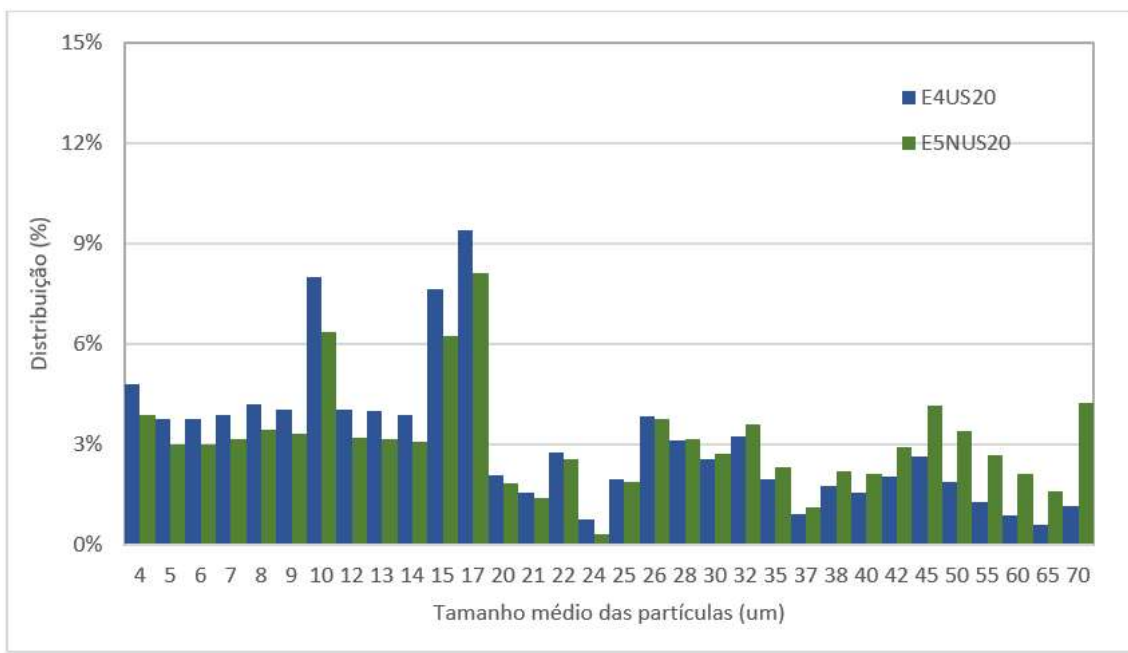


Figura 4.23: Distribuição do tamanho médio das partículas para os ensaios realizados a uma pressão inicial de 20 bar.

O ensaio conduzido a uma pressão inicial de 8 bar, sob a ação do ultrassom, obteve uma distribuição média dos tamanhos das partículas que evidencia mais a ação do ultrassom sob o processo de formação dos cristais de carbonato de cálcio. Sob a ação do ultrassom, a maioria das partículas geradas possuem tamanho médio abaixo de 14 μm.

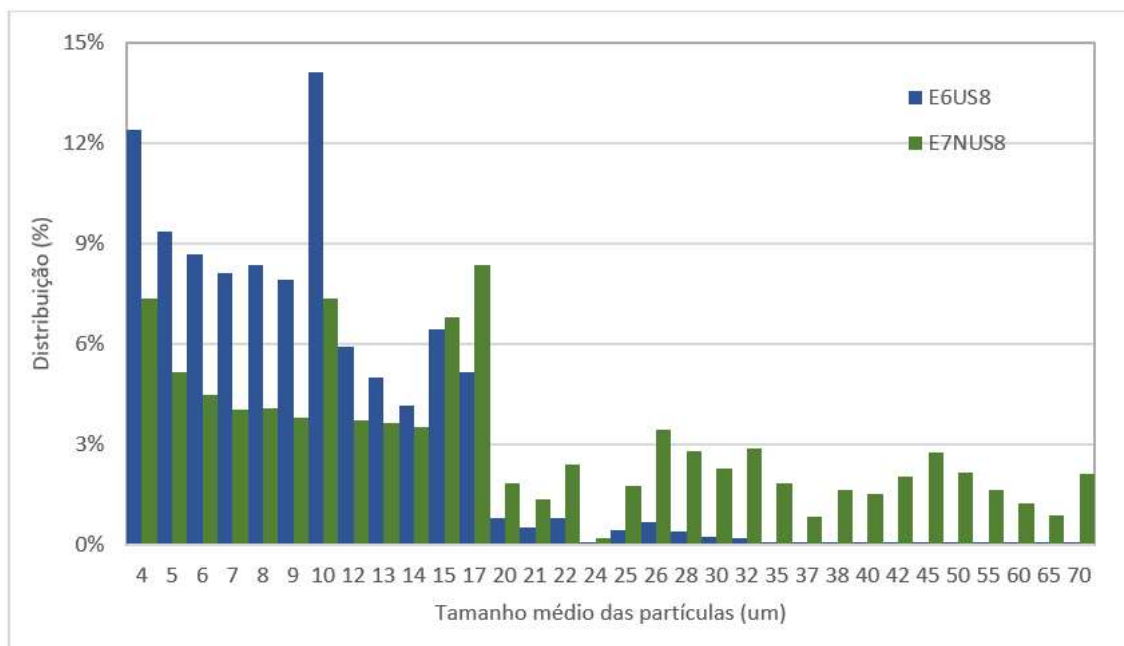


Figura 4.24: Distribuição do médio tamanho das partículas para os ensaios realizados a uma pressão inicial de 8 bar.

Os resultados obtidos a partir da análise do número de partículas e seu tamanho médio evidenciam que o aumento da pressão inicial teve um efeito prejudicial na ação do ultrassom. No entanto, apesar da baixa potência utilizada nos ensaios e da alta vazão o ultrassom foi capaz de atuar acelerando a precipitação e reduzindo o tamanho do material particulado gerado.

**4.2.3.3 Análise de massa dos anéis** Após a finalização dos testes, os corpos de prova foram retirados e secos por duas horas em um dessecador e em seguida pesados. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da massa acumulada nos ensaios com ultrassom e pressão inicial de 20 bar, E3US20 e E4US20, assim como o branco para essa condição, E5NUS20. E também os testes conduzidos a 8 bar, E6US8 e E7NUS8, com e sem ultrassom, respectivamente.

Tabela 4.6: Massa depositada em cada anel da linha para os experimentos E3US20, E4US20, E5NUS20, E6US8 e E7NUS8.

Anel	Posição (m)	Massa depositada (mg)				
		E3US20	E4US20	E5NUS20	E6US8	E7NUS8
1	4,80	10,0	16,8	19,4	35,8	40,7
2		11,4	14,4	16,0	32,2	38,7
3	32,50	10,9	15,7	17,0	26,6	33,3
4		10,9	15,0	15,7	28,3	29,9
5	41,00	15,8	17,3	17,0	27,8	31,7
6		16,6	16,0	17,0	28,4	26,4

Os pares de anéis são posicionados lado a lado podendo ser considerados uma mesma amostra para fins de estatística, então foi realizada uma média entre a massa depositada nos anéis 1 e 2 para os ensaios E3US20 e E4US20. Procedimento similar foi realizado para o branco desta média. E o mesmo foi feito com os demais pares de anéis, os resultados compilados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Massa média acumulada nos pontos de análise para 20 bar de pressão inicial.

Pontos de média	Posição (m)	Sem US (mg)	Desvio sem US (mg)	Com US (mg)	Desvio com US (mg)	Delta m (mg)
#1	4,80	17,70	1,70	13,15	3,60	4,5 (25%)
#2	32,50	16,35	0,70	13,12	2,60	3,2 (20 %)
#3	41,00	17,00	0,00	16,43	0,9	0,6 (4%)



Procedimento similar ao realizado para os ensaios realizados a 20 bar foi realizado para os testes com pressão inicial de 8 bar, ou seja, foi realizada uma média da massa acumulada nos pares de anéis, apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Massa média acumulada nos pontos de análise para 8 bar de pressão inicial.

Pontos de média	Posição (m)	Sem US (mg)	Desvio sem US (mg)	Com US (mg)	Desvio com US (mg)	Delta m (mg)
#1	4,80	39,70	1,00	34,00	1,80	5,7 (14%)
#2	32,50	31,60	1,70	27,40	0,80	4,2 (13%)
#3	41,00	29,00	2,70	28,10	0,30	0,9 (3%)

Os resultados das Tabelas 4.7 e 4.8 são apresentados no gráfico da Figura 4.25, com suas respectivas barras de erro. Como esperado, a massa depositada ao longo da linha nos ensaios realizados a 8 bar foi superior àquela depositada nos ensaios a 20 bar, isto por conta da duração dos ensaios, uma vez que houve uma diferença de aproximadamente 250 s entre os ensaios.

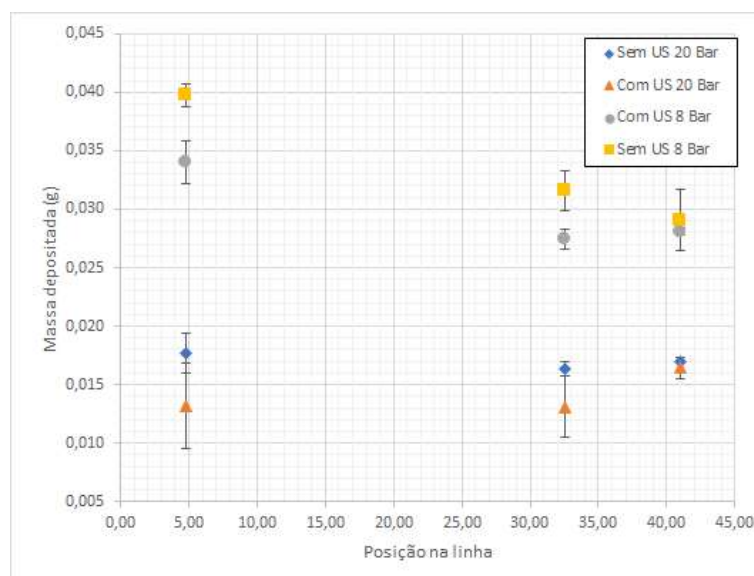


Figura 4.25: Massa média depositada nos corpos de prova da linha para os ensaios com e sem ultrassom e com pressões iniciais de 20 e 8 bar.

O ultrassom foi capaz de reduzir a massa depositada tanto nos testes realizados a 8 bar quanto a 20 bar, o que mais uma vez evidencia o efeito do ultrassom na redução da incrustação de carbonato de cálcio.

**4.2.3.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura - MEV** Para a análise no MEV foram selecionados dentre os pares os anéis 1, 3 e 6, cujos resultados para a pressão de 20 bar são representados na Figura 4.26 tanto para os ensaios com ultrassom quanto para os ensaio sem a ação do ultrassom.

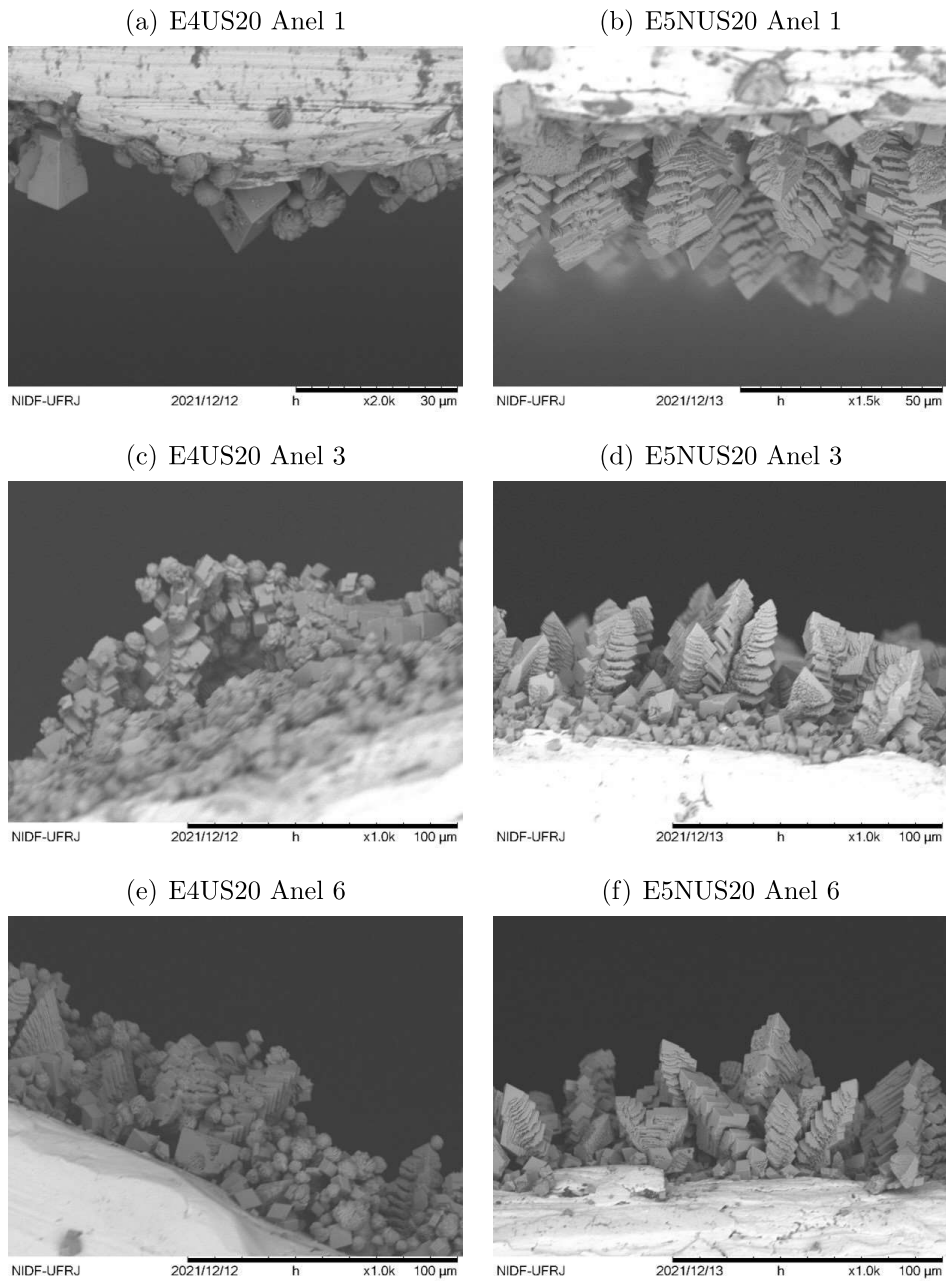


Figura 4.26: Imagens de MEV dos anéis 1,3 e 6 da linha nos ensaios realizados com pressão inicial de 20 Bar na presença do ultrassom (*a*, *c* e *e*) e na ausência ultrassom (*b*, *d* e *f*)

Comparando as imagens de MEV dos ensaios conduzidos na presença de ultrassom aos ensaios conduzidos sem a ação deste, fica evidente a diferença de morfologia do material depositado nos corpos de prova nas três posições na linha. Na ausência de ultrassom a calcita é o polimorfo predominante do carbonato de cálcio, caracterizada por uma estrutura de romboedro, onde as camadas cristalinas crescem umas sobre as outras. Na presença do ultrassom o polimorfo predominante passa a ser a vaterita, caracterizada por uma estrutura esférica, estrutura que possui pouca capacidade de adesão à superfície.

Na Figura 4.27 são apresentados os resultados das análises realizadas em MEV para os anéis 1, 3 e 6, para os ensaios conduzidos a uma pressão inicial de 8 Bar na presença do ultrassom. Devido a problemas técnicos não foi possível realizar as análises em MEV para os experimentos realizados na pressão 8 Bar sem a presença do ultrassom.

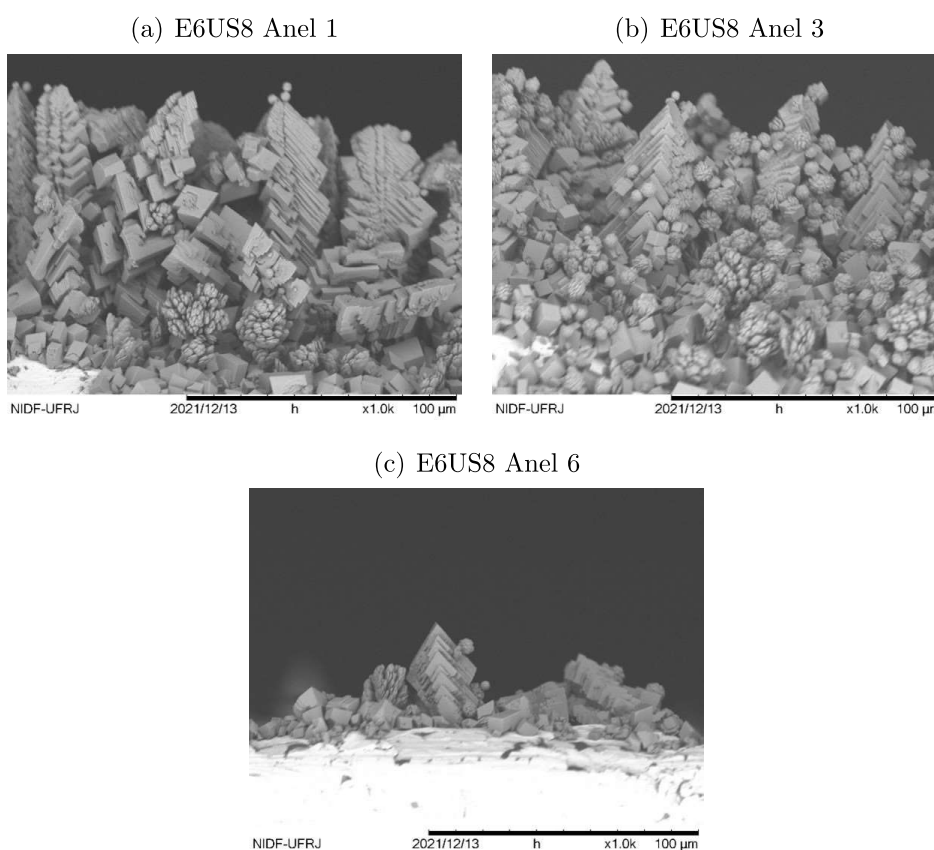


Figura 4.27: Imagens de MEV dos anéis 1,3 e 6 da linha nos ensaios realizados com pressão inicial de 8 Bar na presença do ultrassom (*a*, *b* e *c*).

Apesar de não ter sido possível obter as imagens de MEV na ausência de ultrassom para fins de comparação, é possível observar mais uma vez a presença da vaterina nas imagens de MEV dos 3 anéis. Fica evidente tanto nos ensaios realizados a 20 Bar quanto nos ensaios realizados a 8 Bar que o ultrassom foi capaz de modificar o processo de cris-

74 INVESTIGAÇÃO DO USO DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS ACOPLADOS EM UM TRECHO DE DUTO  
talização do carbonato de cálcio pela presença do polimorfo vaterita.

*Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho e também os trabalhos a serem realizados no futuro.*

## **CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho foram avaliadas duas estratégias para utilização de ultrassom com o intuito de remediar a formação de incrustações de carbonato de cálcio em poços de petróleo. A primeira estratégia foi a utilização de pastilhas piezoelétricas fixadas diretamente à parede do tubo. A segunda estratégia foi a utilização de transdutores de ultrassom do tipo Langevin de pequenas dimensões fixados paralelamente à tubulação. Ambas estratégias visavam atender às restrições de espaço para instalação da ferramenta.

Os testes de mapeamento da pressão acústica da primeira abordagem mostraram que existem zonas com maior atividade ultrassônica e zonas com redução de intensidade. O centro do duto, por exemplo, é uma zona onde se tem grande intensidade ultrassônica. Os testes de condutividade demonstraram que o tempo de indução diminuiu, ou seja, a atuação do ultrassom fez com que a reação fosse acelerada. Os resultados corroboram com a literatura e demonstram que o ultrassom de fato pode influenciar de forma positiva a prevenção de incrustação de carbonato de cálcio. A simulação com o COMSOL Multiphysics® mostrou as zonas de pressão acústica distribuídos em toda a seção transversal do tubo e seus resultados corroboraram com os resultados dos testes realizados no tubo, demonstrando assim que há incidência de ultrassom. A utilização de pastilhas fixadas diretamente ao tubo demonstrou ser uma estratégia promissora para a aplicação de ultrassom em instalações com grandes restrições de espaço.

Na segunda abordagem, as simulações no COMSOL Multiphysics® possibilitaram o desenvolvimento do protótipo da ferramenta ultrassônica com os parâmetros ideais e os testes realizados com folha de alumínio comprovaram que existe maior eficiência quando se aumenta o tempo de exposição ao ultrassom e quando há um aumento no número de anéis ativos. Nestes casos, houve uma maior erosão da folha de alumínio. A ferramenta ultrassônica para a prevenção de incrustação de carbonato de cálcio desenvolvida também apresentou bons resultados em todos os ensaios realizados em laboratório, reforçando assim a sua viabilidade de utilização em poços de petróleo. Durante os ensaios conduzidos

a pressões iniciais de 8 e 20 Bar, as amostras coletadas nos ensaios com ultrassom da solução no ponto de descarte tiveram um número de partículas dispersas em média 60% superior às amostras coletadas sem ultrassom, sendo o tamanho médio destas partículas também menores. O número excessivo de partículas formadas, devido às características da linha, fez com que o gráfico de pressão na linha para todas as condições fosse muito similar. A massa depositada nos corpos de prova existentes ao longo da linha para os ensaios com ultrassom foi inferior à depositada nos ensaios sem ultrassom. Em especial, para o corpo de prova mais próximo do ponto de mistura este valor foi de 25% e 14% inferior para as condições iniciais de 20 e 8 bar respectivamente. O efeito do ultrassom também foi evidenciado na morfologia do material acumulado nos corpos de prova, sendo evidenciado muitos cristais de vaterita. Apesar das condições experimentais onde a ferramenta foi utilizada com apenas 3 anéis montados e o experimento sendo conduzido com uma elevada vazão a ferramenta mostrou-se capaz de alterar a dinâmica de formação dos cristais acelerando sua precipitação, morfologia e massa depositada. No entanto, este efeito foi mais evidente para os ensaios conduzido a uma pressão inicial de 8 Bar.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos para a proposta de ferramenta utilizando cerâmica piezoelétrica acoplada em um trecho de duto foram muito promissores o que sugere a necessidade de uma continuidade da investigação, sendo necessário aumentar o número de cerâmicas piezoelétricas na parede de uma tubulação mais condizente com os padrões utilizados na indústria petrolífera e desta forma avaliar o efeito do campo de ultrassom para tal arranjo. Para desta forma, atingir o objetivo da Figura 3.1.

Já, para a ferramenta ultrassônica utilizando transdutores do tipo Langevin, algumas considerações podem ser feitas:

- realizar os testes com a ferramenta ultrassônica montada com todos os sete anéis e 56 transdutores instalados;
- desenvolver uma eletrônica que seja possível acoplar à ferramenta de modo a não interferir em seu diâmetro;
- desenvolver uma carenagem de modo a isolar os transdutores e a eletrônica do ambiente externo;
- realizar testes e laboratório e posteriormente em poço com a ferramenta completa (transdutores, eletrônica e carenagem).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIB, G. A. P. *Estudo da dissolução de incrustação de sulfato de bário por solução removedora à base de dpta*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015.
- ACHY, A. *Banho químico assistido por ultrassom de alta potência para a remoção de incrustações em hidrociclones*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2018.
- ADDADI, L.; RAZ, S.; WEINER, S. Taking advantage of disorder: amorphous calcium carbonate and its roles in biomineralization. *Advanced Materials*, Wiley Online Library, v. 15, n. 12, p. 959–970, 2003.
- BASHEER, C. et al. Calcium carbonate scale inhibition with ultrasonication and a commercial antiscalant. *Water*, MDPI, v. 13, n. 23, p. 3428, 2021.
- BELLO, O. *Calcium carbonate scale deposition kinetics on stainless steel surfaces*. Tese (Doutorado) — University of Leeds, 2017.
- BEZERRA, M. C. M. et al. Scale management in deep and ultradeep water fields. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. *OTC Brasil*. [S.l.], 2013.
- BISCHOFF, J. L.; FITZPATRICK, J. A.; ROSENBAUER, R. J. The solubility and stabilization of ikaite ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) from 0 to 25 °C: Environmental and paleoclimatic implications for thynolite tufa. *The Journal of Geology*, University of Chicago Press, v. 101, n. 1, p. 21–33, 1993.
- CAVALEIRO, M.; BELEZA, M. *FQ8 Sustentabilidade na Terra*. [S.l.]: ASA, 2006.
- CELSO, G. M. D. et al. Calcium carbonate scales on process equipment: A measure of the induction time for nucleation. *Desalination and Water Treatment*, Desalination Publications, p. 173–177, 2017.
- CHILIBON, I.; WEVERS, M.; LAFAUT, J. Ultrasound underwater transducer for extracorporeal shock wave lithotripsy (eswl). *Romanian Reports in Physics*, Editura Academiei Romane, v. 57, n. 4, p. 979, 2005.
- CHO, Y. I.; FAN, C.; CHOI, B.-G. Theory of electronic anti-fouling technology to control precipitation fouling in heat exchangers. *International communications in heat and mass transfer*, Elsevier, v. 24, n. 6, p. 757–770, 1997.

- CHOTOLI, F. F. et al. Quantificação de polimorfos do carbonato de cálcio cristalizado em laboratório. *Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração de Poços de Petróleo e Gás*, v. 7, n. 2017, p. 1–6, 2017.
- COSMO, R. d. P. et al. Estimating  $CO_2$  degassing effect on  $CaCO_3$  precipitation under oil well conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 181, p. 106207, 2019.
- COTO, B. et al. Effects in the solubility of  $CaCO_3$ : Experimental study and model description. *Fluid Phase Equilibria*, Elsevier, v. 324, p. 1–7, 2012.
- COWAN, J. C.; WEINTRITT, D. J. *Water-formed scale deposits*. [S.l.]: Gulf Publishing Company, Book Division, 1976.
- CRABTREE, M. et al. Fighting scale: removal and prevention. *Oilfield review*, v. 11, n. 03, p. 30–45, 1999.
- CUNHA, J. D. da et al. Avaliação da incrustação no nipple de assentamento da bomba de fundo em poços produtores de petróleo e gás: Estudo de caso. *I Congresso Nacional De Engenharia De Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis / III Workshop De Engenharia De Petróleo*, 2015.
- DALAS, E. The effect of ultrasonic field on calcium carbonate scale formation. *Journal of Crystal Growth*, Elsevier, v. 222, n. 1-2, p. 287–292, 2001.
- DAVIES, M.; SCOTT, P. *Oilfield water technology*. [S.l.]: NACE International Houston, TX, 2006.
- DUARTE, F. V. Influência da aplicação de gás carbônico na redução de precipitação de carbonatos em sistema de irrigação localizada. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- DUGGIRALA, P. Y. Formation of calcium carbonate scale and control strategies in continuous digesters. *CD del II Coloquio Internacional sobre Celulosa de Eucalipto, Concepción, Chile, Mayo*, 2005.
- DYER, S. J.; GRAHAM, G. M. The effect of temperature and pressure on oilfield scale formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 35, n. 1-2, p. 95–107, 2002.
- FARSHAD, F. F. et al. The effects of magnetic treatment on calcium sulfate scale formation. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. *SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting*. [S.l.], 2002.
- FROTA, T. et al. Assessment of scale formation in the column of an oil and natural gas producing well: A case study. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, v. 7, n. 1, 2013.
- FUCHS, J. Ultrasonic intensity measurement techniques. In: *CleanTech Symposium Proceedings*, Witter Publications. [S.l.: s.n.], 2002.



- FUKUSHI, K. et al. Monohydrocalcite: a promising remediation material for hazardous anions. *Science and technology of advanced materials*, Taylor & Francis, 2011.
- GABRIELLI, C. et al. Magnetic water treatment for scale prevention. *Water Research*, Elsevier, v. 35, n. 13, p. 3249–3259, 2001.
- GALLEGO-JUAREZ, J. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, IOP Publishing, v. 22, n. 10, p. 804, 1989.
- GASPAROTTO, G. et al. Síntese e caracterização da cerâmica pzt dopada com íons bário. *Cerâmica*, SciELO Brasil, v. 49, n. 310, p. 110–115, 2003.
- HELAL, A. A. et al. Influence of magnetic fields on calcium carbonate scaling in aqueous solutions at 150 c and 1 bar. *Journal of colloid and interface science*, Elsevier, v. 509, p. 472–484, 2018.
- HIELSCHER. *Ultrasonic Crystallization and Precipitation*. 2020. (<https://www.hielscher.com/ultrasonic-crystallization-and-precipitation.htm>) - Acessado em 15 de julho de 2020.
- HITCLEAN. *Hitclean: Project*. 2016. (<http://hitcleanproject.co.uk/project/>) - Acessado em 15 de julho de 2020.
- JR, V. E. M.; SHARMA, M. M. *Acoustic well cleaner*. [S.l.]: Google Patents, 1997. US Patent 5,595,243.
- KALFAYAN, L. *Production enhancement with acid stimulation*. [S.l.]: Pennwell books, 2008.
- KAMAL, M. S. et al. Oilfield scale formation and chemical removal: A review. *Journal of petroleum science and engineering*, Elsevier, v. 171, p. 127–139, 2018.
- KAN, A. T.; TOMSON, M. B. Scale prediction for oil and gas production. *Spe Journal*, OnePetro, v. 17, n. 02, p. 362–378, 2012.
- KOJIMA, Y.; YAMAGUCHI, K.; NISHIMIYA, N. Effect of amplitude and frequency of ultrasonic irradiation on morphological characteristics control of calcium carbonate. *Ultrasonics sonochemistry*, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 617–620, 2010.
- KRAG, A. H. et al. Preventing scale deposition downhole using high frequency electromagnetic ac signals from surface to enhance production offshore denmark. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. [S.l.], 2014.
- LAIS, H. et al. Characterization of the use of low frequency ultrasonic guided waves to detect fouling deposition in pipelines. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 7, p. 2122, 2018.

LAIS, H. et al. Numerical investigation of design parameters for optimization of the in-situ ultrasonic fouling removal technique for pipelines. *Ultrasonics sonochemistry*, Elsevier, v. 56, p. 94–104, 2019.

LEHMAN, L. V. et al. *System and method for scale removal in oil and gas recovery operations*. [S.l.]: Google Patents, 2007. US Patent 7,213,650.

LIU, S.-P. Chlorine-release test for cavitation-activity measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 38, n. 5, p. 817–823, 1965.

MARQUES, L. et al. How petrobras has faced oilfield scale problems: Evolution of concepts and lessons learned in campos basin, brazil. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. *International Symposium on Oilfield Scale*. [S.l.], 2001.

MARQUES, R. T. de M. *Investigação experimental de inibidores físicos na precipitação de carbonato de cálcio*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MENG, X. et al. Research on magnetization and scale inhibition technology of china oilfield wastewater. *Fresenius Environ. Bull*, v. 28, p. 4414–4422, 2019.

MILLERO, F. J. *Chemical oceanography. 4<sup>a</sup> edição*. [S.l.]: CRC press, 2013.

MOHOLKAR, V.; NIERSTRASZ, V.; WARMOESKERKEN, M. Intensification of mass transfer in wet textile processes by power ultrasound. *Autex research journal*, v. 3, n. 3, p. 129–138, 2003.

MORAIS, S. C. de et al. Effect of ph on the efficiency of sodium hexametaphosphate as calcium carbonate scale inhibitor at high temperature and high pressure. *Desalination*, Elsevier, v. 491, p. 114548, 2020.

MPELWA, M.; TANG, S.-F. State of the art of synthetic threshold scale inhibitors for mineral scaling in the petroleum industry: a review. *Petroleum Science*, Springer, v. 16, n. 4, p. 830–849, 2019.

MULLAKAEV, M.; ABRAMOV, V.; ABRAMOVA, A. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Journal of petroleum science and engineering*, Elsevier, v. 125, p. 201–208, 2015.

MULLIN, J. W. *Crystallization*. [S.l.]: Elsevier, 2001.

MURYANTO, S. et al. Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature, and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale. *Procedia Chemistry*, Elsevier, v. 9, p. 69–76, 2014.

MURYANTO, S. et al. Development of a versatile laboratory project for scale formation and control. *Education for Chemical Engineers*, Elsevier, v. 7, n. 3, p. e78–e84, 2012.

- MYERSON, A.; ERDEMIR, D.; LEE, A. *Handbook of industrial crystallization*, 3<sup>a</sup> edição. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2019.
- NEHRKE, G. *Calcite precipitation from aqueous solution: transformation from vaterite and role of solution stoichiometry*. Tese (Doutorado) — UU Dept. of Earth Sciences, 2007.
- NISHIDA, I. Precipitation of calcium carbonate by ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, Elsevier, v. 11, n. 6, p. 423–428, 2004.
- ONDA, C. *HNR-series Needle Hydrophone*. 2020. <<https://www.ondacorp.com/hnr-needle-hydrophone/>> - Acessado em 16 de abril de 2021.
- PERIĆ, J. et al. Phase transformation of calcium carbonate polymorphs. *Thermochimica Acta*, Elsevier, v. 277, p. 175–186, 1996.
- REIS, M. I. et al. deposição mineral em superfícies: problemas e oportunidades na indústria do petróleo. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 1, p. 2–13, 2011.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. *Projetos de poços de petróleo: geopressões e assentamentos de colunas de revestimentos*. 2<sup>a</sup> edição. [S.l.: s.n.], 2009.
- RODOWANSKI, I. J. *Novo PIG de limpeza assistido por ultrassom: o teste de conceito*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2016.
- ROSA, C. M. d. et al. Comportamento de reagentes inibidores de incrustação aplicados na perfuração de poços de petróleo. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 20, n. 2, p. 514–522, 2015.
- ROSTRON, P. Critical review of pipeline scale measurement technologies. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 11, n. 17, 2018.
- RUECROFT, G. et al. Sonocrystallization: the use of ultrasound for improved industrial crystallization. *Organic process research & development*, ACS Publications, v. 9, n. 6, p. 923–932, 2005.
- SCHLUMBERGER. *Oilfield Glossary: scale removal*. 2020. <[https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/scale\\_removal.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/scale_removal.aspx)> - Acessado em 16 de julho de 2020.
- SCHNEIDER, R. R.; SCHULZ, H. D.; HENSEN, C. Marine carbonates: their formation and destruction. In: *Marine geochemistry*. [S.l.]: Springer, 2006. p. 311–337.
- SHIRSATH, S. et al. Continuous precipitation of calcium carbonate using sonochemical reactor. *Ultrasonics sonochemistry*, Elsevier, v. 24, p. 132–139, 2015.
- SILVA, C. E. T. *Reator ultrassônico de alta potência aplicado na indústria de petróleo e gás*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2022.

SMITH, A. C. *Design of high power ultrasonic manufacturing tools: a systems approach*. Tese (Doutorado) — Loughborough University, 1997.

SOUSA, M. F.; SIGNORELLI, F.; BERTRAN, C. A. Fast evaluation of inhibitors for calcium carbonate scale based on ph continuous measurements in jar test at high salinity condition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 147, p. 468–473, 2016.

SU, M. et al. Ultrasonic crystallization of calcium carbonate in presence of seawater ions. *Desalination*, Elsevier, v. 369, p. 85–90, 2015.

SUTKAR, V. S.; GOGATE, P. R.; CSOKA, L. Theoretical prediction of cavitation activity distribution in sonochemical reactors. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, v. 158, n. 2, p. 290–295, 2010.

TAYRA, V. T. *Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico de potência aplicado em perfuração de rochas e usinagem de metais*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.

THOMAS, J. E. et al. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2<sup>a</sup> edição. [S.l.: s.n.], 2004.

VIANA, M. C. et al. Modelagem e simulação da incrustação de carbonato de cálcio em condições de poço. *VI Encontro nacional de hidráulica de poços de petróleo, ENAHPE*, 2015.

XIAOKAI, X.; CHONGFANG, M.; YONGCHANG, C. Investigation on the electromagnetic anti-fouling technology for scale prevention. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, Wiley Online Library, v. 28, n. 12, p. 1540–1545, 2005.

XUEFEI, M. et al. Experimental study on calcium carbonate precipitation using electromagnetic field treatment. *Water science and technology*, IWA Publishing, v. 67, n. 12, p. 2784–2790, 2013.

Salvador, 06/11/2023

## DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o texto final apresentado para a conclusão do meu curso de doutorado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia é de minha autoria. Declaro também que quaisquer informações utilizadas neste texto, mas que sejam provenientes de outros trabalhos, têm fonte claramente expressa e, quando for o caso, o seu uso foi devidamente autorizado pelo(s) respectivo(s) autor(es).

*Lorena Leal de Oliveira Soares*

Nome: Lorena Leal de Oliveira Soares

CPF: 007.387.375-69