

## Los Celulares como Herramientas de Ingeniería: Medición del Módulo de Elasticidad Dinámico en Materiales Metálicos

Santiago A. Szulczewski <sup>a, b</sup>, Carlos M. Rodriguez <sup>a, c</sup>, María de los R. Mattivi <sup>a, c</sup>, Rubén D. Ferreyra Gonzalez <sup>a, c</sup>, Victor A. Idsi <sup>a, b, c</sup>

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> Departamento de Física, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

<sup>c</sup> LABSE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: santiagoszulczewski@gmail.com.ar, carlos.rodriguez@fio.unam.edu.ar, maria.mattivi@fio.unam.edu.ar, ruben.ferreyra@fio.unam.edu.ar, victor.idsi@fio.unam.edu.ar

---

### Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad determinar el módulo de elasticidad dinámico en piezas metálicas de acero al carbono y aluminio utilizando el método de Excitación por Impulso. Para determinar la frecuencia de resonancia fundamental en el modo flexión se utilizaron aplicaciones de celular. A partir, del cálculo de la frecuencia de resonancia fundamental, la geometría de la probeta, la masa de la pieza y la norma estándar ASTM E1876-01 se realizó el cálculo del módulo de elasticidad dinámico. Los valores obtenidos se encuentran en el orden de los 210GPa para las probetas correspondientes a los aceros al carbono y de los 66GPa para las probetas de aluminio.

**Palabras Clave** – Frecuencia de resonancia, Módulo de Young Dinámico, Excitación por Impulso, Celulares como herramientas.

### 1 Introducción

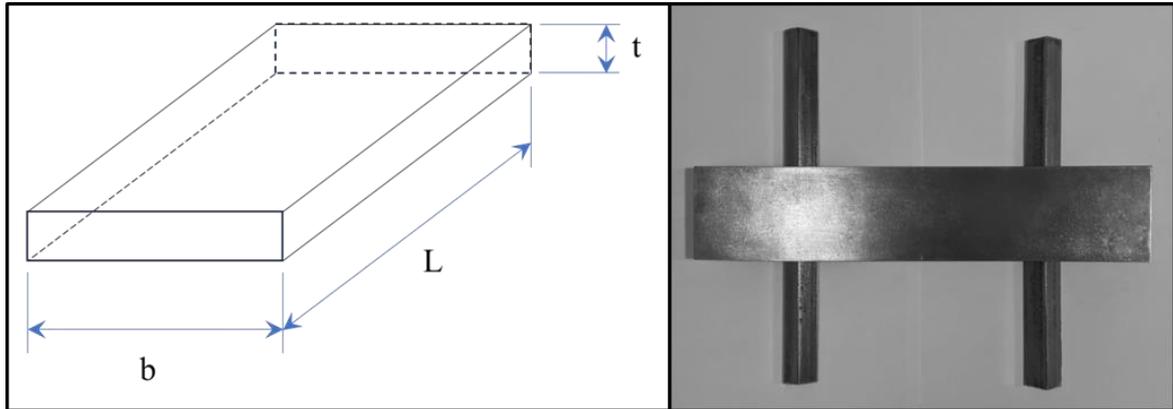
El módulo de Young dinámico es una propiedad mecánica de los materiales que describe su respuesta ante la aplicación de cargas cíclicas, es decir que este módulo evalúa como un material se deforma y recupera su forma cuando se somete a cargas que varían en el tiempo. Estos materiales poseen frecuencias de resonancia mecánicas específicas que vienen definidas por el módulo elástico, la masa y la geometría de la probeta [1].

Para determinar el módulo de Young dinámico se utiliza un ensayo no destructivo denominado Excitación por Impulso, aplicable en materiales elásticos a temperatura ambiente propuesto por [1, 2]. Esta técnica tiene una amplia gama de aplicaciones en diversos campos, como ser: ingeniería de materiales, acústica, biomedicina, entre otros [3-4].

El objetivo de este trabajo fue, mediante el uso de los celulares como herramienta de ingeniería, estimar el valor de la frecuencia de resonancia de probetas metálicas sometidas a flexión y así poder determinar el módulo de elasticidad dinámico [1-5] utilizando método Excitación por Impulso. Los ensayos se realizaron en materiales metálicos como son el acero al carbono y el aluminio.

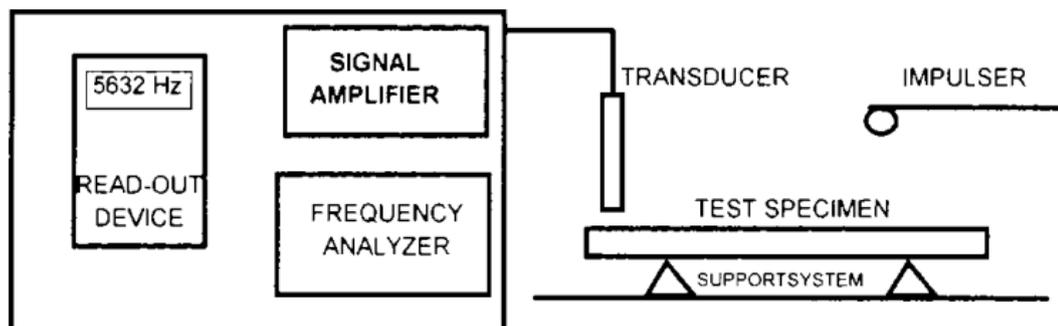
### 2 Materiales y métodos

Para realizar los ensayos se utilizaron materiales metálicos de sección rectangular como se puede observar en el esquema de la Figura N°1, donde se indican el ancho “b”, la longitud “L” y el espesor “t”. A la derecha de la Figura N°1 se muestra una probeta apoyada sobre los soportes.



**Fig. 1. Probetas metálicas y sus dimensiones principales.**

La técnica de Excitación por Impulso se mide con un sistema como el que se representa esquemáticamente en la Figura 2, según lo establecido en [1].



**Fig. 2. Representación esquemática del sistema de Excitación por Impulso.**

En la práctica el sistema de Excitación por Impulso consta de las siguientes partes:

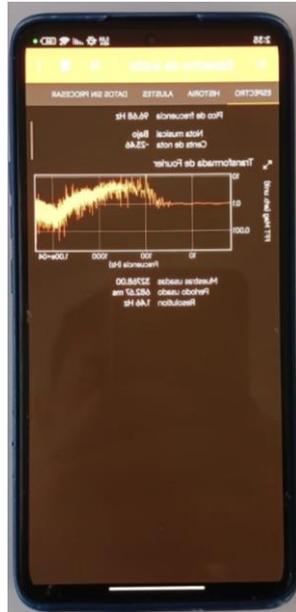
1) *Celular*: es que reemplaza al transductor y sirve para determinar la frecuencia de resonancia fundamental en el modo flexión. Para esto se utiliza el micrófono del celular. En la Figura 3 se presenta el celular que se utilizó. La aplicación que se utilizó para realizar las mediciones se llama Phyphox “Phisical phone experiments”.

2) *Impulsor*: es una varilla de metal con una bola de rulemán en la punta, los golpes realizados con este instrumento deben ser lo suficientemente leves como para no generar deformación plástica en la probeta. En la Figura 4 se presenta el impulsor.

3) *Probeta o muestra*: es un material elástico metálico, que debe ser pulido previamente para evitar la mayor cantidad de defectos sobre todo en la región de impacto del impulsor.

4) *Soportes*: Se utilizaron dos piezas metálicas sobre una superficie de goma para evitar vibraciones indeseadas que pudieran afectar a la medición.

En la Figura 5 se presenta una probeta de acero apoyada sobre los soportes metálicos.



**Fig. 3. Celular Marca: Xiaomi, Modelo 12T.**



**Fig. 4. Impulsor.**



**Fig. 5. Probeta de acero sobre soportes metálicos.**

La técnica utilizada para la medición de la frecuencia de resonancia fundamental de una muestra metálica sometida a flexión se presenta en la Figura 6. En la misma se puede observar que la posición de los apoyos se encuentra a una distancia de  $0,224L$  de los extremos de la probeta. Además, en la Figura 7 se puede observar las dos variantes que presenta la norma [1] para la medición de la frecuencia de resonancia fundamental, tanto dentro como fuera del plano de flexión de la probeta.

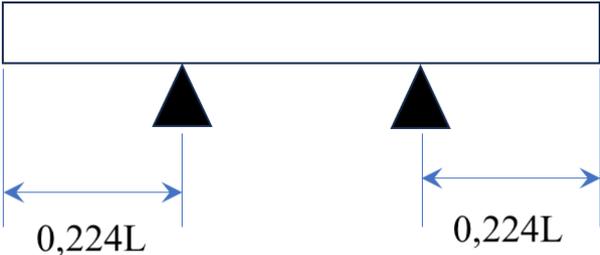


Fig. 6. Posición de los soportes en la probeta.

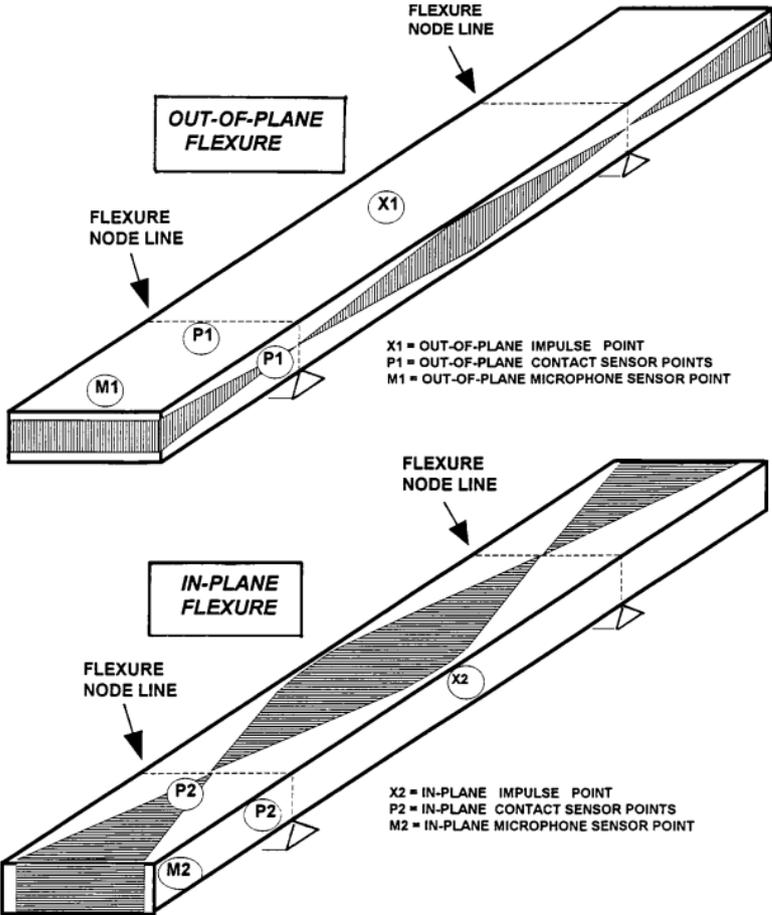


Fig. 7. Barras rectangulares ensayadas dentro y fuera del plano de flexión [1].

Para el cálculo del módulo de elasticidad se utilizó la ecuación (1) propuestas en [1], donde se observa un factor  $T_1$  que depende de la relación entre la longitud y el espesor de las probetas ( $L/t$ ). Si

$L/t > 20$  (que es lo que pasa en todos nuestros ensayos) la ecuación correspondiente al factor de corrección se reduce a la ecuación (2).

$$E = 0,9465 \left( \frac{m \cdot f_f^2}{b} \right) \cdot \left( \frac{L^3}{t^3} \right) \cdot T_1 \quad (1)$$

$E \rightarrow$  Módulo de Elasticidad Dinámico [Pa].

$m \rightarrow$  Masa de la probeta [g].

$b \rightarrow$  Ancho de la probeta [mm].

$L \rightarrow$  Longitud de la probeta [mm].

$t \rightarrow$  espesor de la probeta [mm].

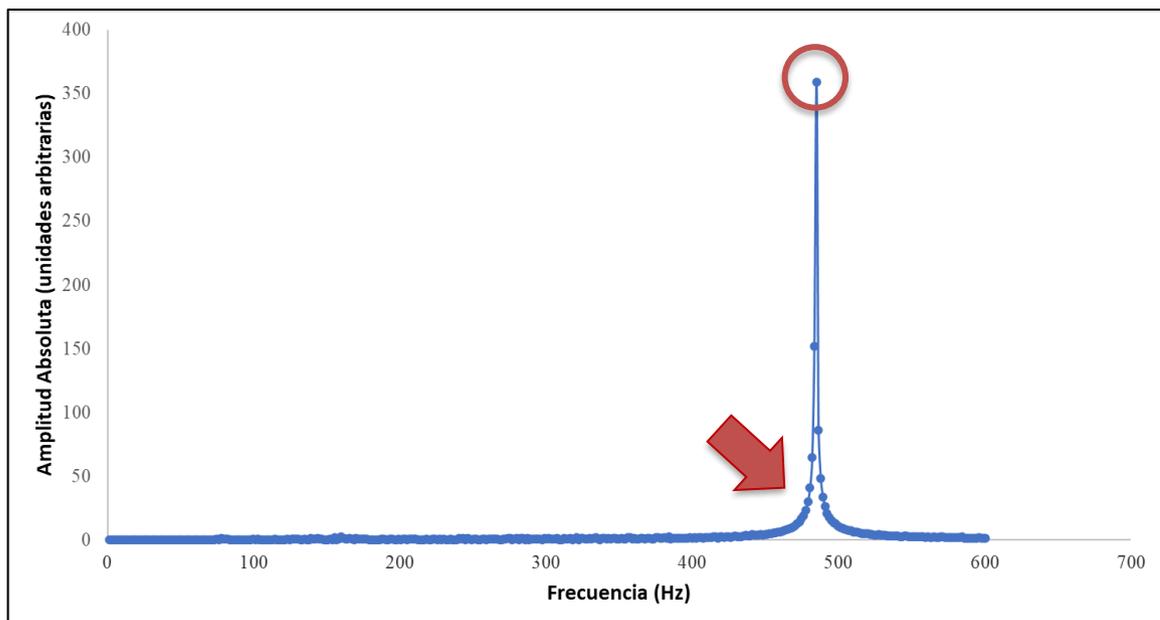
$f_f \rightarrow$  Frecuencia de resonancia fundamental de la probeta en flexión [Hz].

$T_1 \rightarrow$  Factor de corrección para el modo flexión fundamental.

$$T_1 = 1000 + 6,585 \cdot \left( \frac{t}{L} \right)^2 \quad (2)$$

Se realizó el acondicionamiento de la superficie de las probetas (pulido) y se midió el ancho “b”, el largo “L”, el espesor “t” en varios puntos y se determinó un promedio. Además, para determinar la masa se utilizó una balanza digital Marca: SF-400.

La frecuencia de resonancia fundamental de una barra sometida a flexión, se define como la frecuencia de resonancia más baja en un modo de vibración dado, en este caso flexión. Para cada valor de frecuencia utilizado se realizaron 5 mediciones y se tomó el promedio. En la Figura 8 se puede observar un gráfico donde se indica la frecuencia en Hertz en el eje de abscisas y en el eje de las ordenadas la amplitud absoluta en unidades arbitrarias. Sobre el eje de abscisas con una flecha de color rojo se indica la frecuencia de resonancia fundamental en el modo flexión dado en Hertz.



**Fig. 8. Gráfico de frecuencia en función de la amplitud absoluta.**

### 3 Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos: donde se puede ver el tipo de material (columna 1), la geometría de la probeta (columnas 2 a 5), masa de la probeta (columna 6), factor de corrección (columna 7), frecuencia de resonancia fundamental en modo flexión (columna 8) y módulo de elasticidad dinámico (columna 9).

**Tabla 1** – Cálculo de las probetas

Probetas								
Probeta	Ancho “b” (m)	Longitud “L” (m)	Espesor (t) (m)	L/t	Masa “m” (kg)	Factor de corrección “T <sub>1</sub> ”	Frecuencia de resonancia “f <sub>r</sub> ” (Hz)	Módulo de Elasticidad Dinámico “E” (Pa)
Acero al carbono	0,047	0,223	0,0045	49,05	0,375	1,0027	485,6	211,2x10 <sup>9</sup>
Acero al carbono	0,091	0,224	0,0045	49,21	0,7316	1,0027	482,4	206,7 x10 <sup>9</sup>
Aluminio	0,05	0,227	0,0029	78,39	0,088	1,0011	293,7	66,18x10 <sup>9</sup>
Aluminio	0,05	0,189	0,0079	23,79	0,204	1,0116	1123,5	66,14x10 <sup>9</sup>

La determinación de la frecuencia de resonancia fundamental en el modo flexión presenta una buena repetibilidad, además se puede mencionar que el valor del módulo de elasticidad dinámico se encuentra en el orden de magnitud encontrado en la bibliografía de referencia [2, 6-], para materiales de características similares.

### 4 Conclusión y trabajo a futuro

El objetivo principal del trabajo era desarrollar el método de Excitación por Impulso en materiales metálicos utilizando el celular como herramienta para medir la frecuencia de resonancia fundamental en el modo flexión. Los resultados fueron alentadores para que el próximo paso sea la medición de la estimación de los módulos de corte “G”, coeficiente de Poisson “ν” y caracterización de diferentes materiales.

### Referencias

- [1] Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM E1876, 2001.
- [2] T. Húlan, F. Obert, J. Ondruska, I. Stubna, A. Trník, “The Sonic Resonance Method and the Impulse Excitation Technique: A Comparison Study” *Appl. Sci.* 2021, 11, 10802. <https://doi.org/10.3390/app112210802>.
- [3] N. Massara, E. Boccaleri, M. Milanesio, M. Lopresti, “Impulse excitation data set collected on different materials for data análisis methods and quality control procedures development.” *Data in Brief* 39 (2021) 107503.
- [4] H. Nguyen, “Calculation of bending and shear modulus of thin plate by vibration análisis.” *Degree tesis Arcada, Materials Processing Technology*.
- [5] S. Tognana, S. Montecinos, W. Salgueiro, “Medición del módulo de Young en metales mediante la técnica de

excitación por impulso.” *Revista Materia artículo e-12115 (2018) ISSN 1517-7076*.

- [6] M. Radovic, E. Lara-Curzio, L. Riester. “Comparison of different experimental techniques for determination of elastic properties of solids” *Materials Science and Engineering A368 (2004) 56–70*.
- [7] A. Wolfenden, M. Harmouche, G. Blessing, Y. Chen, P. Terranova, V. Dayal, V. Kinra, J. Lemmens, R. Phillips, J. Smith, P. Mahmoodi, R. Wann. “Dynamic Young’s Modulus Measurements in Metallic Materials: Results of an Interlaboratory Testing Program” *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 17, No. 1, Jan. 1989, pp. 2-13*.
- [8] T. Voiconi, E. Linul, L. Marsavina, J. Kovacik, “Determination of Elastic and Damping Properties for Closed-Cell Aluminium Foams Using Impulse Excitation Technique.” *XIIIth Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, June 29th – July 2nd. 141-144*.