



## MEDIÇÃO DA VISCOSIDADE USANDO CONVERSÃO DE MODO DE ONDAS ACÚSTICAS

**Flávio Buiochi**

**Julio Cezar Adamowski**

**Celso Massatoshi Furukawa**

Dep. Eng. Mecânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Avenida Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508-900 – São Paulo, SP, Brasil

**Ricardo Tokio Higuti**

Dep. Eng. Elétrica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp  
Avenida Brasil, 364 – 15385-000 – Ilha Solteira, SP, Brasil

**Resumo.** *Este trabalho apresenta uma nova célula de medição de viscosidade dinâmica de líquidos usando conversão de modo de ondas acústicas. A célula determina o coeficiente de reflexão complexo de ondas de cisalhamento na interface sólido-líquido. Ondas transmitidas e refletidas são medidas por uma membrana de PVDF de grande abertura. A magnitude e a fase do coeficiente são obtidas pela normalização do sinal da interface sólido-líquido com relação ao sinal da interface sólido-ar no domínio da frequência. O método empregado é o da reflexão relativa para ondas de cisalhamento. Medições da viscosidade de óleos automotivos foram feitas no intervalo entre 1 e 10 MHz. Os resultados experimentais são comparados com os obtidos por um viscosímetro rotacional.*

**Palavras-chave:** *Ultra-som, Viscosidade dinâmica, Conversão de modo.*

### 1. INTRODUÇÃO

A medição da viscosidade de líquidos pode ser utilizada como parâmetro na monitoração da qualidade de óleos lubrificantes em máquinas de grande porte como, por exemplo, unidades geradoras de usinas hidrelétricas. Nessas unidades, ocorre a contaminação do óleo lubrificante por água, o que reduz a qualidade lubrificante e contribui para a corrosão dos componentes do sistema. Problemas semelhantes também podem ser encontrados nos transformadores elevadores e abaixadores de tensão, onde o óleo é utilizado como material isolante e refrigerante (Griffin, 1995). Nesse caso, se a umidade do óleo estiver inadequadamente elevada, sua capacidade isolante será reduzida, o que pode danificar o transformador e comprometer a distribuição de energia. Analogamente, medições feitas em óleos lubrificantes à bordo de automóveis são úteis na monitoração da degradação do óleo devido ao uso nos motores de combustão e à contaminação com água, gasolina e outros mais (Lec *et al.*, 1997).

No processamento de alimentos, a medição da viscosidade permite controlar a qualidade das matérias-primas, avaliar o efeito que as variações na formulação e nas condições de

processamento têm sobre os produtos durante a fabricação e estimar o produto final. Assim, a medição da viscosidade reduz os custos dos ingredientes e garante uma melhor consistência do produto (Race, 1991).

Existem diferentes tipos de instrumentos disponíveis no mercado que possibilitam a monitoração contínua da viscosidade de líquidos. Exemplos clássicos desses instrumentos são os viscosímetros rotacional e de haste vibrante. Entretanto, é difícil aplicá-los no controle dos processos, porque exigem dispositivos com partes móveis imersas no líquido que obstruem o escoamento provocando perda de carga.

Para evitar peças móveis há a possibilidade de se utilizar a propagação de ondas ultra-sônicas na medição de parâmetros acústicos relacionados à viscosidade, como por exemplo o coeficiente de reflexão para ondas de cisalhamento em uma interface sólido-líquido (Harrison e Barlow, 1981) (Cohen *et al.*, 1987). Um método que se apresenta viável na obtenção da viscosidade, empregando ondas ultra-sônicas, é o método da reflexão ultra-sônica desenvolvido em 1949 por Mason *et al.* (1949). Atualmente, as medições realizadas com esse método são facilmente adaptadas às possibilidades das técnicas de processamento digital de sinais (Alig *et al.*, 1997).

Uma das vantagens dos dispositivos que utilizam a propagação de ondas de cisalhamento na medição da viscosidade é que eles necessitam apenas de um pequeno volume do líquido. Sendo, portanto, adequado para o desenvolvimento de filmes poliméricos e polpa de papel (Alig *et al.*, 1997), e muitos outros, que chegam à ordem de micrometros.

Neste trabalho, o método empregado na medição do coeficiente de reflexão refere-se a uma onda plana de cisalhamento refletida numa interface sólido-líquido com incidência normal. A célula de medição sugerida neste trabalho usa um transdutor piezoelétrico que gera ondas longitudinais e uma membrana de PVDF (polyvinylidene fluoride) que responde somente no modo longitudinal. A onda de cisalhamento é gerada pela conversão de modo. Essa aproximação evita o problema de que um transdutor de ondas de cisalhamento não gera uma onda perfeita de cisalhamento e devido ao efeito de Poisson, a geração de uma onda de cisalhamento está sempre associada com a geração simultânea de ondas longitudinais (Shah e Balasubramaniam, 1996). Além disso, evita um dos principais problemas na montagem dos arranjos experimentais convencionais que é a viabilidade de transdutores de banda larga para ondas de cisalhamento (Alig *et al.*, 1997). Essas desvantagens são contornadas utilizando-se a conversão de modos na geração das ondas de cisalhamento, pois os transdutores de banda larga para ondas longitudinais são amplamente disponíveis e a conversão de modo é total.

Uma vez que a impedância acústica da onda de cisalhamento é conhecida na parte sólida da célula, a viscosidade dinâmica do líquido pode ser obtida a partir da densidade do líquido e do coeficiente complexo de reflexão na interface sólido-líquido.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

Um método empregado na medição da viscosidade de líquidos, baseia-se na determinação do coeficiente de reflexão de uma onda plana de cisalhamento incidindo normalmente na interface entre uma linha de retardo constituída por um sólido e o líquido que se quer caracterizar. Esse método da incidência normal tem sido objeto de muitos estudos para líquidos Newtonianos (McSkimin e Andreatch Jr., 1967) (Moore e McSkimin, 1970) e líquidos viscoelásticos (Harrison e Barlow, 1981) (Cohen-Tenoudji *et al.*, 1987). Neste caso, a onda de cisalhamento é polarizada de modo a se ter o movimento das partículas paralelo ao plano da interface e, assim, somente ondas de cisalhamento são refletidas nessa interface, evitando outros modos de conversão (O'Neil, 1949).

Assim, como apresentado pelo esquema da Fig. 1, descreve-se o método da reflexão da onda de cisalhamento com incidência normal, onde considera-se uma onda de cisalhamento, plana e harmônica, propagando-se do primeiro meio para o segundo ao longo do eixo  $z$ .

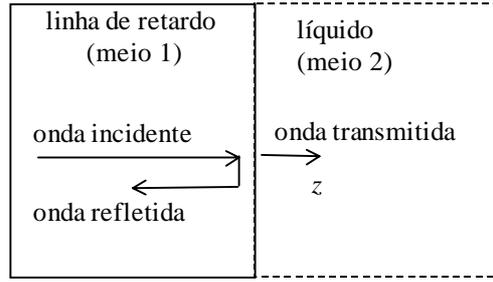


Figura 1 - Onda de cisalhamento com incidência normal na interface entre dois meios.

Tomando a direção de propagação de uma onda de cisalhamento como a direção  $z$  e a direção de movimento das partículas como a direção  $x$ , a equação dessa onda num meio viscoelástico pode ser descrita por:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{\rho}{G^*} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (1)$$

onde  $u_x$  é o deslocamento transversal na direção  $x$ ,  $G^*$  o módulo de cisalhamento complexo, e  $\rho$  a densidade do meio. O módulo de cisalhamento complexo é definido pela razão entre a tensão de cisalhamento pela deformação de cisalhamento,  $G^* = G' + jG''$ , onde  $G'$  é o módulo elástico, e  $G''$  o módulo de perda. O módulo de perda está relacionado com a viscosidade dinâmica  $\eta$  pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{G''}{\omega}, \quad (2)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular. A impedância acústica característica complexa  $Z^*$  de uma onda de cisalhamento no meio é dado por:

$$Z^* = \sqrt{G^* \rho}. \quad (3)$$

Considerando a propagação de uma onda de cisalhamento do primeiro meio para o segundo meio, o coeficiente de reflexão complexo na interface é dado por:

$$R_{12}^* = \frac{Z_2^* - Z_1}{Z_2^* + Z_1}, \quad (4)$$

onde  $Z_1$  é a impedância acústica característica do primeiro meio, material sólido com propriedades conhecidas. Em geral, o sólido introduz uma atenuação muito pequena, logo sua impedância pode ser considerada real. O segundo meio é o líquido cuja viscosidade se quer medir e que apresenta uma impedância complexa. Assim o coeficiente de reflexão complexo pode ser representado numa forma exponencial  $R_{12}^* = R_{12} e^{j(\pi+\theta)} = -R_{12} e^{j\theta}$ , onde  $R_{12}$  é a magnitude do coeficiente de reflexão e  $(\pi + \theta)$  é a mudança de fase na reflexão. Sabe-se que a onda de cisalhamento refletida na interface quando o meio 2 é o ar, apresenta  $R_{12} = 1$  e  $\theta = 0$ . Conseqüentemente, na interface a tensão de cisalhamento refletida está  $180^\circ$  fora de fase da tensão incidente. Agora, ao se colocar o líquido no meio 2, resultará um decréscimo na

fase de  $\theta$  (quantidade negativa) e  $R_{12}$  será reduzido. Assim, determinam-se a magnitude e a fase utilizando como referência uma onda de cisalhamento refletida na interface de medição quando o meio 2 é o ar.

Finalmente, o valor da viscosidade dinâmica é obtido pela seguinte expressão:

$$\eta_2 = \frac{-4(1 - R_{12}^2)R_{12}\sin\theta}{(1 + R_{12}^2 + 2R_{12}\cos\theta)^2} \frac{Z_1^2}{\omega\rho_2}. \quad (5)$$

onde  $\rho_2$  é a densidade do líquido. Essa expressão mostra que só é possível medir a viscosidade conhecendo *a priori* a densidade do meio 2.

### 3. DESCRIÇÃO DA CÉLULA

A célula de medição de viscosidade usando conversão de modo, é apresentada na Fig. 2 e consiste de um emissor de cerâmica piezoelétrica, um receptor de membrana de PVDF, uma linha de retardo de polimetil-metacrilato (PMMA), uma linha de retardo de água e um prisma de material sólido (alumínio ou acrílico). A amostra líquida é colocada sobre a superfície de medição do prisma que se encontra do lado oposto à face inclinada. O emissor gera uma onda longitudinal pulsada no PMMA que atravessa a membrana de PVDF e gera o sinal  $a_T$ . A onda longitudinal alcança a face oblíqua do prisma onde é convertida numa onda de cisalhamento vertical (onda SV). A onda de cisalhamento alcança a interface sólido-amostra com incidência normal. Nessa interface, a onda de cisalhamento é refletida como uma onda de cisalhamento horizontal (onda SH), e pela reciprocidade retorna ao receptor como uma onda longitudinal que gera o sinal  $a_I$ .

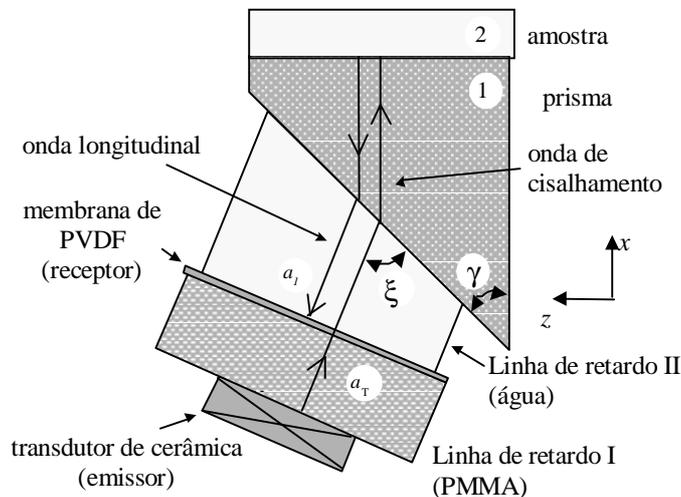


Figura 2 - Desenho esquemático da célula de medição.

O método empregado na medição da magnitude e fase do coeficiente de reflexão é na verdade um conjunto de duas medições à mesma temperatura. Primeiro, uma amostra de ar é usada como referência, obtendo os sinais  $a_{T(ar)}$  e  $a_{I(ar)}$ . As transformadas de Fourier numa frequência particular são calculadas, resultando nos valores  $A_{T(ar)}$  e  $A_{I(ar)}$ . Assim, a medição é repetida para a amostra líquida, obtendo  $A_{I(liq)}$  e  $A_{T(liq)}$ . A magnitude e a fase do coeficiente de reflexão podem ser calculadas como a razão entre a segunda e a primeira medição. Para eliminar o problema da instabilidade da eletrônica e dos transdutores (emissor e receptor), o

método da reflexão relativa permite empregar uma normalização com relação a  $A_{T(liq)}$  e  $A_{T(ar)}$ . Assim, o coeficiente de reflexão complexo é dado por:

$$R_{12}^* = -\frac{A_{1(liq)} / A_{T(liq)}}{A_{1(ar)} / A_{T(ar)}}. \quad (6)$$

A partir dessa equação determinam-se a magnitude  $R_{12}$  e a variação de fase  $\theta$  do coeficiente de reflexão complexo, como mostrado a seguir:

$$R_{12} = |R_{12}^*| \quad \text{e} \quad \theta = \arctg \frac{\text{Im}(R_{12}^*)}{\text{Re}(R_{12}^*)} - \pi. \quad (7)$$

Substituindo essas quantidades mensuráveis na Eq. (5), obtém-se a viscosidade dinâmica do líquido. Nesta montagem deve-se conhecer previamente a impedância acústica do prisma e a densidade do líquido.

Os ângulos  $\xi$  e  $\gamma$ , mostrados na Fig. 2, são escolhidos de modo a existir somente ondas de cisalhamento no meio 1 e de garantir uma incidência normal na interface sólido-líquido. O ângulo de incidência da onda longitudinal na linha de retardo II é  $(90 - \xi)$  graus.

#### 4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

No sistema de medição utilizado, o emissor é excitado com um *burst* senoidal a uma taxa de repetição de 1kHz, usando um gerador programável de funções (Tektronix AFG 5102) e um amplificador RF de potência (AR 150A100A). Os sinais recebidos pela membrana de PVDF são amplificados até 40 dB por um analisador ultra-sônico (Panametrics 5052UA). Esses sinais são digitalizados por um osciloscópio digital (HP54820A) e transferidos para um computador utilizando-se o protocolo de comunicação GPIB. O processamento desses sinais é feito utilizando-se o *software* Matlab™.

Utilizando-se o prisma de alumínio na temperatura de 20°C, a célula é projetada para se ter um ângulo de incidência de 19° para a onda longitudinal e um ângulo refratado de 43° para a onda de cisalhamento. Por outro lado, utilizando-se o prisma de acrílico, os ângulos de incidência e refratado são 47° e 45°, respectivamente. O efeito no ângulo refratado é de aproximadamente  $\pm 0.5^\circ$  para uma variação da temperatura de  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Durante as medições a temperatura deve ser mantida constante. Senão deve-se ajustar o ângulo de incidência da onda longitudinal.

Os emissores usados nos experimentos são transdutores comerciais, piezoelétricos e de banda larga com frequências centrais de: 1, 1,6, 3,5, 5 e 10MHz. O receptor é uma membrana de PVDF de 28 $\mu\text{m}$  de espessura com ambas as faces metalizadas com ouro, formando os seus eletrodos. Essa membrana apresenta um diâmetro de 55mm. Um lado da membrana é colado à linha de retardo I com uma fina camada de adesivo, e o outro lado está em contato com a água. O controle de temperatura na célula de medição é realizado com um banho termostático contendo água a temperatura constante. Os experimentos foram conduzidos à temperatura 23,0 $\pm$ 0,5°C.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As densidades medidas dos prismas de alumínio e acrílico são  $2700 \text{ kg/m}^3$  e  $1180 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente, e as respectivas velocidades de propagação das ondas de cisalhamento são consideradas iguais a  $3130 \text{ m/s}$  e  $1400 \text{ m/s}$ . As densidades dos óleos automotivos SAE 90 e SAE 140, medidas com um picnômetro, são de  $891$  e  $899 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente, e as respectivas viscosidades, medidas com um viscosímetro rotacional (reômetro Rheotest 2), são de  $0,48 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  e  $1,05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . As medições foram realizadas à temperatura de  $23,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . As curvas reológicas obtidas com o viscosímetro são mostradas na Fig. 3. Nota-se que se pode traçar uma linha reta passando por todos os pontos experimentais, inclusive a origem. Assim, os óleos utilizados são considerados como líquidos Newtonianos.

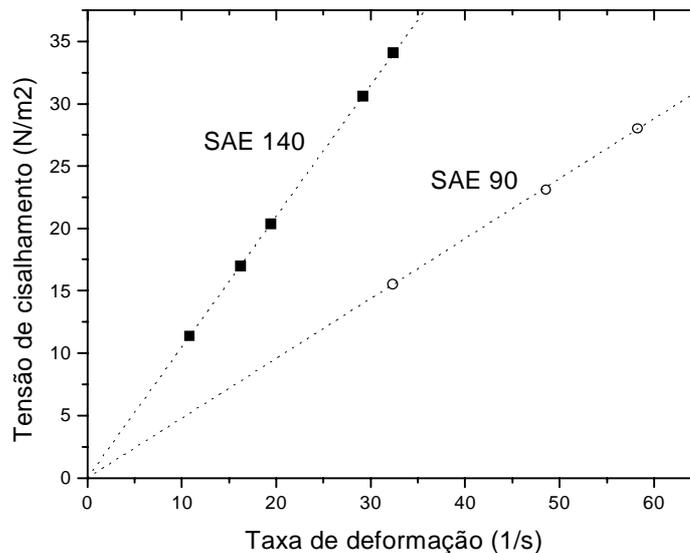


Figura 3 – Curvas reológicas dos óleos SAE 90 e SAE 140.

Nas Figuras 4 (prisma de alumínio) e 5 (prisma de acrílico), as linhas cheias mostram a magnitude e a fase simuladas do coeficiente de reflexão para os óleos automotivos. As viscosidades usadas nessas simulações foram aquelas obtidas com o viscosímetro. Nas simulações esses óleos foram considerados como líquidos Newtonianos. Já os valores obtidos para a viscosidade usando a célula de medição são mostrados com círculos abertos para o SAE 90 e quadrados cheios para o SAE 140. Cada ponto foi obtido considerando a média de 5 aquisições, das quais foram estimadas a média e desvio padrão das medidas. Os pontos que estão juntos e alinhados correspondem a banda de  $-3\text{dB}$  dos respectivos transdutores.

Utilizando-se o prisma de alumínio, os transdutores foram excitados com trens de senóide, contendo um ciclo na frequência de  $1\text{MHz}$  e três ciclos nas frequências de  $3,5$ ,  $5$  e  $10 \text{ MHz}$  – os transdutores utilizados aqui estão relacionados com as respectivas frequências de excitação. Agora, para o prisma de acrílico, devido à elevada atenuação da onda de cisalhamento neste meio, somente o transdutor de frequência central  $1,6\text{MHz}$  foi utilizado e excitado com trens de senóide maiores, contendo três ciclos na frequência de  $1,1\text{MHz}$  e cinco ciclos de  $1,6 \text{ MHz}$ .

Da Figura 4, pode-se ver que a diferença entre a magnitude (simulada e medida) dos coeficientes de reflexão do SAE 90 e do SAE 140 crescem com o aumento da frequência. Portanto, a sensibilidade na medição da viscosidade aumenta com a frequência. O mesmo comportamento é observado para a variação de fase simulada quando o líquido é Newtoniano,

embora a variação de fase medida experimentalmente não apresenta esse comportamento, isto é, a diferença praticamente não se altera. Nota-se que os desvios relativos entre os valores experimentais e simulados crescem com a frequência e são maiores para o líquido mais viscoso. Esse comportamento pode ser explicado considerando o líquido como viscoelástico, também constatado em outros experimentos com líquidos mais viscosos (Buiochi *et al.*, 1998). Isso também pode ser observado para os experimentos realizados com o prisma de acrílico (Fig. 5).

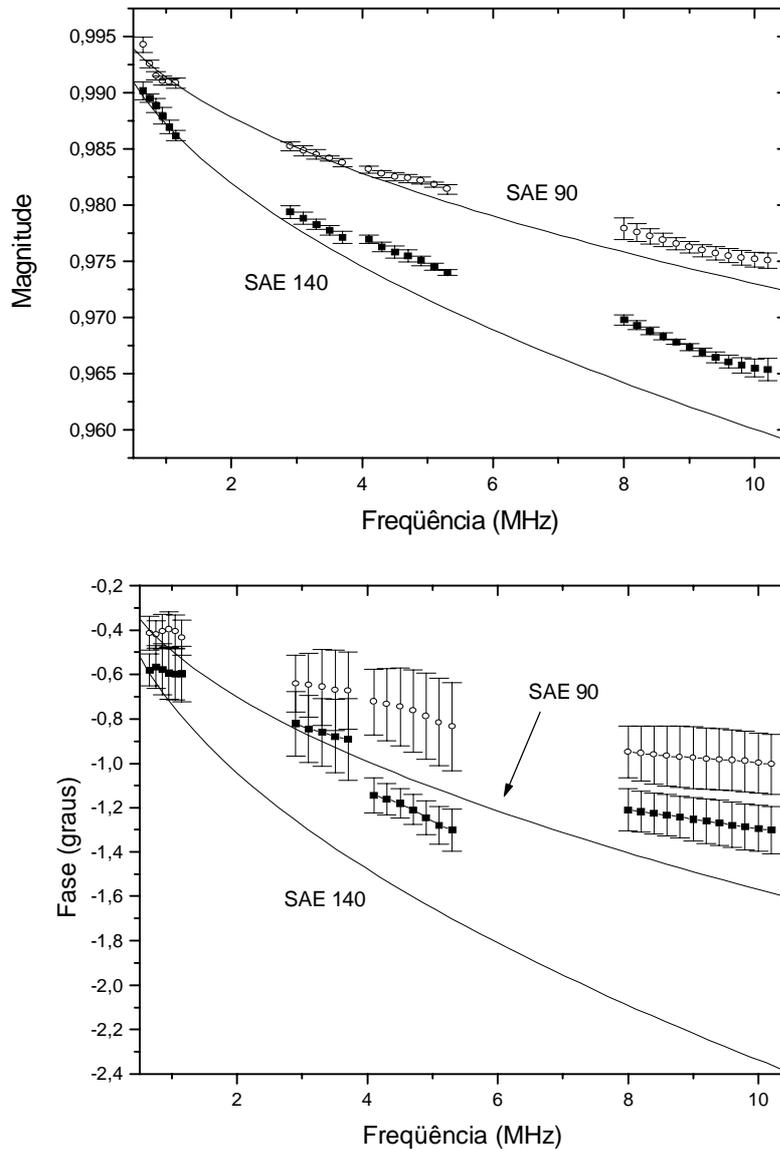


Figura 4 - Magnitude  $R_{12}$  e variação de fase  $\theta$  versus frequência, simuladas e medidas para o prisma de alumínio.

Comparando as Figuras 4 e 5, nota-se que a variação com a viscosidade nas medidas da magnitude e da variação de fase é maior para o prisma de acrílico. Isso é devido ao melhor casamento de impedância entre o prisma de acrílico e os líquidos, que permite uma maior transferência de energia ao líquido. Conseqüentemente, tem-se uma maior sensibilidade da resposta à reflexão.

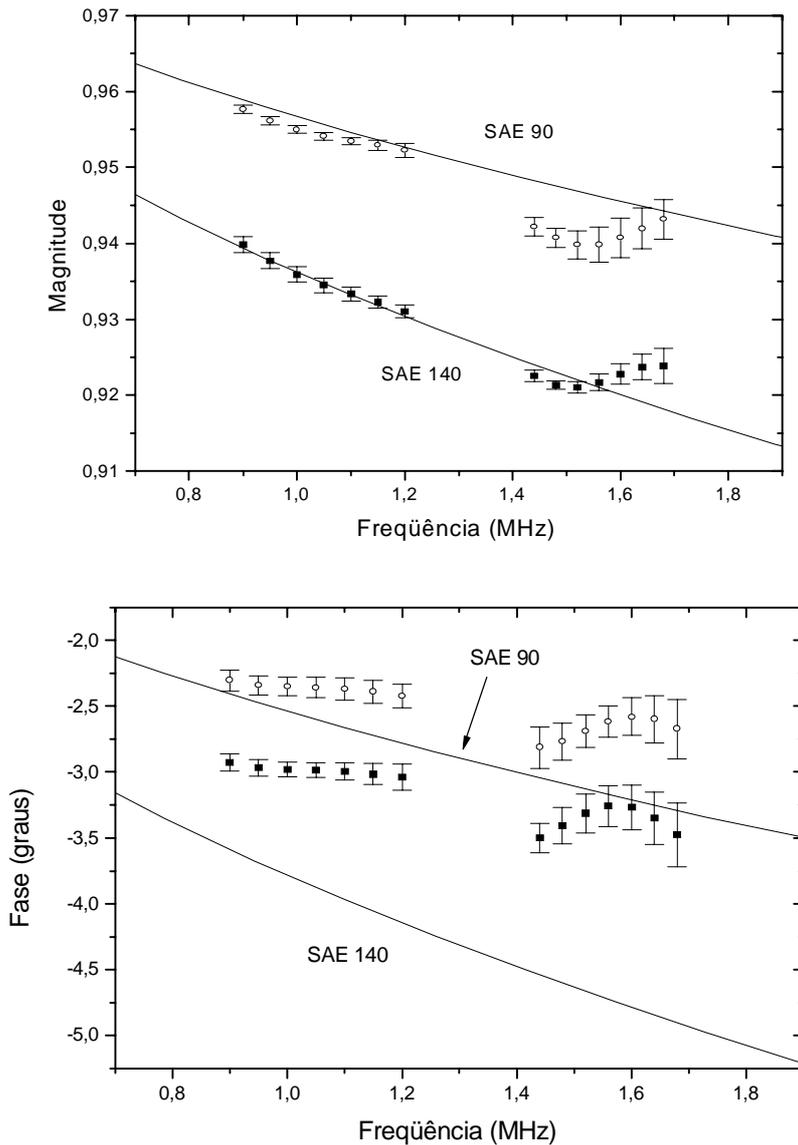


Figura 5 - Magnitude  $R_{12}$  e variação de fase  $\theta$  versus frequência, simuladas e medidas para o prisma de acrílico.

As Figuras 6 e 7 mostram os valores da viscosidade dinâmica do SAE 90 (círculos abertos) e SAE 140 (quadrados cheios) obtidos pelas células de medição com prismas de alumínio e acrílico, respectivamente. Essas viscosidades são comparadas com os valores obtidos em baixa frequência pelo viscosímetro rotacional, são utilizadas linhas sólidas. As linhas tracejadas representam a variação das respectivas viscosidades para uma variação de temperatura de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Nota-se, nessas figuras, que existe uma grande diferença entre os valores medidos da viscosidade (SAE 90 e SAE 140) usando a célula (alta frequência) e o viscosímetro (baixa frequência). Isso acontece porque em altas frequências o efeito elástico não é desprezado e portanto o líquido não se comporta como um líquido Newtoniano. Além disso, o efeito elástico aumenta com o aumento da viscosidade. Observa-se que, os valores absolutos da diferença entre a viscosidade medida com a célula e com o viscosímetro para SAE 90 são menores do que para o SAE 140, isso acontece porque a viscosidade do SAE 90 é menor.

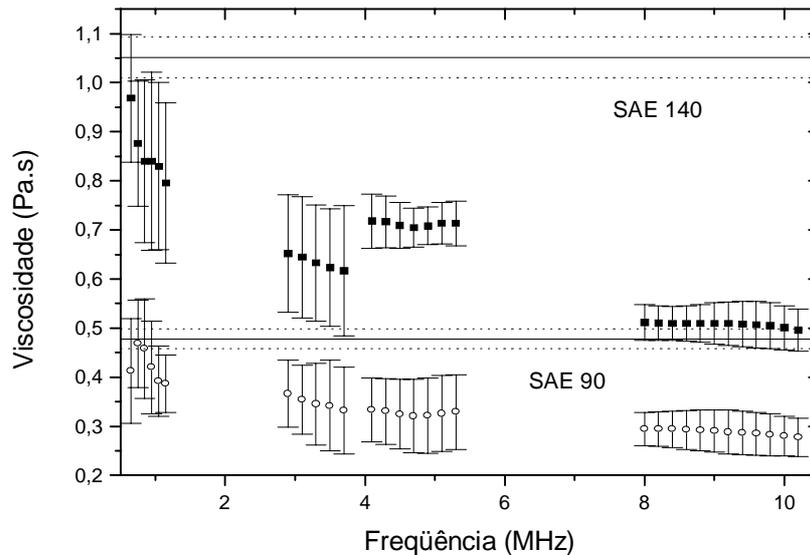


Figura 6 - Viscosidade versus frequência para o prisma de alumínio.

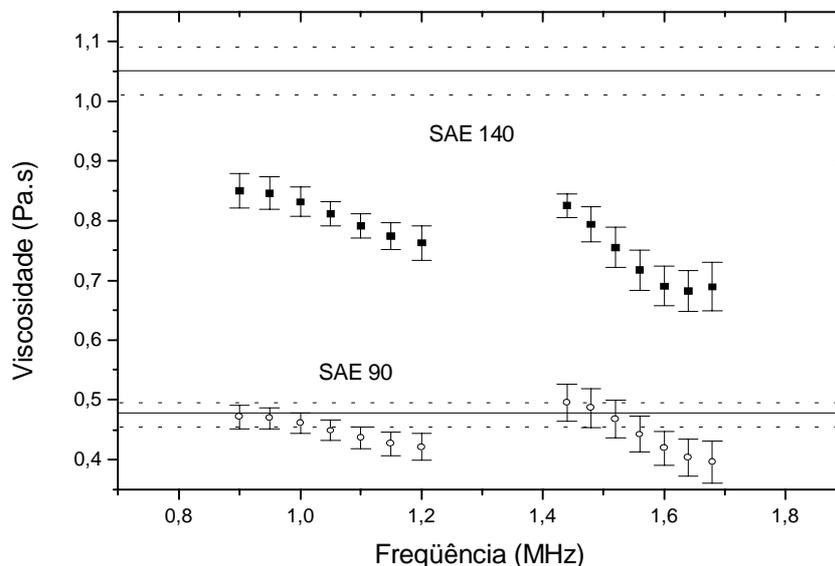


Figura 7 - Viscosidade versus frequência para o prisma de acrílico.

## 6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Uma nova célula para medir a viscosidade dinâmica de líquidos foi apresentada. Essa célula converte ondas longitudinais em ondas de cisalhamento e vice-versa. Portanto, mesmo que as ondas longitudinais sejam geradas e medidas, as ondas incidentes na amostra líquida são ondas de cisalhamento. Esse projeto elimina as ondas longitudinais espúrias geradas por um transdutor de cisalhamento, que é usado em um método convencional baseado na reflexão das ondas de cisalhamento com incidência normal. A membrana de PVDF garante uma normalização do sinal refletido na interface sólido-amostra com o sinal transmitido. A montagem dos transdutores permite o ajuste do ângulo de incidência das ondas longitudinais, em qualquer temperatura, para garantir uma incidência normal da onda de cisalhamento.

Os valores calculados da viscosidade, usando a magnitude e a variação de fase do coeficiente de reflexão medidos na célula, têm um grande erro quando comparados com os valores obtidos pelo viscosímetro. A medição da magnitude tem uma maior precisão do que a medição da variação de fase. Se esses líquidos são considerados Newtonianos então somente a

magnitude é necessária no cálculo da viscosidade. Foi verificado que esse procedimento fornece bons resultados os quais concordam melhor com os valores obtidos pelo viscosímetro.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à FINEP/RECOPE e FAPESP pelo auxílio concedido a esta pesquisa.

### **REFERÊNCIAS**

- Alig, I., Lellinger, D., Sulimma, J., Tadjbakhsch, S., 1997, Ultrasonic shear wave reflection method for measurements of the viscoelastic properties of polymer films, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, n. 3, pp. 1536-1542.
- Buiochi, F., Adamowski, J.C., Furukawa, C.M., 1998, Measurement of Viscosity Using Wave Mode Conversion, *IEEE International Ultrasonics Symposium*, October 5-8, Sendai, Japan, pp. 1193- 1196.
- Cohen-Tenoudji, F., Pardee, W. J., Tittmann, B. R., Ahlberg, L. A., Elsley, R. K., 1987, A shear wave rheology sensor, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, vol. 34, n. 2, pp. 263-269.
- Griffin, P. J., 1995, How to prevent rain in power transformers, *ASTM Standardization News*, pp. 30-33.
- Harrison, G., Barlow, J., 1981, Dynamic Viscosity Measurement, in *Methods of Experimental Physics*, Academic Press, Inc., vol. 19, pp. 137-178.
- Lec, R. M., Zhang, X. J., Hammond, J. M., 1997, A remote acoustic engine oil quality sensor”, *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, Toronto, Canada, pp. 419-422.
- Mason, W. P., 1965, Properties of polymers and nonlinear acoustic, in *Physical Acoustics – Principles and Method* vol. 2 – part B, Academic Press, New York, pp. 1-229.
- McSkimin, H. J., Andreatch Jr., P., 1967, Measurement of dynamic shear impedance of low viscosity liquids at ultrasonic frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 42, n. 1, pp. 248-252.
- Moore, R. S., McSkimin, H. J., 1970, Dynamic shear properties of solvents and polystyrene solutions from 20 to 300 MHz, in *Physical Acoustics*, vol. 6, ed. W. P. Mason, Academic Press, New York, pp. 167-243.
- O’Neil, H. T., 1949, Reflection and refraction of plane shear waves in viscoelastic media, *Phys. Rev.*, vol. 75, n. 6, p. 928-935.
- Race, S.W., 1991, Improved product quality through viscosity measurement, in *Food Technology’s Special Reports*, ed. J. D. Dziezak, pp. 86-87.
- Shah V., Balasubramaniam K., 1996, Effect of viscosity on ultrasound wave reflection from a solid/liquid interface, *Ultrasonics*, vol. 34, pp. 817-824.

### **MEASUREMENT OF VISCOSITY USING WAVE MODE CONVERSION**

***Abstract.*** *This paper presents a novel cell to measure the dynamic viscosity of liquids using ultrasound and wave mode conversion. The cell uses the complex reflection coefficient of shear waves at a solid-liquid interface. The transmitted and reflected waves are measured by a large aperture PVDF membrane. The magnitude and phase of the coefficient are obtained by normalizing the signal from the solid-liquid interface with respect to the one from the solid-air interface in frequency domain. The relative reflection method is used for shear waves. Measurements of the viscosity of automotive oils were made in the range from 1 to 10 MHz. The experimental results were compared with those from a rotational viscometer.*

***Keywords:*** *Ultrasound, Dynamic viscosity, Wave mode conversion.*