

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UMA LIGA Al-0,2%Zr-2,0%Mg ATRAVÉS DE ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

Luis Paulo Brasil de Souza, luisbrasil55@gmail.com¹
Eduardo Rodrigues Silva, eduardo.silvar123@gmail.com¹
Rodrigo Alex Aragão Galvão, aragaogalvao@gmail.com¹
Carolina de Oliveira Contente, carolinacontente@hotmail.com¹
José Victor Brasil de Souza, josevictorbrasil002@gmail.com¹
Giovanni de Souza Pinheiro, giovannipinheiro@yahoo.com.br¹
Leonardo Dantas Rodrigues, leodr@ufpa.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa 01, Guamá, Belém – PA, 66075-110.

Resumo: O módulo de elasticidade ou módulo de Young (E) de um material é uma das propriedades mecânicas mais importantes quando se refere a projetos e seleção de materiais para uma dada aplicação. A maioria dos materiais existentes já consiste de seus módulos de elasticidade catalogados e apresentados em diversas literaturas, porém, as ligas de materiais metálicos podem ter suas propriedades mecânicas modificadas devido à adição de um ou mais elementos de liga. O módulo de elasticidade pode ser definido então de diversas maneiras, destrutivas ou não destrutivas. Este trabalho propõe a obtenção de dados de módulo de elasticidade para uma liga Al-0,2%Zr-2,0%Mg utilizando dois métodos: o tradicional ensaio de tração e a técnica de vibração transversal. Os resultados obtidos pela técnica de vibração transversal foram comparados com os resultados obtidos do ensaio de tração de maneira a verificar a eficiência do método e também obter o valor mais exato do módulo de elasticidade dessa liga e certificar de que a mesma é apta para a aplicação a qual se destina. Os resultados se mostraram eficientes com pequeno erro de aproximadamente 4,44%, porém ainda aceitável.

Palavras-chave: Módulo de Elasticidade, Liga de Alumínio, Análise Modal

1. INTRODUÇÃO

Os componentes e estruturas mecânicas devem ser eficientes e seguras. Para projetar os elementos mecânicos com segurança é necessário o conhecimento prévio das propriedades dos materiais empregados em projeto. O módulo de elasticidade ou módulo de Young (E) é uma das propriedades mais importante dos materiais, uma vez que informa o comportamento da tensão e deformação mecânica na zona elástica do material que esteja sob a ação de algum tipo de carregamento.

Alguns materiais podem não apresentar as propriedades mecânicas apropriadas para determinada aplicação, porém, quando ligados a outros materiais, suas propriedades se modificam, podendo atender a necessidades antes não atendidas. Por este motivo as ligas de alumínio se tornam tão atraentes como materiais de construção mecânica, uma vez que o alumínio facilmente se combina com a maioria dos metais de engenharia formando ligas. Portanto, as características mecânicas desejadas podem ser obtidas associando alumínio com diversos outros elementos de liga, por exemplo. Uma vez que as propriedades mecânicas se modificam, o módulo de elasticidade já não será mais o mesmo.

Alguns ensaios mecânicos podem estimar o valor do módulo de elasticidade de um material, sendo mais comumente realizados os ensaios mecânicos quase estáticos. No ensaio mecânico quase estático, os corpos de prova ficam inutilizados após o ensaio. Este tipo de ensaio consiste na aplicação de uma carga mecânica em um corpo de prova, que pode ser de natureza trativa, compressiva ou de cisalhamento. Esta carga é aplicada de maneira gradativa e lenta, e simultaneamente a aplicação da carga, é monitorada as informações de tensão e deformação induzida. Porém, ensaios mecânicos não destrutivos podem ser uma alternativa para a obtenção do módulo de Young dos materiais. Por definição da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (s.d), ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção.

Um END que pode ser utilizado para encontrar o módulo de elasticidade de um material é a Análise Modal Experimental pela técnica de vibração transversal. O princípio da técnica de vibração transversal consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos.

Estas frequências, em conjunto com as dimensões e massa, possuem uma relação unívoca com os módulos elásticos. Segundo Segundinho (2012), os métodos dinâmicos possuem vantagem de empregar pequenas amostras e serem rápidos e não destrutivos.

He (2001) define a análise modal como o processo de determinação das características dinâmicas inerentes de um sistema em forma de frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais, usando-os para formular um modelo matemático para seu comportamento dinâmico.

Segundo Rao (2008), a análise modal experimental é realizada da seguinte maneira: Um excitador ou uma fonte de vibração aplica uma força a um corpo ou máquina. O movimento gerado relativo a esta força é captado por um transdutor que converte o movimento físico em um sinal elétrico que é amplificado por um amplificador de sinais para que sejam compatíveis com a eletrônica da entrada de sinais do sistema digital de aquisição de dados. Os sinais são analisados e processados em um software adequado para esta finalidade.

A resposta desse ensaio é dada através de funções de resposta em frequência. Schwarz (1999) define uma Função de Resposta em Frequência (FRF) como uma medida de quantidade de resposta no domínio da frequência em aceleração, velocidade ou deslocamento que um sistema apresenta por unidade de força de excitação no sistema mecânico envolvido. Ainda segundo Schwarz (1999), a FRF descreve a relação de entrada-saída entre dois pontos em uma estrutura como uma função da frequência.

Conforme previsto na norma ASTM E-1876 (2015), para caracterização dos módulos de elasticidade, razão de Poisson e módulo de cisalhamento dinâmico dos materiais através das frequências naturais obtidas por testes de vibração, os corpos de prova podem ser do tipo viga de seção retangular ou circular, devem ser bi-apoiados em suportes rígidos ou macios. No entanto, para o caso desta pesquisa o modo flexional foi obtido com modelo de uma viga em balanço para um diâmetro de 3 mm e o módulo de elasticidade estático foi obtido com um ensaio de tração convencional da liga estudada com corpo de prova de 9 mm de diâmetro útil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Corpos de Prova

Os materiais ensaiados foram espécimes de liga de alumínio de um mesmo vazamento de Al-0,2%Zr-2%Mg, fundidas em molde direcional, resfriadas e depois trefiladas para diferentes diâmetros, de 3 mm e 12 mm, mostradas na Fig. 1. A Figura 1 (a) mostra as amostras usinadas para um diâmetro útil de 9 mm, segundo a NBR ISO 6892:2002 para ensaio de tração para a obtenção do módulo de elasticidade estático. A Figura 1 (b) ilustra as amostras utilizadas para o ensaio de vibração.

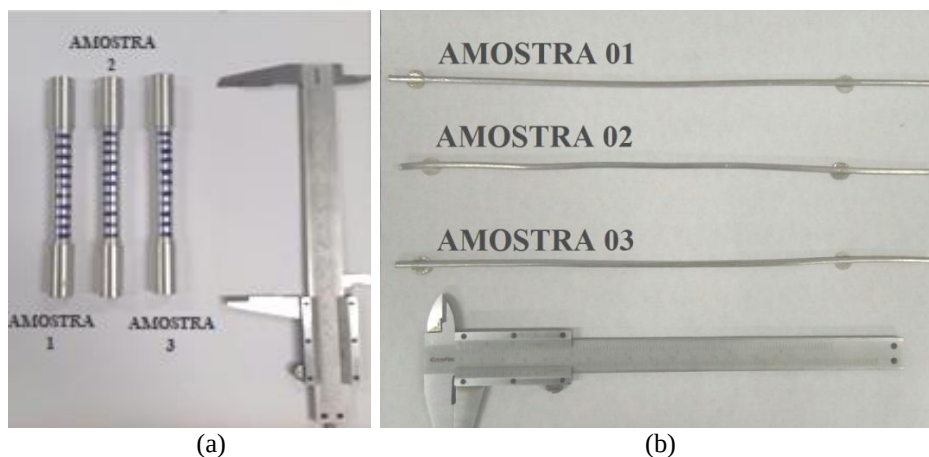


Figura 1. Amostras utilizadas (a) corpos de prova do ensaio de tração; (b) corpos de prova do ensaio de vibração.

2.2. Procedimento Experimental

O teste mecânico quase estático foi realizado em uma máquina de tração do tipo KRATOS modelo IKCL1 – USB acoplada a um microcomputador com sistema de aquisição de dados presente nas instalações do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPMAT) da UFPA. O ensaio consistiu em aplicar esforços de tração de forma gradativa aos três corpos de prova padrão, ilustrados na Fig 1 (a). Como resultado deste ensaio, obteve-se uma tabela com todos os valores de deformação referentes às tensões aplicadas, podendo assim calcular os módulos de deformação da liga utilizando a Eq. (1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Sendo σ a tensão aplicada ao corpo de prova (CP) e ε a deformação devido a aplicação desta força.

Para realização do teste de impacto, utilizou-se o aparato chamado de Barra de *Oberst*, que consiste em um suporte de aço que é possível engastar corpos para fazer a montagem dos sensores e atuadores para a análise modal, ilustrado na Figura 2 (a). Este método de teste é frequentemente chamado de Método de teste da Barra de *Oberst*.

As amostras de alumínio engastadas na barra foram excitadas com um martelo de impacto. Este procedimento foi realizado para as três amostras de material, ilustradas na Fig 1 (b). Depois de excitado o CP, o movimento provocado pela aplicação da força era transmitido em forma de sinal elétrico captado por um acelerômetro do fabricante *Bruel & Kjaer* que fora fixado ao CP utilizando cera própria para esta aplicação. O sinal era então exibido na interface do software de análise de dados da *Bruel & Kjaer*. A montagem é mostrada na Figura 2.

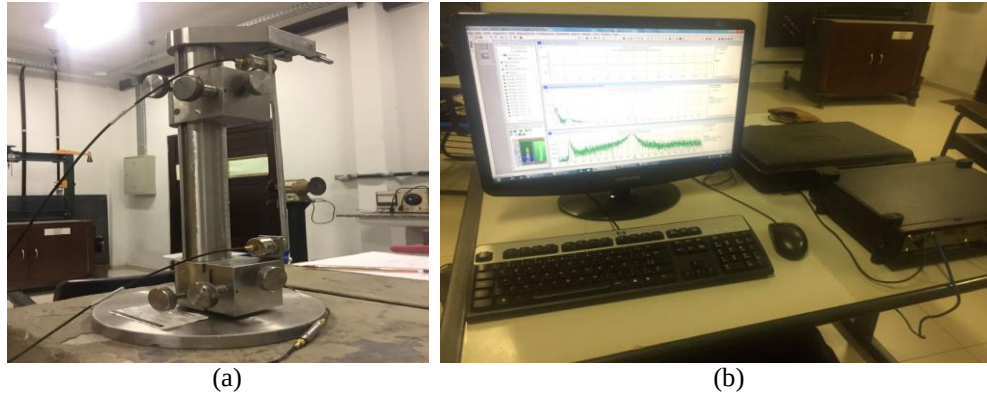


Figura 2. (a) Montagem da viga em balanço na barra de *Oberst* e (b) os equipamentos utilizados para aquisição de sinais

2.3. Análise de dados

Para que fossem obtidos os valores do módulo de elasticidade nesta configuração, foram utilizadas as equações presente em Rao (2008), modelando uma viga em balanço com carga na ponta como um elemento de mola. Este elemento apresenta somente propriedade de rigidez (k) e pode ser obtida através de outras constantes, são elas: o módulo de elasticidade (E), momento de inércia (I) e o comprimento da viga (l). A equação da rigidez de uma viga em balanço é mostrada na Eq. (2).

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad (2)$$

Segundo Rao (2008), a frequência natural (ω_n) de um sistema pode ser obtida através das propriedades de rigidez (k) e massa (m) através da Eq. (3).

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (3)$$

Manipulando a Eq. (1) e (2) para obter o módulo de elasticidade, tem-se a Eq. (4).

$$E = \frac{l^3 \cdot k}{3 \cdot I} = \frac{l^3 \cdot \omega_n^2 \cdot m}{3 \cdot I} = \frac{l^3 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot F_n^2 \cdot m}{3 \cdot (\pi/64) \cdot D^4} = \frac{4 \cdot 64 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{l^3 \times F_n^2 \times m}{D^4} \quad (4)$$

Com uma mudança da escala linear no diagrama de Bode para uma escala semi-log, pode permitir que sejam observados os detalhes em níveis de resposta mais baixos. As FRF de receptância, mobilidade ou aceleração descrevem as mesmas propriedades do sistema e cada uma tem a sua própria vantagem, para este trabalho foi utilizado a FRF de aceleração uma vez que a amplitude do sinal é maior (RAO, 2008). As FRF obtidas nos ensaios são mostradas na Figura 3, 4 e 5.

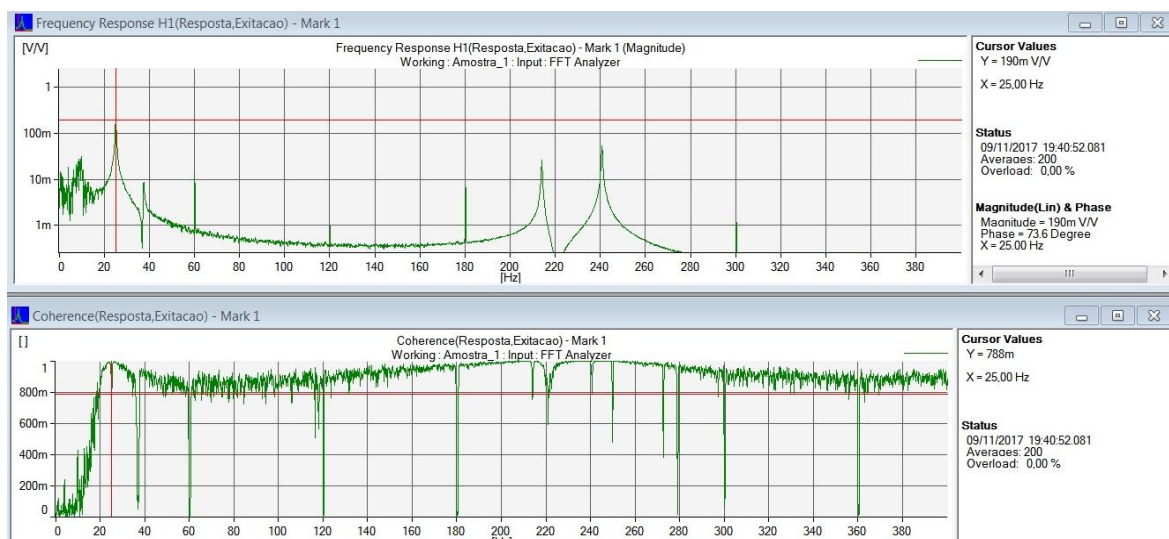


Figura 3. FRF da Amostra 1

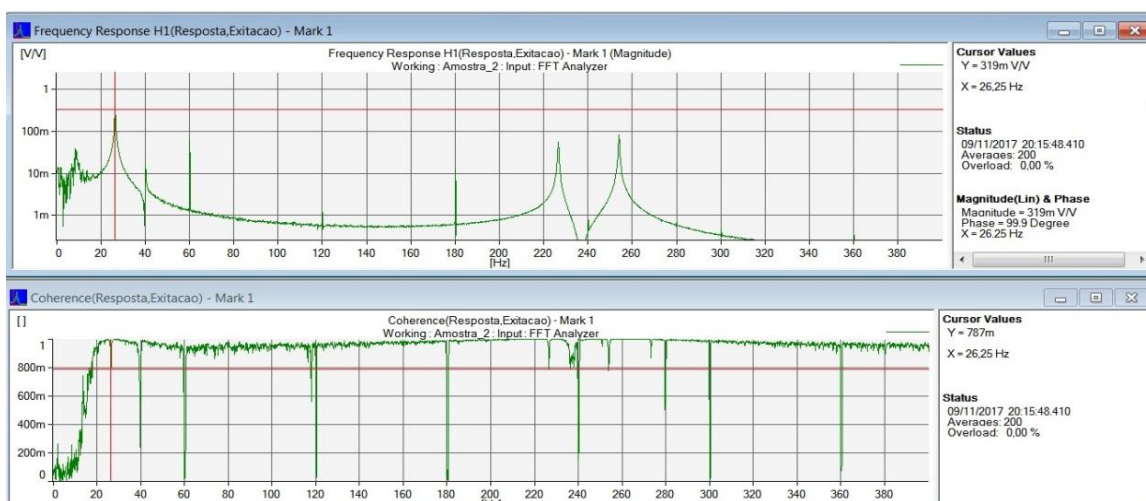


Figura 4. FRF da Amostra 2

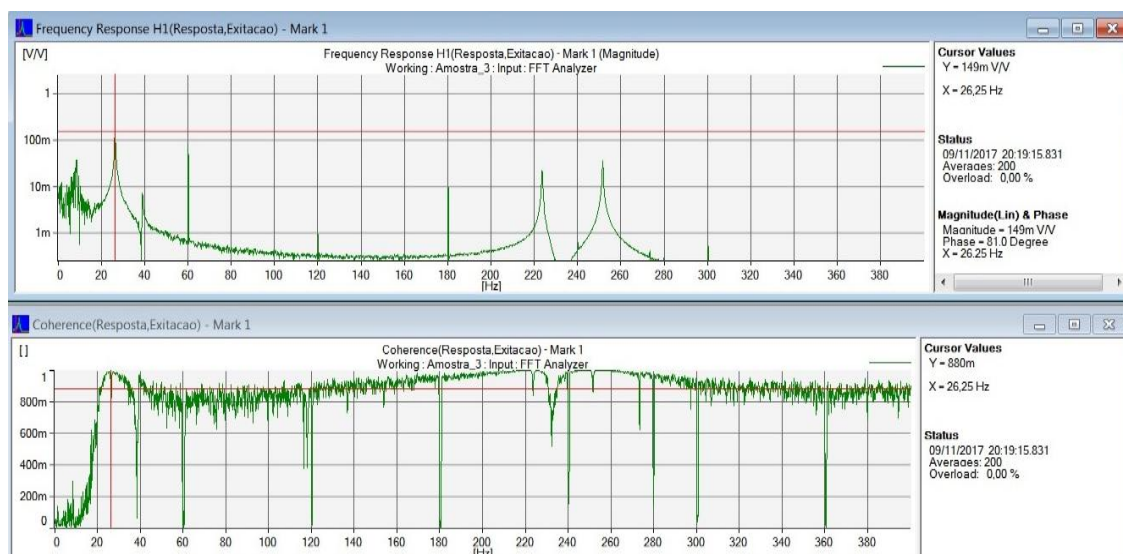


Figura 5. FRF da Amostra 3

As frequências naturais utilizadas para cálculo do módulo de elasticidade são encontradas nas FRFs das amostras. O processo de identificação da frequência natural foi realizado de acordo com o descrito em Rao (2008): As frequências

se encontravam no pico exibido na resposta em frequência de cada amostra, como ilustra as Figs. (3), (4) e (5). Este pico representa que a frequência da força aplicada ao CP é igual a sua frequência natural e o amortecimento não é grande. Além disso, ainda segundo Rao (2008) a fase da resposta muda de 180° quando a frequência da força aplicada passa pela frequência natural do CP e será de 90° na ressonância. Este detalhe é exibido no canto direito das Figs. (3), (4) e (5).

Através do ensaio de tração convencional de três amostras da liga de Al-0,2%Zr-2%Mg juntamente com os dados da Tab. 1, podemos comparar o módulo de elasticidade estático com o dinâmico e encontrar a diferença entre os resultados, mostrado no item de Resultados e Discussões.

Tabela 1. Dados das amostras ensaiadas

	Massa (g)	Comprimento (mm)	Frequência (Hz)	Diâmetro (mm)
Amostra 1	5,5	212	25,00	3,1
Amostra 2	5,2	202	26,25	3,0
Amostra 3	5,4	208	26,25	3,0

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra a comparação dos dados obtidos por ensaio de tração e por análise modal. Nas três amostras, os resultados se mostraram semelhantes, com uma diferença média de 4,44%.

Tabela 2. Dados extraídos da FRF de uma das amostras ensaiadas

	Al-0,2%Zr-2%Mg $E_{\text{estático}}$ (GPa)	Al-0,2%Zr-2%Mg $E_{\text{dinâmico}}$ (GPa)	Diferença (%)
Amostra 1	99,73	95,08	4,67
Amostra 2	105,92	101,51	4,17
Amostra 3	116,04	110,82	4,50
Média	107,23	102,47	4,44

Segundo Targa (2005), quanto menor a frequência de ressonância (frequência natural) do material, maior será a proximidade de elasticidade estática e dinâmica, e essa diferença aumenta na medida em que aumenta o módulo de elasticidade da amostra estudada. Ou seja, um material com frequência natural menor, demonstraria resultados dinâmicos mais próximos dos resultados estáticos.

4. CONCLUSÃO

Levando em consideração os resultados obtidos, conclui-se que é possível obter o módulo de elasticidade utilizando parâmetros dinâmicos, como a frequência natural dos corpos ensaiados, com a rapidez e precisão do ensaio por análise vibratória. O erro médio de 4,44%, que se encontra dentro dos limites aceitáveis, comprova o uso da determinação do módulo de elasticidade pelo caso da viga em balanço de maneira tão eficaz quanto os métodos tradicionais de obtenção de módulo de elasticidade. A vantagem de se utilizar esse método diz respeito ao custo-benefício, já que usar um corpo de prova como os utilizados em ensaios de tração é mais custoso do que trefilar os corpos de prova para o ensaio dinâmico, além de precisar utilizar menos material já que os CPs são finos se comparado aos CPs padronizados para ensaio de tração. Além disso, é um ensaio não destrutivo, não necessitando deteriorar o CP para a determinação de suas propriedades mecânicas.

5. AGRADECIMENTOS

- Fundação Amazônica de Amparo a Estudos e Pesquisas – FAPESPA;
- Instituto de Tecnologia/UFPA - ITEC;
- Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica – PPGEM;
- Ao Grupo de Vibrações e Acústica – GVA;
- Ao Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais – GPMAT;
- Ao Núcleo Avançado de Tensões – NAAT.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. Disponível em: < www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly= >. Acesso em 10 de maio de 2017.
- ASTM E 1876-15, 2015, "Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- He, J.; Fu, Z. F.; "Modal Analysis", 1th ed.; 2001.
- Paiva, Antônio E. Macêdo. Desenvolvimento de um equipamento para avaliar propriedades elásticas de cerâmicas refratárias a altas temperaturas pelo método de ressonância de barras. 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo.
- Rao, S. S., "Mechanical Vibrations", 5th ed., 2011.
- Schwarz, B. J.; Richardson, M. H.; Experimental Modal Analysis. In: CSI Reliability Week. Orlando, FL. October, 1999.
- Segundinho, P. G. A.; Cossolino, L. C.; Pereira, A. H. A.; Junior, C. C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira, In: Revista Árvore, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1155-1161, 2012.
- Targa, L. A.; Ballarin, A. W.; Palma, H. A. L. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. In: Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 25, n. 2, p.291-299, maio/ago, 2005.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF A Al-0,2% Zr-2,0% Mg LEAGUE THROUGH EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS

Luis Paulo Brasil de Souza, luisbrasil55@gmail.com¹
Eduardo Rodrigues Silva, eduardo.silvar123@gmail.com¹
Rodrigo Alex Aragão Galvão, aragaogalvao@gmail.com¹
Carolina de Oliveira Contente, carolinacontente@hotmail.com¹
José Victor Brasil de Souza, josevictorbrasil002@gmail.com¹
Giovanni de Souza Pinheiro, giovannipinheiro@yahoo.com.br¹
Leonardo Dantas Rodrigues, leodr@ufpa.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa 01, Guamá, Belém – PA, 66075-110.

Abstract. The modulus of elasticity or Young's modulus (E) of a material is one of the most important mechanical properties when it comes to designing and selecting materials for a given application. Most of the existing materials already consist of their modulus of elasticity cataloged and presented in several literatures; however, the alloys of metallic materials may have their mechanical properties changed due to the addition of one or more alloying elements. The modulus of elasticity can then be defined in several ways, destructive or non-destructive. This work proposes to obtain modulus of elasticity data for an Al-0,2% Zr-2,0% Mg alloy using two methods: the traditional tensile test and the transverse vibration technique. The results obtained by the transversal vibration technique were compared with the results obtained from the tensile test in order to verify the efficiency of the method and also to obtain the most accurate value of the modulus of elasticity of this alloy and to make sure that it is suitable for the application which it is intended. The results were efficient with a small error of approximately 4.44%, but still acceptable.

Keywords: Modulus of Elasticity, Aluminum Alloy, Modal Analysis.