

## **AVALIAÇÃO DOS MÓDULOS DE ARMAZENAGEM E DE PERDA DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS APLICANDO O MÉTODO PADRÃO ASTM**

**Júlio César Silva de Souza, julioagricola@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

**José Juliano de Lima Junior, limajr@unifei.edu.br<sup>1</sup>**

**José Celio Dias, jcelio@unifei.edu.br<sup>1</sup>**

**Alberto Cardoso de Almeida, albertosjbv@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Cx. P. 50 - 37500-903, Fax: 0xx-35-3629-1148, Itajubá - MG, Brasil.

**Resumo:** A caracterização e identificação dos materiais é de grande interesse para diversos ramos da engenharia, tais como: aeroespacial, civil, mecânica e química. Para isso vêm sendo realizados estudos e pesquisas que tratam da utilização de materiais com propriedades amortecedoras, que quando aplicados na superfície de estruturas, apresentam enorme capacidade de dissipar energia e diminuir as amplitudes de deslocamentos. Tais materiais são aqueles que possuem um comportamento viscoelástico. O comportamento dos materiais viscoelásticos engloba tanto propriedades de sólidos quanto de fluidos viscosos, apresentando como principal característica a capacidade de dissipação de energia por ciclo de oscilação, fazendo com que o sistema acoplado aumente a sua taxa de amortecimento e proporcione reduções significativas das vibrações. O presente trabalho tem como principal objetivo caracterizar experimentalmente alguns materiais viscoelásticos através do módulo de armazenagem, módulo de perda, módulo complexo e fator de amortecimento. Para isso, os ensaios foram realizados em uma viga de polímero, obedecendo o estabelecido na norma ASTM-756. Para o desenvolvimento experimental foi preparado um dispositivo de ensaio de forma que a amostra possuía uma das extremidades fixa e a outra livre, modelo de viga. Foram aplicadas forças impulsivas na amostra de modo a produzir vibrações transversais livres e amortecidas. As respostas foram registradas tanto no tempo como em frequência para permitir a avaliação do módulo de armazenamento e de perda. O módulo complexo e o fator de perda do material variaram em função da frequência e temperatura. A norma padrão ASTM mostrou ser útil na preparação do ensaio, que determina aspectos relacionados ao amortecimento de uma estrutura utilizando o material ensaiado.

**Palavras-chave:** material viscoelástico, módulo de armazenagem, módulo de perda, frequência natural.

### **1. INTRODUÇÃO**

Uma forma para reduzir vibrações é através da elevação das taxas de amortecimento. Para isso vêm sendo realizados estudos e pesquisas que tratam da utilização de materiais com propriedades amortecedoras, que quando aplicados na superfície de estruturas, apresentam enorme capacidade de dissipar energia atenuando as vibrações e como consequência diminuindo as amplitudes de deslocamentos. Tal alternativa, que visa o incremento das taxas de amortecimento de estruturas, refere-se à utilização de materiais viscoelásticos.

Os materiais que apresentam uma combinação de ações elásticas lineares e viscosas, ao se deformarem, parte da energia cedida não resultará em deformação, sendo gasta para vencer os atritos internos do próprio material. Segundo Zener (1962), citado por Ancelotti, et al. (2000) o atrito interno é uma denominação genérica para os diversos efeitos de dissipação de energia que são gerados principalmente devido a não homogeneidade do material. Essa energia será transformada em calor e para grandes deformações poderá ocorrer retenção de certa parcela de energia no material. Num experimento dinâmico mecânico, usando o modelo de vigas em vibração livre, geralmente aplica-se em sua extremidade livre uma força impulsiva, de pequena amplitude, em que a resposta é uma senóide amortecida com o tempo.

Diversos são os termos utilizados para amortecimento, como por exemplo, decaimento logarítmico, meia largura de potência do pico de ressonância, o fator Q, a capacidade de amortecimento, a resiliência e o amortecimento acústico. Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de decaimento logarítmico, sendo uma técnica de estimativa da taxa de amortecimento associada somente ao primeiro modo de vibração, considerada segundo Silva (2007) como sendo uma

das mais confiáveis dentre as existentes. A caracterização de propriedades mecânicas dos materiais viscoelásticos pode ser encontrada em literatura especializada, Snowdon (1968); Hertzberg (1989); Rosen (1971) e Ancelotti, et al (2000).

O presente trabalho tem como objetivo principal caracterizar experimentalmente o material viscoelástico, através da determinação de suas propriedades como: fator de amortecimento, fator de Perda, módulo de armazenagem, módulo de perda e o módulo complexo, no intuito de verificar os níveis de amortecimento quando aplicado em uma estrutura, como também em modelos matemáticos. Verifica-se que o comportamento do módulo complexo e o módulo de perda variam em função da frequência e da temperatura.

### Módulo de Armazenagem e de Perda

Em um sistema constituído por uma viga engastada em uma extremidade e livre em outra, posiciona-se um acelerômetro, onde pode-se aplicar forças impulsivas, as quais geram vibrações transversais livres amortecidas. Isto faz o sistema oscilar com amplitudes decrescentes sucessivas, resultantes de vários mecanismos dissipativos de energia.

Ao analisar um espectro de frequência, observa-se que ocorre uma amplitude máxima de vibração para a frequência de ressonância (Rao, 2008). Então o decremento logarítmico para uma curva de ressonância pode ser dado aproximadamente pela equação (1):

$$\Delta = \frac{\pi(f_2 - f_1)}{f_n} \quad (1)$$

com:  $f_n$  - Primeira frequência natural do sistema (Hz),  $f_1$  e  $f_2$  - frequências correspondentes a largura de banda associadas aos pontos de meia potência (Hz).

Através das grandezas físicas e geométricas do sistema, utilizando-se dos conceitos de vibrações mecânicas (Dimarogonas, 1976), determina-se o módulo de armazenagem  $E'$  (GPa), dado pela equação (2). Este módulo está relacionado com a energia elástica armazenada em cada ciclo.

$$E' = \left[ \left( \frac{4\pi^2 f_n^2}{3I} \right) \left( M + \frac{33m}{140} \right) \left( 1 + \frac{\Delta^2}{4\pi^2} \right) \right] L^3 \quad (2)$$

com:  $I$  – Momento de inércia da área da seção transversal da viga ( $m^4$ );  $m$  – massa da viga (kg);  $L$  – Comprimento da viga (m).

Na equação (2) a frequência natural  $f_n$  considera a presença da massa  $M$  do acelerômetro, colocado na extremidade livre da viga ensaiada.

Segundo Rao (2008), o fator de amortecimento do material da viga é dado pela equação (3):

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \quad (3)$$

Quando  $\Delta \ll 1$ , resulta:  $\zeta \cong \frac{\Delta}{2\pi}$  permitindo escrever, segundo Rosen (1971) que:

$$\eta \approx 2\zeta \quad (4)$$

com:  $\eta$  é o fator de perda do material da viga.

O módulo complexo, normalmente, é escrito por meio da equação (5):

$$E = E'(1 + i\eta) = E' + iE'' , \quad i = \sqrt{-1} \quad (5)$$

Na equação (5) a parcela  $E'\eta$  está relacionada com a energia viscosa dissipada, como calor, em cada ciclo. Esta parcela, designado por  $E''$ , é chamada de módulo de perda.

O módulo de armazenagem e de perda podem ser determinados experimentalmente. Ambos os módulos são dependentes da frequência e da temperatura. Portanto, os experimentos dinâmicos mecânicos são geralmente realizados em um intervalo de frequência à temperatura constante ou em um intervalo de temperatura à frequência constante.

## 2. METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado o método padrão ASTM-756. Este método é normalizado pela “American Society for Testing and Materials” – ASTM e é conhecido como método de teste padrão para medição das propriedades de materiais amortecedores de vibração.

Segundo Silva (2007) o método aplicando o conceito de vibração livre é considerado limitado, quando se trabalha com poucos comprimentos da viga, pois somente é possível estimar as propriedades dos materiais viscoelásticos nas frequências naturais das mesmas, reduzindo assim a poucos pontos a faixa de frequência de interesse. Segundo o autor, para contornar esta limitação, é preciso utilizar maiores faixas de comprimentos, de maneira a permitir uma maior quantidade de informações.

Os ensaios foram realizados com três tipos de vigas compostas de polímeros (Tab 1), com três comprimentos distintos e três repetições. As vigas utilizadas nos ensaios foram obtidas via moldagem por injeção.

Tabela 1 – Vigas de Polímeros.

ME	MATERIAL ENSAIADO
1	Poli - Teraflalato de Butileno (PBT + 17% FV) *
2	Acrilonitrila Butadieno Estireno + Policarbonato (ABS+PC)
3	Copolímero Acrilonitrila Butadieno estireno (ABS)

\* reforçado com FV - Fibra de Vidro

As vigas foram dimensionadas e ensaiadas com um comprimento L dentro do padrão estabelecido pela ASTM-756. No intuito de se obter diferentes frequências naturais, para cada viga, os ensaios foram repetidos com um comprimento de 0,8 L e posteriormente com um comprimento de 0,6 L.

As características físicas e geométricas das vigas são apresentadas na tab. (2).

Tabela 2 - Grandezas Físicas e Geométricas das vigas.

ME	L [mm]	B [mm]	H [mm]	I [m <sup>4</sup> ]	Massa [g]
1	142,30	12,80	3,20	$3,50 \cdot 10^{-11}$	12,90
2	142,30	12,80	3,20	$3,50 \cdot 10^{-11}$	12,41
3	135,40	10,80	4,10	$6,20 \cdot 10^{-11}$	8,69
ME	0,8 L [mm]	B [mm]	H [mm]	I [m <sup>4</sup> ]	Massa [g]
1	113,00	12,80	3,20	$3,50 \cdot 10^{-11}$	11,08
2	113,00	12,80	3,20	$3,50 \cdot 10^{-11}$	10,65
3	108,40	10,80	4,10	$6,20 \cdot 10^{-11}$	7,56
ME	0,6 L [mm]	B [mm]	H [mm]	I [m <sup>4</sup> ]	Massa [g]
1	84,30	12,80	3,20	$3,50 \cdot 10^{-11}$	9,26
2	84,30	12,80	3,20	$3,50 \cdot 10^{-11}$	8,91
3	81,40	10,80	4,10	$6,20 \cdot 10^{-11}$	6,49

Para a obtenção das propriedades do material viscoelástico foi necessário determinar as frequências naturais e calcular os fatores de amortecimento. Para isso, o material foi moldado na forma de uma viga e submetido à ação de uma força impulsiva aplicada na sua extremidade livre. A força impulsiva aplicada foi através de movimentos oscilatórios de um pêndulo com uma esfera na extremidade (Figura 2).

As respostas tanto no tempo como em frequência foram obtidas por meio de um acelerômetro com massa de 10 g e medidas através de um analisador de FFT da SRS - Stanford Research Systems modelo SR 780. Todos os ensaios ocorreram a uma temperatura próxima de 19°C e umidade relativa a 95%.

Cada valor resultante é a média de dez ensaios realizados, com três repetições, totalizando 30 ensaios.

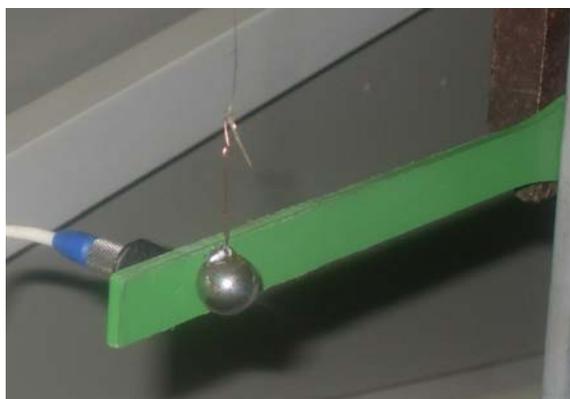


Figura 2. Sistema viga, acelerômetro e pêndulo com esfera.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos gráficos 3, 4 e 5 são apresentados os resultados da média de 30 ensaios. Na figura (3), são mostradas as respostas no tempo e na frequência para o polímero Poli - Teraflalato de Butileno (PBT + 17% FV).

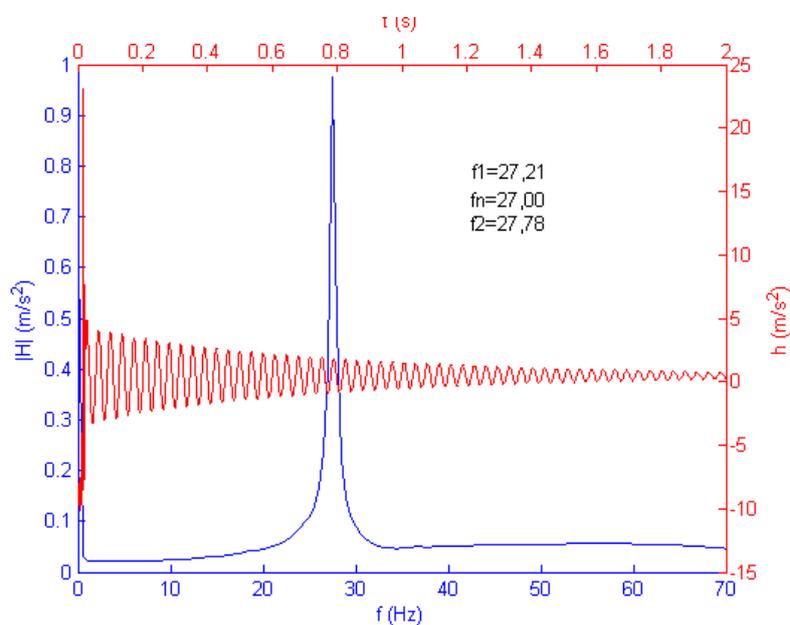


Figura 3 - Resposta em frequência e no tempo para (PBT + 17% FV).

Na figura (4) são mostradas as respostas no tempo e na frequência para o polímero (ABS+PC).

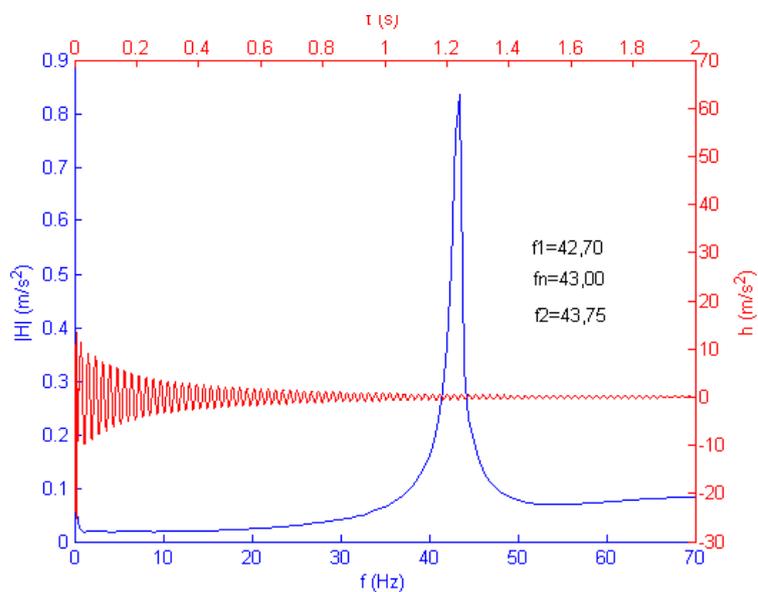


Figura 4 - Resposta em frequência e no tempo para (ABS+PC).

Na figura (5) são mostradas as respostas no tempo e na frequência para o polímero - Copolímero Acrilonitrila Butadieno estireno (ABS).

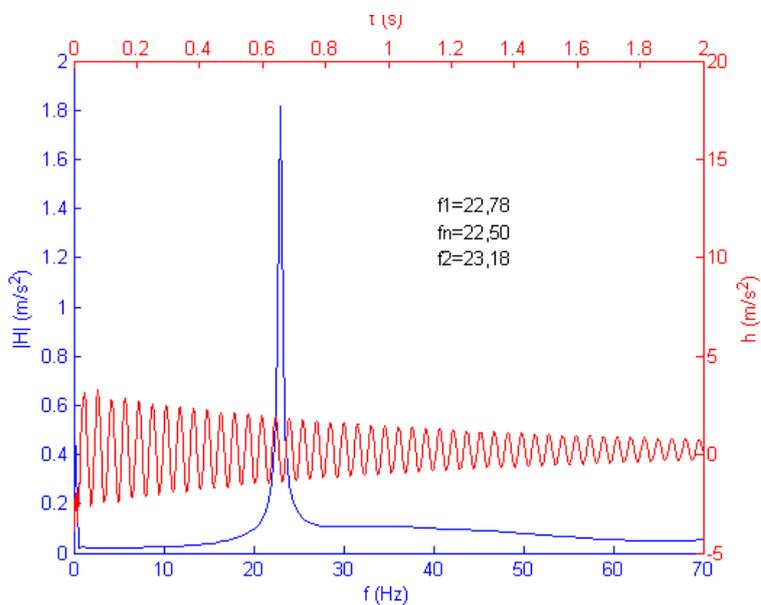


Figura 5 - Resposta em frequência e no tempo para (ABS).

São apresentados, na Tabela 3a, os valores da frequência natural do material ensaiado, bem como os valores calculados do decremento logarítmico. Esses valores foram corrigidos devido à influência da massa do acelerômetro no sistema.

Tabela 3a - Resultados obtidos em laboratório.

ME	$f_n$ [Hz]	$f_{n_c}$ [Hz]	$\Delta$	$\Delta c$	$\zeta$
1	27,00	27,15	$6,57 \times 10^{-2}$	$6,53 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-2}$
1	42,00	44,63	$7,70 \times 10^{-2}$	$7,10 \times 10^{-2}$	$1,13 \times 10^{-2}$
1	60,50	69,39	$8,80 \times 10^{-2}$	$7,67 \times 10^{-2}$	$1,22 \times 10^{-2}$
2	27,50	28,06	$4,60 \times 10^{-2}$	$4,51 \times 10^{-2}$	$7,10 \times 10^{-3}$
2	43,00	46,60	$6,67 \times 10^{-2}$	$6,16 \times 10^{-2}$	$9,80 \times 10^{-3}$
2	71,00	82,93	$5,64 \times 10^{-2}$	$5,33 \times 10^{-2}$	$8,40 \times 10^{-3}$
3	22,50	26,49	$5,25 \times 10^{-2}$	$4,46 \times 10^{-2}$	$7,10 \times 10^{-3}$
3	31,50	39,32	$9,25 \times 10^{-2}$	$7,40 \times 10^{-2}$	$11,70 \times 10^{-3}$
3	57,00	75,97	$7,25 \times 10^{-2}$	$5,93 \times 10^{-2}$	$9,40 \times 10^{-3}$

Na Tabela 3b são mostrados os resultados calculados conforme as equações (2), (3), (4) e (5) para a avaliação do fator de perda, módulo de armazenagem, módulo de perda e módulo complexo.

Tabela 3b - Resultados calculados.

ME	$\eta$	$E'$ [GPa]	$E''$ [GPa]	$ E $ [GPa]
1	$2,08 \times 10^{-2}$	10,31	0,2144	10,31
1	$2,26 \times 10^{-2}$	10,19	0,2301	10,19
1	$2,44 \times 10^{-2}$	10,06	0,2458	10,06
2	$1,44 \times 10^{-2}$	10,60	0,15	10,60
2	$1,96 \times 10^{-2}$	12,57	0,25	12,57
2	$1,68 \times 10^{-2}$	11,59	0,20	11,59
3	$1,42 \times 10^{-2}$	3,21	0,046	3,21
3	$2,34 \times 10^{-2}$	3,16	0,074	3,16
3	$1,88 \times 10^{-2}$	3,19	0,060	3,19

No gráfico da figura (6) apresenta-se a curva de variação do módulo complexo  $|E|$  (GPa) em função da frequência (Hz) para o material PBT (ME1) e sua curva de regressão, considerando a temperatura constante.

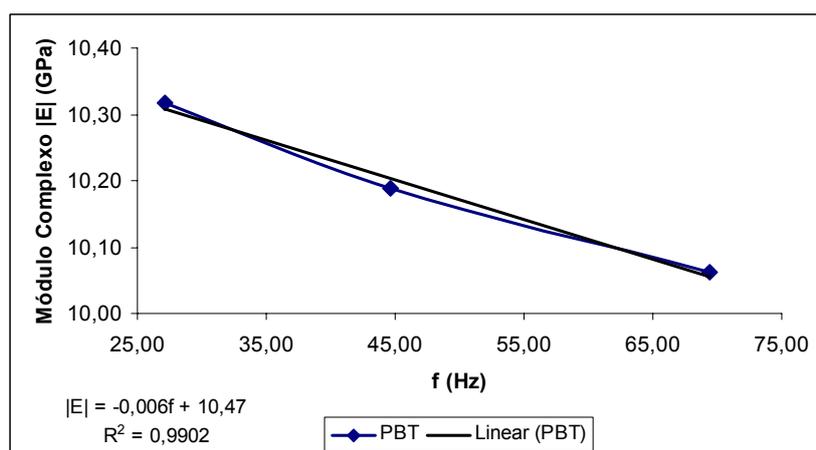


Figura 6 - Módulo complexo de perda em função da frequência.

No gráfico da figura (7) é apresentado o comportamento do fator de perda em função da frequência para o material PBT.

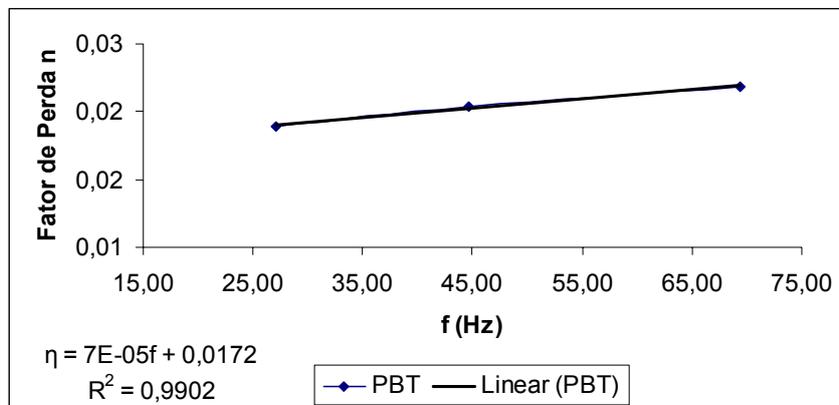


Figura 7 - Fator de perda  $\eta$  em função da frequência.

O gráfico da figura (8) apresenta a curva com os três pontos de variação do módulo complexo  $|E|$  (GPa) em função da frequência (Hz) para material ABS+PC (ME2), e a melhor curva de regressão, considerando a temperatura constante.

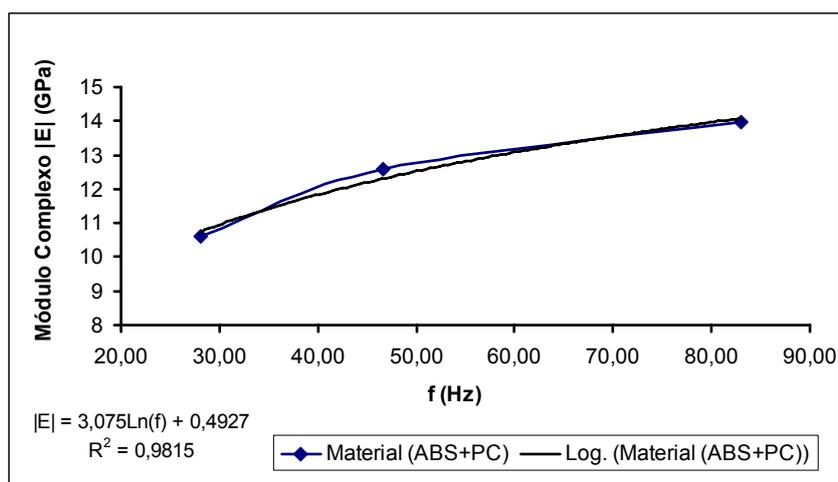


Figura 8 - Módulo complexo de perda em função da frequência.

No gráfico da figura (9) é apresentado o comportamento do fator de perda em função da frequência e a melhor curva de regressão, considerando a temperatura constante do material ABS+PC.

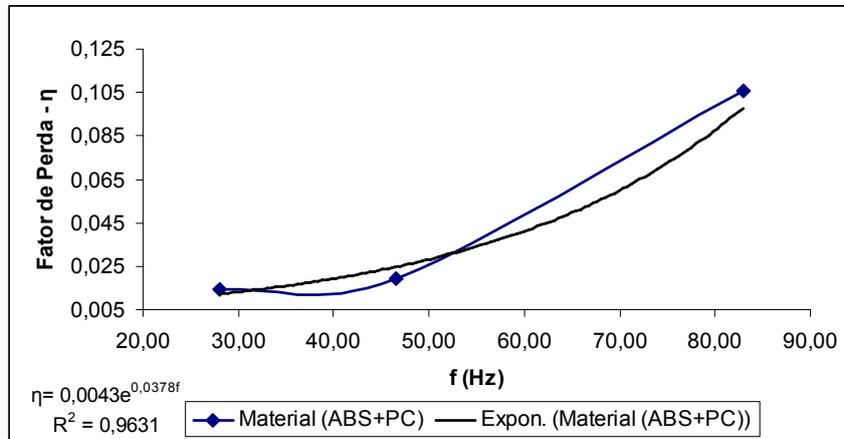


Figura 9 - Fator de perda  $\eta$  em função da frequência.

Para o material ABS (ME3) tem-se no gráfico da figura (10) a curva com os três pontos de variação do módulo complexo  $|E|$  (GPa) em função da frequência (Hz), e a curva de regressão que representa o comportamento do mesmo.

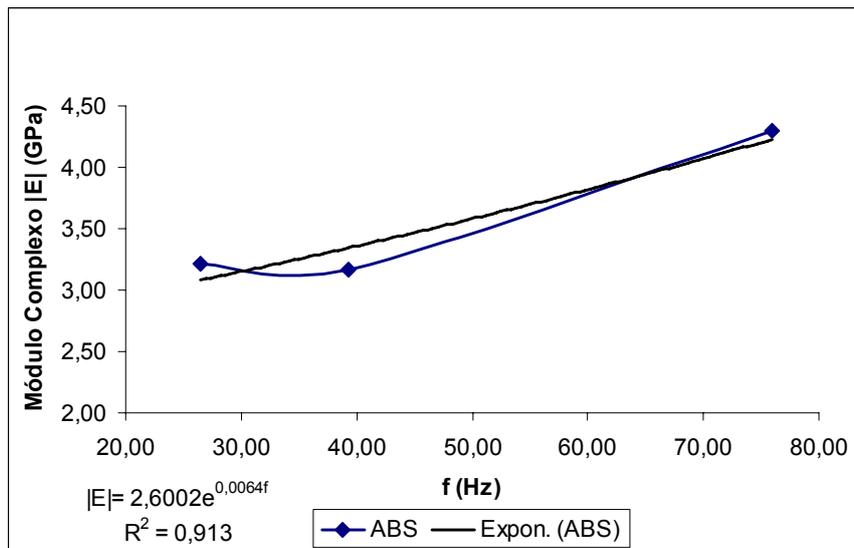


Figura 10 - Módulo complexo de perda em função da frequência.

Na figura (11) é apresentado o gráfico do comportamento do fator de perda em função da frequência e a melhor curva de regressão, considerando a temperatura constante para o material ABS.

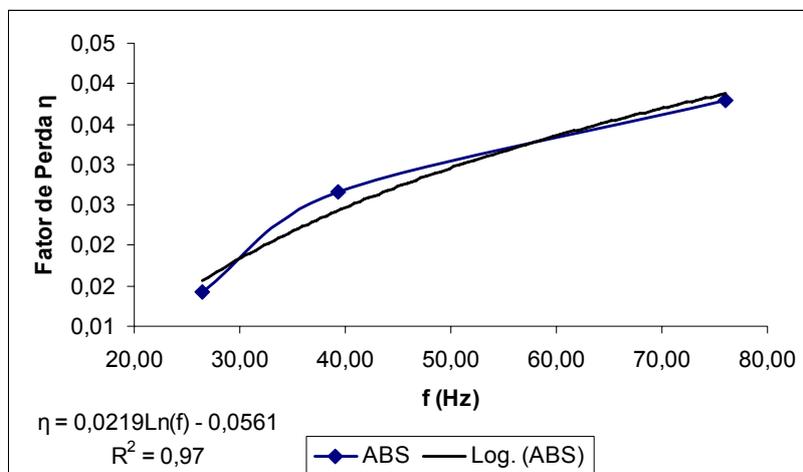


Figura 11 - Fator de perda  $\eta$  em função da frequência.

Observou-se, por meio da figura (8), (9), (10) e (11), que tanto o módulo complexo como o fator de perda do material variou em função da frequência, que é um comportamento esperado para materiais viscoelásticos, com exceção do material PBT apresentados na figura (6) e (7) que praticamente não apresentou variações em função da frequência, apresentando um comportamento elástico.

O fator de amortecimento  $\zeta$  apresentou valores entre 0 e 1 que é representativo do comportamento de um sistema subamortecido. O módulo de perda  $E''$  do material variou de 46,00 a 245,80 MPa, considerando os três materiais ensaiados, representando a quantidade de energia absorvida pelo material. O material que apresentou um comportamento viscoelástico, com maiores valores nos módulos de perda foi o polímero ABS+PC. Quando é desejado que uma peça absorva energia e libere parte desta na forma de calor, deve-se utilizar um material com alto valor no módulo de perda ( $E''$ ).

#### 4. CONCLUSÃO

Foi possível caracterizar as propriedades viscoelásticas do material em estudo por meio da variação da frequência usando o ensaio dinâmico de vibração livre e a norma ASTM.

Mostrou-se que o material PBT apresenta comportamento elástico linear não se caracterizando como material viscoelástico enquanto o ABS+PC e o ABS se caracterizaram como materiais viscoelásticos.

A norma padrão ASTM mostrou ser útil na preparação dos ensaios do material viscoelástico.

A maior dificuldade deste procedimento reside no fato que com um corpo de prova é possível determinar apenas uma frequência natural. Para uma melhor representatividade do fenômeno deve-se preparar vários corpos de prova.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de estudo e suporte financeiro e ao Laboratório de caracterização de polímeros do colégio técnico da UNICAMP pela disponibilização dos materiais de estudo.

#### 6. REFERÊNCIAS

Anelotti, A. C. J., Costa, N. G., Dias, J. C., Lima Jr., J. J. de, Utilização do Método do Decaimento Logarítmico para a Avaliação dos Módulos de Armazenagem e de Perda de Materiais Viscoelásticos Lineares, 14<sup>a</sup>. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, São Pedro, São Paulo, 2000.

American Society for Testing and Materials – ASTM, “Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials”, New York, USA, Desig. E756, pp 1-14, 2005.

Dimarogonas, A. D., **Vibration Engineering**. West Publishing Co., New York, p.100-103, 1976.

Hertzberg, R. W., **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 206-210, 1976.

Rao, S. S., **Vibrações Mecânicas**; Pearson Prentice Hall, São Paulo, Brazil, 2008.

Rosen, S. L., **Fundamental Principles of Polymeric Materials for Practicing Engineers**. Barnes and Noble, New York, p. 227-237, 1971.

Silva, R. P. Desenvolvimento de Metodologias Para Caracterização de Materiais Viscoelásticos em Baixas Frequências [Rio de Janeiro] 2007, xvii, 87 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2007).

Snowdon, J. C., **Vibration and Shock in Damped Mechanical systems**. John Wiley & Sons, Inc., New York, p.3-5, 1968.

Zener, C., **Elasticity and Anelasticity of Metals**. University of Chicago Press, Chicago, K.M. Entwistle Metall Rev. vol. 7 p. 175, 1962.

## EVALUATION OF MODULES AND STORAGE LOSS OF VISCOELASTIC MATERIALS APPLYING THE METHOD ASTM STANDARD

**Julio Cesar Silva de Souza, julioeagricola@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

**Juliano José de Lima Junior, limajr@unifei.edu.br<sup>1</sup>**

**Alberto Cardoso de Almeida, albertosjbv@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Federal University Itajubá, Department of Mechanical Engineering Cx P. 50 - 37500-903, Fax: 0xx-35-3629-1148, Itajubá - MG, Brazil.

**Abstract:** The characterization and identification of viscoelastic materials is of great interest to various branches of engineering such as aerospace, civil, mechanical and chemical. For this have been studies and research dealing with the use of materials with damping properties, when applied to the surface of existing structures, have enormous capacity to mitigate and reduce the vibration amplitudes of displacement. Such materials are those that have a viscoelastic behavior. The behavior of viscoelastic materials includes both properties of solid and more fluid viscous, showing main characteristic the decrease of most energy dissipation by cycle of oscillation, causing the coupled system increases the rate of damping and provides significant reductions vibrations. This work had as main objective to characterize experimentally the module storage and loss modulus at different viscoelastic materials. For this, tests were performed at different beams of polymers, complying with the Standard ASTM-756. For the experimental development, was prepared a device of test so that the sample has one end fixed and the other free. Impulsive forces were applied in the sample to produce free vibration and damped. The responses were recorded in both time and frequency to allow the assessment of the storage modulus and loss.

**Keywords:** viscoelastic material, storage module, module loss, natural frequency.