

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

GUILHERME NATSUTARO DESCROVI NABEYAMA

**DETECÇÃO DE PARAFINA POR INSTRUMENTAÇÃO
ULTRASSÔNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2015

GUILHERME NATSUTARO DESCROVI NABEYAMA

**DETECÇÃO DE PARAFINA POR INSTRUMENTAÇÃO
ULTRASSÔNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Nabeyama, Guilherme Natsutaro Descrovi
N115d Detecção de parafina por instrumentação ultrassônica /
2015 Guilherm Natsutaro Descrovi Nabeyama.-- 2015.
78 f. : il. ; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2015

Bibliografia: p. 72-78

1. Cera de parafina - Medição. 2. Ultrassom. 3. Engenharia Elétrica e Informática Industrial - Dissertações. I. Neves Junior, Flávio, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

Título da Dissertação N°._____

Detecção de Parafina por Instrumentação Ultrassônica

por

Guilherme Natsutaro Descrovi Nabeyama

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

Esta Dissertação foi apresentada em como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Engenharia de Automação e Sistemas** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **9:00h** do dia **26 de Novembro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores.

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(Presidente - UTFPR)

Prof. Dr. Luiz Carlos Felizari
(IFPR)

Prof. Dr. Dalton Bertoldi
(UTFPR)

Visto da coordenação

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Coordenador CPGEI)

Dedico este trabalho a toda a minha
família, meus amigos que estiveram
presente em meu caminho e ao nosso Pai
Celestial que ele sempre ilumine o nosso
caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus familiares, principalmente meus pais Walter Hitossi Nabeyama e Elizabete Genedir Descrovi, que sempre estiveram comigo e me apoiaram em todas as fases da minha vida, me incentivaram e dando suporte a sempre buscar novos conhecimentos e conseguirão fornecer a mim a oportunidade de cursar e finalizar o curso.

Agradeço ao meu orientador, Flávio Neves Junior, que tornou possível a conclusão deste trabalho, desde o início sanando minhas dúvidas, fornecendo um ambiente de trabalho e equipamentos necessários dentro do Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado (LASCA) dentro na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Agradeço ao meu colega de laboratório Cesar Yutaka Ofuchi por todo o apoio durante a realização dos trabalhos.

Agradeço a todos os docentes presentes durante toda a minha formação, capacitação e instrução acadêmica.

Agradeço a todos os meus amigos que me apoiaram durante este longo percurso e lutaram junto comigo para aqui chegar.

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT - PRH10-UTFPR.

Sendo assim, agradeço a esta oportunidade fornecida e a todos que nela se fizeram presentes.



“Lembre-se que as pessoas podem tirar
tudo de você, menos o seu
conhecimento.”
Albert Einstein

RESUMO

NABEYAMA, Guilherme Natsutaro Descrovi. **Detecção de Parafina Por Instrumentação Ultrassônica**. 2015. 78 f. Dissertação – Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica E Informática Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A obstrução das paredes internas de tubulações de transporte e produção de petróleo devido à sedimentação de hidrocarbonetos é um problema grave que pode acarretar riscos operacionais, perdas de equipamentos e gerar prejuízos à indústria. Este trabalho tem por objetivo realizar experimentos utilizando ultrassom, na caracterização de depósitos de parafina em superfícies metálicas, com enfoque na estimativa da espessura desses acúmulos. Os testes foram realizados em uma bancada experimental onde corpos de prova com diferentes espessuras de aço e depósitos de parafina foram mensurados. Os resultados experimentais mostraram que devido à diferença entre as propriedades acústicas do aço e da parafina a utilização de ultrassom, para detectar a presença de depósitos de parafina, torna-se uma tarefa bastante complexa. A medição com exatidão será dependente do meio que fará interface com a parafina, o qual deverá ter certas características para um casamento de impedância acústica com o depósito, permitindo uma maior reflexão do sinal. A técnica de supressão de ecos utilizada para detecção dos depósitos mostrou-se bastante satisfatória, fornecendo uma resposta final com incerteza inferior a 0,32mm.

Palavras-chave: Parafina. Depósito. Medição. Ultrassom. Supressão de eco.

ABSTRACT

NABEYAMA, Guilherme Natsutaro Descrovi. **Detection of Paraffin by Ultrasonic Instrumentation**. 2015. 78 f. Dissertation - Postgraduate Program in Electrical Engineering and Industrial Computing - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2015.

An obstruction in the oil pipelines' inner walls of transport and production due to hydrocarbon deposition is a serious problem that can cause operational risks, equipment losses and lead to losses to the industry. This work aims to conduct experiments using ultrasonic waves, to detect paraffin deposits on steel surfaces, focusing in the estimation of the thickness of these accumulations. The tests were conducted in a test rig where specimens with different thicknesses of steel and paraffin deposits were measured. The experimental results showed that due to the difference between the acoustic properties of the steel and paraffin the use of ultrasound, for detecting paraffin deposits, becomes a very complex task. Measuring accurately is dependent on the medium that will interface with the wax, which must have certain characteristics for the acoustic impedance coupling with the deposit, allowing a greater reflection of the ultrasound signal. The echo suppression technique used to detect the deposits proved to be quite satisfactory, providing a response value with uncertainty of less than 0.32mm.

Keywords: Paraffin. Deposition. Measurement. Ultrasound. Echo suppression.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Seção Transversal de um Oleoduto	14
Figura 2 - Princípio da deposição de parafina por difusão molecular	19
Figura 3 – Configuração do Pulso de Pressão em uma tubulação, mostrando a válvula de ação rápida e dois transdutores de pressão, A e B.....	21
Figura 4 - Redução no diâmetro da tubulação indicado pelo intervalo C-D, este intervalo está entre os pontos A e B de medição.	21
Figura 5 - Técnicas de Radiografia	22
Figura 6 - Configuração básica em uma linha de produção	23
Figura 7 - Exemplo de medição pela técnica de impulso de calor.....	23
Figura 8 – Coeficientes de Reflexão e Transmissão para aço e água	25
Figura 9 – a) Arranjo de um transdutor em imersão para teste ultrassônico de pulso-eco sobre uma amostra; b) Ecos provenientes do meio e da amostra pelo teste ultrassônico.	26
Figura 10 – Bancada Experimental	32
Figura 11 – Processo de produção dos corpos de prova	33
Figura 12 - Corpo de Prova de 6,55mm com depósito de parafina	33
Figura 13 - Corpo de Prova 24,22mm com caixa acrílica fixada	34
Figura 14 - Suporte do Transdutor	35
Figura 15 - Pulsador-Receptor Modelo5077PR Panametrics®	36
Figura 16 - NI PXIe-1078 National Instruments®	37
Figura 17 – Interface do Aplicativo LabView®.....	38
Figura 18 – Configuração do banho térmico	39
Figura 19 – a) Posição do transdutor para obtenção do teste de referência. b) Posição do transdutor para obtenção do teste com parafina.	42
Figura 20 – Sinais transmitidos e refletidos nas interfaces do corpo de prova.....	45
Figura 21 – Sinal com e sem parafina, graficados sobrepostos sem ajuste de tempo	47
Figura 22 – Sinal com e sem parafina com compensação de tempo	48
Figura 23 – Sinal com e sem parafina com indicação da área de interesse.....	48
Figura 24 – Sinal com e sem parafina, normalizado.	49
Figura 25 - Sinal com e sem parafina, juntamente com suas respectivas envoltórias	49
Figura 26 – Envoltórias do sinal com e sem parafina e a diferença	50
Figura 27 - Envoltórias do sinal com e sem parafina e a diferença em decibel.....	50
Figura 28 – Envoltórias do sinal com e sem parafina e a diferença com indicativo dos ecos referente a interface aço/parafina e parafina/meio 2	51
Figura 29 – Curva de Velocidade por Temperatura dos pontos medidos, curva estimada e incerteza associada.	55
Figura 30 – Curvas de Velocidade por Temperatura dos meios	56

Figura 31 – Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 24,22mm e Ar	58
Figura 32 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 24,22mm e Óleo USP	58
Figura 33 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 24,22mm e Óleo Singer®	59
Figura 34 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 24,22mm e Óleo USP	59
Figura 35 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 24,22mm e Óleo Singer®	60
Figura 36 — Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 6,55mm e Ar	60
Figura 37 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 6,55mm e Óleo Singer®	61
Figura 38 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 6,55 e Óleo Singer®	61
Figura 39 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 6,55mm e Óleo USP	62
Figura 40 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 6,55mm e Óleo Singer®	62
Figura 41 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 3,55mm e Ar	63
Figura 42 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Ar	64
Figura 43 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 3,55mm e Óleo USP	64
Figura 44 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 3,55mm e Óleo Singer®	65
Figura 45 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Óleo USP	65
Figura 46 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Óleo Singer®	66
Figura 47 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Petróleo	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação dos Transdutores.....	34
Tabela 2 – Especificação da Configuração dos Testes.....	43
Tabela 3 – Características dos Meios	57
Tabela 4 – Resumo dos Resultados	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 O PETROLEO E A PARAFINA	17
2.2 DEPOSIÇÃO DE PARAFINA.....	18
2.3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE DEPÓSITOS DE PARAFINA	20
2.4 O ULTRASSOM.....	24
2.5 TÉCNICA DE MEDIÇÃO ULTRASSÔNICA.....	27
2.6 CONCLUSÃO	29
3 INSTRUMENTAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	31
3.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	32
3.3 TRANSDUTORES DE ULTRASSOM	34
3.4 PULSADOR-RECEPTOR	35
3.5 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	36
3.6 BANCADA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS	38
3.7 CONCLUSÃO	40
4 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	41
4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS ULTRASSÔNICOS	41
4.1.1 Levantamento das Informações Acústicas dos Meios	41
4.1.2 Testes nos Corpos de Prova.....	41
4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS	44
4.3 MÉTODO DA SUPRESSÃO DO ECO DE REFERÊNCIA	44
4.4 ESTIMATIVA DE INCERTEZA NAS MEDIÇÕES	52
4.5 CONCLUSÃO	54
5 RESULTADOS	55
5.1 VALORES DAS CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS	55
5.2 A SUPRESSÃO DE ECOS	57
5.3 CONCLUSÃO	68
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
6.1 CONCLUSÃO	69
6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A – ALGORITMO SUPRESSÃO DO ECO DE REFERÊNCIA	75

1 INTRODUÇÃO

O petróleo cru é um composto orgânico, formado por uma mistura homogênea de hidrocarbonetos, na qual estão presentes parafinas, aromáticos, naftenos, asfaltenos e resinas (Singh et al., 2000), como também quantidades pequenas de nitrogênio, enxofre e oxigênio, sendo que a composição química de uma amostra varia de acordo com a procedência.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a utilização de petróleo e seus derivados correspondem a 36,1% da matriz energética atual (ano-base 2015). O petróleo caracteriza-se desta forma como a fonte energética de maior utilização mundial e a sua importância está na utilização para geração de energia elétrica, sistemas de aquecimento industrial e residencial e principalmente como energia automotiva.

A maior parte desse produto, no Brasil e em outros lugares como Golfo do México, Mar do Norte e Golfo Pérsico, é extraída em áreas de mar aberto, e distantes da costa marítima (Santos, 2009).

Na produção de petróleo em águas profundas, existe um problema grave que é a obstrução das paredes internas de tubulações de transporte e produção devido à deposição de hidrocarbonetos.

Essas sedimentações, além de gerar danos às tubulações, diminuir a vazão nos dutos, reter água, areia e até mesmo o petróleo, geram riscos operacionais, perdas de equipamentos, riscos ambientais e são responsáveis por gerar gastos com manutenção, acarretando em prejuízos de milhões de dólares para a indústria (Nývlt et al., 2001).

O petróleo quando está no reservatório marítimo se encontra a uma temperatura na faixa de 70°C a 150°C e sobre uma pressão de até 15000 psi (103 Mpa). Nestas condições a parafina torna-se solúvel no petróleo e se encontra no estado líquido (Venkatesan et al., 2005).

O acúmulo de parafina, ilustrado na Figura 1, acontece à medida que o petróleo é extraído. A temperatura do óleo cai rapidamente ao longo do duto em que é transportado, devido ao ambiente frio no fundo do oceano. A variação da temperatura afeta a solubilidade da parafina, que diminui drasticamente com a perda de calor e dessa forma acontece um acúmulo de parafina sólida no interior da tubulação.

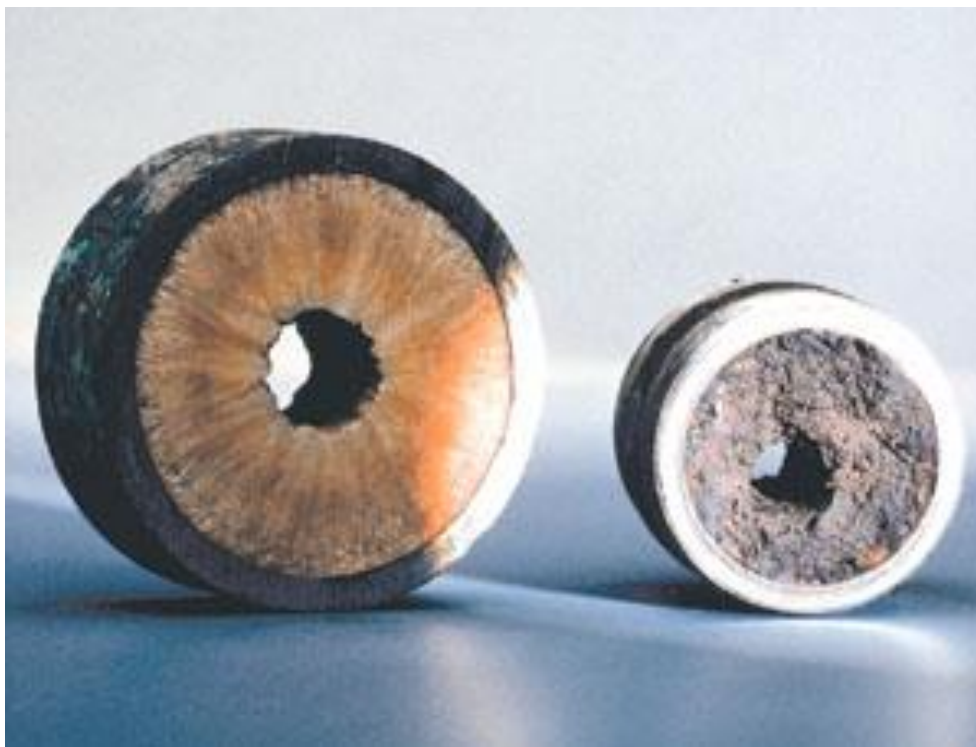


Figura 1 – Seção Transversal de um Oleoduto
Fonte: PANterra Geoconsultants

Diversas técnicas experimentais foram propostas para detectar a sedimentação em tubulações, dentre as quais se destacam três: Pulso de Pressão (Gudmundsson *et al.*, 2002), Radiografia (Edalati *et al.*, 2006) e Pulso de Calor (Hoffman *et al.*, 2011).

Porém, essas técnicas não podem ser utilizadas de modo geral ou possuem alguma restrição. Por exemplo, o Pulso de Pressão é um procedimento onde é necessário parar a produção para realização do teste, a radiografia é uma técnica com custo alto e o Pulso de Calor requer muita energia para sua aplicação.

Dessa maneira, este trabalho explorará métodos de medição utilizando ultrassom, devido ao fato destes procedimentos possuírem características desejáveis na indústria, tais como: serem não intrusivo, utilizarem radiação não ionizante e os transdutores serem robustos.

Os métodos de análise ultrassônica que mais se destacam são: Transformada de Ondulações (Angrisani *et al.*, 2000), Estimação do Modelo Base de Ecos (Demiliri *et al.*, 2001), Técnica de Tempo-Frequência (Wang *et al.*, 2002), Método do Pulo de Fase (Kuts *et al.*, 2009) e Método de Supressão de Ecos (Rommetveit, 2011).

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo detectar depósitos de parafina em oleodutos utilizando técnicas de análise e medição ultrassônica, e realizando ainda uma análise de incerteza sobre as medições.

Sendo assim, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Levantamento do Estado da Arte sobre deposição de parafina;
- Construir uma bancada experimental para análise de diferentes espessuras de aço e depósitos de parafina, no qual seja possível modificar a interface externa da parafina e que garanta uma repetitividade de testes;
- Caracterizar as informações acústicas dos meios que serão utilizados como interface externa da parafina;
- Realizar os testes com os corpos de prova, utilizando transdutores de ultrassom, via *PXI* da National Instruments[®], com programação Labview[®];
- Aplicar o método de supressão de ecos, programado em MATLAB[®], para estimar a espessura da parafina e verificar o valor da incerteza associado às medições.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 é referente ao estado da arte, onde são apresentadas algumas informações a respeito da composição do petróleo e da parafina, explicando-se brevemente a formação de um depósito de parafina. Abordam-se também algumas técnicas de detecção desses depósitos, com ênfase especial nas técnicas de medição utilizando ultrassom.

O capítulo 3 apresenta os instrumentos utilizados no trabalho juntamente com a descrição detalhada da bancada experimental e da confecção dos corpos de provas utilizado nos testes.

No capítulo 4 é abordado o procedimento de aquisição e processamento dos dados, junto com a explicação detalhada do método de supressão de ecos e o procedimento de avaliação da incerteza presente no experimento.

O capítulo 5 mostra todos os resultados obtidos com a discussão de cada um deles e confronta os valores estimados com a incerteza associada e o erro de medição.

Por fim o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e recomenda alguns estudos para possíveis pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta informações a respeito dos elementos presentes neste trabalho. A seção 2.1 é dedicada a fundamentar o que é o petróleo e parafina. Na seção 2.2 é descrito como ocorre a formação de um depósito de parafina. Na seção 2.3 são descritas algumas técnicas de medição dessas sedimentações. A seção 2.4 é dedicada a contextualizar a utilização do ultrassom para medição de sedimentações. Por fim, Na seção 2.5 são apresentadas algumas técnicas de medição ultrassônica.

2.1 O PETROLEO E A PARAFINA

A palavra petróleo deriva do latim *petroleum*, que traduzindo literalmente seria “óleo de pedra”. Essa substância tem uma coloração que pode variar desde um castanho claro até o preto, geralmente é menos densa que a água e é inflamável.

Existem registros da utilização deste composto pelo ser humano desde os tempos antes de Cristo. Há vestígios da utilização do petróleo na antiga Babilônia, pelos egípcios, gregos e romanos, até mesmos pelos índios pré-colombianos e os maias. Mas o fato que marca o início da era do petróleo ocorreu em 1859, quando foi iniciada a exploração comercial deste material e descoberto que com a destilação resultavam subprodutos que substituíam o carvão e o óleo de baleia, que eram utilizados para iluminação (Thomas *et al.*, 1996).

O petróleo bruto é formado por compostos químicos orgânicos, contendo principalmente, alcanos, naftenos, aromáticos e outras impurezas como sais inorgânicos, areia e água. É possível separar através da destilação fracionada os compostos que tenham diferentes faixas de temperatura de ebulição, por exemplo, gasolina, querosene, lubrificantes, impermeabilizantes, etc.

As principais frações de compostos orgânicos encontradas no petróleo são diferenciadas pelas quantidades de carbono. Com menos do que quatro átomos de carbono (C_1 - C_4) tem-se um composto no estado gasoso, por exemplo, éter de petróleo e ligroína, se possuírem de 5 a 38 átomos de carbono (C_5 - C_{38}) estarão no estado líquido, como gasolina, querosene e óleos combustíveis, e com mais de 38

átomos de carbono são considerados os resíduos sólidos, como piche e asfalto (Santos, 2009, Thomas *et al.*, 1996).

O número de carbono da parafina varia de um fluido para o outro. A maior parte das parafinas encontradas em petróleo cru está na faixa de C₁₈-C₆₅ (Ekweribe *et al.*, 2008). A composição exata é determinada através de um ensaio em laboratório de cada amostra. Um método muito utilizado é a cromatografia gasosa de alta temperatura (HTGC), *High Temperature Gas Chromatography* (Singh *et al.*, 2000).

2.2 DEPOSIÇÃO DE PARAFINA

Os depósitos de parafina ocorrem nas tubulações submarinas de escoamento de petróleo devido à transferência de calor entre o fluido, que sai do reservatório a uma temperatura entre 70°C e 150°C e pressão superior a 2000 psi (13 Mpa), encontrando a condição das águas submarinas profundas por volta de 4°C (Huang, 2011).

Dentro do reservatório a parafina encontra-se diluída no petróleo cru. Quando esse produto começa ser extraído pelos dutos ocorre uma transferência de calor devido ao meio externo. Como a temperatura da água é inferior à temperatura de solidificação da parafina, começam a se formar depósitos nas paredes resfriadas. Esses depósitos podem ocorrer ao longo de toda a parede da tubulação.

O processo de deposição de parafina no interior de dutos marinhos foi inicialmente descrito por Singh *et al.* em 2000 e simplificado por Huang em 2011, que descreveu quatro etapas fundamentais (Figura 2):

- 1- Formação de uma camada incipiente de depósito sobre a superfície fria da parede do tubo.
- 2- Fluxo radial de massa das moléculas de parafina do fluido para a interface óleo/depósito (A).
- 3- Fluxo radial das moléculas de parafina da superfície do depósito para a camada de depósito (B).
- 4- Precipitação das moléculas de parafina no interior do depósito, resultando em um aumento do teor de parafina sólida.

A taxa de crescimento do depósito é determinada pela diferença do fluxo radial a partir do fluido para a interface óleo/depósito (fluxo A) e o fluxo a partir da interface para dentro do depósito (fluxo B), tal como ilustrado na Figura 2 (Huang, 2011).

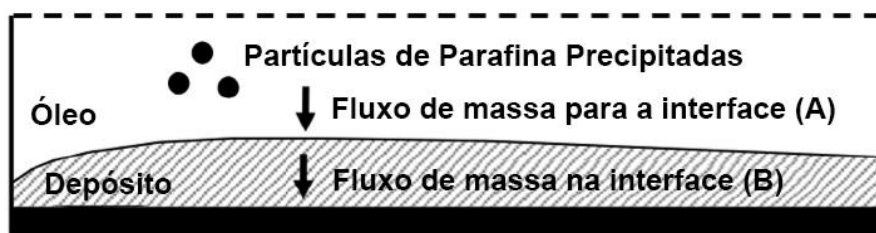


Figura 2 - Princípio da deposição de parafina por difusão molecular
Fonte: Adaptado de Huang (2011)

Entre os estudos anteriores a o processo acima citado, destaca-se o de Hunt (1962) que conduziu um estudo para a sedimentação de parafina em condições estáticas e com escoamento. O objetivo deste trabalho foi o estudo da consequência de utilização de revestimentos e aditivos químicos nas tubulações. O principal resultado deste trabalho foi verificar que para tubos em aço inoxidáveis polidos o depósito não tinha aderência, ao contrário de uma superfície imperfeita, ou seja, a parafina não é presa numa superfície por forças de adesão, mas sim pela rugosidade.

Um estudo bastante completo na área e também muito citado posteriormente, é o trabalho de Burger *et al.* (1981), em que identificou-se quatro possíveis mecanismos de deposição de parafina: Difusão molecular, Difusão Browniana, Dispersão por Cisalhamento e Fixação Gravitacional. Além de realizar a modelagem matemática de cada mecanismo, foi realizado estudos com tubos na vertical e horizontal, concluindo que os efeitos gravitacionais não são importantes no processo de deposição.

Creek *et al.* (1999) realizaram uma pesquisa para identificar os efeitos da taxa de deposição de parafina e de suas características em relação a temperatura e vazão do fluido. Neste estudo foram empregadas cinco diferentes técnicas para estimar a espessura da camada: Diferença de Pressão, Balanço de Energia, Variação de Volume no Interior da Seção de Testes, Ultrassom e Medição Direta. Os resultados da estimativa da espessura mostraram resultados um pouco diferentes um do outro, provando que a estimativa deste valor é bastante difícil.

Por fim, este trabalho chegou a quatro conclusões principais: a taxa de deposição é proporcional a diferença de temperatura entre a parede e o óleo, a temperatura inicial do óleo não interfere significativamente na taxa de deposição, a taxa de deposição diminui com o aumento do fluxo e a quantidade de óleo no depósito para um fluxo turbulento foi significativamente menor do que um fluxo laminar (Creek *et al.*, 1999).

Outros trabalhos tentaram criar um modelo termodinâmico para determinar o comportamento do depósito, Kyotoku *et al.* (2006), Chen (2007), Dalirsefat e Feyzi (2007), Huang (2011). Mesmo assim muitas pesquisas ainda estão em desenvolvimento.

2.3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE DEPÓSITOS DE PARAFINA

Na seção anterior foram apresentados vários estudos para modelagem da formação de parafina em tubulações, contudo muitas vezes é necessário quantificar o estado da sedimentação no interior dos dutos, tanto para aplicações na indústria como para desenvolver modelos teóricos mais detalhados.

Uma técnica bastante simples, flexível e que permite repetitividade dos testes é a técnica de Impulso de Pressão, que permite o monitoramento e detecção das mudanças na geometria do canal do escoamento através de um levantamento do perfil de pressão ao longo do duto (Gudmundsson *et al.*, 2002).

O perfil da pressão é obtido a partir de medições de pressão em um local, imediatamente a montante de uma válvula de ação rápida, como mostrado na Figura 3. Quando a válvula é ativada, a pressão a montante é medida, resultando em um registro de pressão por tempo, Figura 4. Esses dados são, então, convertidos para pressão por distância. As informações de pressão por distância mostram a localização e extensão dos depósitos no duto (Gudmundsson *et al.* 2001).

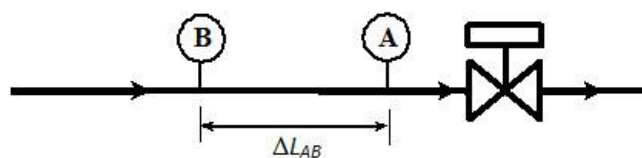


Figura 3 – Configuração do Pulso de Pressão em uma tubulação, mostrando a válvula de ação rápida e dois transdutores de pressão, A e B.
Fonte: Gudmundsson *et al.* 2001

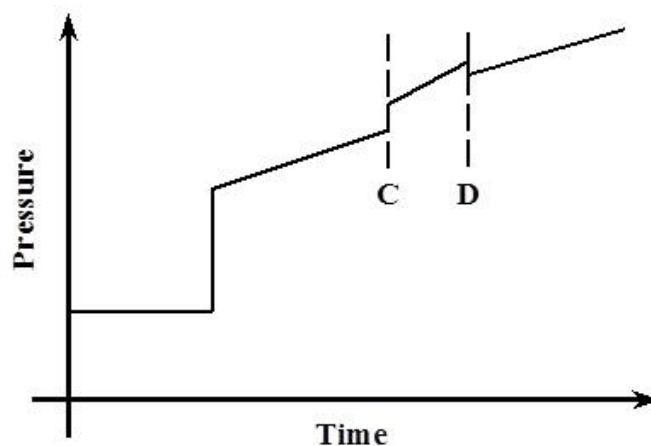


Figura 4 - Redução no diâmetro da tubulação indicado pelo intervalo C-D, este intervalo está entre os pontos A e B de medição.
Fonte: Gudmundsson *et al.* 2001.

Porém essa é uma técnica invasiva e também requer a parada da produção a fim de se realizar as medições, ou seja, são fatores não desejáveis na indústria.

A utilização da técnica de radiografia para monitorar depósitos e corrosão de tubulações foi discutida no trabalho de Edalati *et al.* (2006), onde foi apresentada a utilização de duas técnicas: a radiografia tangencial, Figura 5a e Figura 5b, e radiografia de parede dupla, Figura 5c e Figura 5d.

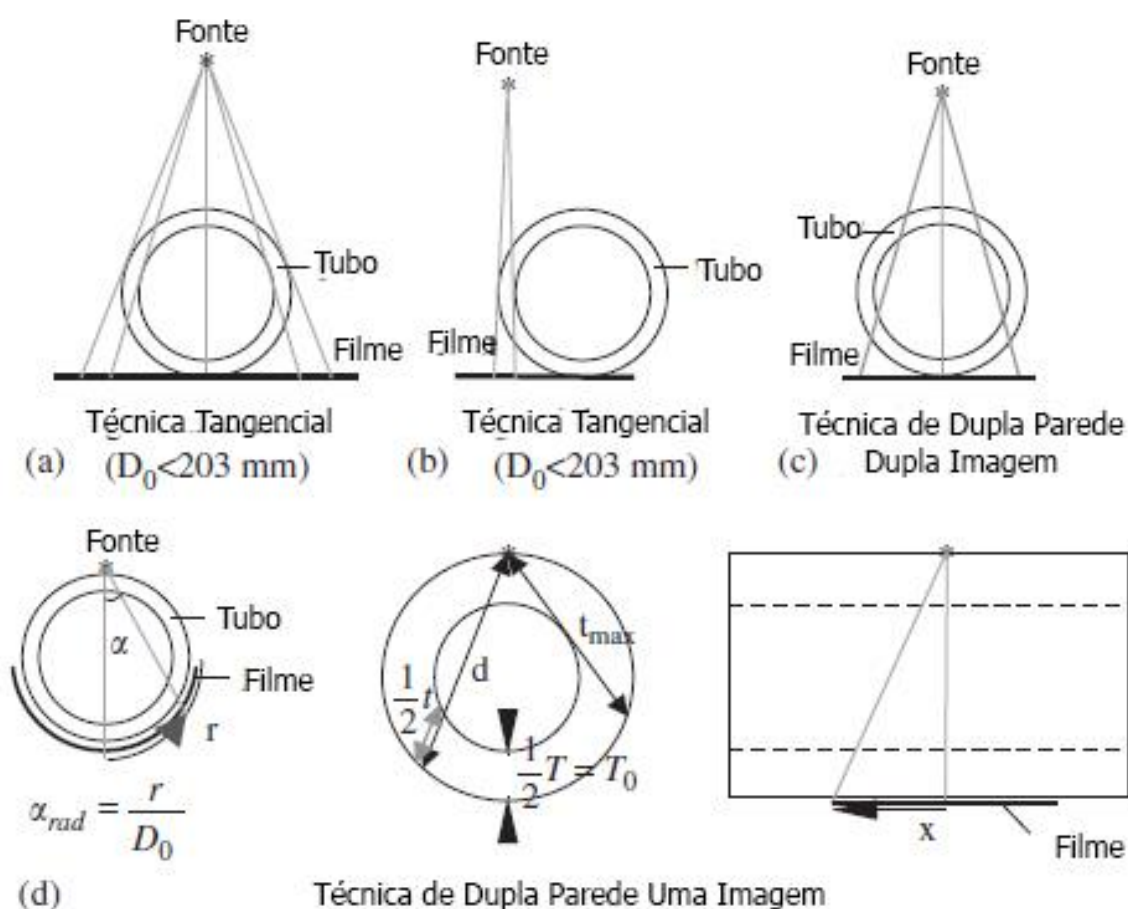


Figura 5 - Técnicas de Radiografia
 Fonte: Edalati *et al.* 2006

Essa pesquisa mostrou que essas técnicas são capazes de realizar medições com precisão superior a 95%. No entanto é um procedimento que utiliza radiação ionizante que agrega riscos operacionais, como contaminação por radiação, e possui um elevado custo de aplicação.

O estudo conduzido por Hoffman *et al.* (2011), para monitoramento online dos depósitos em tubulações, levou a técnica denominada impulso de calor. O procedimento explora o fato de que a parafina no interior dos tubos atua como uma camada de isolamento térmica.

O equipamento de medição consiste em uma fonte de calor, por exemplo, uma resistência elétrica, e um sensor de temperatura, fixados no exterior da tubulação, como são mostrados na Figura Figura 6. Para realizar o procedimento, inicia-se o aquecimento por um período curto de tempo e em seguida desliga-se, então o sensor de temperatura irá monitorar a variação de temperatura desde o início do aquecimento até a volta para a temperatura inicial (Hoffman *et al.* 2011).

Na Figura 7 é apresentado um exemplo de medição, em que fica evidente a influencia da espessura da parafina.

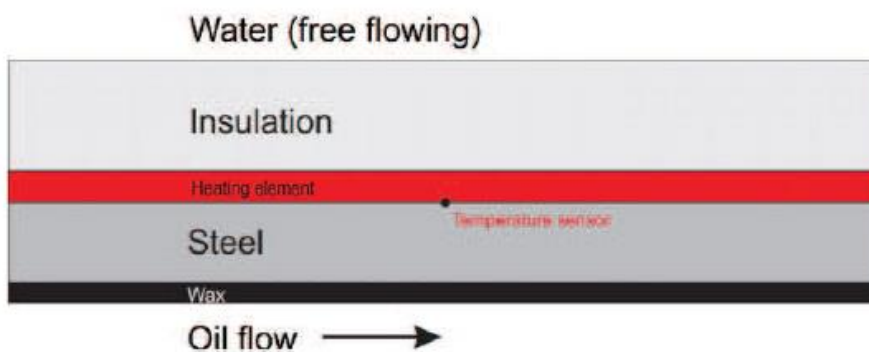


Figura 6 - Configuração básica em uma linha de produção
Fonte: Hoffman *et al.* 2011.

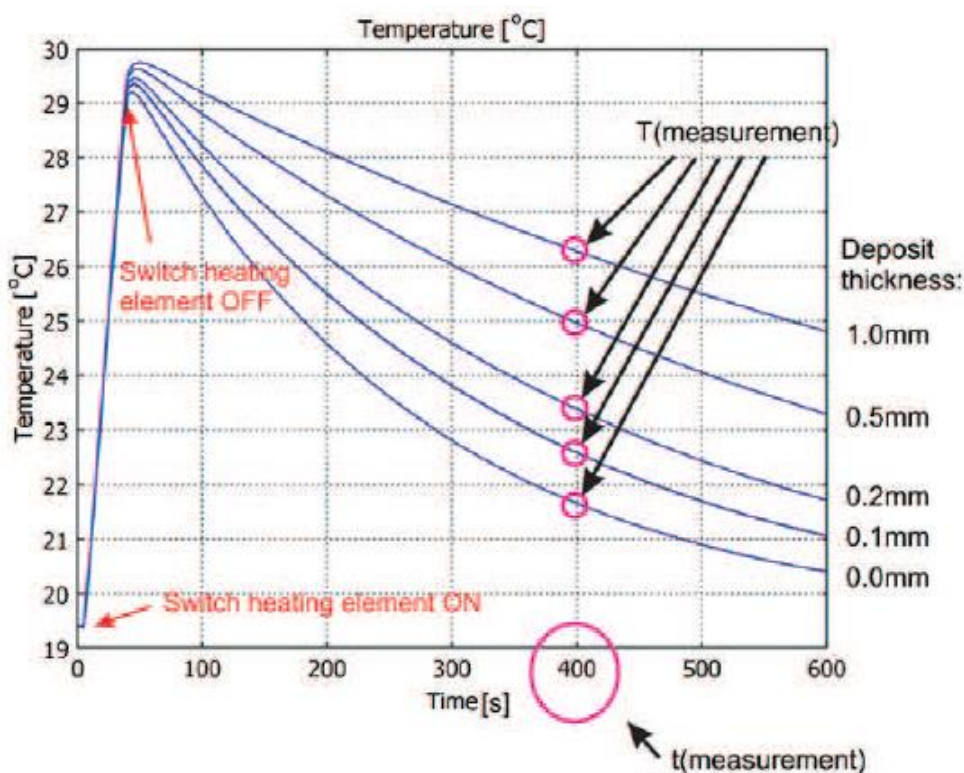


Figura 7 - Exemplo de medição pela técnica de impulso de calor
Fonte: Hoffman *et al.* 2011.

A maior limitação dessa técnica é a potência necessária para realização de uma medição, pois é preciso uma quantidade significativa de energia para elevar a temperatura do sistema, o que dificulta o desenvolvimento um sistema portátil para aplicação na indústria.

Outra técnica de medição que pode ser utilizada para caracterizar e detectar os depósitos sólidos são baseadas em ultrassom. A sua utilização na indústria é

bastante vantajosa, por se tratar de uma técnica não invasiva, com baixo custo, além de utilizar pouca energia no funcionamento e possuir uma precisão bastante elevada. Na seção seguinte serão abordadas algumas das técnicas utilizando ultrassom que podem ser usadas para medição de depósitos de parafina em tubulações.

2.4 O ULTRASSOM

O sinal ultrassônico é uma onda mecânica com frequência superior a 20kHz. Sendo capaz de se propagar por meios líquidos, sólidos ou gasosos em basicamente dois tipos de onda: longitudinal e transversal.

Para as ondas longitudinais, o movimento das partículas é na mesma direção que a propagação da onda, conseguindo se propagar por meios líquidos, sólidos e gasosos. Já nas ondas transversais, as partículas se movimentam perpendicularmente ao movimento de propagação da onda e somente se propagam significativamente em meios sólidos (Halmshaw, 1991).

Uma característica bastante importante no estudo de técnicas de ultrassom é a impedância acústica, a qual representa a resistência de um material transmitir a onda de ultrassom. O valor dessa resistência, Z , pode ser calculado pela equação a seguir a partir da densidade, ρ , e da velocidade do som, c , do material.

$$Z = \rho \cdot c \quad (1)$$

Onde: Z é a resistência acústica do material, medida em (g/cm²-s);

ρ é a densidade do material, medida em (g/cm³);

c é a velocidade do som no meio, medida em (m/s).

Essa grandeza também está relacionada aos coeficientes de reflexão e transmissão das ondas em uma interface entre dois materiais. Se dois materiais, com impedância acústica diferente formam uma interface, a onda de ultrassom, ao chegar nessa área de interseção, terá uma parte refletida e outra transmitida.

A quantidade de sinal refletido é determinada pelo coeficiente de reflexão, que é calculado a partir da diferença de impedância acústica entre os dois meios da interseção.

Os coeficientes de transmissão e reflexão são estimados pelas equações a seguir, onde Z_1 e Z_2 representam as impedâncias acústicas de dois meios distintos.

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2)$$

$$T = 1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (3)$$

Na Figura 8 são ilustrados os coeficientes de reflexão e transmissão nas interfaces de água/aço e aço/água.

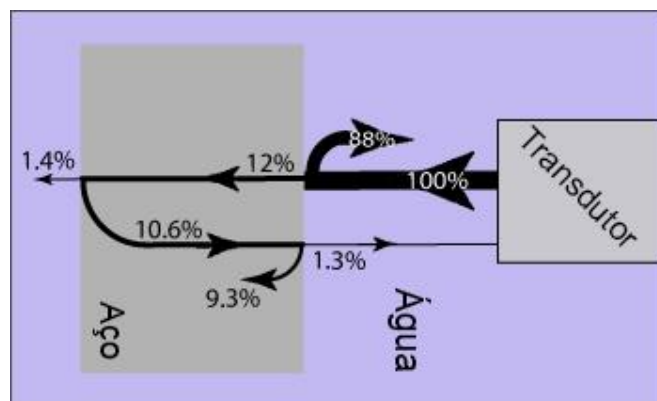


Figura 8 – Coeficientes de Reflexão e Transmissão para aço e água
Fonte: NDT Resource Center

O método mais comum e o mais utilizado na indústria para a geração de um ultrassônico é a partir do efeito piezoelétrico, que consiste em gerar tensão elétrica a partir de uma pressão mecânica ou vice e versa.

Muitos transdutores ultrassônicos são produzidos de cristais que possuem essa característica. Esses materiais além de gerar o sinal de ultrassom, também são

capazes de produzir o processo inverso, ou seja, gerar um sinal elétrico a partir de uma vibração mecânica.

Um arranjo bastante utilizado em testes ultrassônicos é o pulso-eco em imersão, como ilustrado na Figura 9 – a) Arranjo de um transdutor em imersão para teste ultrassônico de pulso-eco sobre uma amostra; b) .

A medição ultrassônica pelo método de pulso-eco envolve três partes fundamentais: geração, propagação e recepção do sinal. Sendo assim, para um sistema de ultrassom, o transdutor irá gerar uma onda ultrassônica a partir de uma excitação criada pelo pulsador. Essa onda se propaga então, pelo meio onde está o transdutor, até encontrar uma interface que irá refletir parte da onda em forma de um eco, que será recebido pelo transdutor como resposta.

A onda mecânica recebida pelo transdutor é convertida em sinal elétrico e o receptor é utilizado para condicionar o sinal, ou seja, irá amplificar e filtrar os dados para que essas informações sejam enviadas para uma placa de aquisição, que permite digitalizar os dados para armazená-los, mostrá-los e processá-los em um computador.

Na Figura 9 – a) Arranjo de um transdutor em imersão para teste ultrassônico de pulso-eco sobre uma amostra; b) é ilustrado o sinal de resposta recebido pelo transdutor, onde os ecos mostrados são referentes às diferentes interseções entre o meio e a amostra; b)

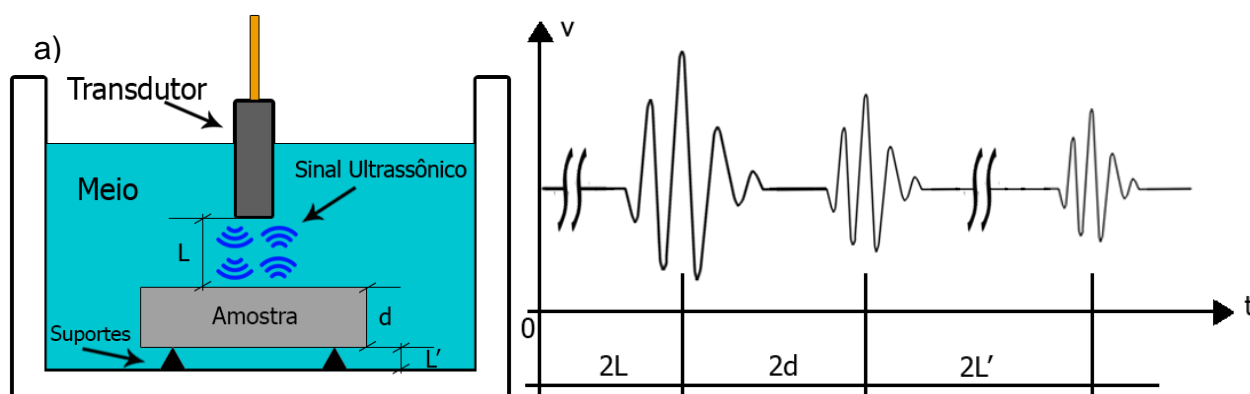


Figura 9 – a) Arranjo de um transdutor em imersão para teste ultrassônico de pulso-eco sobre uma amostra; b) Ecos provenientes do meio e da amostra pelo teste ultrassônico.

Autoria: Própria

A distância indicada é o dobro da real, já que a onda, assim primeiro viaja até a interseção e depois retorna para o transdutor, percorrendo duas vezes a distância até a interface. O tempo necessário para a onda realizar esse percurso é denominado tempo de trânsito.

Dessa forma, a informação acústica mais importante para este trabalho é a velocidade do som no meio, pois além de determinar a proporção de sinal refletido de um material com densidade conhecida para o transdutor, pela equação (2), é a partir desse parâmetro, e o tempo de trânsito t , que é possível estimar a espessura d de uma camada, de acordo com a equação (4).

$$d = c \cdot \frac{t}{2} \quad (4)$$

Onde: d é a distância percorrida pela onda ultrassônica, é medida em metros (m);
 c é a velocidade do som no meio, é medido em metros por segundo (m/s);
 t é o tempo de trânsito, é medido em segundos (s);

A principal vantagem do método pulso-eco é que apenas um lado da amostra precisa ser acessível, além de utilizar só um transdutor para análise o que diminui a utilização de equipamentos (Hägglund, 2009).

2.5 TÉCNICA DE MEDIÇÃO ULTRASSÔNICA

No contexto deste trabalho a detecção da parafina sobre superfícies de aço foi caracterizada como sendo um sistema de múltiplas interfaces ou múltiplas camadas, porém a diferença da impedância acústica do aço em relação à parafina é muito grande, tornando assim a utilização do ultrassom um grande desafio.

Para estimar as propriedades das camadas podem ser utilizados dois tipos de abordagem: utilização de algoritmos para separar ecos que se sobrepõem ou modelar as formas de ondas e reverberações diretamente (Hägglund, 2009).

A modelagem das formas de onda é dividida em mais dois tipos: métodos paramétricos e não paramétricos.

A pesquisa conduzida por Demirli *et al.* (2001), utiliza um método paramétrico para estimar um modelo base de ecos ultrassônicos, onde com as informações que descrevem completamente o sinal: a largura de banda do eco, tempo de trânsito, amplitude, frequência central, fase, quantidade de ecos e o

algoritmo de processamento, é possível separar todos os ecos que compõem o sinal analisado.

O algoritmo é baseado em um estimador de máxima verossimilhança ou MLE, no inglês *Maximum Likelihood Estimation*, onde foi assumido que os cinco parâmetros que descrevem a forma do eco são desconhecidos, mas determinísticos.

Estudos utilizando métodos não paramétricos foram propostos por diversos autores: Wang *et al.* (2002) utilizou uma técnica tempo-frequência para estimar parâmetros como densidade, módulos elásticos, espessura da camada e fator de perda.

Outro trabalho baseado numa descrição multicamadas das deposições foi proposto por Angrisani *et al.* (2000), o qual utilizou a técnica chamada de transformada de ondulações, do inglês *Wavelet Transform*. Os testes foram realizados usando acrílico submerso em água onde no sinal de resposta ocorre uma sobreposição. Este método possui boa resolução temporal, alta rejeição de ruídos e os testes resultaram uma medição precisa da espessura das camadas.

Para aplicar as técnicas acima citadas é necessário que os ecos, que formam o sinal, tenham uma amplitude grande o suficiente para que o método possa convergir. No caso em que se tem uma interface aço/parafina, a amplitude dessa reverberação é muito pequena, comparada com a interface meio/aço, assim esses métodos não convergem para uma resposta satisfatória.

A outra abordagem citada acima consiste em separar os ecos utilizando através de algoritmo ou de uma análise direta das informações de uma medição.

Uma técnica apresentada por Kuts *et al.* (2009) para medir espessura de materiais multicamadas é baseado na ideia de que quando o sinal de ultrassom se sobrepõe, existe uma diferença de fase. Assim com auxílio da transformada de Hilbert e um método para *phase unwrapping*, é possível encontrar o ponto onde ocorre essa troca de fase, e conseqüentemente é possível estimar o tempo de trânsito e a espessura da camada.

Porém quando a intensidade de um sinal que sobrepõe o outro é muito pequena, ela não consegue causar uma diferença de fase significativa, dificultando a localização dessa diferença de fase.

Outros estudos foram realizados no qual se destacam o trabalho de Andersen *et al.* (1997), que realizou uma pesquisa com depósitos de parafina e hidratos, utilizando a técnica de pulso-eco para estimar a espessura da

sedimentação no aço a partir do tempo de trânsito. Os ecos são detectados utilizando a correlação entre um sinal de referência e um sinal com parafina, assim suprimindo ruídos e sendo possível identificar os picos dos ecos.

Em um estudo mais recente realizado por Rommetveit (2011) foi modelado matematicamente uma estrutura multicamadas com todas as informações referentes ao transdutor até a interface com a parafina e também foi proposto um método de separação dos ecos referentes ao aço e à parafina.

A estimação dos parâmetros da parafina é realizada com base nos modelos matemáticos e na inversão, ou seja, é utilizada uma informação para descobrir a outra, por exemplo: dado o tempo de trânsito é calculada a espessura ou com a impedância acústica determina-se a densidade.

Para localizar os ecos da parafina, este método sugere a supressão dos ecos provenientes das reverberações do aço, ou seja, têm-se dois sinais: um de referência, somente com ecos do aço, e um sinal com ecos do aço mais parafina, assim subtraem-se do sinal com parafina os ecos referentes às reverberações do aço, dessa forma isolando o eco da interface de parafina.

Porém os trabalhos de Andersen e Rommetveit foram realizados em cima de um cenário de gasoduto, onde a interface da parafina é com ar, situação que aumenta a reflexão dessa interface e a intensidade do eco recebido.

Este trabalho propõe a utilização de técnicas de separação de ecos para localizar as interfaces dos depósitos sólidos em oleodutos, utilizando a configuração de pulso-eco em imersão e algoritmos de processamento de sinal.

2.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica e uma fundamentação teórica sobre o petróleo, a parafina e como acontece a formação de um depósito de parafina. Foram apresentadas também algumas técnicas de medição de sedimentação de parafina e também as respectivas limitações.

Em seguida, foi apresentada a tecnologia ultrassônica, descrevendo o funcionamento, como é realizada uma medição e alguns dos equipamentos fundamentais.

No fim, foram mostradas algumas técnicas de medição utilizando o ultrassom, que são divididas em dois tipos: métodos paramétricos e não paramétricos.

No capítulo 3 serão discutidos quais os equipamentos utilizados e qual foi o processo experimental utilizado na realização dos testes ultrassônicos.

3 INSTRUMENTAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes ultrassônicos são necessários vários equipamentos, conforme descrito no capítulo anterior. Além disso, é necessário utilizar uma bancada experimental na qual seja possível repetir vários testes com as mesmas condições.

Neste capítulo são descritos a bancada experimental utilizada nos testes, como foi realizado a confecção dos corpos de prova, os transdutores ultrassônicos utilizados, o pulsador-receptor e o equipamento de aquisição de dados, e por fim a bancada experimental de caracterização dos meios.

3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes foi desenvolvido uma bancada experimental que consiste em três partes principais. Esse aparato foi utilizado para garantir a repetitividade dos ensaios e avaliar o comportamento do ultrassom em diferentes meios que fazem interface com a parafina.

A primeira parte é um tanque de água para execução de testes utilizando o método pulso-eco em imersão.

A segunda parte compreende os corpos de teste, que foram confeccionados em aço SAE 1020, com espessuras de 3,57mm, 6,55mm e 24,22mm, para comparação dos resultados. A parafina foi depositada sobre as peças com uma espessura conhecida e medida com auxílio de um micrômetro, cuja resolução é de 0,01mm.

Para simular uma tubulação, foi fixada aos aços uma caixa acrílica, de forma que foi possível adicionar outro meio fazendo interface com parafina, com o propósito de modificar o acoplamento acústico na interface parafina/meio 2.

Por fim a terceira parte é o transdutor, juntamente com os equipamentos responsáveis pelo seu funcionamento e para realização da aquisição de dados, os quais serão descritos posteriormente.

Na Figura 10 é ilustrada a bancada utilizada nos testes.

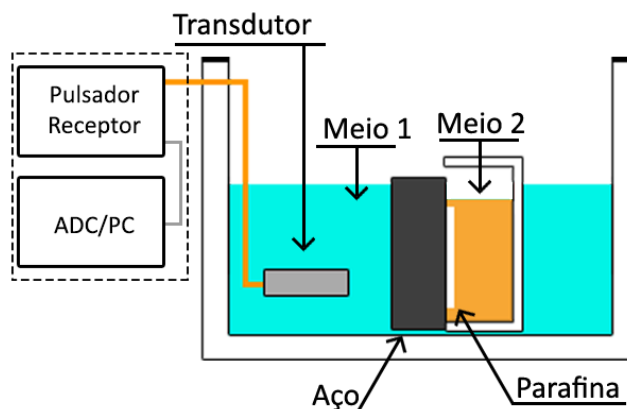


Figura 10 – Bancada Experimental
Fonte: autoria própria

3.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os primeiros depósitos foram realizados despejando-se parafina líquida com temperatura de aproximadamente 60°C sobre as peças de aço, que estavam à temperatura ambiente.

Porém, o depósito sobre o aço não ficava uniforme, desprendia com muita facilidade do metal e também ocorria a presença de pequenas bolhas de ar no interior do depósito.

Dessa forma, outro método foi empregado para simular uma formação mais realista de uma sedimentação de parafina. Para isso utilizou-se um banho-térmico aquecido. Este método é utilizado para aquecer de forma uniforme o metal.

Na Figura 11 é ilustrada a realização deste procedimento: primeiro é colado sobre a peça de aço um tubo cilíndrico onde será colocada a parafina sólida para criar o depósito. Em seguida, posiciona-se dentro de um recipiente com água a placa de aço e inicia-se o processo de aquecimento. Uma vez que toda a parafina tornou-se líquida, a peça é removida do banho e é aguardado o resfriamento, ou seja, a parafina tornar-se sólida novamente. Por último remove-se o tubo da peça metálica e tem-se o corpo de prova.

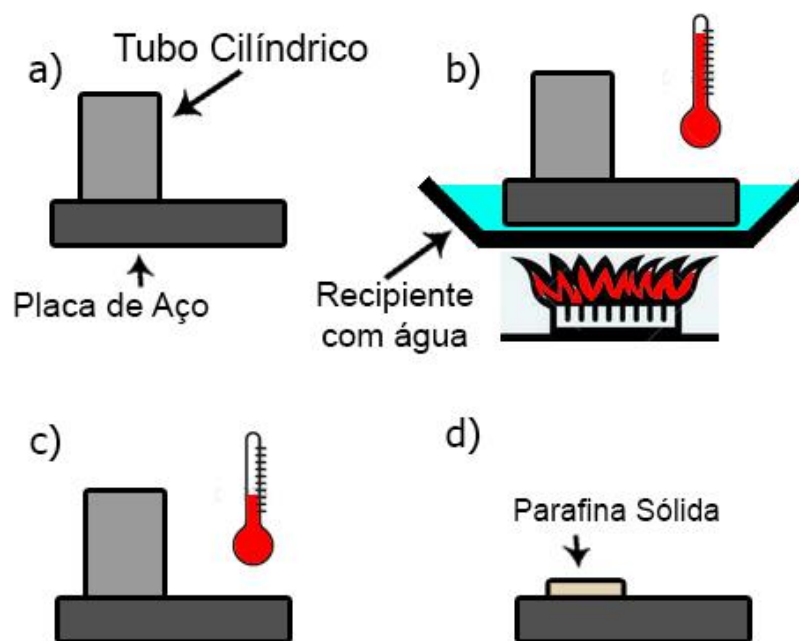


Figura 11 – Processo de produção dos corpos de prova
Fonte: Autoria própria

Na Figura 12 é possível visualizar um dos depósitos pronto e na Figura 13 outro corpo de prova com a fixação da caixa acrílica.

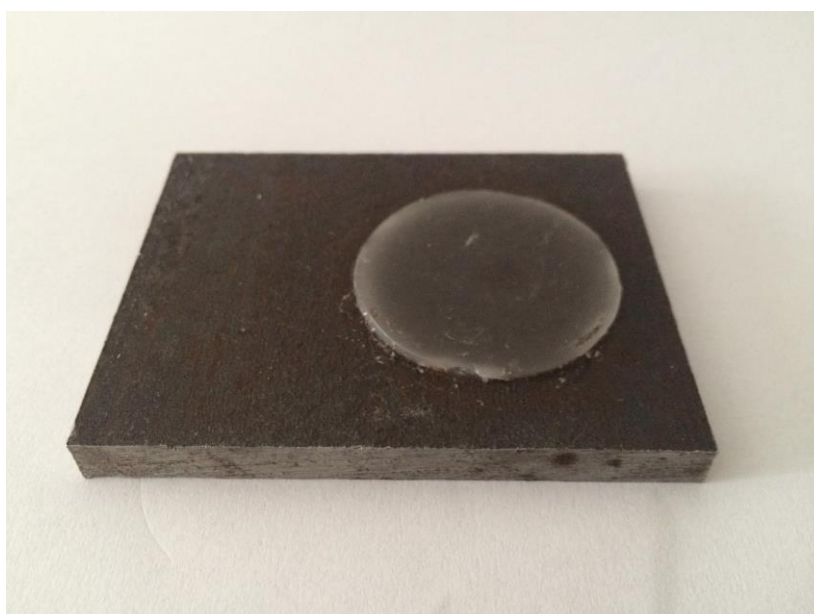


Figura 12 - Corpo de Prova de 6,55mm com depósito de parafina
Fonte: Autoria própria

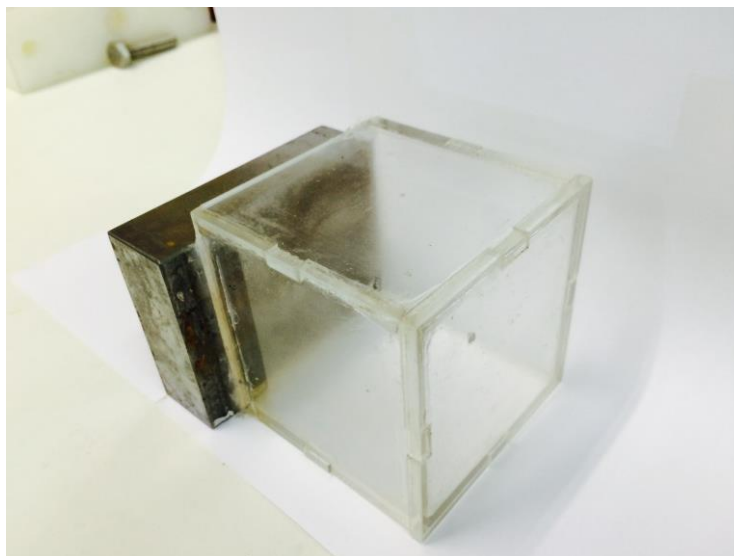


Figura 13 - Corpo de Prova 24,22mm com caixa acrílica fixada
Fonte: Autoria Própria

3.3 TRANSDUTORES DE ULTRASSOM

Os dois transdutores empregados nos testes são de elemento simples¹, um opera com 4MHz e o outro com 8MHz de frequência central, são sendo ambos fabricados pela Met-Flow® e suas especificações estão descritas na Tabela 1 – Especificação dos Transdutores.

Todos os testes realizados foram na configuração de pulso-eco em imersão e a uma distância superior ao foco do transdutor, para garantir que foi utilizado o campo distante² do transdutor.

Tabela 1 – Especificação dos Transdutores
Fonte: Adaptado de <http://www.met-flow.com/>

Modelo	Frequência Central [MHz]	Diâmetro do Elemento Ativo [mm]	Diâmetro do Transdutor [mm]	Comprimento do Transdutor [mm]	Distância Focal [mm]	Meio Ângulo de Divergência
TX4-5-8	4	5	8	40	16,9	2,2°
TX8-2.5-8	8	2,5	8	40	8,5	2,2°

¹Este transdutor é construído com apenas um cristal piezoelétrico e com uma frequência central.

²Campo distante é a região onde a intensidade do ultrassom é mais uniforme, porém, divergente. Há ausência quase total de interferências não existindo picos ou depressões no feixe.

Para uma melhor resolução axial os transdutores são colocados perpendicularmente à superfície de testes, garantindo que a distância percorrida pela onda de ultrassom será a mesma que a medida com o micrômetro. A amplitude do sinal também sofre influência, diminuindo drasticamente caso o transdutor não esteja perpendicular à superfície.

Para isso utilizou-se o aparato ilustrado pela Figura 14, onde são utilizadas duas placas de acrílico coladas uma a outra formando um ângulo reto e um prensa cabo para fixar o transdutor ao acrílico.

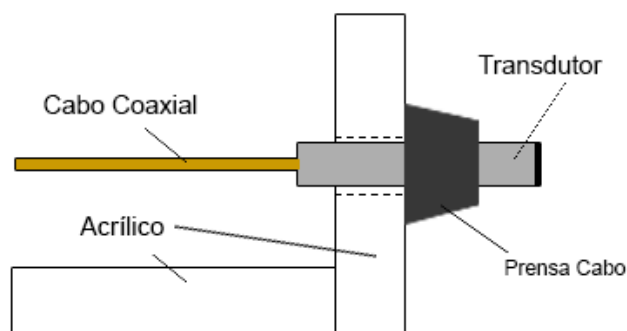


Figura 14 - Suporte do Transdutor
Fonte: Autoria Própria

3.4 PULSADOR-RECEPTOR

Este equipamento é responsável por gerar impulsos elétricos para excitação do cristal piezoelétrico dos transdutores, que por sua vez irão transformar essa energia elétrica em energia mecânica, criando assim o sinal de ultrassom.

Para o método de pulso-eco a onda irá deslocar-se pelo meio até ser refletida em alguma interface e o eco retornar para o transdutor.

A onda ultrassônica do eco refletido até o cristal é reconvertida para um sinal elétrico que é amplificado e condicionado pelo receptor, que fornece em sua saída um sinal analógico.

O equipamento utilizado nos testes foi o Pulsador-Receptor da Panametrics®, modelo 5077PR, Figura 15. Este dispositivo gera um pulso de onda quadrada negativa que permite a escolha da tensão de excitação na faixa de -400V,

-300V, -200V e -100V e também as frequências, que variam entre 1kHz e 20MHz, isso para melhorar a resolução do sinal de saída.

Para o processamento do sinal no receptor além de um amplificador, existem dois filtros: um passa baixa com frequência de corte em 35MHz ou 10MHz e um passa alta sintonizado em 1 MHz ou 1kHz.



Figura 15 - Pulsador-Receptor Modelo5077PR Panametrics®
Fonte: Autoria Própria

3.5 MODULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para análise dos dados, utilizando programas para o processamento dos sinais, como o MATLAB®, torna-se necessário digitalizar as informações analógicas geradas pelos transdutores de ultrassom. Para isso foi utilizado o equipamento PXIe-1078, Figura 16, fabricado pela National Instruments®, que possui um módulo de digitalização modelo NI 5752, capaz de amostrar 32 canais com uma taxa de 50 milhões de amostras por segundo e com uma resolução de 12-bits, esse módulo é recomendado pelo fabricante para aplicações com ultrassom.



Figura 16 - NI PXIe-1078 National Instruments®
Fonte: National Instruments

O algoritmo para aquisição dos dados foi desenvolvido na plataforma de programação gráfica LabView®, que é o aplicativo de desenvolvimento da National Instruments®. Com ele é possível programar interligando blocos de funções, que já estão pré-definidas para operar com o módulo de digitalização.

O código desenvolvido por SBARDELOTTO *et al.* (2014) possui uma interface gráfica para visualização em tempo real do sinal transmitido pelo Pulsador-Receptor. Na Figura 17 é ilustrada a interface do programa. Também é possível gerar um arquivo com as informações do sinal digitalizado.

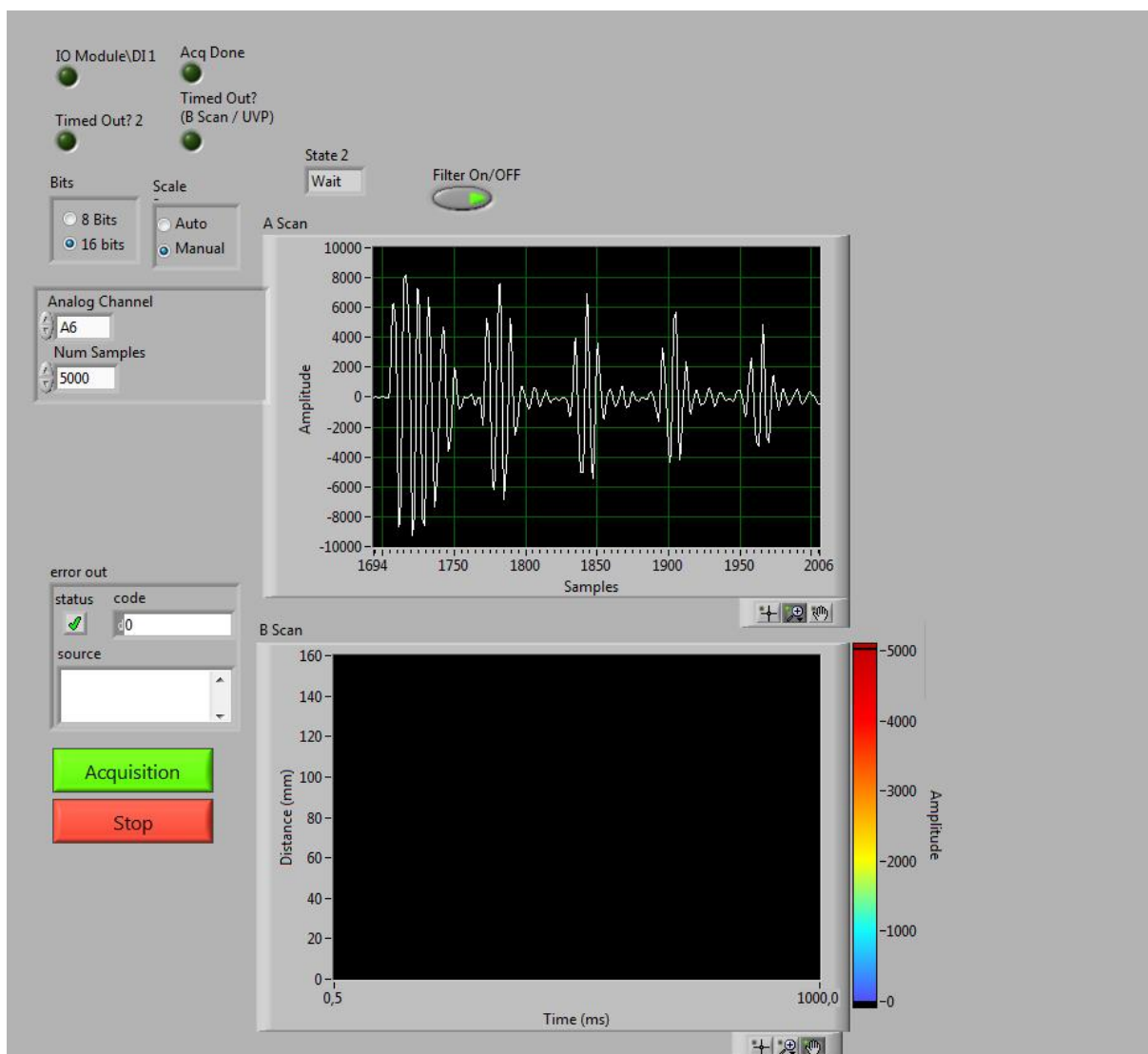


Figura 17 – Interface do Aplicativo LabView®
Fonte: Autoria Própria

Para criar o arquivo é necessário informar a quantidade de ondas, quantos pontos na horizontal e qual a frequência de repetição de pulso do ultrassom a serem salvos para análise no aplicativo de processamento de sinais.

3.6 BANCADA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS

As informações dos meios são de grande importância, pois com as informações exatas as estimativas dos outros parâmetros tendem a se tornar mais próximas das reais.

A velocidade do som no meio é a informação que será utilizada para calcular o coeficiente de reflexão entre interfaces e também a espessura das camadas. Sendo assim o conhecimento dessa grandeza é necessária para a execução deste trabalho.

Nesse sentido uma bancada pra testes foi montada para determinar qual a influência da temperatura sobre a velocidade do som em cada meio. Ela consiste em um banho térmico, no qual é possível variar a temperatura do meio de acordo com a necessidade.

Foi utilizado o banho termostático modelo F12-EH, fabricado pela Julabo. Esse equipamento permite refrigerar e aquecer o líquido do banho, com um controle PID de temperatura, garantindo que a variação de temperatura não ultrapasse $0,03^{\circ}\text{C}$ (JULABO, 2012).

Dentro do banho foi montado um aparato conforme ilustrado na Figura 18. Assim, com auxílio do sensor de temperatura foram realizados os testes ultrassônicos.

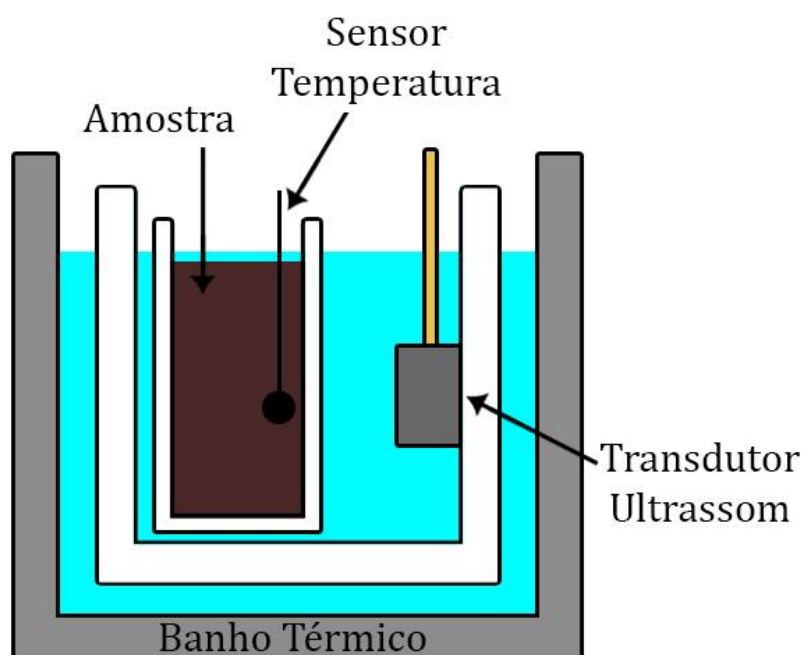


Figura 18 – Configuração do banho térmico
Fonte: Autoria Própria

O sensor de temperatura foi posicionado de forma a não entrar em conflito com as ondas ultrassônicas.

Para controle da temperatura nos testes foi utilizado um termistor de $10\text{k}\Omega$ do tipo NTC, *Negative Temperature Coefficient*, cuja resistência elétrica é

inversamente proporcional à temperatura, e para medi-lo foi utilizado um multímetro modelo ET-2900 fabricado pela Minipa, com exatidão na escala de $5k\Omega$ até $50k\Omega$ de 0,1%.

3.7 CONCLUSÃO

Esse capítulo descreveu os equipamentos e o procedimento experimental utilizados neste trabalho. A bancada e os corpos de prova foram confeccionados garantiram a repetitividade dos testes, simularam uma estrutura multicamadas e a bancada experimental para caracterização dos meios permitiu a estimação dos parâmetros relevantes dos meios utilizados.

No capítulo 4 será discutido como foi realizada a aquisição dos sinais dos testes ultrassônicos, juntamente com a metodologia do método de supressão de ecos e o processo de estimativa da incerteza de medição.

4 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos de aquisição dos dados dos testes com os corpos de prova e de caracterização dos meios. São fundamentados também os pré-processamentos antes da aplicação do método de supressão do eco de referencia, que também será descrito detalhadamente na seção 4.3. Finalmente, será explicado o processo de estimação da incerteza de medição.

4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS ULTRASSÔNICOS

Os testes ultrassônicos foram divididos em duas partes. A primeira foi realizar uma caracterização de algumas informações acústicas dos meios que iriam ser explorados neste trabalho e em seguida os testes de detecção de parafina nos corpos de prova.

4.1.1 Levantamento das Informações Acústicas dos Meios

Com o aparato descrito no capítulo anterior, os testes foram realizados para os quatro elementos mais importantes deste trabalho: Parafina, Petróleo, Óleo USP e Singer®.

Cada meio foi colocado no banho individualmente e a temperatura foi variada de -1°C até 30°C , onde foram coletadas as informações dos testes ultrassônicos e do sensor de temperatura.

Os resultados desses testes encontram-se no capítulo 5, onde serão abordados e discutidos.

4.1.2 Testes nos Corpos de Prova

A tensão de excitação do transdutor deve ser ajustada de forma adequada a PRF (Frequência de Repetição de Pulso) utilizada, assim como o ganho do receptor, pois caso este estiver muito alto, os ruídos serão amplificados e irá sobrepor o sinal do eco da parafina, dificultando a identificação.

Do mesmo modo no Labview[®] são necessárias algumas configurações como: número de pontos amostrados, quantidade de ondas e PRF. Para uma melhor organização dos testes e para consultas futuras, também é possível armazenar as informações do pulsador como: tensão de excitação e ganho analógico. Essas informações das condições de realização de um teste ficam salvas em um arquivo xml.

Depois de todas as configurações estarem definidas é realizado um teste ultrassônico para armazenar a referência, ou seja, o sinal é disparado contra o corpo de prova onde não há depósito de parafina, como é ilustrado na Figura 19a.

Logo em seguida o transdutor é ajustado para a posição onde existe a sedimentação, Figura 19b, e é realizado outro teste, assim são armazenadas 1000 ondas de cada um dos testes.

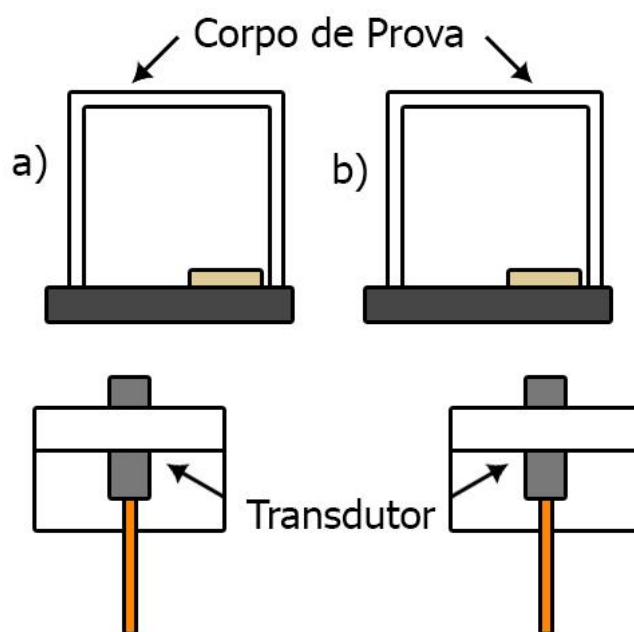


Figura 19 – a) Posição do transdutor para obtenção do teste de referência. b) Posição do transdutor para obtenção do teste com parafina.
Fonte: Autoria Própria

O procedimento é realizado para todas as configurações descritas na Tabela 2, onde na coluna “Meio 2” estão os fluidos colocados dentro da caixa acrílica.

Tabela 2 – Especificação da Configuração dos Testes
Fonte: Autoria Própria

Configuração	Espessura do Aço [mm]	Espessura da Parafina [mm]	Meio 2
1	24,22±0,01	1,71±0,02	Ar
2			Óleo USP
3			Óleo Singer®
4	6,55±0,01	0,97±0,02	Ar
5			Óleo USP
6			Óleo Singer®
7	3,55±0,01	0,45±0,02	Ar
8			Óleo USP
9			Óleo Singer®
10			Petróleo

Como o coeficiente de reflexão da interface parafina/ar é muito maior que com os óleos, o ar foi utilizado como comparação para os outros testes, ou seja, para verificar se o eco da interface parafina/meio 2 estava de acordo com o esperado.

Os Óleos USP e Singer® foram escolhidos por terem características acústicas semelhantes ao petróleo. Seus coeficientes de reflexão, em relação à parafina, são pouco diferentes o que permite uma comparação de resultados, além de eles serem transparentes, o que permitiu a visualização da posição do depósito de parafina dentro dos corpos de prova, facilitando o posicionamento do transdutor.

O petróleo foi utilizado apenas no teste mais crítico, ou seja, com aço de 3,55mm. Trata-se de um material que possui solventes em sua composição, portanto o acrílico foi danificado e ficou inutilizável. Porém como sua característica acústica é semelhante aos óleos utilizados nos testes anteriores, sabe-se que também é possível utiliza-lo nestas configurações.

4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados provenientes da aquisição digital realizada através do Labview® são carregados na plataforma de processamento de sinais. Para este trabalho foi utilizado o MATLAB® da MathWorks. Esta plataforma permite programação em linguagem de alto nível em um ambiente interativo, possui diversas funções matemáticas para análise e tratamento de sinais, além de possibilitar a utilização de gráficos e ferramentas para a avaliação (MathWorks, 2015).

Após os dados serem carregados no ambiente do programa e antes da aplicação do método, são executados dois processamentos de dados: o cálculo da média das múltiplas aquisições e a remoção do desvio do sinal.

O primeiro pré-processamento é utilizado para redução dos efeitos de ruídos na medição (Wilmshurt, 1990). O método consiste em calcular a média de todas as 1000 ondas digitalizadas pelo conversor A/D de um teste, permitindo que a interferência dos ruídos seja bastante reduzida.

Como a onda de resposta do ultrassom é composta por ondas periódicas, a remoção do desvio do sinal previne que não haja um ganho DC, ou seja, garante o zero do sinal.

4.3 MÉTODO DA SUPRESSÃO DO ECO DE REFERÊNCIA

No transdutor, após ser excitado, o cristal piezoelétrico irá vibrar e transmitir as ondas ultrassônicas com certa quantidade de energia, quando o sinal encontra uma interface parte dessa energia é refletida e parte é transmitida.

Na Figura 20a, é ilustrada a onda ultrassônica transmitida e recebida pelo transdutor até a interface água/aço, onde parte dela será refletida como eco fornecendo a componente $v_{\text{água}}(t)$ e parte será transmitida.

O mesmo acontece para as outras interfaces, ilustrada nas Figuras 20b, 20c e 20d, onde estão mostrados os ecos de cada interface juntamente com a onda de ultrassom transmitida por cada camada.

No momento em que o transdutor recebe o eco, ele é convertido para um sinal elétrico com tensão proporcional a energia dessa reverberação. Assim é

possível descrever a tensão elétrica, $V_{transdutor}(t)$, convertida a partir dos ecos recebidos pelo transdutor pela equação (5).

$$V_{transdutor}(t) = v_{\acute{a}gua}(t) + v_{a\grave{c}o}(t) + v_{parafina}(t) + v_{meio}(t) \quad (5)$$

Onde: $V_{transdutor}(t)$ é a tensão elétrica total do transdutor, medida em Volts (V);
 $v_{\acute{a}gua}(t)$ é a parcela da tensão elétrica da interface água/aço, medida em Volts (V);
 $v_{a\grave{c}o}(t)$ é a parcela da tensão elétrica da interface aço/parafina, medida em Volts (V);
 $v_{parafina}(t)$ é a parcela da tensão elétrica da interface parafina/meio 2, medida em Volts (V);
 $v_{meio}(t)$ é a parcela da tensão elétrica da interface meio 2/acrílico, medida em Volts (V).

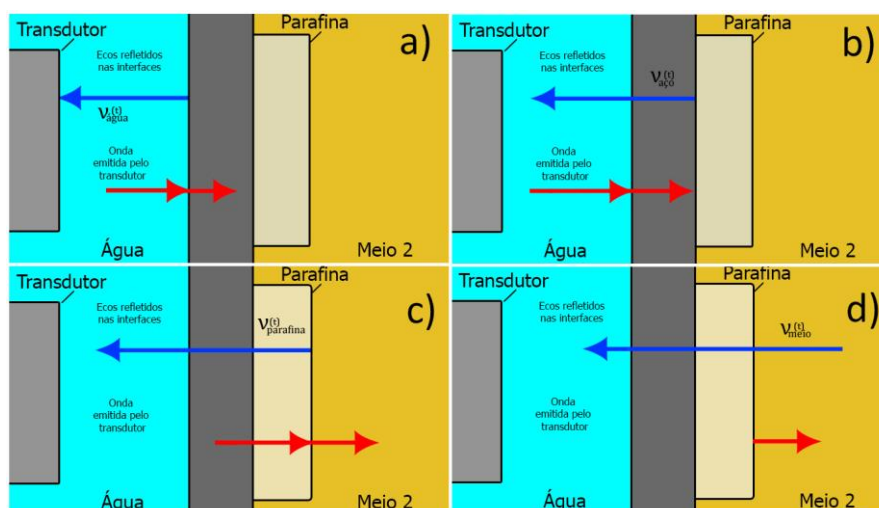


Figura 20 – Sinais transmitidos e refletidos nas interfaces do corpo de prova
Fonte: Autoria Própria

Como os testes foram realizados em imersão, o espaço entre o transdutor e o corpo de prova deve ser maior que a distância focal, garantindo a utilização do campo distante e que o meio 2 seja grande o suficiente para não haver sobreposição nos ecos da parafina nem do aço. Assim é possível escolher uma janela de

interesse no qual apenas os ecos da parafina e do aço aparecerão, simplificando a equação (5) para a equação (6).

$$V_p(t) = v_{aço}(t) + v_{parafina}(t) \quad (6)$$

Para o sinal de referência, $V_r(t)$, ou seja, sem a contribuição do eco da parafina, somente o eco da interface aço/meio 2 será refletido, na área de interesse, para o transdutor. Dessa forma é possível isolar o sinal referente ao eco da parafina de acordo com a equação (7).

$$V_p(t) = v_{aço}(t) + v_{parafina}(t)$$

$$V_r(t) = v_{aço}(t)$$

$$v_{parafina}(t) = V_p(t) - v_{aço}(t)$$

$$v_{parafina}(t) = V_p(t) - V_r(t) \quad (7)$$

Onde: $V_p(t)$ é o sinal que contém os ecos da interface aço/parafina e parafina/meio 2, é medido em Volts (V);

$V_r(t)$ é o sinal que contém apenas o eco da interface aço/parafina, referência, é medido em Volts (V).

Como é realizado um teste para obter o sinal de referência e depois o sinal com parafina, é importante realizar uma correção para a amplitude e um avanço ou atraso de tempo em uma das ondas. Para isso a amplitude é normalizada pelo máximo de cada sinal, na área de interesse, e o tempo é defasado de forma que os picos do eco do aço dos dois sinais, referência e com parafina, fiquem exatamente no mesmo lugar, dada pelas equações (8) e (9).

$$\|V_p\|(t) = \frac{V_p(t)}{\max(V_p(t))} \quad (8)$$

$$\|V_r\|(t - \tau) = \frac{V_r(t)}{\max(V_r(t))} \quad (9)$$

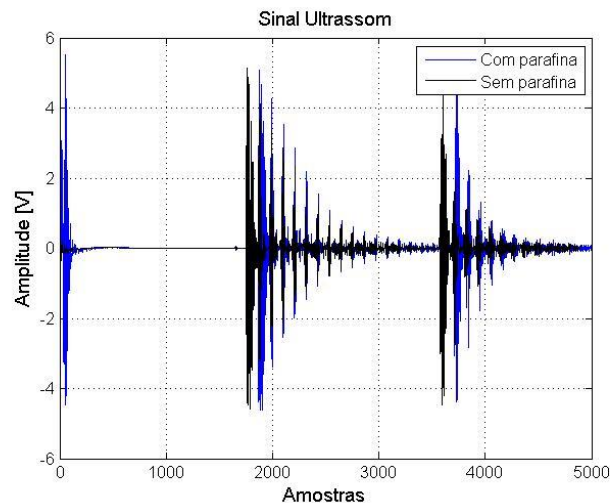
Para identificar os picos dos ecos de cada uma das contribuições é necessário utilizar a transformada de Hilbert, onde a partir dela é possível mapear a envoltória do sinal. Essa transformada é dada pela equação (10).

$$\mathcal{H}\{f(x)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(u)}{u - x} du \quad (10)$$

Essa transformada permite obter o conjugado de uma função real. Assim a envoltória da função original é dada pelo absoluto da função transformada.

Os gráficos a seguir são um exemplo de como foram realizados os procedimentos para supressão dos ecos e como foi isolado o sinal da parafina.

Após os pré-processamentos das duas ondas, a de referência e a com parafina, estão plotadas na Figura 21.



**Figura 21 – Sinal com e sem parafina, graficados sobrepostos sem ajuste de tempo
Fonte: Autoria Própria**

É verificada existência de uma defasagem entre os dois sinais. Então, com auxílio das ferramentas de análise gráficas do MATLAB[®], é medido em quantas amostras representa essa diferença e depois compensada através do algoritmo desenvolvido neste trabalho.

Na Figura 22 é possível observar a existência das múltiplas reflexões, no intervalo de 1800 até 3500 amostras estão presentes às reverberações da interface do aço/parafina e aço/meio 2, após 3500 amostras está representado um segundo eco idêntico ao primeiro, sendo uma múltipla reflexão do conjunto.

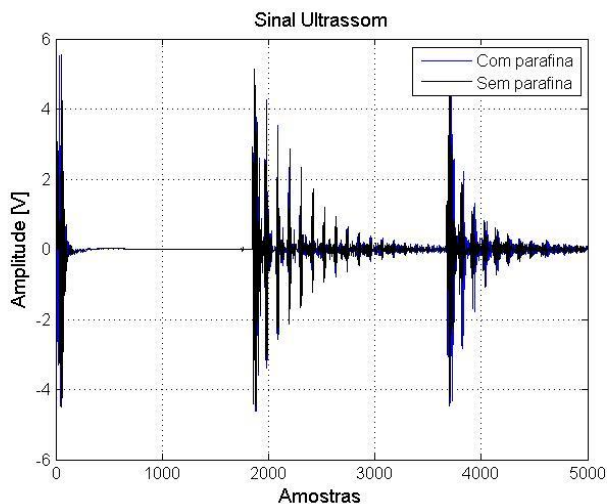


Figura 22 – Sinal com e sem parafina com compensação de tempo
Fonte: Autoria Própria

Essas reverberações dificultam a análise, dessa forma é preciso escolher a área de interesse, essa região deve conter apenas os ecos referentes à interface aço/parafina e parafina/meio2, Figura 23.

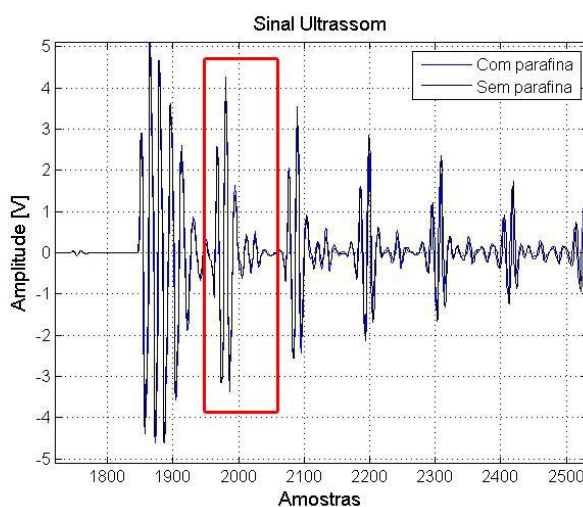


Figura 23 – Sinal com e sem parafina com indicação da área de interesse
Fonte: Autoria Própria

Uma vez localizada onde será aplicado o método, é possível realizar o procedimento de normalização do sinal, de acordo com as equações (8) e (9), como ilustrado na Figura 24.

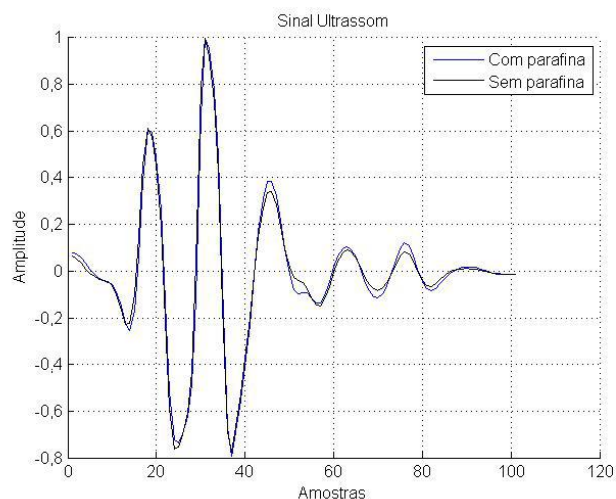


Figura 24 – Sinal com e sem parafina, normalizado.
Fonte: Autoria Própria

Como a espessura da parafina é conhecida sabe-se que o eco, referente à interface parafina/meio 2, deverá aparecer na posição entre 60 e 100 amostras. Assim na Figura 24 verifica-se que existe uma leve diferença entre os dois sinais.

Esse eco é muito pequeno, quase imperceptível analisando somente a amplitude deste sinal, mesmo traçando a envoltória como ilustrado na Figura 25.

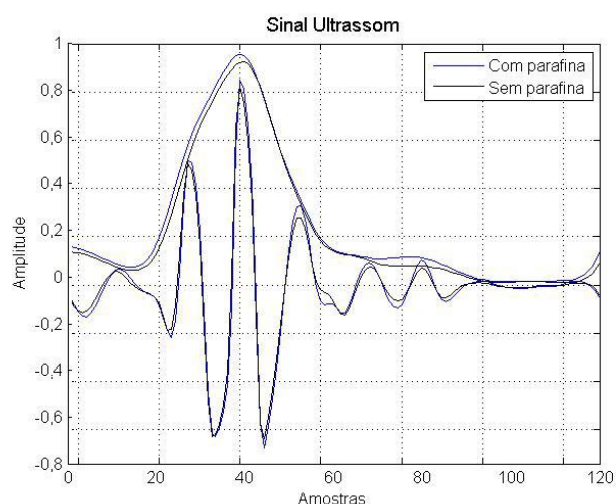


Figura 25 - Sinal com e sem parafina, juntamente com suas respectivas envoltórias
Fonte: Autoria Própria

Calculando a diferença das duas envoltórias ainda é difícil dizer exatamente onde está o eco referente à interface parafina/meio 2, como fica ilustrado na Figura 26.

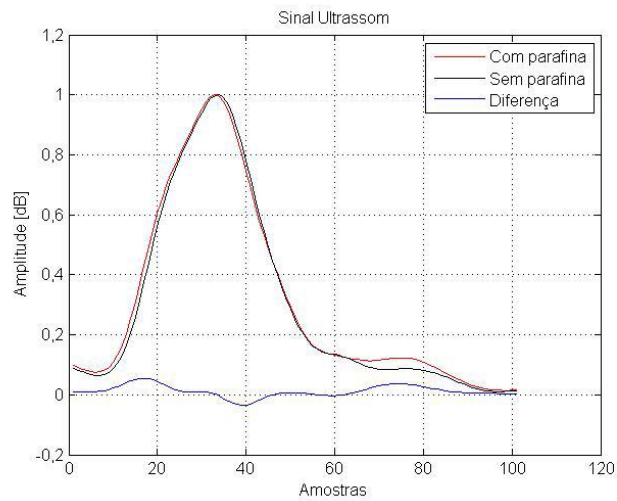


Figura 26 – Envoltórias do sinal com e sem parafina e a diferença
Fonte: Autoria Própria

Sendo assim é utilizada uma grandeza logarítmica que auxilia a quantificar uma proporção de uma grandeza física a um nível de referência, o decibel, assim como é mostrado na Figura 27.

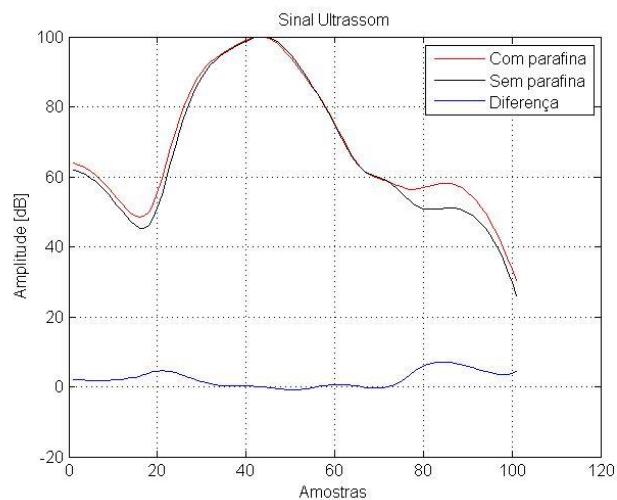


Figura 27 - Envoltórias do sinal com e sem parafina e a diferença em decibel
Fonte: Autoria Própria

Com esse artifício fica muito mais evidente onde cada eco aparece e como o eco referente à interface aço/parafina é zerado. Dessa forma, para localizar o eco relacionado à parafina/meio 2, procura-se a maior diferença entre as duas

envoltórias logo após o maior pico das envoltórias, como é indicado pelas linhas verticais na Figura 28.

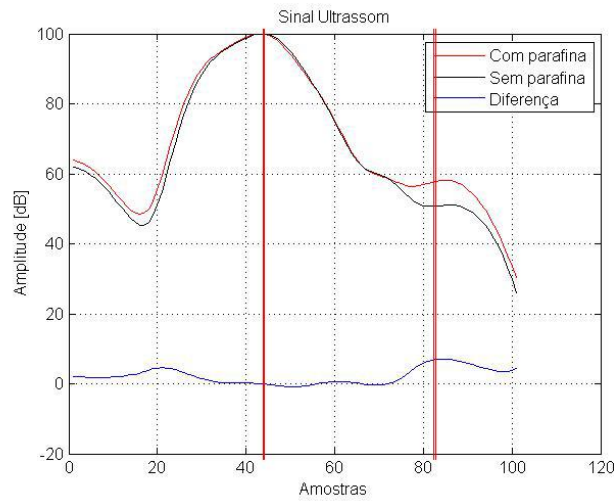


Figura 28 – Envoltórias do sinal com e sem parafina e a diferença com indicativo dos ecos referente a interface aço/parafina e parafina/meio 2
Fonte: Autoria Própria

Com a posição dos ecos é possível determinar o número de amostras, $n_{amostra}$, existentes entre eles e assim estimar o valor da espessura da parafina, $L_{parafina}$, pela equação (11), onde: $c_{parafina}$ é a velocidade do som na parafina e o f_s é a frequência de amostragem do conversor analógico digital.

$$L_{parafina} = \frac{c_{parafina} \cdot \frac{n_{amostra}}{f_s}}{2} \quad (11)$$

Onde: $L_{parafina}$ é a espessura da camada de parafina, medida em metros (m);
 $c_{parafina}$ é a velocidade do som na parafina, medida em metros por segundo (m/s);
 $n_{amostra}$ é o número de amostras referente ao tempo de trânsito da onda ultrassônica dentro da camada de parafina, é um número inteiro;
 f_s é a frequência de amostragem, é medido em amostras por segundo.

Essa é a metodologia utilizada para realizar os cálculos para estimar as espessuras de parafina com base nos ensaios ultrassônicos de todas as configurações de testes realizadas neste trabalho.

4.4 ESTIMATIVA DE INCERTEZA NAS MEDIÇÕES

Toda medição deve estar associada a uma análise quantitativa de sua qualidade, não apenas a observação do erro sobre uma referência, mas sim avaliar a confiabilidade, ou seja, dizer quão certo é essa medida. Nesse sentido entra a verificação da incerteza de uma medição, para mostrar quantitativamente qual o nível de confiança desse valor (INMETRO, 2008).

A análise da incerteza dos dados deste trabalho foi elaborada com auxílio do “Guia para a expressão da incerteza de medição – GUM”, documento fornecido pelo INMETRO e tem por objetivo estabelecer regras para avaliar e expressar a incerteza de medição. Portanto este trabalho segue utilizando as recomendações desse guia.

Sendo assim a primeira etapa do processo é modelar matematicamente a função do mensurado nas grandezas de entrada. Essa equação foi modelada na seção anterior e é expressa pela equação (11).

Os próximos passos são realizar as medições, possíveis correções e listar as fontes de incerteza.

Na equação (11) existem duas componentes de incerteza, número de amostras e a velocidade do som no meio, visto que f_s é a frequência de amostragem do conversor A/D, e possui uma incerteza muito menor que as citadas. Assim, considerando o critério de relação de incerteza de teste (TUR) de 10:1, essa incerteza será desprezada.

A velocidade do som no meio tem a incerteza calculada após a realização dos testes para caracterização dos meios. Assim esse valor será especificado, ou seja, para o cálculo da incerteza da espessura, esse valor será considerado do Tipo B, e o número de amostras será do Tipo A³.

³ Incerteza do Tipo A são provenientes de uma análise estatística de uma série de medições. Já as incertezas do Tipo B são obtidas por quaisquer outros métodos, normalmente relacionadas às especificações dos equipamentos.

Em seguida é calculado a média, o desvio padrão e a variância de $n_{amostras}$ de cada teste ultrassônico.

Com o valor das duas componentes de incerteza, determina-se a incerteza padrão combinada $u_c(L_{parafina})$. Uma vez que essas duas componentes não são dependentes, a equação torna-se:

$$u_c(L_{parafina}) = \sqrt{s_n^2 u^2(n_{amostras}) + s_c^2 u^2(c)} \quad (12)$$

Onde: $u_c(L_{parafina})$ é a incerteza padrão combinada, é medida em metros (m);

s_n é o coeficiente de sensibilidade do número de amostras;

$u(n_{amostras})$ é a incerteza do número de amostras, é medida em metros (m);

s_c é o coeficiente de sensibilidade da velocidade do som no meio;

$u(c)$ é a incerteza da velocidade do som no meio, é medida em metros por segundo (m/s).

O valor de s_n e s_c são os coeficientes de sensibilidade da função, ou seja, é o quanto a estimativa da espessura será influenciada por variações dos valores de entrada.

Assim as sensibilidades são calculadas pelas equações (13) e (14) a seguir:

$$s_n = \frac{c}{2 \cdot f_s} = \frac{c}{100 \cdot 10^6} \quad (13)$$

$$s_c = \frac{n}{2 \cdot f_s} = \frac{n}{100 \cdot 10^6} \quad (14)$$

O último cálculo é a incerteza expandida. Isso melhora a confiança no resultado, para isso utiliza-se um coeficiente de abrangência, k , pelo qual se multiplica o valor da incerteza combinada.

O valor de k é escolhido de acordo com o número de graus de liberdade efetivos e qual a confiabilidade desejada.

Como o número de amostras neste trabalho é bastante elevado, considera-se que existem infinitos graus de liberdade e utilizando a distribuição de *t-student*, tem-se $k = 2$, para uma confiabilidade de 95,45%. Dessa forma o valor final de uma medição é dado por um valor médio medido e uma incerteza:

$$L_{parafina} = l_{parafina} \pm k \cdot u_c \quad (15)$$

Esse mesmo procedimento foi utilizado para estimar a incerteza na medição da velocidade do som nos meios, realizando as modificações necessárias nas equações (11), (12) e (13).

4.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi abordada toda a metodologia de aquisição e processamentos dos dados, onde foi descrito em detalhes o procedimento de realização dos testes, o método de supressão de ecos e também como foi estimada o valor da incerteza de medição.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados da aplicação do método de supressão de ecos, juntamente com as informações acústicas provenientes da caracterização dos meios.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos das análises das medições realizadas. Primeiramente são mostradas as características acústicas dos meios estudados. Em seguida, são realizadas as análises e discussões dos dados obtidos pela aplicação do método de supressão de ecos. Por fim, é apresentado um resumo no qual são confrontados os dados medidos com os respectivos erros e incertezas associadas.

5.1 VALORES DAS CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS

Com os dados processados e analisados foi observada que a variação da velocidade do som no meio é inversamente proporcional a temperatura de forma linear. Na Figura 29 são apresentados os pontos nos quais foram realizadas as medições da velocidade do som para o Petróleo.

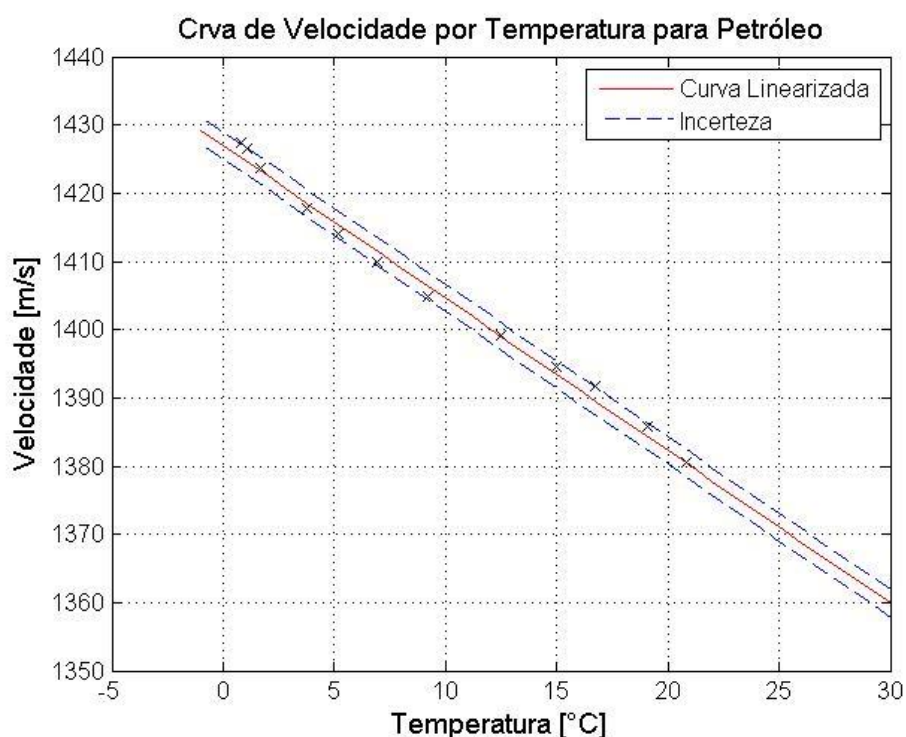


Figura 29 – Curva de Velocidade por Temperatura dos pontos medidos, curva estimada e incerteza associada.
Fonte: Autoria Própria

O valor da incerteza expandida final para qualquer medição foi definido como a máxima incerteza expandida calculada dentre todos os testes e pontos medidos, esse valor foi de $\pm 1,983\text{m/s}$.

Com o gráfico da aproximação linear juntamente com incerteza associada, observa-se que os pontos medidos estão de acordo com o esperado.

Na Figura 30 estão traçados os gráficos linearizados de velocidade do som no meio pela temperatura, da Parafina, Petróleo, Óleo Singer® e USP.

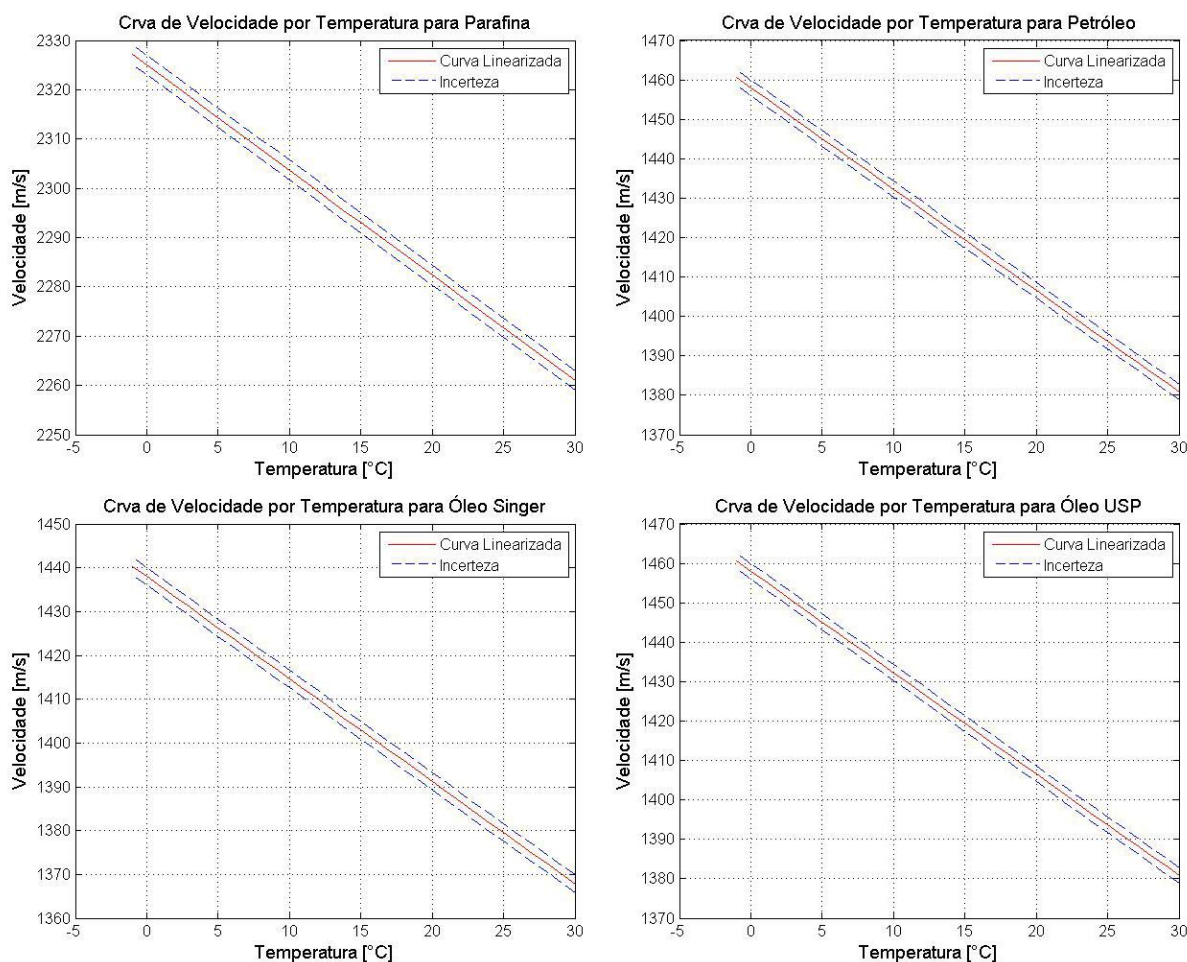


Figura 30 – Curvas de Velocidade por Temperatura dos meios
Fonte: Autoria Própria

Na tabela a seguir são apresentadas as características de cada um dos elementos utilizados neste trabalho. Todos os valores foram obtidos na temperatura de 20°C. Os meios que não apresentam o valor da incerteza associado são provenientes de dados tabelados encontrados na literatura.

Tabela 3 – Características dos Meios
Fonte: Autoria Própria

	Velocidade do som [m/s]	Densidade [g/cm³]	Impedância Acústica [g/cm²-s 10³]	Reflexão Parafina/Meio
Parafina	2286±2	0,835±0,005	190,881±0,02	-
Óleo USP	1407±2	0,850±0,005	119,595±0,02	5,2%
Óleo Singer®	1392±2	0,873±0,005	121,521±0,02	4,9%
Petróleo	1350±2	0,922±0,005	124,470±0,02	4,5%
Água	1480	1	1,48	1,6%
Ar	344	1,275e-3	0,44 10 ⁻³	>99%
Aço	5890	7,71	45,41	84,5%

Observando a porcentagem de reflexão fica evidente que a intensidade do sinal refletido pela interface parafina e os óleos é muito pequena. Outra dificuldade é em relação ao coeficiente de reflexão do aço, que reflete 84,5% do sinal incidente, ou seja, o transdutor irá receber uma quantidade mínima de energia referente ao eco da parafina.

5.2 A SUPRESSÃO DE ECOS

Os primeiros testes foram realizados utilizando o transdutor de 4MHz em uma placa de aço 1020 com 24,22mm e um depósito de parafina com 1,71mm de espessura, conforme descrito na Tabela 2.

Esta configuração foi utilizada para garantir que os ecos referentes à interface aço/parafina ficassem com uma distância grande o suficiente para que o eco pertencente à interface parafina/meio 2 estivesse mais evidente.

Na Figura 31 são mostradas as duas ondas, após a realização das aquisições e os processamentos dos sinais, referente à área de interesse dos testes realizados com o corpo de prova de 24,22mm utilizando ar como meio 2.

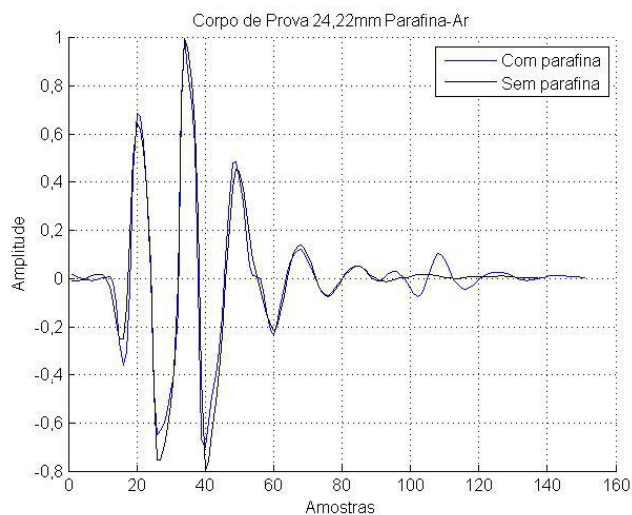


Figura 31 – Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 24,22mm e Ar
Fonte: Autoria Própria

Neste caso fica evidente que o pico do eco da interface parafina/meio 2 está na posição entre 100 e 120 amostras. Sendo assim a utilização do método de supressão de ecos não é necessária.

Utilizando um meio no qual a reflexão do sinal é baixa, por exemplo, com óleos USP e Singer® é verificado que o eco é quase imperceptível, como é ilustrado nas Figuras 32 e 33:

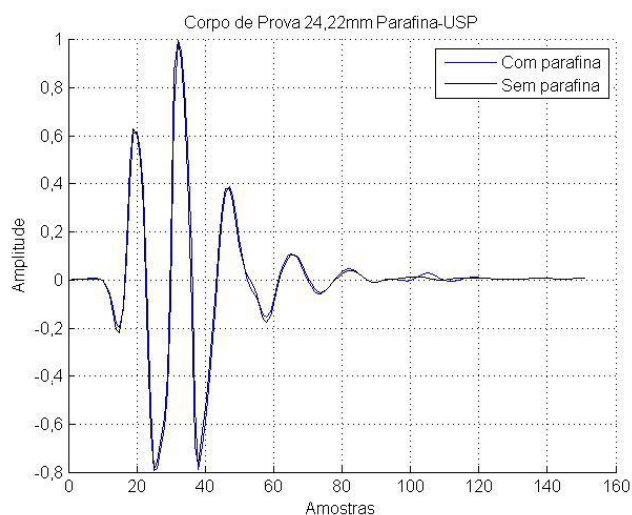


Figura 32 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 24,22mm e Óleo USP.
Fonte: Autoria Própria

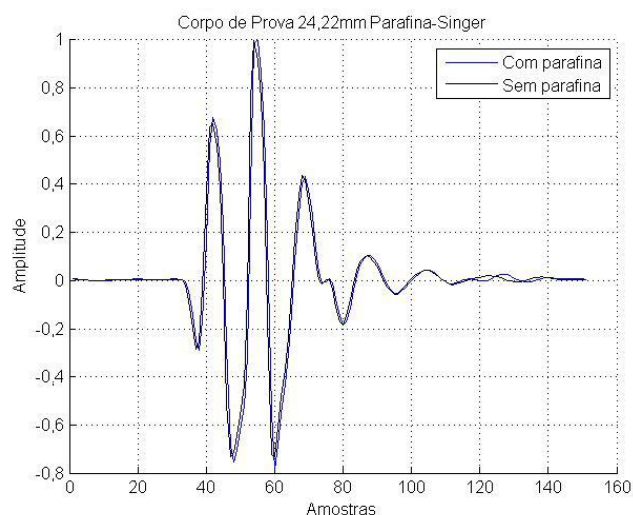


Figura 33 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 24,22mm e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

Nestes dois casos o eco da interface parafina/meio 2 continua no mesmo lugar, ele ainda é visível mas em uma situação real, não seria possível distingui-lo de um ruído.

Sendo assim, o método foi aplicado para essas duas configurações. O resultado é ilustrado nas Figuras 34 e 35.

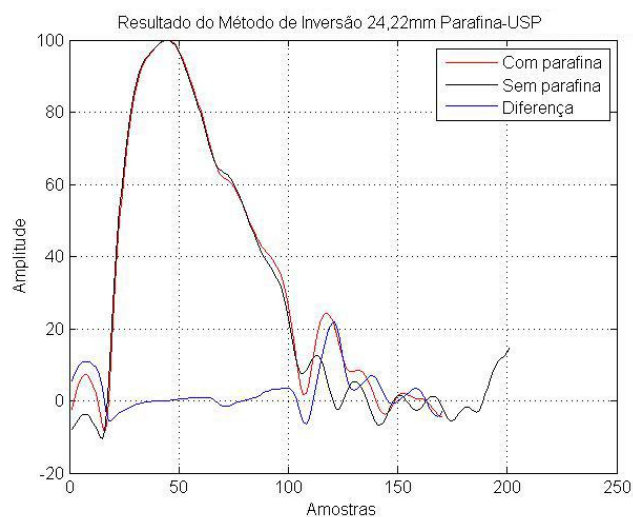


Figura 34 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 24,22mm e Óleo USP
Fonte: Autoria Própria

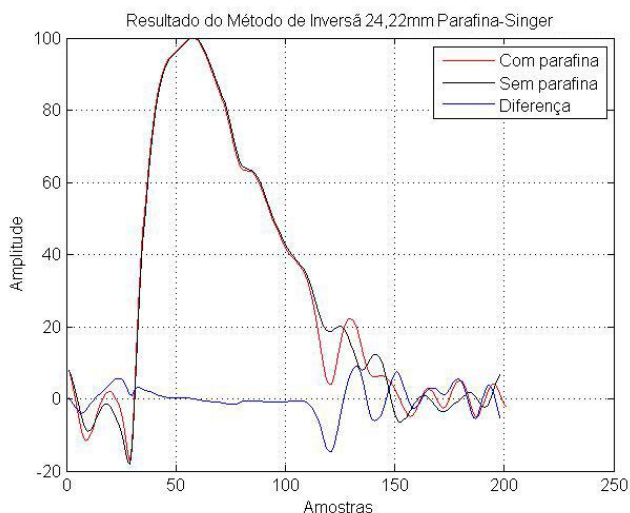


Figura 35 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 24,22mm e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

A segunda seção de testes foi realizada utilizando o corpo de provas de 6,55mm de aço com 0,97mm de parafina e com o transdutor de 4MHz.

Nesta configuração as múltiplas reflexões dos ecos do aço estão bastantes próximas uma das outras. Assim o eco da interface parafina/meio 2 já possui uma sobreposição do fim e do começo das ondas pertencente aos ecos da interface aço/parafina.

Na Figura 36 são mostradas as duas ondas, a de referência e a com parafina, do ensaio com este corpo de prova e ar como meio 2.

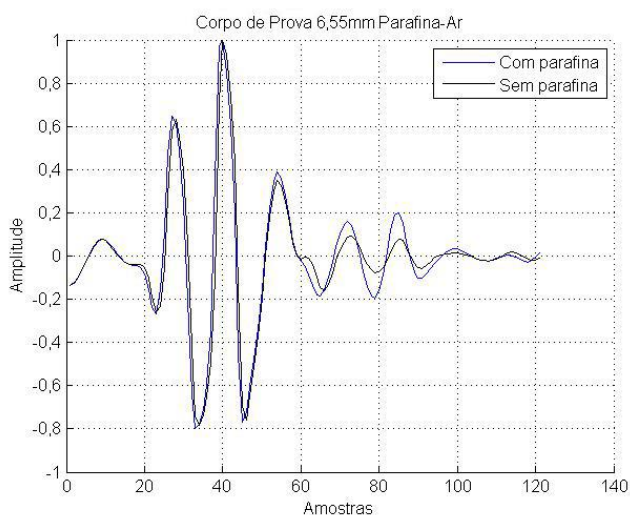


Figura 36 — Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 6,55mm e Ar
Fonte: Autoria Própria

Como era de se esperar, quando existe a interface parafina/ar o sinal é quase totalmente refletido, assim a energia pelo transdutor é maior, isso implica diretamente na amplitude deste eco.

Para os meios com óleo USP e Singer®, Figura 37 e 38, o sinal tem uma amplitude muito pequena e quase não é possível confirmar a existência do depósito de parafina.

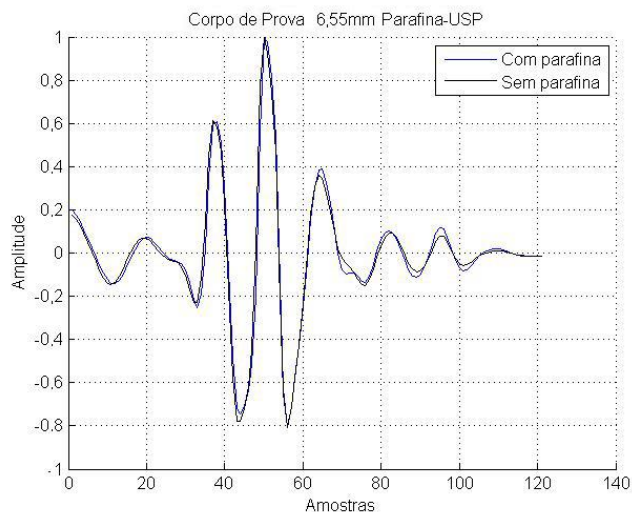


Figura 37 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 6,55mm e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

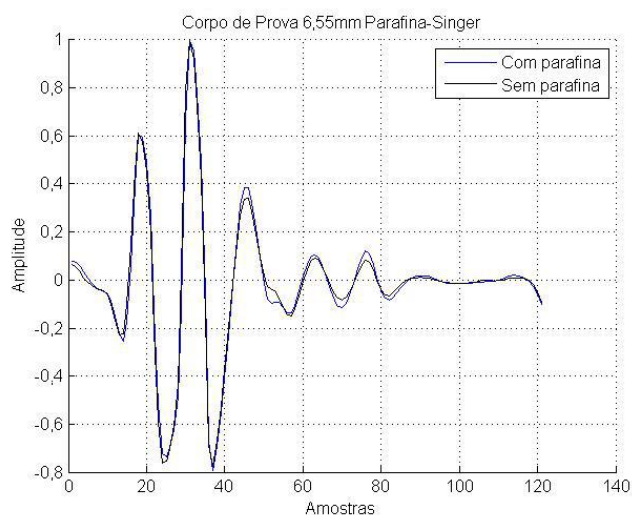


Figura 38 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 6,55 e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

Ao realizar a aplicação do método para os dois testes, Figuras 39 e 40. É verificada a existência de uma diferença entre as duas medições. Assim são identificados os dois pontos de pico e calculada a diferença de amostras entre eles.

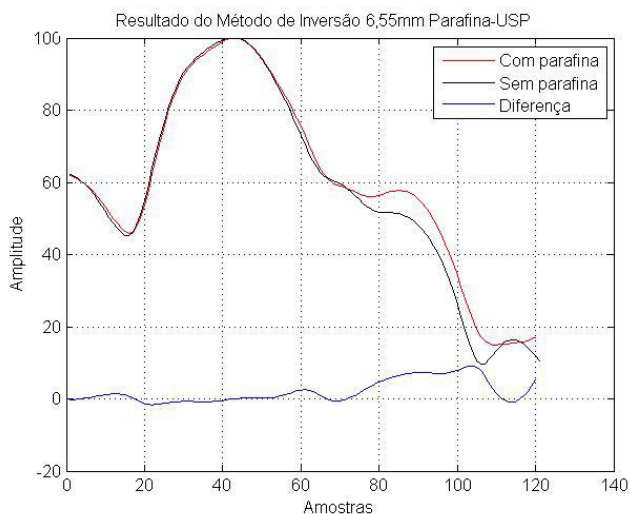


Figura 39 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 6,55mm e Óleo USP
Fonte: Autoria Própria

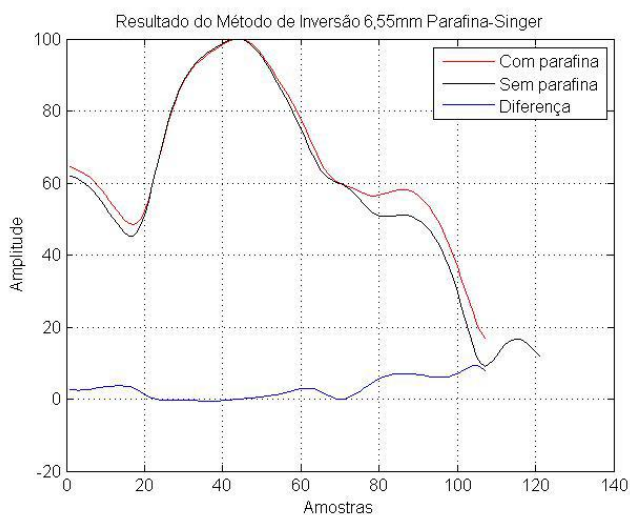


Figura 40 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 6,55mm e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

O último teste foi para uma configuração no qual foi necessário a utilização do transdutor de 8MHz, pois com 4MHz dos testes acima o sinal não possuía uma boa resolução axial.

O corpo de prova confeccionado com 3,55mm de aço e 0,45mm de parafina têm por objetivo principal verificar a detecção de parafina para uma espessura muito pequena, além de verificar se com essa espessura de aço o método também ira funcionar.

No teste com interface de parafina/ar, Figura 41, é possível verificar que existe uma grande diferença de amplitude em uma parte do sinal, porém como existe uma sobreposição, fica difícil identificar onde está o pico dessa onda.

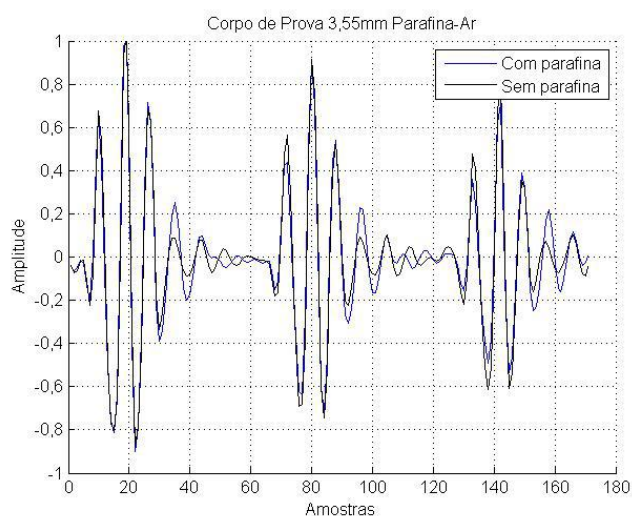


Figura 41 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 3,55mm e Ar
Fonte: Autoria Própria

Sendo assim, neste caso é interessante a execução do método para verificar onde ocorrem os pontos de picos. Na Figura 422 é possível observar o resultado da supressão dos ecos.

Um resultado bastante interessante para este teste é o fato de aparecer na diferença entre as ondas, curva azul da Figura 422, uma múltipla reflexão da interface parafina/ar, algo que não estava presente na Figura 411.

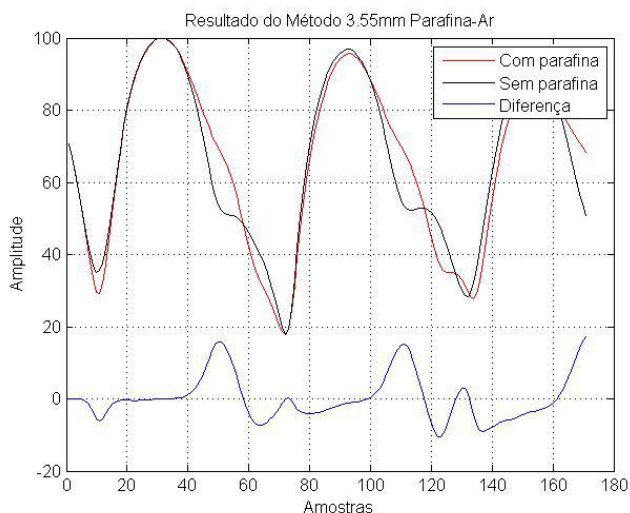


Figura 42 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Ar
Fonte: Autoria Própria

Com essa curva é possível determinar e confirmar o valor da espessura da parafina, pois além da estimativa normal, diferença de amostras entre os picos dos ecos da interface aço/parafina e parafina/meio 2, é possível utilizar a diferença entre as múltiplas reflexões para verificar a estimativa.

Nas Figura 43 e Figura 44 são apresentadas as ondas ultrassônicas para os testes com óleo USP e Singer® como meio 2, da mesma forma que os resultados anteriores, não é possível localizar a posição do eco referente a interface parafina/meio 2 analisando somente o sinal recebido pelo transdutor. É necessário a aplicação do método, neste caso.

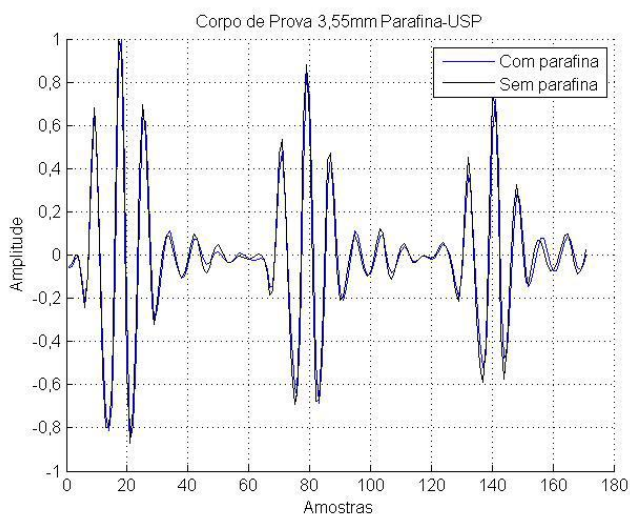


Figura 43 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 3,55mm e Óleo USP
Fonte: Autoria Própria

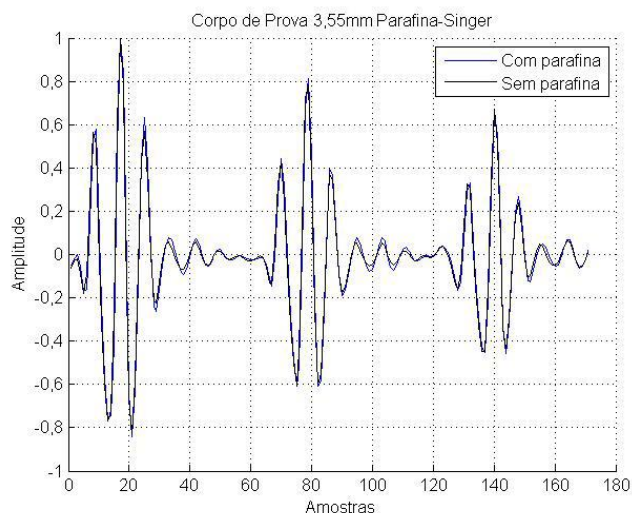


Figura 44 - Ondas ultrassônicas dos testes realizados com corpo de prova de 3,55mm e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

Da mesma forma que na Figura 422, o efeito de uma múltipla reflexão da interface parafina/meio 2 é visível no teste com Óleo USP, Figura 455, porém não tão evidente como no teste com ar.

No teste com Óleo Singer® esse efeito é menor, pois a amplitude do sinal é menor, assim os dois picos tendem a se juntar formando um trapézio, como é ilustrado na curva azul da Figura 466 na posição entre 100 e 140 amostras.

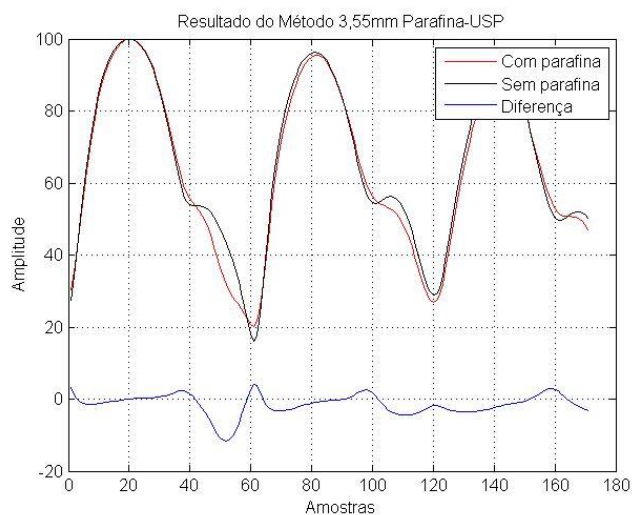


Figura 45 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Óleo USP
Fonte: Autoria Própria

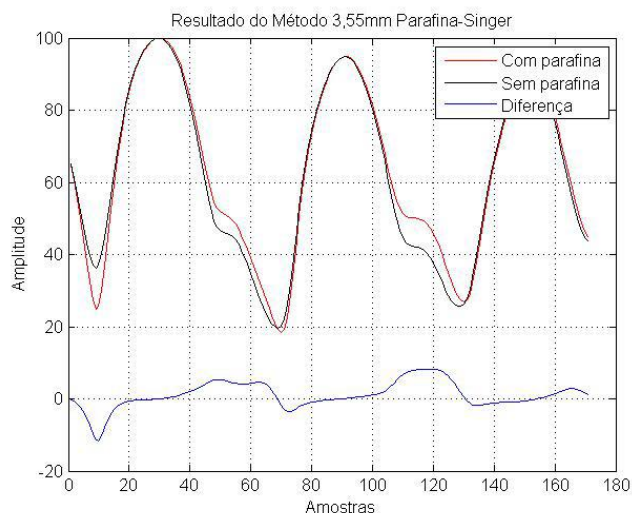


Figura 46 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Óleo Singer®
Fonte: Autoria Própria

Contudo no intervalo de 40 a 80 amostras, da Figura 46, mesmo com uma diferença bastante pequena é possível verificar a existência de dois picos distintos, e quando comparado com os valores dos outros testes é evidente que representam uma múltipla reflexão da interface parafina/meio 2.

Um último teste foi realizado utilizando petróleo como meio 2, Figura 47, porém como as características acústicas dele são bastante parecidas com as dos óleos utilizados o resultado foi semelhante.

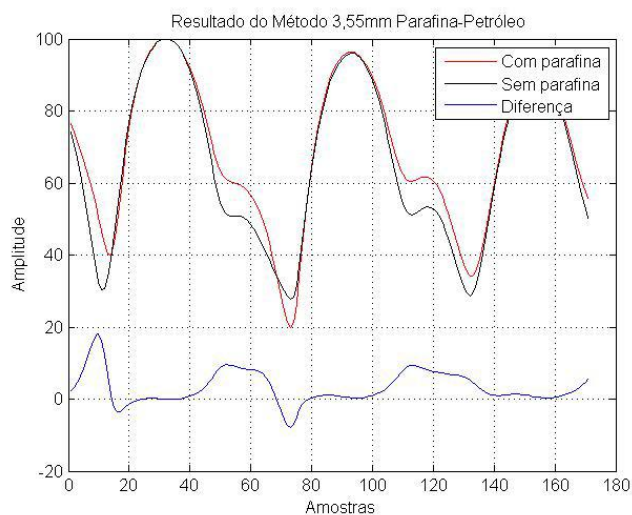


Figura 47 - Resultado do Método de Supressão de Ecos para corpo de prova de 3,55mm e Petróleo
Fonte: Autoria Própria

Para esse teste os picos da múltipla reflexão da interface parafina/meio 2 tornaram-se um trapézio, assim não sendo possível visualizar os dois picos distintos, mas a aplicação do método foi realizada e a estimativa da espessura também.

Após a realização de todos os testes foi necessário à verificação da incerteza associada a cada medição. Dessa forma na tabela 4 é apresentado um resumo de todos os resultados dos testes realizados.

Tabela 4 – Resumo dos Resultados
Fonte: Autoria Própria

Configuração	Espessura da Parafina Medida com micrômetro [mm]	Incerteza da resolução do micrômetro [mm]	Espessura da Parafina Estimada pelo Método de Supressão de Ecos [mm]	Incerteza Estimada [mm]
1	1,71	0,02	1,70	0,11
2			1,72	0,32
3			1,68	0,24
4	0,97	0,02	0,98	0,13
5			1,01	0,21
6			1,04	0,24
7	0,45	0,02	0,44	0,12
8			0,43	0,15
9			0,41	0,19
10			0,46	0,23

Com o valor da incerteza de cada uma das estimativas fica claro que os valores finais das medições são confiáveis.

5.3 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através do método de supressão de ecos foram satisfatórios os valores estimados são muito próximos do valor medido com o micrômetro.

A maior incerteza associada à estimativa pelo método foi de 0,32mm, o que indica que é possível detectar, com exatidão, formações de parafina logo no início da formação de um depósito.

No capítulo 6 será apresentado as conclusões deste trabalho assim como sugestões para trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal utilizar testes baseados na tecnologia de ultrassom para realizar a detecção de um depósito de parafina sobre uma superfície metálica, na qual a parafina estivesse em interface com um óleo, ou seja, simulando um oleoduto.

Depósitos de parafina são um grave problema para diversas plantas de produção e transporte de petróleo. Esses problemas são mais graves nas linhas em alto mar, onde as manutenções podem custar muito caro. Assim a realização de um monitoramento do estado dessas tubulações é de grande interesse, tanto para otimizar a execução de manutenções nas tubulações como também auxiliar na modelagem da formação desses depósitos.

A bancada experimental desenvolvida garantiu a repetitividade dos testes permitindo a comparação entre os corpos de prova, para diferentes tipos de espessura de aço, depósito de parafina e também entre os óleos utilizados.

A caracterização das informações acústicas dos materiais, presentes neste trabalho, foi de grande importância, uma vez que foi possível conhecer com exatidão a velocidade do som no meio dos materiais trabalhados.

O método de supressão de ecos proposto por Rommetveit (2011), teve por resultado uma estimativa bastante satisfatória para todos os testes realizados, onde a maior incerteza de medição foi de 0,32mm para o teste na configuração 2, 24,22mm de aço com 1,71mm de parafina e óleo USP.

Os menores valores de erro e incerteza, como esperado, foram para os testes de parafina/ar. Mas, mesmo assim, o maior erro médio absoluto foi, na configuração 6, de apenas 0,07mm, o que é bastante pequeno considerando que a espessura da parafina neste teste foi de 0,97mm.

Para o teste mais crítico, utilizando 3,55mm de aço e 0,45mm de parafina, todas as estimações foram bem próximas da real. O maior erro médio absoluto de 0,04mm na configuração 9 e a pior incerteza de 0,23mm na configuração 10.

Analisando todos os resultados verifica-se que a estimacão da espessura dos depósitos foi satisfatória. A caracterizaco da velocidade dos meios utilizados permitiu uma melhor estimacão, diminuindo a incerteza associada a cada medicio.

Além disso, estimando a impedância acústica dos meios foi possível concluir que com até 4,5% de coeficiente de reflexão  possível realizar uma medicio. O que auxilia em testes posteriores.

6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, sugerem-se alguns possíveis trabalhos futuros:

- Utilizar tubos cilíndricos como superfície metálica para deposio da parafina;
- Realizar os testes em uma bancada dinâmica, na qual seja simulado com maior fidelidade um escoamento de produo de petróleo;
- Implementar um sistema de monitoramento em tempo real, utilizando o método de supressão de ecos.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, M. I., ISAKEN, O., URDAHL, O., Ultrasonic Instrumentation for On-line Monitoring of Solid Depositions on Pipes, **Society of Petroleum Engineers**, SPE 37437, 1997.

ANGRISANI, L., DAPONTE, P., D'APUZZO, M., The Detection of Echoes from Multilayer Structures using the Wavelet Transform, **IEEE Transactions Instrumentation and Measurement**, vol. 49, no. 4, pp. 727–731, 2000.

BURGER, E. D., PERKINS, T. K., ERICKSON, D. D., Studies of wax deposition in the trans-Alaska pipeline, **Journal of Petroleum Technology**, pp. 1075-1086, 1981.

CHEN, W., ZHAO, Z., ZHANG, X., WANG, L., Thermodynamic phase equilibria of wax precipitation in crude oils, **Fluid Phase Equilibria**, v. 225, pp. 31-36. 2007.

CREEK, J. L., LUND, H. J., BRILL, J. P., “Wax deposition in single phase flow”, **Fluid Phase Equilibria**, v. 158-160, Jun., pp. 801-811, 1999.

DALIRSEFAT, R., FEYZI, F., A thermodynamic model for wax deposition phenomena, **Fuel**, v. 86, pp. 1402-1408, 2007.

DEMIRLI, R., SANIIE, J., Model-based estimation of ultrasonic echoes part i: analysis and algorithms, **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, v. 48, n. 3, p. 787-802, 2001.

EDALATI, K., RASTKHAH, N., KERMANI, A., SEIEDI, M., MOVAFEGHI, A., The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 83, p. 736-741, 2006.

EKWERIBE, C., CIVAN, F., LEE, H., SINGH, P. Effect of System Pressure on Restart Conditions of Subsea Pipelines. SPE 115672, **Society of Petroleum Engineers**, 2008.

GUDMUNDSSON, J. S., DURGUT, T., RONNEVIG, J., KORSAN, K., CELIUS, H. K., Pressure pulse analysis of gas lift wells, **ASME/API Gas Lift Workshop**, 2001.

GUDMUNDSSON, J. S., DURGUT, T., RONNEVIG, J., KORSAN, K., CELIUS, H. K., Pressure pulse analysis of flow in tubing and casing of gas lift wells, **ASME/API Gas Lift Workshop**, 2002.

HAGGLUND, F, Characterization of Thin Multi-Layered Materials Using Ultrasound, **Tese de Doutorado**, 2009, University of Technology Lulea, Suecia.

HALMSHAW, R., **Non-Destructive Testing**, 2 ed. London: Arnold cop., 1991.

HOFFMANN, R., AMUNDSEN, L., SCHÜLLER, R., Online monitoring of wax deposition in sub-sea pipelines, **Measurement Science And Technology**, v. 22, 2011.

HUANG, Z., Application of the fundamentals of heat and mass transfer to the investigation of wax deposition in subsea pipelines, **Tese de Doutorado**, 2011, University of Michigan.

HUNT Jr., E. B., Laboratory study of paraffin deposition, **Journal of Petroleum Technology**, SPE 279, pp. 1259-1269, 1962.

INMETRO, **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão d expressão de incerteza incerteza demedição medição medição – GUM**, Rio de Janeiro, 2008

JULABO, F12-EH Banhos termostático, **Ficha de dados do produto**, 2012.

KUTS, Y. V., YEREMENKO, E. V., MONCHENKO, E. V., PROTASOV, A. G., Ultrasound method of multi-layer material thickness measurement, **American Institute of Physics**, v. 1096, p. 1115-1120, 2009.

KYOTOKU, G. B. C., ARAÚJO, J. C. D., LUCENA, S., “Modelagem matemática e simulação computacional da deposição de parafina no transporte de óleos pesados através de dutos”, **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006**, Rio de Janeiro, Brazil, 11 – 14 Sep, 2006.

LEONTARITIS, K., LEONTARITIS, J., Cloud Point and Wax Deposition Measurements Techniques. SPE 80267, **Society of Petroleum Engineers**, 2003.

MATHWORKS, MATLAB – The Language of Technical Computing, disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acessado em: 15 de Julho de 2015.

National Instruments, Disponível em <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/209253>>. Acessado em 30 de Novembro de 2015.

NDT Resource Center, Disponível em <<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/reflectiontransmission.htm>>. Acessado em 30 de Novembro de 2015

NÝVLT, J., HOSTOMSKÝ, J., GIULIETTI, M., **Cristalização**, EdUSFCar/IPT, São Paulo, 2001.

PANterra, PANterra Geoconsultants, Disponível em <http://www.panterra.nl/_images_upload/_tn_0b55d5b518165db4.jpg >, Acessado em 30 de Novembro de 2015.

ROMMETVEIT, T., Development of non-invasive ultrasound inspection techniques through steel, **Tese de Doutorado**, 2011, Norwegian University of Science and Technology.

SANTOS, J. S. T., Estudo experimental e numérico da parafinação em escoamento de hidrocarbonetos em dutos produtores. **Tese de Doutorado**, 2009, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SBARDELOTTO, G., BAGIO, M. A., BOSTELMANN, P., Medição de Velocidade por Ultrassom Doppler, **Trabalho de Conclusão de Curso**, Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SINGH, P., VENKATESAN, R., FOGLER, H. S., Formation and Aging of Incipient Thin Film Wax-Oil Gels. AIChE Journal, v. 46, n. 5, p. 1059-1074, **American Institute of Chemical Engineers**, 2000.

THOMAS, J. E., **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, ed. Interciência Ltda, Rio de Janeiro, 1996.

VENKATESAN, R., NAGARAJAN, N. R., Paso, K., Yi, Y. B., Sastry, A. M., Fogler, H. S., The Strength of paraffin gels formed under static and flow conditions, **Chemical Engineering Science**, v. 60, pp. 3587-3598, 2005.

WANG, L., XIE, B., ROKHLIN, S., Determination of Embedded Layer Properties Using Adaptive Time-Frequency Domain Analysis, **The Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 111, no. 6, pp. 2644–2653, 2002.

WILMSHURST, T. H., **Signal recovery from noise in electronic instrumentation**, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1990.

APÊNDICE A – ALGORITMO SUPRESSÃO DO ECO DE REFERÊNCIA

O algoritmo desenvolvido realiza o procedimento descrito na seção 4.3.

Código-fonte A.1 – Supressão do Eco de Referência

```

% Carregar Arquivos da Aquisição
file = '2015-07-22 16_42_52';
file1 = '2015-07-22 16_50_32';

% Dados da Aquisição
amostras_por_onda=5000;
numero_ondas=1000;
inicio=0;
prf=1000;
canais=1;
dados=US_lerDadosPXI(file,inicio,prf,canais,amostras_por_onda);
dados1=US_lerDadosPXI(file1,inicio,prf,canais,amostras_por_onda);

C1_16(:, :) = dados(1, :, :);
C2_16(:, :) = dados1(1, :, :);

%% Pre-processamento
% Tirar Off-set
C1 = C1_16 - mean(mean(C1_16));
C2 = C2_16 - mean(mean(C2_16));

C1_mean = 0;
C2_mean = 0;

% Média das ondas
for i=1:length(C1(:,1))
    C1_mean = double(C1(i,:)) + C1_mean;
    C2_mean = double(C2(i,:)) + C2_mean;
end

C1_mean = C1_mean/(i+1);
C2_mean = C2_mean/(i+1);

% Mudar nome da variavel
C1_edit = C1_mean(:, :);
C2_edit = C2_mean(:, :);

```

```

%% Plotar Figura para Identificar Defasagem das ondas

figure
plot(C1_edit(1,1:end)/2048);

hold on
plot(C2_edit(1,1:end)/2048,'k');
fontsize=12;
title('Sinal Ultrassom','FontSize', fontsize);
legend('Com parafina','Sem parafina','FontSize', fontsize);
xlabel('Amostras','FontSize', fontsize)
ylabel('Amplitude [V]','FontSize', fontsize)
grid

%% Compensação da Defasagem
X=30; % Atrasar onda da Referencia
Y=0; % Atrasar onda com parafina
figure
hold on

% Liminação da Janela
start=1750;
final=start+170;

% Grafico Normalizado
plot(C1_edit(1,start+X:final+X)'/max(C1_edit(1,start+X:final+X))','b')
plot(C2_edit(1,start+Y:final+Y)'/max(C2_edit(1,start+Y:final+Y))','k')

title('Sinal Ultrassom Defasagem Compensada');
legend('Com parafina','Sem parafina');
xlabel('Amostras')
ylabel('Amplitude');
grid

%% Transformada de Hilbert

C1_H = hilbert(C1_edit);
C2_H = hilbert(C2_edit);

AAA=abs(C1_H);
BBB=abs(C2_H);

% Filtro para suavizar envoltória
Wn = [0.01 0.10];
N = 25;
b = fir1(N,Wn);
AAA = filter(b,1,double(AAA));
BBB = filter(b,1,double(BBB));

```

```
figure
plot(AAA(1:end), 'b');
hold on
plot(BBB(1:end), 'k');

%% Calculo da Diferença
AI = AAA(start+X:final+X);
AI = AI/max(AI);
BI = BBB(start+Y:final+Y);
BI = BI/max(BI);

% Transformação em decibel
AI = 20*log(AI);
BI = 20*log(BI);

% Offset para melhorar visualização
AI = 100+AI;
BI = 100+BI;

plot(AI(1:end), 'r');
hold on
plot(BI(1:end), 'k');
grid

Diff = AI - BI;
plot(Diff);

title('Resultado do Método');
legend('Com parafina', 'Sem parafina', 'Diferença');
xlabel('Amostras')
ylabel('Amplitude');
```