

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICO MECÂNICA DO MÓDULO DE YOUNG DE MATERIAIS POR AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÃO COM USO DE ARDUINO

Thiago Henrique Braz da Silva (Laboratório de Vibrações-UFC) E-mail: thsilva@alu.ufc.br
Thiago Victor Albuquerque de Freitas (Laboratório de Vibrações-UFC) E-mail: thiagomec@alu.ufc.br
Rômulo do Nascimento Rodrigues (Laboratório de Vibrações-UFC) E-mail: rrodrigues@ufc.br
Roberto de Araújo Bezerra (Laboratório de Vibrações-UFC) E-mail: roberto.bezerra@ufc.com
Vanessa Vieira Gonçalves (Laboratório de Vibrações-UFC) E-mail: vanessavg@ufc.br

Resumo: A seleção de materiais deve se basear em dados de ensaios mecânicos para, assim, validar que o material apresenta as propriedades adequadas para o uso. Dessa forma, é de extrema importância a existência de processos de caracterização dos materiais de forma precisa, consistente e o mais simples possível para estimar suas propriedades. Com base nisso, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para determinar o módulo de young de materiais por meio da curva de amortecimento de uma viga engastada com vibração sub-amortecida a partir de medições com o Arduino. A metodologia consistiu na utilização de um suporte para engastar uma régua de aço inoxidável e, a partir de dois circuitos, um com um sensor ultrassônico e outro com o módulo acelerômetro, foram coletados dados de vibração. Após processar os dados no Python, os resultados foram comparados com o valor teórico disponível em catálogo e simulações computacionais usando elementos finitos. Com isso, obteve-se um erro máximo menor que 2%, validando a metodologia criada.

Palavras-chave: Módulo de Young, Frequência natural, Vibrações, Arduino, Elementos finitos.

DYNAMIC MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE YOUNG MODULUS OF MATERIALS BY UNDERDAMPED VIBRATION WITH THE USE OF ARDUINO

Abstract: To validate the properties of materials it's important to have processes of characterization of materials in a precise, consistent and as simple way as possible. Thus, this aim of this work is the development of a methodology to determine Young's modulus of materials through the damping curve of a cantilever beam with underdamped vibration from measurements with the Arduino. The procediment consisted in the use of a support to set a stainless steel ruler and collect vibration data through two circuits, one with an ultrasonic sensor and another with the accelerometer module. After processing the data in Python, the results were compared with the theoretical value available in catalog and computer simulations using finite elements. Thus, a maximum error of less than 2% was obtained, validating the methodology created.

Keywords: Young's modulus, Natural frequency, Vibration, Arduino, Finite elements.

1. Introdução

Entre uma das propriedades mecânicas mais importantes, destaca-se o módulo de Young, o qual mensura a relação linear elástica de corpos e, assim, é possível prever o comportamento do material sob aplicação de forças. Para adquirir este módulo, pode-se realizar tanto testes estáticos quanto dinâmicos. Do primeiro modo, normalmente utiliza-se uma configuração que possibilite aplicar uma força axial a um corpo e o módulo de Young é calculado a partir do diagrama de Tensão-Deformação. Conforme Digilov (2013), os testes dinâmicos são mais precisos e eficientes que os estáticos, pois são aplicadas tensões menores e os ensaios são não destrutivos, ou seja, é possível reutilizar o corpo de prova repetidas vezes.

Com base nisso, várias produções científicas desenvolveram ensaios dinâmico-mecânico para a caracterização dos materiais, como pode ser visto no trabalho

de Mosquera, Osório e Cordeiro (2015), o qual utilizaram vigas de barra retangular em configuração de cantilever monitoradas por sensor óptico e obteve resultados para o módulo de elasticidade coerentes com a literatura. ABRANTES et al. (2018) também caracterizaram o material desenvolvendo uma bancada experimental utilizando-se vigas na mesma configuração para adquirir a curva de amortecimento e os resultados tiveram um erro baixíssimo quando comparados com ensaios realizados em instrumentos mais caros. Além disso, Rossini et al. (2021) criaram uma metodologia didática de determinação experimental do módulo de elasticidade por meio da análise da frequência de oscilação dos harmônicos, sendo que os dados de testes eram adquiridos através de um smartphone.

Dessa forma, o presente trabalho constitui-se em caracterizar de forma dinâmico-mecânico materiais por amortecimento de vibração por meio da elaboração de um sistema de aquisição de sinais com o Arduino, que seja de fácil manuseio e baixo custo, para a determinação experimental do módulo de young e frequência natural de uma régua.

2. Modelo analítico de vibração de uma viga

Rao (2008) faz uma modelagem analítica de vibrações laterais em uma viga com diferentes condições de contorno que resulta em frequências naturais de vibração dadas pela equação (1).

$$\omega_0 = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (1)$$

Em que:

ω_0 representa a frequência angular de vibração

β é a constante relacionada às condições de contorno da viga,

E é o módulo de young,

I é o momento de inércia da barra e é calculado por $\frac{bh^3}{12}$,

ρ é a massa específica da barra,

A é a área da secção transversal da barra,

l é o comprimento engastado da barra.

No caso, como o intuito é medir a frequência para obter-se o módulo de elasticidade, reescreve-se a equação (1) como em (2).

$$E = \frac{\omega_0^2 \rho A}{I \beta^4} \quad (2)$$

As condições de contorno dessa análise são o engastamento da barra em uma de suas extremidades e a livre vibração da outra. Para esse caso, as constantes βl são dadas para os primeiros 4 modos de vibração conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes do modo de vibração

Modo de frequência	Valor
$\beta_1 l$	1,875104
$\beta_2 l$	4,694091
$\beta_3 l$	7,854757
$\beta_4 l$	10,995541

Rao (2008) também desenvolve a equação de movimento para vibrações subamortecidas, a qual é necessária para o cálculo da frequência natural já descrita. Com isso, tem-se o gráfico da equação (3) de solução de $x(t)$ apresentado na Fig. 1.

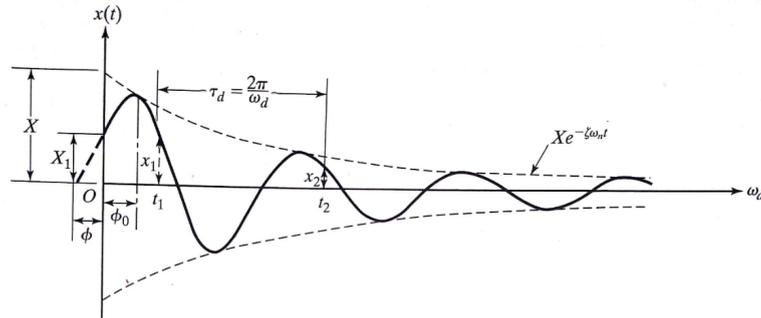


Figura 1 – Curva de vibração subamortecida

Fonte: Rao, 2008

$$x(t) = e^{-\xi \omega_n t} \left[x_0 \cos(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t) + \frac{x'_0 + \xi \omega_n x_0}{\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n} \text{sen}(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t) \right] \quad (3)$$

Em que:

$x(t)$ é a posição no eixo das abscissas,

ξ é o coeficiente de amortecimento,

ω_n é a frequência angular natural de vibração,

t é o tempo.

Além disso, o coeficiente de amortecimento é definido em pela equação (4).

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (4)$$

Sendo, δ o decremento logarítmico dado pela equação (5).

$$\delta = \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \quad (5)$$

Em que x_1 e x_2 são duas amplitudes consecutivas da mesma fase, como exibido na Fig.1, e a relação entre frequência natural e amortecida é fornecida pela equação (6).

$$\omega_{\text{Amortecida}} = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_{\text{Natural}} \quad (6)$$

3. Ferramentas utilizadas

Nesta seção são apresentados a plataforma Arduino para o sistema de aquisição de dados, os sensores utilizados para a captura de dados, os dispositivos elétricos para ativação da bancada e a plataforma de simulação Ansys para validação numérica do experimento.

3.1. Arduino

O Arduino (Banzi et al., 2005) é uma plataforma de prototipagem eletrônica open source baseada em hardware e software flexíveis e fáceis de usar. Entre suas principais vantagens, destacam-se criar projetos de circuitos eletrônicos de complexidade variadas com o mínimo de conhecimento de eletrônica. Com ele, é possível criar desde sistemas mais simples, como ligar Led, até aplicações intermediárias, como Internet das Coisas (IoT), Robôs e Sistemas de Automação (FLOP, 2021).

As placas Arduino contém um conector USB para ligá-lo a um computador com o propósito de alimentação e, principalmente, transferência de dados. Além disso, para programar o Arduino, é necessário criar um código em linguagem baseada em C/C++ e enviá-lo à placa por meio do software que pode ser adquirido no site oficial do Arduino.



Figura 2 - Principais elementos da placa Arduino Uno

Fonte: Mota, 2022

3.2. Ultrassom

O sensor ultrassônico HC-SR04, exibido na Fig. 3, é capaz de medir distâncias de 0,04 m a 4,0 m com uma resolução de 0,002 m com uma taxa de 1/60 ms medidas por segundo, segundo dados do fabricante Elecfreaks.



Figura 3 - Sensor Ultrassônico HC-SR04

Fonte: Thomsen, 2014

Para iniciar a medição com o sensor, é necessário alimentar o módulo colocando 5 V no pino *Trig* durante 10 μ s. Após isso, o sensor irá emitir uma onda sonora que retornará ao dispositivo quando encontrar algum obstáculo. Durante esse tempo de emissão e recebimento do sinal, o pino *Echo* ficará fornecendo 5 V. Com base nisso, é possível calcular a distância entre o sensor e o objeto com a Equação (7).

$$D = \frac{V_{som} \times T}{2} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

D: a distância;

V_{som} : a velocidade do som, que pode ser considerada 340 m/s;

T: o tempo de duração que a porta *Echo* ficou ativada.

3.3. Acelerômetro

O Acelerômetro GY-291 ADXL345 é um sensor que serve para realizar a leitura dos valores espaciais X,Y, Z por meio da junção de 3 eixos de coordenadas oferecidos pelo equipamento, conforme dados do fabricante Analog Devices Inc. Este dispositivo (Figura 4) é ideal para medir a aceleração dinâmica, vibrações e aceleração estática da gravidade (Iwaniec et al., 2017).



Figura 4 - Acelerômetro GY-291 ADXL345

Fonte: Solectro, 2022

Ademais, o sensor possui uma faixa de medição ajustável entre $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$ com sensibilidade de 40 mg/LSB em todas as faixas. Com base nisso, para converter o dado lido pelo sensor em m/s^2 , deve ser utilizado a equação (8).

$$a = \frac{VL * g}{fat} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

a : a aceleração em m/s^2 ;

VL : o valor lido pelo sensor;

g : a aceleração da gravidade, que pode ser considerada $9,81 m/s^2$;

fat : o fator de conversão.

A Tabela 2 fornece os valores de fat para cada intervalo de medição escolhido.

Tabela 2 – Fatores de conversão para cada intervalo de medição.

Intervalo	Fator de conversão
$\pm 2g$	3,9
$\pm 4g$	7,8
$\pm 8g$	15,6
$\pm 16g$	31,2

Fonte: Iwaniec et al. (2017)

3.4. Eletroímã

O eletroímã, exibido na Fig. 5, é um dispositivo eletrônico que permite gerar um campo magnético. Ele é ativado fornecendo uma corrente elétrica para o dispositivo e, quando esta cessar, os elementos metálicos presos a ele se desprendem.



Figura 5 - Eletroímã Solenóide 12 V DC

Fonte: Autocore, 2022

3.5. Ansys

Conforme Azevedo (2003), o método dos elementos finitos ou MEF, é um procedimento numérico que tem como finalidade encontrar soluções simplificadas para problemas de geometria complexa. Ele subdivide o domínio de um problema em uma malha de geometrias menores acopladas, chamadas elementos, e faz a análise individual de cada uma dessas geometrias e junções para obter os resultados da propriedade desejada ao longo do corpo.

Para exemplificar, a Fig. 6 exhibe a geometria do corpo de prova padrão usado no presente trabalho, o qual será explicado posteriormente, representado em elementos finitos. É importante ressaltar que, quanto maior o número de elementos, mais preciso será o resultado. Em contrapartida, à medida que este número aumenta, o tempo de processamento é cada vez maior, logo, a malha deve ser refinada o bastante para gerar resultados precisos em um tempo aceitável.

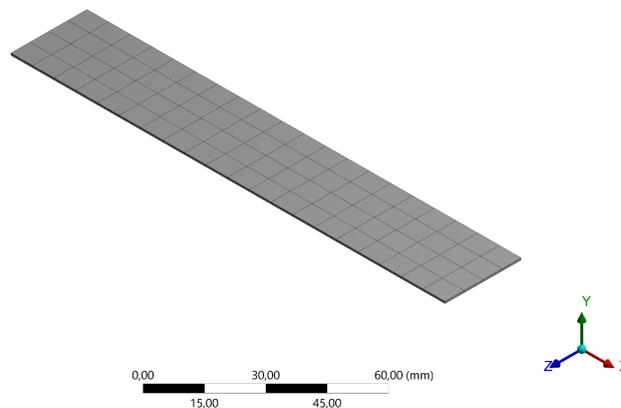


Figura 6 - Geometria do corpo de prova representada em elementos finitos

Para aplicação do MEF no presente artigo, tem-se o software Ansys, o qual é um programa comercial de simulação de engenharia envolvendo análise estrutural, fluidodinâmica, eletromagnética e multifísica, auxiliando diversas empresas no desenvolvimento de produtos, segundo Engineering Simulation and Scientific Software (2016). Entre as vantagens do seu uso, está a diminuição dos custos, quando comparado a criação de um ensaio experimental.

4. Materiais e Metodologia

Foi desenvolvido um teste em uma bancada do Laboratório de Vibrações Mecânicas da Universidade Federal do Ceará (UFC), o qual filtrava vibrações externas, com o uso de

um sistema eletrônico criado a partir da plataforma Arduino. Dessa forma, o teste tinha o propósito de adquirir dados tanto de deslocamento quanto de aceleração em função do tempo e, assim, plotar a curva de amortecimento em vibração livre de uma régua padrão, a qual estava engastada em um de seus lados e suas propriedades serão descritas a seguir. Após a aquisição, os dados foram tratados por meio da linguagem de programação Python e, com isso, foi plotada a curva de amortecimento e estimado o módulo de young do material a partir da determinação da primeira frequência modal. Para validação, utilizou-se análise modal com o software de métodos dos elementos finitos Ansys, e, além disso, o valor calculado para o módulo de elasticidade foi comparado com o valor teórico obtido no catálogo de Irestal Group (2012).

Para a realização dos experimentos, decidiu-se variar os seguintes parâmetros: amplitude inicial de oscilação e geometria da régua. Com isso, pretende-se verificar se a bancada continuará funcionando sobre diferentes configurações do corpo de prova.

Para o material do corpo de prova, foi utilizado uma régua de aço inoxidável 30 cm da marca WESTERN, o qual simplificou a definição de um corpo de prova padrão, pois este objeto é facilmente encontrado para venda online. A Tabela 3 apresenta as propriedades do corpo de prova, conforme dados do catálogo do Irestal Group (2012) e medições realizadas pelos autores.

Tabela 3 - Propriedades do corpo de prova

Simbologia	Propriedades	Régua de aço inoxidável	Fonte
l	Comprimento (m)	0,33	Autor
b	Largura (m)	0,0263	Autor
h	Espessura (m)	0,0007	Autor
m	Massa (kg)	0,0501	Autor
ρ	Densidade (kg/m ³)	8247	Autor
E	Módulo de Young (GPa)	193	Irestal Group
ν	Coefficiente de Poisson	0,3	Irestal Group

A seguir, serão descritas como foi feita a bancada experimental e a análise por MEF.

4.1. Análise experimental

Para o sistema eletrônico, foram feitos dois circuitos, o primeiro utilizando o Sensor Ultrassônico HC-SR04 e, o segundo, o módulo acelerômetro GY-291 ADXL34, conforme exibido na Fig. 7.

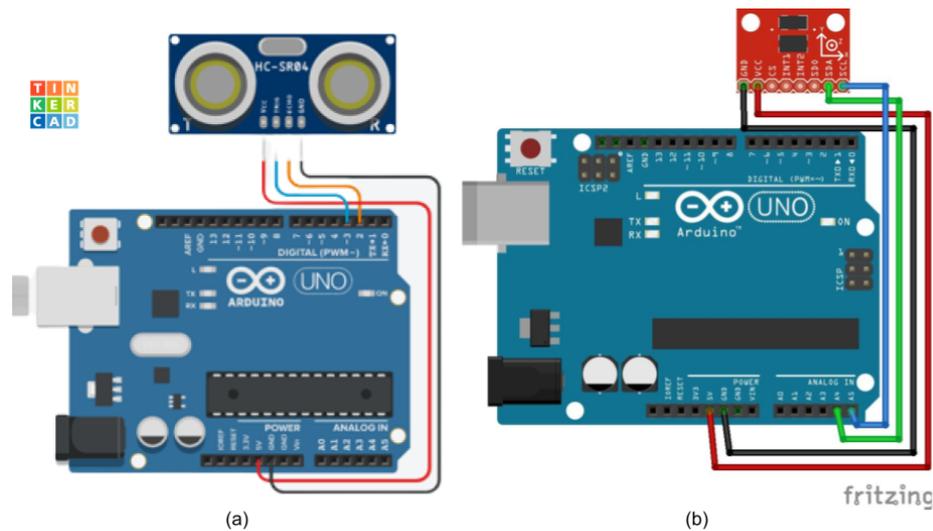


Figura 7 - (a) Esquemático do circuito com ultrassom (b) Esquemático do circuito com acelerômetro

Em relação ao aparato experimental, utilizou-se uma base em formato de S, o qual era fixada em uma mesa e a régua era engastada através de dois parafusos em uma base conforme é exibido na Fig. 8.a. Com isso, o ultrassom foi colocado fixado na mesa em uma posição abaixo da extremidade livre da régua, como pode ser visto na Fig. 8.b. Em relação ao segundo circuito, o acelerômetro foi posto no corpo por meio de cera (Fig. 8.c). Ademais, para os testes em que foram testados as amplitudes iniciais de movimento, foi utilizado o eletroímã solenóide 12V ligado a uma fonte de alimentação e fixado em uma base acima do corpo de prova, conforme exibido na Fig. 8.d. Assim, quando o dispositivo estava ligado, a régua ficava presa na posição inicial padrão e, ao desligar a fonte, o sistema iniciava o movimento vibratório. Nos outros testes, a régua era excitada manualmente puxando a extremidade livre com a mão e soltando.

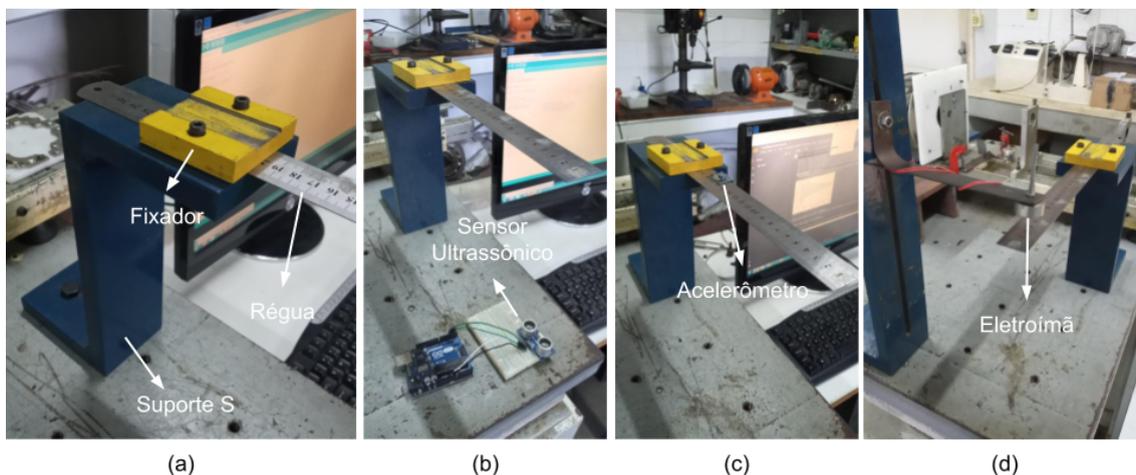


Figura 8 - (a) Régua fixado no suporte da bancada (b) Circuito com ultrassom montado na bancada (c) Circuito com acelerômetro montado na bancada (d) Eletroímã montado na bancada

Também é válido destacar que, uma das fontes de erro no caso do acelerômetro é a contribuição de sua massa e posição de fixação na frequência de vibração do sistema. Em relação a massa, a grandeza afetada é a densidade do sistema e no caso da posição, o momento de inércia é alterado devido ao efeito de amortecimento que a presença do acelerômetro causa à medida que a viga expande e contrai sua área de contato com o

acelerômetro. Desse modo, a situação que teoricamente minimiza ao máximo a interferência da massa do acelerômetro é posicioná-lo o mais próximo possível do ponto de engaste, pois seria onde haveria menor deformação longitudinal, porém ao fazer isso percebe-se que o sinal da aceleração sofre interferência de uma possível onda refletida no engaste, conforme Fig. 9.

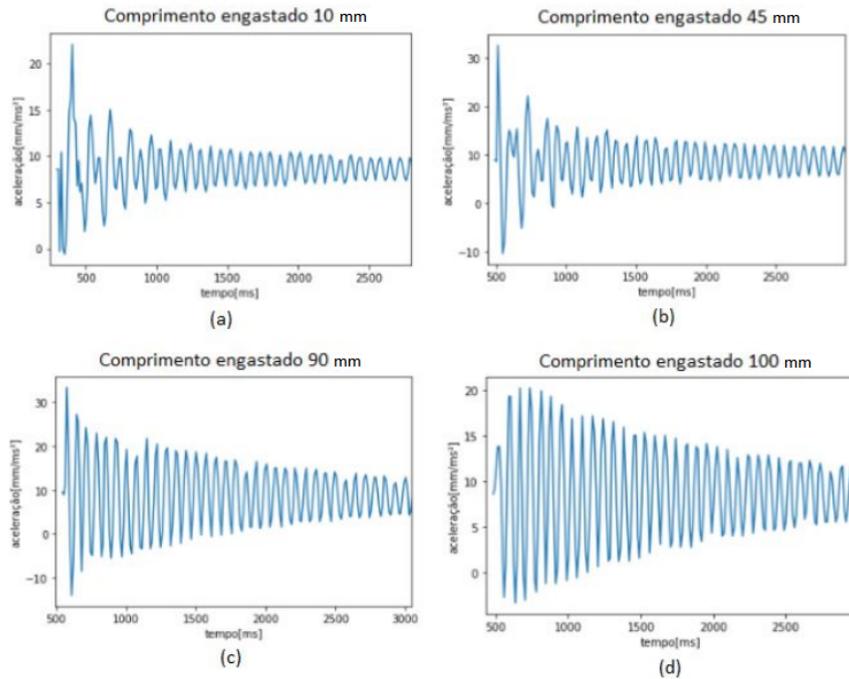


Figura 9: (a) Gráfico de amplitude versus tempo com o acelerômetro posicionado a 10 mm do engaste, (b) Gráfico de amplitude x tempo com o acelerômetro posicionado a 45 mm do engaste, (c) Gráfico de amplitude x tempo com o acelerômetro posicionado a 90 mm do engaste, (d) Gráfico de amplitude x tempo com o acelerômetro posicionado a 100 mm do engaste

Então, após medições em comprimentos diferentes do engaste, decidiu-se por realizar as medições a 100 mm do engaste em todos os casos. Alguns fatos notáveis foram: Para o comprimento de 25 cm fez-se necessário realizar as medições com pequenas amplitudes (menores que 2 cm), pois amplitudes maiores resultaram em ruídos excessivos que atrapalhavam o software em Python a medir a frequência natural.

4.2. Análise por MEF

Nesta sessão, será apresentado o modelo desenvolvido no software Ansys Workbench para realizar as simulações de análise modal discutidas neste artigo. Para simplificar o entendimento, o esquemático do projeto é exibido na Fig. 10.

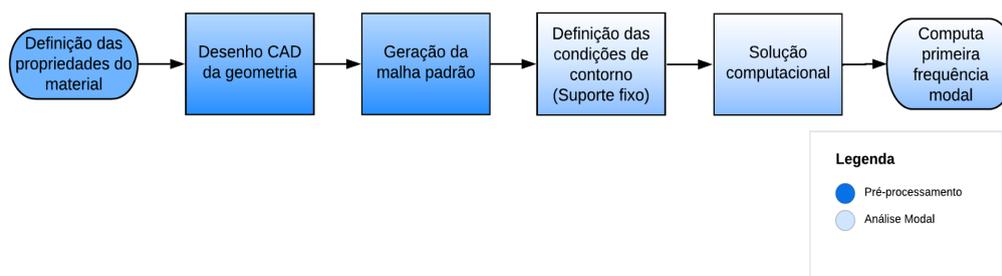


Figura 10 - Fluxograma para análise modal no Ansys

Para o pré-processamento, devem ser configuradas as propriedades do material de acordo com os dados apresentados na Tabela 4. Após isso, é feito o desenho em CAD da régua na ferramenta Design Modeler disponibilizada dentro do software Ansys. Com isso é gerado a malha padrão pelo algoritmo da ferramenta Ansys Mechanical com uma densidade de nós compatível com o hardware para obter resultados em tempo hábil.

Para a análise modal, exibida na Fig. 11, são configuradas as condições de contorno, que, nesse caso, é apenas o engastamento em um dos lados. Dessa forma, o modelo já está criado e, a partir disso, são feitos os cálculos computacionais pelo programa e o valor da primeira frequência modal é computado.

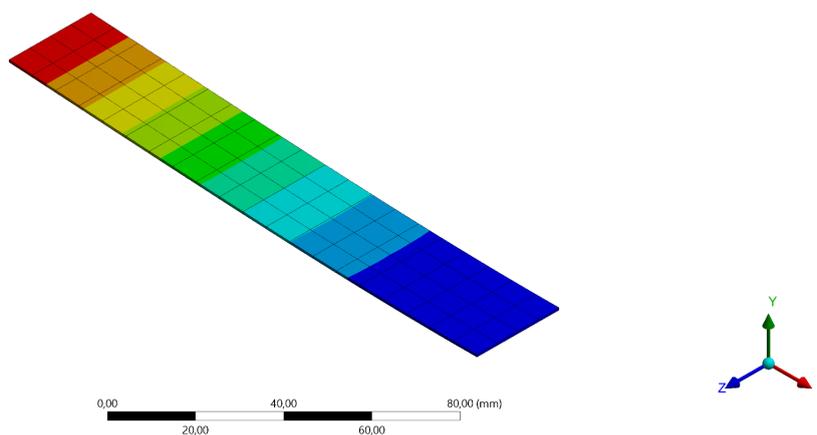


Figura 11 - Resultado da análise modal

5. Resultados e discussões

A seguir, evidenciam-se os resultados pertinentes à análise do presente trabalho, a partir dos experimentos e da solução do modelo estrutural concebido no pacote comercial ANSYS.

5.1. Variação da amplitude

Primeiramente, devido ao método de medição sem padronização de amplitudes, fez-se necessário verificar se a faixa de amplitudes de trabalho afetaria significativamente a frequência experimental obtida (Tabela 4).

Tabela 4 - Variação da frequência com a amplitude inicial de movimento da régua engastada de 18 cm

Amplitude (cm)	Frequência Natural (Hz)		Módulo de Young (GPa)		Erro relativo do módulo de Young (%)
	Análítica	Experimental	Teórica	Experimental	
0,92		17,16		199,4	3,30
1,66	16,88	17,2	193	200,3	3,78
3,94		17,24		201,2	4,24

Obtendo uma faixa de erro de $\pm 0,04$ Hz (0,23%) para uma régua de aço Inox engastada a 18 cm conclui-se pouca influência do modo de coleta de dados, como se verifica teoricamente pela independência da amplitude na equação (1). Em

contrapartida, tem-se uma influência maior ao se analisar o erro provocado no valor do módulo de Young.

5.2. Variação da geometria

Em seguida, variou-se o comprimento da régua de aço inoxidável e os métodos de medição (Tabela 5).

Tabela 5 - Comparação entre os resultados para obtenção das frequências naturais através do método analítico, experimental e elementos finitos

Comprimento (cm)	Freq. Experimental (Hz)		Freq. CAE (Hz)	Freq. Analítica (Hz)
	Acelerômetro	Ultrassom		
15	23,49	23,44	24,672	24,31
20	13,98	13,50	13,831	13,68
25	9,07	8,98	8,833	8,75

Foram realizadas 3 medições para cada comprimento de cada método experimental e computadas suas médias, e 1 simulação por comprimento no CAE (Ansys). Com base nisso, foram calculados os seguintes módulos de Young para cada dado experimental e numérico apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Módulo de elasticidade referente a cada frequência obtida

Comprimento (cm)	Módulo de Young (GPa)		Módulo de Young CAE (Hz)
	Acelerômetro	Ultrassom	
15	180,2	179,4	198,7
20	201,7	188,1	197,4
25	207,2	203,2	192,9
Média	196,4	190,2	195,3

5.3. Discussão dos resultados

Analisando os erros dos dados obtidos, tem-se a Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo dos erros relativos ao módulo de Young referente a cada método

Erro Relativo. Experimental (%)		Erro Relativo CAE (%)
Acelerômetro	Ultrassom	
1,76	1,45	1,19

Com valores de erro que não ultrapassam a faixa dos 2% do valor teórico, pode-se considerar a bancada confiável para essa faixa de erros. Vale ressaltar que a massa do acelerômetro, por ser significativa em comparação com a 'viga cantilever', produz um erro maior que a medição pelo Ultrassom, embora seja, teoricamente, a maneira mais correta para se medir vibrações minimizando os ruídos.

6. Conclusão

É possível concluir que os objetivos foram alcançados, pois os experimentos tanto com o sensor ultrassom quanto com o módulo acelerômetro foram eficientes para determinar o módulo de Young com base na modelagem do sistema como viga engastada em uma faixa de erro abaixo de 2%. Para trabalhos futuros, planeja-se determinar as frequências naturais de corpos de prova de mesma geometria, porém com configuração de engastes diferentes. Também pretende-se testar réguas de outros materiais, como o ABS, o qual é o principal utilizado em impressora 3D.

Referências

ABRANTES, Ayrton O. et al. *DESENVOLVIMENTO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DINÂMICO-MECÂNICA DE MATERIAIS POR AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÃO.*

AUTOCORE. *Eletroímã Solenóide 12V DC 2,5Kg.* Autocore, 2022. Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/eletroima-solenóide-12v-dc-25kg>>. Acesso em: 20/10/2022.

AZEVEDO, Álvaro FM. *Método dos elementos finitos.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, v. 1, n. 7, 2003.

Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, and David Mellis. *Site Arduino.* Acesso em: 16/10/2022. Disponível na internet: <<http://www.arduino.cc>>.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Livro: *Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução.* 2008.

DIGILOV, Rafael M.; ABRAMOVICH, Haim. *Flexural vibration test of a beam elastically restrained at one end: a new approach for Young's modulus determination.* Advances in Materials Science and Engineering, v. 2013, 2013.

ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE. *Método numérico, analítico e experimental: concorrentes ou complementares na engenharia,* 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/simulacao-numerica-metodo-analitico-experimental-concorren-tes-ou-complementares-na-engenharia/>>. Acesso em: 27 de julho, 2022.

Irestal Group (Org.). *Técnicas de Aço Inoxidável.* Barcelona: Irestal Group, 2012. 4 p.

IWANIEC, Marek et al. *Development of vibration spectrum analyzer using the Raspberry Pi microcomputer and 3-axis digital MEMS accelerometer ADXL345.* In: 2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). IEEE, 2017. p. 25-29.

MOSQUERA, L.; OSÓRIO, Jonas H.; CORDEIRO, Cristiano MB. *Determination of Young's modulus using optical fiber long-period gratings.* Measurement Science and Technology, v. 27, n. 1, p. 015102, 2015.

MOTA, Alan. *O que é Arduino e como funciona.* Acesso em: 20/10/2022. Disponível na internet: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/o-que-e-arduino-e-como-funciona/>>.

NOGUEIRA, Danilo. *Conhecendo o Protocolo I2C com Arduino.* Autocore, 2019. Disponível em: <<https://autocorerobotica.blog.br/conhecendo-o-protocolo-i2c-com-arduino/#comments>>. Acesso em: 16/10/2022.

Rao, Singiresu S.. *Vibrações Mecânicas*. 4. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

ROSSINI, Marcos Roberto et al. *Determinação do módulo de elasticidade de Young por meio de um smartphone*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, 2021.

SOLECTRO. *Como usar um acelerômetro ADXL345 de 3 eixos com Arduino*. Solectro, 2022. Disponível em: <<https://solectroshop.com/pt/content/74-como-usar-um-acelerometro-adxl345-de-3-eixo-s-com-arduino>>. Acesso em: 16/10/2022.

THOMSEN, Adilson. *O que é Arduino (Online)*. Filipeflop, 2014. Disponível em: <<http://blog.filipeflop.com/arduino/o-que-e-arduino.html>>. Acesso em: 16/10/2022.

THOMSEN, Adilson. *Como conectar o Sensor Ultrassônico HC-SR304 ao Arduino*. Filipeflop, 2011. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/sensor-ultrassonico-hc-sr04-ao-arduino/>>. Acesso em: 16/10/2022.

Ultrasonic Ranging Module HC-SR04. *ElecFreaks*. Datasheet. Disponível em: <<http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/HCSR04b.pdf>> Acesso em 16 out. 2022.

3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer Datasheet ADXL345. Disponível em: <<http://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/data-sheets/ADXL345.pdf>>. Acesso em 16 out. 2022.