



08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## MÉTODOS DINÂMICOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO DE COMPÓSITO DE GESSO E MANTA DE SISAL

**Catharine Brandão**<sup>1</sup> – cathebrandao@gmail.com

**Ricardo carvalho**<sup>2</sup> – ricardoc@ufba.br

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, Instituto Politécnico – Salvador, BA, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal da Bahia, Instituto Politécnico – Salvador, BA, Brasil

**Resumo.** *O gesso é um material cerâmico de ruptura frágil, por isso há o interesse de modificação desse comportamento com a introdução de fibras como reforço. A maximização da fração volumétrica de fibras adicionada à matriz favorece a eficiência mecânica do compósito. Com uso da fibra na configuração de manta espera-se aumentar o teor de fibra randomicamente adicionada ao compósito. Ensaios dinâmicos não - destrutivos são utilizados na determinação dos módulos de Young dos materiais. Neste trabalho, buscou-se avaliar o compósito com matriz de gesso associado à manta de sisal por métodos dinâmicos de excitação por impulso e propagação do ultrassom e comparar com o módulo de Young obtido através do ensaio de resistência à flexão 4 pontos. Os módulos elásticos por flexão 4 pontos são inferiores em relação aos módulos determinados por métodos dinâmicos. O método de ultrassom se relaciona com a densidade do compósito podendo ser o método mais indicado para controle de qualidade do material. O módulo elástico calculado através do método de ressonância se aproxima ao obtido pelo método de flexão. Portanto, o trabalho apresenta contribuições relevantes para a compreensão do comportamento mecânico do compósito.*

**Palavras - chave:** *Compósito, Comportamento mecânico, Gesso, Módulo de Young*

### 1. INTRODUÇÃO

Gesso é a denominação comercial do aglomerante aéreo constituído de sulfatos semi-hidratados e anidros de cálcio. Por ser uma matriz cerâmica não apresenta deformação plástica e sua resistência ao impacto é reduzida, isto é, apresentam baixa tenacidade (ZANOTTO *et al.*, 1991). Para um material frágil como matriz, a introdução de fibras reduz a propagação de fissuras e aumenta a tenacidade e ductilidade. A eficiência desse comportamento se deve ao tipo de fibra, sua quantidade e orientação.

Quando as fibras são orientadas aleatoriamente, os compósitos apresentam propriedades semelhantes em todas as direções, o que confere uma característica quase – isotrópica, típica de fibras organizadas em forma de mantas, também chamados de não – tecidos (BEIM, 2008). Um não – tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, que pode ser denominada de véu ou manta de fibras ou filamentos, com orientação direcionada ou ao acaso, de acordo com a NBR 13370 (ABNT, 2002).

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é propriedade mecânica importante para caracterizar a deformabilidade elástica dos materiais. Mehta e Monteiro (2008) definem três tipos de módulos de elasticidade, sendo: o módulo de elasticidade dinâmico; o módulo de elasticidade estático, que se divide em módulo tangente, módulo secante e módulo corda; e o módulo de deformação à flexão.

Quando se trata de análise de tensões de estruturas sujeitas a carga de impacto ou terremoto, é mais adequado determinar o módulo de elasticidade por métodos dinâmicos, por apresentar menor variabilidade. Em geral métodos dinâmicos são também não destrutivos, podendo ser determinado por frequência natural de vibração e através da velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo-de-prova (MEHTA E MONTEIRO, 2008; NĚMCOVÁ *et. al.* 2011; PADEVET, *et al.* 2011). Os ensaios não destrutivos já são empregados para análise do módulo de elasticidade do gesso pela literatura internacional, como com os trabalhos de Padevet *et al.* (2011) e Nemcová *et al.* (2011).

A partir da associação da pasta gesso e com uso da fibra na configuração de manta espera-se aumentar o teor de fibra randomicamente adicionada ao compósito, já que a maximização da fração volumétrica de fibras favorece a eficiência mecânica do compósito. O objetivo deste trabalho é analisar comparativamente a resposta do novo material quanto ao módulo de elasticidade obtido por ensaio de flexão 4-pontos e por ensaios dinâmicos de excitação por impulso e propagação do ultrassom.

## 2. MÉTODOS

O gesso foi fornecido por MAXGesso, empresa da região de Araripe, em sacos de papel Kraft<sup>®</sup> de 40 kg. A manta de sisal foi cedida pela empresa Hamilton Rios LTda, da cidade de Conceição do Coité - Bahia. O processo de conformação da manta se dá por compressão das fibras de sisal. O aditivo superplastificante foi fornecido pela BASF e é classificado como de 3º geração indicado para elementos estruturais de concreto autoadensáveis. É um líquido branco turvo, isento de sulfatos composto de policarboxilatos com densidade de 1,107g/cm<sup>3</sup>.

Após o desenvolvimento da pasta a ser utilizada na confecção do compósito, com fator a/g de 0,40 e adição de 1% de aditivo superplastificante foram realizadas avaliações dessa pasta no estado fresco e endurecido.

A quantidade de fibra presente na composição do material foi definida de acordo com a Eq. (1), conforme Levy Neto e Pardini (2006) *apud* Caldas (2014).

$$V_f (\%) = \frac{\frac{mf}{\rho_f}}{V_{\text{compósito}}} \quad (1)$$

Onde o volume de fibra (Vf) é considerado em função da massa de fibra (mf), a densidade da fibra ( $\rho_f$ ) e volume total do compósito (Vcompósito).

## 2.1. Ensaio de Flexão 4-pontos

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Estruturas da UEFS com base no método recomendado pela NBR 12.142 (ABNT, 1991) e norma japonesa JCSE – JF4, utilizando uma máquina de ensaios modelo Shimadzu com capacidade máxima de 100 kN e célula de carga utilizada de 2 kN, conforme Fig. 1.



Figura 1 - equipamento Sonelastic.

O módulo de elasticidade pode ser calculado através da Eq. (2).

$$MOE = \frac{c}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot (3L^2 - 4c^2) \cdot \left(\frac{\Delta F}{\Delta \epsilon}\right) \quad (2)$$

Em que, (c) é a distância do apoio ao suporte, (F) força aplicada a meio vão, (L) é o vão entre os apoios e (b) e (h) são a base e altura da seção transversal da amostra.

## 2.2. Ensaio dinâmico

Para o ensaio por frequência natural de vibração foram coletados dados de cada corpo de prova prismático de 160 x 40 x 14 mm<sup>3</sup> (comprimento, largura, espessura), bem como definido o coeficiente de Poisson de 0,20 e estes inseridos no programa do equipamento Sonelastic, marca ATCP, conforme Fig. 2, que estima o módulo de elasticidade pelo método flexional.

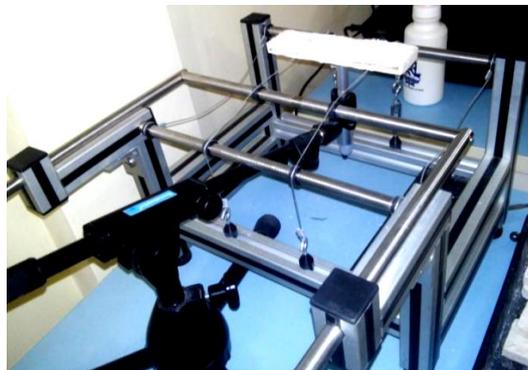


Figura 2 - Equipamento Sonelastic.

O procedimento do ensaio consiste em apoiar o corpo de prova no suporte, na posição dos nós da ressonância fundamental, que ficam localizados na distância de  $0,224 \times$  comprimento em relação a cada extremidade e fornecer um impulso no local de maior amplitude (ventre), para excitação das frequências de vibração, conforme ASTM E 1876 - 01 e ASTM C 215. Os dados foram determinados com frequência de 0,5 – 20 kHz.

Para determinação o módulo de elasticidade em seis corpos de prova, pela velocidade do pulso de ultrassom (VPUS), por método direto longitudinal, foi utilizado um equipamento circuito gerador – receptor UPV modelo E48, apresentado na Fig. 3.



Figura 3 - Equipamento de Ultrassom com diferentes transdutores a) plano b) exponencial.

Calcula-se o valor da velocidade do som para percorrer uma distância que é dada pela NBR 15.630 e 8802 (ABNT, 2005; 1994), conforme Eq. (3).

$$V = \frac{L}{T} \quad (3)$$

Em que, L é a distância entre os transdutores e t o tempo em  $\mu s$  que o pulso leva para percorrer o espaço entre os mesmos. A partir da velocidade do pulso de ultrassom calcula-se o módulo de Young dinâmico, conforme Eq. (4):

$$E = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (4)$$

Onde,  $\rho$  é a densidade do material e  $\mu$  é a razão de Poisson, estimado em 0,20, v é a velocidade v (mm/ $\mu s$ ) é a relação entre o comprimento do corpo de prova e o tempo de transmissão da onda ultrassônica.

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na caracterização da pasta de gesso foram investigadas as propriedades físicas e mecânicas, no estado fresco e o estado endurecido, da pasta com fator a/g de 0,40 sem aditivo e com aditivo no teor de 1%. Na Tabela 1, observa-se redução de 57,43% da propriedade de dureza e 47,76% da compressão da pasta com aditivo em relação à referência. É possível ver também que houve variação no teor de ar incorporado e porosidade em relação à referência.

Tabela 1 -Caracterização de pastas de gesso no estado fresco e endurecido.

Fator a/g	Aditivo (%)	Estado Fresco		Estado endurecido CP 5x5x5 cm <sup>3</sup>			
		Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Ar incorporado (%)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Dureza (N/mm <sup>2</sup> )	Compressão (N/mm <sup>2</sup> )
0,40	0,00 (Ref.)	1,71	4,63	1,47	18,06	93,40	18,97
	1,00	1,71	4,46	1,47	17,79	39,76	9,91

A manta utilizada como reforço na conformação do compósito apresenta gramatura de 788,90 g/m<sup>2</sup>, massa unitária de 0,315 g/cm<sup>3</sup> e massa específica das fibras de 1,3612 g/cm<sup>3</sup>.

A massa específica dos corpos de prova (Fig. 4) de gesso sem aditivo é 1304 (22) kg/m<sup>3</sup>, de gesso com 1% de aditivo e a/g 0,40 é 1403 (19) kg/m<sup>3</sup> e do compósito é 1127 (97) kg/m<sup>3</sup>. Com isso, tem – se que o compósito é mais leve, o que pode ser percebido facilmente com o manuseio do material.



Figura 4 - Corpos de prova a) gesso b) compósito

O volume médio de fibras que foi inserida como reforço dos compósitos é de 35% ± 5% com coeficiente de variação de 13%.

### 3.1. Ensaio de flexão 4-pontos

O comportamento do compósito na primeira fissura está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comportamento sob flexão na primeira fissura para compósito.

F (N)	Desl. Central (mm)	Resistência flexão (MPa)	MOE (MPa)
219,83 (82,06)	0,63 (0,57)	3,07 (0,94)	3887 (2441)

A tenacidade foi determinada seguindo procedimentos da norma japonesa, nas deflexões 20 e 60, em que  $L/20 = 6$  mm e  $L/60 = 2$  mm, podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Comportamento do compósito ao ensaio de flexão 4-pontos.

<b>F<sub>máx</sub> (N)</b>	<b>Desl. Central (mm)</b>	<b>MOR (MPa)</b>	<b>FT <math>\delta</math>60 (MPa)</b>	<b>FT <math>\delta</math>20 (MPa)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
341,01 (80,96)	5,75 (2,81)	4,81 (1,02)	2,29 (0,99)	3,55 (0,91)	1127 (97)

Ao observar os deslocamentos centrais alcançados pelo compósito, temos que na primeira fissura o deslocamento central foi em média de 0,63 mm e no pós – fissuração chegou até 5,75 mm, limitado à capacidade de leitura do LVDT.

Já em se tratando da propriedade de tenacidade, para a deflexão de 6 mm ocorre uma média de 3,55 MPa, superior em 35% em relação à deflexão de 2 mm. Observa-se que na deflexão de razão  $L/20$  há uma maior tenacidade do compósito, conseqüentemente maior absorção de energia. O corpo de prova de compósito durante o ensaio de flexão está ilustrado na Fig. 5.

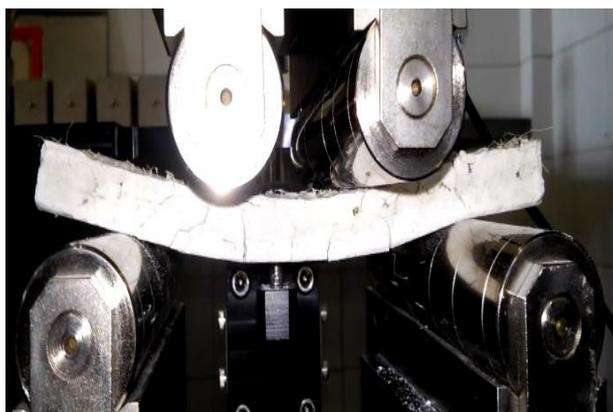


Figura 5 - Ensaio de flexão no compósito.

Após a realização do ensaio, foi possível verificar que a abertura das fissuras aconteceu em maior concentração na face tracionada, enquanto a face comprimida apresentou menor dano em sua superfície.

### 3.2. Método dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade pelo método torcional no ensaio de ressonância, assim como pelo ensaio do pulso de ultrassom (VPUS), pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comportamento do compósito por ensaio de ressonância e VPUS.

<b>Ressonância</b>		<b>VPUS</b>		<b>Densidade</b>
<b>E (MPa)</b>	<b>G (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>Transversal (MPa)</b>	<b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>

7520 (2216)	4313 (1581)	15167 (1852)	1733 (1113)	1127 (97)
-------------	-------------	--------------	-------------	-----------

O módulo transversal obtido por VPUS é inferior ao longitudinal com redução de cerca de 89%, essa variação acentuada pode ocorrer porque, na leitura realizada transversalmente, a camada central formada pela manta pode estar sendo detectada e, devido à acentuada porosidade, estar reduzido o módulo cisalhante.

Pode-se estabelecer uma correlação entre os módulos de elasticidade por flexão e dinâmicos e a densidade aparente do compósito como observado no Gráfico 1.

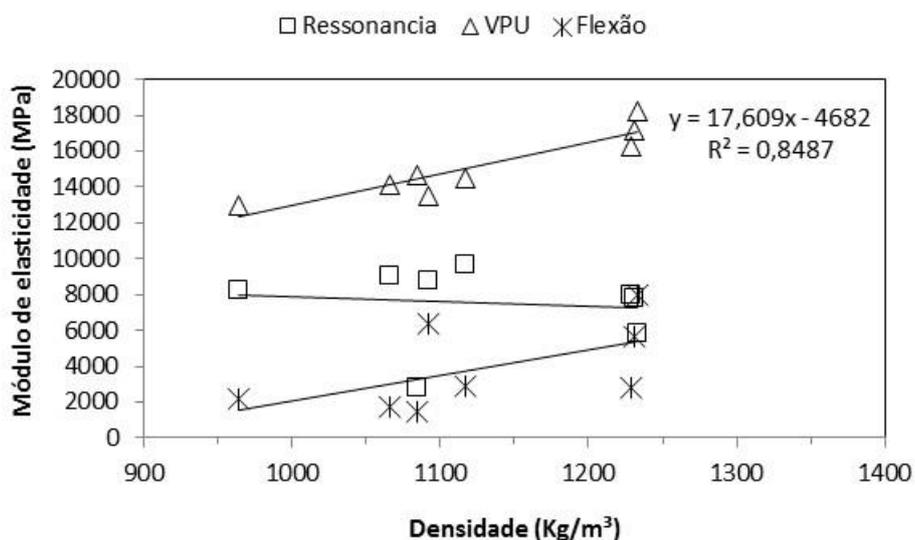


Gráfico 1 - Relação densidade x Módulos de elasticidade do compósito.

Existe uma forte correlação, acima de 80%, entre o módulo elástico gerado pelo método dinâmico de VPUS e a densidade do compósito.

A determinação do módulo de Young dinâmico através do VPUS tem resultados superiores os apresentados pelo método de ressonância, conforme Gráfico 2.

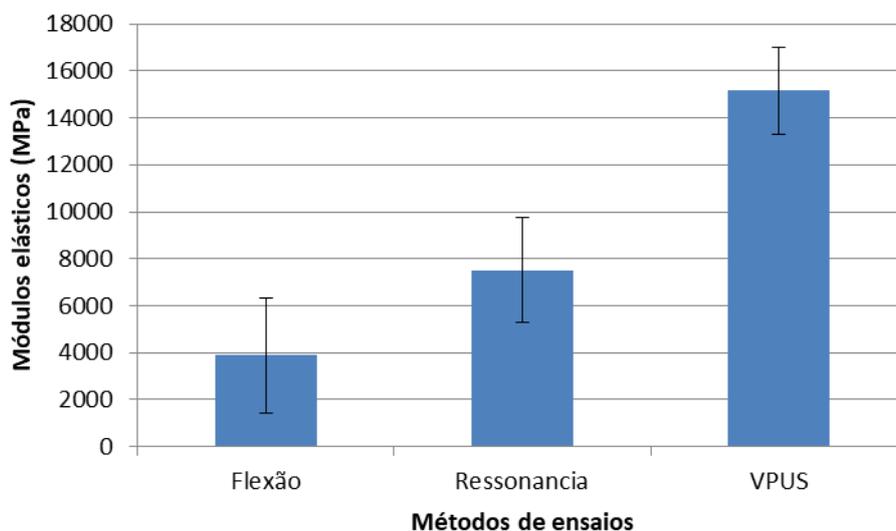


Gráfico 2 – Módulos elásticos por ensaios estático e dinâmicos.

Desse modo, temos que o módulo elástico estático obtido por flexão (MOE) é inferior em relação aos métodos dinâmicos, ficando em torno de 6 GPa. O método de ressonância apresenta resultados que se aproximam com os obtidos pelo método de flexão, sendo em torno de 10 GPa. Enquanto que os resultados obtidos por ultrassom longitudinalmente são superiores aos obtidos por ressonância, estando em torno de 15 GPa, e a reprodutibilidade dos ensaios pode ser observada a partir dos pequenos desvios.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O compósito tem cerca de  $35\% \pm 5\%$  v/v de teor de fibra adicionado, desse modo, a conformação com manta aumenta o teor de fibra. A aplicação da manta favorece, também, o comportamento do compósito pós – fissuração com o aumento da ductilidade e conseqüentemente da tenacidade em crescente suporte de carga, embora não apresente crescimento dos valores absolutos de resistência. A tenacidade média na deflexão de 6 mm é de 3,55 MPa.

A densidade do compósito foi inferior ao apresentado por corpos de prova da matriz. Essa característica indica maior leveza do material composto, que pode ser observada na prática com facilidade, no manuseio dos diferentes materiais. Essa propriedade pode conferir a possibilidade de peças pré-moldadas de dimensões maiores que as usuais, favorecendo a aplicação de menor quantidade de peças em vãos maiores.

A primeira fissura apresenta carga e deslocamento semelhantes ao encontrado no comportamento à flexão da matriz, com sensível redução da carga média suportada. O comportamento pós - primeira fissura foi de crescimento de suporte de carga. Houve uma modificação do seu comportamento durante a ruptura, em que há abertura de fissuras, sem separação do material em partes. Houve aumento da tenacidade do gesso com adição da manta de sisal, com maior absorção de energia ao longo de deformação, com comportamento de multifissuração durante a fase plástica.

Os módulos elásticos determinados por flexão 4-pontos são inferiores em relação aos módulos de elasticidade obtidos por métodos dinâmicos. Quanto aos métodos dinâmicos, o módulo de elasticidade longitudinal variou em função do método de 10 GPa a 15 GPa. O método de ultrassom se relaciona com a densidade do gesso podendo ser o método mais indicado para controle de qualidade do material. O módulo elástico calculado através do método de ressonância se aproxima ao obtido pelo método de flexão, com menor desvio nos resultados.

#### REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_. NBR 12142: *Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. NBR 15.630: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica*. 2009.
- \_\_\_\_\_. NBR 13.370: *Nãotecido - Terminologia*. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. NBR 8.802: *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 1876 – 01. *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. Annual Book of ASTM Standards, 2006.
- \_\_\_\_\_. ASTM C 215. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standards, 1991.
- BEIM, K.F. *Estudo comparativo das tensões cisalhantes na interface entre camadas de um compósito polimérico de fibra de carbono pelos métodos numérico e experimental*. Dissertação (Mestrado em Ciências

- na área de Tecnologia Nuclear- Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) – Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- CALDAS, B. G. S. *Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2014. 121 f.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 3.ed., 2008. 674p.
- NĚMCOVÁ, H. et. all. Comparison of methods for dynamic young's Modulus determination in gypsum materials. In: *4TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF MODELLING OF MECHANICAL AND MECHATRONIC SYSTEMS*. Faculty of Mechanical engineering, Technical university of Košice. 2011.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Part III – 2 *Method of test for steel fiber reinforced concrete*. Concrete Library of JSCE – SF4, n°3, 1984, 74 pag.
- PADEVET, P.; TESAREK, P.; PLACHY, T. Evolution of Mechanical properties of gypsum in time. *Internacional Journal of Mechanics*. Tema 1, Volume 5. 2011.
- ZANOTTO, E.D.; MIGLIORI JR., E.R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. *CERÂMICA*, N. 37, (247), 1991.

## DYNAMIC METHODS APPLIED IN THE EVALUATION OF COMPOSITE OF PLASTER AND SISAL BLANKET

**Abstract.** *Gypsum is a ceramic material of fragile rupture, so there is interest in modifying this behavior with the introduction of fibers as reinforcement. The maximization of the volumetric fraction of fibers added to the matrix favors the mechanical efficiency of the composite. The use of the fiber in the blanket configuration may increase the fiber content randomly added to the composite. Dynamic and non - destructive tests can be used to determine Young 's modulus of the materials. The aim of this study was to evaluate the gypsum matrix composite associated with the sisal blanket by dynamic methods of impulse excitation and ultrasonic propagation and compare with the Young's module obtained by the 4-point flexural strength test. The 4-point flexural elastic moduli are lower than the modules determined by dynamic methods. The ultrasound method is related to the composite density and may be the most suitable method for quality control of the material. The elastic modulus calculated by the resonance method approaches that obtained by the four-poin flexural method. Therefore, the work presents relevant contributions to the understanding of the mechanical behavior of the composite.*

**Keywords:** *Composite, Mechanical behavior, Gypsum, Young 's modulus*