

The Influence of Specimen Length on the Measured Fundamental Vibration Frequencies of Metal Faced Sandwich Beams

 İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ*  Raphiq ALİYEV 

Akdeniz University Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Campus/ANTALYA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 14/07/2019

Revision 19/11/2019

Accepted: 21/12/2019

Highlights

- Vibration test
- Mechanical properties
- Boundary conditions

Keywords

Sandwich beam

Vibration test

Frequency

Specimen length

In this study, the influence of the clamped-free beam specimen length on the measured fundamental vibration frequencies of flat sandwich beams is investigated. First, sandwich beams having flat galvanized steel faces, and a rigid foam core are produced, and clamped beam vibration tests are conducted on specimens having three different lengths. The experimental results obtained are compared with the numerical results obtained using a 1D finite element model. The results obtained show that the clamped beam vibration test yields satisfactory results, and the longer specimens yield more accurate results.



Figure A. The experimental setup

Purpose: The main purpose is to determine the influence of specimen length on the vibration test results.

Theory and Methods: The experimental results obtained using a MEMS type accelerometer are compared with the numerical results obtained using a shear deformable beam finite element model.

Results: The results obtained show that the numerical and experimental results are in good agreement, especially for longer specimens.

Conclusion: (i) The numerical and experimental results obtained are in better agreement for longer beam specimens. (ii) It is observed that the frequency ratio decreases with increasing specimen length. (iii) The material properties used in the numerical model are verified by the experimental results obtained in this study. (iv) It is shown that MEMS type accelerometers can be used to conduct simple vibration tests. (v) The results obtained show that the not-perfect clamped end conditions cause deviations between the numerical and the experimentally obtained results.



Metal Yüzlü Sandviç Konsol Kirişlerde Numune Boyunun Ölçülen Temel Titreşim Frekansına Etkisi

İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ* Rapih ALİYEY

Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kampüs/ANTALYA

Öz

Bu çalışmada düz yüzlü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerin temel titreşim frekanslarının ölçümünde konsol kiriş numune boyunun neticelere etkisi incelenmiştir. Bu maksatla basit bir titreşim deney düzeneği oluşturulmuş ve imal edilen düz galvanizli sac yüzlü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kiriş numuneleri üzerinde 3 farklı konsol uzunluğu için titreşim deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel neticeler bir boyutlu bir sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş olan neticeler ile mukayese edilmiştir. Yapılan mukayese konsol kiriş titreşim deneyi ile sandviç kiriş temel titreşim frekansının hassas olarak ölçülebileceğini ve numune boyunun artırılmasının genel olarak hassasiyeti artırdığını göstermiştir.

The Influence of Specimen Length on the Measured Fundamental Vibration Frequencies of Metal Faced Sandwich Beams

Abstract

In this study, the influence of the clamped-free beam specimen length on the measured fundamental vibration frequencies of flat sandwich beams is investigated. First, sandwich beams having flat galvanized steel faces, and a rigid foam core are produced, and clamped beam vibration tests are conducted on specimens having three different lengths. The experimental results obtained are compared with the numerical results obtained using a 1D finite element model. The results obtained show that the clamped beam vibration test yields satisfactory results, and the longer specimens yield more accurate results.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/07/2019
Düzeltilme: 19/11/2019
Kabul: 21/12/2019

Anahtar Kelimeler

Sandviç kiriş
Titreşim deneyi
Frekans
Numune boyu

Keywords

Sandwich beam
Vibration test
Frequency
Specimen length

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu çalışmada düz metal yüzlü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerin temel titreşim frekanslarının konsol kiriş titreşim deneyi ile elde edilmesinde numune uzunluğunun neticelere etkisi incelenmiştir.

Kiriş titreşim deneyi, kiriş rijitliği ve malzeme parametrelerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Titreşim deneyleri ile ilgili standartlar olan ASTM E 1876'da [1] tarif edilmiş olan basit mesnetli kiriş titreşim ve ASTM E 756'da [2] tarif edilmiş olan konsol kiriş titreşim deneyleri ile malzeme parametreleri belirlenebilir. Bu çalışmada mesnet teşkilinin çok daha kolay olması sebebiyle basit mesnetli kiriş yerine konsol kiriş titreşim deneyinin yapılmasına karar verilmiştir.

Literatürde kiriş titreşim deneyi ile ilgili aşağıda özetlenmiş olan pek çok çalışma bulunmaktadır. Hyer vd. [3] sınır şartlarının etkisini incelemişlerdir ve ankastre ucun tam anlamıyla tutulu olmaması halinde elde edilen neticelerin yüksek oranda hata içereceklerini belirlemişlerdir ve bu sebeple mesnetlenmeye özellikle dikkat edilmesini ve mesnetlerde bir miktar sıkışma meydana geleceğinden mesnetleme sırasında numune kalınlık değişiminin de takip edilmesi gerektiğini konusunda tavsiyelerde bulunmuşlardır. Sokolinsky vd. [4] sandviç kirişlerin titreşim davranışlarını incelemişler ve konsol kiriş titreşim deneylerinden elde ettikleri neticelerin elde ettikleri analitik ve sayısal neticeler ile uyumlu olduğunu ve sönümün göz önünde bulundurulması gerektiğini bildirmişlerdir. Rizos vd. [5] konsol kiriş testi ile kirişlerde çatlak konum ve

derinliğinin belirlenebildiğini göstermişlerdir. Benzer şekilde, titreşim deneyleri sandviç panellerde hasar oluşan bölgelerin belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır [6, 7].

Düşük maliyetli (MEMS tipi) dijital ivmeölçerler özellikle son yıllarda titreşim testlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Albarbar vd. [8] MEMS tipi ivmeölçerlerin performansını incelemişler ve bu tip düşük maliyetli ivmeölçerler ile darbe yüklemesinde yüksek maliyetli ivmeölçerler ile elde edilen frekans tepe değerlerine çok yakın değerlerinin elde edilebileceğini göstermişlerdir. Varanis vd. [9, 10] metal kiriş ve çerçevelerin titreşim parametrelerini elde etmek için bu tip ivmeölçerler kullanmışlardır ve sayısal/analitik neticeler ile uyumlu deneysel neticeler elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, öncelikle basit bir titreşim deney düzeneği oluşturulmuş ve MEMS tipi dijital bir ivmeölçer ile elde edilmiş olan zaman-ivme verileri üzerinde FFT analizleri yapılarak iki farklı uzunluktaki numuneler için temel titreşim frekansları elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen deney neticelerinin mukayese edilebilmesi için formülasyonu Hinton ve Owen [11] tarafından verilmiş kayma deformasyonlu bir izoparametrik kiriş elemanı kullanılmış ve Octave [12] programı kullanılarak bir program yazılmıştır. Son olarak, elde edilen deneysel ve sayısal neticeler mukayese edilerek sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Çekirdek malzemesi olarak yoğunluğu 23.4 kg/m^3 olan Wallboard marka bir XPS (extruded polystyrene) köpük malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme için kayma modülü değeri ASTM C393 [13] standardına göre yapılmış olan sandviç kiriş 3 nokta eğilme testleri ile belirlenmiştir. Bu maksatla titreşim testleri için üretilmiş olan $L=700\text{mm}$ uzunlukta 0.7 mm kalınlıkta galvanizli sac yüzü sandviç kiriş numuneleri kullanılmış ve 3 nokta eğilme testleri ile $G_{12}^{XPS}=4.3 \text{ MPa}$ olarak elde edilmiştir.

Galvanizli sac için aşağıdaki değerler alınmıştır;

$$E_{\zeta} = 2 \times 10^5 \text{ MPa}, \sigma_{\zeta}^a = 120 \text{ MPa}, \nu_{\zeta} = 0.3,$$

burada E_{ζ} ve σ_{ζ}^a kullanılan galvanizli sacın sırasıyla elastisite modülü ve çekmede akma gerilmesi değerleridir. σ_{ζ}^a değeri üretici firma olan Erdemir A.Ş.'nin ürünler kataloğundan alınmıştır.

2.2. Numune Özellikleri

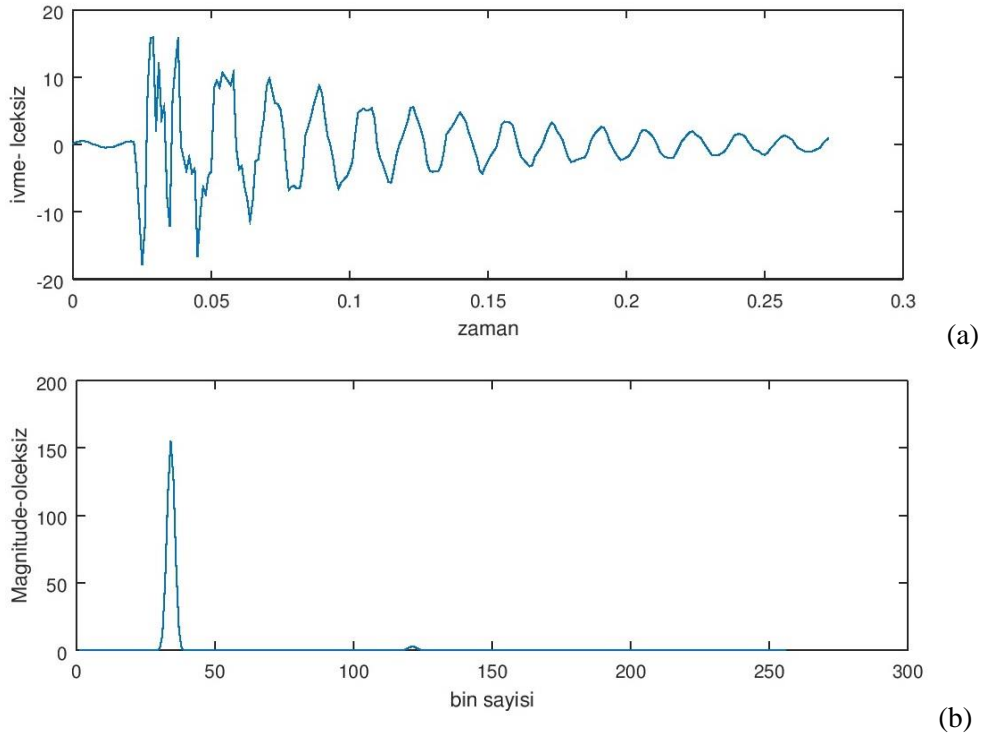
Kiriş uzunluğu $L=700 \text{ mm}$, kiriş genişliği $b=50 \text{ mm}$, çekirdek yüksekliği $h_c=50 \text{ mm}$, dış yüz kalınlığı $t_f=0.7 \text{ mm}$ olarak alınmıştır. Dış yüzler XPS köpük çekirdeğe Mikrokim marka bir poliüretan yapıştırıcı kullanılarak oda sıcaklığında yapıştırılmıştır. İmal edilen numunelerin ağırlıkları sırasıyla 463 gr , 466 gr , ve 468 gr olarak ölçülmüştür. Deneyler yapılmadan önce poliüretan bazlı yapıştırıcının kimyasal dayanımına tam olarak ulaşmasını sağlamak için 2 hafta kadar beklenmiştir.

2.2. Titreşim Deney Düzeneği (Vibration Test Setup)

Bu düzenekte ADXL345 marka 3 eksenli bir MEMS tipi dijital ivmeölçer kullanılmıştır.



Şekil 1. Konsol kiriş titreşim deney düzeneği



Şekil 2. Metal yüzü sandviç kirişin titreşim cevabı (a) zaman, ve (b) frekans tanım alanlarında

Şekil 1’de gösterildiği şekilde, numuneler iki metal plaka arasında 4 adet bulon kullanarak mesnetlenmiştir. Mesnetleme sırasında rijit köpük çekirdeğe hasar vermemek için köpük çekirdeğin sıkışma miktarı kumpas ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Ayrıca, konsol kirişin serbest ucuna ağırlık asılarak deplasman ölçümü yapılmış ve kirişin ankastre mesnet şartına ne derece uyduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, Garrido vd. [14] tarafından da bildirildiği üzere, rijit köpük malzemede yük uygulandıktan çok kısa süre sonra oluşan sünme deformasyonları sebebiyle sağlıklı netice alınamamıştır. Bu sebeplerden dolayı, ileride yapılacak çalışmalarda mesnetlenme bölgesinde uygulanan kuvvetin de ölçüleceği daha hassas bir mesnetleme düzeneği geliştirilmesi planlanmaktadır.

Deneyler sırasında konsol kiriş serbest ucuna ağır bir metal parça ile vurularak tahrik edilmiş ve örnekleme frekansı 912 Hz olacak şekilde toplam 250 zaman-ivme verisi bir Arduino kartı vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmiştir. FFT analizleri Octave programında yazılmış bir program ile yapılmış ve Cooley vd. [15] tarafından geliştirilmiş olan Welch Yöntemi kullanılmıştır.

Programın örnek bir çıktısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2(a)’da gösterilen zaman-ivme verilerine FFT algoritması uygulandığında Şekil 2(b)’de gösterildiği şekilde temel titreşim frekansı elde edilebilir.

2.3. Sönüm Oranının Hesabı (Determination of the Damping Ratio)

Konsol kiriş titreşim deney deticelerini kullanarak sönüm oranını belirlemek için logaritmik azalma yöntemi kullanılmıştır; bkz. Chopra [16]. Az sönümlü sistemlerde sönüm oranı ξ ,

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}}, \quad \delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{X_0}{X_n} \right), \quad (0 < \xi < 1) \quad 1$$

formülleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada X_n ve X_0 sırasıyla göz önünde bulundurulmuş ilk ve son tepe noktalarındaki genlikler ve n ise birbirini takip eden tepe noktaları sayısıdır.

Elde edilen deney neticelerini sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş olan neticeler ile mukayese edebilmek için sönümsüz titreşim açısal frekansları, ω_n ,

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad 2$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ω_d deneysel olarak elde edilmiş olan sönümlü titreşim hali için açısal frekanstır.

2.4. Sonlu Elemanlar Modeli (The Finite Element Model)

Sandviç kiriş titreşim analizleri toplam 6 adet 3 düğümlü, 1. mertebeden kayma deformasyonlu izoparametrik kiriş elemanı kullanılarak oluşturulmuş bir sonlu elemanlar modeli ile yapılmıştır. Standart eleman formülasyonu Hinton ve Owen [11] tarafından detaylı olarak verilmiştir. Bu çalışmada sandviç kiriş kayma rijitliğinin tamamen köpük çekirdek tarafından sağlandığı varsayımı yapılmış ve kayma düzeltme katsayısı $k=1$ olarak alınmıştır; bkz. Eşitlik 3.

$$[D] = \begin{bmatrix} AE & & \\ & EI & \\ & & kGA \end{bmatrix} \quad 3$$

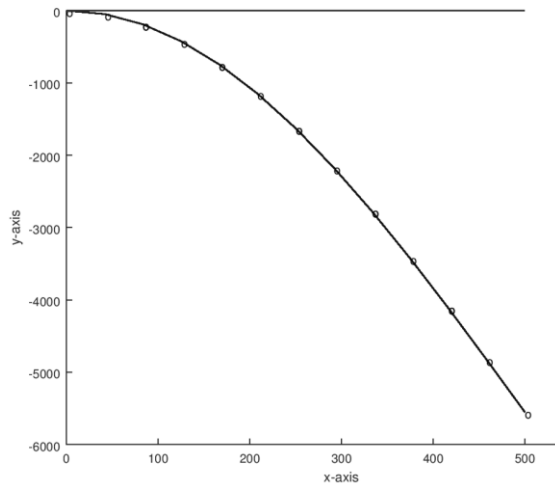
Eşitlik 3'te verilen malzeme rijitlik matrisi $[D]$ nin elemanları olan aksel rijitlik AE , eğilme rijitliği EI , ve kayma rijitliği GA şöyle hesaplanmıştır;

$$EA \cong 2bt_f E_c,$$

$$EI \cong \frac{E_c bt_f}{6} (3h_c^2 + 6h_c t_f + 4t_f^2),$$

$$GA \cong bh_c G_{12}^{XPS}.$$

İvmeölçer ve bunu kiriş ucuna yapıştırmakta kullanılan yapıştırıcı ağırlığı yaklaşık 2 gr olarak ölçülmüştür. Bu ilave kütle modelde kiriş serbest ucuna denk gelen düğüme konsantre kütle olarak ilave edilerek göz önünde bulundurulmuştur. Octave programı kullanılarak yazılmış olan program ile elde edilmiş olan örnek bir titreşim mod şekli Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekil 3'de $x=0, y=0$ noktasında ankastre mesnet bulunmaktadır ve kirişin serbest ucu $x=500, y=0$ noktasında bulunmaktadır.



Şekil 3. $L=500$ mm uzunluktaki metal yüzü sandviç kiriş için sonlu elemanlar modelinden elde edilen 1. titreşim mod şekli

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bölüm 2.4'te tarif edilmiş titreşim deney düzeneği ile elde edilmiş olan deney neticeleri $L= 500$, ve 550 mm için sırasıyla Tablolar 1, ve 2'de verilmiştir. Bu tablolarda 'SE' alt indisli sonlu eleman modeli ile elde edilmiş neticelerini göstermektedir. Her bir L değeri için en az 3 deney yapılmış ve bağıl standart sapmaları en düşük olan ilk 3 deney neticesinin ortalaması alınmıştır. Sönümsüz titreşim frekansı değerleri, $\omega_{n,deney}$, Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Fark şöyle hesaplanmıştır;

$$|Fark| = \left| \frac{\omega_{n,SE} - \omega_{n,deney}}{\omega_{n,SE}} \right| \times 100$$

Tablolar 1 ve 2'den görülebileceği üzere, deneysel olarak elde edilmiş olan temel sönümlü titreşim frekansı değerleri, $\omega_{d,deney}$, için bağıl standart sapmanın bütün deneylerde sıfıra çok yakın olması yapılan ölçümlerin güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. $L=500$ mm uzunlukta numuneler için neticeler

Numune	$\omega_{d,deney}$ (Hz)	Bağıl standart sapma		$\omega_{n,deney}$ (Hz)	$\omega_{n,SE}$ (Hz)	Fark (%)
		ζ (%)	(%)			
1	59.240	0.000	2.987	59.267	61.818	4.352
2	61.035	0.000	3.141	61.065	61.622	0.962
3	61.035	0.000	3.560	61.074	61.491	0.747

Tablo 2. $L=550$ mm uzunlukta numuneler için neticeler

Numune	$\omega_{d,deney}$ (Hz)	Bağıl standart sapma		$\omega_{n,deney}$ (Hz)	$\omega_{n,SE}$ (Hz)	Fark (%)
		ζ (%)	(%)			
1	55.650	0.000	2.235	55.669	55.801	0.246
2	55.623	1.892	2.635	55.071	55.623	0.992
3	57.445	0.000	2.531	57.463	55.505	3.528

Tablo 1'den görülebileceği üzere, $L=500$ mm için sayısal ve deneysel neticeler arasındaki fark 1. numune için yaklaşık %4 ve diğer numuneler için %1'in altındadır. Özellikle 1. numunede ortaya çıkan farkın temel sebebinin numunedeki kusurlar ve/veya mesnetlenmede yapılan hata olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, sönüm oranının %3~3.5 civarında olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2'den görülebileceği üzere, $L=550$ mm için sayısal ve deneysel neticeler arasındaki fark 1. numune için yaklaşık %0.3 ve 2. numune için %1'in altındadır. Ancak, 3. numune için farkın yaklaşık %3.5 olduğu görülmüştür.

$L=550$ mm uzunluktaki 1. numune için, numune uzunluğundaki artışın hatayı bu denli düşürmesi beklenmeyen bir neticedir. Bu yüzden, $L=500$ mm için yapılan deneylerde 1. numunenin iyi mesnetlenmemiş olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde 3. numune için L değerindeki artışın hatayı azaltmamış olması sebebiyle farkın mesnetlenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 2'den $L=550$ mm için sönüm oranının %2.2~2.5 civarında olduğu ve sönüm oranının da numune uzunluğunun artması ile az da olsa azaldığı gözlemlenmiştir.

$L=500$ ve 550 mm dışında, daha düşük L değerleri için de deneyler yapılmıştır. Ancak, kullanılan örnekleme frekansı için 912 Hz'den daha yüksek bir değer alınmadığı için kayda değer neticeler elde edilememiş ve elde edilen deney verileri burada sunulmamıştır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada düz metal yüzü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerin temel titreşim frekanslarının konsol kiriş titreşim deneyi ile elde edilmesinde numune uzunluğunun neticelere etkisi incelenmiştir. Öncelikle basit bir deney düzeneği kurularak imal edilen konsol kiriş numuneleri üzerinde çok sayıda titreşim deneyi yapılmıştır. Elde edilen deney neticeleri kayma deformasyonlu kiriş elemanları kullanılarak yapılmış bir sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş olan sayısal neticeler ile mukayese edilmiştir. Elde edilen neticeler ve gözlemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

i. Deneysel ve sayısal neticelerin $L=550$ mm uzunluktaki numuneler için $L=500$ mm uzunluktaki numunelere kıyasla genel olarak daha uyumlu olduğu söylenebilir.

ii. Her iki L değeri için de temel frekans için hata oranları düşüktür. Ayrıca, artan numune uzunluğu ile sönüm oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

iii. Galvanizli sac dış yüzü sandviç kiriş eğilme ve kayma rijitlikleri için sayısal modelde kullanılmış olan değerler deney neticeleri ile doğrulanmıştır.

iv. Düşük maliyetli MEMS tipi dijital ivmeölçerler ile basit titreşim deneylerinin yapılabileceği gösterilmiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılmış olan ivmeölçer ile örnekleme frekansını 912 Hz'den daha fazla yükseltmek mümkün olamamıştır. Bu sebeple, deneysel çalışmada daha kısa kiriş numuneleri için kayda değer netice elde edilememiştir. İleride yapılacak çalışmalarda örnekleme frekansı daha yüksek bir ivmeölçer kullanılması planlanmaktadır.

v. Bu çalışmada elde edilen en önemli netice ileride yapılacak çalışmalarda daha hassas bir mesnetleme düzeneği geliştirilmesi gerektiğinin anlaşılmış olmasıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar Pakmetal A.Ş.'den Harun TAYLAN Bey'e deney düzeneklerinin kurulmasında yardımları sebebiyle şükranlarını sunarlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] ASTM E1876-15, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).
- [2] ASTM E756-05, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
- [3] Hyer, M. W., Anderson, W. J., & Scott, R. A. Non-linear vibrations of three-layer beams with viscoelastic cores, II: Experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 61(1), 25-30, (1978).
- [4] Sokolinsky, V. S., Von Bremen, H. F., Lavoie, J. A., & Nutt, S. R. Analytical and experimental study of free vibration response of soft-core sandwich beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 6(3), 239-261, (2004).
- [5] Rizos P.F., Aspragathos N., Dimarogonas A.D. Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, 138(3), 381-388, (1990).
- [6] Baba, B. O., & Thoppul, S. Experimental evaluation of the vibration behavior of flat and curved sandwich composite beams with face/core debond. *Composite Structures*, 91(1), 110-119, (2009).

- [7] Baba, B. O., & Thoppul, S. An experimental investigation of free vibration response of curved sandwich beam with face/core debond. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(21), 3208-3218, (2010).
- [8] Albarbar, A., Badri, A., Sinha, J. K., & Starr, A. Performance evaluation of MEMS accelerometers. *Measurement*, 42(5), 790-795, (2009).
- [9] Varanis, M., Silva, A. L., Brunetto, P. H. A., Gregolin, R. F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(1), (2016).
- [10] Varanis, M., Silva, A. L., & Mereles, A. G. On mechanical vibration analysis of a multi degree of freedom system based on arduino and MEMS accelerometers. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(1), (2018.)
- [11] Hinton, E., & Owen, D. P. (1977). *Finite element programming*, New York: Academic Press.
- [12] Eaton, J. W., Bateman, D., Hauberg, S., Wehbring, R. (2007). *GNU Octave manual: A high-level interactive language for numerical computations*. Network Theory Ltd.
- [13] ASTM C393 / C393M-16, *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [14] Garrido, M., Correia, J. R., Branco, F. A., Keller, T. Creep behaviour of sandwich panels with rigid polyurethane foam core and glass-fibre reinforced polymer faces: Experimental tests and analytical modelling. *Journal of Composite Materials*, 48(18), 2237-2249, (2014).
- [15] Cooley, J. W., Lewis, P. A., & Welch, P. D. Historical notes on the fast Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1675-1677, (1967).
- [16] Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall.