

Caracterização de Propriedades Acústicas e Mecânicas de Materiais Simuladores de Tecido por Ultrassom

Characterization of Acoustic and Mechanical Properties of Ultrasound Tissue Simulator Materials

Jheferson S. S. Gomes¹, Sílvio L. Vieira¹¹Universidade Federal de Goiás/Instituto de Física, Goiânia, Brasil

Resumo

Materiais simuladores de tecidos biológicos são de extrema importância no campo da Imagenologia Médica. Esses materiais são também conhecidos por fantasmas, objetos simuladores ou mais comumente "phantoms". Os *phantoms* são materiais que imitam ou simulam tecidos biológicos em sua interação com radiação ionizante ou não-ionizante. Assim, conhecer as propriedades físicas desses materiais é de grande importância na produção e desenvolvimento de novos materiais para uso como objetos simuladores. Nesse trabalho, ondas mecânicas longitudinais foram aplicadas em um material polimérico objetivando caracterizar suas propriedades acústicas e mecânicas por meio de ultrassom pulso-eco. A extração de tais atributos se deu por meio de algoritmo computacional, o qual possibilitou a obtenção dos módulos elásticos e viscosos do polímero. Foram encontrados os seguintes parâmetros por meio do processamento de dados: o coeficiente de atenuação $\alpha = 0,152 \text{ dB/cm}$, e a velocidade longitudinal $c = 1448,60 \text{ m/s}$. Dessa forma, foi possível estimar o módulo de elasticidade de armazenamento e de perda do módulo de elasticidade longitudinal, $L' = 2,098 \text{ GPa}$ e $L'' = 0,386 \text{ MPa}$, e de cisalhamento, $G' = 0,424 \text{ GPa}$ e $G'' = 0,068 \text{ MPa}$, dentre outros de interesse. Esse estudo evidenciou a possibilidade de se obter informações importantes a respeito das propriedades mecânicas de polímeros por meio de sondagem via ultrassom pulso-eco. No entanto, estudos subsequentes são necessários com a finalidade de se realizar a validação desse método. Para isso, os resultados devem ser comparados com os obtidos por meio de outra técnica padrão, tal como análise dinâmico-mecânico.

Palavras-chave ultrassom pulso-eco; propriedades viscoelásticas; propriedades acústicas; ondas ultrassônicas longitudinais; polímeros.

Abstract

Tissue-mimicking materials of biological tissues are essential in the field of Medical Imaging. These materials are known as phantoms or simulator objects. These phantoms are materials that simulate biological tissues in the interaction of ionizing and non-ionizing radiation. Thus, it is essential to know about the physical properties of these materials for use in new production and development of materials to employ as simulator objects. In this work, longitudinal ultrasonic waves were applied in a polymer material, looking for mechanical features and acoustic properties through pulse-echo ultrasound. The extraction of these attributes was obtained through a computational algorithm. Thus, an algorithm was developed to obtain the viscous and elastics modulus of the polymer. Were found through data processing: the attenuation coefficient, $\alpha = 0,152 \text{ dB/cm}$, and the longitudinal speed, $c = 1448,60 \text{ m/s}$, value of propagation in the sample. In this way, it was possible to estimate the modulus of storage elasticity and loss of the modulus of longitudinal elasticity, $L' = 2,098 \text{ GPa}$ e $L'' = 0,386 \text{ MPa}$ and shear, $G' = 0,424 \text{ GPa}$ e $G'' = 0,068 \text{ MPa}$. The tangent delta, the volumetric modulus of elasticity, Young's modulus, and the Poisson's ratio was calculated from these. This study showed the possibility of obtaining essential information regarding the mechanical properties of polymers by pulse-echo ultrasound inspection. However, subsequent studies are necessary in order to carry out the validation of this method. For this, the results must be compared with those obtained using another standard technique, such as dynamic-mechanical analysis.

Keywords: pulse-echo ultrasound; viscoelastic properties; acoustic properties; longitudinal ultrasonic waves; polymers.

1. Introdução

Polímeros são grandes moléculas orgânicas com unidades repetidas, a palavra tem o seguinte significado: poli = muitos e mero = partes, ou seja, são muitas partes de uma mesma unidade que compõem o polímero. A utilidade dos polímeros está em todas as áreas e na sociedade em geral, sendo muito importante em basicamente tudo que é feito, eles estão presentes nos momentos desde que se acorda até o momento que se deita. Eles podem ter várias classificações como: polietileno, polipropileno, Teflon, PVC, Silicones, Borrachas Sintéticas, PVA e mais uma série de classificações. Por serem tão diversificados, eles podem apresentar propriedades mecânicas diferentes, tais como: tração, fluência, relaxação de tensões, compressão, flexão, impacto,

dureza, ensaio dinâmico-mecânico, entre outros. Com base nessas propriedades, técnicas podem ser utilizadas para mensurá-las e determiná-las com precisão. Uma técnica muito eficaz nessas determinações é a técnica de Ultrassom.

A técnica de ultrassom é utilizada, gerando um pulso na amostra por meio de transdutores piezoelétricos, podendo ser classificado em pulso-eco ou transmissão. Independentemente da forma que as medidas são feitas a essência é a mesma para ambas as metodologias. Com a incidência desses pulsos ao longo do meio, o sistema capta o tempo de voo dessas ondas ultrassônicas, que podem ser (longitudinais ou transversais) e a partir disso determinar as propriedades inerentes ao material. As aplicações do ultrassom de baixa intensidade têm

como propósito, transmitir a energia através de um meio e com isso obter informações dele. Como exemplo dessas aplicações pode citar: ensaio não-destrutivo (NDT) de materiais, medida das propriedades elásticas dos materiais (Elastografia) e diagnose médica (Ultrassonografia).

Mesclando os dois temas citados nos parágrafos anteriores, pode-se então determinar as propriedades de polímeros por meio da técnica de ultrassom. Onde o objetivo é estimar os valores de velocidade e coeficiente de atenuação de um de um material polimérico, candidato a material de base para ser usado em *phantoms*. Um *phantom* é um objeto que imita as propriedades de um determinado tecido biológico. Pode ser produzido com diversos materiais, em nosso caso ele é formado por polímeros os quais são gerados a partir de reações químicas controladas. O *phantom* em questão, que está sendo produzido, necessita atender alguns critérios, tais como ter propriedades físicas próximas aos dos tecidos biológicos moles. Para que estes tenham aplicação, tanto em testes para estudos na medicina, quanto no trabalho de dosimetria dos físicos em centros que trabalham com radiações ionizantes e em ensaio não-destrutivos e não-ionizantes. Nesse projeto, foi explorada uma técnica de ultrassom pulso-eco para determinar propriedades, tais como velocidade acústica e atenuação, levando-se em consideração as propriedades viscosas do meio. Uma vantagem dessa abordagem é que o programa empregado para realizar as estimativas não necessita de um meio de referência para executar os cálculos. Além disso, ele tem como base a mudança de fase da onda que garante uma maior confiabilidade nos valores obtidos.

1.1. Fundamentação teórica

A técnica consiste em realizar medições em duas posições distintas ao longo da amostra. Nessa metodologia, o primeiro eco é registrado a uma distância z_1 , e o segundo em z_2 , equivalendo a espessura d da amostra. O primeiro eco é obtido prescionado levemente o transdutor sobre a amostra. Ao final é produzido uma deformação $\Delta z = z_2 - z_1$.

O meio é um polímero, o qual possui propriedades viscoelásticas e as ondas acústicas possuem um perfil pulsado. Assim, uma mudança de fase pode ser detectada de forma que a fase do sinal varia em função do seu número de onda. Quando essa onda se propaga no interior de um meio viscoelástico, parte da energia contida no pulso é absorvida, fazendo com que a fase varie. A frequência gerada pelo transdutor é mantida fixa e como o meio é dispersivo torna-se possível mensurar o valor da fase do sinal que é alterada. Em meios não-dispersivos, como por exemplo, a água, há a atenuação da onda e não há a mudança de fase, enquanto em meios dispersivos há a atenuação e a mudança de fase da onda no interior do material. A partir da mudança de fase em meios dispersivos, pode-se extrair informações velocidade de fase e coeficiente de atenuação, e com isso determinar propriedades elásticas e viscosas do

meio. O sinal captado pela propagação da onda é descrito pela equação abaixo:

$$p(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{p}(v) \cdot e^{-\alpha(v)z} \cdot e^{2i\pi v(t - \frac{z}{c(v)})} dv \quad (1)$$

em que $p(z, t)$ é a pressão acústica, v é a frequência do transdutor. Nas equações a seguir, $c(v)$ é a velocidade de fase da onda e $\alpha(v)$ é o coeficiente de atenuação (1).

$$c(v) = -\frac{2\pi v(z_2 - z_1)}{\text{Arg} \left(\frac{\tilde{p}(z_2, t)}{\tilde{p}(z_1, t)} \right)} = \frac{2\pi v(z_2 - z_1)}{\Delta\phi} \quad (2)$$

$$\alpha(v) = -\frac{1}{2(z_2 - z_1)} \log \left(\left| \frac{\tilde{p}(z_2, t)}{\tilde{p}(z_1, t)} \right| \right) \quad (3)$$

em que $\tilde{p}(z, t)$ é a transformada de Fourier temporal do sinal $p(z, t)$. Como o sinal pode ser mascarado por uma volta de 2π na fase, uma correção deve ser feita nas equações, onde adiciona-se um tempo τ' denominado como tempo de avanço. Com isso a correlação aplicada a seguir corrige esse problema.

$$C_p(z_1, z_2; \tau') = \int_0^{t_{\text{máx}}} p(z_1, t) p(z_2, t + \tau') dt \quad (4)$$

Para o pulso avançado a equação seguinte é introduzida para uma função $q(z, t)$, fazendo com que a velocidade dependa da transformada de Fourier da solução inserida:

$$q(z_2, t) = p(z_2, t + \tau) \quad (5)$$

$$\tilde{q}(z_2, v) = \tilde{p}(z_2, v) e^{2i\pi v\tau} \quad (6)$$

Isso faz com que haja uma correção no cálculo da velocidade calculada a partir do pulso:

$$c(v) = -\frac{2\pi v(z_2 - z_1)}{\text{Arg} \left(\frac{\tilde{q}(z_2, v)}{\tilde{p}(z_1, v)} \right) - 2\pi v\tau} \quad (7)$$

Por meio dessa equação pode-se determinar a velocidade de fase $c(v)$, já incorporada com a devida correção de fase, em que a relação de mudança de fase pode ser estimada assim:

$$\phi_1(v) = \left(\frac{\tilde{q}(z_2, v)}{\tilde{p}(z_1, v)} \right) \quad (8)$$

Assim, com base na teoria discutida, pode-se então determinar o coeficiente de atenuação e a velocidade na amostra pela Equação (3) e (8), respectivamente. A quantificação da mudança de fase da onda no interior do polímero propicia uma forma precisa desses parâmetros (1).

A metodologia descrita acima mostra como pode-se obter informações sobre as propriedades acústicas do polímero de forma relativamente simples. Esses procedimentos serão empregados a seguir, para estudo das propriedades mecânicas de novo material polimérico. A composição do material vem sendo estudado para uso como simulador de

tecidos biológicos, comumente conhecido por *phantoms*. Por motivo de propriedade industrial o material empregado não pode ser descrito, aqui, em detalhes para que não seja descaracterizado seu registro de patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Essa técnica de medida de propriedades mecânicas vem sendo denominada aqui de análise dinâmico-mecânica por ultrassom (ADMUS).

É de conhecimento na literatura que para materiais cristalinos e isotrópicos existe a seguinte relação:

$$M = \rho c^2 \tag{9}$$

em que M representa um módulo elástico, ρ é a densidade do material e c é a velocidade da onda no meio que pode ser longitudinal ou transversal.

Por outro lado, em meios viscoelásticos há uma dissipação de energia das ondas, os quais apresentam um comportamento não elástico e fazendo com que o perfil e a fase da onda ultrassônica sejam alterados ao longo de sua trajetória.

Uma relação material que é usada para descrever a propagação de uma onda é chamada de módulo complexo M^* . O módulo complexo pode representar vários módulos que vão depender da carga de tensão aplicada e inclui o módulo de Young E^* , transversal G^* , compressão volumétrica K^* e o módulo longitudinal L^* .

A representação matemática de uma onda transversal harmônica que se propagando em uma corda, por exemplo, pode ser vista como um simples oscilador, com deslocamento y . Essa grandeza pode ser usada para representar a variável de interesse que se altera quando a onda passa através do material. Assim, o deslocamento de um elemento na direção x , em um determinado tempo t , com tensão T , e densidade ρ pode ser modelado pela seguinte equação de onda:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{10}$$

Essa equação possui a seguinte solução:

$$y = C \sin(\omega t - kx) \tag{11}$$

em que C é amplitude da onda.

De forma geral, a equação de onda pode apresentar uma solução, na forma complexa descrita na forma de equação de Euler abaixo:

$$y = C e^{i(\omega t - kx)} \tag{12}$$

Essa equação propõe uma solução suficiente para materiais do tipo elástico que obedecem a lei de Hooke. Por exemplo, como no caso de uma mola, submetida a uma pequena deformação em relação ao seu ponto de equilíbrio, em que a sua constante elástica representa a componente elástica da mola.

No entanto, para materiais poliméricos, possuem propriedades de materiais viscoelásticos, os quais apresentam uma componente elástica e viscosa para o módulo de elasticidade. Para tais materiais o módulo de elasticidade é complexo M^* , formado por

duas componentes dependentes da frequência $M'(\omega)$, representando a parte real, conhecida como módulo de elasticidade de armazenamento, e que corresponde à componente elástica. Enquanto a parte imaginária $M''(\omega)$, denominada por módulo de elasticidade de perda, descreve a componente viscosa. Assim, o módulo complexo é dado por:

$$M^*(\omega) = M'(\omega) + iM''(\omega) \tag{13}$$

em que $\omega = 2\pi\nu$ e ν é a frequência de oscilação do transdutor em MHz. Os termos da equação acima devem ser agrupados a equação geral da onda, segundo a Equação (10).

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = M^* \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{14}$$

Substituindo a expressão para o módulo complexo $M^*(\omega)$, tem-se:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = M' \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + iM'' \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{15}$$

Nolle (2) formulou uma equação que em descreve uma relação entre os parâmetros acústicos dependentes da velocidade do som c , da atenuação α e de M' ou M'' com ρ .

$$M' = \rho c^2 \tag{16}$$

$$M'' = 2\alpha\rho c^3/\omega \tag{17}$$

Essas equações são válidas apenas para valores em que o fator $r = \alpha c/\omega \ll 1$. Por exemplo, para tecidos biológicos moles o fator r é da ordem de 0,003, que é muito menor que um, para uma frequência de 5 MHz.

A parte imaginária M'' é o módulo elástico que relaciona a energia dissipada em forma de calor quando o material é deformado. Outro parâmetro muito utilizado para descrever propriedades de amortecimento dos materiais é a $tg(\delta)$, conhecida como tangente delta, tangente de perda ou fator de amortecimento. Essa grandeza é definida como a razão da energia dissipada por ciclo pela máxima energia potencial armazenada durante um ciclo, assim.

$$tg(\delta) = \frac{M''}{M'} \cong 2\alpha c/\omega \tag{18}$$

Quando a relação $\alpha c/\omega \ll 1$, tem-se:

$$tg(\delta) \cong 2r \tag{19}$$

Essa grandeza pode ser diretamente calculada a partir do comprimento de onda e a atenuação, e pode ser facilmente comparada com os resultados de outras técnicas, por exemplo análise-mecânica dinâmica (DMA) (3). Para o coeficiente de atenuação α , existe a dependência com as amplitudes dos picos e da espessura das amostras, que são obtidas experimentalmente, portanto a Equação (3) dimensiona este parâmetro em dB/cm.

Se uma amostra sob carga ou tração possui dimensões laterais pequenas em comparação com o

comprimento de onda, então o módulo dinâmico complexo M^* pode ser substituído por um módulo de compressão complexo E^* na equação de onda. Por outro lado, uma onda longitudinal em um meio o comprime e o distorce lateralmente. Como um sólido pode desenvolver uma força de cisalhamento em qualquer direção, essa distorção lateral é acompanhada por um cisalhamento transversal.

Nesse estudo foi empregado uma amostra cuja espessura é cerca de 82 vezes maior do que o comprimento da onda longitudinal empregada no estudo.

Se a amostra possui a sua superfície extensa se comparada ao comprimento de onda e é colocada sob tensão ou compressão, o módulo complexo M^* pode ser substituído pelo complexo longitudinal L^* ou módulo complexo de cisalhamento G^* , dependendo de qual modo de onda é propagada, pois em sólidos as ondas longitudinais e transversais podem ser consideradas independentes. Portanto, as expressões a seguir são válidas para M^* , e podem ser derivadas da equação de onda, conforme mostrado.

$$M^* = M' + iM'' \quad (20)$$

Sabe-se que o coeficiente de Poisson, μ_p , estabelece uma relação entre as deformações longitudinal e transversal. Assim, por meio dele, e do módulo volumétrico, K^* , é possível relacionar o módulo de Young e o módulo transversal ou de cisalhamento de uma amostra. Com todos os módulos citados, Cowie (4) escreveu equações que os relacionam.

$$E^* = \frac{9G^*K^*}{G^* + 3K^*} \quad (21)$$

$$\mu_p^* = \frac{E^*}{2G^*} - 1 \quad (22)$$

Essas expressões podem ser rearranjadas e escritas da forma a seguir:

$$E^* = 3K^*(1 - 2\mu_p^*) = 2(1 + \mu_p^*)G^* \quad (23)$$

Conhecendo duas propriedades é possível determinar as outras, pois duas podem variar independentemente das outras. Uma boa aproximação para o coeficiente de Poisson é obtida quando se usa como exemplo borrachas macias, cujo valor é $\mu_p = 0,5$, e, portanto, $E^* = 3G^*$.

O módulo de elasticidade para ondas longitudinais é dado pela teoria matemática da elasticidade de Love (5).

$$L^* = K^* + \frac{4}{3}G^* \quad (24)$$

$$L' = K' + \frac{4}{3}G' \quad (25)$$

$$L'' = K'' + \frac{4}{3}G'' \quad (26)$$

Visto que conhecendo-se a velocidade do som e a atenuação do meio torna-se simples encontrar K' e K'' , para ondas longitudinais e transversais.

2. Materiais e Métodos

Na Figura 1, o aparato experimental é descrito, sendo composto de um transdutor emissor/receptor, um *pulser/receiver*, um osciloscópio, uma cuba de acrílico com uma coluna de água, a amostra que fica entre o caminho de propagação das ondas e um computador para processamento dos sinais.

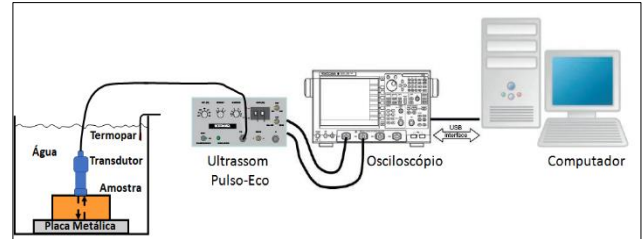


Figura 1 - Diagrama esquemático do arranjo experimental da técnica de medição por ultrassom de pulso-eco.

Inicialmente, foi necessário alterar a espessura de $(25,85 \pm 0,05)$ mm da amostra, para isso o transdutor foi mantido levemente pressionando no centro da superfície superior da amostra. Em um segundo momento, o transdutor foi afastado em relação a amostra de uma distância $\Delta z = 1,75$ mm, mas ainda mantido em contato com a amostra.

O transdutor e a amostra se encontravam imersos dentro de um tanque preenchido com água destilada. A temperatura da água registrada foi de $(24,35 \pm 0,2)$ °C, a qual permaneceu inalterada durante todo experimento. A temperatura foi monitorada por meio de um conjunto de quatro termopares (MTK-01, Minipa, SP, Brasil), imersos no tanque de acrílico. Os termopares empregados possuíam limite padrão de erro de $\pm 2,2$ °C ou 0,75% do valor medido. Por exemplo, adotando-se 0,75% do valor medido que foi 24,35 °C estimou-se uma incerteza aproximada de $\pm 0,2$ °C. Os termopares foram interligados ao módulo de condicionamento de sinais (NI DAQ-9212, National Instruments, TX, EUA) integrado ao módulo de comunicação (NI DAQ-9171, National Instruments, TX, EUA), estando este conectado a um computador via cabo USB. Com base nos dados, considerou-se o sistema em equilíbrio térmico, devido as medidas das temperaturas terem apresentado o mesmo valor em todas as regiões do tanque. Um transdutor de ultrassom (Panametrics, Olympus NDT Inc., Waltham, MA, USA) de imersão, de ondas longitudinais com frequência central de 5 MHz e 12,70 mm de diâmetro foi empregado como emissor e receptor dos sinais. O nível da água no tanque foi mantido de tal forma que a amostra, o transdutor, a base refletora e termopares permanecessem totalmente imersos.

Durante a execução das medições propostas por esse estudo, foi necessário o emprego dos seguintes instrumentos e acessórios experimentais:

- Osciloscópio (Tektronix, modelo TDS 2024C).
- Software MATLAB.
- *Pulser/Receiver* Ultrassônico (Olympus, modelo 5072PR).
- Computador pessoal (HP, Processador Intel Pentium, 512 MB de memória, DDR 400 MHz, Disco Rígido de 40 GB, sistema operacional Windows 7).

- Paquímetro digital (Digimess).
- Termômetro digital portátil (Equitherm, modelo TM879).
- Cabo *micro-dot* (Panametrics).
- Transdutor, 5,0 MHz longitudinal de imersão (Panametrics, modelo V110-RM).
- Dois cabos coaxiais blindados de 75 ohms.
- Dois cabos de alimentação.
- Cabo de comunicação USB.
- Porta amostra de $(25,85 \pm 0,05)$ mm de espessura.
- Tanque acrílico para água.
- Conjunto de quatro termopar.
- Módulo de condicionamento de sinais dos termopares (NI DAQ-9212).
- Módulo de comunicação (NI DAQ-9171).
- Suporte adaptado para o paquímetro e para o transdutor.
- Nivelador de superfície.

Para realização dos ensaios proposto foi montado o aparato experimental ilustrado de forma esquemática na Figura 2, para obtenção dos dados. Um algoritmo baseado em MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts, EUA) foi escrito para que se pudesse estimar a velocidade e o coeficiente de atenuação por meio de medidas dos ecos devido aos pulsos de ultrassom emitidos na amostra. O algoritmo se baseia na diferença de fase de dois ecos adquiridas, com o transdutor, em duas posições diferentes, como descrito na seção anterior onde foi apresentado os fundamentos teóricos do modelo.

A técnica de sondagem da amostra foi a de ultrassom pulso-eco, cujo aparato experimental pode ser visto na Figura 2.

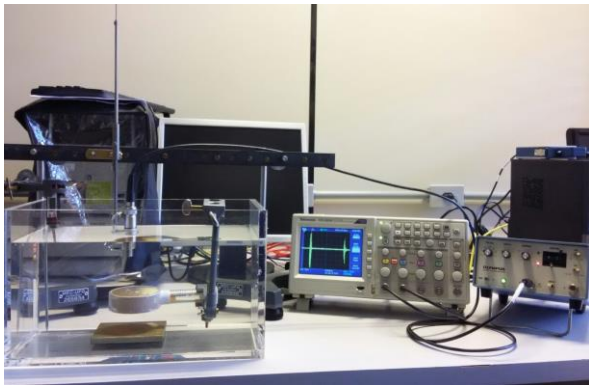


Figura 2 – Diagrama esquemático do arranjo experimental da técnica de medição por ultrassom pulso-eco.

Ajustes, no sistema de medição são necessários para garantir que o transdutor permaneça perpendicularmente alinhado com a amostra, para isso foi empregado um nivelador de superfície. Esse procedimento garante que os pulsos acústicos se propaguem ao longo de toda a espessura, minimizando perda por espalhamento da onda acústica, assim favorecendo o máximo de eco proveniente da amostra.

Com o aparato devidamente calibrado e nivelado, o primeiro pulso foi gerado sobre a amostra, imersa na água, e então um sinal pode ser visualizado na tela do osciloscópio, conforme descrito na Figura 3.

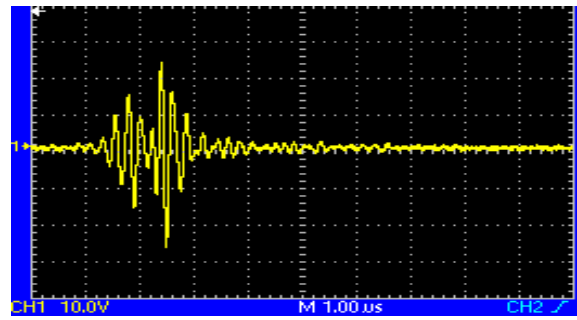


Figura 3 – Sinal obtido com o transdutor pressionado levemente a amostra.

Esse sinal foi obtido estando a amostra submetida a uma deformação temporária. Em seguida, o sinal foi processado e armazenado em disco rígido para posteriormente serem esses dados lidos e utilizados pelo algoritmo. Após essa etapa, o transdutor foi movido para uma segunda posição, sendo afastado de uma distância $\Delta z = 1,85 \text{ mm}$ maior em relação à anterior. O transdutor foi fixado nesse ponto. Antes que o segundo eco fosse registrado foi esperado um tempo de 5 minutos para garantir que o sistema estivesse em equilíbrio. Após esse tempo, foi finalmente registrado o segundo sinal, visualizado na tela do osciloscópio, como apresentado na Figura 4.

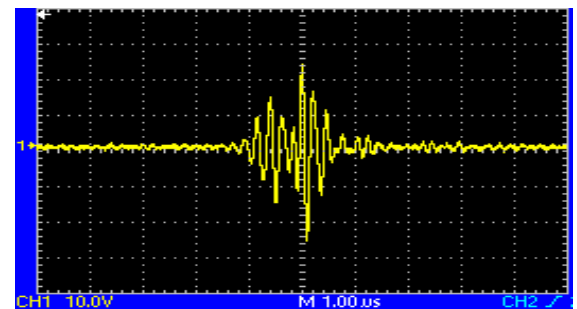


Figura 4 – Sinal adquirido quando o transdutor é deslocado de uma pequena distância $\Delta z = 1,85 \text{ mm}$, mas mantendo-se em contato com a amostra.

A deformação temporária percentual $(\Delta z/d) \cdot 100$ introduzida, pelo transdutor na amostra, durante o processo de sondagem foi aproximadamente 7%. Essa deformação é de natureza temporária, porque ao se afastar o transdutor da amostra nota-se que o eco retorna para a posição inicial, livre de deformação. Dessa forma garantindo que não houve alteração nas propriedades mecânicas do material sob teste. As medições foram executadas de acordo com as configurações pré-estabelecidas do osciloscópio e do *pulser/receiver*, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros instrumentais pré-ajustados no *Pulser/Receiver* e Osciloscópio para medidas da velocidade de ondas longitudinais na amostra de *phantom*.

Equipamento	Parâmetro	Valores
<i>Pulser/Receiver</i>	HPF	1 MHz
	LPF	10 MHz
	PRF	100 Hz
	Energia	1
	Damping	3
	Gain	+20 dB
Osciloscópio	Mode	1
	Escala Horizontal	1,00 µs/Div
	Escala Vertical	10,00 V/Div

Fonte: O autor (2016).

Assim, foram gerados dois arquivos com 2500 pontos cada. Após essas aquisições de sinais, os dados foram armazenados, em formato .dat, em um *pendrive*, e transportados para o computador para a etapa de pós-processamento. Após carregados, o algoritmo foi executado e os valores da velocidade longitudinal e do coeficiente de atenuação do polímero foram estimados, bem como os módulos elásticos e viscosos.

3. Resultados

A partir da metodologia apresentada nas seções anteriores, o valor do coeficiente de atenuação foi determinado em $\alpha = 0,152 \text{ dB/cm}$. O valor estimado da velocidade longitudinal de propagação na amostra foi de $c = 1448,6 \text{ m/s}$. A estimativa dos módulos de elasticidade foi feita assumindo que a densidade do polímero era equivalente à da água, ou seja $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$, os quais foram modelados por meio da Equação (16) até a Equação (26). O primeiro a ser determinado foi o módulo de elasticidade longitudinal de armazenamento $L' = 2,098 \text{ GPa}$, e o segundo foi o módulo de elasticidade longitudinal de perda da onda para o meio $L'' = 0,386 \text{ MPa}$.

A tangente delta $tg(\delta)$ é uma das propriedades dinâmicas mais comumente medidas em borrachas, representando a propriedades de amortecimento ou histerese, respectivamente. Em frequências muito altas (10 kHz – 100 MHz), a borracha aparenta ser muito rígida. Nessas frequências, as moléculas de polímero não têm tempo para reagir em resposta às oscilações forçadas. Nesse caso o fator de amortecimento é então muito pequeno. Nesse estudo, vimos que a tangente delta depende do coeficiente de atenuação, da velocidade da onda longitudinal propagando no polímero e da frequência do transdutor, assim: $tg(\delta) = 2ac/\omega$. Dentre os parâmetros citados o coeficiente de atenuação é o que mais influência no valor da tangente delta de polímeros, considerando o sistema em equilíbrio térmico e para uma mesma frequência (6). Esse fato é fácil de entender porque quanto maior for a atenuação do meio maior será a componente responsável pela viscosidade presente no módulo de elasticidade de perda. O valor da tangente delta obtido foi $tg(\delta) = 16,138 \times 10^{-6}$ mostrando que a $tg(\delta) \ll 1$. Com isso, nota-se que o polímero aqui estudado, na frequência de 5 MHz, apresenta características perfeitamente elástica ou Hookiano, em que a natureza viscosa é desprezível. No entanto, essa análise não é conclusiva uma vez que foi empregada uma única frequência de inspeção. Sabe-se que o comportamento mecânico ou dinâmico-mecânico de um material é governado por sua viscoelasticidade, que é uma função do tipo de ensaio e da solitação aplicada.

Os dados expostos ajudam a entender o fato de não se ter observado mudanças significativas entre os perfis dos ecos apresentados na Figura (2) e (3).

Nesse estudo, não foi utilizado transdutores de modo de onda transversal, devido ao meio acoplador ser constituído de água, o qual não possibilita a propagação de ondas desse tipo. No entanto, um

outro estudo subsequente vem sendo desenvolvido pelos autores como objetivo avaliar as propriedades de polímeros empregando diferentes modos de propagação de onda.

Os termos reais e imaginários de K^* , E^* e μ_p^* podem ser avaliados a partir de valores determinados experimentalmente para L^* e G^* . No entanto, nesse estudo não foi possível empregar ondas transversais para avaliar o módulo de cisalhamento complexo, G^* . Contudo, uma excelente estimativa pode ser feita considerando que ondas de cisalhamento se propagam cerca de 45% mais devagar do que as ondas longitudinais (6). Dessa forma, o módulo de armazenamento e de perda de cisalhamento pode ser estimado usando $G' = \rho c_T^2$, e $G'' = 2\alpha \rho c_T^3/\omega$, respectivamente. Esses módulos são menores do que suas contrapartes do módulo longitudinal. Em baixas temperaturas, como a do ambiente do laboratório, a velocidade da onda de cisalhamento é de aproximadamente 652 m/s, a qual proporciona estimar os módulos transversais correspondentes em $G' = 0,424 \text{ GPa}$ e $G'' = 0,068 \text{ MPa}$.

Portanto, por meio do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de elasticidade de cisalhamento foi determinado o módulo de elasticidade de volumétrico ($K' = 1,531 \text{ GPa}$ e $K'' = 0,247 \text{ MPa}$), módulo de Young ($E' = 1,166 \text{ GPa}$ e $E'' = 0,188 \text{ MPa}$) e o coeficiente de Poisson ($\mu_p' = 0,373$ e $\mu_p'' = 0,373$), os quais são os módulos de elasticidade de armazenamento e de perda, respectivamente.

4. Discussão

Os resultados apresentados animadores visto que empregando uma técnica simples, sendo possível estimar diversas propriedades física de um material polimérico. No entanto, esses resultados são preliminares e necessitam ser melhores interpretados e refinados. Isso porque durante a obtenção dos sinais não foi notada mudanças significativas na fase da onda se propagando no meio. Isso provavelmente se deve ao fato da amostra teste ser rica em água, a qual é considerado um meio não dispersivo. Outra hipótese é que o osciloscópio empregado não foi capaz de coletar um número maior que 2500 pontos, e isso pode também ter influenciado no cálculo da fase. Estudos vêm sendo conduzidos por estudantes vinculado ao nosso grupo de pesquisa buscando solucionar esses problemas. Principalmente aqueles relacionados às características físico-química do polímero. Visto que o polímero empregado está sendo caracterizando como um material útil para imitar o tecido biológico mole. Assim, espera-se que com a introdução de novos compostos químicos ao material de base suas propriedades físicas possam ser alteradas.

Outro ponto que também necessita ser explorado é a realização de medida comparativas empregando outras técnicas de avaliação de módulos elásticos, tal como a de *DMA*. Dessa forma pode-se comparar os resultados, podendo então ser feita a validação da técnica de análise-mecânica dinâmica por ultrassom. Com base nos fundamentos teóricos apresentados,

os módulos elásticos e viscosos foram determinados e poderão ser comparados com os valores encontrados pela técnica de *DMA*. Dessa forma, a diferença entre a técnica ultrassônica e de *DMA*, poderão ser analisadas.

5. Conclusões

Nesse trabalho foi apresentado um modelo acusto-mecânico para intimativa de propriedades acústicas e mecânicas de matérias viscoelásticos. Por meio de um algoritmo computacional de processamento de sinais acústicos foi possível inferir a velocidade do som e o coeficiente de atenuação do material teste. A partir desses resultados foram calculados diversos módulos elásticos, tais como o módulo elástico longitudinal e transversal. Para isso, a única grandeza que foi introduzida foi a densidade do material. Assim, devido a simplicidade, a técnica de ultrassom poderá se tornar uma ferramenta promissora para estimativas de propriedades mecânicas de materiais poliméricos.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador e professor Sílvio Leão Vieira, pela oportunidade concedida, onde pude ter acesso à pesquisa científica. Agradecemos especialmente ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica.

Os autores também agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), edital 05/2012, num. 10267001199 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), edital MCTI/CNPq 14/2014, num. 46229820140 pelo apoio financeiro.

Referências

1. Peters F, Petit L. A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media. *Ultrasonics* [Internet]. 2003 Jul 1 [cited 2021 May 17];41(5):357–63. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X03001094>
2. Nolle AW. Acoustic Determination of the Physical Constants of Rubber-Like Materials. *J Acoust Soc Am* [Internet]. 1947 Jun 17 [cited 2021 May 17];19(1):194–201. Available from: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.1916420>
3. Claro Neto S. *DMA: o que é preciso saber antes de sua utilização*. Brazilian J Therm Anal - BJTA. 2012;1(1):VII–X.
4. Cowie J. *Polymers Chemistry & Physics of Modern Materials*. 2nd. Glasgow and London: Blackie; 1991.
5. Love A. *Mathematical Theory of Elasticity*. London: Cambridge University Press; 1927.
6. Mc Hugh, J., Döring, J., Stark, W., Guey JL. Relationship between the Mechanical and Ultrasound Properties of Polymer Materials. In: 9th European Conference on NDT. Berlin; 2006. p. 1:9.

Contato:

Sílvio Leão Vieira
Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás
– UFG.

Av. Esperança, s/nº, Campus Samambaia, 74.690-900, Goiânia, Goiás, Brasil.

Telefone: (62) 3521-1014, ramal 2311

Fax: (62) 35211014.

slvieira@ufg.br