

## MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO ULTRA-SOM EM MATERIAIS COM ESPESURAS DA ORDEM DE UM COMPRIMENTO DE ONDA

por

P.H. Chang<sup>1</sup> e J.C. Machado<sup>2</sup>

**RESUMO** -- Uma nova técnica é apresentada para a medição da velocidade de ondas ultra-sônicas em materiais sólidos ou líquidos de espessuras muito finas (menor que um comprimento de onda). Esta nova técnica permite superar as dificuldades que geralmente se encontram na determinação de velocidades ultra-sônicas desses materiais utilizando os métodos tradicionais. Desenvolveu-se um sistema automatizado para detectar o atraso de fase que a onda de ultra-som sofre ao atravessar uma fina camada de material em uma frequência específica. Para isso, utilizam-se recursos computacionais e instrumentais, além de um circuito eletrônico dedicado. A comunicação entre o computador e os instrumentos é feita através da interface paralela GPIB (General Purpose Interface Bus). Experiências com amostras de epoxi e borrachas de silicone com espessuras de 0,70 mm e 0,55 mm, respectivamente, foram efetuadas e os resultados para o epoxi indicaram um coeficiente de variação amostral igual a 0,5%, e acurácia de 4% quando comparados com aqueles de materiais equivalentes, com espessuras da ordem de 3 centímetros, medidos por métodos tradicionais.

**Palavras-Chave:** Velocidade do ultra-som, medição da velocidade de fase, ultra-som.

### INTRODUÇÃO

A medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas é realizada freqüentemente nos laboratórios. Ela permite aplicações diversas, como a determinação de espessuras de materiais, aquisições de imagens, verificação da atuação de um "phantom", caracterização de tecidos, etc. Para cada caso, existem técnicas diferentes de medição. Uma grande dificuldade surge quando se quer medir velocidades em materiais com espessuras da ordem de grandeza de um comprimento de onda, ou menor ainda, como os que são utilizados na confecção de transdutores ultra-sônicos.

---

<sup>1</sup>Mestrando e <sup>2</sup>Professor Adjunto do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE/UFJR, Centro de Tecnologia, Bloco H, Sala 327, Cx.Postal 68510, CEP 21944, Rio de Janeiro.

O método que geralmente é empregado (Bamber, 1986), faz uso de dois transdutores ultra-sônicos, um atuando como transmissor e o outro como receptor. A amostra é colocada entre eles. É aplicado um pulso elétrico no transmissor e medido o intervalo de tempo decorrido até que surja um pulso elétrico na saída do receptor, através de um osciloscópio. A velocidade é calculada dividindo-se a largura do material pelo intervalo de tempo medido. Os problemas que este método apresenta, quando o meio do qual se deseja medir a velocidade possui uma espessura da ordem de um comprimento de onda, são os seguintes (Bamber, 1986 e Wells, 1977):

- o pulso emitido deve ter uma duração extremamente curta para evitar o aparecimento de ondas estacionárias no meio. Isso implica em um par de transdutores com ampla largura de banda de frequências. Nestas condições é geralmente medida a velocidade de grupo ao invés da velocidade de fase;
- o atraso que o material causa na onda que por ele se propaga é tão pequeno que torna-se difícil medi-lo com precisão pelo osciloscópio;
- a onda recebida pelo transdutor receptor tem, em geral, a sua forma modificada em relação ao pulso que incide na camada, de maneira que perde-se a noção do instante que começa o pulso recebido quando comparado com aquele emitido pelo transdutor transmissor.

O método descrito neste trabalho visa solucionar estes problemas e também automatizar a técnica de medição.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A teoria de transmissão de ondas acústicas planas com incidência normal através de três meios, conforme Kinsler e Frey (1962), é a base teórica deste trabalho (figura 1).

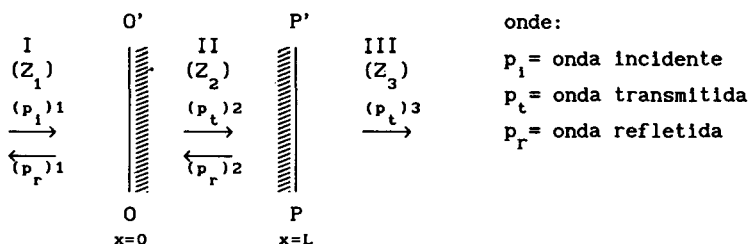


Figura 1. Transmissão de ondas planas através de três meios, I, II e III. As impedâncias acústicas de cada meio são representadas por  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ .

Uma onda acústica plana  $p(x,t)$ , propagando-se no sentido positivo do eixo  $x$ , conforme mostrado na figura 1 pode ser descrita como:

$$p(x,t) = A e^{j(\omega_0 t - Kx)} \quad (1)$$

onde:

$A$  = amplitude da onda de pressão,

$K = \omega_0 / c$ ,  $\omega_0$  = frequência angular,

$c$  = velocidade da onda no meio.

Quando esta onda incide na interface de separação dos meios I e II, uma parte da onda é refletida e uma outra parte é transmitida ao meio II. Após passar pelo meio II uma parte desta onda transmitida é refletida em  $x=L$  e retornada a  $x=0$  onde é novamente parcialmente refletida. Após sucessivas reflexões em  $x=0$  e  $x=L$ , o processo alcança um estado estacionário onde a energia contida na onda refletida no meio I adicionada à energia contida na onda transmitida ao meio III é igual à energia da onda incidente  $p_1$ , para um meio II sem perdas.

Nesta condição de estado estacionário, aplicam-se as condições de contorno que devem ser satisfeitas em todos os pontos dos planos que separam dois meios: as pressões acústicas em ambos os lados do plano devem ser iguais e as velocidades das partículas, normais à interface, são iguais. A primeira condição é imposta para se considerar que a interface de separação dos dois meios não saia de sua posição inicial. A segunda condição é necessária devido ao contato constante dos dois meios na região de separação.

Chega-se dessa forma à seguinte equação, que representa a razão,  $(A_1/A_3)$ , entre a onda incidente e a onda transmitida:

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{(Z_3 + Z_1) \cos(K_2 L)}{2 Z_3} + \frac{j(Z_2^2 + Z_3 Z_1) \sin(K_2 L)}{2 Z_3 Z_2} \quad (2)$$

A fase  $\theta$  desta razão complexa indica a fase acrescentada à onda que incide no meio II quando a mesma se propaga uma distância  $L$  neste meio. Desenvolvendo-se a Equação (2) tem-se:

$$\tan(\theta) = \frac{(Z_2^2 + Z_1 Z_3)}{Z_2 (Z_1 + Z_3)} \tan(K_2 L) \quad (3)$$

Para fazer uso da Equação (3) de forma a permitir a utilização do método, supõe-se os meios I e III iguais, por exemplo a água pura, conforme descrito por Del Grosso e Mader (1972) e o meio II como sendo um material genérico com impedância acústica  $Z_2$ . Tem-se desta forma:

$$\tan(\theta) = \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \tan(K_2 L) \quad (4)$$

onde:  $\theta$  = fase imposta pelo material,

$Z_1 = \rho_a \cdot c_a$  = impedância acústica da água,

$Z_2 = \rho_m \cdot c_m$  = impedância acústica do material,

$\rho$  = densidade ;  $c$  = velocidade,

$K_2 = 2\pi f_o / c_m$  ,

$L$  = espessura do material.

Nota-se que o termo entre parêntesis envolvendo impedâncias acústicas refere-se às ondas estacionárias do meio II. Por isso a fase que esta impõe não é apenas  $K_2 L$  como a princípio era de se esperar.

#### MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizando-se o método relativo de medição, semelhante ao trabalho desenvolvido por Lee, Lahham e Martin (1990), foram realizados os passos experimentais para a determinação da fase  $\theta$  do material conforme mostrado na Equação (4).

A técnica de medição empregada a seguir difere daquela utilizada por Sachse e Pao (1978), onde os transdutores são colocados diretamente em contato com a amostra, para a obtenção da onda transmitida, e colocados em contato um com o outro, para a obtenção da onda de referência. Desta forma, para que se consigam medições acuradas, é necessário que o coeficiente de acoplamento acústico entre os transdutores em contato, seja igual ao coeficiente de acoplamento entre o transdutor transmissor e a amostra, multiplicado por aquele entre a amostra e o transdutor receptor. Isso na prática é difícil de ser verificado.

Os passos enumerados a seguir (figuras 2a e 2b) utilizam a água como acoplamento entre os transdutores, de forma que este coeficiente de acoplamento não é afetado quando diferentes tipos de amostras são utilizadas. O efeito deste acoplamento é posteriormente subtraído no processo de medição.

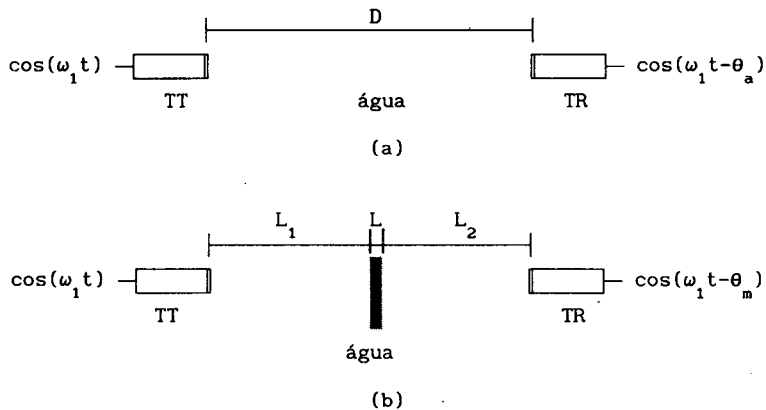


Figura 2. Método relativo de medição. (a) Transdutor Transmissor (TT) e Receptor (TR) imersos em água excitados por uma onda senoidal na frequência  $\omega_1$ . (b) Uma amostra de espessura  $L$  é colocada entre os transdutores.

- 1- Inicialmente mede-se o atraso provocado apenas pela água, (figura 2a), admitindo-se casamento de impedâncias entre os transdutores e a água, para evitar a presença de ondas estacionárias, ou utilizando-se a emissão por TT de ondas pulsáteis. Este atraso corresponde à seguinte diferença de fase:

$$\theta_a = K_1 D + \alpha \quad (5)$$

onde:  $K_1 = 2\pi f_1 / c_a$ ,

$D = L_1 + L + L_2 =$  distância entre os transdutores TT e TR,

$\alpha =$  fase imposta pelo transdutor e circuito eletrônico.

- 2- A seguir é inserido o material e a fase novamente medida, figura 2b,

$$\theta_m = K_1 (L_1 + L_2) + \beta + \alpha, \quad (6)$$

onde:  $\beta =$  fase provocada pelo material.

- 3- Ao subtrair (5) de (6), obtém-se :

$$\gamma = \theta_a - \theta_m = K_1 L - \beta. \quad (7)$$

- 4- Como  $\beta$  é a fase do material e portanto igual a  $\theta$  da Equação (4), substituindo a Equação (7) em (4) tem-se:

$$\left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \tan(K_2 L) - \tan(K_1 L - \gamma) = 0. \quad (8)$$

- 5- Repetindo este procedimento para uma frequência  $f_2$  diferente de  $f_1$  e igualando o resultado à Equação (8), a fim de se eliminar a densidade, tem-se:

$$f(c_m) = 0, \quad (9)$$

onde :

$$f(c_m) = \tan\left(\frac{2\pi f_1 L}{c_m}\right) \tan\left(\frac{2\pi f_2 L}{c_a} - \gamma_2\right) - \tan\left(\frac{2\pi f_2 L}{c_m}\right) \tan\left(\frac{2\pi f_1 L}{c_a} - \gamma_1\right)$$

- 6- Uma vez conhecidos  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $c$  e  $L$ , a Equação (9) é resolvida numericamente em função de  $c_m$ . Os pontos que cruzam o zero representam soluções desta equação. No entanto devem ser desprezadas as descontinuidades, i.e., pontos em que o argumento da tangente assume valores próximos a  $(\pi/2)$  ou  $(3\pi/2)$ , e também raízes da equação que se situam fora de um intervalo de valores onde se espera encontrar a velocidade para a amostra na qual está sendo efetuada a medição. Portanto, antes de resolver a Equação (9), deve-se definir uma faixa de valores para a velocidade  $c_m$ .

A técnica empregada tem como ponto fundamental a utilização de um circuito eletrônico capaz de detectar a fase do sinal recebido pelo transdutor receptor com precisão. Utilizou-se a forma de detecção das Componentes em Fase e Quadratura da onda recebida, conforme descrita a seguir:

Uma onda acústica plana na frequência  $f_0$  com atraso de fase  $\phi$ , pode ser escrita em função do tempo por:

$$p(t) = A \cos(\omega_0 t - \phi) \quad (10)$$

A geração das Componentes de Fase (IF) e Quadratura (IQ) é feita multiplicando-se a Equação (10) por  $\cos(\omega_0 t)$  e  $\sin(\omega_0 t)$  respectivamente e eliminando-se as componentes de alta frequência ( $2\omega_0$ ). Obtém-se assim:

$$IF = (1/2) A \cos(\phi) \quad (11)$$

e

$$IQ = (1/2) A \sin(\phi) \quad (12)$$

Donde se conclui que  $\phi = \arctan(IQ/IF)$  (13)

A figura 3 mostra o diagrama em blocos dos equipamentos utilizados na montagem experimental. Dois transdutores piezoelétricos com diâmetros de 4mm imersos em água e alinhados corretamente fazem a transformação da energia elétrica em mecânica e da energia mecânica em elétrica (TT e TR respectivamente). O conjunto atenuador (WaveTek, modelo 5080.1) e amplificador de potência (Rochester, modelo A300-40PA), com ganho fixo de 40 dB, permite adequar a amplitude do sinal recebido para o módulo processador desenvolvido. Os sinais IF e IQ são mostrados com varredura em X e Y e digitalizados em 8 bits num osciloscópio digital donde são enviados por GPIB para um computador. Um programa escrito em linguagem Pascal gerencia o sistema, efetua os cálculos, apresenta os resultados e dá as instruções necessárias para o usuário efetuar a medição.

Basicamente o que se tem no circuito eletrônico (figura 4) são os geradores de ondas defasadas de  $90^\circ$ ,  $x(t)$  e  $y(t)$ , dois multiplicadores e filtros passa-baixas. O circuito retificador de onda completa e somador permite detectar o início da onda recebida pelo transdutor TR, já que esta altera-se tanto no tempo como em amplitude na medida em que se modificam a frequência do oscilador, a distância dos transdutores ou a espessura da amostra. Uma vez detectado o seu início, o circuito de "Sample & Hold" deve amostrar as componentes IF e IQ no intervalo de tempo compreendido no pulso das salvas de senóides (figura 5). Estas são empregadas para evitar o aparecimento de ondas estacionárias entre os transdutores. No entanto elas devem possuir um intervalo de duração suficiente para que em cada salva de senóides a onda transmitida tenha características de onda contínua na frequência de trabalho.

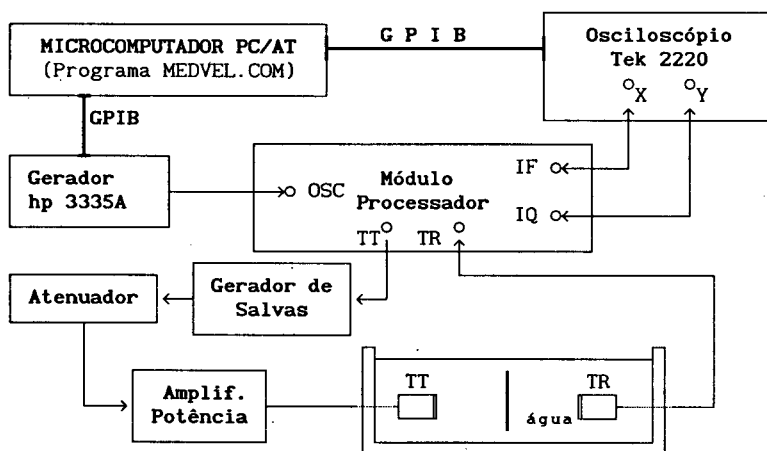


Figura 3. Diagrama da montagem experimental.

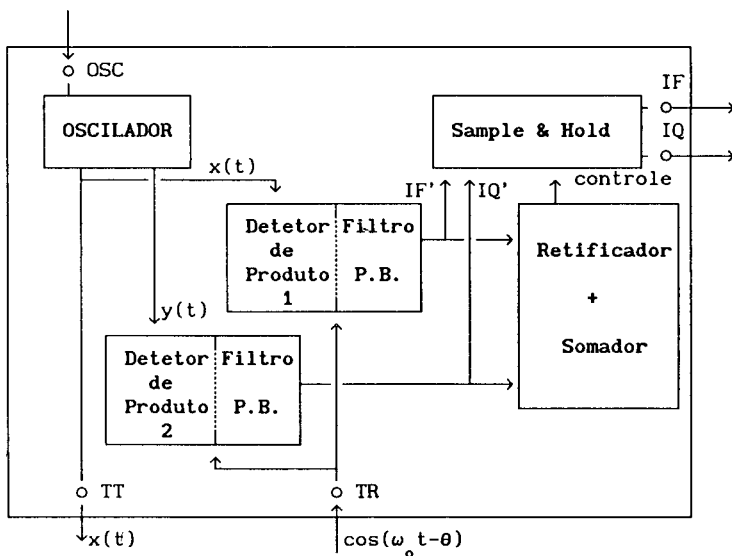


Figura 4. Diagrama em blocos do Módulo Processador.

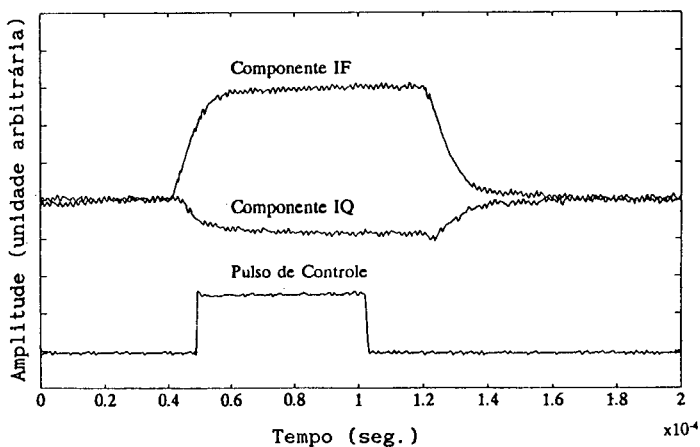


Figura 5. Componentes IF, IQ e o intervalo de tempo em que o pulso de controle se mantém ativado para o "Sample & Hold" amostrar estes sinais. (Obtidos após digitalização em um osciloscópio digital Tektronix 2220).

## RESULTADOS

Foram realizados testes com dois tipos de materiais. As frequências empregadas em ambos os casos foram  $f_1 = 1,8$  MHz e  $f_2 = 1,85$  MHz. A velocidade da água foi considerada constante e igual a 1500 m/s, para temperatura de trabalho em torno de 27°C.

Obteve-se de 35 medições com uma amostra de resina epoxi (CY 248, e catalisador HY 830, da Ciba-Geigy) de 0,70 mm de espessura, uma defasagem  $\gamma$  em torno de 120°, resultando em uma velocidade média de 2515 m/s e coeficiente de variação amostral de 0,5%. A comparação feita com o mesmo material medindo 31,1 mm de espessura, empregando métodos tradicionais como mencionados na introdução, revelou uma diferença na velocidade de aproximadamente 4%. A faixa de valores esperados para o epoxi segundo Krautkrämer (1977) se encontra entre 2400 e 2900 m/s.

Um segundo material, com velocidade inferior à da água foi testado. Utilizou-se a borracha de silicone RP310 da Reforplás Ind. Com. S.A., equivalente aos RTV's (Room Temperature Vulcanized) como descrito em Edmonds *et alii* (1979) e Eggleton & Whitcomb (1979). De acordo com as composições destes materiais, as velocidades podem variar de 960 a 990 m/s. Para uma amostra de 0,55 mm de espessura foram obtidas diferenças de fase  $\gamma_1 = 128,8^\circ$  e  $\gamma_2 = 139,8^\circ$ , respectivamente, nas frequências  $f_1$  e  $f_2$ . A figura 6 mostra o gráfico representando a função  $f(c)$  definida pela Equação (9). Observa-se para este caso, que a única solução possível é o valor de velocidade igual a 981 m/s, considerando os valores esperados para  $c_m$  variando entre 700 e 1450 m/s.

## DISCUSSÃO

A medição da propagação do ultra-som em materiais com espessuras da ordem de um comprimento de onda é difícil de ser realizada, conforme mencionado na introdução. O método do Interferômetro, segundo Andrae e Edmonds (1961), que possui acurácia de 0,5%, e o método de SLAM (Scanning Laser Acoustic Microscope), segundo Embree *et alii* (1985), que possui precisão de 0,3% e acurácia de 2%, permitem também medições de velocidades em espessuras desta ordem. No entanto, estes métodos são adequados apenas para amostras líquidas, quasi-líquidas ou tecidos.

Ao se comparar os valores de velocidades obtidos pelo método descrito neste trabalho, com o método tradicional (tempo de trânsito), deve-se lembrar que este último apresenta uma acurácia em torno de 3% (Wells, 1977). Por isso, a diferença encontrada de 4% conforme mostrado nos resultados, representa a soma de erros dos dois métodos utilizados.

Para ambos os materiais testados, a resina epoxi e a borracha de silicone, os quais são empregados para confecção de transdutores de ultra-som, os resultados de valores de velocidades obtidos estão conforme previstos. Portanto pode-se concluir que este novo método de

medição tem potencial para servir de apoio aos laboratórios de ultra-som para desenvolvimento de pesquisas nesta área (vide Chang, 1991).

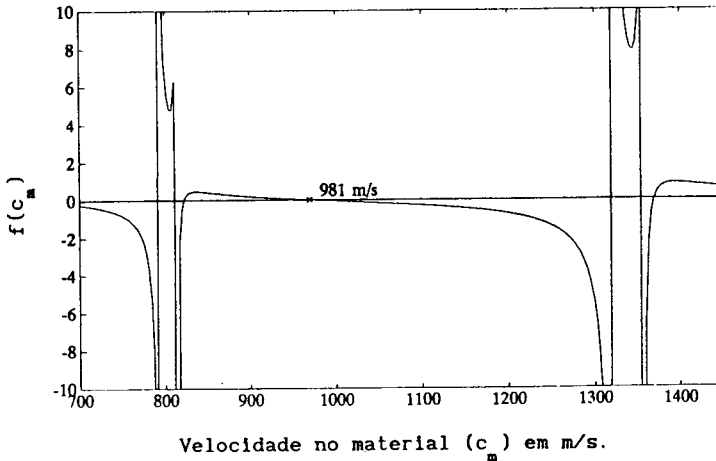


Figura 6. Gráfico de  $f(c_m)$ , utilizando os valores experimentais de  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $c_a$  para uma camada de 0,55 mm de RTV., e valores de velocidades  $c_m$  variando entre 700 e 1450 m/s.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio concedido pelo CNPq e PADCT/SINST.

#### REFERÊNCIAS

- ANDREAE, J.H., e EDMONDS, P.D. (1961). "Two megacycle Interferometer", *J. Scient. Instrum.*, Volume 38, page 508.
- BAMBER, J.C. (1986), "Speed of Sound" em *Physical Principles of Medical Ultrasonics*, editado por Hill, C.R., Ellis Horwood Limited, West Sussex, England.
- CHANG, P.H. (1991), "Medidor de Velocidades Ultra-sônicas Microcontrolado". Projeto final do curso de engenharia eletrônica do DEEL/UFRJ.

- DEL GROSSO, V.A., e MADER, C.W. (1972), "Speed of Sound in Pure Water", *J. Acoust. Soc. Am.*, Volume 52, pages 1442-1446.
- EDMONDS, P.D., REYES, Z., PARKINSON, D.B., FILLY, R.A., e BUSEY, H. (1979), "A Human Abdominal Tissue Phantom", *Ultrasonic Tissue Characterization II*, LINZER, M. (ed.), NBS Special Publication 525, U.S. Government Office, Washington, D.C., pages 323-326.
- EGGLETON, R.C., e WHITCOMB, J.A. (1979), "Tissue Simulators For Diagnostic Ultrasound", *Ultrasonic Tissue Characterization II*, LINZER, M. (ed.), NBS Special Publication 525, U.S. Government Office, Washington, D.C., pages 327-336.
- EMBREE, P.M., TERVOLA, K.M.U., FOSTER, S.G., e O'BRIEN, Jr.W.D. (1985), "Spatial distribution of the speed of sound in biological materials with the scanning laser acoustic microscope". *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, SU-32, pages 341-350.
- KINSLER, L. E. ,e FREY, A. R. (1962), *Fundamentals of Acoustics*, second edition, John Wiley & Sons, New York.
- KRAUTKRÄMER J., KRAUTKRÄMER H. (1977), *Ultrasonic Testing of Materials*, second edition, Springer Verlag.
- LEE, C.C., LAHAM, M., e MARTIN, B.G. (1990), "Experimental Verification of the Kramers-Kronig Relationship for Acoustic Waves". *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, Volume 37, pages 286-294.
- SACHSE, W., e PAO, Y.H. (1978), "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids", *J. Appl. Phys.*, Volume 49, pages 4320-4327.
- WELLS, P.N.T. (1977), *Biomedical Ultrasonics*, Academic Press Inc., London.

## ULTRASOUND VELOCITY MEASUREMENT IN THIN LAYERS

P.H. Chang and J.C. Machado

Biomedical Engineering Dept. COPPE/UFRJ, P.O. box 68510  
Rio de Janeiro, BRAZIL.

**ABSTRACT** -- This paper presents a novel technique for measuring ultrasonic velocity in thin solid or liquid layers (less than one wavelength in thickness). This technique overcomes some difficulties that are generally present when traditional methods of ultrasonic velocity measurement are used. An automatic system which detects the phase of a wave passing through a thin layer at specific frequency was developed. The method requires computational and instrumentation facilities, and a dedicated electronic circuit which are described. Communication between computer and instruments is performed by the GPIB (General Purpose Interface Bus). Experiments with samples of epoxy and RTV rubber with thickness of 0.7 mm and 0.55 mm, respectively, were carried out, and the results for epoxy showed a coefficient of variation of 0.5% and an accuracy of 4% when compared with measurement carried out by traditional methods, in samples of approximately three centimeters in thickness.

**KEYWORDS** : Ultrasound velocity, phase velocity measurement, ultrasound.