

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

Centro de Ciências Exatas

Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

**CÉLULA ACÚSTICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LÍQUIDOS, NÃO
DESTRUTIVA, USANDO ULTRASSOM**

Acadêmico: Miguel Oswaldo Garson Sacco

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá, 01 de Março de 2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

Centro de Ciências Exatas

Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

**CÉLULA ACÚSTICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LÍQUIDOS, NÃO
DESTRUTIVA, USANDO ULTRASSOM**

Trabalho de Conclusão de Curso ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do professor José Roberto Dias Pereira, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Física.

Acadêmico: Miguel Oswaldo Garson Sacco

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá, 01 de Março de 2024

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus por permitir chegar a esta conclusão mesmo frente a todas as situações que apareceram no caminho e a Mãe Rainha por sua grandiosa intercessão.

Aos professores que se dedicaram em seu trabalho de forma ética e coerentes sendo fonte de conhecimento e em especial ao professor doutor José Roberto Dias Pereira por me orientar nessa etapa final da graduação.

Ao meu pai Miguel e minha avó Pedrina por todo o auxílio durante esses anos de graduação.

Aos meus amigos, Maria, Rafael, Erick e Luan que compartilharam essa etapa da minha vida e me apoiaram e auxiliaram em todo o processo.

E por último ao colégio Platão, em especial ao professor Diego, que me auxiliaram permitindo que tivesse os meios para produzir esse trabalho e permitindo minha ausência em alguns momentos para que pudesse finalizar este trabalho.

Resumo

Células acústicas são equipamentos que utilizam do efeito piezoelétrico para gerarem (efeito piezoelétrico inverso) ou captarem (efeito piezoelétrico direto) ondas ultrassônicas e transformar em sinais elétricos como o objetivo de estudar propriedades físicas de um material ou encontrar imperfeições ou impurezas em um meio em questão e para a formação de imagens que são amplamente usadas em processos de diagnósticos médicos ou industriais. Acabam sendo bastante utilizadas devido a terem métodos de aplicação do ultrassom não destrutivos, chamados END (ensaios não destrutivos) e também pela característica de que o ultrassom pode se propagar em meios sólido, líquidos e gasosos, diferente da luz que não se propaga em meios sólidos que não tenham certo nível de transparência. Para este trabalho foi revisado algumas aplicações do método pulso-eco (por ser uma aplicação de END), proveniente de transdutor piezoelétrico, em estudos das características reológicas de líquidos, tais como a viscosidade e a densidade através das informações obtidas da onda ultrassônica emitida e recebida pelo transdutor, tais como a atenuação da onda e tempo de propagação da onda no meio em estudo. Foi feito um comparativo de trabalhos antes e depois de 2015 com objetivo de mostrar que este método ainda é bastante utilizado devido as suas vantagens frente a outros métodos.

Palavras-chave: Células Acústicas, Ultrassom, Propriedades Físicas, END, Reologia de Fluidos, Viscosidade, Densidade, Método Pulso-eco, Transdutor Piezoelétrico.

Abstract

Acoustic cells are devices that exploit the piezoelectric effect to generate (inverse piezoelectric effect) or detect (direct piezoelectric effect) ultrasonic waves and convert them into electrical signals. These signals are subsequently utilized to investigate the physical properties of materials, identify imperfections or impurities within a medium of interest, and create images that are extensively employed in medical and industrial diagnostic processes. The widespread use of acoustic cells can be attributed to the utilization of non-destructive ultrasonic methods, referred to as NDT (non-destructive testing), and the inherent property of ultrasound to propagate in solid, liquid, and gaseous media, unlike light which is incapable of propagating in solid media that lack a certain level of transparency. This study presents a review of certain applications of the pulse-echo method (an NDT application) emanating from a piezoelectric transducer in the investigation of the rheological characteristics of liquids, such as viscosity and density. The information obtained from the ultrasonic wave emitted and received by the transducer, such as wave attenuation and wave propagation time within the medium under investigation, is utilized. A comparative analysis of studies conducted before and after 2015 was undertaken with the objective of demonstrating the continued widespread use of this method due to its advantages over alternative methods.

Keywords: Acoustic Cells, Ultrasound, Physical Properties, NDT, Rheology of Fluids, Viscosity, Density, Pulse-echo Method, Piezoelectric Transducer.

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	i
Abstract	i
Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Símbolos	iv
Introdução	1
1- Ultrassom	2
1.1-Conceitos básicos de onda	3
1.2-Uso do ultrassom	7
1.2.1-Medicina	7
1.2.2-Industria	8
2- Piezoelectricidade e Piezoelétricos	10
2.1- Piezocerâmicas	16
2.1- Piezopolímeros	19
2.3- Piezocristais	21
2.4- Piezocompósitos	21
3- Ferroelectricidade	24
4- Reologia de fluidos	29
4.1- Densidade	29
4.2- Viscosidade	30
4.3- Compressibilidade do fluido e módulo de elasticidade volumétrico	32
4.4- Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos	32
5- Transdutores Piezoelétrico	34
5.1- Configuração de transdutores piezoelétricos	36
5.2- Campo Acústico	36

6- Uso dos transdutores piezoelétricos	38
6.1- Sistema de medição	38
6.2- Transdutores de pulso-eco	38
6.2.1- Formação de imagem	40
6.2.2- Densidade de fluidos pelo método pulso-eco	44
6.2.2.1 – Uso de células acústicas da década de 40 até atualmente.....	46
6.3- Sonar	47
7- Conclusão	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

Lista de Figuras

Figura I - Faixa de frequência das ondas sonoras.	2
Figura II - Comprimento de onda e frequência de uma onda senoidal.	3
Figura III - Representação esquemática de um sistema com (a) efeito piezoelétrico e (b)efeito piezoelétrico reverso.	11
Figura IV - Direção de aplicação das grandezas ao qual os subíndices descrevem.	15
Figura V - Configuração das direções do PZT e eixo de orientação do material piezoelétrico.	15
Figura VI - Coeficientes nas matrizes elastoelétricas para (a) PZT (cristal de classe 6 mm), (b) PVDF (2 mm), (c) LiNbO 3 (3 m) e (d) PMN-PT (4mm).	18
Figura VII - Estruturas do polifluoreto de vilinideno nas fases α , β , e γ	20
Figura VIII – Estruturas de materiais piezocompósitos: (a) conectividade 1-3, (b) conectividade 2-2 e (c) conectividade 0-3. O polímero é mostrado uniformemente em cinza, e a cerâmica é texturizada. A área no canto superior direito indica uma das superfícies às quais o eletrodo é aplicado.	21
Figura IX - Organização de conjuntos entre Piezoelétricos, Piroelétricos e Ferroelétricos.	25
Figura X - Domínios ferroelétricos (a) Situação inicial sem a presença de um campo elétrico, (b) com a presença de um campo elétrico, (c) após a retirada do campo elétrico.	26
Figura XI - Curva de histerese ferroelétrica genérica.	26
Figura XII – Polarização de ferroelétricos em função da temperatura.	28
Figura XIII - Gráfico Temperatura versus Viscosidade em comparação dos três óleos estudados.	31
Figura XIV - Subclassificação dos fluidos não-Newtonianos.	33
Figura XV - Representação do feixe acústico de transdutores convencionais e sua divisão de campo acústico.	37
Figura XVI - Pulso-eco e interfaces em diferentes posições.	38
Figura XVII - Exemplificação de picos obtidos pelo pulso e pelo eco do ultrassom.	39
Figura XVIII - Direção das resoluções em uma representação de uma onda ultrassônica.	41
Figura XIX - Ultrassonografia ocular, exemplo de imagem de modo A.	42

Figura XX - Imagem de ultrassonografia modo-B em plano transversal da artéria carótida comum.....	42
Figura XXI - Modo M da valva mitral com estenose reumática e espessamento grau 2, com a média de espessamento de 4,5 mm.....	43
Figura XXII -Ultrassonografia com Doppler colorido da artéria carótida esquerda mostra fluxo arterial normal sem estenose significativa.	44
Figura XXIII - Transdutor de duplo elemento com emissor PZT e receptor PVDT....	45

Lista de Tabelas

Tabela I - Velocidade da onda ultrassônica em diferentes meios de propagação.....	4
Tabela II - Impedância acústica de diferentes materiais.	5
Tabela III - Variáveis e coeficientes das equações constituintes piezoelétricas.....	12
Tabela IV - Principais materiais piezoelétricos comerciais e as respectivas constantes.	19
Tabela V - Parâmetros de ajuste de diferentes modelos ao comportamento reológico da polpa de jabuticaba.	31

Lista de Símbolos

2D	Duas dimensões espaciais
AlN	Nitreto de Alumínio
BaTiO ₃	Titanato de bário
END	Ensaio não destrutivo
Hz	Hertz
LiNbO ₃	Niobato de Lítio
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
NaCl	Cloreto de sódio
Np	Nepers
Pa	Pascal
PIB	Poliisobuteno
PbTiO ₂	Titanato de chumbo
PbZrO ₃	Zirconato de chumbo
PLLA	Ácido polilático
PLGA	Ácido poli(lático-co-glicólico)
PVDF	Polifluoreto de vinilideno
PZT	Titanato-zirconato de chumbo
rads	Radianos
s	Segundos

Introdução

As tecnologias de ultrassom têm despertado grande interesse na área industrial, sendo aplicadas em diversos processos, em equipamentos de solda, corte, limpeza e diagnóstico. O ultrassom é uma onda mecânica de alta frequência, acima dos 20 kHz assim como proposto na Figura I. Neste trabalho iremos estudar que o ultrassom se propaga em meios sólidos, líquidos e gasosos e pode ser gerado por transdutores piezoelétricos, que convertem energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa.

Comumente, os transdutores ultrassônicos são usados para produção de ondas mecânicas que permitam fazer limpeza, perfuração, visão de sonar ou geração de imagens em exames diagnósticos. Neste projeto iremos estudar sobre o uso de um transdutor ultrassônico do tipo pulso-eco (método não destrutivo) para estudar propriedades e características reológicas de um meio líquido (viscosidade e densidade) através de dados obtidos através da medição dos parâmetros acústicos desse meio, como velocidade de propagação, impedância acústica característica, atenuação e espalhamento. A velocidade de propagação da onda ultrassônica depende da densidade e da viscosidade do meio, a impedância característica depende da densidade, da viscosidade e da tensão superficial do meio, a atenuação da onda ultrassônica depende da densidade, da viscosidade e da temperatura do meio, o espalhamento da onda ultrassônica depende da densidade, da viscosidade e da rugosidade das superfícies do meio.

Com isso, podemos usar essas informações obtidas, para o controle de qualidade de substâncias líquidas, monitoramento de processos industriais, pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e diagnósticos de falhas de equipamentos.

A célula de medição pulso-eco consiste em dois transdutores piezoelétricos, um para gerar a onda ultrassônica e outro para receber o eco. O tempo de propagação da onda ultrassônica entre os dois transdutores é medido e usado para calcular a densidade e a viscosidade do meio.

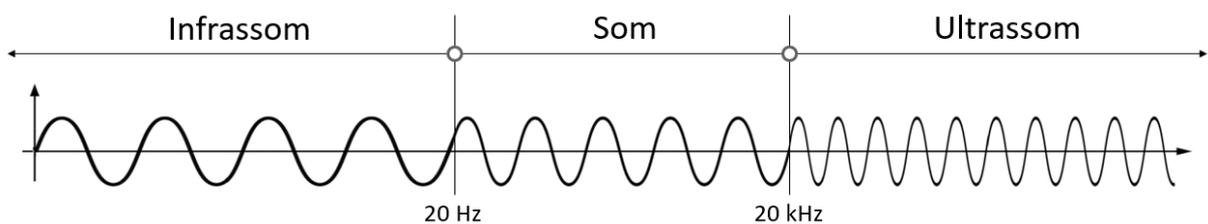
O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sobre o uso de transdutor piezoelétricos para a análise de propriedades reológicas de líquidos assim como o uso dessas propriedades para formação de imagem ou análises beneficiadas pelo conhecimento reológico do líquido.

1- Ultrassom

O ultrassom são ondas mecânicas longitudinais e tridimensionais, que ultrapassam o audível do ser humano, ou seja, ondas mecânicas que tem frequência maiores do que 20 kHz. Por serem ondas mecânicas, necessitam de um meio para se propagar pois “quando uma onda mecânica passa através da matéria, o deslocamento do estado de equilíbrio ocorre, e tal perturbação se desloca através do meio. Por fim, o sistema retorna ao equilíbrio, para um estado não perturbado.” (VERRUC; PRUDÊNCIO, 2018, p. 3) onde se verifica apenas a transferência de energia entre as partículas do meio sem haver transferência da própria matéria. Temos que o movimento da frente de onda se de forma progressiva e o movimento particular de cada partícula do meio é periódico em relação a um ponto de equilíbrio (ALMEIDA; SILVA; FERREIRA; 2006).

Podemos caracterizar as ondas mecânicas levando em consideração a sua frequência que é a medida do número de ciclos completos de sua função de onda dentro de um segundo. Na figura I podemos observar os grupos de ondas mecânicas de acordo com a faixa de frequência ao qual pertence.

Figura I - Faixa de frequência das ondas sonoras.



Fonte: VERRUCK; PRUDENCIO (2018).

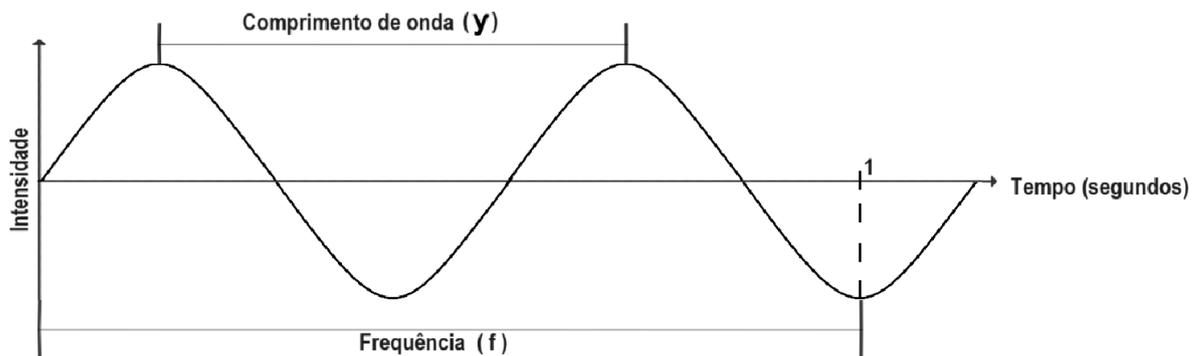
As ondas sonoras, em muitos aspectos, se comportam como a luz, obedecendo aos mesmos princípios, como por exemplo a sua velocidade, onde a onda irá se propagar com uma velocidade característica dependente das propriedades do meio e não da própria onda em si. Porém as ondas mecânicas podem ser transferidas para um meio sólido, característica que a luz não apresenta, tendo assim uma vantagem no uso do ultrassom no estudo de materiais.

1.1- Conceitos básicos de onda

O comprimento de onda é a distância entre dois pontos consecutivos da função de onda de mesma fase ou também definido como a distância linear entre dois pontos entre dois estados equivalentes de vibração na função de onda. A fase de uma onda refere-se à posição relativa de uma onda em relação a um ponto de referência, também podemos definir a fase de uma onda como sendo a medida do deslocamento horizontal de um ponto da sua função de onda em relação a um ponto de referência.

Na figura II abaixo está demonstrado o comprimento de onda e a frequência da onda em uma onda senoidal simples.

Figura II - Comprimento de onda e frequência de uma onda senoidal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A velocidade de propagação de uma onda, descrita pela distância percorrida em um segundo pode ser descrita pela seguinte expressão

$$v = \lambda \cdot f \quad (1.1)$$

onde v é a velocidade da onda em metros por segundo, λ é o comprimento de onda medido em metros e f é a frequência (número de vezes que se completa um ciclo de vibração por segundo) medida em Hertz (Hz). Com a manipulação algébrica da expressão (1.1), podemos obter uma expressão para o comprimento de onda assim como se segue

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.2)$$

Na tabela I, temos alguns exemplos da velocidade, em metros por segunda, da onda ultrassônica dependendo do meio ao qual está propagando.

Tabela I - Velocidade da onda ultrassônica em diferentes meios de propagação.

Meio de propagação	Velocidade (m/s)
Ar	330
Água	1480
Gordura	1460
Músculo	1620
Tecidos moles	1540
Osso	4080
Fígado	1555
Sangue	1560

Fonte: Adaptado Salvi Junior e Mustafá (2021).

Através da frequência podemos encontrar o período, tendo que um é o inverso do outro, assim como demonstrado a seguinte expressão

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.3)$$

Quando um ultrassom é emitido em um meio, sua perturbação gera uma pressão ao qual podemos definir levando em consideração a pressão natural do meio não perturbado e a pressão total do meio após a perturbação pela seguinte expressão:

$$p(t) = P(t) - P_0 \quad (1.3)$$

onde $p(t)$ é a pressão da onda, $P(t)$ é a pressão total e P_0 é a pressão natural do meio não perturbado e todas dadas em Pascal (ALMEIDA; SILVA; FERREIRA. 2006).

Dependendo do meio ao qual a onda se propaga, encontrara um grau de resistência ao movimento do meio maior ou menor, característica definida como impedância acústica. Existem vários conceitos diferentes de impedância acústica, mas usaremos a princípio o conceito de impedância acústica específica, dada pela expressão

$$Z = \frac{p}{v} \quad (1.4)$$

ou

$$Z = \rho v \quad (1.5)$$

onde a impedância acústica específica Z é dado em Rayl (equivalente a $\text{gm/cm}^2\text{s}$), a pressão sonora p é dada em Pascal, a velocidade das partículas no meio é dada em metros por segundo (m/s), a massa volumétrica ρ é dada em quilogramas por metros cúbicos e a velocidade de propagação da onda mecânica é dada em metros por segundo (ALMEIDA; SILVA; FERREIRA. 2006). A impedância acústica é um elemento de grande importância para ser considerado em situações de uso do ultrassom, pois é a diferença de impedância acústica entre dois meios que irá determinar quando da onda será transmitida e quanto da onda será refletida. Na tabela II temos alguns exemplos de valores de impedâncias ao quais foram citados no trabalho da referência Biscegli (2004).

Tabela II - Impedância acústica de diferentes materiais.

Material	Impedância Acústica (Rayls)
Ar	0,00043
Gordura	1,38
Óleo	1,40
Água	1,54
Músculo	1,70
Tecidos moles	1,65
Fígado	1,65
Sangue	1,61
Osso	5,3

Fonte: Adaptado de Biscegli (2004) e Salvi Junior e Mustafá (2021).

Também podemos definir a intensidade sonora, sendo está a potência da energia de vibração da onda que passa por uma superfície unitária perpendicular a direção de propagação da onda no instante ao qual quer ser analisado.

Outro elemento importante é a atenuação de uma onda mecânica, caracterizada pela perda progressiva de energia acústica (ou de sua intensidade) em sua propagação e que pode ser observado pela diminuição da amplitude da onda e que pode ser expressa pela equação

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (1.6)$$

$$\alpha = 20 \ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \beta \quad (1.7)$$

onde P é a pressão do meio após a propagação da onda, P_0 é a pressão original do sistema sem a propagação da onda e α é a atenuação do meio em Np (FRANCISCO, 2013). Temos também que o coeficiente de atenuação pode ser descrito em relação a intensidade da pressão acústica obtendo uma equação análoga a (1.6), sendo esta

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1.8)$$

A atenuação pode ser influenciada por diferentes processos como o espalhamento, a reflexão e pela absorção da onda. O espalhamento de uma onda ocorre devido ao feixe da onda passar por uniformidades existentes no meio de propagação transformando-se em um feixe de sinal oriundos. A absorção é devida a energia dissipada no meio para realizar a vibração ao qual depende principalmente frequência da onda tendo que quanto maior a frequência, maior é a dissipação (FRANCISCO, 2013). A reflexão, favorecida pelas características físicas e geométricas do material e também por imperfeições possivelmente existentes dentro do material, ocorre quando a onda é interrompida, criando uma nova frente de onda para uma nova direção de propagação contrária a anterior.

Além dessas situações citadas que influenciam na atenuação, também temos a transmissão e a refração. A transmissão é caracterizada pela continuidade na propagação da onda ao atingir uma superfície ao qual será uma nova frente de onda enquanto a refração ocorre quando a onda muda seu meio de propagação e altere sua velocidade de propagação, acarretando uma mudança de direção na sua propagação e uma perda de sua intensidade.

Uma onda mecânica ao propagar em um meio ela gera uma pressão acústica definida pela equação

$$p = \rho V \omega u \quad (1.9)$$

$$p = Z \omega u \quad (1.10)$$

tendo que u é o deslocamento das partículas dado em metros e ω é a velocidade angular dada em rads/s. Como as ondas ultrassônicas são ondas mecânicas longitudinais, a pressão acústica é exercida perpendicularmente a frente de onda.

Através das informações descritas é possível definir também a intensidade da potência acústica que é dada pela equação

$$J = \frac{1}{2} \frac{p^2}{Z} \quad (1.11)$$

$$J = \frac{1}{2} Z \omega^2 u \quad (1.12)$$

onde J é dado em W/m².

Podemos assim estabelecer uma proporção entre o deslocamento das partículas pelo comprimento que tem grande importância para entender a interação entre a onda acústica e o meio de propagação e que pode ser escrita como

$$\frac{u}{\lambda} = \sqrt{\frac{J}{2\pi^2 \rho V^3}} \quad (1.13)$$

1.2- Uso do ultrassom

As vantagens do uso do ultrassom são a capacidade de propagar em meios gasosos, líquidos e sólidos (devido a ser uma onda mecânica) e que por ter uma frequência mais elevada, acaba trazendo alguns propriedades da propagação a luz. A possibilidade de sofrer uma reflexão e refração quando atinge uma interface entre dois meios com diferentes densidades pode ser usada para medir distâncias, espessuras e propriedades de materiais sendo assim aplicável amplamente dentro da medicina e da indústria.

1.2.1- Medicina

Dentro da medicina, temos diversos usos para o ultrassom, desde usos para potências pequenas até usos para potências elevadas. Assim como afirma Ensminger e Bond (2011, p. 8, Tradução nossa):

Pode-se dizer que a pesquisa em ultrassom para aplicações médicas realmente começou com o trabalho de R. W. Wood e A. L. Loomis, que fez um estudo abrangente dos efeitos físicos e biológicos da radiação supersônica. Eles demonstraram que os tecidos vegetais e animais podiam ser rompidos por energia ultrassônica de alta potência.¹

¹ No original: Research into ultrasonics for medical applications can be said to have really started with the work of R. W. Wood and A. L. Loomis who made a comprehensive study of the physical and

Os ultrassons de alta potência, que apresentam frequências mais baixas, sendo empregadas de 20 kHz a 100kHz (Alves, 2020), foram os primeiros a serem empregados na área médica, para possíveis cirurgias onde as capacidades destrutivas são maiores e não podendo ser empregados em situações ao qual é necessário que o meio de propagação volte ao seu perfeito estado antes da perturbação. Outro fator que influencia também na possibilidade de uso do ultrassom de alta potência é que as interações se tornam mais complexas devido a interações térmicas, cavitacionais² (alterando a estrutura das células e assim afetando o funcionamento da mesma), mecânicas, sonoquímicas³ (que deriva do processo de cavitação) (ENSMINGER; BOND, 2011, p. 9). Com isto, acaba sendo mais empregado em situações como cirurgias, quebra de cálculos renais (usualmente chamado de “pedra no rim”), atomização de água e inalantes e entre outras situações.

Ultrassom de potência mediana são mais empregados em fisioterapias ou no auxílio da absorção e administração de medicamentos e para aliviar dores devido no processo chamado de sonoforese ou fonoforese. Para este tipo de aplicação, usasse ultrassons de frequências entre 0,5 MHz à 5MHz, tendo que as frequências mais utilizadas são de 1MHz e 3 MHz (CARCI, c2024). Já os de baixa potência é facilmente encontrado em exames de imagem, devido ao fato de não modificarem o meio de propagação após a sua passagem. Para o fim de gerar imagens, são empregados ultrassons de frequências de 1 MHz a 10 MHz (BISCEGLI; 2004).

1.2.2- Industria

Industrialmente, o ultrassom é empregado em processamentos de materiais, testes não destrutivos, medições e controle. Suas aplicações tem cada vez se ampliado com a avanço dentro do processamento de dados (tempo, quantia de dados e precisão).

Devido a possibilidade de propagação em meios sólidos, líquidos e gasosos e o seu alto poder de penetração é possível fazer a verificação de elementos ao qual

biological effects of supersonic radiation. They demonstrated that vegetable and animal tissues were all able to be disrupted by high-power ultrasonic energy. (ENSMINGER; BOND, 2011, p. 8)

² Cavitação é o nome empregado para quando é formado bolhas ou cavidades em meio ao liquido devido ao fato de ter quantidade variáveis de gases em meio ao liquido.

³ Sonoquímica é o processo de induzir reações químicas em uma substancia através da aplicação de ultrassons de alta potência.

não são acessíveis com facilidade ou sem que seja desmontado o maquinário ou um equipamento produzido e assim verificar falhas profundas em peças. Em várias situações, apenas uma superfície precisa estar acessível para que seja usado de métodos ultrassônicos para escanear o equipamento tendo que peças que apresentam rugosidade, irregularidade ou não são homogêneas tendem a dificultar o processo de checagem.

Ultrassom de alta potência são empregados em processos de limpeza, emulsificação e soldagem (ENSMINGER; BOND, 2011, p. 13). Processos tais que dependem da alteração do meio ao qual será propagado a onda. Na limpeza por ultrassom, o equipamento de limpeza tem um tanque onde será colocada uma solução líquida em que a peça que será limpa deverá ser submersa no líquido. Direcionado a esse tanque, teremos o transdutor piezoelétrico que irá produzir a onda ultrassônica, conforme será abordado na seção (5), que para esta aplicação, terá uma frequência que pode variar de 20 kHz à 100 kHz, tendo que o intervalo de 20 kHz à 50 kHz são os mais aplicados. A onda ultrassônica irá fazer o objeto vibrar e com a agitação que irá fazer a ação mecânica de retirada da sujeira de forma homogênea, constante e automática durante todo o processo (DELTA ULTRASSONS, 2023). No processo de emulsificação⁴, que irá acontecer devido a cavitação dos líquidos a serem emulsificados, as ondas ultrassônicas usadas no processo são de frequências próximas a 20 kHz (HENNEMANN, 2020). No processo de soldagem, realizados em plásticos, usam ondas ultrassônicas de frequências de 20 kHz à 70 kHz usualmente. As ondas são direcionadas a região ao qual será soldada sendo transformadas em energia térmica na região em questão, derretendo a parte que será soldada (HERRMANN, c2024).

Para potências intermediárias, temos processos mais correlacionados a checagem de propriedades de materiais ou a manipulação dos mesmos. Para esta aplicação, a frequência da onda pode variar de 0,1 MHz à 50 MHz, sendo que o intervalo de 0,1 MHz à 15 MHz são de mais comum uso. Utiliza do princípio do método pulso-eco, que será abordado na seção (6.2), para realizar a inspeção de fabricação de peças fundidas, peças forjadas, laminados ou medida de espessura de uma região

⁴ Emulsificação é o processo que irá fazer a junção de dois líquidos que são imiscíveis entre si, ou seja, que não irão se misturar se colocados em um mesmo recipiente.

de uma peça ou maquinário ou detecção de trincas ou na inspeção preventiva de componentes de um maquinário em uso (INSPE SOLDA, 2023).

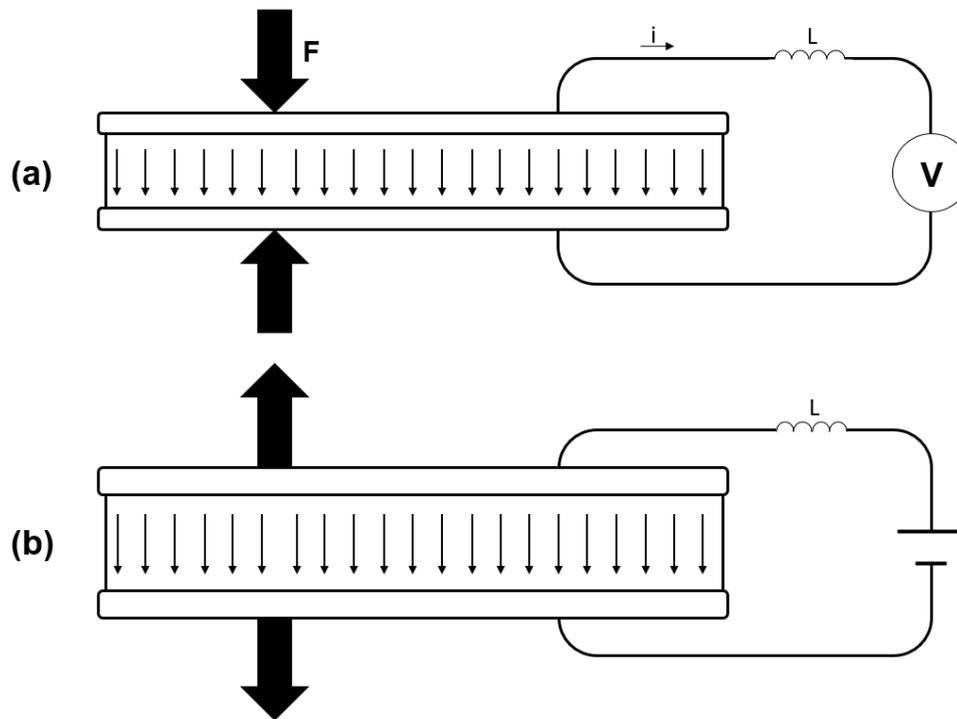
O uso mais comum do ultrassom dentro da indústria é em processos de medição de distância, tendo em conta que o ultrassom, ao ser emitido irá propagar até que encontre um objeto onde parte desta onda emitida será refletida para o emissor do ultrassom, ao qual é feito por um material piezoelétrico, e pode-se usar a informação do tempo de retorno para calcular a distância. Esta aplicação é usada, por exemplo, em linhas de produção automatizadas ou maquinários automatizados para detecção de objetos ou obstáculos e também no monitoramento do nível de substância no interior de maquinários.

2- Piezoeletricidade e Piezoelétricos

Em 1880, Pierre Curie e Jacques Curie, também chamados de irmãos Curie, em seus experimentos, notaram que ao ser realizado trabalho mecânico em determinadas superfícies cristalina (como por exemplo o Quartzo), um potencial elétrico era apresentado em lados opostos desse mesmo material. Tal efeito, ficou conhecido como piezeletricidade, ou seja, “o efeito piezoelétrico permite a geração direta de sinais a partir da aplicação de pressão e a geração direta de pressão a partir de sinais elétricos” (NAKAMURA, 2002, p. 4, Tradução nossa)⁵, ou seja, esse efeito é reversível, assim como proposto por Gabriel Lippmann em 1881, o que significa que o efeito direto, que gera eletricidade a partir da pressão, pode ser usado para gerar pressão a partir de eletricidade e vice-versa assim como expressado na figura III . A piezoeletricidade tem diversas aplicações em diversas áreas tendo como exemplo, os microfones que convertem a pressão sonora gerada em sinais elétricos, os fones de ouvidos que fazem o processo contrário ao do microfone, em balanças eletrônicas ou de precisão, ultrassonografia e até mesmo em sistema de geração de energia elétrica através da pressão dos passos.

⁵ No original: the piezoelectric effect allows the direct generation of electrical signals from the application of pressure and the direct generation of pressure from electrical signals (NAKAMURA, 2002, p. 4)

Figura III - Representação esquemática de um sistema com (a) efeito piezoelétrico e (b) efeito piezoelétrico reverso.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura III (a) temos uma tensão mecânica sendo aplicada nas extremidades do material piezoelétrico produzindo um potencial elétrico nas extremidades para a fonte de tensão elétrica e na figura III (b) temos que a fonte de tensão elétrica aplica uma diferença de potencial nas extremidades do piezoelétrico, fazendo com que o mesmo tenha uma mudança em sua espessura o que leva a uma tensão mecânica para fora do material. Em ambas as partes da figuras temos um indutor L ao qual será explicado na seção (5.1).

Tais materiais tem estruturas cristalinas não centrossimétricas, o que significa que as cargas elétricas não estão uniformemente distribuídas no material. O conjunto de equações constituintes para um modelo unidimensional de um material piezoelétrico são dadas nas equações (2.1), (2.2) e (2.3) onde seus coeficientes tem significados físicos muito importantes, sendo eles o coeficiente d mede a magnitude da deformação induzida por uma tensão elétrica, o coeficiente g mede a magnitude da tensão induzida por uma deformação e o coeficiente e mede a magnitude da deformação induzida por uma tensão elétrica e vice-versa (NAKAMURA,2002). Na

tabela III temos a relação de unidades de medidas para cada uma das variáveis e coeficientes.

$$S = S^E T + dE \quad e \quad D = dT + \varepsilon^T E \quad (2.1)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\varepsilon^T} \quad e \quad S = s^D T + gD \quad (2.2)$$

$$E = -hS + \frac{D}{\varepsilon^S} \quad e \quad T = c^D S - hD \quad (2.3)$$

Tabela III - Variáveis e coeficientes das equações constituintes piezoelétricas.

	Nome	Unidade
Variáveis		
D	Deslocamento elétrico	C/m ²
E	Campo elétrico	V/m
S	Tensão Mecânica	-
T	Estresse Mecânico	N/m ²
Coefficientes		
c^D, c^E	Rigidez elástica	N/m ²
d	Constante de tensão piezoelétrica	m/V
e	Constante de estresse piezoelétrico	C/m
g	Constante de tensão (voltagem) piezoelétrica	Vm/N
$\varepsilon^S, \varepsilon^T$	Permissividade	F/m
h	Constante de rigidez piezoelétrica	V/m
S^E, S^D	Complacência elástica	m ² /N

Fonte: Adaptado de Nakamura, 2002

Para podermos ter uma consideração mais próxima do real, adotando um modelo tridimensional. Sabendo que os materiais piezoelétricos apresentam “um potencial grau muito alto de anisotropia⁶ em materiais práticos.”⁷ (NAKAMURA, 2002, p. 9), devemos primeiramente descrever o estresse mecânico T e a tensão mecânica

⁶ Anisotropia é a propriedade que alguns materiais tem ao qual dependendo da direção ao qual realizarmos uma medida de determinadas propriedades físicas ou mecânicas, teremos resultados diferentes.

⁷ No original: “a potentially very high degree of anisotropy in practical materials” (NAKAMURA, 2002, p. 9).

S através de um tensor de segunda ordem para assim ser considerado cada uma das 3 direções espaciais representadas pelo primeiro subíndice de cada um dos termos, obtendo

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Tendo que cada um dos elementos descritos na matriz é dado por um T_{nm} ou S_{nm} teremos duas situações: $m = n$ onde a força interna aplicada está na mesma direção que o estresse e a tensão; $m \neq n$ onde a força interna aplicada é oposta ao estresse e a tensão, expressando assim as deformações e a tensão de cisalhamento⁸.

Para o segundo caso, assumindo um equilíbrio estático no material piezoelétrico, temos que

$$T_{nm} = T_{mn} \text{ e } S_{nm} = S_{mn} \quad (2.5)$$

e tomando uma notação mais simples de trabalhar, podemos nomear seis elemento de apenas um subíndice, sendo

$$T_1 = T_{11}, \quad T_2 = T_{22}, \quad T_3 = T_{33}, \quad T_4 = T_{23}, \quad T_5 = T_{13} \text{ e } T_6 = T_{12}$$

Realizando a transposta das matrizes \mathbf{T} e \mathbf{S} , obtemos

$$\mathbf{T}^T = [T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6] \quad (2.6)$$

e

$$\mathbf{S}^T = [S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6] \quad (2.7)$$

Podemos reescrever também o campo elétrico e o deslocamento elétrico através de uma matriz linha, resultado da transposta de uma matriz coluna, de três elementos por serem duas grandezas físicas vetoriais, assim obtendo

$$\mathbf{E}^T = [E_1 E_2 E_3] \quad (2.8)$$

e

$$\mathbf{D}^T = [D_1 D_2 D_3] \quad (2.9)$$

Como temos que, em um modelo unidimensional, as equações para o estresse piezoelétrico e a tensão piezoelétrica podem ser escritas como

$$D = \varepsilon^S E + eS \quad (2.10)$$

⁸ Tensão de cisalhamento é a força de cisalhamento por unidade de área que acontece quando as camadas que constituem o local estão um deslizando sobre a outra.

e

$$T = c^E S - eE \quad (2.11)$$

associando as equações (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9) com o proposto nas equações (2.10) e (2.11), obtemos

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & c_{14}^E & c_{15}^E & c_{16}^E & -e_{11} & -e_{21} & -e_{31} \\ c_{21}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & c_{24}^E & c_{25}^E & c_{26}^E & -e_{12} & -e_{22} & -e_{32} \\ c_{31}^E & c_{32}^E & c_{33}^E & c_{34}^E & c_{35}^E & c_{36}^E & -e_{13} & -e_{23} & -e_{33} \\ c_{41}^E & c_{42}^E & c_{43}^E & c_{44}^E & c_{45}^E & c_{46}^E & -e_{14} & -e_{24} & -e_{34} \\ c_{51}^E & c_{52}^E & c_{53}^E & c_{54}^E & c_{55}^E & c_{56}^E & -e_{15} & -e_{25} & -e_{35} \\ c_{61}^E & c_{62}^E & c_{63}^E & c_{64}^E & c_{65}^E & c_{66}^E & -e_{16} & -e_{26} & -e_{36} \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} & \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} & \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

onde a matriz central da expressão (3.12) e chamada de matriz elastoelétrica.

Também é importante citarmos o coeficiente de acoplamento k , descrito pela equação

$$k = \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} \quad (2.13)$$

onde W_s é energia armazenada dissipada na carga e W_t é a energia total dissipada na aplicação da tensão

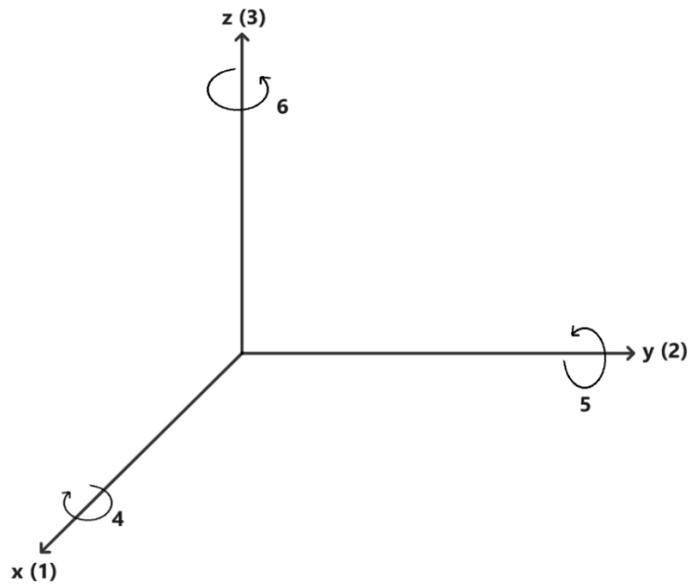
Elevarmos ao quadrado ambos os lados, obtemos

$$k^2 = \frac{W_s}{W_t} \quad (2.14)$$

Expressão que mensura a eficiência da conversão de energia eletromecânica do material.

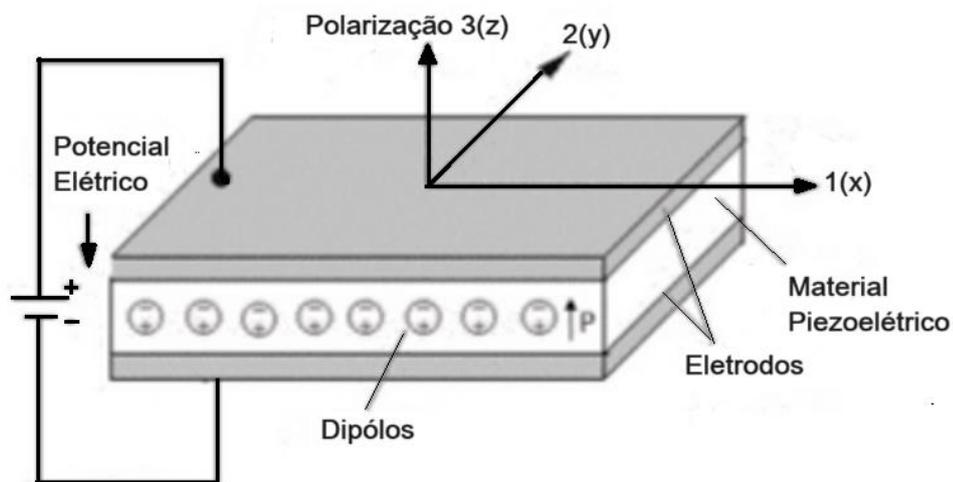
Como temos que o material piezoelétrico é anisotrópico, usasse uma notação do tipo k_{mn} para representar em que eixo está a carga (subíndice “m”) e em que eixo está sendo aplicado o estresse mecânico (subíndice “n”). Onde o subíndice 1 refere-se ao eixo x, o subíndice 2 refere-se ao eixo y e o subíndice 3 refere-se ao eixo z assim como representado na figura e os eixos que cortam esses eixos são descritos pelos subíndices 4, 5 e 6 assim como demonstrado na figura IV e figura V abaixo.

Figura IV - Direção de aplicação das grandezas ao qual os subíndices descrevem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura V - Configuração das direções do PZT e eixo de orientação do material piezoelétrico.



Fonte: LIMA (2013)

A partir dessas expressões, podemos tirar as “cinco importantes figuras de mérito” (Nakamura, 2012, p. 88) para a caracterização de materiais piezoelétricos, as quais são:

- Constante de deformação piezoelétrica d , dada por

$$x = dE \quad (3.15)$$

onde x é a magnitude da deformação induzida.

- Constante de tensão piezoelétrica g , dada por

$$g = \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (3.16)$$

onde ε é a permissividade relativa.

- Fator de acoplamento eletrônico k , dado por

$$k = \frac{d^2}{\varepsilon_0 \varepsilon S} \quad (3.17)$$

- Fator de qualidade mecânica Q_M

$$Q_M = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega} \quad (3.18)$$

- Impedância acústica Z

$$Z = \rho v = \sqrt{\rho c} \quad (3.19)$$

tendo que v é a velocidade da onda no meio e c é a rigidez elástica do material.

Essas grandezas são importantes para o desenvolvimento de novos materiais e dispositivos piezoelétricos. Por exemplo, um material com um alto valor de k seria ideal para aplicações em transdutores piezoelétricos, pois seria capaz de converter energia de forma eficiente. Um material com um alto valor de Q_M seria ideal para aplicações em filtros piezoelétricos, pois seria capaz de filtrar sinais com melhor qualidade. E um material com um alto valor de tensão de ruptura (σ_b), que é a tensão máxima que um material pode suportar antes de se deformar irreversivelmente, seria ideal para aplicações em sensores piezoelétricos, por ser capaz de resistir a grandes forças.

Dentre os materiais piezoelétricos, podemos encontrar quatro tipos diferentes de piezoelétricos usados hoje em dia, ao quais são: piezocerâmicas, piezopolímeros, piezocristais e piezocompósitos.

2.1- Piezocerâmicas

Cerâmicas são materiais que em sua constituição apresentam elementos metálicos e não-metálicos e com ligações de caráter misto (combinações de ligações covalentes, iônicas e até mesmo metálicas) e também um alto ponto de fusão e estáveis em condições ambiente mais severas. (Carter e Norton, 2007).

Materiais cerâmicos apresentam, na temperatura ambiente, fragilidade devido as suas interações iônicas-covalente, que tentem a manter-se sempre unidas,

trazendo a característica de dureza do material (embora em altas temperaturas, alguns tipos de cerâmicas ficam mais maleáveis). São péssimos condutores elétricos e térmicos, também devido ao tipo de suas ligações, onde seus elétrons de valências estarão ligados a outros átomos, não tendo a liberdade de movimentação dos metais. Mas vale salientar que algumas cerâmicas possam apresentar alta condutividade elétrica como por exemplo “a cerâmica de óxido, ReO_3 , tem uma condutividade elétrica à temperatura ambiente”⁹(CARTER e NORTON, 2007, p. 5).

Cerâmicas são fortes contra a compressão, características que diferem bem de outros materiais, e apresentam baixa tenacidade quando puras. Também podem apresentar uma insensibilidade química, podendo usar em meio a reações químicas sem que isso afete a cerâmica e também pode apresentar transparência.

As piezocerâmicas são os tipos de piezoelétrico mais utilizado hoje em dia e dentre elas a mais comum ao ser usada é a perovskita PZT (NAKAMURA, 2002). Sua estrutura é composta por pequenos grãos do material que a compõe. Dentro desses grãos teremos os domínios ferroelétricos com polarização aleatória para cada um de seus domínios de forma que a polarização total da cerâmica será nula e só após a aplicação de um campo elétrico suficientemente forte, após a retirada do campo teremos as propriedades piezelétricas.

Alguns exemplos de piezocerâmicas são o titanato de bário (BaTiO_3), descoberto no período da Segunda Guerra Mundial e que abriu o caminho para as outras piezocerâmicas, e também o titanato zirconato de chumbo (PZT, abreviação da fórmula $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ com $0 < x < 1$), titanato de chumbo (PbTiO_2) e o zirconato de chumbo (PbZrO_3).

Estes materiais podem apresentar dopagens¹⁰ nesses materiais tendo como objetivo mudar determinadas características que levam a uma variação do material no mercado assim como demonstra a tabela IV, elencando as mudanças das características do PZT para diferentes dopagens do material.

O PZT tem uma estrutura cristalina de perovskita, tendo que sua fórmula química possui a mesma estrutura que a fórmula química genérica que ABX_3 , com simetria hexagonal, classe 6 mm, que leva a simplificação da matriz elastoelétrica descrita na equação (2.12) por ser uma matriz simétrica, tendo 24 de seus 81

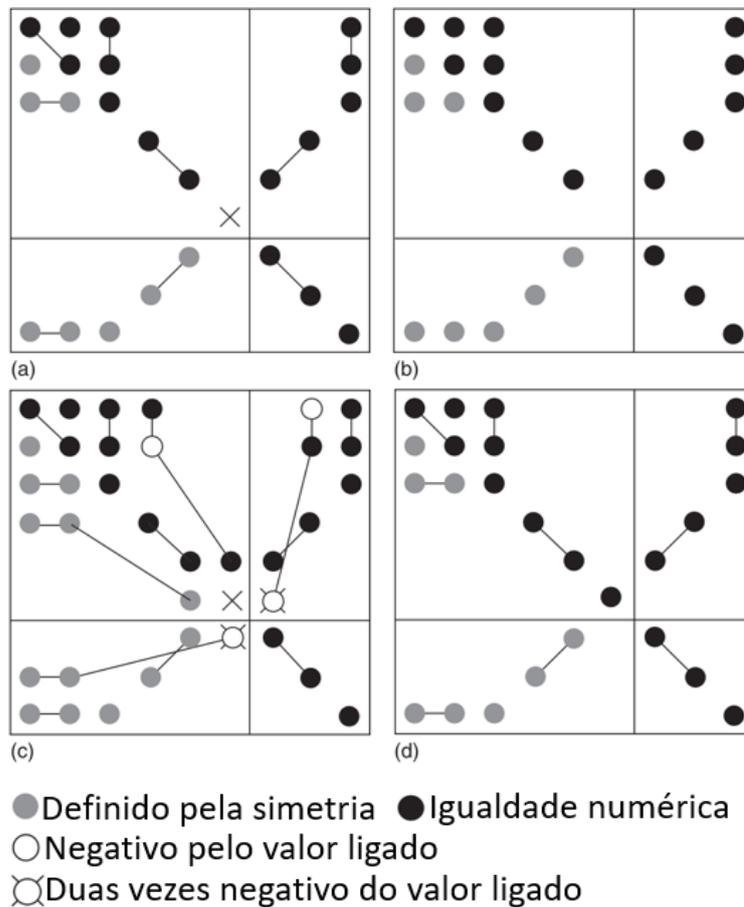
⁹ No original: the oxide ceramic, ReO_3 , has an electrical conductivity at room temperature.

¹⁰ Processo de adição de elementos químicos em um determinado material.

coeficientes nulos. Dos coeficientes que sobram, temos que alguns deles são correlacionados, assim como a figura VI (a) mostra e representado na matriz abaixo. (Nakamura, 2012)

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Figura VI - Coeficientes nas matrizes elastoelétricas para (a) PZT (cristal de classe 6 mm), (b) PVDF (2 mm), (c) LiNbO 3 (3 m) e (d) PMN-PT (4mm).



Fonte: Adaptado de NAKAMURA (2012, p. 15)

Tabela IV - Principais materiais piezoelétricos comerciais e as respectivas constantes.

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
k_p	0,60	0,50	0,61	0,60	0,63
k_{33}	0,68	0,63	0,70	0,71	0,73
d_{33} (10^{-12} C/N)	300	215	400	460	550
d_{31} (10^{-12} C/N)	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	26	25	25	22	19
g_{31} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	-11	-11	-11	-9	-9
K_3^T (baixo sinal) C. dielétrica relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan \delta$ (baixo campo)	0,004	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidade (kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temp. de Curie ($^{\circ}\text{C}$)	325	330	360	260	190
Fator de qualidade Q_m	500	1000	75	70	65
s^{E11} ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	12	11	19	23	21
s^{E33} ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	16	14	16	16	15
N_p (Hz-m) (modo planar)	2200	2270	1950	2000	1950
N_t (Hz-m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

Fonte: PEREIRA (2010, p.6)

Podemos classificar as piezocerâmicas por características apresentadas na sua curva de histerese (características derivada da ferroeletricidade e que será abordado no capítulo 3), diferenciando-as em duras ou leves, onde as piezocerâmicas duras, denominadas piezocerâmicas de alta potência, tem uma dissipação térmica menor o que podemos associar com a área interna da curva assim como citado no capítulo 2 como uma área interna pequena, já as leves, chamadas de piezocerâmicas de alta sensibilidade, tem uma área interna maior.

2.1- Piezopolímeros

Polímeros são materiais em que suas moléculas são formadas por ligações covalentes do tipo sp^3 , tendo em sua estrutura molecular elementos que se repetem, chamados de “meros”. Exemplo de polímero piezoelétrico é o PVDF (polifluoreto de vinilideno), que é um fluoreto termoplástico semicondutor e que apresenta sua cadeia

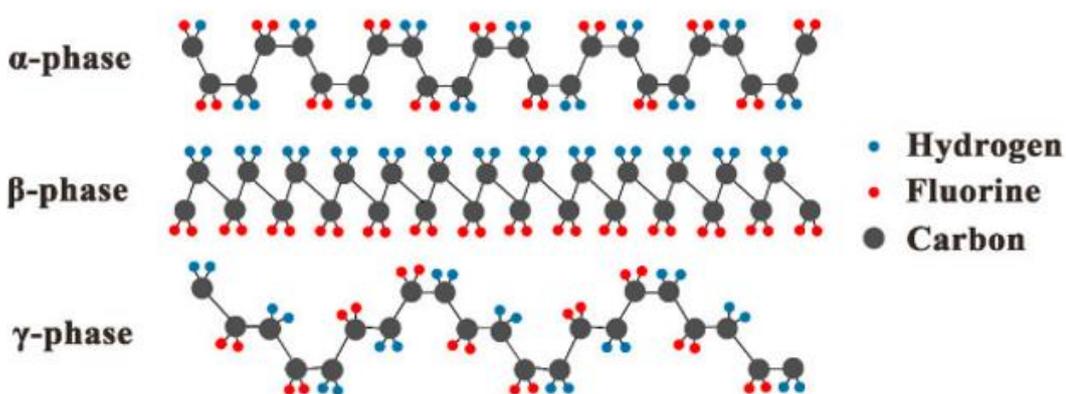
polimérica compostas por meros de CH₂ e CF₂ alternando entre sim (Omnexus, [2023]), outros exemplos de piezopolímeros são: nylo-11, ácido polilático (PLLA) e ácido poli(lático-co-glicólico) (PLGA).

Além da necessidade de terem um grau de cristalinidade na cadeia polimérica processos diferentes para obter as propriedades piezoelétricas são necessárias para os piezopolímeros. No caso do PVDF, ele tem que passar por processos de extrusão¹¹ ou moldagem por injeção ou através da usinagem ou por processos de estiramento uniaxial ou biaxial (método mais comum). Nesse processo de estiramento, as cadeias poliméricas se orientam e ao ser submetido a uma tensão elétrica, se polariza (Nakamura, 2012).

O PVDT, diferente do PZT, possui uma estrutura cristalina ortorrômbica de classe 2mm, o que leva ela a ter 17 coeficientes independentes, como demonstrado na figura VI (b), (Nakamura, 2012) o que leva a uma razoável facilidade no uso e identificação de suas propriedades.

O PVDF apresenta 5 fases, chamada α , β , γ , δ e ϵ , que são caracterizadas pela organização molecular assim como podemos ver na figura VII as três primeiras fases. Tendo que o mais comum entre eles é a fase β , por apresentarem maiores atividades piroelétricas e piezoelétricas.

Figura VII - Estruturas do polifluoreto de vilinideno nas fases α , β , e γ .



Fonte: WU, et al. (2020)

¹¹ “Extrusão é um processo de tratamento térmico do tipo HTST (High Temperatura Short Time) que por uma combinação de calor, umidade e trabalho mecânico, modifica profundamente as matérias-primas, proporcionando novos formatos e estruturas com diferentes características funcionais e nutricionais.” (Ascheri, 2021)

Outro fator que o difere dos outros materiais piezoelétricos é o coeficiente d_{33} , que apresenta um valor negativo após o processo de estiramento. Isso faz com que ao ser exposto a um campo elétrico, o material acaba comprimindo.

2.3- Piezocristais.

Exemplos de piezocristais são o Quartzo, a Turmalina e o Topázio, cristais pelos quais foram descobertas a piezeletricidade. São bastante encontrados em fones de ouvido e microfones. O quartzo e o sal de Rochelle, são piezocristais que, historicamente foram usados para desenvolver toda a base da geração de ondas sonoras utilizando piezoelétricos.

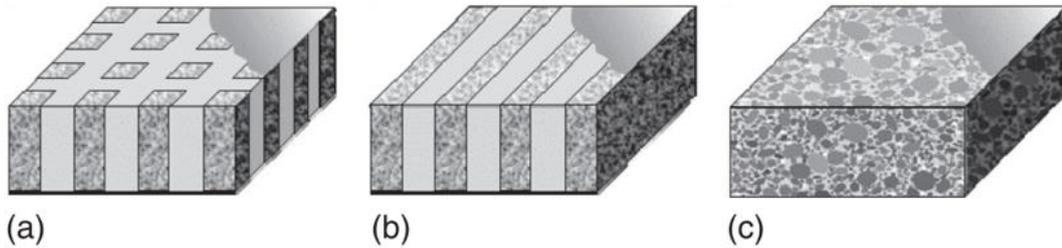
Outros piezocristais são o Niobato de Lítio (LiNbO_3) e o Nitreto de Alumínio (AlN) e que são bem utilizados hoje em dia, mesmo que cada vez mais os piezocristais tenham perdido espaço para as piezocerâmicas. O LiNbO_3 tem uma simetria menor que o PZT, porém maior que o PVDT e uma temperatura de Curie elevada, permitindo ser usado em aplicações de alta frequência em uma gama maior de dispositivos devido ao seu T_c enquanto o AlN se destaca por ter sua simetria cristalográfica similar ao PZT e por ser um filme cristalino fino altamente inerte (Nakamura, 2012).

2.4- Piezocompósitos

Piezocompósitos seriam a junção de uma piezocerâmica ou de um piezocristal a um polímero. A forma como é feita essa junção entre os materiais são nomeadas levando em consideração as dimensões ao qual estão arranjas os elementos piezoelétricos e a fase de polímero. Exemplos dessas estruturas são os da figura VIII.

Figura VIII – Estruturas de materiais piezocompósitos: (a) conectividade 1-3, (b) conectividade 2-2 e (c) conectividade 0-3. O polímero é mostrado uniformemente em

cinza, e a cerâmica é texturizada. A área no canto superior direito indica uma das superfícies às quais o eletrodo é aplicado.



Fonte: NAKAMURA (2012)

Pegando como exemplo a conectividade 1-3, temos que a cerâmica piezoelétrica, distribuído em colunas tem apenas uma face disponível para ser conectada ao eletrodo enquanto o polímero tem três faces. As possibilidades de conectividades para as duas fases são um total de 10 combinações sendo elas: 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 3-2 e 3-3.

O objetivo de montar esses compósitos de materiais piezoelétricos com polímeros é mudar algumas características do piezoelétrico base, como maiores coeficientes de acoplamento, impedâncias acústicas mais baixas que leva a uma transferência de energia melhor, aumento da largura de banda, sensibilidade, eficiência e uma redução da propagação do ultrassom para as regiões laterais (Nakamura, 2012). Outro fator de vantagem é que o material cerâmico, por ficar disperso em uma matriz polimérica, adquire uma maleabilidade maior.

Essas mudanças são geradas pelo efeito de soma que apresenta na junção do polímero piezoelétrico com a cerâmica piezoelétrica. Esse efeito de soma dos compósitos piezoelétricos é um fenômeno em que a saída piezoelétrica de um compósito é maior do que a soma das saídas piezoelétricas das fases individuais que o compõem e pode ser observado em compósitos de cerâmica piezoelétrica/polímero, onde a cerâmica fornece alta rigidez e o polímero fornece flexibilidade.

Para entender o efeito de soma, é importante considerar as propriedades piezoelétricas das fases individuais, como por exemplo a constante piezoelétrica de deformação d , que mede a capacidade de um material converter energia elétrica em energia mecânica e enquanto a permitividade relativa ϵ , mede a capacidade de um material armazenar energia elétrica.

Em geral, a constante piezoelétrica de deformação de uma cerâmica piezoelétrica é maior do que a de um polímero. Por outro lado, a permitividade relativa de um polímero é maior do que a de uma cerâmica piezoelétrica.

Quando essas duas fases são combinadas em um compósito, o efeito de soma pode ocorrer se, por exemplo, d tiver tendências diferentes para os materiais usados para fazer o compósito. Se no material 1 tivermos uma tendência convexa e no material 2 uma tendência concava, o efeito de soma irá levar a uma nova tendência intermediária (Nakamura, 2012).

Devido a essas mudanças em suas características e por consequência em suas grandezas físicas, temos as seguintes expressões que descrevem os novos valores obtidos para os piezocompósitos:

- Constante de tensão piezoelétrica

$$e'_{33} = v_c \left(e_{33} - \frac{2e_{31}(c_{13}^E - c_{12})}{c'} \right) \quad (3.21)$$

- Permitividade relativa equivalente em tensão constante

$$\varepsilon'_{33} = v_c \left(\varepsilon_{33}^S + \frac{2e_{31}^2}{c'} \right) + (1 - v_c)\varepsilon_{11} \quad (3.22)$$

- Rigidez equivalente em campo elétrico constante

$$c'_{33} = v_c \left(c_{33}^E - \frac{2(c_{13}^E - c_{12})^2}{c'} \right) + (c_{11}(1 - v_c)) \quad (3.23)$$

tendo que, para as três equações anteriores

$$c' = c_{11}^E + c_{12}^E + \frac{v_c(c_{11} + c_{12})}{1 - v_c} \quad (3.24)$$

- Constante de rigidez piezoelétrica

$$h'_{33} = \frac{e'_{33}}{\varepsilon'_{33}} \quad (3.25)$$

- Densidade do composto

$$\rho' = \rho_a v_c + \rho_p (1 - v_c) \quad (3.26)$$

onde ρ_a é a densidade de fase ativa piezoelétrica e ρ_p é a densidade de fase passiva.

- Velocidade acústica longitudinal

$$v' = \sqrt{\frac{c'_{33}{}^D}{\rho'}} \quad (3.27)$$

- Impedância acústica

$$Z' = \rho' v' \quad (3.28)$$

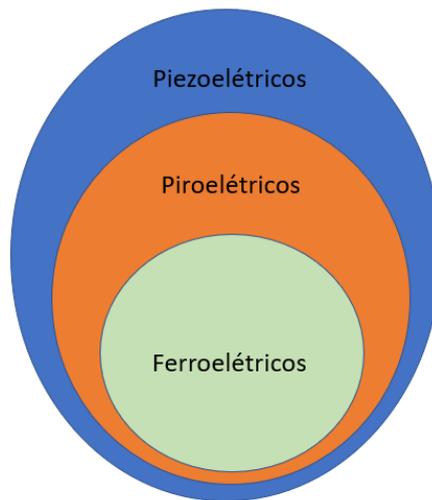
- Coeficiente de acoplamento eletromecânico

$$k'_t = h'_{33} \sqrt{\frac{\epsilon'_r{}^S}{c'_{33}{}^D}} \quad (3.29)$$

3- Ferroeletricidade

Dependendo do material piezoelétrico escolhido, é importante considerar os efeitos ferroelétricos e piroelétricos que podem ser apresentados. Materiais ferroelétricos são um subgrupo dos materiais piroelétricos, subgrupo do piezoelétricos, assim como demonstrado na figura IX. Os materiais piroelétricos têm são caracterizados por apresentarem uma polarização natural se colocados em condições específicas de temperatura e pressão, característica nomeada de polarização espontânea. Enquanto, os materiais ferroelétricos, que descrevem apenas alguns materiais piroelétricos tem a possibilidade adquirir uma polarização ou até mesmo de inverter sua polarização dependendo do campo elétrico ao qual for submetido.

Figura IX - Organização de conjuntos entre Piezoelétricos, Piroelétricos e Ferroelétricos.

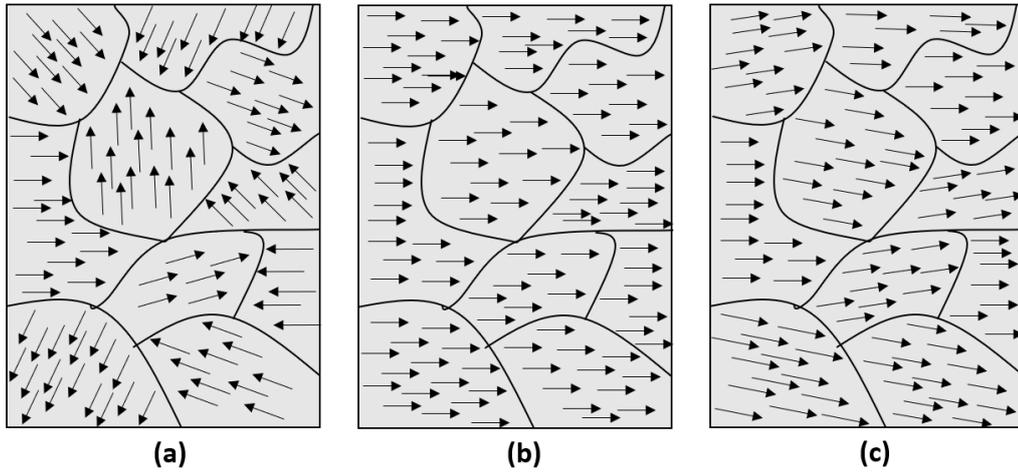


Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentre os 32 tipos específicos de estruturas cristalinas, “há três que possuem a propriedade da ferroeletricidade, que são elas: Perovskita, Aurivillius e Tungstênio Bronze” (Silva, 2018, p. 18).

Dentro de alguns ferroelétricos, os dipolos elétricos podem estar em direções aleatórias, tendo assim os chamados ferroelétricos não polarizados. Quando temos “n” dipolos elétricos juntos que apresentam um alinhamento em comum, podemos delimitar uma região chamada de domínio ferroelétrico (domínios na ordem de micron), onde no caso, esses ferroelétricos não polarizados serão formados por vários desses domínios ferroelétricos assim como demonstrado na figura X (a). Se aplicarmos um campo elétrico externo a esse material, todos os dipolos em todos os domínios alinham-se a esse campo, demonstrado na figura X (b), quando retirado o campo, os domínios tendem a permanecer na mesma direção a do campo elétrico aplicado, mesmo que comparando um domínio com o outro os seus dipolos não tenham o mesmo alinhamento entre os domínios, a direção média tende a ser a mesma assim como demonstrado na figura X (c).

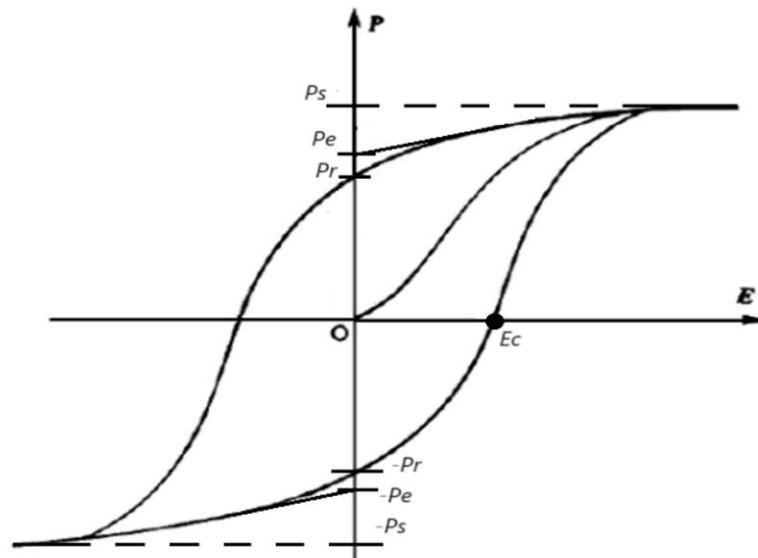
Figura X - Domínios ferroelétricos (a) Situação inicial sem a presença de um campo elétrico, (b) com a presença de um campo elétrico, (c) após a retirada do campo elétrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentro desse conceito de alinhamento dos dipolos e a possibilidade de inverter esse alinhamento dos dipolos, temos a curva de histerese ferroelétrica, descrita pela dependência da polarização em função do campo elétrico aplicado demonstrada na figura XI.

Figura XI - Curva de histerese ferroelétrica genérica.



Fonte: Elaborada pelo autor

Nessa figura temos o ponto O, ao qual a polarização é nula, tendo que este ponto representa o material ferroelétrico ainda não submetido ao campo elétrico, ou seja, com os domínios de polarização diferentes como exemplificado na figura X (a). Após a aplicação de um campo elétrico \vec{E} de valor pequeno, temos que a domínios começam a adquirir uma mesma orientação para uma mesma direção e sentido do campo \vec{E} . Com o aumento desse campo, a polarização aumenta até atingir um valor máximo descrita pelo ponto P_s da figura XI (tendo que $-P_s$ seria obtido com a valores negativos para \vec{E}).

Os valores de polarização P_e e P_r são, respectivamente, a polarização espontânea e a polarização remanescente (e $-P_e$ e $-P_r$ são para um campo \vec{E} negativo), que a princípio deveriam ser os mesmos, mas devido a impurezas e irregularidades no material, se diferem.

A polarização espontânea, obtida na curva através da extrapolação do eixo de saturação ao eixo de polarização, é uma característica intrínseca do material, sendo está a polarização dos dipolos elétricos encontrados nos domínios do material sem que o mesmo seja submetido a um campo elétrico.

A polarização remanescente, diferente da espontânea, é uma propriedade induzida ao ferroelétrico após submetido a um campo elétrico \vec{E} , onde após retirar esse campo, os dipolos tendem a retornar ao seu estado inicial, mas se o campo \vec{E} for forte o suficiente, o material mante um certo valor de polarização mesmo sem o campo.

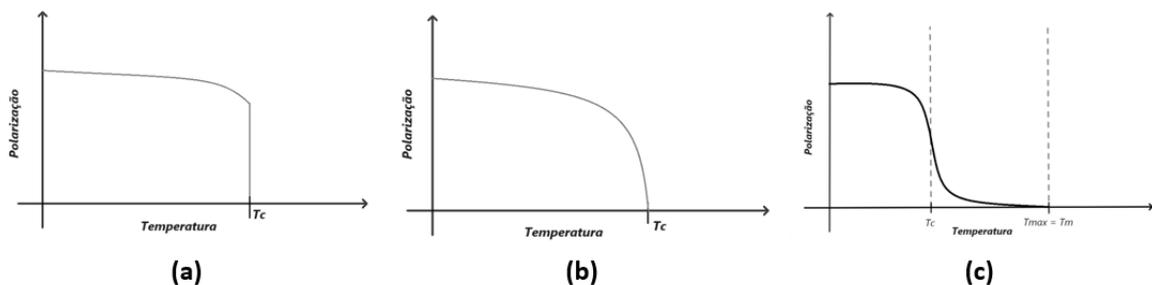
Na figura XI, temos o campo coercivo E_c , ao qual está localizado no eixo horizontal do gráfico P x E, ou seja, temos uma polarização nula, descrevendo a energia necessária para despolarizar o material ferroelétrico através do processo de inversão do campo elétrico \vec{E} . Materiais com campos coercivos elevados (maiores que 1kV/cm), chamados de ferroelétricos duros, tem sua polarização elétrica mais estável. Ferroelétricos de campos coercivos baixos (menores que 100 V/cm), não tem polarização estável, tornando a inversão de polaridade mais fácil, por isso é empregado em memórias ferroelétricas. Campos coercivos médios são encontrados em ferroelétricos usados em atuadores, pois apresentam um certo equilíbrio entre facilidade de reversão de polaridade e estabilidade da mesma.

A área interna que a curva de histerese apresenta é equivalente a energia dissipada em forma de calor pelo material, tendo que quando maior a área interna dessa curva, mais as perdas mecânicas e dielétricas do material em questão, dissipadas em energia térmica.

Ferroelétricos têm um limite de temperatura ao qual é possível ter essa polarização espontânea, essa temperatura limite é chamada de Temperatura de Curie ferroelétrica. Quando um material ferroelétrico ultrapassa esse valor de temperatura, a energia térmica é suficiente para conseguir superar a energia de interação entre os dipolos, desorientando-os em direções aleatórias e perdendo seus domínios e assim chegando numa fase chamada paraelétrica. Quanto mais esse material se aproxima da temperatura de Curie, menor é sua polarização espontânea. Tal característica é determinada pela estrutura cristalina do material e pelas interações dos dipolos elétricos.

Para a visualização do conceito temos a Figura XII, onde é apresentada exemplos de curvas de polarização em um gráfico P x T de ferroelétricos.

Figura XII – Polarização de ferroelétricos em função da temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura XII(a) temos uma queda abrupta de polarização quando a temperatura de Curie é atingida, chamada de transição de fase de primeira ordem. Quanto a situação da figura XII(b), o material perde sua polarização decai mais lentamente, tendo assim uma transição de fase de segunda ordem.

A situação da figura XII(c) é chamada transição de fase difusa, onde o material ao atingir a temperatura de Curie ele ainda mantém um certo nível de polarização até atingir uma temperatura máxima, descrita na figura por T_{max} ou T_m .

4- Reologia de fluidos

Reologia é ciência que estuda o comportamento de fluxo e deformação da matéria, ou seja, como os materiais se comportam quando submetidos a forças externas, como tensão, cisalhamento e compressão, enfocando na aplicação em fluidos. Fluidos são substâncias que pode assumir a forma do recipiente ao qual é posto, característica que se dá por que “se deformam continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento, sem levar em consideração quão pequena possa ser essa tensão” (Silva, Silva Junior, & Pinto Junior, 2019, p. 288), ou seja, líquidos e gases.

4.1- Densidade

Algumas grandezas físicas são de importância para o estudo dos fluidos, tais como a viscosidade, a densidade e a pressão. A densidade de um material, de forma geral, assim como proposto por Arquimedes é dada pela razão entre a massa de um corpo por seu volume, tendo

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

onde a densidade ρ é dada em quilogramas por metros cúbicos (kg/m^3).

Através da densidade de uma substância é uma característica intrínseca do material, tendo que em substâncias formadas por mais de um elemento, a densidade total é proporcional a densidade de cada um dos elementos constituintes e por sua concentração (Rocha, 2008). Tendo que alguns fluidos podem apresentar bolhas ou outras situações semelhantes ao qual, caso seja medida a massa do material em estudo, o valor obtido será influenciado pelo ar presente na amostra, temos dois tipos de densidades a definir: Densidade real ou relativa e densidade aparente.

A densidade real de uma substância leva em consideração apenas o volume total da substância em análise, sem considerar a presença do ar imerso na mesma e que normalmente é nomeada referenciada apenas como densidade.

A densidade aparente já se caracteriza por considerar em seu volume a parcela de ar imersa na mesma, tendo que o valor de sua densidade será menor que a obtida para a densidade real, visto que o volume considerado será o mesmo porém sem desconsiderar as partes ao qual não estão preenchidas pelo material em estudo.

4.2- Viscosidade

Outra grandeza importante é a viscosidade de um fluido, determinada pela taxa de deformação ao qual o fluido sofre devida a tensão de cisalhamento aplicada no mesmo que também pode ser definida como o grau de resistência do fluido ao movimento¹² (WHITE, 2008), ou seja, quando mais viscoso o material for, maior a energia gasta para ele se mover ou para algum objeto mover em meio a ele. Dentro do conceito de viscosidade podemos definir duas viscosidades diferentes para um material, sendo estas a viscosidade absoluta (ou dinâmica) e a viscosidade cinemática. A viscosidade dinâmica segue o conceito dito antes, sendo a resistência do fluido apresentada pela tensão de cisalhamento enquanto a viscosidade cinemática leva em consideração a densidade do meio, descrevendo a influência da gravidade na mesma. Ambas as viscosidades são relacionadas pela expressão

	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	(4.2)
--	--------------------------	-------

onde ν é a viscosidade cinemática dada em metros quadrados por segundo (m^2/s), μ é a viscosidade absoluta dada em Pascal segundo (Pas) e ρ é a densidade do meio.

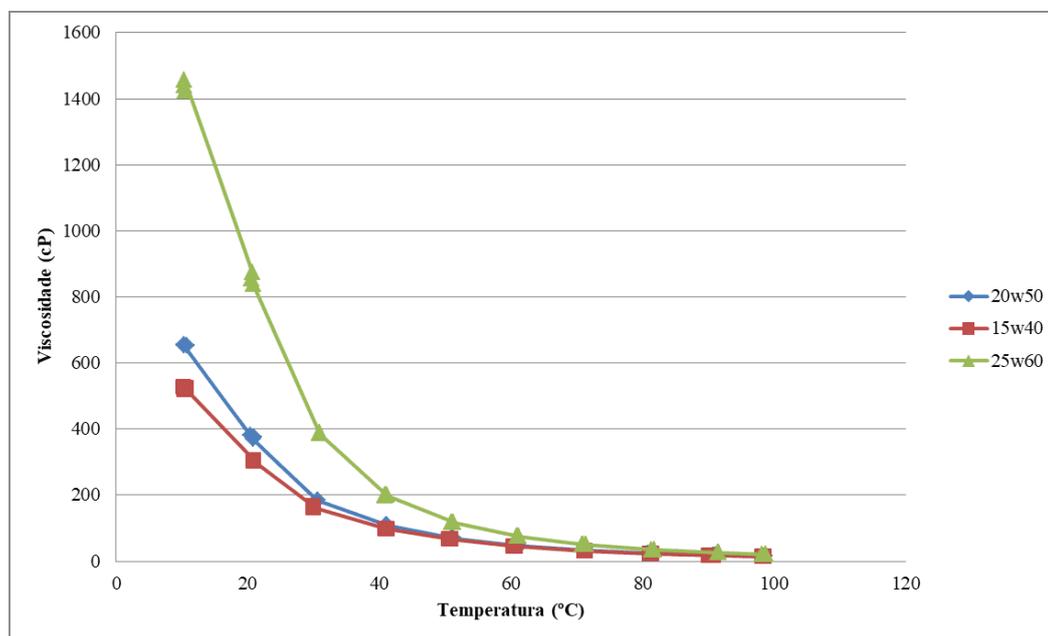
Um fator que influencia na viscosidade é a temperatura e a pressão do fluido. Ao aumentarmos a temperatura do fluido, aumentamos a energia cinética das moléculas do fluido levando a um aumento de sua movimentação e diminuição das interações intermoleculares responsáveis pela viscosidade, como podemos observar na figura XII, onde temos que os valores de viscosidade de três óleos comparados onde foi submetido a um aumento de temperatura.

A pressão ao qual o fluido está submetido, também influencia a viscosidade, mas de forma contrária a temperatura, onde quanto maior a pressão, maior é a viscosidade. Quanto maior a pressão, mais as moléculas dos fluidos se agrupam e por consequência, aumenta suas interações intermoleculares. Esse efeito geralmente é menor que o efeito pela temperatura, porém, em fluidos não-newtonianos podem ser mais significativos.

¹² Viscosidade também pode ser definida como o quão um determinado fluido resiste ao escoamento.

Na tabela V podemos observar a mudança do valor de viscosidade da polpa da jabuticaba dependendo da temperatura em quatro modelos diferentes de descrição de fluidos.

Figura XIII - Gráfico Temperatura versus Viscosidade em comparação dos três óleos estudados



Fonte: CHIARELLO (2019)

Tabela V - Parâmetros de ajuste de diferentes modelos ao comportamento reológico da polpa de jabuticaba.

Modelo	Parâmetros	5 °C	25 °C	45 °C	65 °C	85 °C
Newtoniano	η (Pa.s)	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
	R^2	0,746	0,725	0,718	0,745	0,712
Lei da potência	k (Pa.s ⁿ)	1,36	1,11	1,08	0,99	0,66
	n	0,47	0,46	0,45	0,43	0,47
	R^2	0,990	0,985	0,972	0,969	0,975
Plástico de Bingham	σ_0 (Pa)	4,17	3,28	3,03	2,25	1,74
	μ_p (Pa.s)	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02
	R^2	0,957	0,961	0,965	0,963	0,967
Herschel-Bulkley	σ_0 (Pa)	1,62	1,55	1,82	1,49	1,05
	k (Pa.s ⁿ)	0,71	0,48	0,34	0,27	0,20
	n	0,58	0,60	0,65	0,66	0,67
	R^2	0,997	0,995	0,993	0,985	0,990

Fonte: SATO; CUNHA (2007)

4.3- Compressibilidade do fluido e módulo de elasticidade volumétrico

De forma geral, um fluido de volume V , ao sofrer um aumento de pressão, expresso por ΔP , tem uma redução em seu volume. Tal característica é chamada de compressibilidade do fluido e pode ser expressa por

$$k = -\frac{\Delta V/V}{\Delta P} \quad (4.3)$$

onde temos que a variação que o volume V é dado em m^3 , a pressão P é dada em Pa (Pascal) e k é dado em m^3/N . Podemos assim, definir também a inversa dessa expressão como o módulo de elasticidade volumétrico, obtendo assim a expressão

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad (4.4)$$

tendo que B é dado em Pa (Francisco, 2013). Nas expressões (4.3) e (4.4), o sinal negativo é devido a que, para variações positivas de pressão, obtém-se valores negativos para variação de volume.

Através das expressões (4.1), (4.3) e (4.4), podemos obter uma expressão para uma variação da densidade correspondente, dada por

$$\Delta \rho = -\rho \frac{\Delta V}{V} \quad (4.5)$$

ou

$$\Delta \rho = -M \frac{\Delta V}{V^2} \quad (4.6)$$

Por fim, podemos reescrever o módulo de elasticidade volumétrico como sendo

$$B = \rho \frac{\Delta P}{\Delta \rho} \quad (4.5)$$

4.4- Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos

A deformação dos fluidos é chamada de irreversível ou viscosa por terem o escoamento e assim, dependendo da forma que isto ocorre, podemos classificar os fluidos em dois tipos diferentes:

- Newtonianos: fluidos em que a tensão de cisalhamento entre as camadas de fluido é diretamente proporcional à taxa de deformação assim como proposto

por Newton em 1687, fluidos desse tipo apresentam pouca viscosidade como por exemplo a água, o ar, metais fundidos e óleos vegetais.

- Não-Newtonianos: como o próprio nome propõem, são fluidos em que a tensão de cisalhamento entre as camadas de fluido e à taxa de deformação não são diretamente proporcionais, no caso, irão depender do valor da tensão de cisalhamento e por quanto tempo foi aplicada (Silva, Silva Junior, & Pinto Junior, 2019), como exemplos a pasta de dente, glicerina e graxas de lubrificação.

Os fluidos não-Newtonianos podem ser subdivididos em vários grupos de propriedades semelhantes assim como podemos observar a figura XVIII.

Figura XIV - Subclassificação dos fluidos não-Newtonianos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas equações podem ser descritas para esses fluidos ao qual a origem delas estão mais detalhadas na referência [12] (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2002), onde para os fluidos newtonianos, temos a expressão

$$\tau_{yx} = \mu \left(-\frac{dv_x}{dy} \right) \mu \dot{\gamma}_{yx} \quad (4.3)$$

tendo que

$$\dot{\gamma}_{yx} = \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^\dagger \quad (4.4)$$

Na equação (4.1) temos que τ_{yx} é a tensão de cisalhamento do fluido na direção x em uma área unitária perpendicular a direção y, μ é a viscosidade do fluido e $\dot{\gamma}_{yx}$ taxa de deformação.

Para os fluidos não-newtonianos, podemos ter três expressões que irão incluir todos os subgrupos não-newtonianos, uma delas é a conhecida como Modelo Power Law¹³, que descreve os fluidos do subgrupo dos fluidos sem tensão de cisalhamento inicial, ao qual é expresso como

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n \quad (4.5)$$

onde o expoente n é o expoente da potência que traz o nome ao modelo. Se $n < 1$, temos os pseudoplásticos e se $n > 1$ temos um fluido dilatante. O caso em que $n = 1$, retorna ao fluido newtoniano.

Agora para o grupo dos fluidos com tensão de cisalhamento inicial, temos mais duas expressões,

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (4.6)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}^n \quad (4.7)$$

onde τ_0 é a tensão crítica de escoamento ao qual gera o cisalhamento inicial.

A equação (4.4) é chamada de Modelo de Bingham para os plásticos de Bingham e a equação (4.5) é nomeada como Modelo de Herchel-Bulkley para os fluidos não-newtoniano com cisalhamento inicial de Herchel-Bulkley. Notasse que para $n = 1$ a equação (4.5) retorna a equação (4.4).

5- Transdutores Piezoelétrico

Transdutores são equipamentos que realizam a transformação de um tipo de energia em outra, no caso dos transdutores piezoelétricos são dispositivos que, através das propriedades piezoelétricas converte energia mecânica em energia elétrica ou vice-versa. O processo piezoelétrico direto (esforço mecânico -> mudança de polarização) é usado para receptores ultrassônicos e o processo piezoelétrico inverso (mudança de polarização – esforço mecânico) é usado em emissores de ultrassom. (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2002).

¹³ Modelo de Lei de Potência.

Os transdutores piezoelétricos de banda larga são projetados para operar em uma ampla faixa de frequências. Eles são geralmente feitos de uma placa piezoelétrica fina, com dimensões laterais muito maiores que a espessura. A placa é acionada por um campo elétrico aplicado aos seus eletrodos.

As características elétricas e acústicas de um transdutor piezoelétrico podem ser descritas usando uma matriz eletromecânica 3x3 descrita na equação (5.1) (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002). Esta matriz relaciona as variáveis terminais presentes nas portas do transdutor, incluindo a tensão, a corrente, a força e a velocidade da partícula.

$$\begin{pmatrix} F_L \\ F_B \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{0A}/j \tan \beta t & Z_{0A}/j \sin \beta t & h_{33}/j\omega \\ Z_{0A}/j \sin \beta t & Z_{0A}/j \tan \beta t & h_{33}/j\omega \\ h_{33}/j\omega & h_{33}/j\omega & 1/j\omega C_0^S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_L \\ u_B \\ I \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Onde $C_0^S = A\varepsilon_{33}^S/t$ é a capacitância de bloqueio (tensão nula, alta frequência) da placa piezoelétrica, $Z_0 = (\rho c_{33}^S)$ é a impedância acústica característica de rigidez do material piezoelétrico e $1\beta = \omega/(c_{33}^S/\rho)^{1/2}$ é a constante de propagação, tendo que A é a área dos eletrodos e ρ a densidade (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

Para otimizar o desempenho de um transdutor piezoelétrico de banda larga, é importante considerar uma adaptação de impedância acústica, tendo que a impedância acústica é uma medida da resistência que um meio oferece à passagem de ondas acústicas. Ela é definida como o produto da densidade do meio pelo módulo de elasticidade longitudinal. Quando a impedância acústica do transdutor é igual à impedância acústica do meio, ocorre uma transmissão perfeita da energia acústica, mas de forma geral não é o que normalmente ocorre, tendo que a diferença de impedância acústica entre o meio de propagação e o transdutor causa uma reflexão de parte da energia acústica, diminuindo a eficiência do transdutor.

Temos que a impedância acústica da adaptação acústica deve ser feita levando em consideração a seguinte equivalência para obter o melhor resultado

$$Z_C = (Z_0 Z_L)^{1/2} \quad (5.2)$$

onde Z_C é a impedância acústica da adaptação acústica, Z_0 é a impedância acústica do material piezoelétrico e Z_L é a impedância acústica do meio de propagação.

5.1- Configuração de transdutores piezoelétricos

Os transdutores podem apresentar duas configurações nomeadas single-crystal e twice-crystal¹⁴. Os transdutores single-crystal tem como característica um único elemento piezoelétrico que será responsável tanto emissão do sinal qual por sua recepção, tendo sua constante de deformação e o módulo piezoelétrico com valores próximos. Os transdutores twice-crystal são construídos com dois elementos piezoelétricos, um responsável pela emissão do sinal ao qual terá sua constante de deformação mais elevada e o outro responsável pela recepção do sinal e que terá seu módulo piezoelétrico mais elevado (FRANCISCO, 2013).

Um transdutor piezoelétrico é constituído por 4 elementos: Camada protetora, cristal piezoelétrico, bloco de contenção e um indutor. A camada protetora é feita de um material ao qual fará o acoplamento acústico do material piezoelétrico com o meio, melhorando a qualidade do sinal e protegendo o material do meio em estudo. Para o estudo das propriedades do meio, existe a necessidade de uma onda direcionada, para evitar várias respostas de sinais de diferentes posições e o objetivo do bloco de contenção e a atenuação máxima possível dessa parte da onda emitida em direções diferentes do desejado. Devido a característica capacitiva dos piezoelétricos, o indutor se faz necessário para descarregá-los, reduzindo o tempo de espera para gerar um novo pulso pelo emissor (FRANCISCO, 2013). Por fim o material piezoelétrico será o responsável pela emissão do sinal e a recepção do mesmo. O conjunto formado pelo(s) transdutor(es) piezoelétrico(s), camada protetora e outros materiais como a adaptação acústica é chamado de célula acústica.

5.2- Campo Acústico

O campo acústico é a região ao qual a onda irá passar por todo o seu deslocamento. Para os transdutores ultrassônicos, a profundidade do campo acústico, também nomeada de distância de Rayleigh é dividida em duas regiões diferentes, chamadas de campo próximo e campo distante.

¹⁴ Podem ser traduzidos para transdutores de cristal único (single-crystal) e transdutor de duplo cristal (twice-crystal).

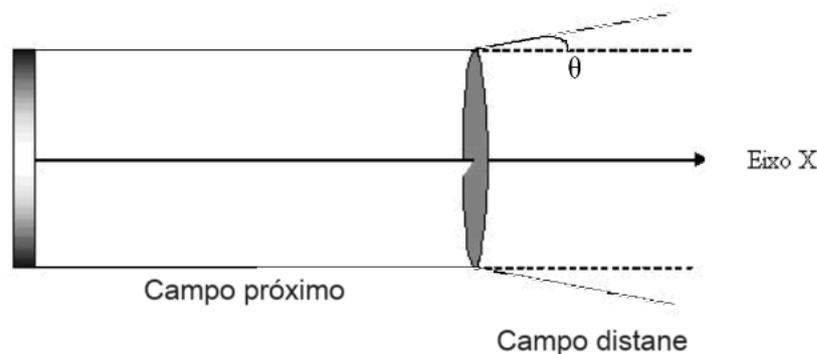
A onda após percorrer a distância de Rayleigh, passa pelo processo de espalhamento, onde o feixe adquire um aumento no ângulo de espalhamento θ , resultado do efeito de difração ao qual o feixe toma. Esse processo de espalhamento afeta diretamente a resolução lateral do feixe que pode ser descrita como

$$resolução\ lateral = \frac{profundidade\ x\ \lambda}{diâmetro} \quad (5.3)$$

onde o diâmetro citado na equação é o diâmetro do transdutor piezoelétrico.

Nessa divisão temos que o campo próximo ("nearfield region") ou região de difração de Fresnel como também é chamada é a região que fica mais próxima ao transdutor. Essa região é caracterizada pela superposição das ondas de borda, que são formadas na periferia do transdutor, e das ondas diretas, que são formadas em toda a região da face do transdutor e como as ondas diretas e ondas de borda podem apresentar fases diferentes, ocorre o efeito de interferências construtivas e destrutivas das ondas, tendo máximos e mínimos. Essa região, assim como representado na figura XV, a pouca divergência do feixe ultrassônico (FRANCISCO, 2013).

Figura XV - Representação do feixe acústico de transdutores convencionais e sua divisão de campo acústico.



Fonte: Adaptado de MOREIRA (2008).

Na região de campo distante, iniciada após ultrapassar a distância de Rayleigh, temos que a diferença de fase não é mais evidenciada tendo assim apenas interferências construtivas, formando assim, uma nova frente de onda quase plana divergente que atenua conforme a propagação do feixe (FRANCISCO, 2013). Apresenta uma abertura θ no campo acústico devida espalhamento (ou difração) do feixe acústico.

6- Uso dos transdutores piezoelétricos

6.1- Sistema de medição

O emissor ultrassônico é colocado em contato total com o fluido alinhado com a superfície do recipiente ao qual será colocado o fluido (e o receptor é colocado no lado oposto do recipiente alinhado com o emissor).

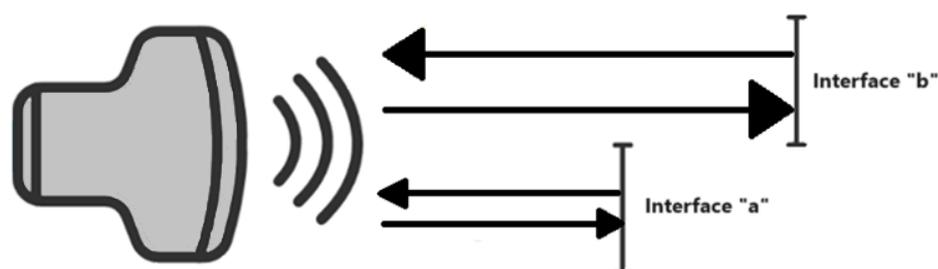
O emissor, pode ser acionado através de um pulso ou de uma explosão sinusoidal de um ou mais ciclos onde a onda gerada propagara pelo fluido e depois absorvida pelo receptor, ao qual o sinal elétrico irá passar por um sistema de amplificação para depois passar por um osciloscópio digital, através de um sistema ligado ao osciloscópio, os dados obtidos de capitação dos ecos podem ser processados.

6.2- Transdutores de pulso-eco

Santin (2003) e Ferreira (2014) descreve transdutores de pulso-eco como sendo os mais utilizados, isso devida a necessitar de poucos equipamentos e por necessitar apenas do acesso a uma das superfícies do equipamento.

O método pulso eco consiste em emitir um pulso curto de onda, sem a presença da mesma antes e depois do deslocamento do pulso, em vez de uma onda continua. Esse pulso, assim como demonstrado na figura XVI, ao propagar pelo material, irá sofrer uma reflexão parcial ou total ao encontrar uma interface, que pode ser alguma irregularidade no material ou algo inerte no meio de propagação e assim retornando ao transdutor, gerando um sinal elétrico (FERREIRA, 2014).

Figura XVI - Pulso-eco e interfaces em diferentes posições

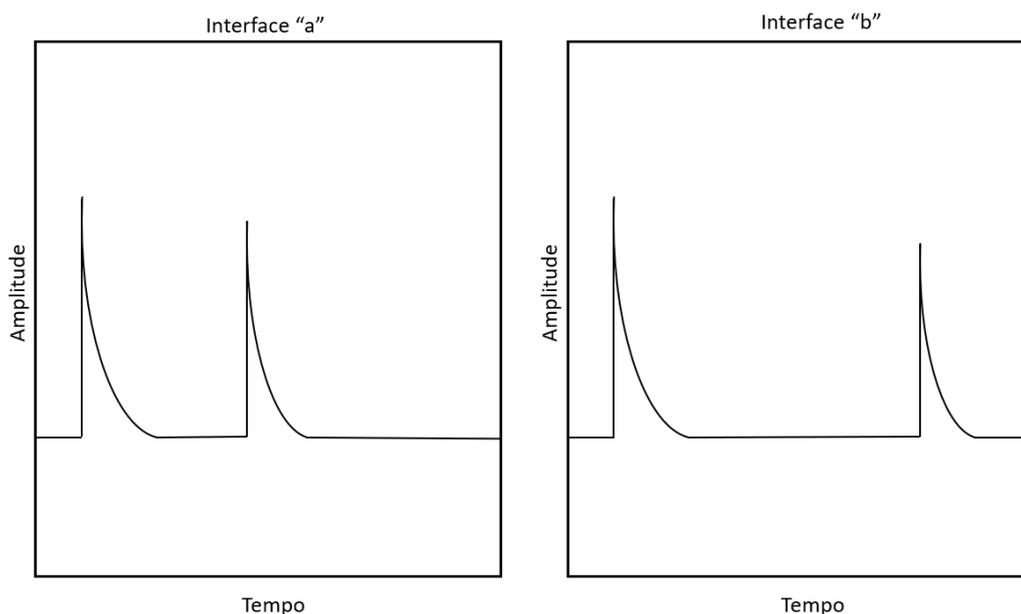


Fonte: Elaborada pelo autor.

O pulso é produzido por uma tensão aplicada no transdutor normalmente com um intervalo de tempo inferior a $10\ \mu\text{s}$, onde o transdutor irá atingir sua vibração máxima determinada por sua frequência nominal. Se temos uma superfície paralela ao emissor, podemos ter o surgimento de múltiplos ecos com espaçamento uniforme, mas que apresentam uma redução em sua amplitude. Característica devida as múltiplas reflexões que ocorrem dentro do material e pela atenuação da onda (FERREIRA, 2014).

Com o uso de um osciloscópio e um sistema capaz de processar os dados obtidos pelos mesmos, o sinal elétrico gera um pico de corrente ao retornar, assim como o exemplo da figura XVII, tendo que o valor máximo será usado para adquirir as informações de tempo de emissão e de retorno. Na figura XVII podemos notar que na representação dos sinais da interface “a” os picos estão mais próximos comparados ao da interface “b” pois está mais próxima ao transdutor.

Figura XVII - Exemplificação de picos obtidos pelo pulso e pelo eco do ultrassom.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como proposto por Carvalho (2013), este método é de razoável simplicidade comparado a outros métodos, tem fácil construção e é relativamente barato, sendo assim amplamente utilizado, porem necessita de grandes volumes de amostra para resultados mais precisos além de que não apresenta bons resultados em sistemas com grandes atenuações.

6.2.1- Formação de imagem

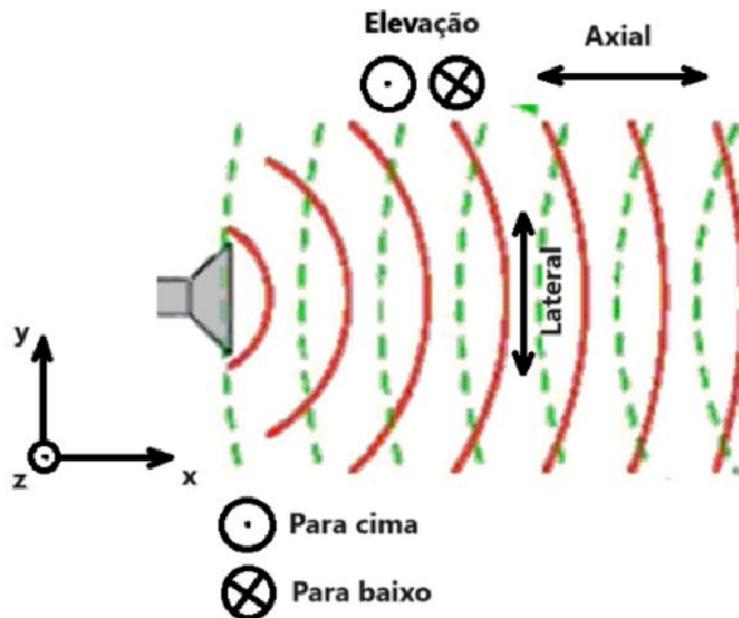
Através do sistema de leitura, o intervalo de tempo entre a emissão do pulso e o tempo de retorno do mesmo junto com a velocidade da onda e a posição de retorno da mesma, é possível localizar a posição onde a reflexão foi realizada e através do processamento desses dados é possível criar pontos na imagem desejada e assim possibilitando interpretar o material em estudo levando em consideração as características físicas do mesmo. Quanto maior for a reflexão, maior o brilho do ponto referente a eco na imagem.

As imagens produzidas terão diferentes tipos de resolução devido a características do meio de propagação, tendo que na aplicação médica seriam a constituição dos tecidos. Imagens com muitas estruturas brilhantes, prevalecendo a cor branca, devido a tecidos que apresentam uma alta taxa de reflexão são denominadas imagens hiperecoica. Imagens onde a cor preta prevalece, são caracterizadas por estruturas líquidas, assim tendo menos ecos e nomeadas de anecoica. A situação intermediária é nomeada hipoecoica (NEVES et al., 2008).

Outro fator que influencia em uma imagem melhor é o sistema de amplificação do sinal do eco. Devido a atenuação da onda, o sinal gerado pelo eco por si só pode produzir pontos de pouco brilho, mas com o sistema de amplificação do sinal, nomeada como ganho e normalmente exibida na lateral da imagem.

O feixe ultrassônico tem uma amplitude maior no seu ponto de emissão, se estreitando até atingir um ponto ao qual a sua onda retorna a maior amplitude. Este ponto onde a onda tem essa redução em sua amplitude é chamado de ponto focal ao qual, se focado na região de estudo, obtém-se uma resolução melhor da imagem. Esta mudança no feixe faz com que a resolução lateral e a resolução de elevação sejam afetadas, devido a diferença na área ao qual o feixe irá atingir, porém, como sua frequência não é alterada, a resolução axial não é afetada, mas a escolha da frequência inicial influencia no resultado final tendo que quanto uma alta frequência resulta em uma melhor resolução axial porém uma menor penetração e uma baixa frequência resulta no oposto. As direções das resoluções citadas acima são expressas na figura XVIII.

Figura XVIII - Direção das resoluções em uma representação de uma onda ultrassônica.



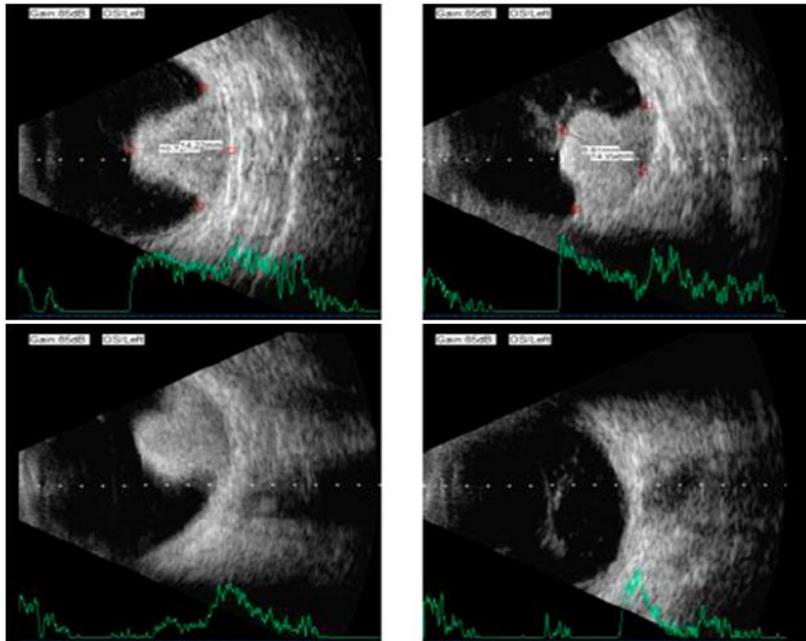
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de frequências usados em células acústicas em aplicações biológicas são células com um range (faixa) de frequência entre 1 a 5 MHz para células de baixa frequência (alta potência) e de 5 a 10 MHz para células de alta frequência (baixa potência).

Dentro da medicina, a geração de imagem é empregada em vários processos como diagnóstico por imagem, avaliação e exame de órgãos e regiões internas, onde dependendo do sistema associado ao transdutor, podem se obter tipos de imagem diferentes, sendo estas:

- Modo A: Representada em um gráfico de amplitude do eco pela profundidade, é o modo mais simples de imagem, registrando os picos de sinais gerados pelos ecos. Normalmente utilizada na oftalmologia e para ecoencefalografia (MEHMET..., 2021).

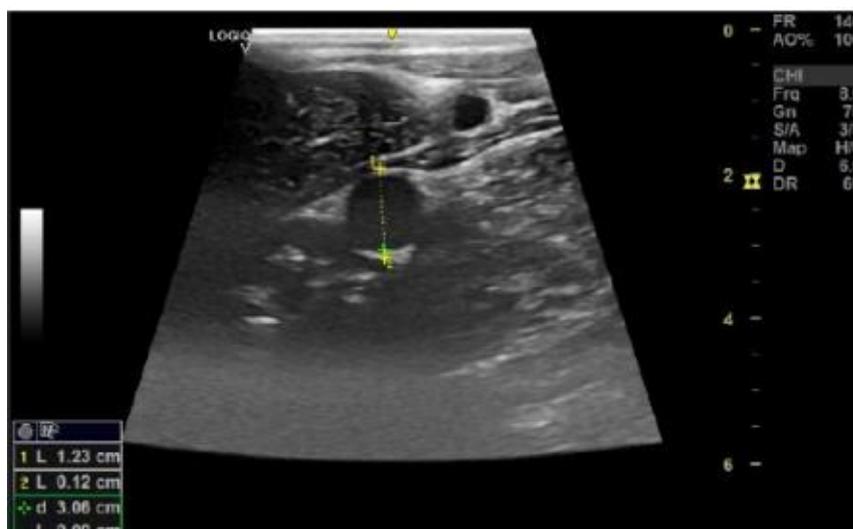
Figura XIX - Ultrassonografia ocular, exemplo de imagem de modo A.



Fonte: ULTRASSONOGRAFIA OCULAR (2015)

- Modo B: Conjunto de imagens 2D geradas consecutivamente devido a um conjunto de ecos ultrassonográficos levando a impressão de movimentação. Devido a esta característica é principalmente empregada para o diagnóstico de órgãos como o coração e para a movimentação de um feto (MEHMET..., 2021).

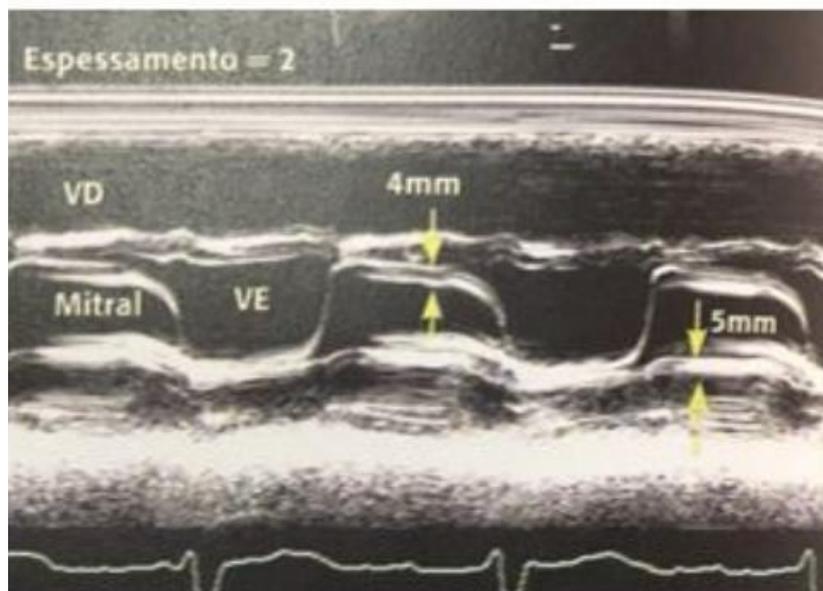
Figura XX - Imagem de ultrassonografia modo-B em plano transversal da artéria carótida comum.



Fonte: FOGAÇA; et al (2020)

- Modo M: Utilizado em estruturas que estão em movimento (motivo pelo qual é utilizado a letra M para nomear), apresenta ao longo de um eixo vertical os ecos de forma contínua de forma semelhante ao registro eletrocardiográfico. Utilizado por exemplo para a análise dos batimentos cardíacos fetais (MEHMET..., 2021). Esta imagem é formada por consecutivas imagens de modo B, trazendo uma percepção de movimentação muito mais suave. Geralmente, os equipamentos modernos exibem de 15 a 60 quadros por segundo, onde quando mais quadros por segundo, mais suave é a movimentação (ADRICH, 2007).

Figura XXI - Modo M da valva mitral com estenose reumática e espessamento grau 2, com a média de espessamento de 4,5 mm.



Fonte: Adaptado de GUEDES (2020)

- Doppler: Analisa a diferença de frequência, devido ao efeito Doppler, entre a onda quando pulsada e seu eco gerado em um objeto em movimento. Normalmente se utiliza para analisar o fluxo sanguíneo (MEHMET, 2021).

Figura XXII -Ultrassonografia com Doppler colorido da artéria carótida esquerda mostra fluxo arterial normal sem estenose significativa.



Fonte: MEHMET (2021)

6.2.2- Densidade de fluidos pelo método pulso-eco

Para obter a densidade ρ e um fluido por meio do ultrassom, é necessário ter a informação de velocidade de propagação da onda no meio e da impedância acústica característica que podem ser substituídas na equação 3.19. O cálculo da impedância vem do uso das propriedades de reflexão e transmissão das ondas acústicas. Baseia-se na quantificação das ondas refletidas durante o processo de pulso-eco ou das ondas transmitidas pelo material em estudo sendo assim um método não destrutivo.

Através de um sistema de emissão e recepção de sinais acústicos, uma onda acústica é emitida no material em estudo, propagando-se por ele. Devido a impedância acústica do material em estudo, obtém-se um eco. Utilizando a expressão

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (6.1)$$

tendo que v é a velocidade da onda emitida em metros por segundo, ΔS é a distância de ida e retorno em metros e Δt é o intervalo de tempo entre a ida e volta da onda em segundo é possível ter a informação da distância percorrida pelo objeto

Para obter o valor da impedância, podemos utilizar a expressão

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6.2)$$

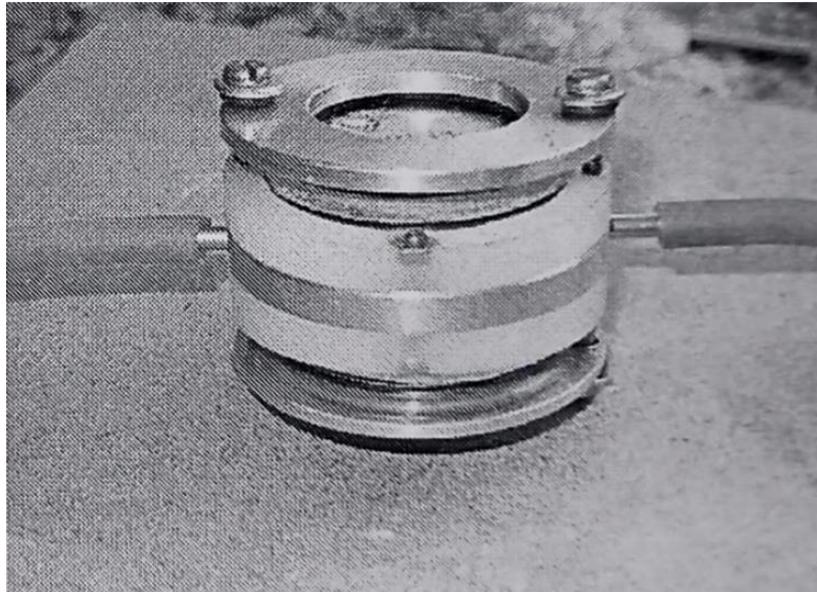
onde R_{12} é o coeficiente de reflexão entre o meio 1 e o meio 2, e Z_1 e Z_2 são as impedâncias acústicas dos meios 1 e 2 respectivamente (ADAMOWSKI et al.).

Sabendo a densidade do meio de propagação 1, e obtendo Z_2 através da equação (6.2), podemos obter o valor da densidade do meio pela equação

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 c_1 (1 + R_{12})}{c_2 (1 - R_{12})} \quad (6.3)$$

Através de um transdutor de duplo elemento sendo tendo que o emissor é constituído pela cerâmica PZT e o receptor é um sensor a base de PVDT assim como demonstrado na figura XXIII, as ondas são emitidas e propagam por todo o meio, gerando retornos de eco atenuados. Conhecendo o tempo de deslocamento da onda, a atenuação que ocorreu e a impedância acústica do meio através da equação (1.5) é possível obter a densidade do meio.

Figura XXIII - Transdutor de duplo elemento com emissor PZT e receptor PVDT.



Fonte: FRANCISCO (2013)

Para um sistema de incidência perpendicular, temos que o índice de reflexão da onda pode ser descrito por

$$Z_2 = Z_1 \frac{1 + R_{12}}{1 - R_{12}} \quad (6.4)$$

tendo que Z_1 e Z_2 são as impedâncias acústica do meio 1 e 2.

Conhecendo essas informações, é possível obter a densidade do meio através da expressão

$$\rho = Z_s \frac{1 + R}{1 - R} v \quad (6.5)$$

para Z_s sendo a impedância acústica do sistema, R sendo o índice de reflexão da onda e v sendo a velocidade de propagação da onda na amostra.

6.2.2.1 – Uso de células acústicas da década de 40 até atualmente.

No trabalho de Franco (2006), é apresentado uma revisão bibliográfica de pesquisas em que são usadas ondas de cisalhamentos¹⁵ através do método pulso-eco para o estudo reológico de fluidos em diversas proposições diferentes, como por exemplo no trabalho de Mason (1949) onde foi realizada a medição da viscosidade do PIB (poliisobuteno) em frequências que atingiam até 60 MHz e onde também é apresentado a possibilidade de determinar a impedância acústica da onda ultrassônica que propaga no meio através da obtenção do coeficiente de reflexão da onda em uma interface. Este trabalho foi um dos primeiros trabalhos propostos na revisão tendo que o mais recente que finaliza a revisão foi escrito por Dixon e Lanyon (2005) onde foi estudada a mudança de fase das ondas ultrassônicas com frequências de 0,5 MHz a 8 MHz usadas no monitoramento do processo de cura de resinas epóxicas¹⁶ onde a análise de viscosidade e densidade acontecem para obter as informações de qualidade e término da cura. Dentro desta revisão, é possível notar que desde a década de 40, cada vez mais os END são empregados em análise de diversos fluidos através da obtenção das propriedades reológicas deles com cada vez mais aplicabilidades e usos diversos.

No início das aplicações do ultrassom no estudo das propriedades viscoelásticas de líquidos, os líquidos em maior análise eram polímeros líquidos, soluções poliméricas e óleos lubrificantes. Com o passar do tempo, foram sendo aperfeiçoadas as técnicas e sendo testadas novas aplicações, como em cristais líquidos e líquidos de acoplamento para a transmissão das ondas de cisalhamento. Com o avanço dos líquidos em estudo, mais áreas foram obtendo aplicações, principalmente em setores de aplicações orgânicas, como na medicina e na indústria alimentícia (GEZMÁN, 2010).

Assim como proposta por Guzmán (2010), o estudo acústico da viscosidade em líquidos acaba tendo grande aplicabilidade devido a grande vantagem de analisar

¹⁵ Ondas de cisalhamento são ondas ultrassônicas em que as partículas do meio vibram perpendicularmente ao eixo de propagação.

¹⁶ Resina utilizada em revestimento de pisos e em aplicações de adesão.

a viscosidade do meio em tempo real, tendo assim, sido cada vez mais empregada a prática, porém acaba sendo mais empregado em laboratório ou em ambientes controlados devido a necessidade de um razoável controle de temperatura.

Veloso (2016) utilizou de um transdutor piezoelétrico de baixo custo para estudar a mudança de viscosidade conforme a temperatura do óleo lubrificante, onde o sensor funciona conforme o conceito de amortecimento mecânico e coleta os dados através.

A utilização deste método para a análise de misturas de água com NaCl e de água com etanol, ao qual tem aplicações para análises de biodiesel, de óleo de rícino e de silicone e também apresenta alguns resultados de medições de propriedades de amostras de biodiesel termodegradado e de misturas de diesel e biodiesel, realizado por Tiago (2018), utilizando faixas de frequências de 20 MHz a 80 MHz e com temperatura das amostras controladas para terem variações menores que 0,01°C, demonstrando que é possível detectar a degradação térmica do biodiesel desde o estágio inicial assim como detectar a porcentagem de biodiesel em misturas de diesel e biodiesel. Durán (2020), utiliza de células ultrassônicas para análise de emulsões de água e óleo focando na aplicação para a indústria do petróleo, onde estuda o uso de dois tipos de células acústicas para a determinação da concentração de água e óleo e outras propriedades, sendo estas: célula com linha de retardo e célula de espalhamento.

Alves (2022), em seu trabalho, realiza o estudo da resposta do ultrassom no leite puro e adulterado demonstrando que para verificação de adulteração do volume de leite com misturas de água e NaCl é viável.

6.3- Sonar

Os sonares utilizam do princípio do pulso-eco para a detectar quais coisa que entre na trajetória em observação, diferenciando-se na onda emitida, tendo que os sonares emitem um pulso maior devido as distancias maiores ao qual desejam encontrar retornos e também apresenta uma abertura maior por ter como objetivo varrer a maior área possível.

O sonar, após a emissão, alterna seu sistema para gravar os retornos acústicos, dividindo-os em intervalos de tempo recebendo mais de um sinal por

intervalo de tempo. A média desses raios resulta em um valor ao qual será convertida em uma cor dentro de uma escala de tons definidos dentro do sistema e que será convertida em uma imagem pela localização dos pontos de retorno a suas cores associadas (OLIVEIRA, 2018).

7- Conclusão

Este trabalho teve como objetivo estudar e revisar sobre o uso do método pulso-eco, por ser um END, para análise e obtenção de informações, tendo que através das informações de emissão e retorno da onda, pode-se obter a informações reológicas do fluido ou até gerar informações para formação de imagens. Devido aos transdutores terem muitos conceitos necessários de serem compreendidos para assim poder usá-los assim como as características dos fluidos foram ilustradas o conceito de piezoeletricidade e ferroeletricidade, os tipos de piezoelétricos e suas aplicações, características das ondas ultrassônicas, reologia de fluidos e a formação de imagem. Dentre dos trabalhos revisados, é possível concluir que suas aplicações são amplas e cada vez mais usadas e com novas aplicações, principalmente devido ao fato de que através do método pulso-eco é possível obter a informação da viscosidade em tempo real e de ter a possibilidade, dependendo da aplicação de um menor gasto na construção da célula acústica.

Com o avanço do conhecimento e da tecnologia, cada vez mais é possível usar as propriedades reológicas dos líquidos para obter mais informações a fim do estudo e do controle de líquidos em processos industriais e medicinais, tais como graxas e lubrificantes, pureza e concentrações de emulsões de água e óleo em aplicações para a indústria petrolífera, terapias e exames clínicos além de que o uso para os transdutores ultrassônicos de forma geral acabam tendo muito mais possibilidades de aplicações além do estudo reológico e caracterização de líquidos ainda usando o método pulso-eco e ampliando mais ainda suas aplicações se observados outros métodos.

Para projetos futuros, propõe-se a análise mais ampla do uso do pulso-eco além do estudo reológico de líquidos e também de análises mais afuniladas em cada uma das aplicações focadas em pequenas áreas de aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NAKAMURA, K. **Ultrasonic transducers: Materials and design for sensors, actuators and medical applications**. New York, United States: Wiley, 2002.
- [2] SILVA, M. C. O. **Propriedades estruturais e microestruturais de eletrocerâmicas baseadas em BaTiO₃**. Monografia (Graduação em Física) - Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Física, Uberlândia, p. 62, 2018
- [3] VERRUCK, S.; PRUDENCIO, E. S. **Ultrassom na indústria de alimentos**: Aplicações no processamento e conservação. Ponta Grossa: Atena, 2018. 50 p.
- [4] ENSMINGER, D.; BOND, L. J. **Ultrasonics: Fundamentals, Technologies and Applications**. 3.ed. Boca Raton, United States, CRC Press, 2011, 730p.
- [5] CARTER, C. B., NORTON, M. G. **Ceramic Materials**: Science and Engineering. New York, United States, Springer New York, 2007, 716p.
- [6] PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: Funcionamento e propriedades**. Apostila, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2010, 7p.
- [7] Guia abrangente sobre fluoreto de polivinilideno (PVDF). **Onmexus: The material selection plataforma**, [2023]. Disponível em: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyvinylidene-fluoride-pvdf-plastic#:~:text=What%20is%20PVDF%3F-,What%20is%20PVDF%3F,up%20to%20150%C2%B0C> > Acesso em 02 de jan. de 2024.
- [8] ASCHERI, J. L. Extrusão. **Embrapa**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/tipos-de-processos/extrusao#:~:text=Extrus%C3%A3o%20%C3%A9%20um%20processo%20de,diferentes%20caracter%C3%ADsticas%20funcionais%20e%20nutricionais> > Acesso em: 02 de jan. de 2024
- [9] WU, T., et al. A Flexible Film Bulk Acoustic Resonator Based on β - Phase Polyvinylidene Fluoride Polymer. **Sensors**, n° 5, 2020, 11p. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1346>
- [10] LIMA, W. B. Transdutores de deformação a base de sensores piezoelétricos. 2013. 118 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.
- [11] SILVA, Celiane Mendes da; SILVA JUNIOR, Talvares Lins e; PINTO JUNIOR, Ismar Macário. Caracterização reológica de fluidos não newtonianos e sua aplicabilidade na indústria. **Cadernos de graduação: ciências exatas e**

tecnológicas. Centro Universitário Tiradentes – UNIT, Maceió, v. 5, n. 2, p. 285-300, Maio de 2019.

[12] BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N. **Transport Phenomena**, 2 ed., New York, United States, Wiley, 2002.

[13] ALEMIDA, Manuela. SILVA, Sandra. FERREIRA, Tiago. (2006) – Física das construções. Acústica ambiental e de edifícios [Em linha]. [Consultado 21 de janeiro de 2024]. Disponível em: https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_475.pdf

[14] FRANCISCO, Mariana Salamoni. **Medidor Ultrassônico de Densidade de Líquidos**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2013. 26 p. (Relatório Parcial - PIBITI)

[15] ROCHA, Marcio André Sartori. Medidores de ultra-som e tubo ressoante para medidas de densidade em líquidos estacionários ou de fluxo contínuo. (2008). 23p. Trabalho (Bacharel em Física) – Universidade Estadual de Maringá UEM, Maringá, 2008.

[16] WHITE, F. M. **Mecânica de Fluidos**. Tradução: Mario Moro Fecchio; Nelson Manzaneres Filho. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 880 p. Título original: Fluid mechanics. ISBN: 978-85-8055-009-2.

[17] CHIARELLO, Taise Gusatti. TODT, Pietra. **Viscosidade Dos Óleos Lubrificantes**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 01, Vol. 01, pp. 05-22. Janeiro de 2019. ISSN:2448-0959

[18] ADAMOWSKI, Julio C. *et al.* Ultrasonic measurement of density of liquids. **The Journal of the Acoustical Society of America**, United States: coustical Society of America, ed. 97, ano 1995, p. 354-361, Mensal.

[19] SANTIN, J. L. **Ultra-som: técnica e aplicação**. 2. ed. Curitiba (PR): Optagraf,2003.

[20] FERREIRA, J. P. G. **Aplicação da técnica de ultrassom pulso eco com cabeçote monocristal na análise de porosidade de revestimento de barreira térmica depositados por plasma**. Orientador: Luciano Augusto Lorençato. 2014. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de ENGENHARIA MECÂNICA, DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Ponta Grossa, 2014.

[21] OLIVEIRA, Lucas Chiarelli de. **Utilização de sonar de varredura lateral para mapeamento de macrodetritos no porto de Niterói**. Orientador: José Antônio Baptista Neto. 2018. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Geofísica, Departamento de Geologia e Geofísica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

[22] MEHMET KOCAK. **Manual MSD**. Versão para profissionais da saúde. Illinois: Rush University Medical Center, 2021. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/pt-br/profissional/t%C3%B3picos->

[especiais/princ%C3%ADpios-de-imagens-radiol%C3%B3gicas/ultrassonografia#v1125215_pt.%20Acesso%20em:%202022%20jan.%202014](#) > Acesso em: 22 jan. 2014.

[23] ULTRASSONOGRAFIA OCULAR (ECOGRAFIA). **Day Clinic Madureira**. [S.l.]. Day Clinic Madureira, 2015. Disponível em: <https://dcm-rio.com.br/exames/ultrassonografia-ocular-ecografia/>. Acesso em: 28 jan. 2014.

[24] FOGAÇA, J. L. et al.. Comparação das artérias carótidas comuns e muares por ultrassonografia modo-B e Doppler espectral e a relação com a massa corpórea. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, n. 2, p. 419-430, mar. 2020.

[25] GUEDES, Caio. Modo M Classic Series: imagens que auxiliam no diagnóstico. *In*: ECOPE - Escola Ecográfica de Pernambuco. **Blog ECOPE**. Pernambuco, 28 de setembro de 2020. Disponível em: <https://blog.escolaecope.com.br/modo-m-classic-series-auxiliam-diagnostico/> > Acesso em: 1 fev. 2024.

[26] NEVES, J. P.; OLIVEIRA, J. F. C.; FREITAS V. J. F.; SIMPLÍCIO A. A.; TEIXEIRA D. I. A.; ALMEIDA J. L. Diagnóstico de Prenhez nos Ruminantes. *In*: GONÇALVES, P. B. D.; FIGUEIREDO, J. R.; FREITAS, V. J. Biotécnicas Aplicadas à Reprodução Animal. 2 a ed., São Paulo: Roca, 2008, cap.2, p.17-32.

[27] ALDRICH, J. E. Basic physics of ultrasound imaging. *Critical Care Medicine*, Baltimore, v. 35, n. 5, p. 131-137, 2007.

[28] SATO, A. C. K.; CUNHA, R. L. DA.. Influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de jabuticaba. **Food Science and Technology**, v. 27, n. 4, p. 890-896, out. 2007.

[29] MOREIRA, D. C. **Construção e Caracterização do Campo Acústico de Transdutores Ultra-sônicos Piezoelétrico de Polarização Variada**.. Orientador: José Antonio Eiras. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, UFSCar, São Carlos, 2008.

[30] BISCEGLI, C. I. **Conceitos da física do ultra-som**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, USP, 2004. 18 p.

[31] SALVI JUNIOR, W.; MUSTAFÁ, R. C. (2021). Princípios físicos básicos de Ultrassom aplicado a Medicina de Urgência e Emergência [Notas de aula à disciplina de Sistemas Orgânicos Integrados, ministrada na USP] https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6681886/mod_resource/content/1/PRINCIPIOS%20FI%CC%81SICOS%20DE%20USG-%20MANUAL%20ECOMURGEM.pdf

[32] As diferenças entre os tipos de ultrassom na fisioterapia. **CARCI**, c2024. Disponível em: <https://blog.carcioficial.com.br/tipos-de-ultrassom-na-fisioterapia/> > Acesso em: 06 de março de 2024.

[33] Tudo o que você precisa saber sobre o sistema de limpeza ultrassônico. **Delta Ultrassons**. 2023. Disponível em: <https://www.deltaultrassons.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-sistema-de-limpeza-ultrassonico/> > Acesso em: 06 de março de 2024.

[34] HENNEMANN, B. L. **Efeitos do ultrassom na preparação de emulsões do fluconazol usando líquidos iônicos N-Alquil-N-Metil imidazolíneos**. Orientador: Clarissa Piccinin Frizzo. 2020. 223 p. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Química, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

[35] Soldagem por ultrassom de plásticos. **Herrmann Ultrassom**. c2024. Disponível em: <https://www.herrmannultraschall.com/pt-br/soldar-com-ultrassom/soldagem-de-plasticos/soldagem-por-ultrassom-de-plasticos> > Acesso em: 06 de março de 2024.

[36] INSPESOLDA, Equipe Técnica. Ultrassom industrial: o END mais utilizado. **Inspesolda**. Osasco – SP, 18 fev. 2023. Disponível em: <https://inspesolda.com/ultrassom-industrial/> > Acesso: 06 de março de 2024.

[37] FRANCO, E. E. **Análise do método de medição de viscosidade de líquidos por ultra-som usando a reflexão de ondas de cisalhamento**. Orientador: Flávio Buiochi. 2006. 122 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2006.

[38] DIXON, S.; LANYON, B. Phase change measurement of ultrasonic shear waves on reflection from a curing epoxy system. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Coventry, v. 38, n. 22, p. 4115-4125, 18 mai. 2005

[39] MASON, W. P. *et al.* Measurement of Shear Elasticity and Viscosity of Liquids at Ultrasonic Frequencies . **Physical Review**, New Jersey , v. 75, n. 6, p. 936-946, 15 mar. 1949

[40] GUZMÁN, E. E. F. **Medição de propriedades viscoelásticas de líquidos por ultrassom**. Orientador: Flávio Buiochi. 2010. 95 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Controle e Automação Mecânica, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2010.

[41] VELOSO, E. M. **Avaliação de um sensor piezoelétrico para medição de viscosidade e densidade de fluidos**. Orientador: Igor Braga de Paula. 2016. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

[42] TIAGO, M. M. **De envolvimento de uma célula para medição de propriedades de líquidos por ultrassom com manipulação de amostras através de cubetas**. Orientador: Ricardo Tokio Higuti. 2018. 91 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018.

[43] CARVALHO, R. M. D. **Avaliação da utilização da espectroscopia acústica na análise de sistemas multifásicos de petróleo.** Orientador: Fernando Luís Pellegrini Pessoa. 2013. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2013.

[44] ALVES, L. B. **Avaliação de viabilidade não destrutiva de leite bovino por propriedades acústicas e regras fuzzy submetido à adulteração assistidas.** Orientador: Francisco José Arnold. 2022. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia, Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP, 2022.