

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DE FILME LUBRIFICANTE ATRAVÉS DE
SENSORES PIEZOELÉTRICOS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

ALVARO SANTOS PIOVESAN

RIO GRANDE, RS

2021

ALVARO SANTOS PIOVESAN

**AVALIAÇÃO DE ESPESSURA DE FILME LUBRIFICANTE ATRAVÉS DE
SENSORES POR ULTRASSOM**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Simulação e controle de processos de fabricação.

Orientador: Prof. PhD. Henara Lillian Costa Murray

RIO GRANDE, RS

2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Henara Lillian Costa Murray, PhD.
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande - FURG

Prof. Tiago Cousseau, Dr.
Departamento Acadêmico de Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Prof. João Henrique Corrêa de Souza, Dr.
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande - FURG

*Dedico este trabalho à minha família, por todo o
apoio e amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Tadeu e Avany, por todo o incentivo, carinho e confiança que sempre depositaram em mim, além de todo o suporte necessário para concluir esse trabalho.

Aos meus irmãos, Alencar e Tatiana, por sempre estarem disponíveis para compartilhar as alegrias e aflições enfrentadas diariamente.

Aos meus sobrinhos, Clarissa, Luís Antônio e Martín, pelos abraços apertados toda vez que chegava de viagem.

À minha namorada, Ariane, por ser tão paciente, principalmente nessa reta final, onde os dias têm durado muito mais do que 24 horas.

Ao AC²T (Centro Austríaco de Excelência em Tribologia), por fomentar este trabalho, através do projeto *COMET INTRIBOLOGY*, FFG-No. 872176, coordenado pelo AC²T *research GmbH*, na Áustria, fornecendo sensores e placas de aço inox, indispensáveis para a execução dos testes práticos.

Ao doutor Michele Schirru, do AC²T, pela atenção, disponibilidade e por todos os conhecimentos que sempre foram compartilhados de forma muito clara e objetiva. Obrigado por acreditar e possibilitar que esse trabalho pudesse ser concluído com qualidade.

À minha orientadora, professora, PhD, Henara L. Costa Murray, pela oportunidade, confiança, amizade e prontidão em sanar todas as dificuldades que surgiram durante o desenvolvimento dessa pesquisa e, principalmente, por sempre me instigar na busca pelo conhecimento, contribuindo para meu crescimento pessoal.

Ao professor, Dr., Jorge Braz, pelas conversas, pelo incentivo e a amizade.

Aos demais professores do PPMec, pela amizade e respeito.

Aos colegas e amigos, que contribuíram direta ou indiretamente, em especial aos amigos Hektor Borges, Leonardo Dias e Welinton Breitenbach, que mesmo sem ter um amplo conhecimento sobre o assunto deste trabalho, sempre dedicaram um tempo para discutir sobre as dúvidas que surgiram ao longo dessa pesquisa e contribuíram com suas habilidades.

RESUMO

O contato entre superfícies constituintes de sistemas e componentes mecânicos é, na maioria das vezes, inevitável e fundamental para o seu correto funcionamento. Muitos desses conjuntos trabalham sob condições extremas e o controle da distância entre as asperezas das superfícies de contato se faz necessário. Como forma de reduzir o desgaste excessivo e evitar danos prematuros, sem que haja o comprometimento da condição de deslizamento entre as superfícies de contato, o emprego de lubrificantes se mostra uma ferramenta muito eficaz. O controle da camada de lubrificante, formada entre essas superfícies, é tão importante quanto desafiador, pois, definir ferramentas e métodos de inspeção capazes de determinar espessuras tão pequenas não é algo trivial. A utilização de técnicas envolvendo ultrassom e sensores piezoelétricos tem se mostrado muito promissora e eficaz no que diz respeito à medição de espessuras tão finas quanto a camada de filme lubrificante formada entre as superfícies de contato dos sistemas mecânicos. Como forma de investigar a capacidade de medição de sistemas envolvendo técnicas de ultrassom, este estudo apresenta uma configuração, baseada nos critérios descritos na norma ASTM E – 1065, para a determinação da espessura de filme lubrificante presente entre duas superfícies estacionárias. Duas placas de aço inox martensítico 1.4313 foram utilizadas para compor as superfícies sólidas de um sistema de três camadas, juntamente com o óleo lubrificante PAO (polialfaolefina) ExxonMobil Spectrasyn 4. Dois sensores piezoelétricos de Niobato de Lítio (LiNbO_3), responsáveis pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas, foram fixados na superfície da placa superior, enquanto que na placa inferior foram coladas duas fitas metálicas, com espessura de 10 μm , a fim de criar a região de acomodação do lubrificante. A confecção das placas e a montagem dos sensores foram realizadas no AC²T (Centro Austríaco de Excelência em Tribologia), na Áustria, e enviadas para a execução dos ensaios. Para a emissão dos sinais, responsáveis pela excitação dos sensores, um gerador de funções arbitrárias foi utilizado. A coleta dos sinais, bem como a exportação das informações dos ensaios, para posterior análise, foram feitas através de um osciloscópio digital e de uma interface escrita em Labview. Espessuras entre 10 μm e 17,5 μm foram encontradas para as frequências dentro da largura de banda do sensor piezoelétrico, evidenciando uma ótima concordância com a espessura de referência utilizada.

Palavras-chave: Medição de espessura de filme; tribologia; sensores piezoelétricos; coeficiente de reflexão; modelo de mola.

ABSTRACT

The contact between constituent surfaces of systems and mechanical components is almost always inevitable and fundamental for its proper functioning. Many of these assemblies work under extreme conditions and control of the distance between contact surface roughness is necessary. As a way to reduce excessive wear and prevent premature damage, without compromising the sliding condition between contact surfaces, the use of lubricants is a very effective tool. The control of the lubricant layer, formed between these surfaces, is as important as challenging, because defining tools and inspection methods capable of determining such small thicknesses is not something trivial. The use of techniques involving ultrasound and piezoelectric sensors has proved very promising and effective in measuring thicknesses as thin as the lubricating film layer formed between the contact surfaces of mechanical systems. To investigate the measurement capability of systems involving ultrasound techniques, this study presents a configuration, based on the criteria described in ASTM E - 1065, for the determination of the lubricating film thickness between two stationary surfaces. Two 1.4313 martensitic stainless steel plates together with the PAO (polyalphaolefin) Exxonmobil Spectrasyn 4 lubricating oil, were used to compose the surfaces of a three-layer system, two piezoelectric Lithium niobate sensors (Linbo3), responsible for the emission and reception of ultrasonic waves, were fixed on the surface of the upper plate, while on the lower plate were glued two metallic tapes, with a thickness of 10 μm , in order to create a channel for accommodation of the lubricant. The manufacturing and assembling of the plates and sensors were carried out in AC²T (Austrian Center of Excellence in Tribology). For the emission of the signals responsible for sensor excitation, an arbitrary function generator was used. Signal acquisition and analysis were carried out using a digital oscilloscope and a Labview interface. Thicknesses between 10 μm and 17.5 μm were found for frequencies within the bandwidth of the piezoelectric sensor, showing an excellent agreement with the reference thickness used.

Keywords: Film thickness measurement; tribology; piezoelectric sensors; coefficient of reflection; spring model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REFLEXÕES ULTRASSÔNICAS CONSECUTIVAS PARA UM MEIO DE TRÊS CAMADAS.	8
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE MOLA.	10
FIGURA 3 - TRANSDUTORES USADOS EM ESTUDOS DE INTERFACES TRIBOLÓGICAS, SENDO: (A) CONTATO LONGITUDINAL, (B) CISLHAMENTO E (C) FOCO LONGITUDINAL.	13
FIGURA 4 – CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA MEDIR A ESPESSURA DE UMA GOTTA DE ÓLEO.....	14
FIGURA 5 – REFLEXÕES DA ESPESSURA DE FILME OBTIDOS ENTRE DUAS PLACAS DE VIDRO DADOS NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	15
FIGURA 6 - REFLEXÕES DA ESPESSURA DE FILME OBTIDOS ENTRE DUAS PLACAS DE VIDRO DADOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.	16
FIGURA 7 - ESPECTRO DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO.....	16
FIGURA 8 - ESPESSURA DO FILME DE ÓLEO OBTIDO A PARTIR DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO.....	17
FIGURA 9 – CONFIGURAÇÃO EM FORMA DE CUNHA PARA MEDIÇÃO DE ESPESSURAS DE FILME.....	18
FIGURA 10 – ESPECTROS DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA DIVERSAS CAMADAS DE FILME MEDIDAS, UTILIZANDO TRANSDUTOR DE 10MHZ.....	19
FIGURA 11 – ESPECTROS DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA DIVERSAS CAMADAS DE FILME MEDIDAS, UTILIZANDO TRANSDUTOR DE 25MHZ.....	19
FIGURA 12 – VALORES DE ESPESSURA OBTIDOS ATRAVÉS DA CONVERSÃO DOS ESPECTROS DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO.....	20
FIGURA 13 - SENSOR PIEZOELÉTRICO COLADO NA SUPERFÍCIE INTERNA DE UM ANEL DE ROLAMENTO.....	21
FIGURA 14 - SENSOR PIEZOELÉTRICO DO ANEL DE ROLAMENTO AO PASSAR PELO ROLO.	21
FIGURA 15 - TÍPICO SISTEMA PARA GERAÇÃO E MEDIÇÃO DE ONDAS DE ULTRASSOM.	22
FIGURA 16 - ONDA REFLETIDA EM: (A) CONTATO PERFEITO E (B) CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES RUGOSAS. ..	24
FIGURA 17 - SENSORES PIEZOELÉTRICOS MONTADOS EM ROLO DE LAMINAÇÃO A FRIO.	25
FIGURA 18 – ADAPTAÇÃO DE SENSORES PIEZOELÉTRICOS EM UM CONECTOR METÁLICO: (A) DETALHE DOS SENSORES E (B) CONECTOR METÁLICO.....	25
FIGURA 19 – REGIME DE LUBRIFICAÇÃO DE MODO MISTO PRESENTE NA INTERFACE DO ROLO DE LAMINAÇÃO E DA CHAPA.	26
FIGURA 20 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO LONGITUDINAL E ESPECTRO DE FREQUÊNCIA.	28
FIGURA 21 – RIGIDEZ LONGITUDINAL, DE CISLHAMENTO E DO FLUIDO, NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.	28
FIGURA 22 – ORGANIZAÇÃO DAS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS.....	30
FIGURA 23 – ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS.....	31
FIGURA 24 – PLACAS DE AÇO INOX: (A) PLACA SUPERIOR E PLACA INFERIOR (B).....	33
FIGURA 25 – APARATO PARA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM EM MEIOS LÍQUIDOS.....	36
FIGURA 26 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE O CAMINHO PERCORRIDO PELA ONDA SONORA E A PROFUNDIDADE DO TUBO.....	37
FIGURA 27 – COMPORTAMENTO DA ONDA ULTRASSÔNICA INCIDENTE EM UM SISTEMA DE TRÊS CAMADAS AÇO- ÓLEO-AÇO.	39
FIGURA 28 – CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE ESPESSURA DE FILME.....	40

FIGURA 29 – MEDIÇÃO DO SINAL DE REFERÊNCIA.....	41
FIGURA 30 – MEDIÇÃO DO SINAL NA CAMADA DE LUBRIFICANTE.....	43
FIGURA 31 – MAGNITUDE DO PULSO DE REFERÊNCIA E SINAL MEDIDO NA CAMADA DE LUBRIFICANTE.....	45
FIGURA 32 – FFT DOS SINAIS MEDIDOS.	46
FIGURA 33 – DEFINIÇÃO DA LARGURA DE BANDA.	47
FIGURA 34 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO, R, E ESPECTRO DO SINAL DE REFERÊNCIA.	50
FIGURA 35 – ESPESSURA DE FILME LUBRIFICANTE MEDIDA COM SENSORES PIEZOELÉTRICOS.	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES DO LUBRIFICANTE.	34
TABELA 2 – PROPRIEDADES ACÚSTICAS DO LUBRIFICANTE E DO AÇO.	48
TABELA 3 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO, R, PARA LARGURA DE BANDA (-6 DB).	49

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Amplitude	[V]
A_{ref}	Amplitude de referência	[u.a.]
A_m	Amplitude medida	[u.a.]
B	Módulo de massa	[GPa]
c	Velocidade do som	[m/s]
f	Frequência	[Hz]
f_m	Frequência ressonante de modo "m"	[Hz]
h	Espessura de filme	[μm]
K	Rigidez da camada de líquida	[Rayl]
K_τ	Rigidez de cisalhamento	[Rayl]
K_σ	Rigidez normal	[Rayl]
m	Número do modo da frequência	[u.a.]
n	Número do comprimento de ondas	[u.a.]
R	Coeficiente de reflexão	[u.a.]
R_{av}	Coeficiente de reflexão da água e do vidro	[u.a.]
R_l	Coeficiente de reflexão da camada líquida	[u.a.]
T	Coeficiente de transmissão	[u.a.]
ToF	Tempo de vôo	[s]
V_{pp}	Volt pico a pico	[V]
Z	Impedância acústica	[MRayl]
ρ	Densidade	[Kg/m ³]
ω	Frequência angular da onda	[rad/s]
ASTM	<i>American Society for Testing na Materials</i>	
BNC	<i>Bayonet Neill Concelman</i>	
FFT	<i>First Fourier Transform</i>	
PAO	Polialfaolefina	
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo	
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	
VI	<i>Virtual Instrument</i>	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	OBJETIVOS	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1	INTRODUÇÃO	5
3.2	MÉTODOS PARA DETERMINAR A CAMADA DE FILME LUBRIFICANTE	5
3.2.1	MÉTODOS ULTRASSÔNICOS.....	6
3.2.1.1	MÉTODO TOF	8
3.2.1.2	MODELO DE MOLA.....	9
3.2.1.3	MÉTODO DE RESSONÂNCIA.....	11
3.3	SENSORES PIEZOELÉTRICOS	12
3.4	REVISÃO DOS MODELOS VALIDADOS.....	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	31
4.1.1	<i>Gerador de Funções Arbitrárias</i>	31
4.1.2	<i>Osciloscópio</i>	31
4.1.3	<i>Sensores Piezoelétricos</i>	31
4.1.4	<i>Placas metálicas</i>	33
4.1.5	<i>Óleo lubrificante</i>	34
4.1.6	<i>Cabo Coaxial</i>	34
4.1.7	<i>Adesivo para a fixação dos calços metálicos</i>	35
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DOS MATERIAIS.....	35
4.2.1	<i>Determinação da velocidade do som no lubrificante</i>	35
4.2.2	<i>Determinação da velocidade do som nas placas de aço inox</i>	37
4.3	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO	38
4.4	MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE LUBRIFICANTE.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6	CONCLUSÕES	53
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos sistemas e componentes mecânicos atuam de tal forma que a ocorrência do contato entre superfícies seja praticamente inevitável. Em geral, essa interação entre as partes constituintes de um sistema é justamente o que caracteriza seu funcionamento e suas aplicações. No entanto, esse contato superficial, que ocorre em pequenas regiões também chamadas de asperezas, precisa se dar de maneira controlada, a fim de se evitar desgastes excessivos e/ou deformações indesejadas.

Um das principais formas de se amenizar os efeitos negativos que a presença do contato superficial pode gerar nos componentes mecânicos é fazendo-se a utilização de lubrificantes entre as superfícies em contato. Por possuir uma menor resistência ao cisalhamento, em relação ao contato entre as superfícies, a camada de lubrificante pode atuar de forma a separá-las parcialmente ou, até mesmo, de forma que contato direto entre as asperezas de uma superfície com a outra seja inexistente. Com isso, ocorre uma redução no atrito e nas taxas de desgaste das superfícies deslizantes. Em alguns casos, o emprego de uma camada de filme lubrificante não implica em uma separação total das interfaces, porém, a existência de uma fina película é capaz de fornecer menor resistência ao cisalhamento, fazendo com que componentes que encontrem-se em movimento relativo possam trabalhar de maneira menos restritiva (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A investigação sobre o comportamento do contato entre as superfícies de componentes mecânicos apresenta grande interesse por parte da indústria, visto que os efeitos devido ao desgaste produzido pelo movimento de deslizamento entre duas superfícies promovem perdas progressivas de material. O correto funcionamento de alguns componentes e equipamentos mecânicos está intimamente ligado à eficácia da camada de lubrificante, sendo que essa depende de três fatores principais: as propriedades do lubrificante, a geometria das superfícies de contato e as condições de operação às quais está submetida (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003).

O controle da lubrificação de um sistema mecânico torna-se fundamental tanto para sua eficiência quanto para a durabilidade de seus componentes. Através do monitoramento da camada de filme lubrificante é possível prever e evitar falhas ou perdas permanentes, além de prolongar o tempo de vida útil dos componentes. Apesar da relevância desse controle, uma das principais dificuldades para o

monitoramento em tempo real da camada de filme lubrificante é a complexidade em desenvolver sistemas não invasivos que possam ser aplicados diretamente aos componentes mecânicos (SPIKES, 2003).

Mesmo para os sistemas mais robustos, geralmente as regiões críticas, onde um monitoramento seria extremamente relevante, não podem ser acessadas facilmente. Em alguns casos, as regiões mais expostas a situações de desgaste apresentam espessuras da camada de lubrificante extremamente baixas, podendo resultar em situações onde o contato das duas superfícies ocorra de maneira severa, favorecendo o desgaste excessivo (SHEU; WILSON, 1994).

Através dos métodos de medição convencionais, a determinação de espessuras de filme lubrificante não é possível devido aos baixos valores de espessura considerados para esses fluidos. A medição de espessura de filme através de métodos óticos (UEDA; SPIKES; KADIRIC, 2019) e elétricos (COSTA; HUTCHINGS, 2007) é bastante difundida e, em ambos os casos, apresenta uma boa resposta para a obtenção dos valores investigados. Porém, esses métodos apresentam limitações quando se faz necessária a aplicação fora do ambiente laboratorial. Contudo, a utilização de técnicas de ultrassom, para obter valores de espessuras tão pequenos, tem se mostrado uma técnica bastante promissora (DWYER-JOYCE, 2005).

Por se tratar de um método não invasivo muito versátil (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003; HARPER; DWYER-JOYCE; SJÖDIN; OLOFSSON, 2005), além da possibilidade de aplicação em locais de acesso remoto (HUNTER, 2018; HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017), impossível através dos métodos ótico ou elétrico, o desenvolvimento e investigação sobre as técnicas de medição de espessura de filme através de sensores ultrassônicos apresenta grande relevância.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi determinar a espessura da camada de filme lubrificante, formada entre duas superfícies estacionárias, através de um método envolvendo sensores piezoelétricos e ondas ultrassônicas. Para tal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir os equipamentos para emissão e recepção das ondas ultrassônicas de alta frequência;
- Desenvolver um modelo experimental capaz de medir a espessura de filme lubrificante em um sistema de três camadas, do tipo aço-óleo-aço;
- Determinar o coeficiente de reflexão do sinal ultrassônico aplicado em um sistema de três camadas;
- Medir a espessura do filme lubrificante presente entre duas superfícies estacionárias.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Introdução

A utilização de técnicas de ultrassom já é bastante difundida e com ampla aplicação para análise de defeitos e falhas. Em muitos casos, a utilização desse método não implica em uma interrupção das atividades do componente que está sendo avaliado, como por exemplo nos casos da investigação de perdas de espessura por corrosão e análise do crescimento de trincas (HANDBOOK, 1992). A versatilidade dos métodos ultrassônicos é uma das grandes razões para que cada vez mais estudos sejam feitos a respeito da sua utilização em âmbito industrial.

Recentemente, alguns pesquisadores têm usado técnicas de ultrassom para medir a espessura de filme lubrificante entre duas superfícies. Sua utilização tem se mostrado muito promissora no que diz respeito à determinação de medidas tão pequenas, como no caso da camada de filme lubrificante presente entre as superfícies de alguns componentes mecânicos. Porém, quando se buscam informações do comportamento de um lubrificante operando em condições de regime misto ou elastohidrodinâmico, a obtenção dos valores de espessura do filme não é algo trivial. Isso ocorre porque as dimensões dos contatos e a espessura da camada de filme são muito pequenas quando comparados com as dimensões dos componentes em contato. A maioria dos estudos realizados são baseados no princípio da reflexão de ondas ultrassônicas através de uma camada de fluido localizada entre dois corpos sólidos. Uma das grandes vantagens de se utilizar métodos de medição por ultrassom é que eles são métodos não invasivos e podem ser aplicados para a obtenção de resultados em tempo real, sem que haja a necessidade de paradas ou interferências no processo produtivo (DWYER-JOYCE, 2005; DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003).

3.2 Métodos para determinar a camada de filme lubrificante

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas descritas pela vibração das partículas atômicas ou moleculares de uma substância sobre as suas posições de equilíbrio. Sua propagação pode se dar em um meio sólido, líquido ou gasoso, sendo que o comportamento da onda estará diretamente relacionado ao tipo de material pelo qual ela irá se propagar. Essa dependência em relação às propriedades do material se dá pela ocorrência de diferentes espaçamentos e arranjos interatômicos, característicos de cada meio. Isso faz com que ocorram diferentes forças de atração

entre as partículas e o comportamento elástico dos materiais (HANDBOOK, 1992). Sendo assim, conhecer as características e a composição dos materiais analisados é um fator determinante para se obter resultados confiáveis.

As técnicas de medição de espessura de filme mais difundidas podem ser divididas entre duas principais categorias: métodos elétricos (ALLISTON-GREINER; GREENWOOD; CAMERON, 1987; COSTA; HUTCHINGS, 2007; CROOK A. W. , 1958) e métodos óticos (GUANGTENG; CANN; OLVER; SPIKES, 2000; GUNSEL; SPIKES; ADERIN, 1993; JOHNSTON; WAYTE; SPIKES, 1991). Apesar de ambos os métodos se mostrarem eficazes, tanto a medição pelo método elétrico quanto pelo método ótico apresentam limitações. No caso dos métodos elétricos, pode haver a necessidade do isolamento dos elementos de contato. Já para a utilização de métodos óticos, faz-se necessária a utilização de elementos de contato que sejam transparentes, o que dificulta uma aplicação fora do ambiente de laboratorial (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003). Em contrapartida, a técnica de medição de espessura de filme lubrificante por ultrassom não apresenta nenhuma das limitações presentes nos modelos elétricos e óticos. Além disso, tem se mostrado uma técnica muito promissora, principalmente pela sua versatilidade e capacidade de medição.

3.2.1 Métodos ultrassônicos

Como já foi comentado, as ondas ultrassônicas podem se propagar em diferentes meios devido à excitação e ao deslocamento de partículas desse meio onde elas incidem. Geralmente, essa excitação é feita através de um elemento piezoelétrico, capaz de produzir ondas sonoras em decorrência de um pulso de tensão que a ele é fornecido. Caso o elemento piezoelétrico esteja acoplado a um material sólido, um deslocamento mecânico é propagado através desse material (DWYER-JOYCE, 2005).

Quando a onda de ultrassom atravessa um material sólido, terá parte de sua energia refletida ao encontrar uma fina camada de fluido. A parte da onda que é retornada carrega muitas informações sobre a camada do lubrificante. Dessa forma, a espessura dessa camada pode ser obtida em função do coeficiente de reflexão da onda refletida, associado às propriedades acústicas dos materiais (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003; KAI; QINGFENG; WEI; JUNNING *et al.*, 2015). Ao analisar superfícies em contato, observa-se que as ondas propagadas através dessas

superfícies apresentam comportamentos distintos de acordo com o tipo de contato presente na interface dos materiais.

Ao incidir na interface de dois materiais, com diferentes propriedades acústicas e idealmente em contato, uma onda ultrassônica tem uma parte de sua energia refletida e outra parte transmitida através dos materiais. A parte da energia refletida pode ser obtida através do coeficiente de reflexão, R , dado pela Equação (1) (HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012).

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

Na Equação (1), Z representa a impedância acústica dos materiais, dada pelo produto da densidade e pela velocidade do som. A parte da energia da onda transmitida é dada pelo coeficiente de transmissão, T , dado pela Equação (2).

$$T = 1 - R \quad (2)$$

A impedância acústica dos materiais é um fator fundamental a ser levado em consideração quando as informações que estão sendo buscadas são obtidas em função do coeficiente de reflexão e da interação que ocorre entre a onda sonora e a camada de filme lubrificante. Segundo SCHIRRU (2017), essa propriedade do material define quão bem uma onda sonora irá se propagar através do mesmo, sendo esse comportamento definido pela razão entre a pressão acústica, à qual os átomos que interagem com a onda sonora são submetidos, e a velocidade de deslocamento da partícula.

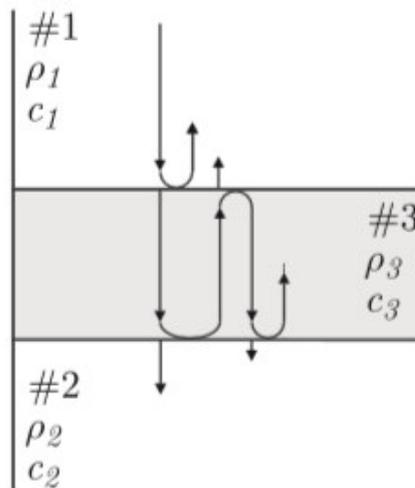
A quantidade da onda que será refletida, ao atingir o limite entre dois meios, é determinada pela impedância acústica dos dois materiais em ambos os lados do limite. Quanto maior for a disparidade entre os valores dessas impedâncias, maior será a quantidade da onda refletida. Nos casos onde essa diferença é muito grande, a reflexão da onda sonora ocorre quase que em sua totalidade e, dessa forma, poucas informações sobre a camada de lubrificante podem ser extraídas. A esse fenômeno é dado o nome de incompatibilidade acústica (HANDBOOK, 1992; SCHIRRU, 2017).

Dentre as técnicas utilizadas para a determinação da espessura de filme, baseadas no princípio da propagação das ondas ultrassônicas, três métodos ganham destaque por apresentarem boa resposta ao comportamento da camada de fluido. Esses métodos são conhecidos como: ToF (*Time of Flight*), modelo de mola e método de ressonância.

3.2.1.1 Método ToF

Considerando que a camada de filme lubrificante entre duas superfícies seja suficiente espessa, ou seja, na ordem de alguns milímetros, sua medição pode facilmente ser obtida pelo tempo de reflexão das ondas entre a superfície superior e inferior. Esse método conhecido como ToF (*Time of Flight*), ou tempo de voo, leva em consideração a velocidade de propagação do som no fluido lubrificante. O comportamento de uma onda ultrassônica, em um típico sistema de três camadas, cuja espessura de filme é grande o suficiente para garantir o afastamento completo entre duas superfícies, ou seja, sem contato entre ambas, pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Reflexões ultrassônicas consecutivas para um meio de três camadas.



Fonte: Adaptado de CARRETTA *et al.*, 2018.

Na Figura 1, ρ diz respeito à densidade do meio, c representa a velocidade do som através do material e os subíndices representam cada um dos três diferentes meios constituintes do sistema. Nesse tipo de sistema, parte da onda ultrassônica é refletida em cada interface, enquanto a parte restante do sinal atravessa a interface. O valor da espessura de filme, h , pode ser calculado pelo método ToF através da Equação (3).

$$h = \frac{(ToF)c}{2} \quad (3)$$

Para que o método ToF possa ser aplicado, a distância de propagação do pulso ultrassônico deve ser maior que sua largura. Dessa forma, a espessura mínima do filme detectável por esse método é dada pela Equação (4) (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003).

$$h > \frac{nc}{2f} \quad (4)$$

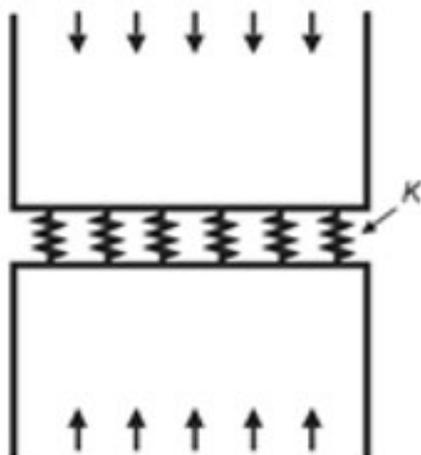
Na Equação (4), n representa o número de comprimentos de onda no pulso ultrassônico, normalmente em torno de três, c representa a velocidade do som através do fluido e f refere-se à frequência do pulso. Apesar de ser uma técnica simples, ela não possui muita aplicação para a medição de camadas em situações reais, pois, à medida em que os filmes tornam-se mais finos, o método ToF torna-se impreciso. Dessa forma, se faz necessária a utilização de métodos alternativos a fim de se obter informações confiáveis sobre a camada que está sendo analisada (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003).

Além do método ToF, outras duas abordagens são utilizadas para realizar medições de espessura de filme através das técnicas de ultrassom, sendo que essas são mais indicadas para a medição de espessuras mais finas. A primeira técnica está baseada na amplitude do pulso que é refletido, comumente ela é chamada de modelo de mola. Já a segunda abordagem toma como base a utilização da frequência ressonante da camada de filme, sendo conhecida como método de ressonância de filme (ZHANG; DRINKWATER; DWYER-JOYCE, 2005). Nos casos onde o comprimento da onda ultrassônica é grande em comparação com a espessura do filme de lubrificante, a utilização da frequência para medir a espessura da camada de filme não se torna prática. Nesse caso, melhores resultados seriam obtidos com o modelo de mola. A escolha entre um ou outro método de avaliação pode ser feita de acordo com a espessura do filme e a frequência central do transdutor (JINGPIN; QIANG; BIN; CUNFU, 2008).

3.2.1.2 Modelo de mola

O modelo de mola pode ser utilizado para descrever o comportamento de uma típica interface de três camadas, aço-óleo-aço, onde a camada entre as duas superfícies de aço é uma película muito fina de óleo, que, geralmente, apresenta valores abaixo de 10 μm . Para esse modelo, considera-se que a camada de filme lubrificante atue como uma espécie de mola, onde o comportamento reflexivo das ondas sonoras que atuam sobre ela seria dependente da rigidez, K , dessa camada. Segundo (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003), através da determinação do coeficiente de reflexão, bem como da rigidez da interface, informações sobre o grau de conformidade das superfícies de contato podem ser observadas. Uma representação esquemática do modelo de mola pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do modelo de mola.



Fonte: Adaptado de DWEYER-JOYCE *et al.*, 2005.

A interação do ultrassom com uma camada muito fina fornece uma primeira frequência de ressonância muito alta. Dessa forma, pode se dizer que o comportamento da onda será governado pela rigidez, K , dessa camada. Então, a amplitude do sinal refletido pode ser medida e interpretada pelo modelo de mola (DWEYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003). A rigidez da camada de lubrificante depende do módulo de massa da camada, B , e da espessura da camada, h , conforme a Equação (5).

$$K = \frac{B}{h} \quad (5)$$

A interação de uma onda ultrassônica com a camada de lubrificante depende intimamente da velocidade de propagação do som nesse meio. Na Equação (6), a velocidade do som através de um líquido, c , é dada em função do módulo de massa, B , e da densidade do líquido, ρ .

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (6)$$

Combinando a Equação (5) com a Equação (6), a rigidez da camada de lubrificante, em função das propriedades acústicas do fluido, é dada pela Equação (7).

$$K = \frac{\rho c^2}{h} \quad (7)$$

A rigidez calculada na Equação (7) pode então ser usada em um modelo quase estático da interação do ultrassom com a camada de lubrificante (DWEYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003). TATTERSALL (1973) sugeriu que as propriedades da interface dependem tanto das propriedades da camada do fluido

quanto das propriedades dos materiais de ambos os lados. Essa relação é dada pelo coeficiente de reflexão da camada líquida, R , que pode ser obtido através da Equação (8).

$$R = \frac{z_1 - z_2 + i\omega(Z_1 Z_2 / K)}{z_1 + z_2 + i\omega(Z_1 Z_2 / K)} \quad (8)$$

Na Equação (8), Z_1 e Z_2 referem-se à impedância acústica dos materiais em ambos os lados da camada de lubrificante e ω refere-se à frequência angular da onda. Considerando que os materiais dos dois lados do lubrificante sejam iguais ($Z_1 = Z_2 = Z'$), a Equação (8) pode ser simplificada para a Equação (9) (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003).

$$R = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K}{\pi f z'}\right)^2}} \quad (9)$$

Finalmente, combinando as Equações (7) e (9) pode se relacionar a espessura da camada de filme, h , com o coeficiente de reflexão, R , através da Equação (10).

$$h = \frac{\rho c^2}{\pi f z'} \left(\frac{R^2}{1 - R^2} \right) \quad (10)$$

Observando-se a Equação (10) é possível notar que, à medida que os valores do coeficiente de reflexão se aproximam de 1, os valores da espessura do filme tenderão ao infinito, o que demonstra uma perda de precisão do modelo de mola nesses casos (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003). Contudo, DRINKWATER; DWYER-JOYCE e CAWLEY (1996), em um estudo da rigidez no contato seco entre duas amostras de alumínio, observaram que, para fins práticos, valores de $R < 0,9$ apresentam resultados satisfatórios.

3.2.1.3 Método de ressonância

Assim como no modelo de mola, o coeficiente de reflexão é quem governa o comportamento da camada de lubrificante de um sistema de três camadas. Nessa abordagem, espessura h do lubrificante é relacionada com a frequência de ressonância da onda incidente, juntamente com a velocidade da onda no meio líquido. Essa frequência de ressonância refere-se às regiões onde o coeficiente de reflexão R apresenta mínimos periódicos, sendo que cada um destes mínimos ocorre em um número definido como a metade do comprimento de onda (HUNTER; DWYER-

JOYCE; HARPER, 2012). Segundo BANKS; OLDFIELD e RAWDING (1962) *apud* HUNTER (2018) a espessura de filme dada em relação à frequência de ressonância pode ser obtida pela Equação (11).

$$h = \frac{cm}{2f_m} \quad (11)$$

Na Equação (11), c representa a velocidade do som na camada de lubrificante, m diz respeito ao número do modo da frequência ressonante e f_m é a frequência de ressonância do modo m . Geralmente o primeiro modo corresponde a um valor de m igual a 1, devido a apresentar o menor valor em frequência, o que facilita o cálculo.

Através do modelo ressonante é possível determinar a espessura da camada de filme através da ressonância do eco entre as interfaces do filme, sendo que a resolução dessa camada pode ser identificada pela frequência contida na região da largura de banda do pulso ultrassônico. Esse modelo mostra-se mais adequado quando se pretende determinar espessuras acima de 10 μm , isso porquê, numa faixa superior a essa espessura, são identificados vários pontos mínimos de frequência. Dessa forma é possível determinar a espessura da camada de filme entre um intervalo Δf_m entre dois mínimos de frequência (HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012; OUYANG; ZHOU; JIN; YAN *et al.*, 2020). A relação entre a espessura de filme e o intervalo entre os mínimos de frequência é dada pela Equação (12).

$$h = \frac{c}{2\Delta f_m} \quad (12)$$

A Equação (12) é muito similar à Equação (11), ficando como critério de utilização, entre uma ou outra, a quantidade de pontos mínimos de frequência dentro da largura de banda do sinal refletido (OUYANG; ZHOU; JIN; YAN *et al.*, 2020). De modo geral, tanto o modelo de mola quanto o método de ressonância apresentam uma precisão satisfatória para a determinação de espessura de filme. A escolha entre um ou outro método deve ser feito com base na faixa de valores de espessuras que deseja ser investigada.

3.3 Sensores piezoelétricos

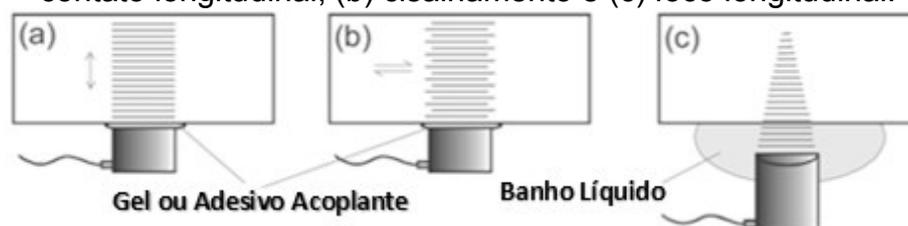
De modo geral, a principal característica dos materiais piezoelétricos é a sua capacidade de converter estímulos mecânicos, que a eles foram aplicados, em uma carga elétrica correspondente a tais estímulos, bem como o inverso desse

processo (KATSOURAS; ASADI; LI; VAN DRIEL *et al.*, 2016). Quando empregados junto a um sistema de inspeção, com capacidade de fornecer os estímulos necessários para que atuem em seu funcionamento pleno, podem fornecer informações de grande complexidade em relação aos materiais ou sistemas sob investigação. Sua grande utilização como fontes emissoras e receptoras das ondas sonoras, em equipamentos ultrassônicos, é justificada pelo fato de que quando uma onda sonora atravessa um material ou um sistema constituído por diversos elementos, carrega consigo diversas informações sobre o caminho por ela percorrido. Essas informações podem se manifestar em diferentes aspectos da onda, como por exemplo amplitude, frequência ou velocidade de propagação. Dessa forma, se o sistema de inspeção, utilizado na excitação dos elementos piezoelétricos, for capaz de captar e extrair as informações da onda retornada, poderá relacioná-las ao meio analisado (HUNTER, 2018).

Outra justificativa para a grande utilização de elementos piezoelétricos, em conjunto a equipamentos ultrassônicos, se dá principalmente pela sua versatilidade, baixa complexidade e custo reduzido. Além disso, podem ser utilizados em sua forma mais simples, de maneira que podem ser fixados diretamente na superfície dos materiais analisados. A possibilidade de conferir geometrias diversas aos elementos piezoelétricos favorece sua aplicação em áreas remotas sem que haja uma interferência no funcionamento do sistema investigado (SCHIRRU, 2017).

DWYER-JOYCE (2005) apresentou três principais tipos de transdutores aplicados em estudos tribológicos, sendo possível visualizá-los na Figura 3. Na Figura 3 (a) é mostrado um transdutor longitudinal, caracterizado pela geração de ondas que apresentam a sua direção de propagação paralela à direção de oscilação. Essas ondas são conhecidas como ondas longitudinais. Os transdutores longitudinais podem ser diretamente acoplados na amostra, utilizando um adesivo ou gel, ou, ainda, podem ser colados a uma lente de foco e usados imersos em um banho líquido, como é o caso do transdutor de foco longitudinal, mostrado na Figura 3 (c).

Figura 3 - Transdutores usados em estudos de interfaces tribológicas, sendo: (a) contato longitudinal, (b) cisalhamento e (c) foco longitudinal.



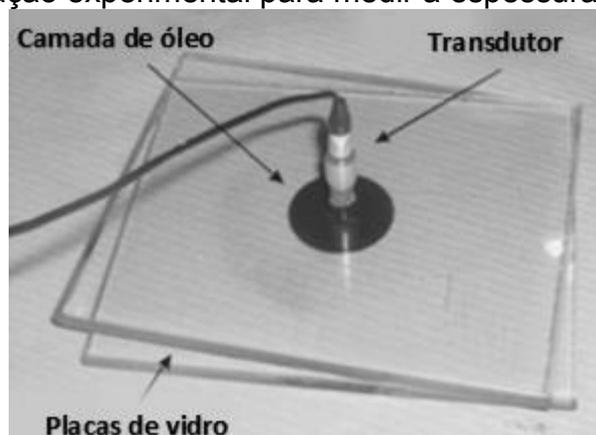
Fonte: DWYER-JOYCE, 2005.

O transdutor de cisalhamento, mostrado na Figura 3 (b), tem como característica a geração de ondas que apresentam uma vibração transversal à sua direção de propagação. Como as ondas de cisalhamento não se propagam através de líquidos, sua utilização nos estudos de medição de filmes líquidos não é considerada.

3.4 Revisão dos modelos validados

Uma grande dificuldade encontrada ao se fazer medições de espessuras muito finas, utilizando os métodos ultrassônicos, é produzir espessuras de referência nessa magnitude. Isso ocorre porque a validação da técnica utilizada está intimamente ligada com a sua capacidade em determinar, com precisão, espessuras previamente conhecidas. HUNTER; DWYER-JOYCE e HARPER (2012) realizaram quatro diferentes experimentos para medir a espessura de filme de óleo através de métodos ultrassônicos, utilizando o modelo de mola e técnicas de ressonância de filmes. Uma das formas utilizadas pelos autores para determinar valores de espessura de referência, a fim de comparar com os valores medidos pelas técnicas ultrassônicas, foi restringindo uma gota de óleo em uma região de dimensões conhecidas entre duas placas de vidro paralelas. A espessura do filme foi calculada a partir de medições do diâmetro, massa e densidade da gota de óleo. Junto à placa de vidro superior foi fixado um transdutor ultrassônico, de forma que uma comparação entre os valores de espessura de filme, obtidos através dos cálculos e os valores obtidos pelo transdutor, fosse realizada. Na Figura 4 é possível visualizar o aparato utilizado pelos autores.

Figura 4 – Configuração experimental para medir a espessura de uma gota de óleo.

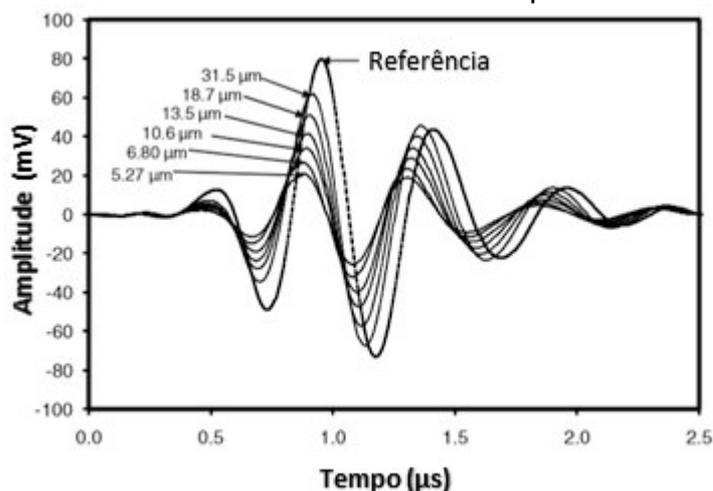


Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

Diferentes valores de espessura de filme foram registrados alterando a quantidade de óleo usada ou pressionando as placas de vidro juntas. Os valores de

espessura de filme obtidos entre as placas de vidro são apresentados na Figura 5, onde os pulsos são dados no domínio do tempo e, na Figura 6, dados em função da frequência.

Figura 5 – Reflexões da espessura de filme obtidos entre duas placas de vidro dados no domínio do tempo.



Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

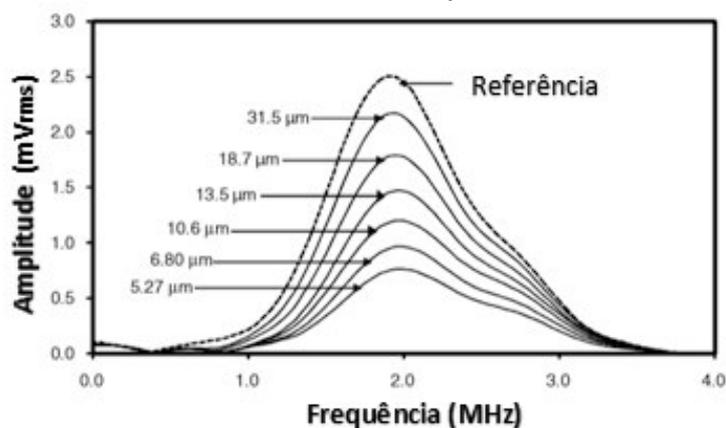
Na Figura 5 é mostrado um espectro de referência, o qual foi obtido de um pulso registrado antes de se realizar as leituras dos espectros de espessura. Esse pulso de referência foi obtido através de uma leitura realizada apenas na placa superior. Dessa forma, o pulso registrado fornece as informações referentes ao limite da interface formada entre a placa de vidro e o ar.

Quando uma onda ultrassônica atravessa um sólido e atinge o limite da interface formada com o ar ocorre uma reflexão quase que total dessa onda. Essa é uma característica desejada para o pulso de referência, pois, além de fornecer as informações sobre o pulso incidente, não será função de nenhuma propriedade do fluido. Assim, esse primeiro pulso registrado pode ser considerado como uma referência ideal para analisar o sinal atenuado pela camada de lubrificante (SCHIRRU, 2017).

Através da comparação da amplitude de uma onda refletida da interface com uma reflexão de referência ideal é possível medir o coeficiente de reflexão. Nessa reflexão de referência são considerados os efeitos de atenuação, dispersão do feixe e perdas de conversão que resultam em uma redução no sinal ultrassônico (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017). A partir dos sinais dados no domínio do tempo, mostrados na Figura 5, uma conversão para o domínio da frequência foi realizada, aplicando uma transformada rápida de Fourier. Os espectros de reflexão da espessura

do filme de óleo, convertidos para o domínio da frequência, podem ser visualizados na Figura 6.

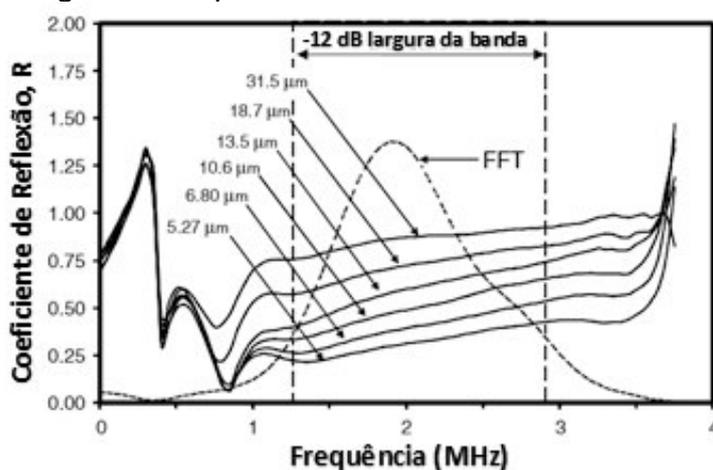
Figura 6 - Reflexões da espessura de filme obtidos entre duas placas de vidro dados no domínio da frequência.



Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

Os dados apresentados na Figura 6 são os resultados da divisão dos espectros de amplitude, de cada medição realizada, pelo espectro de amplitude do sinal de referência. A partir dessa divisão foram obtidos valores correspondentes ao coeficiente de reflexão, que é caracterizado pela razão entre a intensidade das ondas refletidas pela intensidade das ondas incidentes. Os espectros do coeficiente de reflexão obtidos, para cada uma das medições, são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Espectro do coeficiente de reflexão.



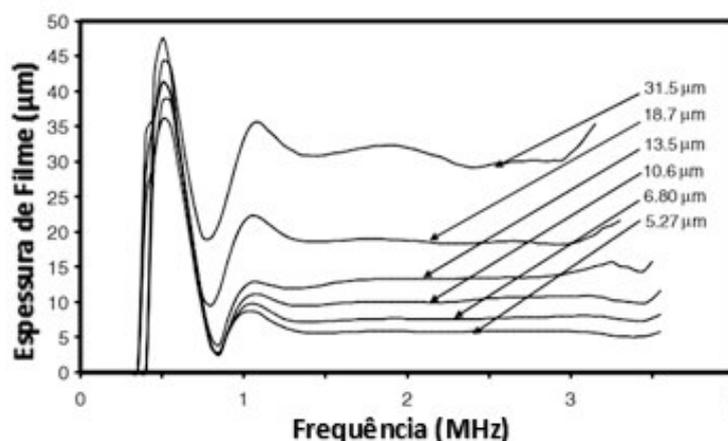
Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

A curva FFT (*First Fourier Transform*), presente na Figura 7, representa a transformada rápida de Fourier do sinal de referência e é apresentada junto aos demais espectros para indicar a região de energia útil do transdutor, entre 1,25 e 3 MHz, aproximadamente. Considera-se que as informações confiáveis a respeito da

camada de filme medida encontram-se dentro da região de energia útil do transdutor, sendo indicado desconsiderar os resultados encontrados fora dessa região (HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012).

A partir das informações de frequência e coeficiente de reflexão, apresentados na Figura 7, HUNTER; DWYER-JOYCE e HARPER (2012) utilizaram o modelo de mola para calcular os valores de espessura do filme de óleo entre as placas de vidro. Esses valores podem ser visualizados na Figura 8.

Figura 8 - Espessura do filme de óleo obtido a partir do coeficiente de reflexão.

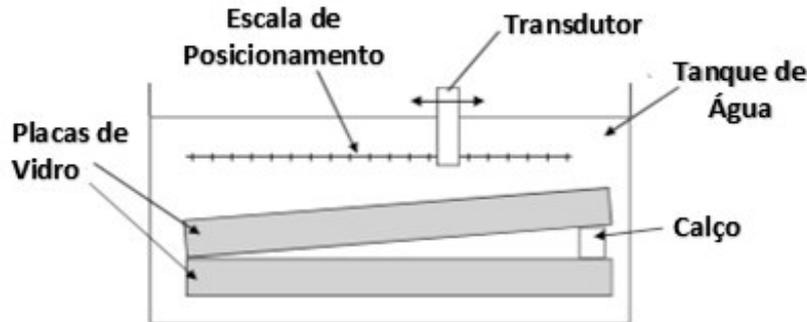


Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

É possível notar na Figura 8 que a espessura da camada de óleo não sofre variação significativa, dentro da região de energia útil, com a mudança de frequência. Isso demonstra que o modelo de mola, em função da frequência, é um modelo adequado para interpretar os dados (HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012).

Um modelo de cunha também foi utilizado por HUNTER; DWYER-JOYCE e HARPER (2012) para determinar espessuras de filme utilizando dois transdutores de foco, com bandas de frequência de 10 e 25 MHz. Nesse modelo, duas placas de vidro foram colocadas em um banho de água e, em uma das extremidades das placas, foram colocados calços com diferentes espessuras conhecidas. Assim, a geometria formada entre as placas se assemelha a uma cunha. Dessa forma, a espessura da camada de líquido em qualquer local de medição foi estimada a partir da geometria da cunha líquida formada pelo calço. Durante a execução do experimento, os transdutores ultrassônicos também foram imersos no tanque de água e montados acima da cunha líquida. Para garantir a precisão das medições, o deslocamento dos sensores, seguindo uma espécie de escala, foi controlado por meio de um computador. A configuração deste equipamento é mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Configuração em forma de cunha para medição de espessuras de filme.



Fonte: Adaptado HUNTER, *et al.*, 2012.

No modelo de cunha de HUNTER; DWYER-JOYCE e HARPER (2012), a obtenção do pulso de referência foi feita retirando-se a placa de vidro inferior e, então, o pulso refletido pela interface de água de vidro registrado. Este sinal, no domínio do tempo, foi convertido para o domínio da frequência através de uma transformada rápida de Fourier, resultando em uma amplitude de referência, $A_{ref}(f)$, que, em seguida, foi armazenada. Essa amplitude de referência é dada pela Equação (13).

$$A_{ref}(f) = I(f)R_{AV} \quad (13)$$

Na Equação (13), $I(f)$ é uma característica de resposta da frequência do pulso incidente e R_{AV} é o coeficiente de reflexão da água e do vidro, que pode ser obtido pela Equação (1). Após ter gravado o sinal de referência, a placa de fundo foi então reposicionada. Assim, as medições do pulso refletido na película de água foram registradas em vários pontos ao longo da cunha. Essas medições resultaram em valores de amplitudes, $A_m(f)$, que foram obtidos pela Equação (14).

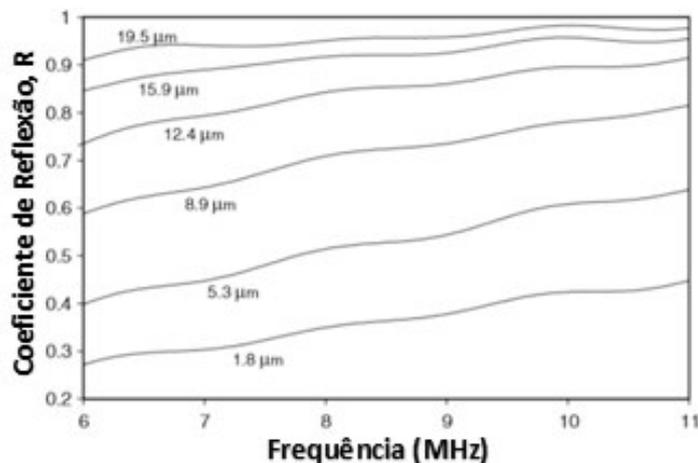
$$A_m(f) = I(f)R_l(f) \quad (14)$$

Na Equação (14), $R_l(f)$ representa o espectro do coeficiente de reflexão da camada de lubrificante e pode ser obtido através do quociente entre a amplitude medida, $A_m(f)$, e a amplitude de referência, $A_{ref}(f)$, multiplicado pelo coeficiente de reflexão dos meios, R_{AV} . Este cálculo é representado pela Equação (15).

$$R_l(f) = \frac{A_m(f)}{A_{ref}(f)}R_{AV} \quad (15)$$

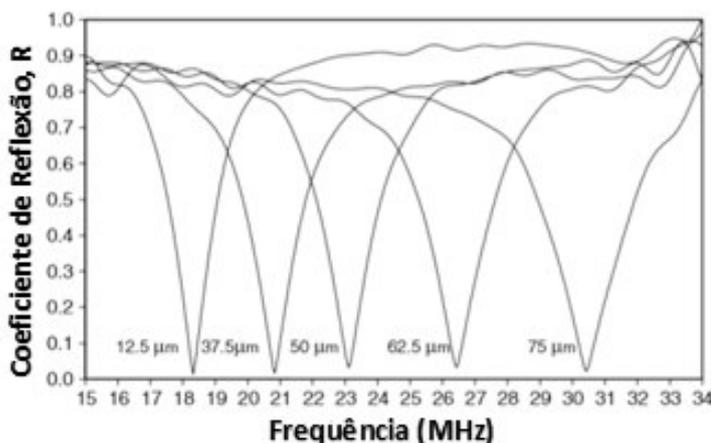
Dois transdutores de banda larga diferentes, de 10MHz e 25MHz, foram utilizados para realizar as medições através do modelo de cunha. Dentro das dimensões da cunha, diversas medições de espessura de filme foram realizadas. Os espectros do coeficiente de reflexão obtidos pelos dois transdutores, a partir do modelo de cunha, são mostrados na Figura 10 e na Figura 11.

Figura 10 – Espectros do coeficiente de reflexão para diversas camadas de filme medidas, utilizando transdutor de 10MHz.



Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

Figura 11 – Espectros do coeficiente de reflexão para diversas camadas de filme medidas, utilizando transdutor de 25MHz.

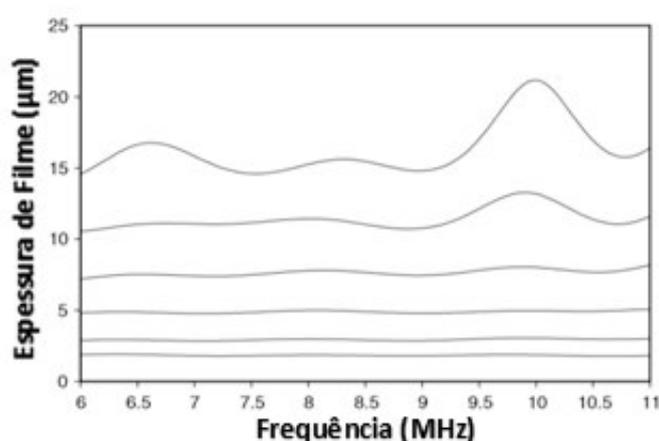


Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

Os valores de espessura apresentados, tanto na Figura 10 quanto na Figura 11, foram estimados a partir da geometria da cunha de fluido formada pelo calço. Na Figura 10 nota-se que, para camadas mais finas e/ou pelo fato da utilização de um transdutor de baixa frequência, ressonâncias não são registradas. Nesse caso, através do espectro do coeficiente de reflexão, a espessura da camada líquida pode ser calculada pelo modelo de mola utilizando a Equação (10). Já na Figura 11, onde são apresentados os espectros do coeficiente de reflexão referentes a espessuras de filme mais altas, nota-se que frequências de ressonância foram registradas. Essas frequências podem ser identificadas, na Figura 11, como mínimas nos espectros do coeficiente de reflexão. Quando frequências de ressonância são registradas, a espessura da camada de filme pode ser obtida pelo método de ressonância de filme.

HUNTER; DWYER-JOYCE e HARPER (2012) utilizaram o modelo de mola para converter os espectros do coeficiente de reflexão, apresentados na Figura 10, em espessura de filme. Como já foi discutido anteriormente, a Equação (10) relaciona os valores do coeficiente de reflexão e as propriedades do fluido com a espessura de filme. Os valores de espessura de filme obtidos por meio da conversão dos espectros do coeficiente de reflexão, dentro da largura de banda do transdutor, são mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Valores de espessura obtidos através da conversão dos espectros do coeficiente de reflexão.



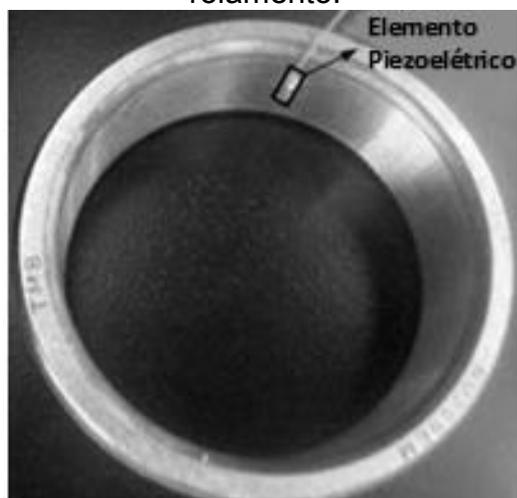
Fonte: Adaptado de HUNTER, *et al.*, 2012.

Na Figura 12 é possível observar que, para valores mais baixos de espessura de filme, as curvas apresentam uma certa regularidade na direção horizontal. Isso indica uma boa medição, já que a espessura do filme não pode ser uma função da frequência com a qual ele é medido (HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012). À medida que os valores de espessura vão ficando mais altos, observa-se o surgimento de ondulações na direção horizontal. Essas variações, ao longo da camada medida, sugerem que o modelo utilizado não converte corretamente o coeficiente de reflexão para uma espessura de camada constante. Isso ocorre porque, como o coeficiente de reflexão tende à unidade, o modelo da mola, representado pela Equação (10), torna-se propenso a erros numéricos (HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012). Portanto, para estas espessuras, o mais adequado seria a utilização de maiores frequências para que a medição pudesse ser feita pelo método de ressonância do filme.

Para realizar a medição da espessura do filme de óleo entre o rolo e o anel interno em rolamentos de rolos, ZHANG; MENG; GENG e WANG (2015) utilizaram

um pequeno elemento piezoelétrico, com uma altura de 0,22 mm e área ativa de $6 \times 0,6 \text{ mm}^2$, colado na superfície interna do anel, como pode ser visto na Figura 13.

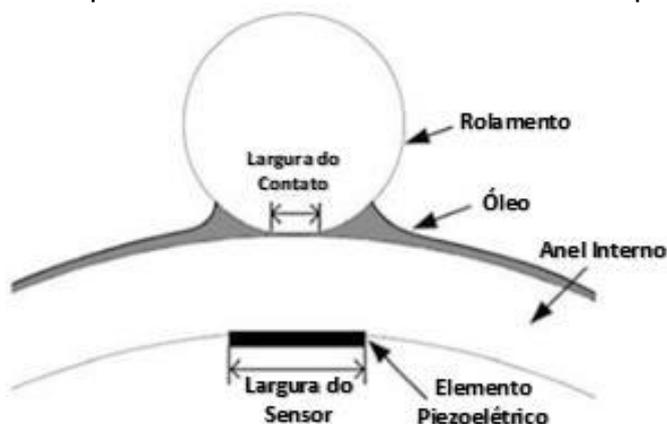
Figura 13 - Sensor piezoelétrico colado na superfície interna de um anel de rolamento.



Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.*, 2015.

Uma representação esquemática da configuração do experimento de ZHANG; MENG; GENG e WANG (2015) é mostrada na Figura 14, sendo possível observar que a região que irá caracterizar a espessura da camada do lubrificante será limitada pelas dimensões do elemento piezoelétrico.

Figura 14 - Sensor piezoelétrico do anel de rolamento ao passar pelo rolo.



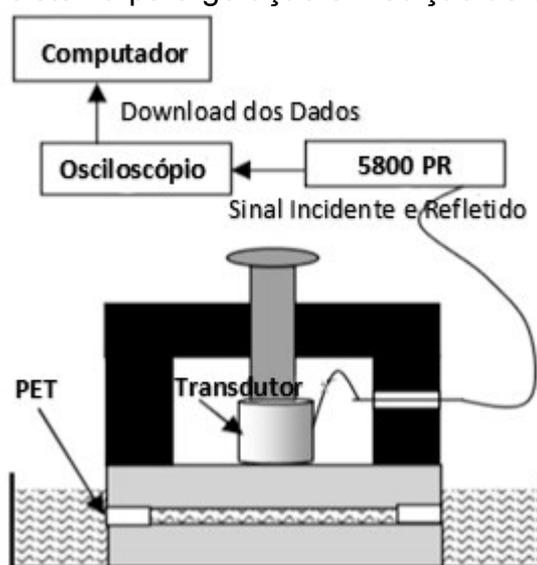
Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.*, 2015.

Na Figura 14 pode-se observar que a largura do sensor piezoelétrico é maior que a região de contato do rolo. Assim, fez-se necessária a consideração de um modelo particular, para extrair o coeficiente de reflexão na região exata do contato.

Através de um equipamento produzido para simular as condições reais de uso, medições da camada de filme foram realizadas. Durante a execução do processo, a excitação do elemento piezoelétrico era dada através de um sinal de

tensão que a ele era imposto, fazendo com que o elemento vibrasse e, posteriormente, o sinal de ultrassom fosse emitido. Parte das ondas ultrassônicas que atravessaram o anel interno foi refletida e parte transmitida, sendo as ondas refletidas captadas pelo sensor piezoelétrico e convertidas em um sinal de tensão. Após as ondas refletidas serem convertidas em sinais elétricos, foram mostradas e armazenadas para uma análise posterior (ZHANG; MENG; GENG; WANG, 2015). Na Figura 15 é mostrado um típico sistema de geração e processamento de sinais ultrassônicos.

Figura 15 - Típico sistema para geração e medição de ondas de ultrassom.



Fonte: Adaptado de JINGPIN *et al.*, 2008.

O modelo esquemático de um sistema de geração e processamento de sinais ultrassônicos apresentado na Figura 15 representa o equipamento utilizado no estudo de JINGPIN; QIANG; BIN e CUNFU (2008), onde espessuras de filme lubrificante foram obtidas através da reflexão de ondas ultrassônicas de incidência normal.

Os resultados para a espessura do filme de óleo, na região de contato entre o rolo e o anel interno do rolamento, obtidos no estudo de ZHANG; MENG; GENG e WANG (2015), foram comparados com valores de espessura previstos em regimes de lubrificação elastohidrodinâmicos e apresentaram uma boa concordância. Um fato relevante que pôde ser notado nesse estudo foi o comportamento dos valores de espessura de filme obtidos tanto em baixas rotações, quanto em rotações mais altas. Nessas condições, dos extremos opostos das rotações, notou-se que os valores da espessura da camada de filme obtidos em altas rotações foram menores do que o que se esperava pela consideração teórica. Já no caso das rotações mais baixas, os

valores de espessura encontrados ficaram um pouco acima do que estava previsto pela teoria. A principal justificativa para esse desalinhamento com a previsão teórica se deve ao fato de que, de acordo com a teoria, a viscosidade do óleo permaneceria constante durante todo o experimento, o que de fato não aconteceu. Nesse caso, uma análise minuciosa sobre os fatores que afetam a pressão e a temperatura dos lubrificantes deve ser considerada.

O princípio da ressonância no filme de óleo foi utilizado por ZHANG; DRINKWATER e DWYER-JOYCE (2005) como uma das técnicas para validar e caracterizar a calibração de um instrumento experimental utilizado para medições de espessura de filme. Nessa abordagem, os autores relacionaram a espessura da camada com a frequência através da Equação (11). Além do método da ressonância, neste mesmo trabalho os autores utilizaram o modelo de mola e, neste caso, a espessura da camada de lubrificante foi relacionada com a sua rigidez e a amplitude do coeficiente de reflexão como função da frequência. Com isso, a espessura da camada de lubrificante pode ser dado pela Equação (16).

$$h = \frac{\rho c^2}{\pi f z} \sqrt{\frac{|R(f)|^2}{1 - |R(f)|^2}} \quad (16)$$

Além do coeficiente de reflexão $R(f)$, dado em função da frequência, a Equação (16) leva em consideração a densidade do lubrificante, ρ , que é uma propriedade característica do fluido e a impedância acústica, z , através do lubrificante. Para a obtenção do coeficiente de reflexão, $R(f)$, utiliza-se a Equação (17).

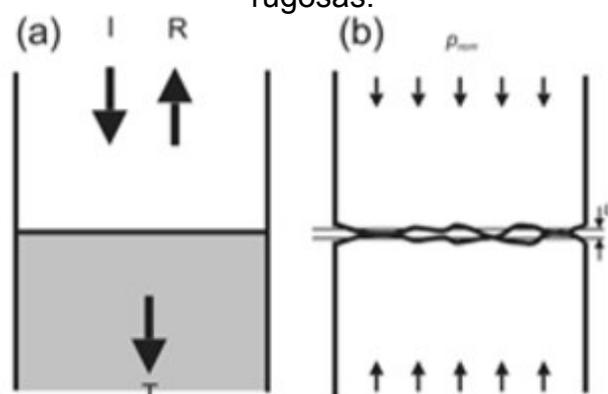
$$R(f) = \frac{A_m(f)}{A_{ref}(f)} R_{ref} \quad (17)$$

O coeficiente de reflexão, $R(f)$, calculado na Equação (17) é utilizado na Equação (16) a fim de se obter o valor da espessura da camada de filme. Na Equação (17), $A_m(f)$ representa a amplitude do sinal refletida na camada de lubrificante, $A_{ref}(f)$ é a amplitude do sinal de referência e R_{ref} representa o valor do coeficiente de reflexão da interface de referência (ZHANG; MENG; GENG; WANG, 2015).

Em situações onde a interface entre os dois materiais não está perfeitamente unida, ou ainda, se existe uma pequena camada que separa totalmente os dois sólidos (pequena em relação ao tamanho do comprimento de onda), então, ocorre um aumento da proporção da onda refletida (DWYER-JOYCE; DRINKWATER; DONOHOE, 2003; HUNTER; DWYER-JOYCE; HARPER, 2012). As duas situações,

quando existe um contato ideal entre a interface das superfícies e quando são consideradas superfícies rugosas, podem ser vistas na Figura 16.

Figura 16 - Onda refletida em: (a) contato perfeito e (b) contato entre superfícies rugosas.



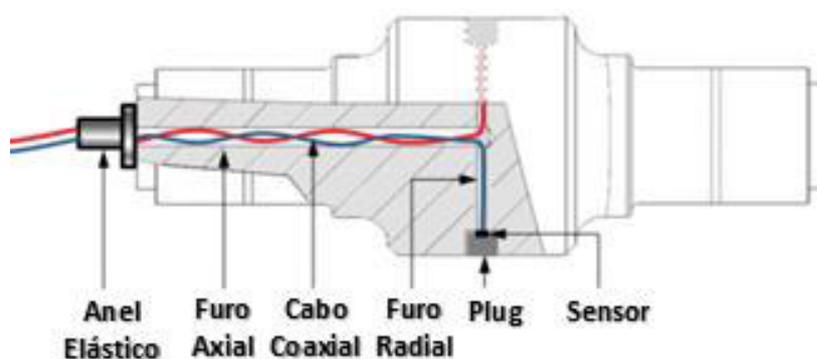
Fonte: Adaptado de DWEYER-JOYCE *et al.*, 2005.

Em superfícies reais é quase impossível a ocorrência de um contato perfeito entre duas superfícies, como no exemplo mostrado na Figura 16 (a). Isso porque uma superfície real não está isenta de irregularidades. O que acontece, na maioria dos casos, é que o contato entre os corpos acontece apenas nas asperezas presentes na superfície de cada um (GREENWOOD; WILLIAMSON, 1966). Quando uma carga é aplicada sobre duas superfícies que encontram-se em contato, isso acaba modificando a área de contato e a distância entre as asperezas (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017). A magnitude dessas mudanças pode ser relacionada com a rigidez na interface entre as superfícies, que está dividida em duas componentes, uma normal e outra de cisalhamento. Nos casos onde existe uma camada líquida entre as duas superfícies, a componente da rigidez de cisalhamento é desprezada, visto que os líquidos não oferecem resistência a uma carga cisalhante (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017).

HUNTER; CARRETTA e DWYER JOYCE (2017) realizaram medições da camada de filme lubrificante existente entre uma chapa e a superfície de um rolo de laminação a frio utilizando a técnica de ultrassom. Neste caso, a transmissão do ultrassom ocorre apenas em pontos de contato e a reflexão se dará nos intervalos entre asperezas, que estão preenchidos pelo lubrificante. Para obter os valores da espessura de filme, em diferentes condições de processo, os autores utilizaram um rolo de laminação piloto onde introduziram dois sensores piezoelétricos, um para a geração de ondas longitudinais e outro para ondas de cisalhamento.

Os sensores utilizados no estudo de HUNTER; CARRETTA e DWYER JOYCE (2017) foram introduzidos em um orifício perfurado radialmente dentro do rolo de trabalho superior, de modo que eles ficassem voltados para a superfície de rolagem. A configuração esquemática do rolo de laminação utilizado nesses experimentos pode ser vista na Figura 17.

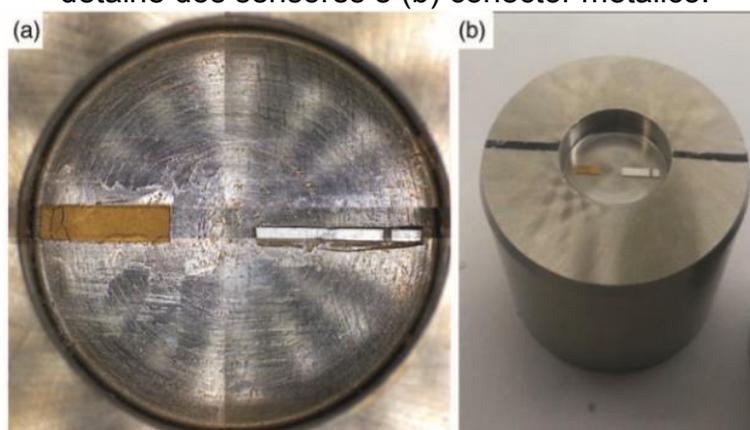
Figura 17 - Sensores piezoelétricos montados em rolo de laminação a frio.



Fonte: Adaptado de HUNTER *et al.*, 2017.

Os sensores utilizados no equipamento mostrado na Figura 17 foram uma adaptação de elementos piezoelétricos. Originalmente, os sensores possuíam um diâmetro de 7 mm, porém, eles foram cortados e transformados em tiras retangulares, para melhor se ajustarem a um conector metálico que foi montado no rolo de laminação. Essa adaptação dos sensores junto ao conector metálico pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 – Adaptação de sensores piezoelétricos em um conector metálico: (a) detalhe dos sensores e (b) conector metálico.



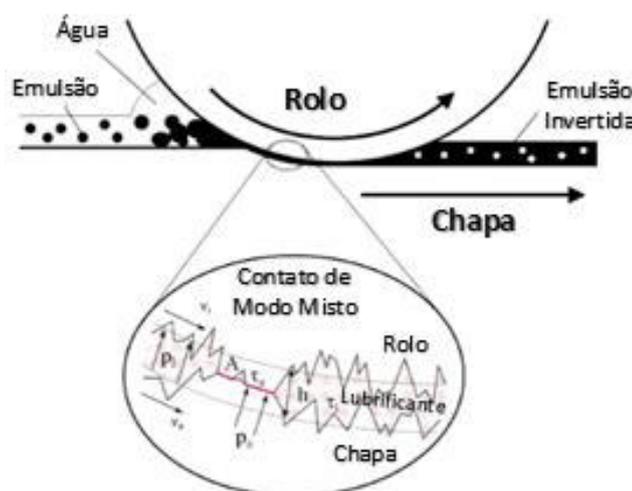
Fonte: Adaptado de CARRETTA *et al.*, 2018.

A fixação dos sensores mostrados na Figura 18 foi feita com um material adesivo que, além de garantir a fixação ao conector metálico, também atua como

acoplante acústico. A área de detecção do sistema resultante é, aproximadamente, equivalente ao tamanho do sensor.

No processo laminação a frio, o regime de lubrificação presente é de modo misto, onde existem alguns pontos de contato nas asperezas da chapa e dos rolos, sendo as demais regiões preenchidas pelo lubrificante. A amplitude das asperezas é da mesma ordem que a camada de lubrificante. Portanto, definir um único valor para a espessura do filme não é trivial. Neste caso, para se obter a espessura da camada de fluido lubrificante, considera-se tanto a rigidez da interface entre os sólidos, quanto a rigidez da camada líquida (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017). A Figura 19 mostra, esquematicamente, o modo de lubrificação presente na região de contato entre o rolo e a chapa, para um sistema típico de laminação a frio.

Figura 19 – Regime de lubrificação de modo misto presente na interface do rolo de laminação e da chapa.



Fonte: Adaptado de HUNTER *et al.*, 2017.

No caso da lubrificação de modo misto, a rigidez da interface normal e de cisalhamento é dada pela soma da rigidez resultante dos componentes sólidos e líquidos (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017). Utilizando a Equação (18) é possível obter-se valores da rigidez normal, K_σ , enquanto que os valores da rigidez de cisalhamento, K_τ , são obtidos de acordo com Equação (19).

$$K_\sigma = (K_a)_\sigma + (K_l)_\sigma \quad (18)$$

Os subscritos *a* e *l* representam as contribuições da aspereza e da parte líquida do contato, respectivamente. A rigidez de cisalhamento, K_τ é descrita como a tração tangencial q requerida para causar a deflexão de cisalhamento da unidade u_x (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017). Partindo da definição de que os

líquidos não oferecem resistência a uma carga cisalhante, os autores também consideram, neste estudo, a rigidez devido à viscosidade do fluido como insignificante. Dessa forma, a rigidez de cisalhamento será dada apenas pela componente correspondente às asperezas, como pode ser visto na Equação (19).

$$K_{\tau} = (K_a)_{\tau} = \frac{dq}{du_x} \quad (19)$$

A Equação (18) $(K_a)_{\sigma}$ representa a rigidez normal da interface entre dois corpos sólidos. Ela é definida como a pressão de contato necessária para causar uma aproximação unitária das superfícies e pode ser expressa conforme a Equação (20). Nesta equação, p é a pressão de contato nominal e u_z é a distância entre as linhas médias da superfície.

$$(K_a)_{\sigma} = -\frac{dp}{du_z} \quad (20)$$

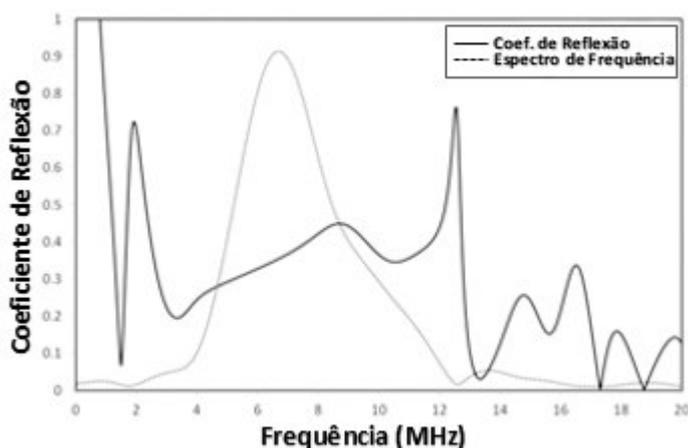
A rigidez medida por uma onda longitudinal terá componentes sólidas e líquidas. Considerando apenas a rigidez devido ao líquido, é possível realizar o cálculo a partir da diferença entre a rigidez normal total, K_{σ} , e a rigidez normal somente do contato sólido calculado a partir da rigidez de cisalhamento, $(K_a)_{\tau}$. A Equação (21) descreve essa relação.

$$(K_l)_{\sigma} = K_{\sigma} - 1,216(K_a)_{\tau} \quad (21)$$

No estudo de HUNTER; CARRETTA e DWYER JOYCE (2017), uma frequência de ressonância natural de 10 MHz foi apresentada pelos sensores. Essa frequência acabou sofrendo um decréscimo, devido a atenuações causadas pelos demais constituintes do sistema. Porém, esse decréscimo, de aproximadamente 3 MHz, não afetou a penetração das ondas através do rolo. Durante o movimento do rolo os sensores fizeram a varredura da camada de lubrificante no momento em que passavam pelo local de contato. O sinal de pulso retornado foi amplificado e depois digitalizado a uma frequência de 100 MHz. Uma conversão para o domínio da frequência foi realizada através da transformada rápida de Fourier. Essa conversão é realizada a fim de se evitar erros de detecção de pico e deslocamento de fase (HUNTER; CARRETTA; DWYER JOYCE, 2017). A partir daí, foram realizados os cálculos dos coeficientes de reflexão e de cisalhamento das ondas longitudinais. Por meio de uma divisão do espectro da frequência de reflexão pelo espectro da frequência de referência foi obtido o coeficiente de reflexão em uma ampla faixa de

frequências, como pode ser visto na Figura 20. A mesma abordagem para calcular o coeficiente de reflexão foi usada para as ondas de cisalhamento e longitudinal.

Figura 20 – Coeficiente de reflexão longitudinal e espectro de frequência.

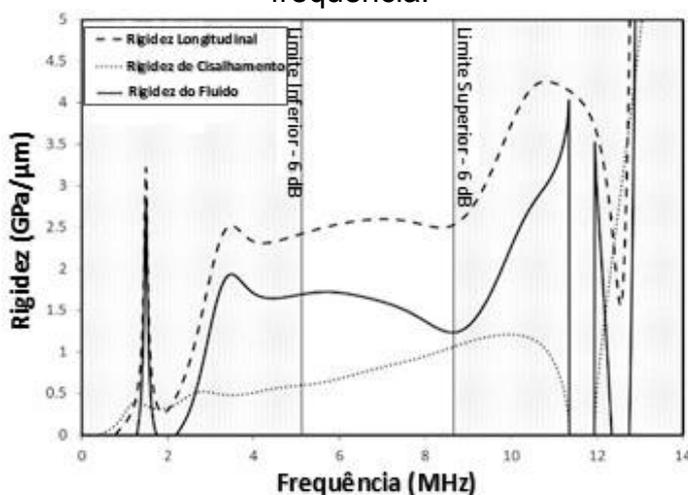


Fonte: Adaptado de HUNTER *et al.*, 2017.

Na Figura 20, além da plotagem do coeficiente de reflexão, o espectro de frequência foi sobreplotado em uma escala arbitrária para mostrar as frequências com maior energia e, portanto, melhor relação sinal-ruído. Esse espectro de frequência é identificado pela curva tracejada na figura.

Os coeficientes de reflexão para ambas as ondas longitudinais e de cisalhamento foram convertidos em rigidez usando impedâncias acústicas de 46,7 e 25,3 MRayls para os casos de cisalhamento e longitudinal, respectivamente. Dessa forma, a rigidez da camada líquida foi obtida a partir destes valores. Na Figura 21 é possível visualizar as curvas referentes à rigidez longitudinal, rigidez de cisalhamento e a rigidez da camada líquida, no domínio da frequência.

Figura 21 – Rigidez longitudinal, de cisalhamento e do fluido, no domínio da frequência.



Fonte: Adaptado de HUNTER *et al.*, 2017.

Neste sentido, HUNTER; CARRETTA e DWYER JOYCE (2017) obtiveram os valores da espessura da camada de lubrificante considerando que a rigidez da camada líquida está relacionada às propriedades do fluido. Desta forma, os autores relacionaram a rigidez normal da camada de fluido com a espessura de filme, h , e o módulo de massa, B , através da Equação (22). Essa abordagem já havia sido considerada no estudo de HARPER; DWYER-JOYCE; SJÖDIN e OLOFSSON (2005), ao utilizar o método ultrassônico para medir a espessura de óleo em um anel de pistão hidráulico.

$$(K_l)_\sigma = \frac{B}{h} \quad (22)$$

Relacionando o módulo de massa, B , com os coeficientes de cisalhamento e reflexão longitudinal, através da Equação (23), é possível se obter espessura do fluido para o caso da laminação a frio de chapas metálicas.

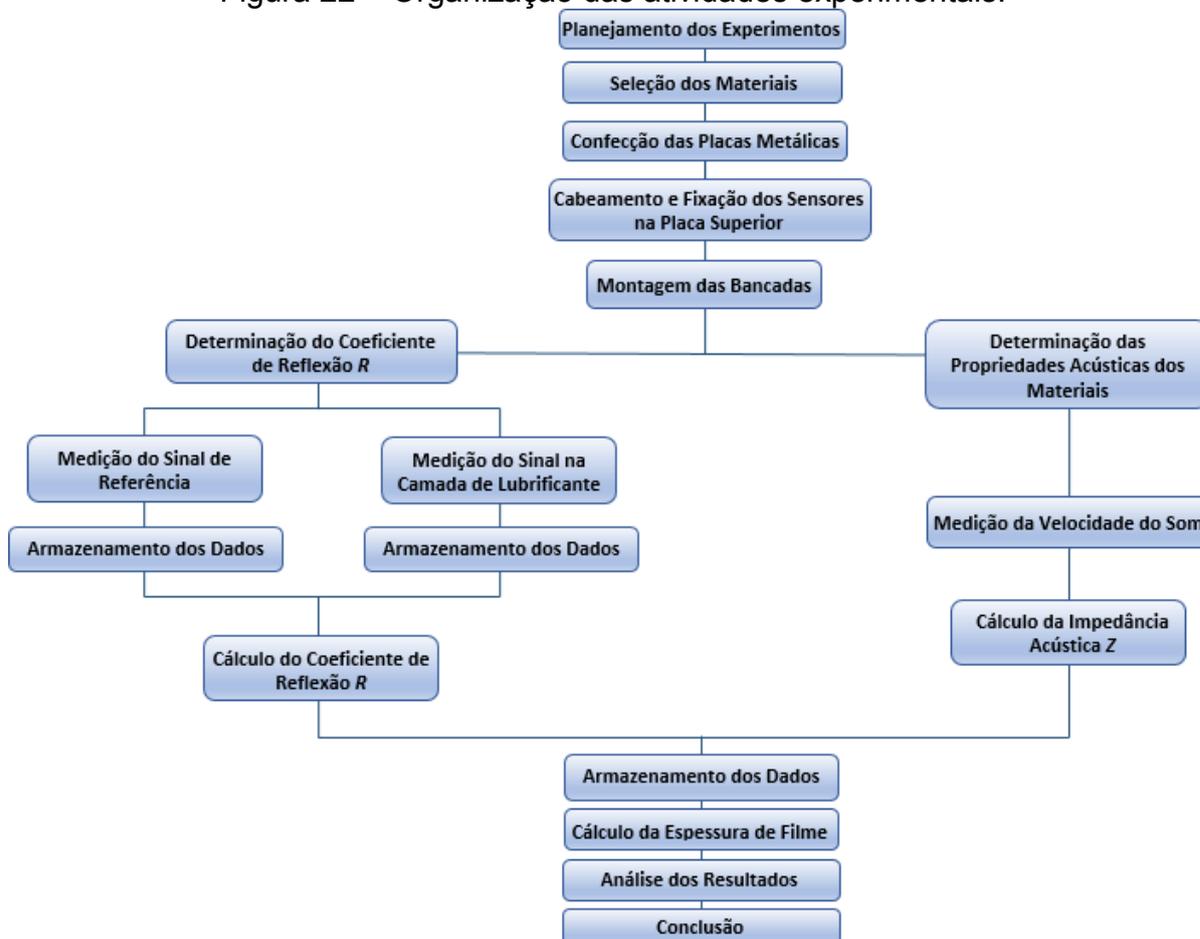
$$h = \frac{B}{K_\sigma - 1,26 K_\tau} \quad (23)$$

Na Equação (23), K_σ representa a rigidez normal total (sólido e líquido) e K_τ a rigidez de cisalhamento do contato sólido. Os valores de espessuras de filme obtidos no estudo de HUNTER; CARRETTA e DWYER JOYCE (2017) variaram entre 0,285 μm e 0,875 μm ao variar as condições de alongamento do chapa, sendo que menores valores de espessura de filme lubrificante foram obtidos para maiores alongamentos, o que já era esperado. Quando foram realizadas variações das velocidades de rolagem, os valores da espessura do filme variaram entre 0,223 μm e 0,308 μm , sendo que os valores de espessura aumentaram à medida em que maiores velocidades de rolagem eram impostas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos experimentos de medição da espessura de filme lubrificante através de sensores piezoelétricos, as atividades foram divididas e realizadas de acordo com o organograma apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Organização das atividades experimentais.



Fonte: O autor.

Inicialmente, algumas tentativas de montagem de sensores foram realizadas na Furg baseada em informações da literatura. Face às dificuldades encontradas, uma vez que o uso dessa técnica aparentemente é pioneiro dentro do Brasil para a medição de espessura de filmes lubrificantes em contatos tribológicos, foi estabelecida uma parceria de cooperação em pesquisa com o AC²T (Centro Austríaco de Excelência em Tribologia), na Áustria. Através dessa parceria, a usinagem das placas metálicas, bem como a fixação dos sensores na placa superior, foram feitas no AC²T e, posteriormente, enviados para a realização das medições na Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

4.1 Materiais utilizados

Nesta seção é feita uma descrição dos equipamentos e materiais utilizados para a realização dos experimentos.

4.1.1 Gerador de Funções Arbitrárias

Para fornecer os sinais de tensão, a fim de excitar o sensor piezoelétrico responsável pela emissão das ondas ultrassônicas, foi utilizado um gerador de funções arbitrárias de 100 MHz, modelo Fy6900-100M, com taxa de amostragem de 250 MSa/s.

4.1.2 Osciloscópio

Para leitura do sinal retornado do sensor, um osciloscópio digital com 4 canais de entrada, frequência de 100 MHz e taxa de amostragem de 2 GSa/s, modelo TDS 2014C da marca Tektronics®, foi utilizado. Além de amplificar os sinais fornecidos pelo sensor e possibilitar a visualização direta destes, o osciloscópio teve como principal função o armazenamento das informações referente às medições, possibilitando o envio direto dos dados para o computador.

4.1.3 Sensores Piezoelétricos

Para a emissão e recepção das ondas ultrassônicas, com base no princípio da piezoelectricidade, foram utilizados elementos cerâmicos piezoelétricos PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) produzidos a partir de placas piezoelétricas de Niobato de Lítio (LiNbO_3) polarizadas longitudinalmente, com dimensões de 5 mm x 5 mm. Estes sensores podem ser visualizados na Figura 23.

Figura 23 – Elementos piezoelétricos.



Fonte: Autor.

Pelas informações concedidas pelo fabricante, a faixa de frequência para se obter melhor eficiência dos sensores estaria próxima aos 10 MHz. Trabalhando com sensores com frequência central de 10 MHz é possível determinar espessuras de filme dentro de uma faixa de 0,1 μm a 10 μm , aproximadamente. Apesar das informações do fabricante sugerirem um frequência de 10 MHz, durante a calibração feito no AC²T, verificou-se que os melhores sinais eram obtidos utilizando uma frequência entorno de 14 MHz. Isso acabou se verificando também nos experimentos em torno deste trabalho. Em decorrência dessa constatação, a frequência de excitação dos sensores, utilizada neste trabalho, foi de 14 MHz.

Uma característica dos materiais que apresentam comportamento piezoelétrico é a capacidade de converter sinais elétricos em uma quantidade de vibração ou deformação. O inverso disso também ocorre, ou seja, ao receber uma carga ou deformação, o material piezoelétrico irá converter esse estímulo externo em uma carga elétrica que correspondente a essa excitação. Nos casos da medição de espessura de filme, todas as informações relevantes sobre a camada do filme estão presentes nas ondas refletidas e pelo sensor piezoelétrico.

Outra característica interessante a respeito dos materiais piezoelétricos é a sua grande flexibilidade de adaptação quanto à sua forma; isso permite que alterações na sua geometria sejam realizadas sem que ocorram perdas relativas ao funcionamento efetivo. No entanto, para os testes de medição de espessura de filme, o controle da geometria do elemento piezoelétrico deve ser considerado. Isso se deve pelo fato de que o coeficiente de reflexão, utilizado para os cálculos de espessura, é extraído da região limitada pelas dimensões do sensor.

Dentre as principais características dos elementos piezoelétricos, destacam-se: a temperatura ou ponto de Curie, o coeficiente de acoplamento eletromecânico e a constante piezoelétrica. A temperatura de Curie está diretamente relacionada à capacidade dos materiais piezoelétricos em converter sinais elétricos em vibração ou o contrário desse fenômeno. Temperaturas acima do ponto de Curie podem conferir a perda das propriedades piezoelétricas do material. Isso faz com que a etapa de conexão dos cabos, junto aos elementos piezoelétricos, exija cuidados com o controle da temperatura de soldagem.

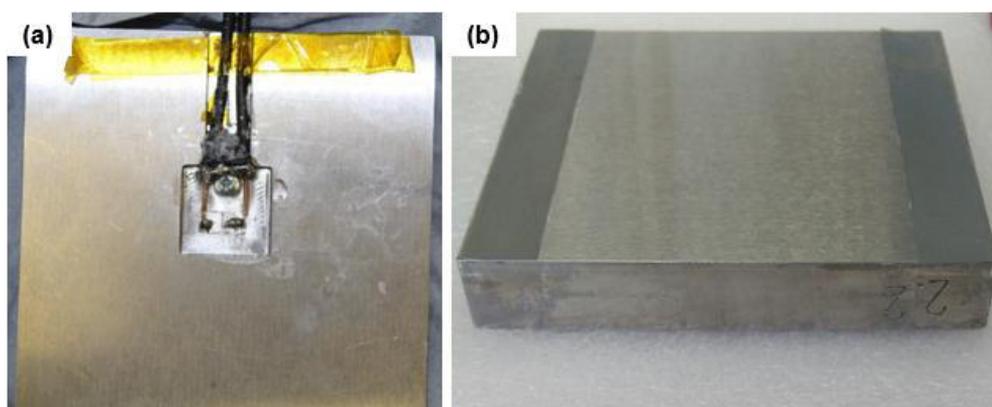
4.1.4 Placas metálicas

Além dos sensores piezoelétricos, descritos na Seção 4.1.3, as duas placas metálicas utilizadas neste estudo, que caracterizam um típico sistema de três camadas (aço-óleo-aço), foram confeccionadas pelo AC²T e enviadas para a execução dos experimentos. As duas placas foram fabricadas a partir de um mesmo bloco de aço inox martensítico 1.4313 - X3CrNiMo13-4, ambas com as mesmas dimensões. As placas foram dimensionadas de forma a constituir dois blocos maciços com espessura de 14 mm e lados iguais com 90 mm cada.

Em uma das placas foram acomodados dois sensores piezoelétricos, idênticos aos apresentados na Figura 23, sendo responsáveis pela emissão das ondas ultrassônicas. Esses sensores atuam de maneira independente, não necessitando que os dois elementos estejam conectados na fonte emissora/receptora para a realização das medições. A placa onde os sensores piezoelétricos foram fixados é utilizada como placa superior do sistema de três camadas. Na placa inferior foram coladas duas fitas metálicas, com espessura de 10 μm , utilizadas como uma espécie de calço entre as duas placas. A finalidade desses calços é a criação de um canal, com dimensão previamente conhecida, responsável pela restrição do óleo lubrificante.

A Figura 24 apresenta as duas placas de aço, devidamente montadas, que foram utilizadas nesse trabalho. Na Figura 24 (a) é possível visualizar os sensores piezoelétricos alocados na superfície da placa superior, enquanto que na Figura 24 (b) é mostrada a placa inferior, evidenciando os calços metálicos fixados em sua superfície.

Figura 24 – Placas de aço inox: (a) placa superior e placa inferior (b).



Fonte: Autor.

Um rebaixo foi feito na superfície da placa superior afim de alocar os sensores piezoelétricos e posicionar os cabos de ligação. Os cabos foram posicionados, na placa superior, de maneira que nenhum tipo de carga externa fosse transmitida aos sensores, evitando assim possíveis danos. Além do posicionamento dos cabos, uma camada de adesivo epóxi transparente foi aplicado sobre os sensores para aumentar a proteção.

4.1.5 Óleo lubrificante

O óleo utilizado nos ensaios foi o lubrificante de base sintética polialfaolefina (PAO) ExxonMobil Spectrasyn 4. As principais características e especificações desse lubrificante, fornecidas pelo fabricante, estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do lubrificante.

Características	
Densidade Relativa, 15 °C	0,82
Viscosidade, 40 °C	18 cSt (18 mm ² / seg)
Viscosidade, 100 °C	4 cSt (4 mm ² / seg)
Solubilidade em Água	Insignificante

Fonte: Autor, com base em informações do fabricante ExxonMobil.

Além dos dados apresentados na Tabela 1, a velocidade do som no lubrificante é um parâmetro essencial para a obtenção dos valores da espessura da camada de filme. Apesar de se encontrar, na literatura, informações sobre essa característica do lubrificante, elas não são ideais para se aplicar aos cálculos devido à sua generalidade. Para garantir maior precisão nas medições da camada de filme, uma medição da velocidade do som, para o lubrificante utilizado nesse estudo, foi realizada. A descrição da técnica utilizada para a obtenção desse valor é descrita na Seção 4.2.

4.1.6 Cabo Coaxial

A utilização de cabos coaxiais tem como principal objetivo a redução dos efeitos produzidos por sinais externos, como os ruídos. Dessa forma, evita-se que esse tipo de interferência atue, significativamente, sobre os sinais das medições.

Na extremidade oposta à que o sensor foi soldado, um conector do tipo BNC foi montado para facilitar a comunicação com a instrumentação de controle. A malha metálica do cabo foi utilizada como polo negativo e prendida junto ao terminal

negativo do conector BNC, enquanto que o fio de cobre, responsável pela condução dos sinais, foi ligado ao terminal positivo do conector.

4.1.7 Adesivo para a fixação dos calços metálicos

A fixação dos calços metálicos, junto à placa metálica inferior, foi feita utilizando uma cola adesiva instantânea LOCTITE® 496™. Este adesivo apresenta baixa viscosidade e é amplamente utilizado para adesão em substratos metálicos. A quantidade de cola utilizada deve ser mínima, apenas o suficiente para que haja a união entre a placa e os calços metálicos. O excesso de adesivo pode acabar conferindo um acréscimo no valor da espessura criada pelos calços, interferindo no resultado das medições.

4.2 Determinação das propriedades acústicas dos materiais

Um dos requisitos para que a espessura de filme lubrificante possa ser determinada, através da técnica utilizada nesse estudo, é que a velocidade do som no líquido analisado seja conhecida. Esse valor pode ser aproximado, utilizando dados disponíveis na literatura, ou determinado experimentalmente para um fluido específico. Essa segunda opção é a mais adequada, pois fornece o valor da velocidade do som no fluido estudado.

Para determinar a velocidade do som nos materiais constituintes do sistema de três camadas utilizados nos ensaios, um equipamento de ultrassom modelo *Phasor XS*, da marca GE, foi utilizado. Existem diversas formas de se determinar a velocidade do som em um líquido e para esse experimento foi utilizado o princípio do método ToF, que considera o tempo que a onda sonora leva para percorrer o meio investigado e retornar ao transdutor. O equipamento foi configurado para trabalhar em seu modo de medição convencional, juntamente com um cabeçote monocristal com frequência de 4 MHz e diâmetro de 10 mm.

4.2.1 Determinação da velocidade do som no lubrificante

Para determinar a velocidade do som no lubrificante, o equipamento de ultrassom foi configurado utilizando um parâmetro de velocidade padrão referente a óleos SAE 30. Com base nessa configuração inicial, foi possível determinar a velocidade do som no lubrificante ExxonMobil Spectrasyn 4 executando uma espécie de calibração do equipamento a partir desse óleo.

Quando se faz a calibração do equipamento ultrassônico, são necessárias pelo menos duas medidas de referência. Para a analisar o fluido utilizado nos testes, foram utilizados dois tubos com 10 mm de diâmetro e com alturas de 7 e 47 mm. Os tubos foram preenchidos com o lubrificante, de maneira que a superfície do cabeçote ficasse totalmente em contato com o fluido. A fim de eliminar qualquer tipo de erro ou atraso, a película de proteção do cristal foi retirada, garantindo assim um contado direto entre o cristal e o lubrificante.

Como as dimensões dos tubos onde o lubrificante ficou restringido eram conhecidas, a calibração do equipamento foi realizada inserindo as duas alturas dos tubos como pontos de referência. Dessa forma, a menor medida, 7 mm, foi utilizada para fornecer o primeiro sinal de referência e a medida de 47 mm utilizada para corresponder ao segundo sinal de referência da calibração. Após a inserção dos valores de referência no equipamento, o cabeçote foi posicionado sobre a abertura do tubo de 7 mm e o sinal recebido foi gravado. Em seguida, o mesmo procedimento foi realizado utilizando o tubo de 47 mm de altura. Com isso, a calibração pode ser finalizada e os novos parâmetros apresentados na tela do equipamento são dados em função da velocidade de propagação do som através do material utilizado para a calibração. O novo valor de velocidade do som que o equipamento fornece corresponde à velocidade do som no lubrificante testado.

O aparato montado para determinar a velocidade de propagação do som no óleo lubrificante, juntamente com o equipamento ultrassônico *Phasor XS*, são mostrados na Figura 25.

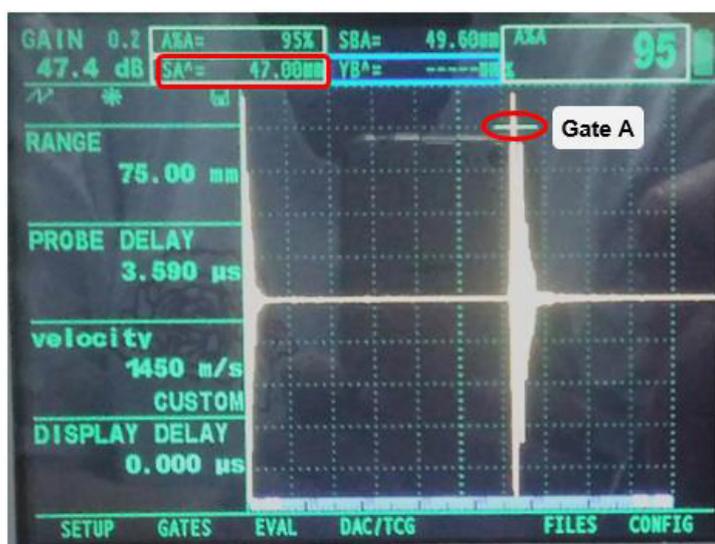
Figura 25 – Aparato para medição da velocidade do som em meios líquidos.



Fonte: Autor.

Com o equipamento previamente calibrado e a sonda devidamente ajustada, foi possível verificar um sinal limpo, livre de ruídos, na tela do equipamento. Esse sinal, que pode ser visto na Figura 25, corresponde ao caminho percorrido pela onda ultrassônica no fluido e retornado para o transdutor. Na Figura 26 pode ser visualizado o detalhe da correspondência entre o valor da distância percorrida pela onda ultrassônica e a profundidade do tubo preenchido com o lubrificante.

Figura 26 – Correspondência entre o caminho percorrido pela onda sonora e a profundidade do tubo.



Fonte: Autor.

Na Figura 26 é possível visualizar que a posição do pico que atravessa o *gate* A está de acordo com a profundidade do tubo utilizado para o experimento. Através dessa congruência pode se dizer que o valor da velocidade do som no líquido ensaiado corresponde ao valor fornecido na tela do equipamento.

4.2.2 Determinação da velocidade do som nas placas de aço inox

Da mesma forma que determinar a velocidade do som no lubrificante, conhecer a velocidade de propagação das ondas sonoras através das placas de aço que restringem o lubrificante é importante. Apesar de esse valor não ser utilizado de maneira direta, na equação que determina a espessura do filme lubrificante testado, é necessário conhecê-lo para poder determinar a impedância acústica desse material. Mesmo podendo se utilizar valores da literatura ou mesmo disponibilizados pelo fabricante, optou-se por fazer a medição através do método ultrassônico.

De maneira muito semelhante ao método utilizado para determinar a velocidade som no lubrificante, a velocidade do som nas placas de aço inox

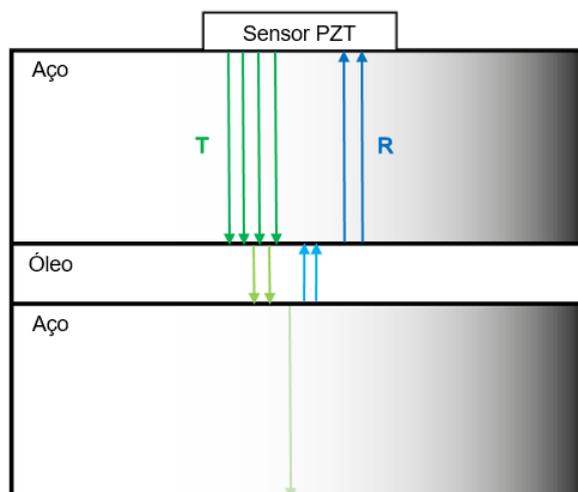
martensítico 1.4313 - X3CrNiMo13-4 foi determinada. Nesse caso, foram medidas duas dimensões de uma das placas de aço, sendo que dimensões de referência utilizadas foram os valores correspondentes a sua espessura e comprimento, 14 e 90 mm, respectivamente. O mesmo transdutor utilizado para o lubrificante foi utilizado para a calibração nas placas de aço, porém, para os valores padrões iniciais da calibração, foram utilizados parâmetros correspondentes a aços inox em sua generalidade. O processo de calibração é idêntico ao realizado utilizando o lubrificante, com isso, ao medir os dois valores de referência, foi possível obter o valor da velocidade do som na placa de aço.

4.3 Determinação do coeficiente de reflexão

Nessa seção são descritos os processos de montagem, as configurações utilizadas nos equipamentos e as demais atividades executadas para se obter os valores do coeficiente de reflexão, R . A partir dos valores do coeficiente de reflexão, do sinal de referência e da camada de lubrificante, é possível realizar os cálculos para a obtenção dos valores da espessura de filme utilizando o princípio do modelo de mola.

A abordagem desse estudo foi estruturada a partir do modelo de mola, que considera o comportamento reflexivo de uma onda sonora, incidente em um típico sistema de três camadas, como sendo dependente da rigidez da camada de filme presente entre duas superfícies sólidas. Uma maneira de facilitar a análise e os cálculos do coeficiente de reflexão é utilizar elementos produzidos a partir um mesmo material, para compor as superfícies que restringem o fluido. Dessa forma, é possível garantir as mesmas propriedades acústicas em ambas as extremidades do sistema. A Figura 27 representa o comportamento de uma onda ultrassônica, incidente em um típico sistema de três camadas.

Figura 27 – Comportamento da onda ultrassônica incidente em um sistema de três camadas aço-óleo-aço.



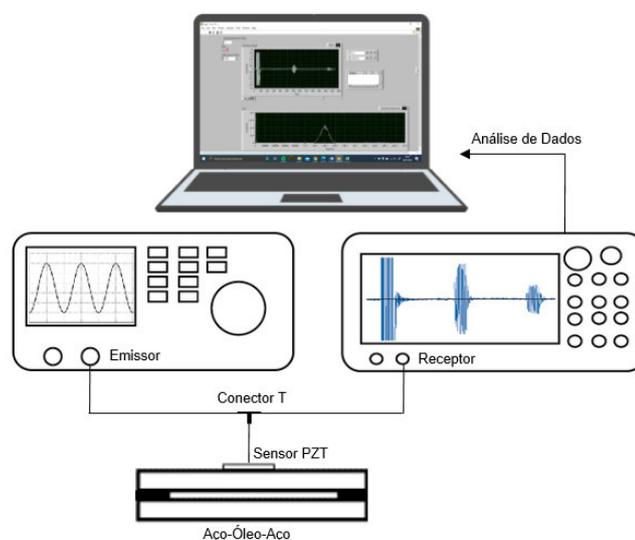
Fonte: Autor.

Na Figura 27, *T* e *R* representam as ondas transmitidas através da primeira placa de aço e a parte da onda que é refletida, respectivamente. O esquemático mostrado na Figura 27 também evidencia como uma onda ultrassônica, gerada por um sensor PZT que está fixo no bloco de aço, propaga-se através desse bloco e, ao incidir na interface aço-óleo, é parcialmente transmitida através da camada de óleo. Isso ocorre sempre que há uma mudança na densidade do meio em que a onda se propaga. Quando a camada de óleo é mais fina do que o comprimento da onda ultrassônica, a parte refletida, *R*, inclui informações referentes à camada de óleo. A parte da onda que é transmitida através da camada de óleo terá o mesmo comportamento reflexivo ao encontrar o limite da interface óleo-aço. As informações a respeito da camada de lubrificante são obtidas a partir da parte da onda que percorre essa camada e retorna para o sensor.

O coeficiente de reflexão representa a parte da onda ultrassônica que retorna para o sensor, ou seja, a parte que não foi transmitida através do limite da interface. Como esse coeficiente é dado em função da impedância dos elementos constituintes do sistema em análise, é fundamental o conhecimento das propriedades acústicas desses materiais.

Antes de iniciar a execução das medições que fornecem as informações a respeito da camada de filme lubrificante, restringida entre duas superfícies estacionárias, os componentes e equipamentos descritos na Seção 4.1 foram montados de acordo com o desenho esquemático apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Configuração experimental para medição de espessura de filme.



Fonte: Autor.

A configuração apresentada na Figura 28 caracteriza a bancada experimental montada para realizar as medições desse trabalho, envolvendo sensores piezoelétricos. Nesse tipo de configuração, o sistema de emissão e recepção dos sinais, compartilhados com o sensor, é composto pelo gerador de funções e o osciloscópio. Um computador foi adicionado ao sistema para armazenar e tratar os dados obtidos durante os ensaios.

Em uma das placas enviadas pelo AC²T, dois sensores piezoelétricos foram fixados na parte superior. Esses sensores são responsáveis pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas que viajam através do sistema de três camadas utilizado para esse estudo. Esse típico sistema é composto por duas placas metálicas, de mesmo material, e pela camada de lubrificante entre elas. Os dois sensores podem atuar de maneira independente, ou seja, funcionando em uma configuração de pulso eco, ou também podem ser utilizados de forma conjunta. Quando utiliza-se a configuração de pulso eco, empregado nesse estudo, cada um dos elementos assume tanto a função de emissão quanto a de recepção dos sinais. Quando utilizados de maneira conjunta, um dos sensores tem a função de emitir o sinal e o outro será responsável por captar o sinal retornado.

Após ter sido montada a bancada experimental, foram realizadas a configuração e o ajuste dos equipamentos. Como fonte emissora dos sinais, responsáveis pela excitação do elemento piezoelétrico, foi utilizado um gerador de funções arbitrárias com capacidade para fornecer sinais de onda com até 100 MHz.

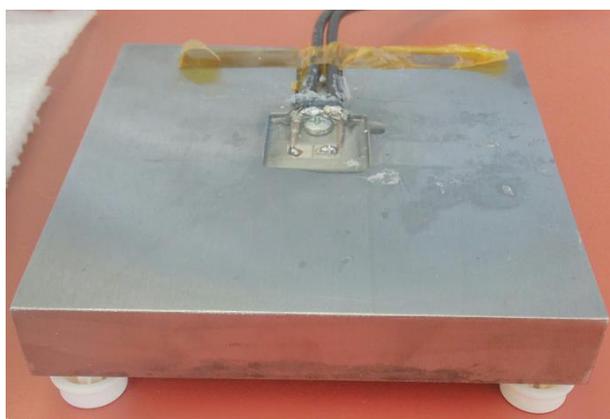
Esse equipamento foi configurado para emitir rajadas de pulsos de ondas senoidais com frequência de 14 Mhz e uma amplitude de 5 Vpp. Além do controle da frequência e amplitude dos sinais, estes foram configurados de forma que, para cada pulso enviado, o sensor piezoelétrico recebesse um ciclo de 5 ondas senoidais.

Como neste trabalho as medições foram realizadas utilizando apenas um sensor piezoelétrico, na configuração de pulso-eco, o cabeamento foi feito em uma única linha. Nesse formato, o gerador de funções é conectado, simultaneamente, ao sensor piezoelétrico e ao osciloscópio através de cabos coaxiais. Para realizar essa conexão entre os três elementos, constituintes do sistema de medição, foi utilizado um conector BNC tipo T. Com isso, os sinais, emitidos pela fonte geradora, foram enviados para o sensor piezoelétrico, lidos, amplificados e armazenados pela fonte receptora, que neste caso é o osciloscópio, e, finalmente, os dados foram enviados para o computador, onde o tratamento e análise foram realizados.

Antes da execução dos ensaios propriamente ditos, a medição de um sinal de referência foi realizada. Essa medição é feita entre a interface aço-ar e tem como principal função a caracterização dos sinais que estão sendo utilizados nos ensaios. Através da medição do sinal de referência é possível obter as melhores informações a respeito do coeficiente de reflexão do pulso ultrassônico incidente.

Para fazer a medição do sinal de referência, a placa superior, onde o sensor PZT estava fixado, foi acomodada sobre três calços, posicionados nas extremidades da placa. Dessa forma, garantiu-se que a região de abrangência dos sensores ficasse livre de qualquer contato na face inferior da placa. O posicionamento da placa superior, para a medição do sinal de referência pode ser visualizado através da Figura 29.

Figura 29 – Medição do sinal de referência.



Fonte: Autor.

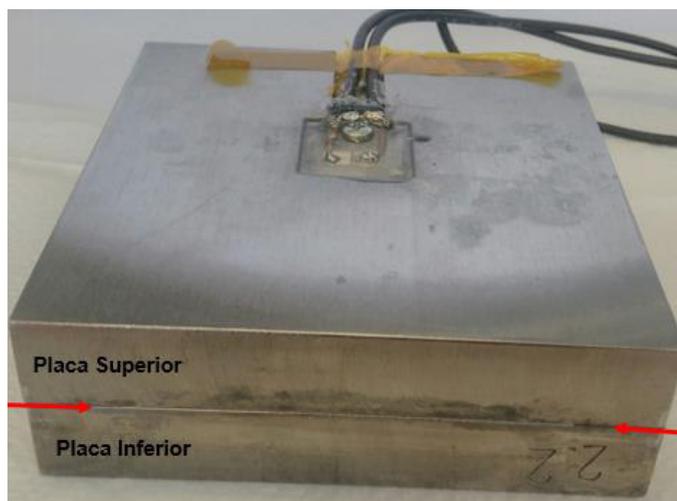
Quando uma onda ultrassônica atinge o limite da interface da placa com o ar, ela será quase que totalmente refletida. Assim, o sinal retornado apresenta uma grande quantidade de informações sobre a onda incidente.

Tanto o sinal de referência quanto os demais sinais medidos durante os ensaios foram adquiridos no domínio do tempo; dessa forma, precisaram ser convertidos para o domínio da frequência, através de uma transformada rápida de Fourier. Utilizando um VI (*Virtual Instrument*), criado no *software LabView*, essa conversão pode ser realizada ao mesmo tempo em que as informações obtidas no domínio do tempo estavam sendo coletadas. Através da interface criada em *LabView*, foi possível estabelecer uma comunicação entre o sistema de medição e o computador, facilitando a aquisição e o processamento dos dados.

A conversão dos sinais, que estão no domínio do tempo, para o domínio da frequência, foi realizada a fim de se obter sinais de amplitude, que posteriormente foram utilizados para a obtenção do coeficiente de reflexão. Tanto a amplitude de referência, quanto a amplitude obtida com a camada de óleo entre as placas, foram obtidas de maneira direta, a partir dos dados armazenados pelo osciloscópio e transmitidos para o computador.

Para obter informações a respeito da camada de óleo lubrificante, envolvida pelas duas placas de aço inox, uma gota de óleo foi depositada sobre a placa inferior, no entorno da região de abrangência do sensor localizado na placa superior. Em seguida, a placa contendo o sensor PZT foi posicionada na parte superior, comprimindo a gota até a espessura limitada pelos calços metálicos presentes na placa inferior. Essa combinação do sistema de três camadas é mostrada na Figura 30.

Figura 30 – Medição do sinal na camada de lubrificante.



Fonte: Autor.

Estando de posse das duas amplitudes dos dois sinais de medição, o coeficiente de reflexão, R , foi obtido através da divisão da amplitude do sinal medido na camada de lubrificante, A_m , pela amplitude do sinal de referência, A_{ref} . Esse cálculo é dado pela Equação (24).

$$R = \frac{A_m}{A_{ref}} \quad (24)$$

Para o cálculo da Equação (24), tanto os valores referentes à amplitude de referência quanto para a amplitude medida foram tomados a partir dos seus correspondentes picos (máximos valores), dados em função das frequências de resposta obtidas dentro largura de banda do sensor. Os valores calculados para o coeficiente de reflexão, através da Equação (24), foram armazenados e utilizados para determinação da espessura de filme.

4.4 Medição da espessura da camada de lubrificante

Com as informações coletadas nos ensaios, a determinação da espessura de filme é obtida através da aplicação de métodos algébricos. Nesse cálculo final são consideradas tanto as propriedades acústicas do lubrificante quanto dos componentes que o envolvem. Quando os materiais, constituintes do sistema de três camadas, utilizados para restringir a camada de lubrificante, são idênticos, a quantidade de energia refletida na camada de lubrificante pode ser relacionada com a espessura da película de filme formada através da Equação (25):

$$h = \left(\frac{\rho c^2}{2\pi f z} \right) \cdot \left(\frac{R^2}{1 - R^2} \right) \quad (25)$$

Na Equação (25), h representa a espessura do lubrificante, envolvido pelas duas placas de aço, ρ é a densidade do lubrificante, c é a velocidade do som no lubrificante, f é a frequência de operação do sensor piezoelétrico, z é a impedância acústica dos meios sólidos e R é o coeficiente de reflexão, dado pela Equação (24).

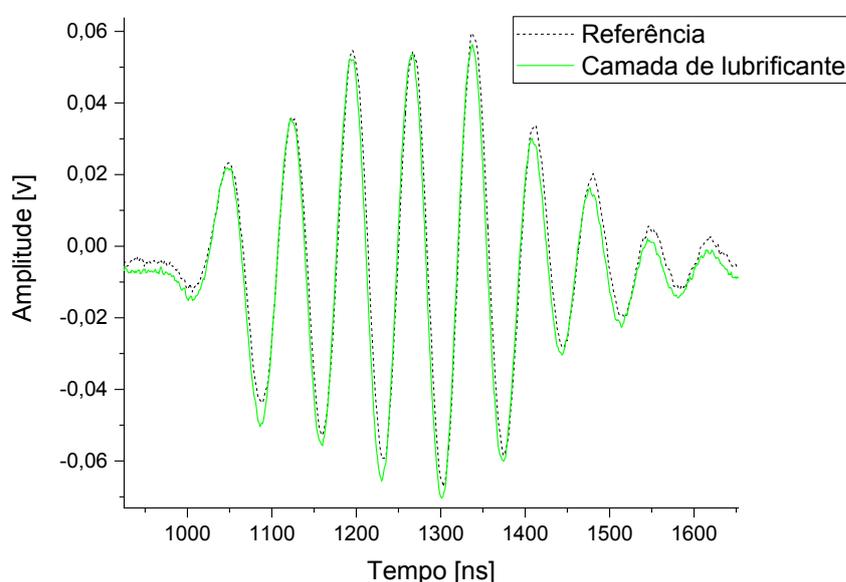
Para a determinar a espessura de filme, através da Equação (25), foram considerados apenas os valores dos coeficientes de reflexão obtidos para as frequências de resposta, localizadas dentro da largura de banda do sensor. Essa filtragem de frequências ocorre devido aos limites que devem ser respeitados para se obter informações precisas sobre a camada medida. Além disso, todos os valores obtidos em função da frequência central, foram extraídos após a transformada rápida de Fourier ter sido aplicada ao conjunto de medições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A determinação da espessura de filme lubrificante, através de sensores piezoelétricos, inicia-se com a identificação e a filtragem dos pulsos fornecidos pelo sistema de medição. Uma medição inicial foi realizada a fim de se obter informações a respeito da região de energia útil do sensor piezoelétrico; essa região é caracterizada pela largura de banda dos pulsos gerados. Após a identificação do primeiro pulso retornado, foi feito um ajuste na tela do osciloscópio a fim de isolar esse sinal dos demais. A importância dessa separação se dá pelo fato de que, além de ser o sinal com melhor resposta para a caracterização da camada de filme medida, os demais sinais tendem a conferir propagação de erros durante as medições.

Na Figura 31 é possível visualizar o primeiro pulso retornado, a partir da interface de referência (aço-ar), juntamente com o sinal contendo informações a respeito da camada de filme lubrificante, ou seja, o pulso que foi retornado a partir do sistema de três camadas, aço-lubrificante-aço.

Figura 31 – Magnitude do pulso de referência e sinal medido na camada de lubrificante.



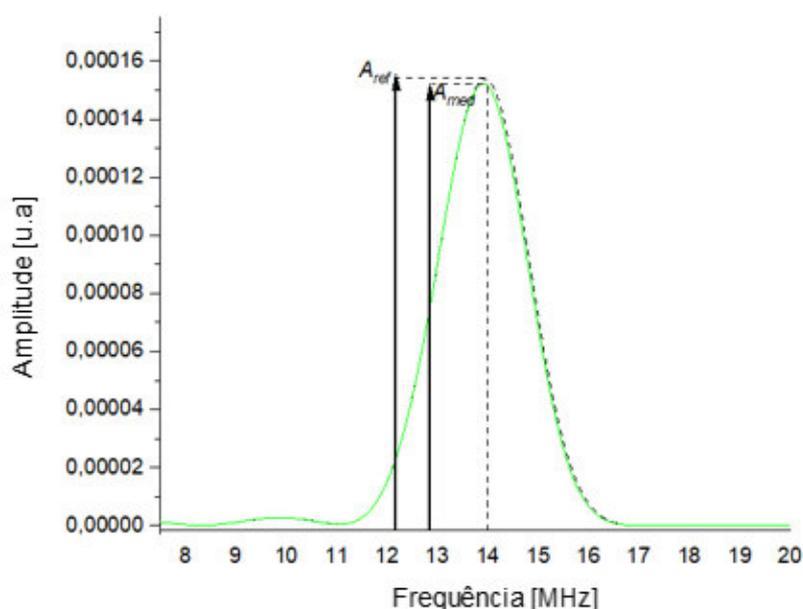
Fonte: Autor

Através da Figura 31 é possível verificar que a amplitude do sinal medido, representado pela linha contínua, sofre uma pequena diminuição em comparação ao sinal de referência (linha tracejada). Essa atenuação do sinal ocorre devido à presença de um segundo meio, mais resistente que o ar, criado entre as placas de

aço. Como a medição do sinal de referência é realizada apenas entre a placa superior e o ar, a reflexão da onda sonora ocorre, praticamente, na sua totalidade, sendo possível relacionar essa atenuação com a camada de filme lubrificante.

Para determinar o coeficiente de reflexão da onda incidente na camada de filme lubrificante e, assim, determinar a espessura do filme formado entre as placas de aço, os sinais apresentados na Figura 31, dados no domínio do tempo, foram convertidos para o domínio da frequência através de uma transformada rápida de Fourier (FFT). A FFT para do sinal apresentado na Figura 31 pode ser vista na Figura 32.

Figura 32 – FFT dos sinais medidos.



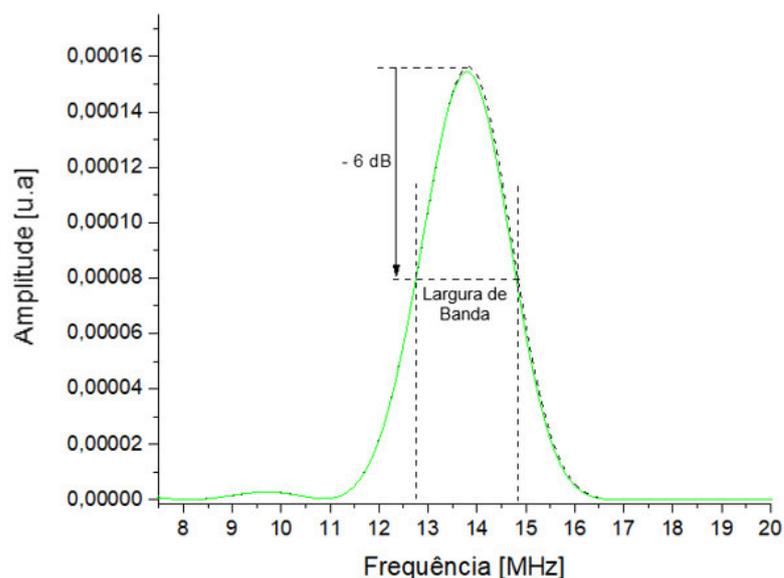
Fonte: Autor.

É possível observar que as curvas da Figura 32, referentes à FFT dos sinais medidos, tem seu valor máximo (pico) de amplitude coincidindo com a frequência de 14 MHz. Essa frequência refere-se à excitação para qual o sensor piezoelétrico, utilizado nesse estudo, mostrou-se mais efetivo. As amplitudes máximas para o sinal de referência e para o sinal medido foram determinadas a partir da frequência central desse transdutor piezoelétrico. Essas amplitudes estão indicadas na Figura 32 por A_{ref} e A_{med} , e possuem magnitudes de 0,000159088 e 0,000157001, respectivamente. Neste caso, o valor da amplitude foi plotado em uma escala arbitrária, visto que o coeficiente de reflexão, R , obtido através do cociente entre desses valores, é uma constante adimensional.

Estando de posse dos valores das amplitudes de referência e do sinal medido, o coeficiente de reflexão R , da medição inicial, foi calculado através da Equação (24). O valor encontrado para essa constante foi de 0,98686, excedendo, em três centésimos, o intervalo de $0,1 < R < 0,95$ considerado, por DWYER-JOYCE; DRINKWATER e DONOHOE (2003), como ideal para medições de espessura de filme utilizando o modelo de mola. Como o modelo de mola é caracterizado em função da resposta da rigidez da camada de filme, valores de R fora desse intervalo podem aumentar consideravelmente as chances de ocorrerem erros durante as medições. Apesar da consideração feita pelos autores, de que melhores resultados são obtidos para o intervalo de $0,1 < R < 0,95$, valores mais elevados para o coeficiente de reflexão são esperados quando as medições são realizadas entre materiais com impedâncias acústicas muito distintas, como é o caso do aço e do fluido utilizados para esse estudo.

A partir dos valores de amplitude máxima encontrados na medição inicial, a região de energia útil do sensor foi delimitada pela definição da largura de banda para a frequência central do sensor piezoelétrico. Essa largura de banda foi definida em -6 dB, a partir da amplitude máxima do sinal de referência, produzido pela excitação do sensor em uma frequência de 14 MHz, conforme sugere a norma ASTM E 1065-14. Nessa região encontram-se as informações mais relevantes a respeito da camada de lubrificante presente entre as placas de aço, além de uma melhor relação sinal-ruído. A Figura 33 mostra a largura de banda encontrada para o sensor piezoelétrico atuando com uma frequência de 14 MHz.

Figura 33 – Definição da largura de banda.



Fonte: Autor

Na Figura 33 é possível identificar que a região representada pela energia útil do sensor está compreendida no intervalo de frequências entre 12,9 MHz e 14,9 MHz. Esse intervalo de frequências está presente em todas as medições realizadas. Vinte e uma repetições foram realizadas utilizando a frequência central de 14 MHz. As frequências pertencentes à largura de banda, dos sinais retornados, foram utilizadas para se obter os devidos coeficientes de reflexão correspondentes e os ensaios seguiram a rotina realizada para as medições de referência, sendo que, no final, foram obtidos os valores de espessura de filme através da Equação (26).

$$h = \left(\frac{(\rho c^2)}{2\pi f z} \right) \cdot \left(\frac{R^2}{1 - R^2} \right) \quad (26)$$

Além do coeficiente de reflexão, R , obtido pelo cociente entre as amplitudes dos sinais de medição, o cálculo da espessura de filme através da Equação (26) requer o conhecimento de algumas características acústicas dos materiais utilizados para compor o sistema de três camadas, além da frequência central utilizada.

Utilizando o método para determinar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas através de diferentes materiais, descrito na Seção 4.2, foi possível determinar a velocidade do som correspondente ao lubrificante ExxonMobil Spectrasyn 4 e às placas de aço inox martensítico 1.4313 - X3CrNiMo13-4. Esses valores, juntamente com a impedância acústica e a densidade para cada um dos materiais, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades acústicas do lubrificante e do aço.

	Velocidade do som, c [m/s]*	Impedância Acústica, z [MRayl]	Densidade, ρ [kg.m ³]
Óleo (<i>ExxonMobil Spectrasyn 4</i>)	1450	1,19	820
Aço Inox Martensítico (1.4313-X3CrNiMo13-4)	5883	45,4	7700

*Ondas longitudinais

Fonte: Autor; (BS, 2014).

Os valores da densidade, ρ , presentes na Tabela 2, foram extraídos da literatura, sendo usado a norma BS EN 10088-1:2014, para obter o valor da densidade das placas de aço inox e para a densidade do óleo lubrificante foram utilizadas as informações do fabricante ExxonMobil. Já os valores da impedância acústica, z , foram obtidos através do produto entre a velocidade do som, c , e a densidade, ρ , apresentados. Tanto a velocidade do som quanto a densidade, calculadas a partir do

método descrito na Seção 4.2, apresentam uma ótima equivalência aos valores encontrados, também de maneira experimental, por HUNTER (2018) e DWYER-JOYCE; DRINKWATER e DONOHOE (2003), demonstrando a confiabilidade do método utilizado.

Uma vez que os valores das propriedades acústicas dos dois meios foram obtidos, o procedimento descrito na Seção 4.3 foi executado para uma faixa de frequências entre 0 e 20 MHz, a fim de verificar, também, o comportamento do sistema de medição para valores fora da largura de banda. Porém, esses valores não foram utilizados, já que as melhores respostas foram obtidas quando o sensor foi excitado na frequência de 14 MHz. Dessa frequência central foram extraídos os valores dos coeficientes de reflexão de cada frequência dentro da largura de banda, que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente de reflexão, R , para largura de banda (-6 dB).

Frequência, f [MHz]	Coeficiente de Reflexão, R [u.a.]
12.9	0,99480
13.0	0,99399
13.3	0,99427
13.6	0,99399
13.9	0,98134
14.0	0,98686
14.3	0,98134
14.6	0,98124
14.9	0,97671

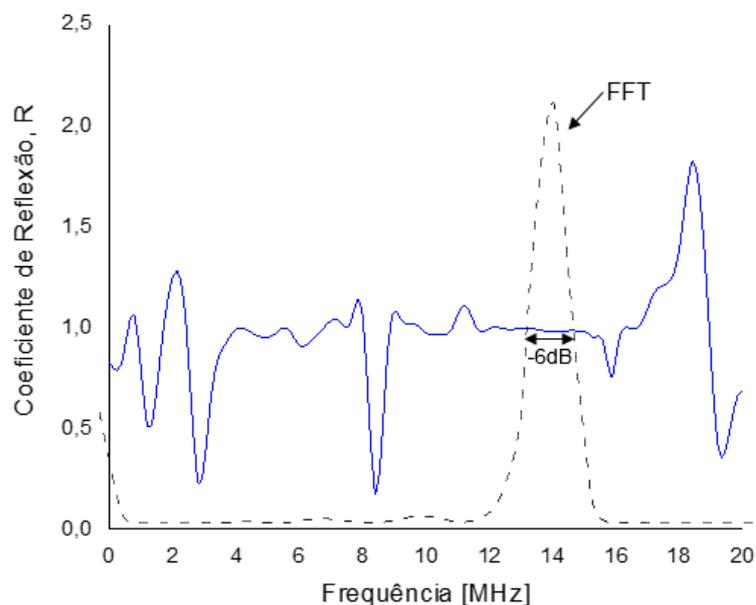
Fonte: Autor.

Como esperado, para as frequências mais baixas da largura de banda, os valores do coeficiente de reflexão se aproximam da unidade, apresentando um leve decréscimo com o aumento da frequência. Os valores das impedâncias acústicas, para o aço e o lubrificante utilizados, apresentados na Tabela 2, já evidenciavam a ocorrência de uma diferença, bastante significativa, entre a impedância no sólido e no fluido. Para o caso de uma interface aço-óleo, como é utilizado nesse estudo, a energia acústica da onda é, praticamente, toda refletida a partir do limite sólido-líquido SCHIRRU (2017).

Os valores do coeficiente de reflexão foram utilizados para determinar a espessura de filme presente entre duas superfícies estacionárias. O comportamento do coeficiente de reflexão, ao longo da faixa de frequência adotada neste estudo, pode

ser visualizado na Figura 34, que também apresenta o espectro da transformada rápida de Fourier na frequência central do sensor piezoelétrico.

Figura 34 – Coeficiente de reflexão, R , e espectro do sinal de referência.

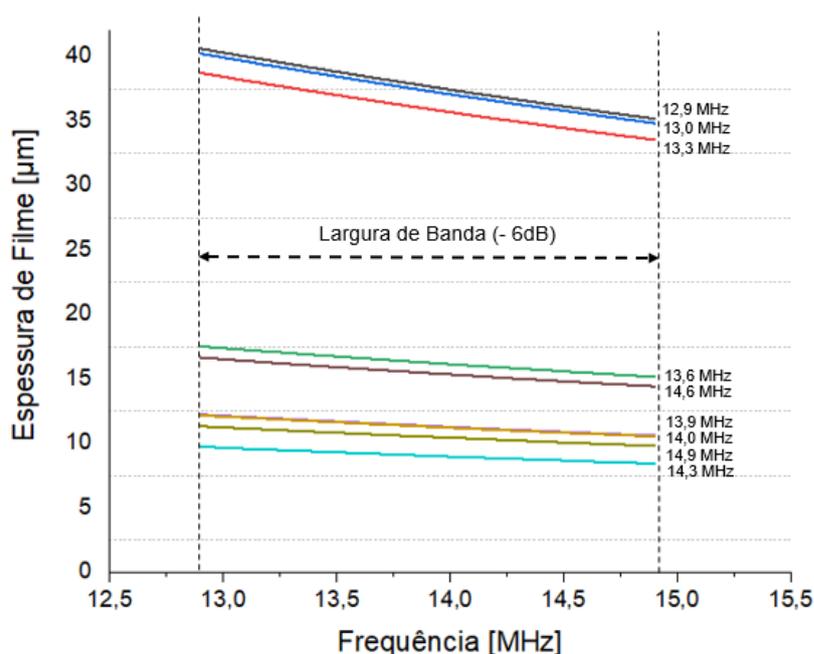


Fonte: Autor.

Analisando a curva do coeficiente de reflexão, R , mostrada na Figura 34, dentro da faixa de frequências em que foi calculado, pode se identificar alguns pontos mínimos caracterizados por frequências de ressonância. Esses pontos são observados para frequências menores que a frequência central do sensor PZT, mais precisamente para as frequências de 2,82 e 8,4 MHz. Caso esses picos de frequência de ressonância fossem observados dentro da região da largura de banda (- 6 dB), poderia ser um indicativo de que as espessuras de filme obtidas nos ensaios estivessem apresentando valores acima dos esperados para esse estudo, já que esse modelo é, geralmente, utilizado para medir espessuras acima de 10 μm (KAI; QINGFENG; WEI; JUNNING *et al.*, 2015; OUYANG; ZHOU; JIN; YAN *et al.*, 2020; ZHANG; DRINKWATER; DWYER-JOYCE, 2005). Além da identificação dos mínimos de frequências ressonantes, o espectro do sinal de referência foi plotado junto com o coeficiente de reflexão, a fim de evidenciar a região utilizada para o calcular os valores de espessura de filme entre as duas superfícies de aço. É possível notar que a região limitada pela largura de banda apresenta coeficientes de reflexão muito próximos à unidade, sendo que os principais valores obtidos para essa constante já foram apresentados na Tabela 3.

Os valores encontrados para o coeficiente de reflexão, dentro da largura de banda do sensor PZT de 14 MHz, foram utilizados para determinar a espessura de filme contida entre as duas placas de aço. As fitas metálicas, coladas na superfície da placa inferior do sistema de três camadas, tiveram a função de criar um canal com altura conhecida de 10 μm . Estando o lubrificante limitado pela altura desse canal, os valores de espessura de óleo obtidos através das técnicas descritas neste trabalho foram comparados com o valor de referência. Os coeficientes de reflexão das frequências de resposta foram utilizados para calcular a espessura de filme detectada dentro da largura de banda. Os valores de espessura encontrados para a camada de filme lubrificante, formada entre as duas placas de aço inox, foram plotados em função da frequência e são apresentados na Figura 35.

Figura 35 – Espessura de filme lubrificante medida com sensores piezoelétricos.



Fonte: Autor.

A Figura 35 apresenta os valores de espessura obtidos através das medições utilizando um sensor piezoelétrico com frequência central de 14 MHz. Os valores de frequências apresentados junto as curvas de espessura de filme correspondem as frequências de resposta, determinadas pela transformada de Fourier, para as quais os valores de espessura foram encontrados. Para a maioria das frequências de resposta, dentro da largura de banda do sensor, valores de espessura coerentes foram obtidos. Para a frequência de resposta de 14,9 MHz valores de espessura de filme lubrificante entre 10 e 11,3 μm foram obtidos, mostrando excelente

concordância com o valor de referência adotado. Da Tabela 3 é possível verificar que o coeficiente de reflexão correspondente a essa frequência apresenta um valor de 0,97671, o menor entre as frequências da largura de banda. Para frequências de resposta variando de 13,9 a 14,3 Mhz, espessuras entre 10,1 e 12,2 μm foram registradas.

Ainda sobre as espessuras de filme apresentadas na Figura 35, é possível identificar que as espessuras obtidas na faixa de frequências de resposta entre 12,9 e 13,3 MHz são muito elevados. Os valores de espessura encontrados para esse intervalo de frequências varia de 33,5 a 40,6 μm , muito acima do valor de referência. Os valores dos coeficientes de reflexão correspondentes a essas frequências, apresentados na Tabela 3, sugerem uma maior disposição a erros decorrentes durante o processo de medição. O coeficiente de reflexão pra essas três componentes apresenta valores acima de 0,99. ZHANG; DRINKWATER e DWYER-JOYCE (2005) sugerem que, para valores do coeficiente de reflexão acima de 0,9, a propensão aos erros de medição aumenta significativamente. No entanto, isso não invalida a técnica, visto que sempre deve ser levado em consideração o nível de confiabilidade exigido para cada medição.

6 CONCLUSÕES

Uma configuração experimental eficaz e precisa foi apresentada, para a medição de espessuras de filmes finos, para um sistema de três camadas do tipo aço-óleo-aço. Tanto os equipamentos quanto a técnica, propostos neste estudo, se mostraram capazes de determinar espessuras de lubrificante na ordem de 10 μm . O coeficiente de reflexão, R , fundamental para a obtenção dos valores da camada de lubrificante, foi calculado utilizando o modelo de mola. Para o lubrificante utilizado, valores acima de 0,9 foram encontrados para o coeficiente de reflexão, evidenciando o fato de que, para óleos de baixa viscosidade, o coeficiente tende a unidade. As medições de espessura de filmes finos, utilizando técnicas fundamentadas na resposta da camada líquida, apresentam elevada dependência dos valores do coeficiente de reflexão. As propriedades acústicas do lubrificante e das placas de aço foram determinadas de maneira experimental, sendo fundamental o conhecimento dessas propriedades quando se pretende determinar a espessura de um filme de óleo fino através das equações do modelo de mola.

A espessura da camada de lubrificante entre duas superfícies estacionárias foi determinada a partir dos equipamentos e técnicas propostos neste estudo. A faixa de valores entre 10 μm e 17,5 μm , obtida através das medições, apresenta ótima concordância com o valor da camada de referência e demonstra a precisão do equipamento. Apesar de os resultados apresentados evidenciarem uma ótima concordância, mais testes devem ser realizados a fim de garantir maior confiabilidade nas medições. A precisão na colagem das fitas metálicas sobre a placa de aço inferior deve ser considerada, principalmente quando essa for a única referência para as medições.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de explorar o sistema de medição proposto neste trabalho e aprofundar o conhecimento sobre as técnicas de medição de espessura de filme lubrificante, são listadas as seguintes sugestões:

- Aplicar a técnica apresentada, para a medição de espessura de diferentes óleos, a fim de comparar comportamento do coeficiente de reflexão para lubrificantes com diferentes propriedades acústicas;
- Propor um modelo de calibração através da utilização diferentes espessuras de filme conhecidas;
- Investigar e comparar os diferentes modelos de medição de espessura de filme já existente, apontando as principais vantagens e desvantagens na utilização de cada modelo.
- Adaptar o sistema de medição a tribômetros e também a sistemas mecânicos reais, de forma a permitir a medição *in-situ* de espessura de filmes lubrificantes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLISTON-GREINER, A. F.; GREENWOOD, J. A.; CAMERON, A. Thickness Measurements and Mechanical Properties of Reaction Films Formed By Zinc Dialkyldithiophosphate During Running, 1987, Institution of Mechanical Engineers.

BANKS, B.; OLDFIELD, G. E.; RAWDING, H. Ultrasonic flaw detection in metals : theory and practice. **London : Iliffe Books**, p. 256, 1962. Book.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. **Tribology International**, 40, n. 8, p. 1227-1238, 2007/08/01/ 2007.

CROOK A. W. , S. The lubrication of rollers. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A**, 250, n. 981, p. 387 - 409, 1958.

DRINKWATER, B.; DWYER-JOYCE, R.; CAWLEY, P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid—solid interface. **Proc. R. Soc. Lond. A**, 452, n. 1955, p. 2613-2628, 1996.

DWYER-JOYCE, R. S. The Application of Ultrasonic NDT Techniques in Tribology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, 219, n. 5, p. 347-366, 2005.

DWYER-JOYCE, R. S.; DRINKWATER, B. W.; DONOHOE, C. J. The Measurement of Lubricant-Film Thickness Using Ultrasound. **Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 459, n. 2032, p. 957-976, 2003.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. Contact of nominally flat surfaces. **Proc. R. Soc. Lond. A**, 295, p. 300 - 319, 1966.

GUANGTENG, G.; CANN, P. M.; OLVER, A. V.; SPIKES, H. A. An experimental study of film thickness between rough surfaces in EHD contacts. **Tribology International**, 33, n. 3, p. 183-189, 2000/04/01/ 2000.

GUNSEL, S.; SPIKES, H. A.; ADERIN, M. In-Situ Measurement of ZDDP Films in Concentrated Contacts. **Tribology Transactions**, 36, n. 2, p. 276-282, 1993/01/01 1993.

HANDBOOK, A. **Vol. 17 Nondestructive Evaluation and Quality Control**. 1992. (ASM International The Materials Information Company).

HARPER, P.; DWYER-JOYCE, R. S.; SJÖDIN, U.; OLOFSSON, U. Evaluation of an Ultrasonic Method for Measurement of Oil Film Thickness in a Hydraulic Motor Piston Ring. *In: Tribology and Interface Engineering Series*: Elsevier, 2005. v. 48, p. 305-312.

HUNTER, A. Ultrasonic Measurements of the Roll Bite in the Cold Rolling of Steel. 2018. Thesis (Ph.D.).

HUNTER, A.; CARRETTA, Y.; DWYER JOYCE, R. Lubricant film thickness measurements in cold rolling using ultrasound. **World Tribology Congress**, Beijing, China, September 17 - 22, 2017.

HUNTER, A.; DWYER-JOYCE, R.; HARPER, P. Calibration and validation of ultrasonic reflection methods for thin-film measurement in tribology. **Measurement science and technology**, 23, n. 10, p. 105605, 2012.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Butterworth-Heinemann, 2017. 0081009518.

JINGPIN, J.; QIANG, Z.; BIN, W.; CUNFU, H., 2008, **Measurement of lubricant film thickness using normal incidence ultrasound**. 836-839.

JOHNSTON, G. J.; WAYTE, R.; SPIKES, H. A. The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contacts. **Tribology Transactions**, 34, n. 2, p. 187-194, 1991/01/01 1991.

KAI, Z.; QINGFENG, M.; WEI, C.; JUNNING, L. *et al.* Ultrasonic measurement of oil film thickness between the roller and the inner raceway in a roller bearing. **Industrial Lubrication and Tribology**, 67, n. 6, p. 531-537, 2015.

KATSOURAS, I.; ASADI, K.; LI, M.; VAN DRIEL, T. B. *et al.* The negative piezoelectric effect of the ferroelectric polymer poly(vinylidene fluoride). **Nature Materials**, 15, n. 1, p. 78-84, 2016/01/01 2016.

OUYANG, W.; ZHOU, Z.; JIN, Y.; YAN, X. *et al.* Ultrasonic measurement of lubricant film thickness distribution of journal bearing. 91, n. 6, p. 065111, 2020.

SCHIRRU, M. **Development of an ultrasonic sensing technique to measure lubricant viscosity in engine journal bearing in-situ**. Springer, 2017. 3319534084.

SHEU, S.; WILSON, W. R. D. Mixed Lubrication of Strip Rolling. **Tribology Transactions**, 37, n. 3, p. 483-493, 1994/01/01 1994.

SPIKES, H. A. In Situ Methods for Tribology Research. **Tribology Letters**, 14, n. 1, p. 1-1, 2003/01/01 2003.

TATTERSALL, H. The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 6, n. 7, p. 819, 1973.

UEDA, M.; SPIKES, H.; KADIRIC, A. In-situ observations of the effect of the ZDDP tribofilm growth on micropitting. **Tribology International**, 138, p. 342-352, 2019/10/01/ 2019.

ZHANG, J.; DRINKWATER, B. W.; DWYER-JOYCE, R. S. Calibration of the ultrasonic lubricant-film thickness measurement technique. **Measurement science and technology**, 16, n. 9, p. 1784, 2005.

ZHANG, K.; MENG, Q.; GENG, T.; WANG, N. Ultrasonic measurement of lubricant film thickness in sliding Bearings with overlapped echoes. **Tribology International**, 88, p. 89-94, 2015/08/01/ 2015.