

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Obtención de parámetros y modelos mecánicos de materiales mediante métodos resonantes”

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

Autor/a:  
**Lucas Onrubia Fontangordo**

Tutor/es:  
**Jesús Alba Fernández**  
**Romina Del Rey Tormos**

**GANDIA, 2020**

## **RESUMEN**

Este Trabajo de Fin de Máster se inscribe tanto en el ámbito de la ingeniería mecánica como de la acústica: tiene como finalidad la obtención de una serie de parámetros mecánicos fundamentales -como el módulo elástico, la rigidez o el factor de pérdidas- de los cuales nos serviremos para el posterior cálculo de magnitudes de acústica de la edificación como lo son las pérdidas por transmisión y el valor global del índice para la reducción del ruido aéreo. Para ello, se necesitará implementar una configuración experimental de laboratorio que nos permitirá la obtención de todas las propiedades anteriormente mencionadas mediante el método resonante. Con la ayuda de dicho método podremos calcular la frecuencia resonancia de los materiales a medir y deducir la mayoría de las propiedades mecánicas a partir de esa base. Disponemos de una serie de bio-composites que caracterizaremos utilizando nuestra plataforma y discutiremos los resultados obtenidos. También se discutirá la validación de la misma comparando medidas obtenidas mediante su uso y medidas obtenidas mediante ensayo normativo.

### **Palabras clave:**

Parámetros Mecánicos; Módulo de Young; Factor de Pérdidas; Bio-Composites; Aislamiento Acústico

## **ABSTRACT**

This Master's Thesis takes part in both the mechanical and acoustics engineering world: the purpose of this investigation is to obtain a series of fundamental mechanical parameters -such as elastic modulus, stiffness or loss factor- which we will use for the subsequent calculation of important magnitudes used in building acoustics, such as transmission loss and the global value of the index for the reduction of airborne noise. For this, it will be necessary to implement an experimental laboratory configuration that will allow us to obtain all the aforementioned material properties by means of the resonant method. With the help of this method we will be able to calculate the resonance frequency of the materials to be measured and deduce most of the mechanical properties from that basis. We will characterize a series of bio-composites using our platform and we will discuss the results obtained. The validation of the results obtained via the platform will also be discussed by comparing measurements obtained through its use and measurements obtained through normative testing.

### **Keywords:**

Mechanical Parameters; Young's Modulus; Loss Factor; Bio-Composites; Sound Insulation

## Agradecimientos

Me gustaría agradecer, primero y de la mas especial de las formas a mis padres por todo el apoyo que me han brindado tanto durante la realización de este Trabajo de Fin de Máster como a lo largo de toda mi carrera universitaria y máster, ya que sin ellos no habría podido seguir adelante en situaciones en las que me he visto necesitado de su ayuda y apoyo. Asimismo, me habría sido imposible realizar este trabajo sin la ayuda de mis tutores Jesús Alba y Romina Del Rey y les estoy agradecido por haber mostrado su interés en este proyecto y haberme dado la posibilidad de realizarlo. También agradezco la ayuda y paciencia de aquellos que están en el laboratorio trabajando y me han ayudado y hecho reír, en especial a Juan Carlos y Gema. También agradecer a Enrique la ayuda prestada con las herramientas para la realización de la plataforma. Y, en último lugar, dar las gracias a mis compañeros de promoción del máster; que, a pesar de haber sido un año difícil y con una parte de docencia online imprevista por la pandemia del CoViD-19 siempre han estado ahí para apoyarnos mutuamente.

¡Gracias a todos!

Lucas Onrubia Fontangordo

## Índice

<b>1. Introducción, justificación y objetivos.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Conceptos.....</b>	<b>4</b>
2.1. Propiedades mecánicas.....	4
2.2. El método resonante.....	7
<b>3. Desarrollo.....</b>	<b>11</b>
3.1. Plataforma experimental.....	11
3.2. Materiales.....	27
<b>4. Resultados.....</b>	<b>29</b>
4.1. Suavizado de datos.....	29
4.2. Resultados para el Ácido Poliláctico (PLA).....	32
4.2.1. PLA: Rigidez.....	32
4.2.2. PLA: Módulo de Young.....	33
4.2.3. PLA: Loss Factor.....	34
4.2.4. PLA: Rigidez a la flexión.....	35
4.3. Resultados para el Bio-Polietileno (Bio-PE).....	36
4.3.1. Bio-PE: Rigidez.....	36
4.3.2. Bio-PE: Módulo de Young.....	37
4.3.3. Bio-PE: Loss Factor.....	38
4.3.4. Bio-PE: Rigidez a la flexión.....	39
4.4. Comentarios a los resultados obtenidos.....	40
4.5. Validación de la plataforma.....	43
4.6. Error Asociado.....	46
4.6.1. Error asociado a la rigidez.....	46
4.6.2. Error asociado al módulo de Young.....	47
4.7. Modelado acústico.....	50
4.7.1. Pérdidas por transmisión.....	50
4.7.2. Predicción de aislamiento acústico.....	53
<b>5. Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>55</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>58</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>60</b>
7.1. Código en MATLAB® para la obtención de los parámetros mecánicos.....	60
7.2. Hojas de características del equipo utilizado.....	69
7.3. Planos y renders de la plataforma experimental.....	74

## 1. Introducción, justificación y objetivos

El presente trabajo se presenta para su evaluación como Trabajo Final de Máster (TFM) para la titulación del Máster Universitario en Ingeniería Acústica que se imparte en la Universidad Politécnica de Valencia (Campus de Gandía). En el mismo se profundiza en un aspecto de gran importancia en la titulación y que se aborda en diferentes materias del plan de estudios: la caracterización de materiales y dispositivos acústicos. De alguna forma, en este trabajo se plasma el potencial de lo aprendido en la titulación.

Como todo problema relacionado con la acústica, todo comienza con el ruido. Es una idea compartida por todo el mundo que el problema que suponen el ruido y la contaminación acústica es de gran relevancia en una sociedad cada día más afectada por estos fenómenos. El excesivo ruido que generan los vehículos, las instalaciones industriales, las actividades aeroportuarias, puede tener efectos negativos en la vida de las personas. Estos efectos pueden ser tanto físicos (pérdida de audición, ruptura de tímpano) como psicológicos (molestias generalizadas, interrupción del sueño, desórdenes mentales, ansiedad y estrés) y sociológicos (el ruido excesivo reduce la sensación de privacidad, puede interferir con el desempeño de tareas complicadas y, por supuesto, puede alterar especialmente el desempeño cuando se requiere comunicación de voz o respuesta a señales auditivas). Estos hechos están bien documentados desde hace tiempo (J. Miller, 1974). El problema de la reducción del nivel de ruido puede afrontarse con técnicas pasivas, con materiales o dispositivos que absorben o atenúan la perturbación, o activas, añadiendo una señal que combinada con el ruido produzca como resultado un nivel inferior. En cualquier caso, siempre es necesario realizar predicciones en base a modelos que, necesariamente, tienen como datos de entrada las características del material o del dispositivo. En este mismo sentido, el trabajo que se propone realizar sirve para obtener algunas de las características o propiedades más importantes en un material a la hora de evaluar su practicidad como aislante de ruidos o vibraciones (parámetros elásticos como el módulo de Young o el factor de pérdidas) así como la deducción de dichas propiedades aislantes a partir de sus propiedades mecánicas. También, en el ámbito de la ingeniería estructural y civil es de vital importancia conocer y poder obtener propiedades -que se podrán obtener utilizando el método resonante y la plataforma que se propondrá para dar solución a este TFM- como el módulo de Young o la rigidez, cuya utilidad es máxima a la hora de poder evaluar la resistencia a esfuerzos, tracciones y compresiones de cualquier estructura.

En la actualidad, muchas de estas propiedades se pueden medir y cuantificar mediante ensayos de laboratorio estandarizados como por ejemplo la norma ASTM C469 (ASTM C469 / C469M – 14) para hormigones y cementos o la norma ASTM D638 (ASTM D638 – 14) para plásticos. Estos ensayos son destructivos, por lo que las muestras a ensayar deben destruirse para obtener sus propiedades mecánicas, además se debe tener en cuenta que el equipo necesario para realizar dichos *tests* es especial, costoso y en muchas ocasiones grande, por lo que no todos los laboratorios de medida pueden permitirse su utilización. En este trabajo final de máster se propone implementar una configuración experimental de relativa sencillez con el fin de obtener las propiedades mecánicas de materiales rígidos sin recurrir a métodos destructivos y con unos resultados que puedan compararse a los que proporcionan los ensayos normalizados. También, mediante el uso de programas y modelos analíticos específicamente diseñados al efecto, se podrán convertir las propiedades mecánicas en valores de aislamiento acústico.

En cuanto a los materiales que se van a caracterizar en este proyecto, se trata de bio-composites a base de Ácido Poliláctico (PLA) y Polietileno (PE). El uso de este tipo de materiales en acústica de la edificación es algo muy positivo ya que dejan una huella de carbono menor a los materiales tradicionales, son muy reciclables; esto deja la puerta abierta a un campo de investigación realmente amplio sobre la caracterización y utilización de este tipo de materiales en aislamiento acústico de la edificación.

Los objetivos de este trabajo final de máster son:

- Conocer algunas de las propiedades mecánicas mas importantes de los materiales en relación con este trabajo.
- Descubrir el método resonante, del cual nos serviremos para caracterizar los materiales
- Proponer una plataforma experimental mediante la cual, utilizando el método resonante obtendremos las propiedades mecánicas de los materiales a medir.
- Implementar el *software* necesario para hacer que nuestra plataforma funcione correctamente
- Realizar medidas de parámetros mecánicos de bio-composites
- Comparar algunas medidas con datos de otros artículos con el fin de verificar la usabilidad de nuestra plataforma
- Realizar predicciones de aislamiento acústico con los datos obtenidos con el fin de evaluar la utilidad de los materiales medidos como aislantes acústicos

Para el desarrollo de este trabajo final de máster, primero se realizará una breve, pero concisa introducción teórica sobre las propiedades que estamos interesados en obtener (Rigidez, Módulo de Young y *Loss Factor*) así como la base teórica sobre el método resonante. En el siguiente capítulo se definirá en detalle una configuración experimental que nos permitirá obtener dichas propiedades mecánicas. Más adelante, en la fase experimental, pondremos a prueba nuestra plataforma caracterizando una serie de bio-composites y mostrando los resultados obtenidos; para mas adelante validar las medidas realizadas mediante la comparación con otros métodos de medida estandarizados. Finalmente realizaremos el modelado mecánico de las muestras con la ayuda de los parámetros obtenidos para evaluar acústicamente su rendimiento como materiales reductores de ruido. Finalmente, para terminar, realizaremos una conclusión donde valoraremos hasta que punto se han alcanzado los objetivos propuestos y si existen líneas futuras donde poder seguir desarrollando este proyecto.



## 2. Conceptos

Durante este capítulo se tratará de explicar en que consisten mecánicas de los materiales así como una pequeña introducción teórica sobre el método resonante para la obtención de algunas de dichas propiedades mecánicas.

### 2.1. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de un material son una serie de magnitudes que nos permiten caracterizar prácticamente por completo el comportamiento de dicho material. Cuando un determinado material está sometido a una fuerza (como por ejemplo una tensión), gracias al conocimiento de sus propiedades mecánicas podemos predecir, entre otras cosas, hasta que punto ese material resistirá esa tensión, o cuanto se deformará por haber sido sometido a la misma. Las propiedades mecánicas permiten conocer en profundidad el comportamiento elástico de los materiales y son de especial utilidad en campos de la ciencia tan importantes como la ingeniería civil y de estructuras, el aislamiento y acondicionamiento acústico de recintos o edificaciones, la ingeniería de materiales o la medicina.

En el caso que concierne a este trabajo, las propiedades mecánicas fundamentales que se van a estudiar son las siguientes:

- La rigidez ( $k$ )
- El Módulo de Young o Módulo Elástico ( $E$ )
- El *Loss Factor* o factor de pérdidas ( $\eta$ )

Explicuemos brevemente que representa cada una de estas propiedades mecánicas:

Se entiende como la rigidez de un material su capacidad o medida para resistir la deformación en respuesta a una fuerza aplicada sobre la misma.

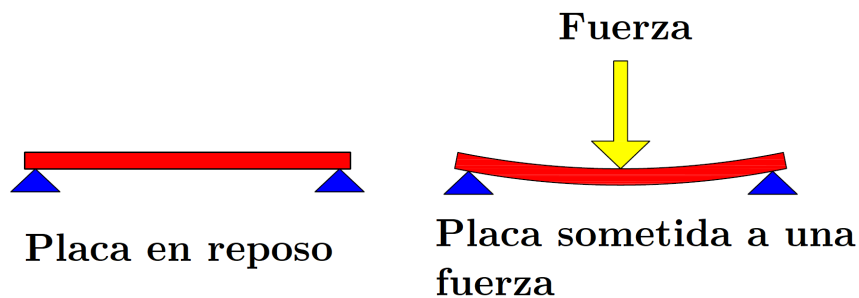


Figura 01: Deformación de una placa al ser sometida a una fuerza

Es importante distinguir la rigidez, que es una medida de la carga necesaria para inducir una determinada deformación en el material, de la resistencia, que generalmente se refiere a la resistencia del material a fallar por fractura o deformación excesiva. La rigidez generalmente se mide aplicando cargas relativamente pequeñas, muy por debajo de la zona de fractura del material, y midiendo la deformación resultante. Dado que las deformaciones en la mayoría de los materiales son muy pequeñas para estas condiciones de carga, la dificultad práctica consiste principalmente en medir con precisión los pequeños cambios de dimensión de la muestra bajo estudio. Robert Hooke realizó varias de estas medidas en cables largos bajo diversas cargas y observó que, con una buena aproximación, la carga  $P$  y su deformación resultante  $\delta$  estaban relacionadas linealmente siempre que las cargas fueran suficientemente pequeñas. Esta relación, generalmente conocida como Ley de Hooke, se puede escribir algebraicamente como

$$P = k\delta, \text{ donde:} \tag{2.1.1}$$

$k$  es una constante de proporcionalidad llamada rigidez y tiene unidades de Newton por metro ( $N/m$ ) en el sistema internacional. La rigidez definida por  $k$  no es una función solo del material, sino que también está influenciada por la forma de la muestra bajo estudio. Una forma útil de ajustar la rigidez para que sea una propiedad del material y que no dependa de la forma es normalizar la carga por el área de la sección transversal; es decir, utilizar la tensión de tracción en lugar de la carga. Además, la deformación  $\delta$  se puede normalizar observando que una carga aplicada deforma todas las partes de la muestra de manera uniforme, de modo que una medida razonable de "estiramiento" es la deformación por unidad de longitud:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}, \tag{2.1.2}$$

Aquí  $L_0$  es la dimensión original de la muestra (su longitud, por ejemplo) y  $\varepsilon$  es una medida adimensional de estiramiento llamada deformación. Usando estas medidas más generales de carga por unidad de área y desplazamiento por unidad de longitud, la ley de Hooke se convierte en:

$$\frac{P}{A_0} = E \frac{\delta}{L_0} \tag{2.1.3}$$

O en otras palabras:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{2.1.4}$$

La constante de proporcionalidad  $E$ , llamada módulo de Young o módulo elástico, es una de las propiedades más importantes de los materiales. Se mide en Pascales ( $Pa$ ). Es una propiedad mecánica que mide la rigidez a la tracción de un material sólido. Cuantifica la relación entre la tensión de tracción ( $\sigma$ ) y la deformación axial en la región elástica lineal de un material y se determina mediante la fórmula :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1.5)$$

Un material sólido sufrirá una deformación elástica cuando se le aplique una pequeña carga en compresión o extensión. Es importante destacar que la deformación elástica es reversible (el material vuelve a su forma original después de que se retira la carga). En tensiones y deformaciones casi nulas, la curva tensión-deformación es lineal y la relación entre tensión y deformación se describe mediante la ley de Hooke, como hemos descrito anteriormente. Cuanto mayor sea el módulo de Young, más tensión se necesita para crear la misma cantidad de deformación; un cuerpo rígido ideal tendría un módulo de Young infinito. Por el contrario, un material muy blando, como un fluido, se deformaría sin fuerza y tendría un módulo de Young cero. No muchos materiales son lineales y elásticos más allá de una pequeña deformación.

Para ilustrar el concepto del módulo de Young se va a mostrar una curva de Tensión-Deformación ideal para un material cualquiera obtenida mediante un ensayo de tracción y se van a mostrar las diferentes regiones de dicha curva.

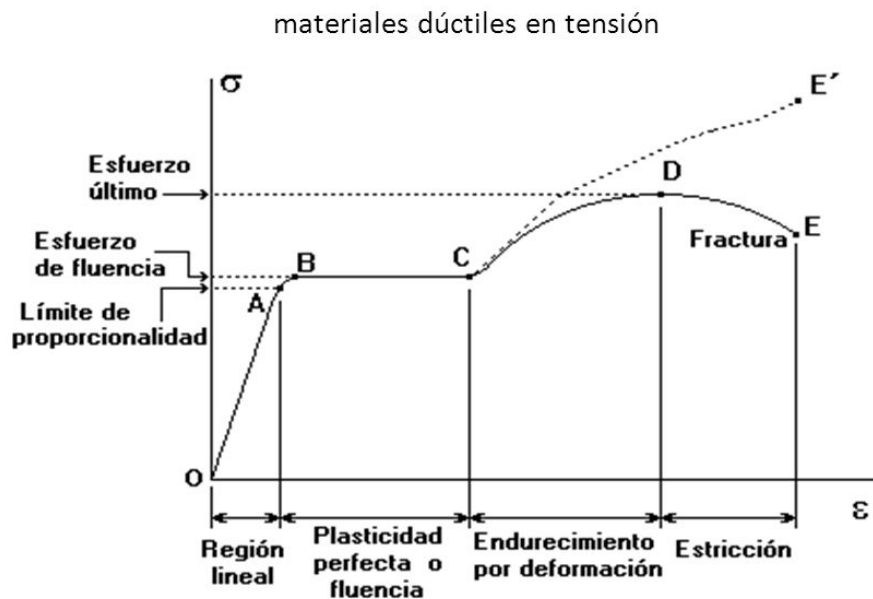


Figura 02: gráfica de tensión-deformación en ensayo de tracción

Es importante destacar que el módulo de Young se suele medir en la región lineal de la curva de tensión-deformación, y normalmente puede calcularse como la pendiente de la curva en la región lineal.

En este trabajo de fin de máster se obtendrán estas dos propiedades que se acaban de describir sin la utilización de las curvas de tensión-deformación ni de ensayos destructivos como veremos en el capítulo 3.

En cuanto al *loss factor* o factor de pérdidas ( $\eta$ ), se trata de una métrica de gran utilidad para evaluar las facultades de disipación de energía vibratoria en los materiales. Es una magnitud muy útil para comparar la capacidad de amortiguación de vibraciones en diferentes materiales. Hay que señalar que esta magnitud se utiliza para materiales con amortiguaciones relativamente ligeras. Es una magnitud adimensional que se calcula de forma práctica mediante la curva de respuesta en frecuencia vibratoria de un determinado material, como se verá en el siguiente apartado.

## 2.2. El método resonante

La finalidad de este trabajo final de máster es la obtención de parámetros mecánicos de materiales utilizando el método resonante. Por lo tanto, es de especial interés explicar la teoría que soporta de dicho método con el fin de comprenderlo.

Al montar una masa conocida sobre un material elástico, la combinación se comporta como un simple sistema masa-muelle de un solo grado de libertad:

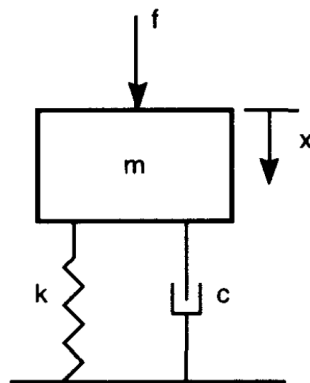


Figura 03: sistema masa-muelle

Como se puede observar, se trata de un sistema con una rigidez  $k$ , con una masa  $m$  fija al extremo y una compliancia o amortiguación  $c$  en posición paralela al muelle. La fuerza  $F_m$  que se necesita para hacer vibrar la masa  $m$  será

proporcional a la aceleración  $a$ . También, la fuerza necesaria para la deformación del muelle,  $F_k$ , será proporcional a la distancia  $x$  entre sus dos extremos. Finalmente la fuerza que se necesita para hacer entrar en vibración al amortiguador,  $F_c$ , será proporcional a la velocidad en sus dos extremos. En otras palabras:

$$F_m = m \cdot a \quad (2.2.1)$$

$$F_k = k \cdot x \quad (2.2.2)$$

$$F_c = c \cdot v \quad (2.2.3)$$

Si se asume una excitación de naturaleza sinusoidal, la aceleración, velocidad y desplazamiento se relacionan mediante:

$$a = j\omega v = -\omega^2 x \quad (2.2.4)$$

$$v = j\omega x = \left( \frac{1}{-j\omega} \right) a \quad (2.2.5)$$

$$x = \left( \frac{1}{j\omega} \right) v = \left( \frac{1}{-\omega^2} \right) a \quad (2.2.6)$$

Usando la segunda ley de Newton y la formulación del dominio del tiempo, obtenemos:

$$f(t) = m \cdot a(t) + c \cdot v(t) + k \cdot x(t), \text{ en otras palabras:} \quad (2.2.7)$$

$$f(t) = m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) \quad (2.2.8)$$

Usando el hecho de que la derivación corresponde a la multiplicación por  $j\omega$  en el dominio de la frecuencia, obtenemos la siguiente expresión para la función de respuesta de frecuencia (FRF), en este caso la compliancia del sistema:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot c + k} = \frac{1}{(k - m \cdot \omega^2) + j\omega \cdot c} \quad (2.2.9)$$

Lo que muestra que la FRF de la compliancia es igual al recíproco de la rigidez,  $k$ , a bajas frecuencias y que la FRF de la aceleración es igual al recíproco de la masa aplicada a altas frecuencias. A la frecuencia de resonancia,  $\omega_0$ , la parte real de la ecuación (2.2.9) se vuelve cero y el nivel está determinado exclusivamente por el mecanismo de amortiguación o compliancia,  $c$ . La frecuencia de resonancia viene dada por la raíz cuadrada de la relación entre rigidez y masa:

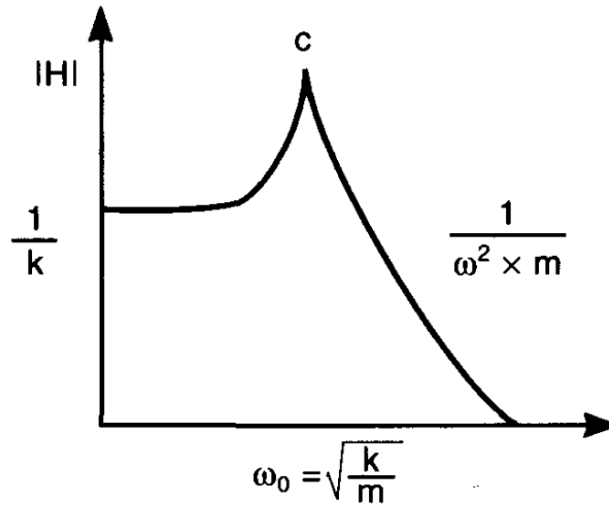


Figura 04: Representación gráfica de la FRF

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2.10)$$

Se puede demostrar que el loss factor o factor de pérdidas,  $\eta$ , una medida del amortiguamiento como hemos visto en el apartado 2.1, viene dado por la relación entre el ancho de banda a -3 dB,  $\Delta f$ , y la frecuencia de resonancia,  $f_0$

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2.2.11)$$

Se va a explicar brevemente como obtener el ancho de banda a -3 dB con una gráfica:

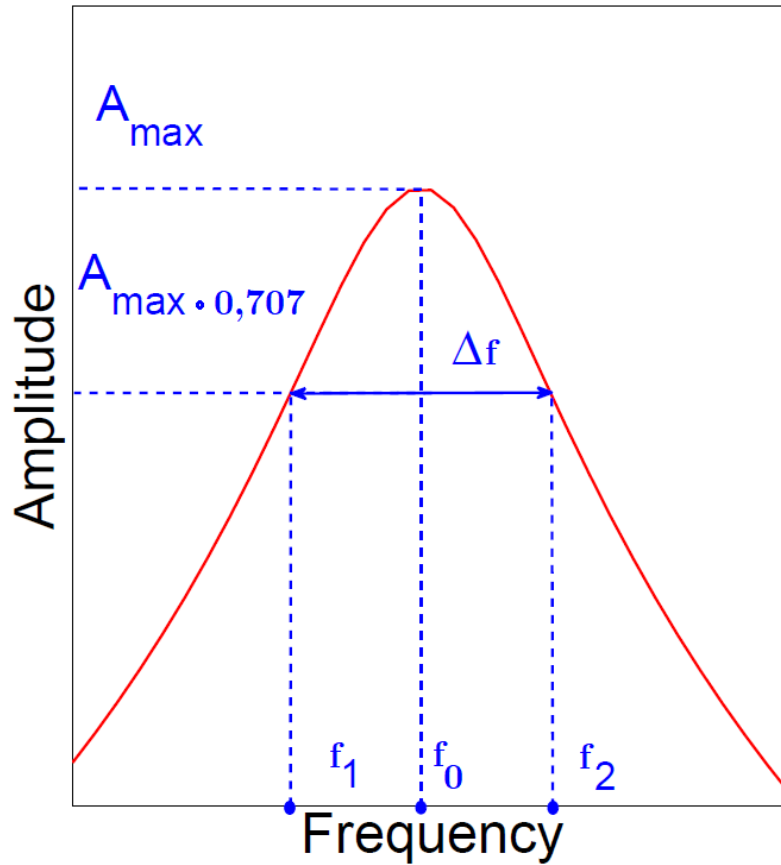


Figura 05: ejemplo de curva de respuesta en frecuencia, centrada alrededor de la frecuencia de resonancia

El ancho de banda a -3 dB se obtiene calculando los puntos de corte de la curva roja con la línea horizontal cuyo valor es 3 dB inferior al pico de la curva, es decir, 0.707 veces el valor de pico de la amplitud. Con los puntos de corte podemos saber a que frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  se producen, calculando  $\Delta f$  como:

$$\Delta f = |f_2 - f_1| \quad (2.2.12)$$

En el siguiente capítulo se explicará como se obtienen las propiedades mecánicas a partir de estos datos de FRF.

### 3. Desarrollo

En este capítulo, se discutirán los procedimientos necesarios para llevar a cabo la implementación de una plataforma experimental que permitirá obtener propiedades mecánicas de determinados materiales, así como algunos de los materiales que caracterizaremos mediante el uso de dicha plataforma.

#### 3.1. Plataforma experimental

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es la obtención de las propiedades mecánicas de materiales rígidos. Para ello, se necesita una configuración o montaje experimental del que nos serviremos para realizar las medidas necesarias para poder obtener dichas propiedades. La idea general de nuestra configuración experimental es como la que presenta Brüel & Kjaer en su Technical Preview N<sup>o</sup>2 de 1994 (Brüel & Kjaer, 1994); donde se utilizan vibraciones para caracterizar los materiales con la ayuda de un sensor de fuerza y un acelerómetro:

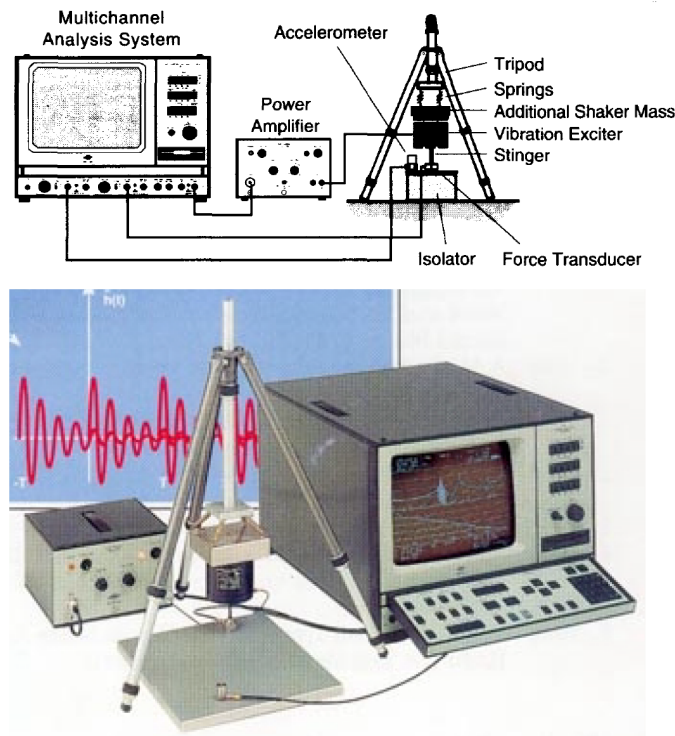


Figura 06: Antigua configuración experimental de B&K



Con la ayuda de este esquema, la fase de diseño de nuestra configuración experimental comienza. Para poder crear una configuración similar se necesita, al menos, una estructura de soporte, un excitador mecánico (o shaker), un soporte para la muestra que queremos caracterizar (o portamuestras), un sistema de adquisición de señales, un transductor de fuerza y otro de aceleración y finalmente un ordenador con software para procesado de datos. Teniendo en cuenta lo anterior, e inspirándonos en el diseño de Brüel & Kjaer, se propone a modo esquemático la siguiente configuración:

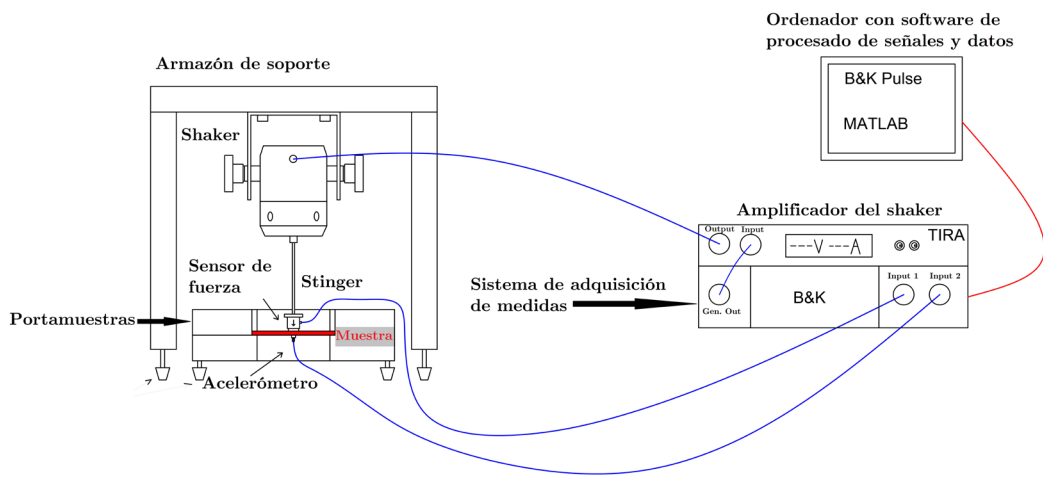


Figura 07: Propuesta de configuración para la obtención de propiedades mecánicas

El primer paso para la implementación de la configuración experimental es diseñar el armazón y el/los portamuestras, que dependerán del tipo de muestra que se quiera caracterizar. En el caso que nos concierne, se caracterizarán muestras de bio-composites, cuya forma es cilíndrica con 8 cm de diámetro y 4 mm de espesor. Al tratarse de muestras de sección circular importante idear un portamuestras que nos permita fijar la muestra únicamente por los extremos del diámetro exterior con tal de que pueda vibrar ajustándose a esas condiciones de contorno; esto es muy importante para poder definir ciertas ecuaciones que nos permitirán obtener algunas de las propiedades mecánicas de las muestras (como se verá mas adelante). La geometría básica de las muestras es la siguiente:

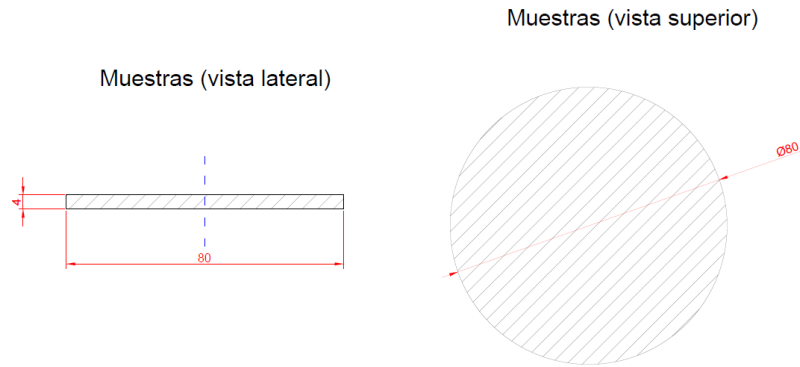


Figura 08: Medidas de las muestras (en milímetros)

Con las características geométricas de las muestras definidas, el diseño que se ha decidido hacer del portamuestras es el siguiente:

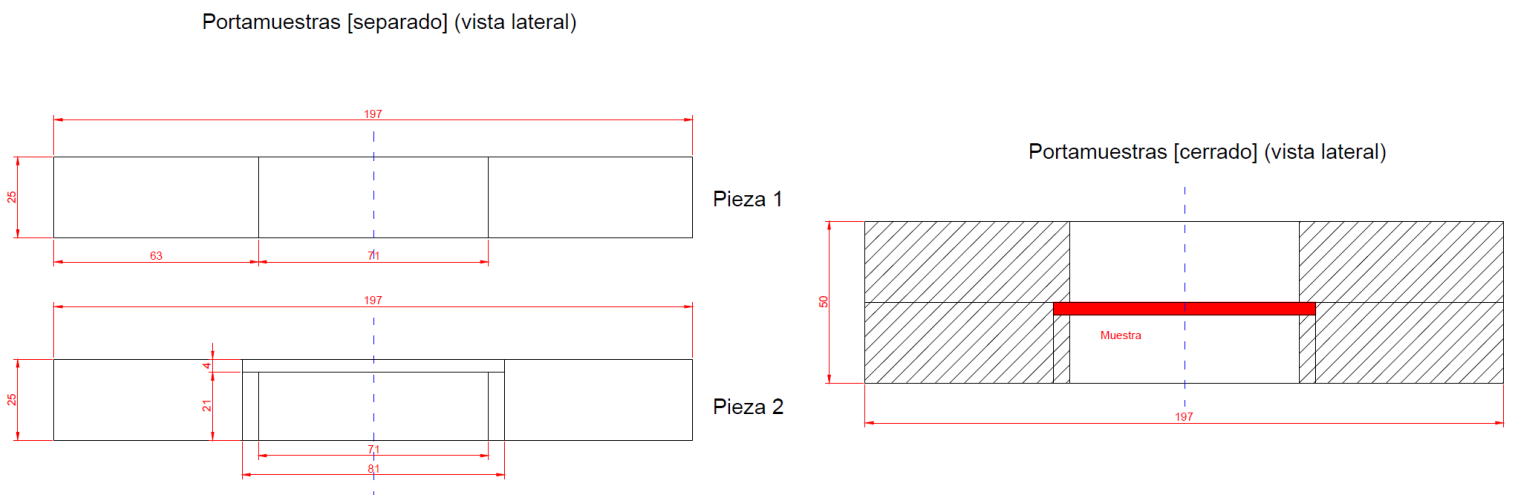


Figura 09: Diseño principal del portamuestras, vista lateral (dimensiones en mm)

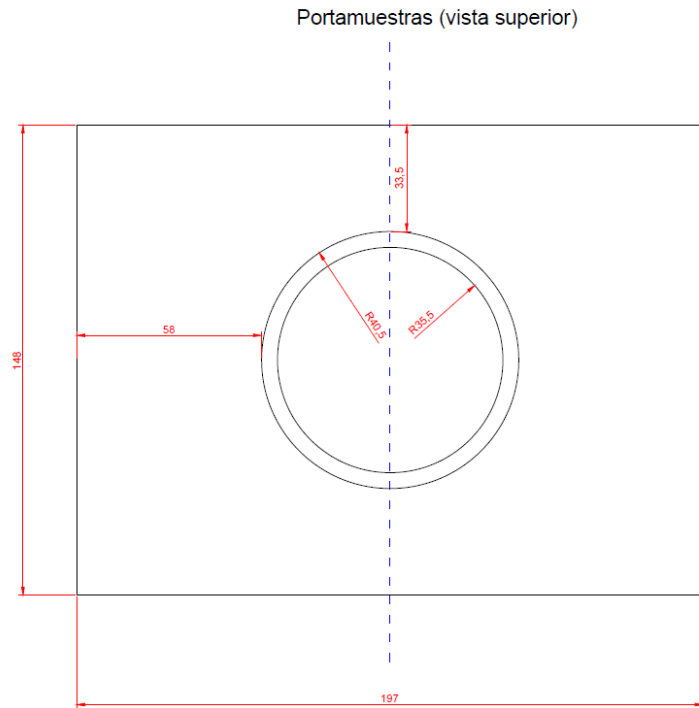


Figura 10: Diseño principal del portamuestras, vista superior (dim. en mm)

Este diseño de portamuestras permite fijar las muestras únicamente por la parte exterior del diámetro como si se tratase de un “sándwich”, dejando las caras superior e inferior de la misma expuestas, con la finalidad de pegar un acelerómetro en una cara y un sensor de fuerza unido al shaker en la otra. Se ha intentado minimizar todo lo posible el área de contacto entre la muestra y el portamuestras con el fin de que se maximice el área expuesta de la muestra por ambas caras del portamuestras, como se muestra en el siguiente esquema donde podemos ver cuanta cantidad de la muestra está bajo la influencia del portamuestras y cuanta no lo está:

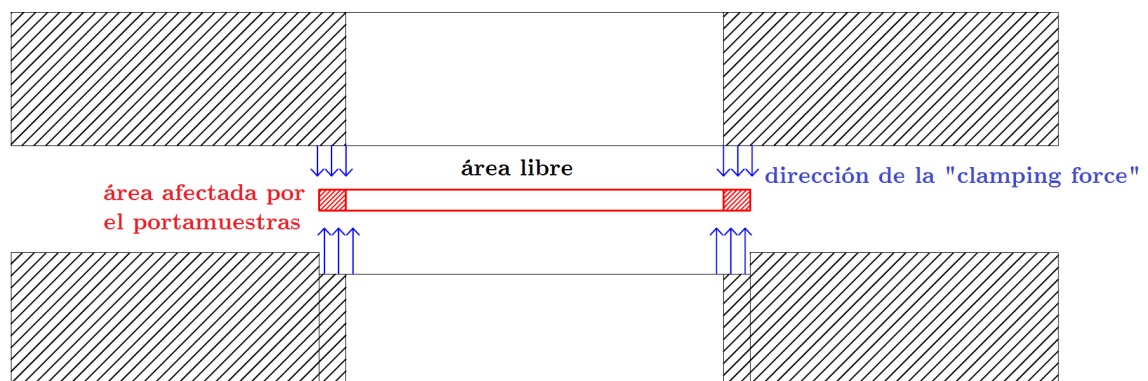


Figura 11: Detalle del portamuestras

En cuanto al material de fabricación del portamuestras, se ha elegido utilizar madera MDF por su disponibilidad inmediata en los materiales del laboratorio de acústica y su facilidad de mecanizado.

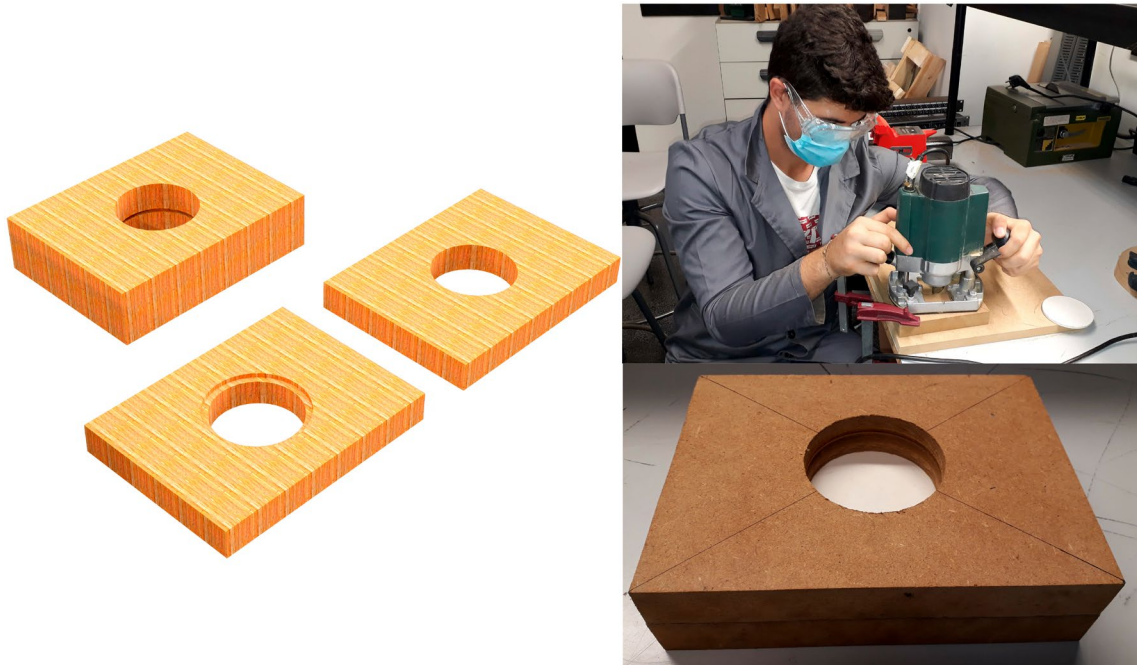


Figura 12: Render preliminar del portamuestras (Izq.) Proceso de mecanizado y resultado final (Der.)

Con el portamuestras ya terminado, procedemos a diseñar el armazón que sujetará el shaker. La forma del armazón ha de ser lo mas sencilla y sólida posible con el fin de proporcionar al shaker una base adecuada sobre la cual apoyarse. Asimismo es importante que el armazón esté desacoplado del medio sobre el cual esté puesto (por ejemplo, del suelo, o de la superficie de una mesa sobre la cual se apoya para realizar las medidas), mas adelante se explicará como se ha intentado realizar esto.

El armazón proyectado en fase de diseño tiene las siguientes características:

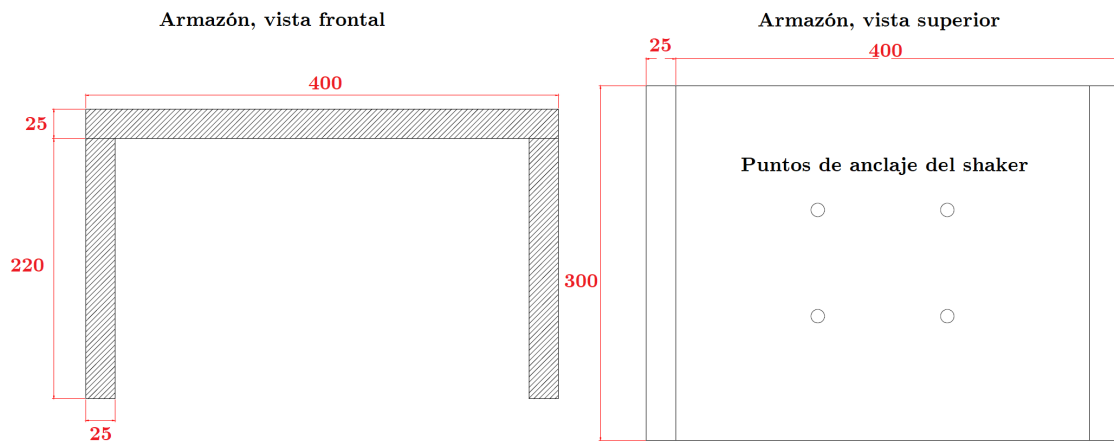


Figura 13: Diseño esquemático del armazón (dimensiones en milímetros)

El armazón tiene un diseño muy sencillo, en forma de mesa. Con el fin de reforzar el diseño en las uniones entre las tablas de MDF que lo componen además de utilizar cola para madera se utilizará tornillería para unir las piezas y así obtener un resultado final mas rígido y resistente.



Figura 14: Render de pre-producción (Izq.) y producto terminado (Der.)

Como se ha dicho anteriormente, es importante desacoplar la estructura del armazón del suelo o de la superficie sobre la cual esté apoyado con el fin de que no se propaguen vibraciones del suelo o de la superficie a la plataforma experimental. Al estar midiendo vibración es necesario que, de existir algún tipo de vibración externa a la que estamos generando para medir (como por ejemplo

la generada por los pasos de las personas que están en el edificio, o la que genera el tráfico de la carretera que está cerca de la universidad) esta influencia lo menos posible la medida que queremos realizar. Para ello se propone la utilización de un material anti-vibratorio y autoadhesivo que colocaremos en unas patas que enroscaremos en el armazón. Con la ayuda de esta solución reduciremos al máximo la influencia del entorno en nuestras medidas y además haremos que la plataforma sea ajustable en altura. Esta solución se aplicará también al portamuestras; este último también dispondrá de patitas ajustables en altura y con material reductor de vibraciones. Ahora se mostrará una imagen de la implementación de dicha solución en el armazón:

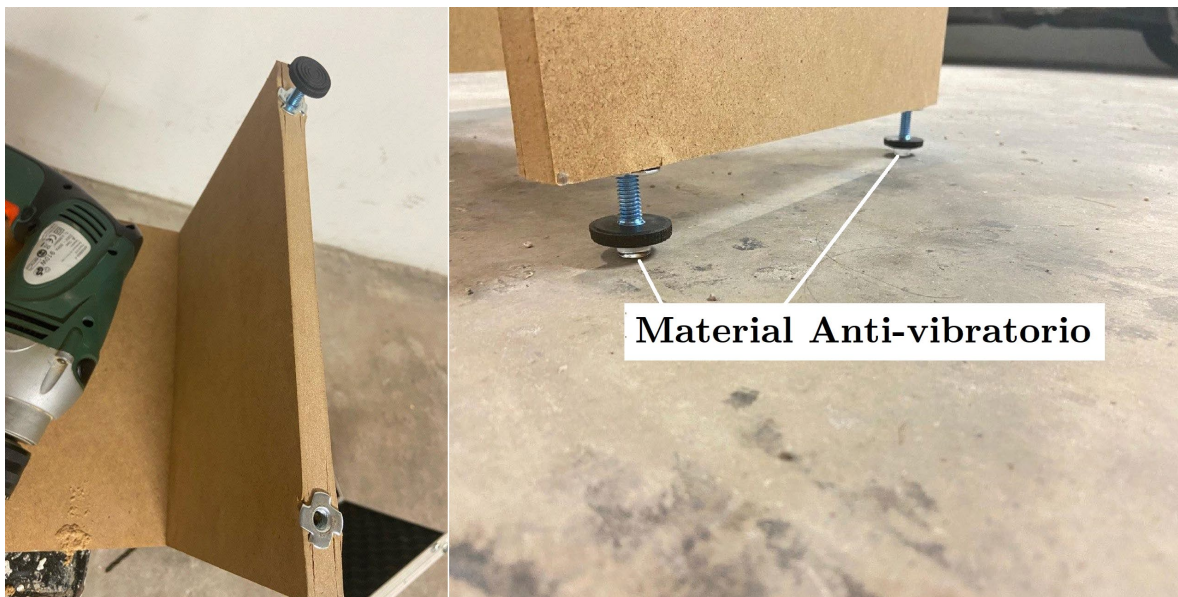


Figura 15: Detalle de las patas ajustables en altura (Izq.) y detalles de las patas con material anti-vibratorio (Der.)

Una vez instalado este último detalle se procederá a la instalación del shaker.

El Shaker no es mas que un excitador mecánico. Un transductor electro-mecánico que transforma una señal eléctrica en excitación mecánica en el eje vertical. El shaker del que disponemos en el laboratorio es un TIRA S 50009, cuya ficha completa de características podrá encontrarse en los documentos anexos que se encuentran al final de esta memoria; pero básicamente proporciona una excitación con máximo desplazamiento de 3 mm y de 9 N de fuerza máxima, con una respuesta frecuencial entre 2 y 20000 Hz.



Figura 16: Shaker TIRA S 50009

Para alimentar el shaker utilizaremos un amplificador TIRA BAA 60, pensado para trabajar con este tipo de shaker.



Figura 17: Amplificador TIRA BAA 60

Como se ve en la figura 07, vamos a necesitar un sensor de fuerza, que irá colocado en el extremo del shaker con el fin de poder cuantificar la fuerza ejercida por este mismo sobre la muestra en función de la frecuencia de excitación. El único sensor de fuerza del que disponemos en el laboratorio es un transductor ENDEVCO Isotron® 2311-100, que trabaja en un rango de -220 a +220 N, mas que suficiente para las fuerzas que queremos medir. Como se ha dicho anteriormente, todas las hojas de características de los equipos se presentarán en el apartado de ANEXOS que se encuentra al final de esta memoria.



Figura 18: transductor de fuerza ENDEVCO 2311-100

En cuanto al acelerómetro, se necesitará uno lo suficientemente pequeño y ligero como para que no afecte a las medidas. Se ha decidido utilizar un Brüel & Kjaer 4508-B-001 ya que es muy ligero (unos 4 gramos) y posee las características necesarias para realizar las medidas.



Figura 19: Acelerómetro B&K 4508

Con los componentes que hemos descrito hasta ahora y la plataforma experimental prácticamente terminada de montar, se va a mostrar la forma en la que queda con todos los componentes montados:

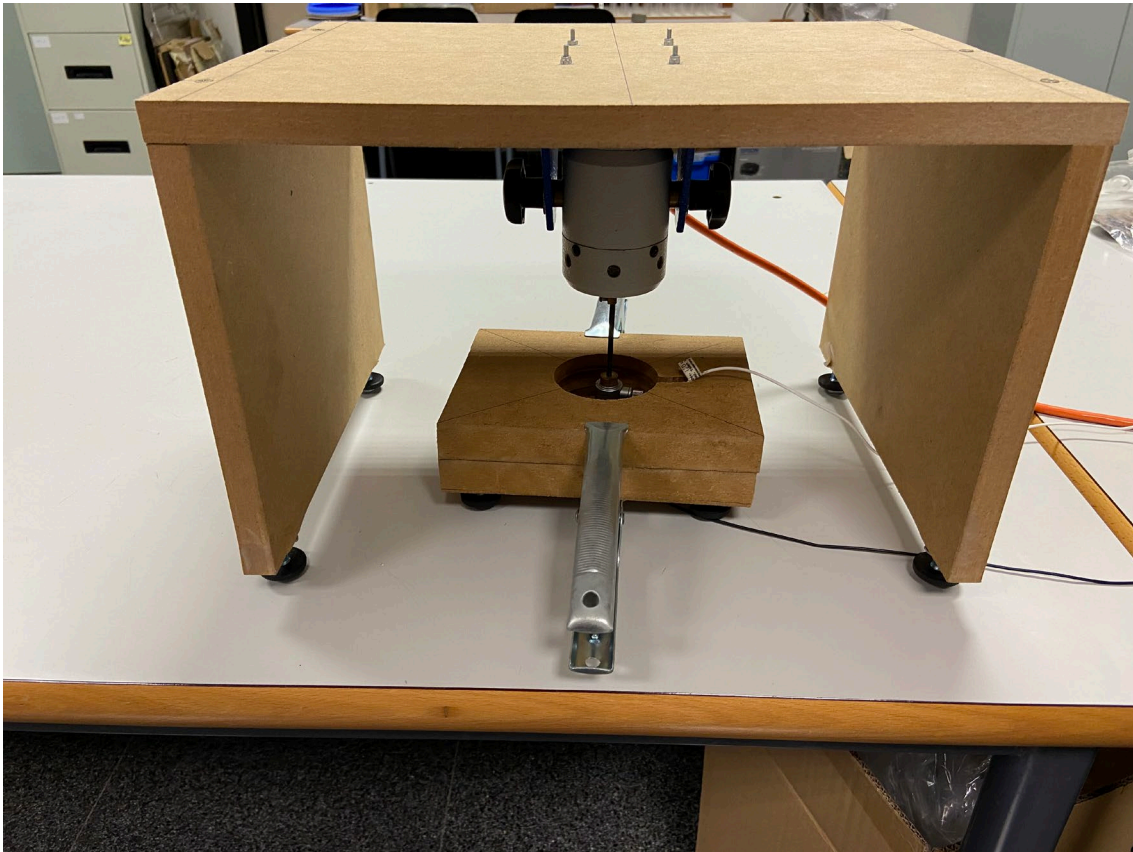


Figura 20: Plataforma experimental terminada



Es de interés fijarse en que el portamuestras se mantiene cerrado y la muestra apretada contra las paredes del mismo gracias a la utilización de las dos pinzas plateadas que se ven en la figura 20. Asimismo, también se ven las patas ajustables con su material anti-vibración, tanto en el portamuestras como en el almacén. Vemos también el sensor de fuerza en la parte superior del portamuestras, con el cable blanco y el acelerómetro en la parte inferior del portamuestras, con el cable negro. Con la parte física de la plataforma descrita se pasa a explicar el apartado de *hardware*, interconexión y procesado.

Con el fin de obtener los datos de fuerza y aceleración que proporcionan el sensor de fuerza y el acelerómetro, así como poder generar la excitación con el shaker necesitamos un dispositivo que nos permita trabajar con estos transductores y capturar sus señales. Se ha decidido utilizar el entorno PULSE de Brüel & Kjaer. En el apartado de captura y generación de señal utilizamos un sistema de captación de señales de Brüel & Kjaer con múltiples entradas y salidas; utilizando este dispositivo, conectamos el sensor de fuerza y el acelerómetro a cada uno de los canales de entrada del dispositivo, también conectamos la salida del generador a la entrada del amplificador TIRA para poder alimentar el shaker.

En el ordenador, utilizamos el software PULSE LabShop para diseñar una plantilla que utilizaremos para realizar nuestras medidas. Una plantilla no es más que una serie de rutinas y operaciones totalmente programables por el usuario que hace PULSE sobre las señales que envía y recolecta (como por ejemplo realizar la transformada de Fourier de una señal, o la suma de dos señales, etc.).

Para realizar las medidas, la plantilla que se ha programado envía ruido aleatorio (ruido blanco) al shaker, que está en contacto con la muestra de material y hace que esta entre en vibración. Con la muestra en estado de vibración se recogen los datos de fuerza y aceleración con respecto al tiempo. La medida dura unos 6 segundos en realizarse y se programa la plantilla para que durante esos 6 segundos se realicen promediados en los datos de fuerza y aceleración recogidos, 150 promediados para ser exactos; esto se realiza con el fin de tener una mayor estabilidad en las medidas. Tras adquirir los datos medidos, la plantilla realiza la transformada de Fourier de los canales de entrada y con ello obtenemos el espectro de los datos de aceleración y fuerza en función de la frecuencia. Una vez volcados estos datos a un archivo de texto se procesarán en un ordenador mediante la utilización del software MATLAB® (R2020a en nuestro caso) con el fin de obtener las propiedades mecánicas de la muestra a estudiar. El procesado de los datos constituye la parte más tediosa de toda la implementación de la plataforma (el código podrá verse en la sección final de esta memoria en el apartado de

ANEXOS), no obstante se explicará paso por paso como se obtienen las magnitudes de interés para cada material de una forma simplificada.

Antes de explicar la manera en la que se obtienen las propiedades mecánicas de los materiales medidos, es interesante ver como son los datos que nos muestra PULSE por pantalla del ordenador después de cada una de las medidas:

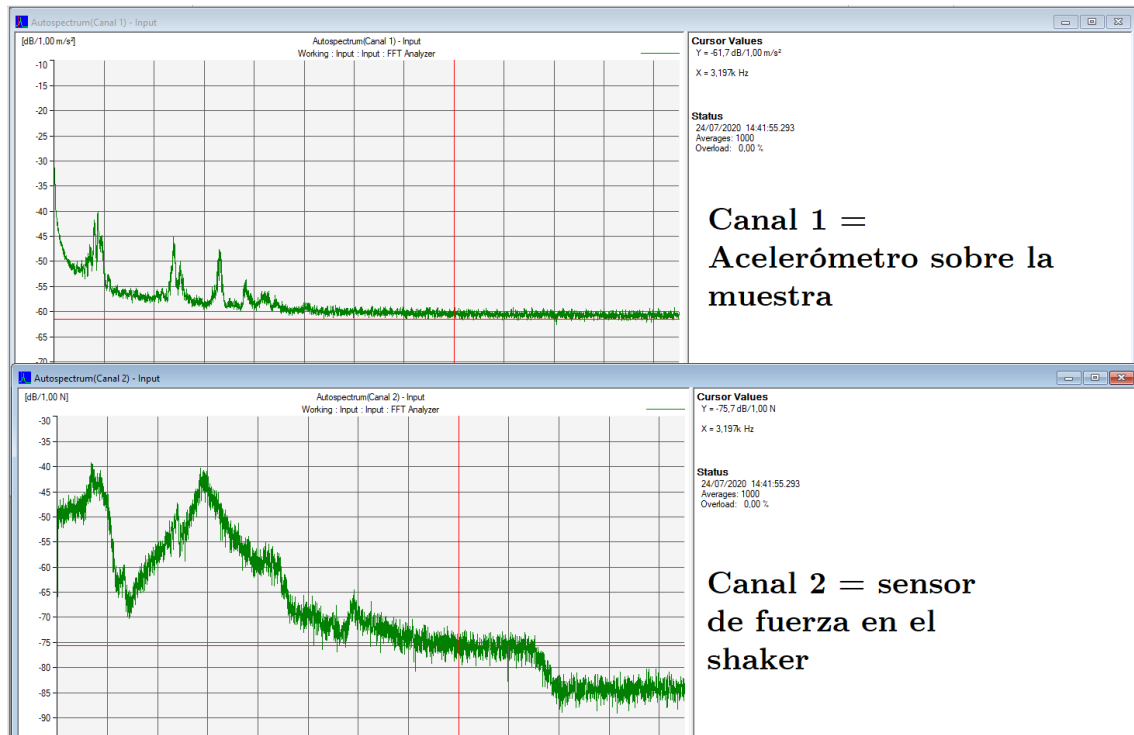


Figura 21: Captura de pantalla del software PULSE después de una adquisición de datos de una muestra

Poseemos tres muestras de cada uno de los materiales que vamos a caracterizar, por lo tanto para obtener los datos de un solo material habrá que promediar los datos de cada una de las muestras. Además, en cada muestra se realizarán 3 pares de medidas de aceleración y fuerza, desplazando el acelerómetro entre 3 posiciones por muestra. Para explicar la nomenclatura de las medidas (aunque las medidas en sí no se adjuntarán en este trabajo de fin de máster por limitaciones de tamaño de archivo, es conveniente explicar como se han decidido organizar las medidas) se va a mostrar en un esquema sencillo las diferentes posiciones de medida por muestra:

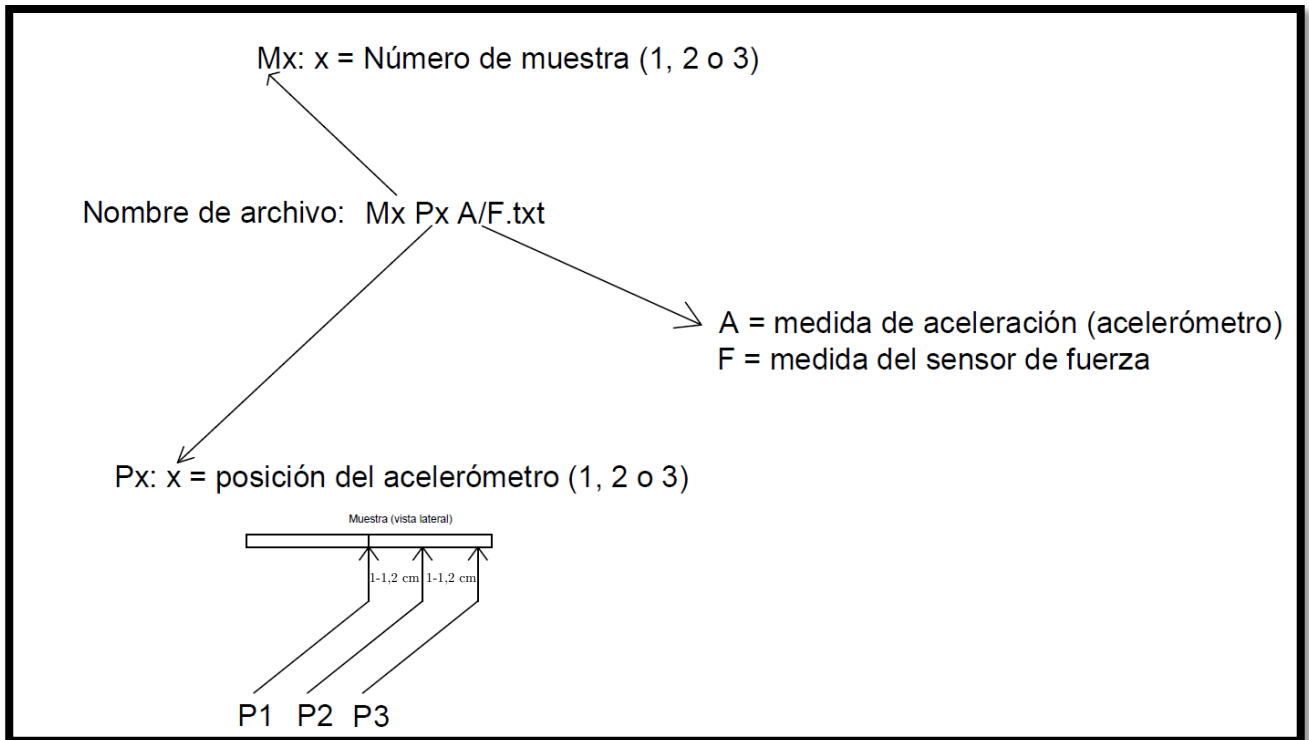


Figura 22: Explicación y nomenclatura de las medidas y de las posiciones de medida

Con esta nomenclatura, a modo de ejemplo, la medida correspondiente a la aceleración en la posición 3 de la segunda muestra de un determinado material se llamaría M2P3A.txt (a título informativo).

Una vez explicado esto, ya se puede proceder a mostrar de que manera se obtendrán las propiedades mecánicas de los materiales mediante el procesado en MATLAB. Primero, para el material elegido se realizará el promediado (realizando la media aritmética) para los datos de aceleración y fuerza en cada una de las posiciones de medida, es decir que tendremos el promedio en la posición 1, 2 y 3. Una vez realizado este promediado se decidirá si se suavizan los datos para reducir el ruido en los mismos o no, así como el método de suavizado; en el próximo capítulo se hablará de la influencia del suavizado y de como se ha decidido integrarlo para la obtención de los resultados. Una vez realizado este paso se procede al cálculo de la función de transferencia (FRF, frequency response function) que se obtiene empleando la siguiente expresión (Brüel & Kjaer, 1994):

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)}, \text{ donde:} \quad (3.1.1)$$

$X(f)$  es el desplazamiento en función de la frecuencia,

$F(f)$  es la fuerza en función de la frecuencia.

Es importante recordar que los datos que obtenemos en las medidas son de fuerza y aceleración, no obstante, en esta ecuación se utiliza el desplazamiento. Para deducir el desplazamiento debemos realizar la integración numérica de los datos de aceleración dos veces; la primera nos proporcionará la velocidad en función de la frecuencia y la segunda el desplazamiento, también en función de la frecuencia. Una vez realizamos el cálculo de la función de transferencia, se obtiene una curva como esta:

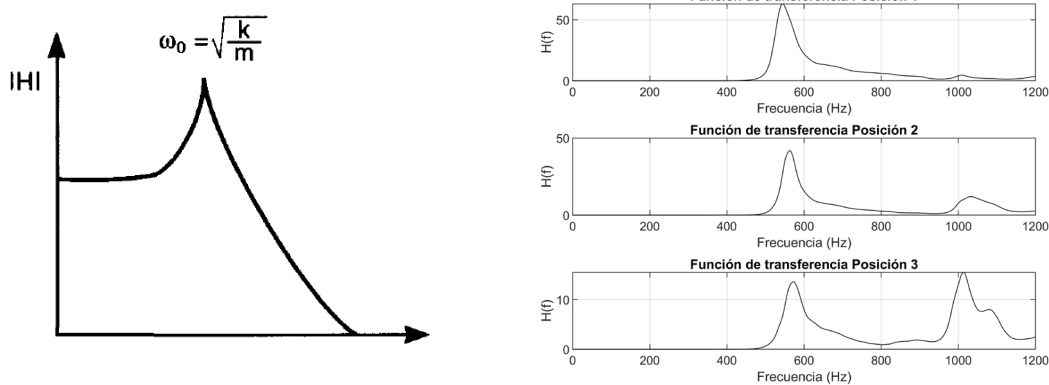


Figura 23: Función de transferencia teórica, tal cual aparece en el paper de B&K (Izq.) y funciones de transferencia para un determinado material obtenidas mediante nuestro método (Der.)

De la curva de la función de transferencia podemos deducir que el máximo se corresponde con la frecuencia de resonancia mecánica  $f_0$  de la muestra, por lo tanto nuestro programa captura ese máximo automáticamente en cada una de las curvas correspondientes a cada una de las 3 posiciones de medida. Con esa frecuencia de resonancia podemos deducir la rigidez  $k$  de la muestra:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ despejando:} \quad (3.1.2)$$

$$k = 4 \cdot m \cdot \pi^2 \cdot f_0^2, \text{ donde:} \quad (3.1.3)$$

$k$  es la rigidez del material ( $N/m$ ),

$m$  es la masa de la muestra (Kg),

$f_0$  es la frecuencia de resonancia mecánica de la muestra (Hz).

Ya hemos obtenido la primera propiedad mecánica del material, para obtener la siguiente, el *Loss Factor* emplearemos un método visual. El *Loss Factor* es adimensional y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\Delta f_{3dB}}{f_0}, \text{ donde:} \quad (3.1.4)$$

$\Delta f_{3dB}$  es el ancho de banda a -3dB a la frecuencia de resonancia (Hz),

$f_0$  es la frecuencia de resonancia mecánica de la muestra (Hz).

Para obtener visualmente el *loss factor*, seleccionaremos manualmente el máximo de la curva de la función de transferencia, acto seguido el programa nos pedirá que seleccionemos los puntos de corte a ambos lados de la curva de la FRF con la línea horizontal cuyo valor es la amplitud máxima que se corresponde con el valor del eje y en la frecuencia de resonancia multiplicado por 0,707 (o lo que es lo mismo, 3dB inferior). Con esto se obtiene el ancho de banda a -3dB y, conocida la frecuencia de resonancia se obtiene el *loss factor*.

Con el *Loss Factor* calculado, procederemos a obtener un parámetro mecánico fundamental, el Módulo de Young. Para obtenerlo, deducimos su expresión de la fórmula para calcular la frecuencia de resonancia en placas circulares (M. Recuero, 1999):

$$E = \frac{-a^4 \cdot f_n^2 \cdot \rho \cdot (v^2 - 1)}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2}, \text{ donde:} \quad (3.1.5)$$

$E$  es el Módulo Elástico o Módulo de Young (Pa),

$a$  es el radio de la placa (m),

$f_n$  es la frecuencia correspondiente al modo n de la placa (Hz),

$\rho$  es la densidad del material del que está constituida la placa ( $Kg/m^3$ ),

$v$  es el coeficiente de Poisson de la placa,

$c$  es un coeficiente que depende de las condiciones de contorno de la placa, por ejemplo, si está apoyada en su contorno exterior (como es nuestro caso) vale 0.172, sin embargo, si está apoyada en el centro vale 0.233 (M. Recuero, 1999).

$n$  es el número de modo de la placa y

$e_0$  es el espesor de la placa (m).

Como puede observarse, para poder calcular el Módulo de Young necesitaríamos saber el coeficiente de Poisson del material, no obstante, al estar midiendo materiales bastante rígidos podemos asumir que el coeficiente de Poisson para todos y cada uno de los materiales que vamos a medir es 0.1, de tal forma, la ecuación (3.1.5) se convierte en:

$$E = \frac{0.99 \cdot a^4 \cdot f_n^2 \cdot \rho}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2} \quad (3.1.6)$$

Además, también se puede obtener la rigidez a la flexión de la muestra, a partir de la siguiente expresión de la teoría de Kirchoff-Love para placas circulares sujetas por el diámetro exterior (como es nuestro caso):

$$D = \frac{2 \cdot E \cdot h^3}{3 \cdot (1 - \nu^2)}, \text{ donde:} \quad (3.1.7)$$

$D$  es la rigidez a la flexión ( $Pa \cdot m^3$ ),

$E$  es el Módulo de Young (Pa),

$h$  es la mitad del espesor de la placa (m)

$\nu$  es el coeficiente de Poisson de la placa.

No obstante, en esta ecuación podemos volver a suponer que el Coeficiente de Poisson es pequeño, y que su influencia no afecta a la formulación. Se elige normalmente como 0,1:

$$D = \frac{2 \cdot E \cdot h^3}{2.97} \quad (3.1.8)$$

Una vez obtenidas estas magnitudes, el programa detecta automáticamente si existen *outliers* o valores aberrantes de cada una de las magnitudes para cada

posición de medida y se realiza la media aritmética entre aquellas que no son outliers para poder obtener una única magnitud de cada tipo por material.

Este apartado de procesado puede resumirse mediante este diagrama de flujo:

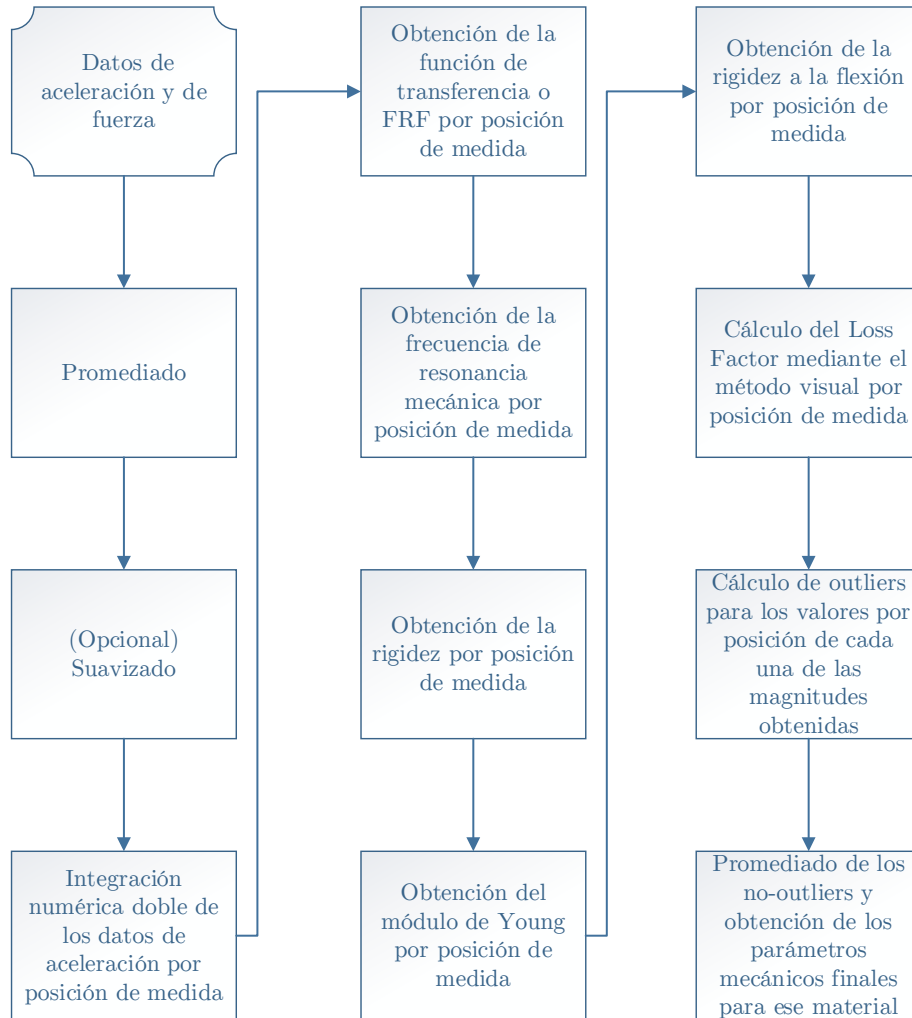




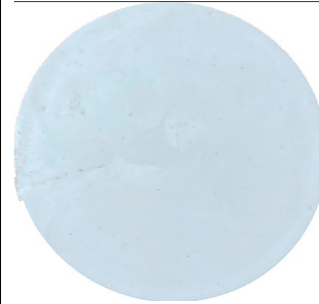

Figura 24: Diagrama de flujo del apartado de procesado de la plataforma

Una vez explicada detalladamente tanto la construcción de la plataforma experimental como su implementación en el apartado de software, se procederá a presentar los materiales que se van a caracterizar en el siguiente capítulo.

### 3.2. Materiales






Los materiales que se van a caracterizar mediante el uso de la plataforma experimental son bio-composites. En el caso que nos concierne se dispone de dos familias diferentes de plásticos combinados con diferentes porcentajes de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). En cuanto a las familias de plástico, primero se tiene Ácido Poliláctico (o PLA), y después Bio-Polietileno (Bio-PE). Cabe destacar que dentro de la familia del PLA se dispone tanto de PLA elemental como de mezclas con  $\text{CaCO}_3$  con porcentajes de 20% y 40% de este último. En la familia del Bio-PE disponemos de Bio-PE elemental y de mezclas con  $\text{CaCO}_3$  con porcentajes de 20%, 40% y 60%. En la próxima sección, se mostrarán los materiales de los que se dispone en detalle, así como algunas de sus propiedades fundamentales como las dimensiones y densidad.

#### Familia de Bio-Composites a base de Ácido Poliláctico (PLA)

PLA		PLA + 20% $\text{CaCO}_3$ Natural		PLA + 40% $\text{CaCO}_3$ Natural		PLA + 40% $\text{CaCO}_3$ Precipitado	
							
Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm
Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm
Peso medio	23,42 g	Peso medio	26,46 g	Peso medio	30,68 g	Peso medio	29,70 g
Densidad	1165 $\text{Kg/m}^3$	Densidad	1316 $\text{Kg/m}^3$	Densidad	1526 $\text{Kg/m}^3$	Densidad	1477 $\text{Kg/m}^3$



## Familia de Bio-Composites a base de Polietileno (PE)

Bio-PE		Bio-PE + 20% CaCO Natural		Bio-PE + 40% CaCO Natural		Bio-PE + 40% CaCO Precipitado		Bio-PE + 60% CaCO Natural	
									
Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm
Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm
Peso medio	17,01 g	Peso medio	19,69 g	Peso medio	22,86 g	Peso medio	22,46 g	Peso medio	26,01 g
Densidad	846 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	979 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	1137 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	1117 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	1293 Kg/m <sup>3</sup>

Estos son los materiales de los que se dispone para caracterizar mediante el uso de la plataforma experimental que se ha implementado. Para poder caracterizarlos, como bien se explicó anteriormente es necesario medir 3 posiciones por muestra, con una medida de aceleración y de fuerza por cada posición. Al disponer de 3 muestras por cada uno de los materiales, el total de medidas a realizar es de 81, dejándonos un total de 162 archivos de texto con datos de fuerza y aceleración. Con esto se concluye este capítulo sobre la implementación de esta plataforma y los materiales a medir y se dará paso a la sección de resultados, donde se mostrará y discutirá lo que se ha obtenido mediante el procesamiento de las medidas.

## 4. Resultados

En este capítulo se van a mostrar los resultados que se han obtenido al procesar todas las medidas que se han hecho, para facilitar la organización y la lectura de los resultados se van a mostrar primero los resultados para la familia de materiales derivados del Ácido Poliláctico (PLA), después para la familia del Bio-Polietileno (Bio-PE) y finalmente se mostrarán algunas gráficas de todos los materiales al mismo tiempo para realizar alguna comparación y tener una visión general. Asimismo, con el fin de validar la plataforma compararemos algunas medidas de un material conocido con las que se han obtenido mediante la plataforma, en particular estudiaremos unas muestras de bio-composites de polipropileno reforzados con fibras de naranjo que ya han sido caracterizados (J. Alba et. Al, 2014) mediante otros métodos de ensayo y compararemos los resultados de su artículo y de nuestro método.

Antes de mostrar los resultados, nos vamos a interesar por un tema del que hemos hablado muy brevemente en el capítulo anterior y de como afecta a los valores que obtendremos de cada uno de los parámetros mecánicos; el suavizado de los datos.

### 4.1. Suavizado de datos

El suavizado de datos es un conjunto de técnicas que se aplican sobre datos que contienen ruido o pequeñas variaciones inestables con el fin de estabilizar dichos datos. Al estar midiendo vibraciones, y además con equipo muy preciso y con una frecuencia de muestreo relativamente elevada, no es extraño encontrar ruido indeseado entre los datos que se recolectan; por lo que necesariamente se deben utilizar este tipo de técnicas para reducir dicho ruido lo máximo posible. En el caso que nos concierne, vamos a servirnos de una función específica de MATLAB (`smoothdata`). Dicha función pone a nuestra disposición 8 métodos distintos de suavizado de datos (Moving mean, Moving median, Gaussian, Lowess, Loess, Robust Lowess, Robust Loess y Savitzky-Golay) que explicaremos brevemente:

- Moving mean: Promediado “móvil”. Este método es útil para reducir las tendencias periódicas en los datos.
- Moving median: Mediana “móvil”. Este método es útil para reducir las tendencias periódicas en los datos cuando existen valores atípicos.

- Gaussian: Promediado “móvil” ponderado de Gauss.
- Lowess: Regresión lineal. Este método puede ser computacionalmente intenso, pero produce menos discontinuidades.
- Loess: Regresión cuadrática. Este método es un poco más costoso computacionalmente que Lowess.
- Robust Lowess: Regresión lineal robusta. Este método es una versión más costosa desde el punto de vista computacional del método Lowess, pero es más robusto frente a valores atípicos.
- Robust Loess: Regresión cuadrática robusta. Este método es una versión más costosa desde el punto de vista computacional del método Loess, pero es más robusto frente a los valores atípicos.
- Savitzky-Golay: Filtro Savitzky-Golay, que suaviza de acuerdo con un polinomio cuadrático. Este método puede ser más efectivo que otros métodos cuando los datos varían rápidamente.

Para ilustrar como afecta el suavizado a los datos, se va a mostrar a modo de ejemplo una curva de aceleración de una de las medidas realizadas sin suavizar y suavizada mediante todos los métodos anteriormente descritos:

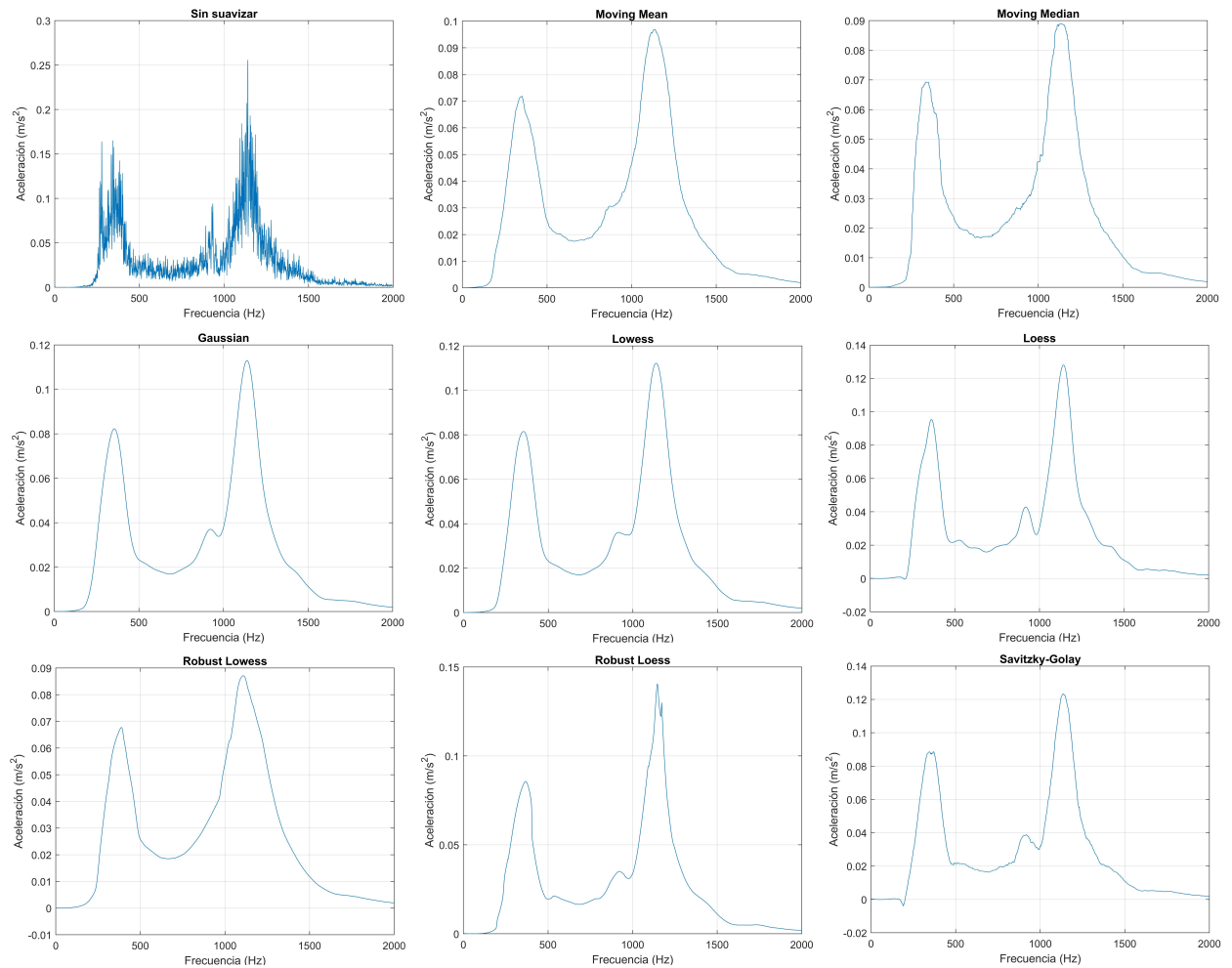


Figura 25: Ejemplo de los diferentes métodos de suavizado que vamos a utilizar

Como se puede observar, todos los métodos de suavizado eliminan la gran cantidad de ruido presente en los datos sin suavizar. Para todos los resultados que posteriormente se van a mostrar se calculará cada propiedad mecánica en función del método de suavizado, el valor final de dicha propiedad será la media entre todos los métodos de suavizado, junto a la desviación típica entre los mismos métodos de suavizado.

Con esto correctamente explicado, se procede a mostrar los resultados obtenidos.

## 4.2. Resultados para el Ácido Poliláctico (PLA)

Se empezará esta ronda de resultados presentando una a una las propiedades mecánicas obtenidas para el PLA y sus diferentes mezclas.

### 4.2.1. PLA: Rigidez

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
PLA	160	164	154	154	161	167	156	158	159 KN/m	5 KN/m
PLA + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	265	268	259	258	275	265	256	246	262 KN/m	9 KN/m
PLA + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	407	415	388	386	371	376	382	374	387 KN/m	16 KN/m
PLA + 40% CaCO Precipitado	332	375	349	344	309	350	325	330	339 KN/m	20 KN/m

Tabla 01: Resultados para la rigidez (KN/m) de la familia PLA

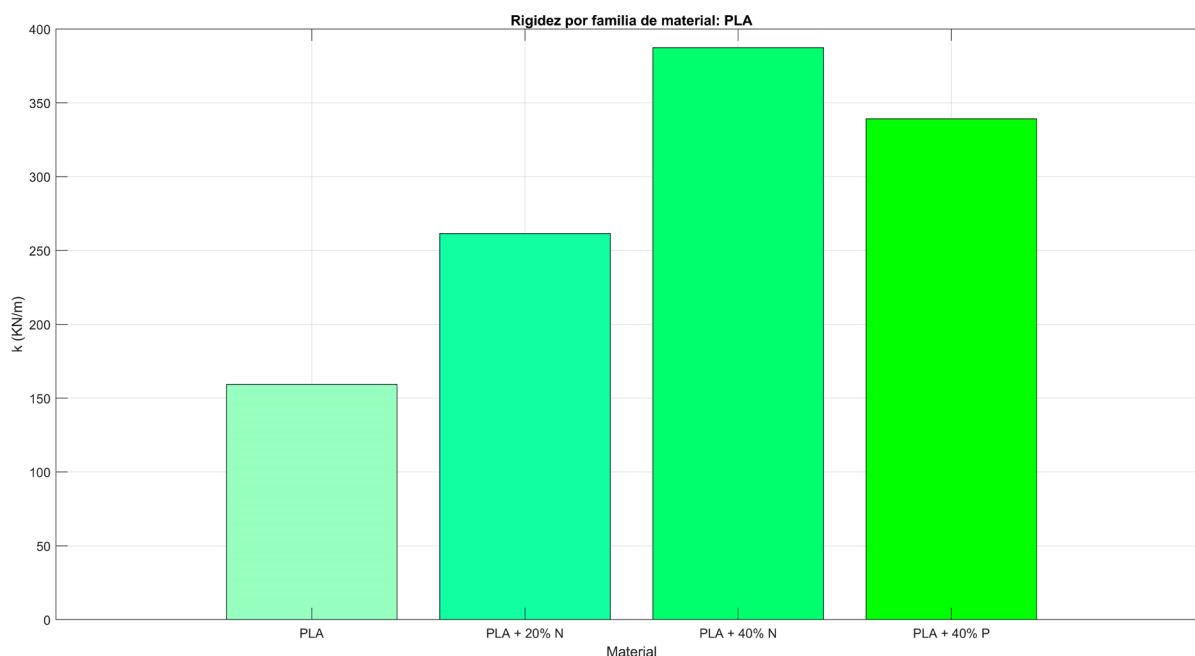


Figura 26: Representación gráfica de la media de las rigideces de los PLA

#### 4.2.2. PLA: Módulo de Young

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
PLA	1,08	1,11	1,04	1,04	1,09	1,11	1,05	1,06	1,07 Gpa	0,03 Gpa
PLA + 20% CaCO3 Natural	1,79	1,81	1,75	1,75	1,75	1,79	1,73	1,66	1,75 Gpa	0,05 Gpa
PLA + 40% CaCO3 Natural	2,75	2,80	2,62	2,60	2,51	2,54	2,57	2,53	2,61 Gpa	0,11 Gpa
PLA + 40% CaCO Precipitado	2,24	2,53	2,36	2,32	2,09	2,36	2,35	2,39	2,33 Gpa	0,13 Gpa

Tabla 02: Resultados para el Módulo de Young (GPa) de la familia PLA

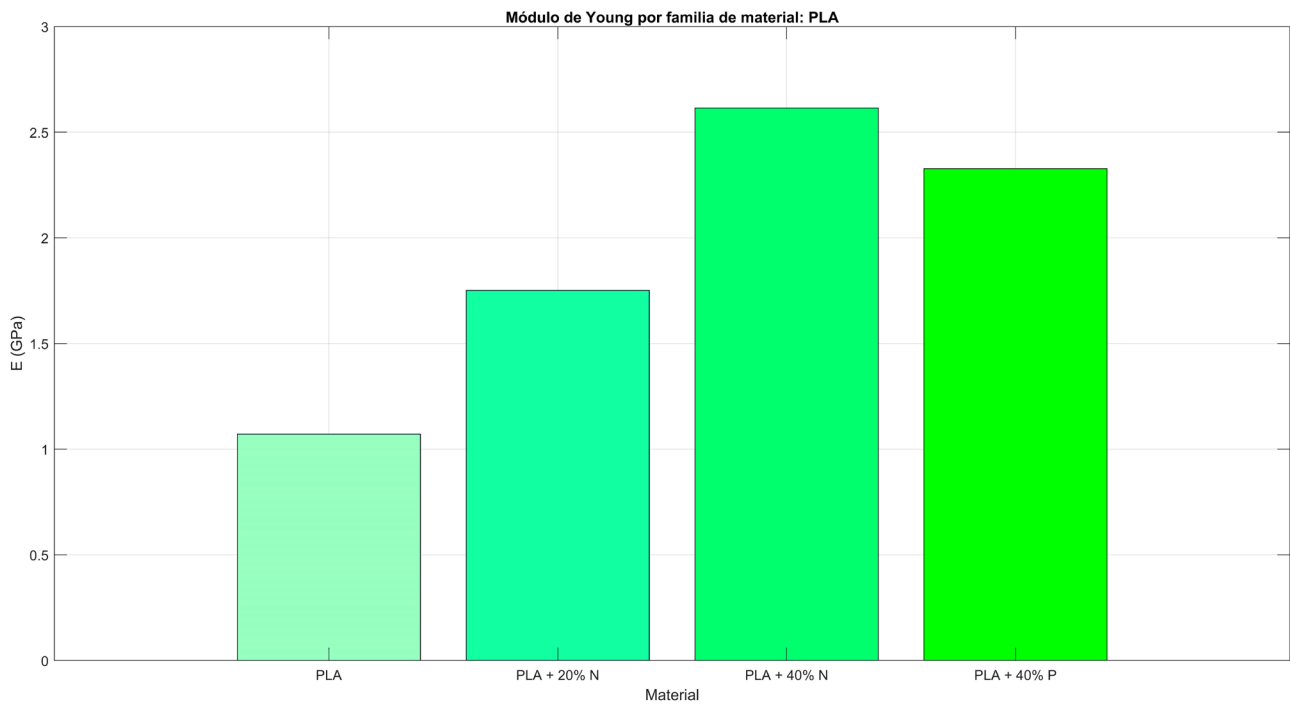


Figura 27: Representación gráfica de la media de los módulos de Young de los PLA

### 4.2.3. PLA: Loss Factor

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
PLA	0,09	0,07	0,05	0,06	0,05	0,07	0,03	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
PLA + 20% CaCO3 Natural	0,23	0,21	0,16	0,16	0,12	0,2	0,13	0,15	<b>0,17</b>	<b>0,04</b>
PLA + 40% CaCO3 Natural	0,24	0,21	0,17	0,18	0,13	0,2	0,17	0,16	<b>0,18</b>	<b>0,03</b>
PLA + 40% CaCO Precipitado	0,27	0,23	0,24	0,22	0,24	0,23	0,25	0,24	<b>0,24</b>	<b>0,02</b>

Tabla 03: Resultados para el *Loss Factor* de la familia PLA

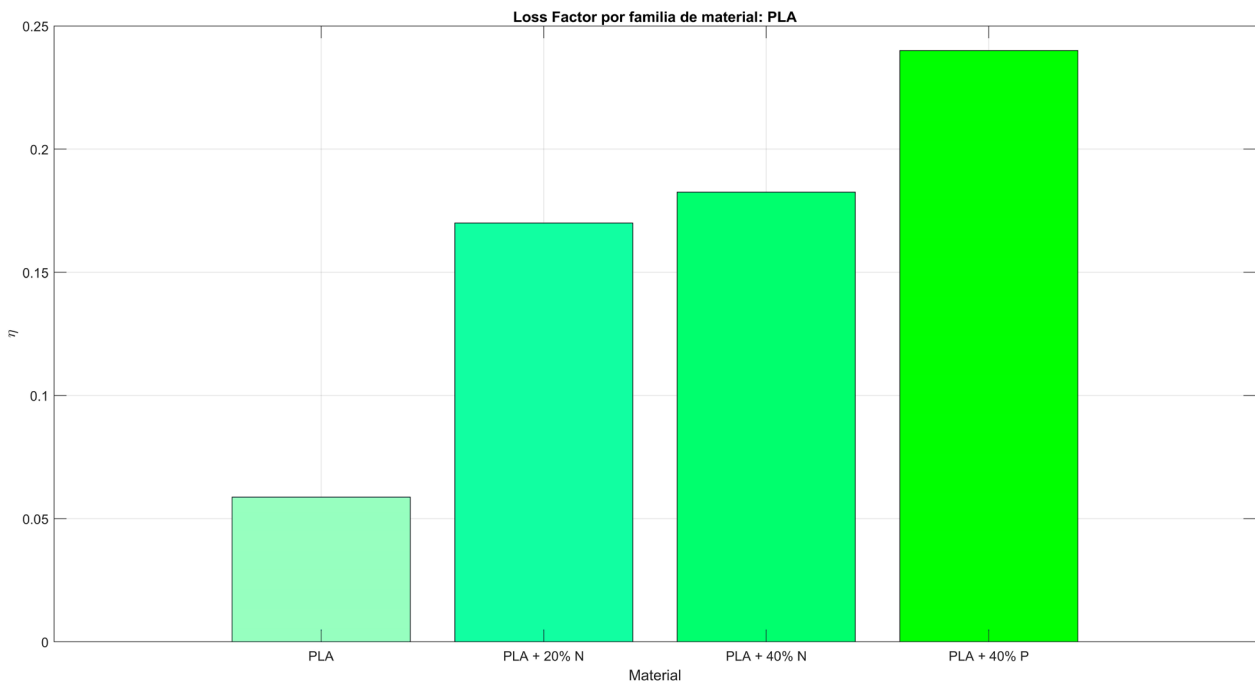


Figura 28: Representación gráfica de la media del *Loss Factor* de los PLA

#### 4.2.4. PLA: Rigidez a la flexión

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
PLA	5,8	6,0	5,6	5,6	5,9	6,0	5,7	5,7	5,8 N·m	0,1 N·m
PLA + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	9,6	9,7	9,4	9,4	9,4	9,6	9,3	8,9	9,4 N·m	0,2 N·m
PLA + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	14,8	15,1	14,1	14,0	13,5	13,7	13,9	13,6	14,1 N·m	0,6 N·m
PLA + 40% CaCO Precipitado	12,1	13,6	12,7	12,5	11,2	12,7	12,7	12,8	12,5 N·m	0,7 N·m

Tabla 04: Resultados para la Rigidez a la flexión de las muestras (N·m)

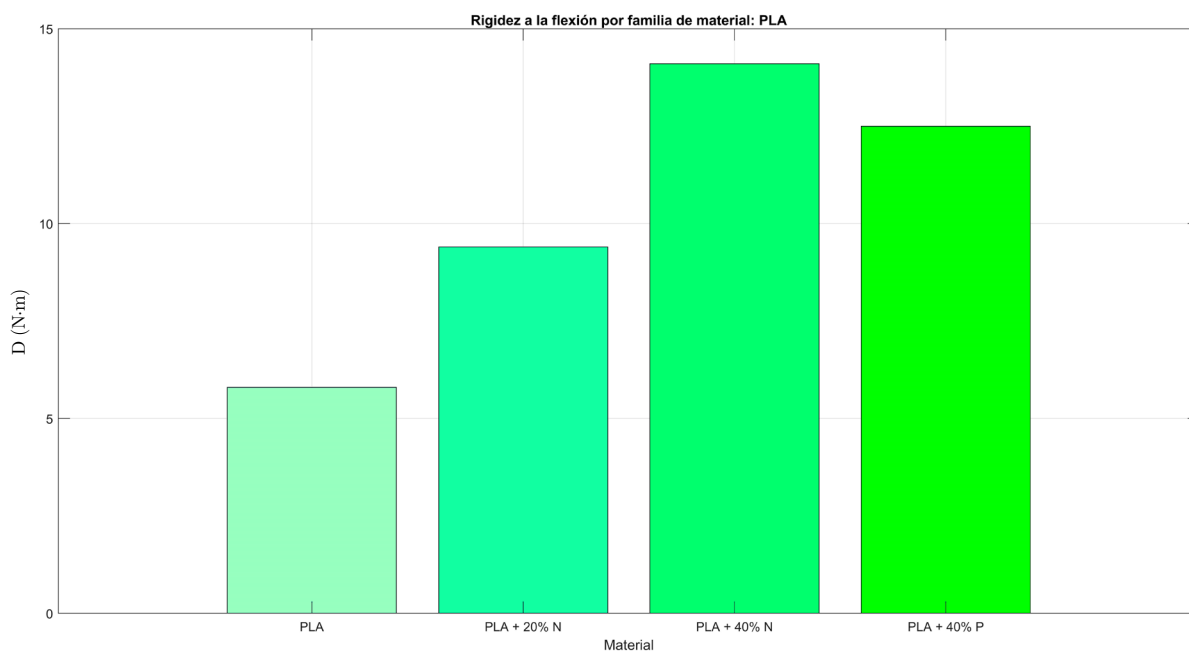


Figura 29: Representación gráfica de la media de la Rigidez a flexión de los PLA



### 4.3. Resultados para el Bio-Polietileno (Bio-PE)

Continuamos con los resultados obtenidos para el Bio-PE y sus diferentes mezclas:

#### 4.3.1. Bio-PE: Rigidez

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
Bio-PE	120	120	119	119	118	121	117	118	119 KN/m	1 KN/m
Bio-PE + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	139	148	138	138	135	136	143	135	139 KN/m	4 KN/m
Bio-PE + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	175	176	177	172	167	164	167	167	171 KN/m	5 KN/m
Bio-PE + 40% CaCO Precipitado	194	195	187	187	180	185	180	176	186 KN/m	7 KN/m
Bio-PE + 60% CaCO Natural	286	278	266	269	261	286	263	254	270 KN/m	12 KN/m

Tabla 05: Resultados para la rigidez de la familia Bio-PE (KN/m)

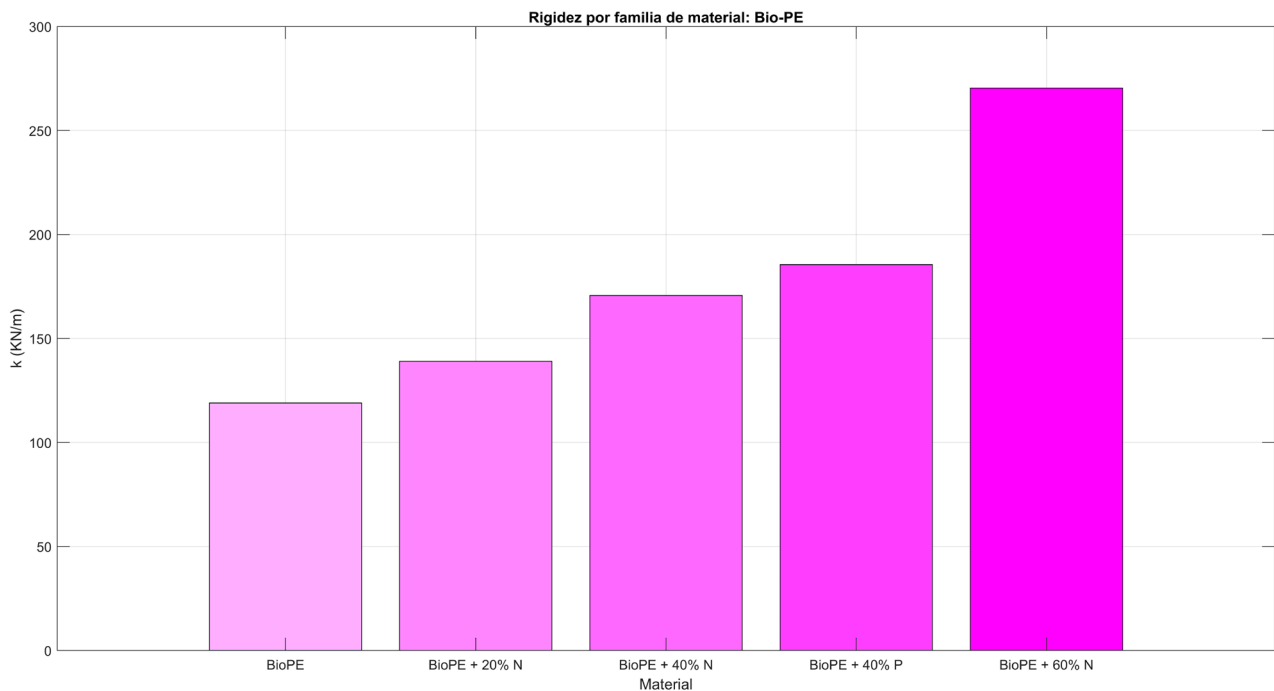


Figura 30: Representación gráfica de la media de la rigidez para la familia Bio-PE

### 4.3.2. Bio-PE: Módulo de Young

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
Bio-PE	0,81	0,81	0,80	0,81	0,80	0,82	0,79	0,80	0,80 Gpa	0,01 Gpa
Bio-PE + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	0,94	0,99	0,93	0,93	0,91	0,92	0,97	0,91	0,94 Gpa	0,03 Gpa
Bio-PE + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	1,18	1,19	1,19	1,16	1,13	1,11	1,13	1,13	1,15 Gpa	0,03 Gpa
Bio-PE + 40% CaCO <sub>3</sub> Precipitado	1,31	1,32	1,27	1,27	1,20	1,25	1,21	1,19	1,25 Gpa	0,05 Gpa
Bio-PE + 60% CaCO <sub>3</sub> Natural	1,69	1,55	1,51	1,52	1,45	1,64	1,48	1,37	1,52 Gpa	0,1 Gpa

Tabla 06: Resultados para el módulo de Young de la familia Bio-PE (GPa)

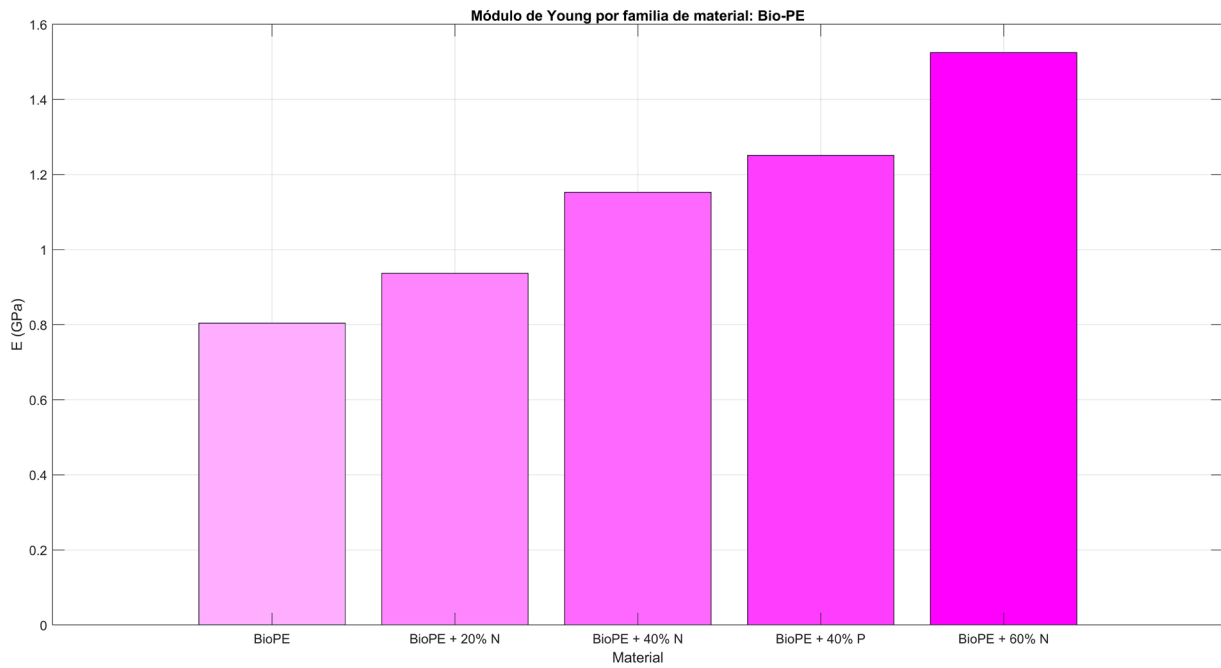


Figura 31: Representación gráfica de la media del módulo de Young para la familia Bio-PE

### 4.3.3. Bio-PE: Loss Factor

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
Bio-PE	0,27	0,22	0,16	0,16	0,15	0,17	0,14	0,16	<b>0,18</b>	<b>0,04</b>
Bio-PE + 20% CaCO3 Natural	0,19	0,15	0,13	0,14	0,09	0,12	0,11	0,11	<b>0,13</b>	<b>0,03</b>
Bio-PE + 40% CaCO3 Natural	0,16	0,13	0,13	0,1	0,09	0,11	0,13	0,13	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
Bio-PE + 40% CaCO Precipitado	0,2	0,22	0,18	0,15	0,12	0,21	0,15	0,17	<b>0,18</b>	<b>0,03</b>
Bio-PE + 60% CaCO Natural	0,19	0,17	0,14	0,16	0,11	0,19	0,08	0,12	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>

Tabla 07: Resultados para el *Loss Factor* de la familia Bio-PE

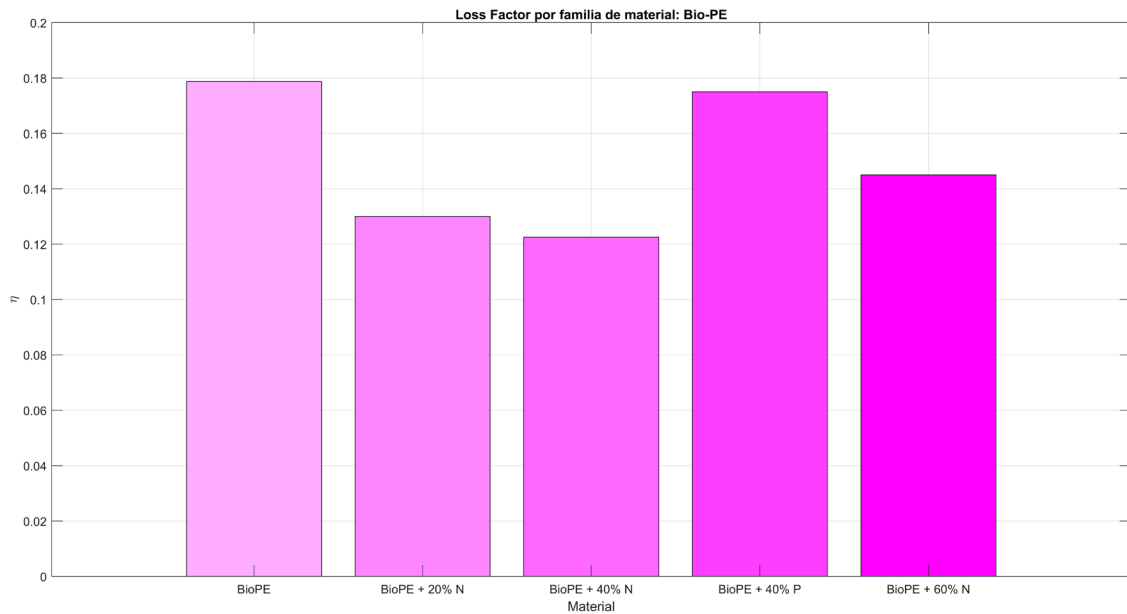


Figura 32: Representación gráfica de la media del *Loss Factor* para el Bio-PE

#### 4.3.4. Bio-PE: Rigidez a la flexión

Material	Método de suavizado de datos								Media de los métodos	Desviación típica
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay		
Bio-PE	4,4	4,3	4,3	4,4	4,3	4,4	4,3	4,3	4,3 N·m	0,0 N·m
Bio-PE + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	5,1	5,3	5,0	5,0	4,9	5,0	5,2	4,9	5,0 N·m	0,1 N·m
Bio-PE + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	6,4	6,4	6,4	6,3	6,1	6,0	6,1	6,1	6,2 N·m	0,2 N·m
Bio-PE + 40% CaCO <sub>3</sub> Precipitado	7,0	7,1	6,8	6,8	6,5	6,7	6,5	6,4	6,7 N·m	0,3 N·m
Bio-PE + 60% CaCO <sub>3</sub> Natural	9,1	8,4	8,1	8,2	7,8	8,8	8,0	7,4	8,2 N·m	0,6 N·m

Tabla 08: Resultados para la Rigidez a flexión de las muestras de la familia Bio-PE ( $Pa/m^3$ )

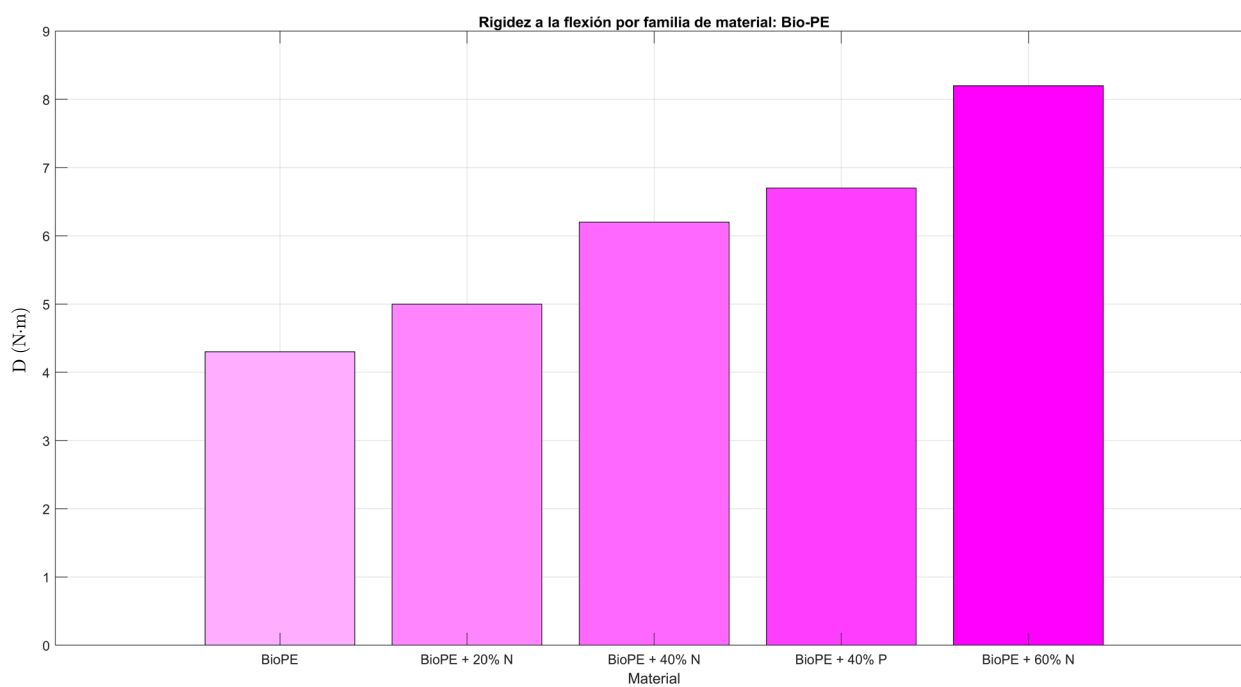


Figura 33: Representación gráfica de la media de la rigidez a flexión de la familia Bio-PE

Una vez se han mostrado los resultados detallados para cada uno de los materiales, se pondrá en común todo lo que se ha obtenido hasta el momento para hacer un comentario de los mismos.

#### 4.4. Comentarios a los resultados obtenidos

Para realizar el comentario de los resultados que se han obtenido, se va a mostrar una serie de gráficos que contienen la misma propiedad para todos los materiales medidos. Empecemos comentando los resultados de rigidez:

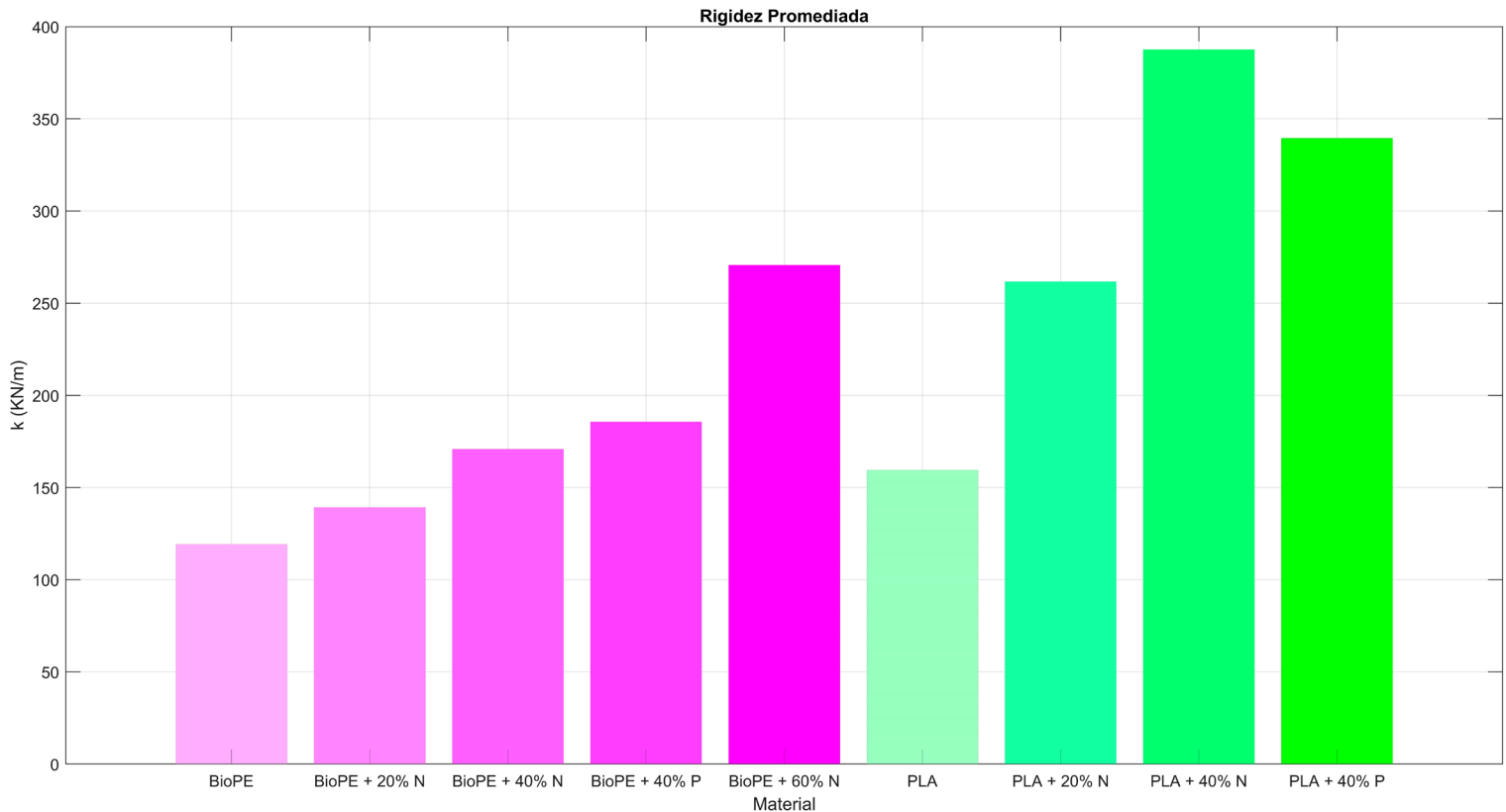


Figura 34: Rigidez para todos los materiales medidos

La escasez de datos específicos de rigidez en la literatura para cualquier material de los que hemos medido nos impide hacer una comparación directa con los resultados obtenidos. No obstante, observamos dos tendencias diferenciadas: Primero, los bio-composites a base de Polietileno son menos rígidos que aquellos a base de Ácido Poliláctico. Segundo, se observa que los materiales son mas rígidos a medida que va aumentando el porcentaje de mezcla de Carbonato de Calcio. Esto último tiene sentido ya que el  $\text{CaCO}_3$ , al ser un elemento principal en minerales como la calcita, la caliza o el mármol posee una gran dureza, lo que confiere una mayor rigidez al material con el cual se fusiona.

En cuanto a los valores obtenidos de módulo de Young, veamos si los datos obtenidos se ajustan a la realidad y comentémoslos:

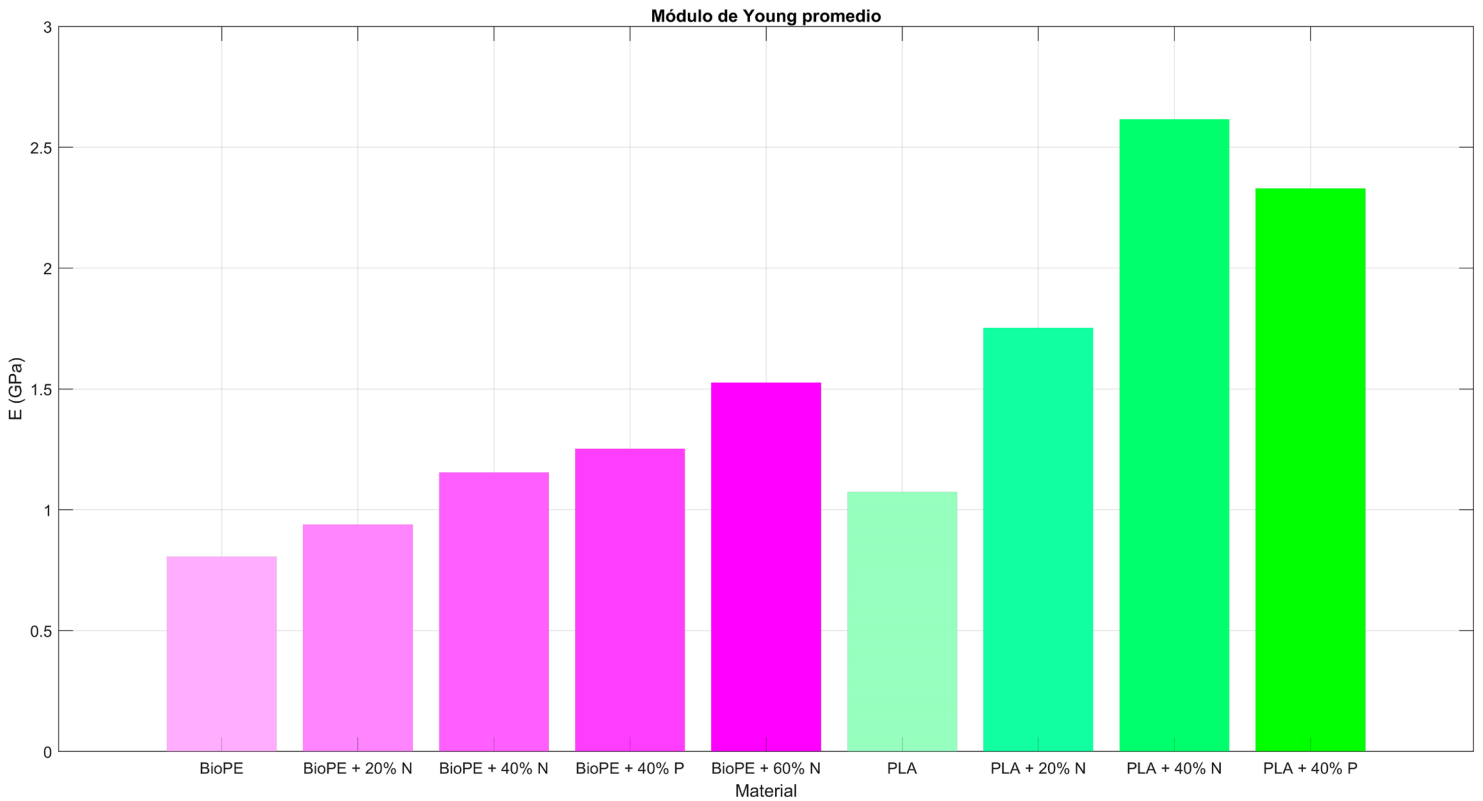


Figura 35: Módulo de Young para todos los materiales medidos

Se observa que la tendencia que comentamos en la anterior figura se mantiene, que los materiales con base de Polietileno poseen un menor módulo elástico que aquellos basados en Ácido Poliláctico y que a mayor concentración de Carbonato de Calcio mayor es el módulo elástico. En la literatura encontramos algunos datos con los que comparar lo que hemos obtenido. Por ejemplo, el Polietileno base, sin aditivos presenta valores de módulo elástico de entre 0,4 y 0,9 GPa (Matweb). Si comparamos esto con el valor que se ha obtenido (0,8 GPa) se puede decir que ambos están en rangos similares. No obstante, no he podido encontrar datos de módulo elástico de Bio-Polietileno con diferentes porcentajes de  $\text{CaCO}_3$  y no puedo realizar la comparación. En cuanto a las muestras de Ácido Poliláctico (PLA), en la literatura se ve que para el PLA podemos encontrar valores de módulo elástico que van desde los 0,35 hasta los 3,5 Gpa (S. Farah et. Al, 2016). Con estos datos, todos los resultados que se han obtenido entran dentro de esos límites. No obstante, para validar las medidas y la plataforma que se ha

implementado sería necesario comparar los datos de módulo elástico que hemos obtenido con otros disponibles de muestras de exactamente el mismo material que se ha medido; eso es algo que veremos mas adelante.

En cuanto al *Loss Factor* o factor de pérdidas, tenemos la siguiente figura:

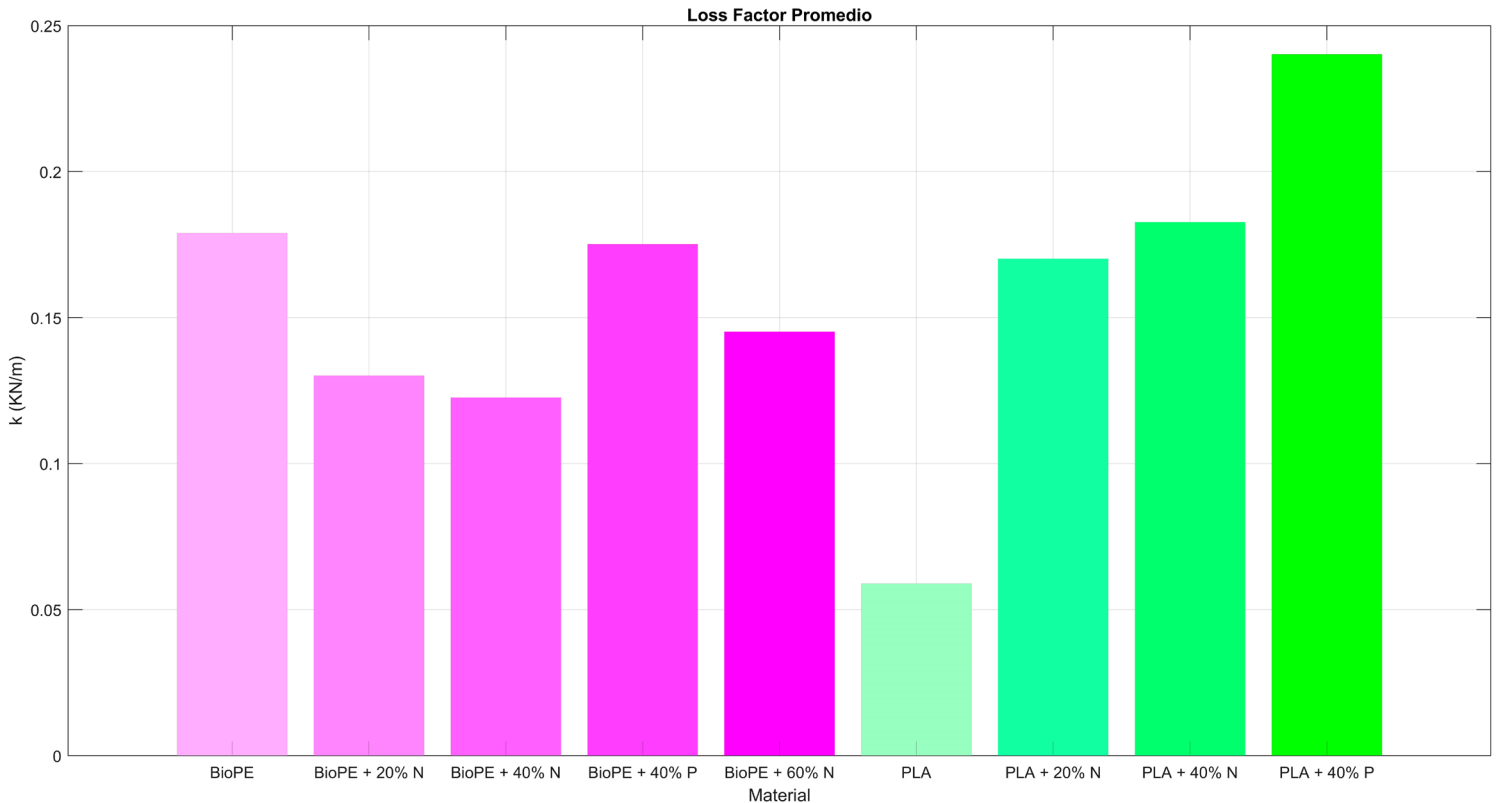


Figura 36: *Loss Factor* para todos los materiales medidos

Es interesante destacar que, en el caso de la familia de composites a base de PLA, el factor de pérdidas crece conforme se aumenta la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  presente en la muestra. No obstante en el caso de los Bio-PE el factor de pérdidas fluctúa entre 0,12 y 0,17 y no parece tener una dependencia con el porcentaje de mezcla. También es interesante ver que en ambas familias de materiales, para un mismo porcentaje de mezcla, el factor de pérdidas es mayor en el que tiene  $\text{CaCO}_3$  precipitado en lugar de natural. Al no existir en la literatura datos de factor de pérdidas para paneles de Bio-PE o de PLA no se pueden comparar los datos obtenidos con ninguna referencia.

Con esto se concluye la sección sobre resultados. En la próxima sección se compararán medidas realizadas con nuestra plataforma y las de un material de

características conocidas, lo que nos ayudará a evaluar la efectividad de la solución que se ha propuesto para caracterización de materiales.

#### 4.5. Validación de la plataforma

Con el fin de evaluar la validez de algunos de los parámetros mecánicos que se han obtenido, lo ideal sería comparar medidas de exactamente los mismos materiales medidas mediante nuestro método y otro procedimiento normativo que esté bien documentado. Al no disponer de ningún material que ya haya sido caracterizado previamente entre los que se han medido, se va a recurrir a realizar una última tanda de medidas con otras muestras de bio-composites que sí que han sido medidas mediante procedimientos normativos. En este caso, se van a comparar las medidas de módulo elástico proporcionadas por nuestro método con las obtenidas mediante ensayo mecánico destructivo ampliamente utilizado en los laboratorios de estudio de materiales ASTM D638 (ASTM D638 – 14) de una serie de bio-composites de Polipropileno reforzados con diferentes porcentajes de fibras de naranjo. Dichas muestras ya fueron caracterizadas en su momento (J. Alba et. Al, 2014) y por lo tanto, asumiendo que el material es exactamente el mismo de los ensayos de ese artículo se tiene una base sólida de la cual partir y comparar los resultados obtenidos mediante nuestro método. Antes de mostrar la comparación de resultados, se mostrará brevemente como son las muestras de las que se dispone, así como de algunas de sus propiedades fundamentales:





Polipropileno + 20% fibras de naranjo		Polipropileno + 30% fibras de naranjo		Polipropileno + 40% fibras de naranjo		Polipropileno + 50% fibras de naranjo	
							
Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm	Radio	4 cm
Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm	Espesor	4 mm
Peso medio	17,61 g	Peso medio	18,52 g	Peso medio	19,46 g	Peso medio	20,15 g
Densidad	876 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	921 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	968 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	1002 Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 09: Propiedades de las muestras de Polipropileno



Como para todas las muestras que se han medido en este trabajo de fin de máster, para cada una de las 3 muestras de cada material se han realizado 3 pares de medidas de fuerza y aceleración, variando la posición del acelerómetro en cada una de las medidas, dejándonos un total adicional de 24 archivos a procesar. Ahora compararemos los datos obtenidos de módulo de Young con los proporcionados por el artículo y comentaremos los resultados, valorando si la plataforma que se ha implementado es válida para realizar medidas de propiedades mecánicas.

Material (Polipropileno + fibras de naranja)	Método de suavizado de datos							
	Moving Average	Moving Median	Gaussian	Lowess	Loess	Robust Lowess	Robust Loess	Savitzky-Golay
PP + 20% MP	2,58	2,48	2,49	2,50	2,35	2,62	2,45	2,42
PP + 30% MP	3,49	3,58	3,41	3,41	3,28	3,53	3,37	3,38
PP + 40% MP	4,12	3,87	4,07	3,98	3,74	4,17	4,04	3,91
PP + 50% MP	5,02	5,23	4,80	4,77	4,81	4,67	4,88	4,69

Tabla 10: Resultados del módulo de Young para la familia de Polipropileno (GPa)

A partir de estos resultados, se realiza la media y se calcula la desviación entre métodos de suavizado, una vez realizado esto, se comparan con los proporcionados por el artículo:

Media de los métodos	Desviación típica	Módulo de Young medido en el artículo [ASTM D638]	Diferencia entre ensayo destructivo y método de resonancia	
2,49 Gpa	0,09 Gpa	2,80 GPa	0,31 Gpa	11%
3,43 Gpa	0,10 Gpa	3,70 GPa	0,27 Gpa	7%
3,99 Gpa	0,14 Gpa	4,30 GPa	0,31 Gpa	7%
4,86 Gpa	0,19 Gpa	5,10 GPa	0,24 Gpa	5%

Tabla 11: Comparación de los resultados obtenidos mediante nuestra plataforma y los obtenidos mediante un ensayo destructivo

Si se representan gráficamente todos los datos:

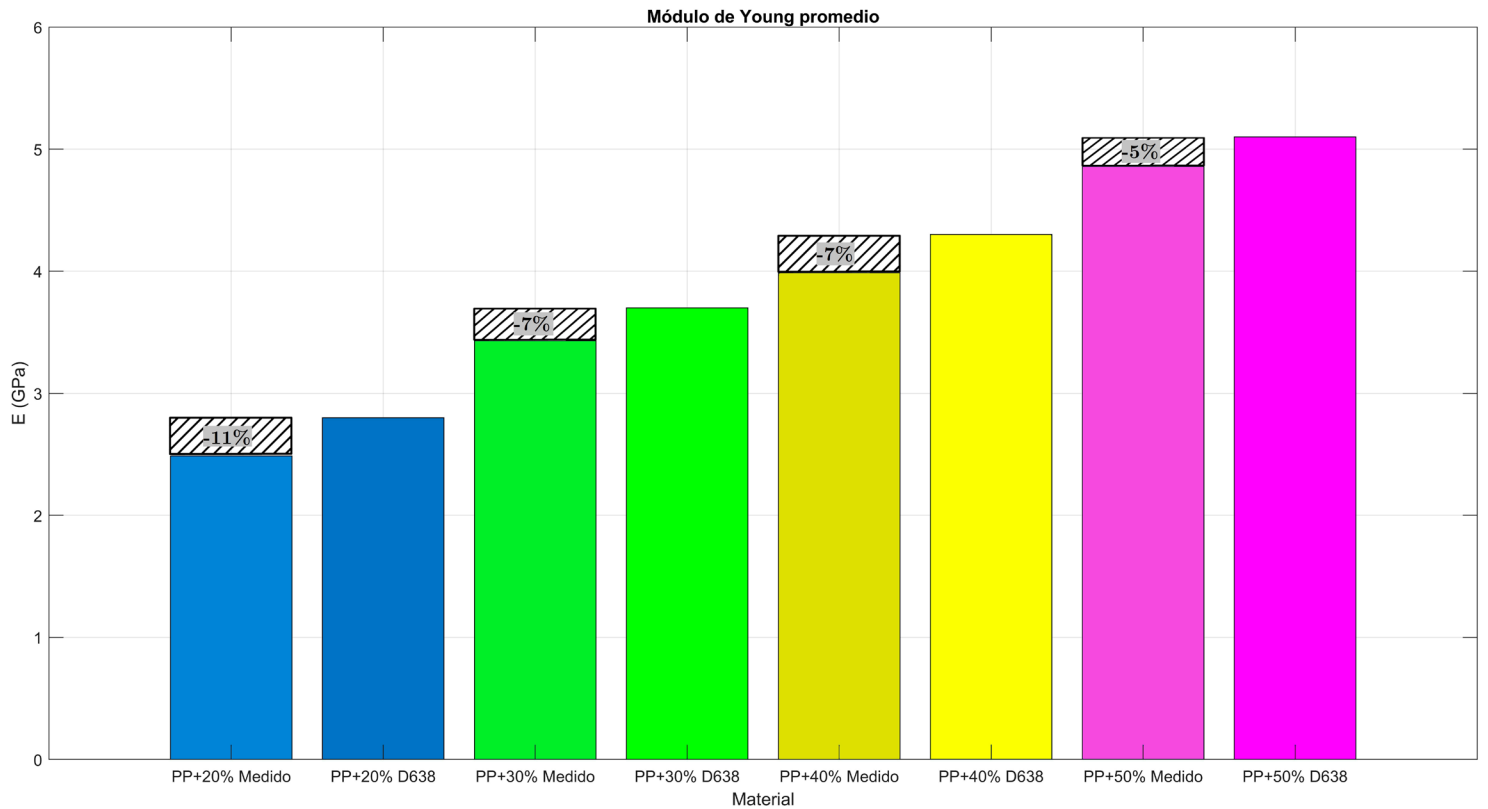


Figura 37: Comparación gráfica entre nuestras medidas de módulo elástico y las del artículo

Las diferencias entre las medidas de nuestra plataforma oscilan entre un 5% y un 11% con respecto a las del ensayo destructivo del artículo. Dichas diferencias no son demasiado elevadas y sirven para demostrar que la plataforma que se ha implementado puede obtener unos resultados comparables a los que proporcionan los ensayos destructivos basados en normativas ampliamente utilizadas. No obstante, a pesar de que las diferencias no son muy grandes se entiende que los valores de las propiedades que se obtienen mediante ensayo destructivo son de mayor fiabilidad que las que se han obtenido con nuestra plataforma, ya que en la literatura y en laboratorio son los que utilizan. Independientemente de esto, estoy satisfecho con los resultados obtenidos, y, asumiendo las diferencias entre ambos métodos se puede considerar que esta plataforma experimental está validada para realizar medidas de propiedades mecánicas (al menos, de Módulo de Young) asumiendo que habrá alguna diferencia con respecto a los métodos tradicionales. Lamentablemente, en el artículo no se midieron otras propiedades como la rigidez, la rigidez a flexión o el *Loss Factor* y no tenemos como compararlos con los obtenidos mediante la utilización de nuestra plataforma experimental.

#### 4.6. Error asociado

A la hora de realizar las medidas, se producen errores derivados de los métodos que se utilizan para obtener algunas de las magnitudes que se emplean en las fórmulas para el cálculo de los parámetros mecánicos. Estas magnitudes, como por ejemplo el diámetro de las muestras, su espesor o incluso su frecuencia de resonancia se pueden medir con diferentes grados de precisión; la precisión con la cual se miden afectará en mayor o menor medida a las magnitudes obtenidas para los parámetros mecánicos, como veremos a continuación:

##### 4.6.1. Error asociado a la rigidez, $\varepsilon k$

La rigidez se calcula mediante la ecuación (3.1.3) cuya expresión recordamos:

$$k = 4 \cdot m \cdot \pi^2 \cdot f_0^2$$

De esta expresión, se deducen las variables que hayan podido introducir un error por culpa de la instrumentación o de naturaleza humana. En este caso se trataría de la masa  $m$ , y la frecuencia de resonancia  $f_0$ . Ahora se deriva parcialmente la fórmula anterior con respecto a estas variables y se obtiene la siguiente expresión del error asociado:

$$\varepsilon k = \left| \frac{\partial k}{\partial m} \right| \cdot |\varepsilon m| + \left| \frac{\partial k}{\partial f_0} \right| \cdot |\varepsilon f_0| \quad (4.6.1.1)$$

$$\varepsilon k = \left| 4 \cdot f_0^2 \cdot \pi^2 \right| \cdot |\varepsilon m| + \left| 8 \cdot f_0 \cdot m \cdot \pi^2 \right| \cdot |\varepsilon f_0|, \text{ donde:} \quad (4.6.1.2)$$

$$\varepsilon m = 1 \cdot 10^{-5} \text{ kg}, \quad \varepsilon f_0 = 0.7813 \text{ Hz}$$

Para cada material medido, se calcula el error asociado mediante la expresión anterior y se obtiene la siguiente tabla valores de rigidez y error asociado:

Material	K ± εK	% de error
BioPE	119,0 ± 0,5 KN·m	0,4%
BioPE + 20% CaCO3 Natural	139,0 ± 0,6 KN·m	0,4%
BioPE + 40% CaCO3 Natural	170,6 ± 0,7 KN·m	0,4%
BioPE + 40% CaCO3 Precipitado	185,5 ± 0,7 KN·m	0,4%
BioPE + 60% CaCO3 Natural	270,4 ± 0,9 KN·m	0,3%
PLA	159,3 ± 0,7 KN·m	0,4%
PLA + 20% CaCO3 Natural	261,5 ± 0,9 KN·m	0,4%
PLA + 40% CaCO3 Natural	387,4 ± 1,2 KN·m	0,3%
PLA + 40% CaCO3 Precipitado	339,3 ± 1,1 KN·m	0,3%

Tabla 12: error asociado a la rigidez

Como se puede observar, el error asociado a la rigidez fluctúa entre un [0,3-0,4]%, se puede decir que el error asociado es pequeño y no afecta en gran medida a los resultados obtenidos

#### 4.6.2. Error asociado al módulo de Young, $\varepsilon E$

El módulo de Young se obtiene mediante la ecuación (3.1.5) y (3.1.6), cuya formulación se recuerda:

$$E = \frac{0.99 \cdot a^4 \cdot f_n^2 \cdot \rho}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2}$$

A partir de esta expresión, las magnitudes sujetas a error son el radio de la muestra  $a$ , la frecuencia de resonancia de la muestra  $f_n$  y el espesor de la muestra  $e_0$ . También se tiene en cuenta que tanto para el cálculo del error como de la magnitud del módulo elástico los valores del resto de variables que se toman en la expresión son  $n=1$  (ya que se trata de estudiar la frecuencia fundamental) y  $c=0.172$ . Ahora se deriva parcialmente la fórmula anterior con respecto a estas variables y se obtiene la siguiente expresión del error asociado:

$$\varepsilon E = \left| \frac{\partial E}{\partial a} \right| \cdot |\varepsilon a| + \left| \frac{\partial E}{\partial f_n} \right| \cdot |\varepsilon f_n| + \left| \frac{\partial E}{\partial e_0} \right| \cdot |\varepsilon e_0| \quad (4.6.2.1)$$

$$\varepsilon E = \left| \frac{3.96 \cdot a^3 \cdot f_n^2 \cdot \rho}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2} \right| \cdot |\varepsilon a| + \left| \frac{1.98 \cdot f_n \cdot a^4 \cdot \rho}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2} \right| \cdot |\varepsilon f_n| + \left| \frac{-1.98 \cdot a^4 \cdot f_n^2 \cdot \rho}{e_0^3 \cdot c^2 \cdot n^4} \right| \cdot |\varepsilon e_0| \quad (4.6.2.2)$$

Donde:  $\varepsilon a = 10^{-4} m$ ,  $\varepsilon f_n = \varepsilon f_0 = 0.7813 Hz$ , y  $\varepsilon e_0 = 10^{-4} m$

Para cada material medido, se calcula el error asociado mediante la expresión anterior y se obtiene la siguiente tabla valores de módulo de Young y error asociado:

Material	$E \pm \epsilon E$	% de error
BioPE	$0,80 \pm 0,05$ Gpa	6,8%
BioPE + 20% CaCO3 Natural	$0,94 \pm 0,06$ Gpa	6,8%
BioPE + 40% CaCO3 Natural	$1,15 \pm 0,08$ Gpa	6,8%
BioPE + 40% CaCO3 Precipitado	$1,25 \pm 0,09$ Gpa	6,8%
BioPE + 60% CaCO3 Natural	$1,52 \pm 0,12$ Gpa	8,1%
PLA	$1,07 \pm 0,07$ Gpa	6,9%
PLA + 20% CaCO3 Natural	$1,75 \pm 0,12$ Gpa	6,8%
PLA + 40% CaCO3 Natural	$2,61 \pm 0,18$ Gpa	6,7%
PLA + 40% CaCO3 Precipitado	$2,33 \pm 0,15$ Gpa	6,6%

Tabla 13: Error asociado a la obtención del módulo elástico

En el caso del módulo elástico, el error asociado es claramente mayor al de la rigidez [6-8]%. No obstante, estas diferencias de entorno al 7% no representan una cantidad significativamente grande, son de al menos un orden de magnitud inferior al del módulo de Young obtenido en todos los casos. Este 7% de diferencia promedio que obtenemos aquí quizá explique también las diferencias que hemos encontrado al comparar anteriormente los datos del método resonante y de ensayo de tracción; de alrededor del [5-11]%

Resulta de interés preguntarse si existen métodos para reducir el error asociado a la obtención del módulo elástico. Se puede empezar por intentar reducir el error del radio de la muestra,  $\epsilon a$ . Si en lugar de medir las muestras con un pie de rey cuya media mínima es de una décima de milímetro ( $10^{-4} m$ ) las medimos con micrómetro cuya precisión es, de al menos una centésima de milímetro ( $10^{-5} m$ ), se mejoraría el error y de [6-8]% se pasaría a [5-7]%. La medida de espesor,  $e_0$ , también está tomada con un calibre y con una precisión de décima de milímetro, no obstante, se puede mejorar la precisión hasta las centésimas de milímetro o superior ( $10^{-5} m$ ) con la ayuda de un micrómetro. Así el error asociado mejoraría aún mas hasta colocarse entorno a un 1%, dejándonos con un error muy pequeño. En la formulación del error asociado, la frecuencia de muestreo de los datos es lo que menos afecta al error, por lo tanto, aunque se mejore mucho el error gracias a instrumentos de medida muy precisos para medir las dimensiones

de las muestras; aumentar la frecuencia de muestreo no ayudará a mejorar el error (de hecho, aunque se aumente 10 veces su valor, el error no mejorará mas).

Estos serían los errores mínimos teóricos de módulo de Young que se podrían conseguir mejorando, como se ha dicho, la precisión en las técnicas de medida:

Material	$E \pm eE$	% de error
BioPE	$0,80 \pm 0,01$ Gpa	1,5%
BioPE + 20% CaCO3 Natural	$0,94 \pm 0,01$ Gpa	1,5%
BioPE + 40% CaCO3 Natural	$1,15 \pm 0,02$ Gpa	1,5%
BioPE + 40% CaCO3 Precipitado	$1,25 \pm 0,02$ Gpa	1,5%
BioPE + 60% CaCO3 Natural	$1,52 \pm 0,03$ Gpa	1,8%
PLA	$1,07 \pm 0,02$ Gpa	1,5%
PLA + 20% CaCO3 Natural	$1,75 \pm 0,03$ Gpa	1,5%
PLA + 40% CaCO3 Natural	$2,61 \pm 0,04$ Gpa	1,5%
PLA + 40% CaCO3 Precipitado	$2,33 \pm 0,03$ Gpa	1,5%

Tabla 14: mínimo error que podríamos conseguir de forma teórica para el módulo elástico

Los errores de esta tabla se han calculado considerando  $\varepsilon a = 10^{-5} m$ ,  $\varepsilon e_0 = 10^{-5} m$  y  $\varepsilon f_n = 0.07813 Hz$ .

Una vez hecho este análisis sobre el error asociado a los métodos y técnicas de medida se abordará otro de los principales puntos de interés en este trabajo de fin de máster: aplicar, en el campo de la ingeniería acústica, los parámetros mecánicos obtenidos previamente. En la siguiente sección se verá el apartado correspondiente al modelado acústico y la predicción de aislamiento de los materiales medidos.

#### 4.7. Modelado acústico

Como apartado final en esta sección de resultados, e inscribiendo este trabajo en el campo de la ingeniería acústica, es de interés el poder constatar la practicidad de los resultados obtenidos y su aplicación en el campo del conocimiento que concierne a la titulación que estoy cursando.

##### 4.7.1. Pérdidas por transmisión

Con los parámetros que hemos obtenido, se puede utilizar un modelo numérico para deducir las pérdidas por transmisión -un parámetro fundamental en acústica de la edificación- de los materiales que se han medido. Haciendo uso del modelo de Ookura y Saito para particiones impermeables monocapa homogéneas (K. Ookura, Y. Saito, 1978) implementado en MATLAB mediante las funciones proporcionadas en el artículo *Aislamiento acústico a ruido aéreo en acristalamiento de vidrio* (E. Escuder Et. Al., 2007). Para esta implementación, se decide utilizar un ángulo límite de  $80^{\circ}$  y los siguientes parámetros de entrada para cada material:

Material	Densidad de área (Kg/m <sup>2</sup> )	Módulo de Young (Gpa)	Loss Factor	Rigidez a flexión (N·m)
BioPE	3,38	0,80	0,18	4,3
BioPE + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	3,92	0,94	0,13	5
BioPE + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	4,55	1,15	0,12	6,2
BioPE + 40% CaCO <sub>3</sub> Precipitado	4,47	1,25	0,18	6,7
BioPE + 60% CaCO <sub>3</sub> Natural	5,17	1,52	0,15	8,2
PLA	4,66	1,07	0,06	5,8
PLA + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	5,26	1,75	0,17	9,4
PLA + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	6,10	2,61	0,18	14,1
PLA + 40% CaCO <sub>3</sub> Precipitado	5,91	2,33	0,24	12,5

Tabla 15: Valores utilizados para el cálculo de las pérdidas por transmisión

Se calculan las pérdidas por transmisión para cada una de las dos familias de materiales medidos y se muestran a continuación; se debe hacer hincapié en que estas pérdidas por transmisión se obtienen por el resultado de un modelo mecánico, se tendría que observar si las pérdidas son similares utilizando métodos estandarizados como el ASTM E-2611 (ASTM E2611-17) aplicados en plataformas experimentales pensadas para tal efecto (L. Onrubia, 2019).

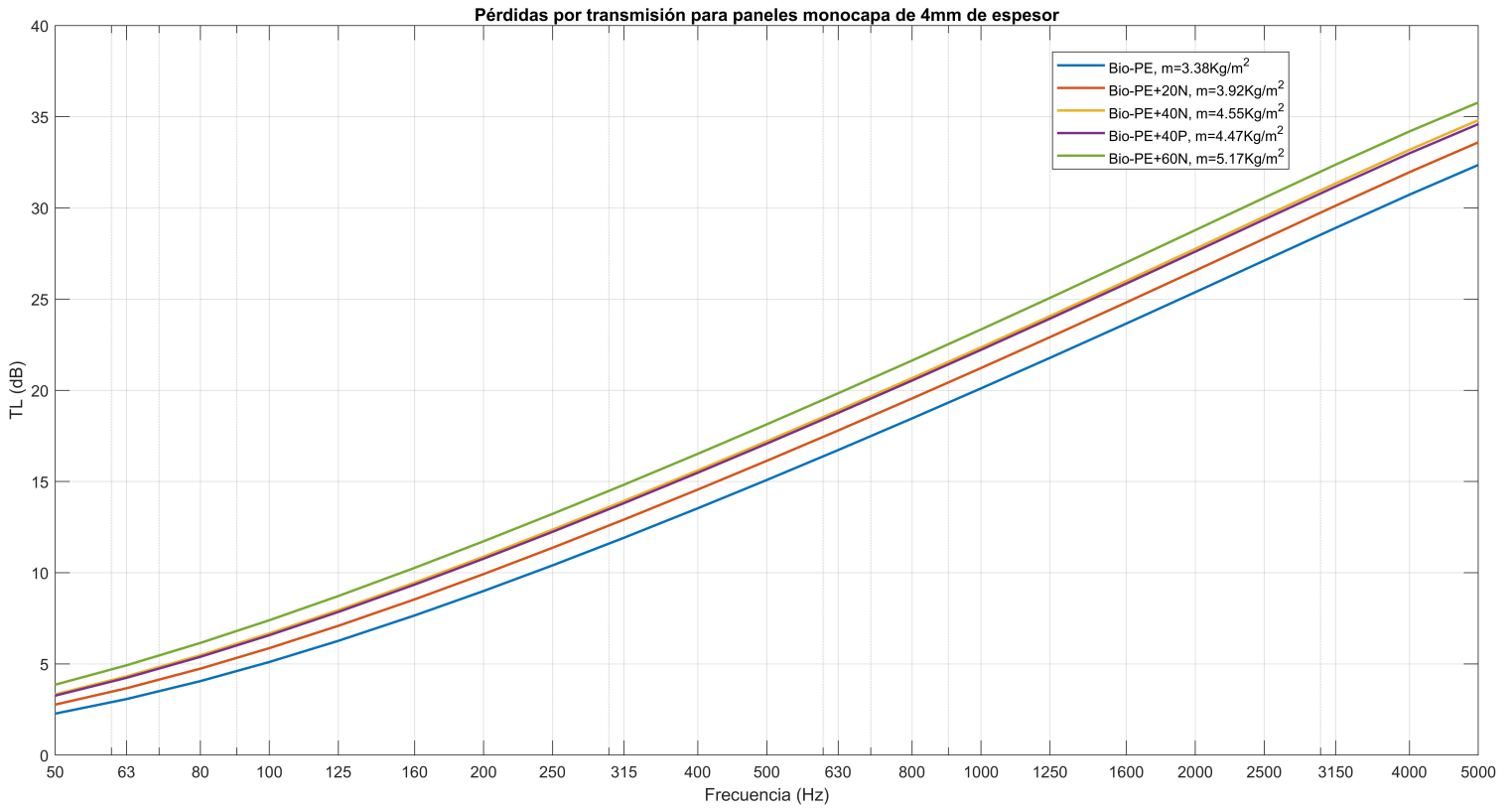


Figura 38: Pérdidas por transmisión (TL) para la familia de materiales Bio-Polietileno



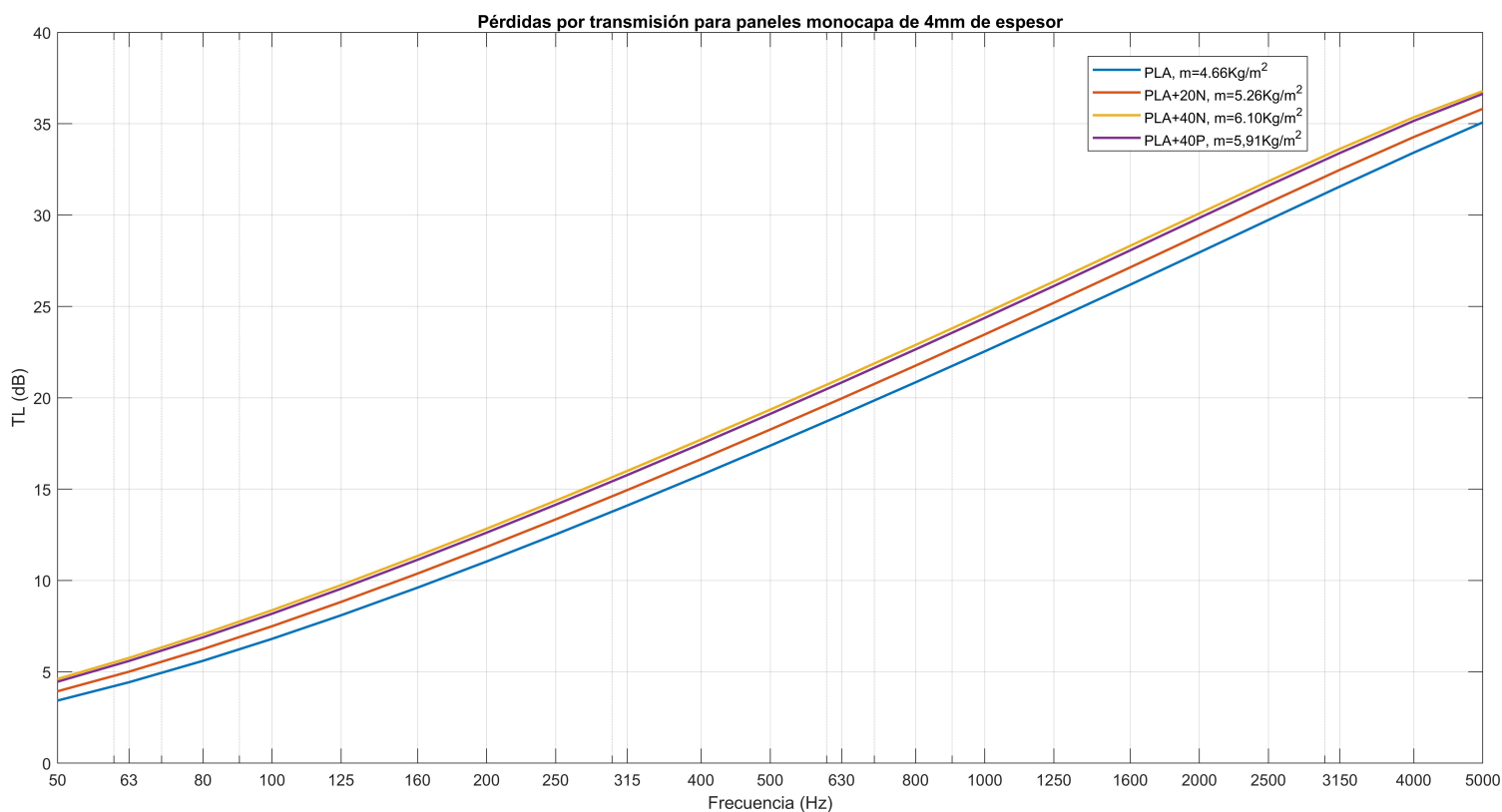


Figura 39: Pérdidas por transmisión (TL) para la familia de materiales PLA

Con la ayuda de esta predicción de pérdidas por transmisión mediante el modelado mecánico de los bio-composites caracterizados podemos transformar los datos de pérdidas por transmisión en valores de índice de reducción de ruido aéreo en concordancia a la norma UNE-EN ISO 717-1 (UNE-EN ISO 717-1:2013):

Frecuencia (Hz)	Transmission Loss (dB)								
	Bio-PE	Bio-PE + 20 N	Bio-PE + 40 N	Bio-PE + 40 P	Bio-PE + 60 N	PLA	PLA + 20 N	PLA + 40 N	PLA + 40 P
50	2,3	2,8	3,3	3,3	3,9	3,4	3,9	4,6	4,5
63	3,1	3,7	4,3	4,2	4,9	4,4	5,0	5,8	5,6
80	4,1	4,7	5,5	5,4	6,2	5,6	6,2	7,1	6,9
100	5,1	5,9	8,0	6,6	7,4	6,8	7,5	8,4	8,2
125	6,3	7,1	8,0	7,8	8,7	8,1	8,8	9,7	9,5
160	7,7	8,5	9,5	9,3	10,3	9,6	10,4	11,3	11,1
200	9,0	9,9	10,9	10,8	11,7	11,0	11,8	12,8	12,6
250	10,4	11,4	12,4	12,2	13,2	12,5	13,3	14,4	14,1
315	11,9	12,9	13,9	13,8	14,8	14,1	14,9	16,0	15,8
400	13,5	14,6	15,6	15,5	16,5	15,8	16,6	17,7	17,5
500	15,1	16,1	17,2	17,1	18,1	17,4	18,3	19,4	19,1
630	16,7	17,8	18,9	18,8	19,8	19,1	20,0	21,1	20,8
800	18,5	19,6	20,7	20,5	21,6	20,8	21,8	22,9	22,7
1000	20,1	21,2	22,4	22,2	23,3	22,5	23,5	24,6	24,4
1250	21,8	22,9	24,1	23,9	25,1	24,3	25,2	26,4	26,1
1600	23,7	24,8	26,0	25,8	27,0	26,2	27,1	28,3	28,1
2000	25,4	26,6	27,8	27,6	28,8	28,0	28,9	30,1	29,8
2500	27,1	28,3	29,5	29,4	30,6	29,7	30,7	31,8	31,6
3150	28,9	30,1	31,3	31,2	32,4	31,6	32,5	33,6	33,4
4000	30,7	32,0	33,2	33,0	34,2	33,4	34,3	35,4	35,2
5000	32,4	33,6	34,8	34,6	35,8	35,1	35,8	36,8	36,6

Tabla 16: Pérdidas por transmisión en función de la frecuencia para todos los materiales medidos

#### 4.7.2. Predicción de aislamiento acústico

La norma ISO 717-1 (UNE-EN ISO 717-1:2013) nos permite cuantificar con un único valor la capacidad de aislamiento acústico de un material. Utilizando los datos que nos proporciona nuestra plataforma, así como las pérdidas por transmisión proporcionadas por el modelo mecánico, se va a calcular la magnitud global para el aislamiento a ruido aéreo acorde con este procedimiento normativo. Dicha magnitud global se presenta de la siguiente forma:

$R_w(C;C_{tr})$  donde  $R_w$  es la magnitud global del aislamiento acústico a ruido aéreo proporcionado por el material en cuestión y  $C, C_{tr}$  son los coeficientes de adaptación espectral.

A modo de ejemplo, y para evitar hacer innecesariamente largo este documento de memoria, se va a mostrar el cálculo detallado únicamente de la primera muestra, correspondiente a Bio-PE elemental.

Frecuencia (Hz)	R (o TL) (dB)	Valores de Referencia	Valores Desplazados -32	Desviación Desfavorable	Espectro Nº1 C	Lil-Ri	$10^{(Lil-Ri)/10}$	Espectro Nº2 Ctr	Lil-Ri	$10^{(Lil-Ri)/10}$
50	2,3									
63	3,1									
80	4,1									
100	5,1	33	1	0,0	-29	-34,1	0,0003885	-20	-25,1	0,00308634
125	6,3	36	4	0,0	-26	-32,3	0,0005936	-20	-26,3	0,00236322
160	7,7	39	7	0,0	-23	-30,7	0,0008597	-18	-25,7	0,00271853
200	9,0	42	10	1,0	-21	-30,0	0,0010007	-16	-25,0	0,00316441
250	10,4	45	13	2,6	-19	-29,4	0,0011475	-15	-25,4	0,00288228
315	11,9	48	16	4,1	-17	-28,9	0,0012835	-14	-25,9	0,00256092
400	13,5	51	19	5,5	-15	-28,5	0,001402	-13	-26,5	0,00222206
500	15,1	52	20	4,9	-13	-28,1	0,0015548	-12	-27,1	0,00195741
630	16,7	53	21	4,3	-12	-28,7	0,001341	-11	-27,7	0,00168824
800	18,5	54	22	3,5	-11	-29,5	0,0011329	-9	-27,5	0,00179549
1000	20,1	55	23	2,9	-10	-30,1	0,000976	-8	-28,1	0,00154681
1250	21,8	56	24	2,2	-9	-30,8	0,0008358	-9	-30,8	0,00083575
1600	23,7	56	24	0,3	-9	-32,7	0,0005422	-10	-33,7	0,00043067
2000	25,4	56	24	0,0	-9	-34,4	0,0003649	-11	-36,4	0,00023023
2500	27,1	56	24	0,0	-9	-36,1	0,0002449	-13	-40,1	9,7484E-05
3150	28,9	56	24	0,0	-9	-37,9	0,0001621	-15	-43,9	4,0709E-05
4000	30,7									
5000	32,4									
		<b>Suma Rw</b>	<b>31,3 20</b>	<b>&lt;32 dB</b>	<b>Suma -10logSuma C</b>	<b>0,01383 18,59179 -1</b>	<b>dB</b>	<b>Suma -10logSuma Ctr</b>	<b>0,027621 15,58767 -4</b>	<b>dB</b>

Tabla 17: Ejemplo de procedimiento normativo para el cálculo del aislamiento acústico para la muestra de Bio-PE

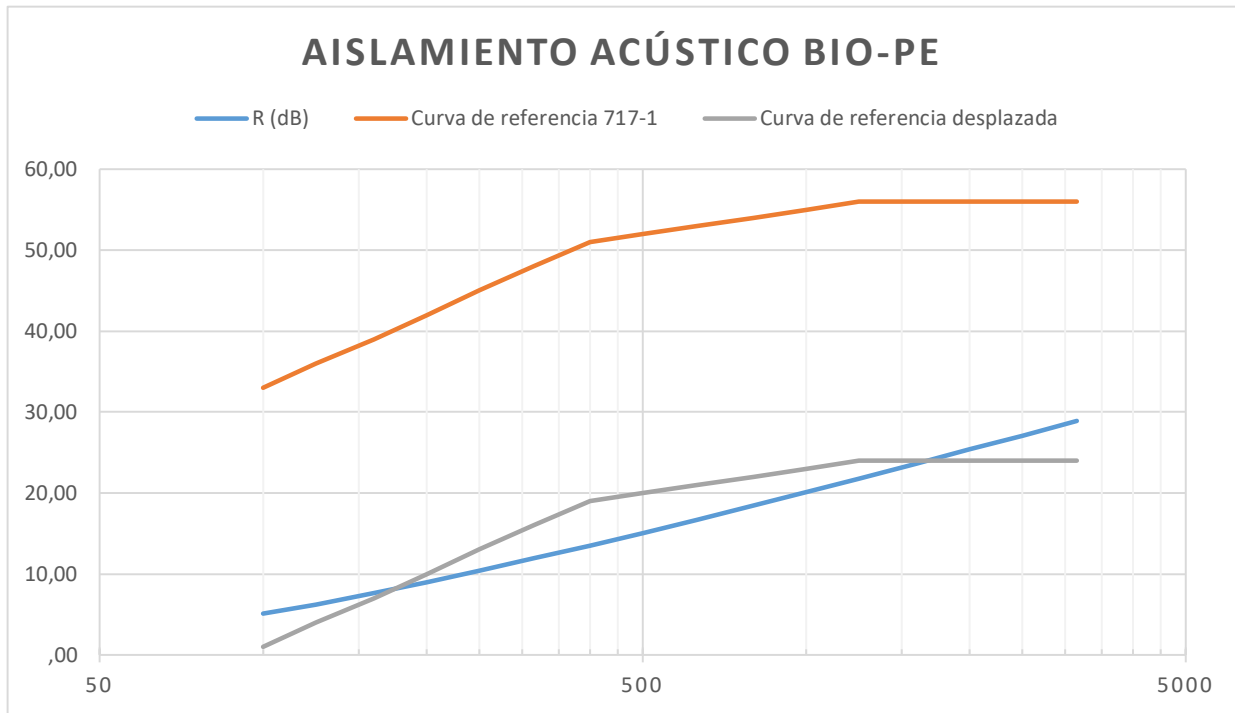


Figura 40: Curvas de referencia, desplazada y de los datos de TL predichos por el modelo acústico

Ahora se van a mostrar todas las magnitudes globales que se han obtenido mediante la aplicación de la norma ISO 717-1 para el resto de materiales:

Material	Espesor (mm)	Densidad de área (Kg/m <sup>2</sup> )	Magnitud global Rw (C ; Ctr)
BioPE	4	3,38	20 (-1 ; -4) dB
BioPE + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	4	3,92	21 (-1 ; -4) dB
BioPE + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	4	4,55	22 (-1 ; -4) dB
BioPE + 40% CaCO <sub>3</sub> Precipitado	4	4,47	22 (-1 ; -5) dB
BioPE + 60% CaCO <sub>3</sub> Natural	4	5,17	23 (-1 ; -5) dB
PLA	4	4,66	22 (-1 ; -4) dB
PLA + 20% CaCO <sub>3</sub> Natural	4	5,26	23 (-1 ; -4) dB
PLA + 40% CaCO <sub>3</sub> Natural	4	6,10	24 (-1 ; -4) dB
PLA + 40% CaCO <sub>3</sub> Precipitado	4	5,91	24 (-1 ; -5) dB

Tabla 18: Magnitudes globales del índice de aislamiento acústico a ruido aéreo por material

De acuerdo con los datos medidos, los materiales que mayor porcentaje de mezcla de CaCO<sub>3</sub> tienen son aquellos que mejores pérdidas por transmisión presentan así como un mayor valor global de reducción de ruido aéreo, lo que los convierte en mejores aislantes acústicos que sus variantes de menor porcentaje de mezcla o elementales, aunque la diferencia es relativamente escasa entre ellos.

Como se ha visto hasta ahora, esta plataforma que se ha propuesto no solamente obtiene parámetros mecánicos de importancia en el mundo de la ingeniería estructural (como el módulo de Young o la rigidez) sino que con los datos que se obtienen se puede utilizar en el ámbito de la ingeniería acústica, arquitectura y edificación para la predicción de aislamiento de los materiales.

Con esto se concluye la sección de resultados y se procederá, en el siguiente capítulo, a realizar las conclusiones sobre este trabajo de fin de máster.

## 5. Conclusiones y líneas futuras

Antes de entrar en las conclusiones generales del proyecto, hagamos algunas conclusiones sobre las medidas obtenidas:

- Se ha comprobado que los materiales de la familia PLA ofrecen ventajas algo mayores como aislantes frente a los de la familia Bio-PE (de hecho para obtener mejor índice de reducción acústica en el Bio-PE que en el PLA sin aditivos hace falta añadirle a la mezcla del PE mas de 40% de carbonato cálcico).
- También, teniendo en cuenta que, por ejemplo una placa de yeso laminado de masa  $7.2Kg/m^2$  y 10mm de espesor ofrece un índice de reducción acústica  $R_w$  de 26 dB (R. Estelles); esto es bastante comparable a los valores de reducción que se han calculado para los bio-composites  $R_w = [20 - 24]dB$ , de un espesor inferior (4mm) y masa por metro cuadrado inferior, convirtiéndolos en una buena alternativa ecológica al yeso laminado a la hora de utilizarlos en acústica de la edificación.
- Asimismo, también hemos visto que los PE presentan una rigidez inferior a los PLA, así como un módulo elástico mas bajo, lo cual concuerda con lo que se puede encontrar en la literatura.
- Se han observado los diferentes efectos que tiene el suavizado sobre los resultados obtenidos, observando que la desviación típica entre métodos de suavizado es mínima entre las medidas realizadas mediante la aplicación de los diferentes métodos.

En cuanto a las conclusiones generales:

- Se han explicado los fundamentos del método resonante para la caracterización de materiales rígidos
- Se ha visto que se puede implementar una configuración experimental que, mediante el uso de vibraciones y del método resonante, nos permite la obtención de parámetros importantes para la predicción mecánica (Módulo de Young, Rigidez, Rigidez a Flexión, *Loss Factor*) y acústica (Pérdidas por transmisión, valores globales de aislamiento a ruido aéreo) del comportamiento de los materiales medidos.
- Se ha desarrollado un método que permite "reciclar" muestras. Las muestras circulares se usan en tubos de transmisión, lo que permite con la misma muestra hacer ensayos de parámetros mecánicos y de TL en tubo de impedancia.
- Hemos comparado algunos de los resultados obtenidos por nuestra plataforma para módulo de Young con aquellos obtenidos para exactamente los mismos materiales mediante ensayo destructivo, encontrando diferencias de entre [5-11]%. Dichas diferencias pueden deberse a una variedad de factores, como el uso de suavizado, la temperatura, el hecho de que la muestra que medimos no está sujeta únicamente por el diámetro exterior, sino que también el portamuestras atrapa unos milímetros del diámetro interior y eso puede hacer que fluctúen los resultados por pequeñas variaciones de las condiciones de contorno que no se tienen en cuenta en las expresiones teóricas utilizadas por nuestro programa a la hora de obtener los parámetros mecánicos, etc... No obstante, asumiendo que dichas diferencias no son grandes, podemos validar nuestra plataforma y decir que los parámetros obtenidos por la misma pueden compararse hasta cierto punto con aquellos obtenidos mediante el uso de ensayos normativos.

En cuanto a líneas futuras y cosas que me hubiese gustado hacer si hubiese dispuesto del tiempo suficiente:

- Habría sido realmente interesante implementar una plataforma con el método no resonante y comparar los resultados obtenidos por el método que se ha implementado con aquellos que proporciona el método no resonante.

- Asimismo, habría sido interesante disponer de todas las propiedades mecánicas de los bio-composites que hemos medido para poder realizar la comparación de los resultados, en ese sentido habría sido interesante medir en laboratorio sus pérdidas por transmisión mediante ensayo normativo con el fin de comparar las que se han obtenido mediante la aplicación del modelo mecánico y poder ver si el índice de reducción acústico obtenido para todos los materiales medidos con la plataforma coincide con el obtenido mediante medidas en tubo de impedancia.
- Habría sido de interés realizar simulaciones mediante elementos finitos de nuestra plataforma para evaluar si existe algún modo propio perjudicial que pueda afectar en cierto modo a la realización de las medidas.
- Durante la fase de diseño y fabricación de la plataforma, también se fabricó un portamuestras de 20x20 cm<sup>2</sup> para ensayar muestras mas grandes (tipo pladur y similar), pero debido a complicaciones de tiempo a raíz del Covid-19 no fue posible realizar medidas con el. Este portamuestras es interesante porque se adapta a las muestras que se ensayan según UNE-EN 29052-1:1994 de ensayos de rigidez dinámica.

## 6. Bibliografía

Alba, J., Reixach, R., Del Rey, R., Arbat, G., Espinach, F. X., & Mutjé, P. (2015). Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated gypsum boards. *Construction and Building Materials*, 77, 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.041>

ASTM C469 / C469M-14, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM E2611-17, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)

Brüel & Kjaer. (1994). Damping Measurements - From Impulse Response Functions - From Resonance and Non-resonance Excitation Techniques (Vol. 2). <https://www.bksv.com/media/doc/bv0045.pdf>

Escuder, E., Alba, J., Soriano, J. (2007). Aislamiento acústico a ruido aéreo en acristalamientos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, ISSN 0366-3175, Vol. 46, N<sup>o</sup>. 4, 2007, pags. 197-204. 46. [10.3989/cyv.2007.v46.i4.237](https://doi.org/10.3989/cyv.2007.v46.i4.237).

Estelles, R. (s. f.). Valores de aislamiento para diferentes materiales. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (Universidad de Buenos Aires). <http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/Tablas-de-Indice-de-Reduccion.pdf>

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>

Matweb. (s. f.). Overview of materials for Polyethylene (PE), Molded. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=012541b0d0a14512ab711efc8411e61e&ckck=1>

Miller, J. D. (1974). Effects of noise on people. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(3), 729–764. <https://doi.org/10.1121/1.1903322>

Onrubia, L. (2019, julio). Puesta a punto de una configuración experimental para medida de pérdidas por transmisión (TFG). Universidad de Alicante

Ookura K., Saito Y. “Transmission loss of multiple panels containing sound absorbing material in a random incidence field”. *Internoise 78*, 637-642. 1978

Recuero, M. (1999). Ingeniería acústica. Paraninfo.

UNE-EN ISO 717-1:2013. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1:2013)



## 7. Anexos

**7.1.** Anexo 1: Código en MATLAB® para la obtención de los parámetros mecánicos a partir de las medidas de fuerza y aceleración:

```
%% TFM - Lucas Onrubia Fontangordo
%% Limpieza del espacio de trabajo

close all
clear all
clc

%% Carga de los datos

load(uigetfile('*.mat'));
% Elegimos un vector de frecuencias, será el mismo para todas las medidas
f = M1P1A(:,1);
% Quitamos la primera columna de todas las medidas, ya que es la
frecuencia
% y es la misma para todas (ya tenemos guardado el vector f para eso)
M1P1A(:,1) = [];
M1P2A(:,1) = [];
M1P3A(:,1) = [];
M1P1F(:,1) = [];
M1P2F(:,1) = [];
M1P3F(:,1) = [];
M2P1A(:,1) = [];
M2P2A(:,1) = [];
M2P3A(:,1) = [];
M2P1F(:,1) = [];
M2P2F(:,1) = [];
M2P3F(:,1) = [];
M3P1A(:,1) = [];
M3P2A(:,1) = [];
M3P3A(:,1) = [];
M3P1F(:,1) = [];
M3P2F(:,1) = [];
M3P3F(:,1) = [];

%% 'Pequeñas' operaciones con los datos recogidos
```

```

%% Descomentar si se quiere hacer el smoothing antes de promediar los
datos,
%% sino se hará después de hacer el promedio. los resultados varían poco
se
%% haga el smoothing antes o después.
% smoothing = input('¿Deseas suavizar los datos originales? (S/N)
{Recomendable suavizar}: ','s');
% if(smoothing == 'S' || smoothing == 's')
%     metodo = 'loess';
%     M1P1A = smoothdata(M1P1A,metodo);M2P1A = smoothdata(M2P1A,metodo);
M3P1A = smoothdata(M3P1A,metodo);
%     M1P2A = smoothdata(M1P2A,metodo);M2P2A = smoothdata(M2P2A,metodo);
M3P2A = smoothdata(M3P2A,metodo);
%     M1P3A = smoothdata(M1P3A,metodo);M2P3A = smoothdata(M2P3A,metodo);
M3P3A = smoothdata(M3P3A,metodo);
%     M1P1F = smoothdata(M1P1F,metodo);M2P1F = smoothdata(M2P1F,metodo);
M3P1F = smoothdata(M3P1F,metodo);
%     M1P2F = smoothdata(M1P2F,metodo);M2P2F = smoothdata(M2P2F,metodo);
M3P2F = smoothdata(M3P2F,metodo);
%     M1P3F = smoothdata(M1P3F,metodo);M2P3F = smoothdata(M2P3F,metodo);
M3P3F = smoothdata(M3P3F,metodo);
% else
% end

% Promediado de los resultados para consolidar una sola muestra a partir
de
% las 3 que hemos medido
for i=1:length(f)
    % Aceleración, posiciones 1 a 3
    P1A(i,:) = (M1P1A(i)+M2P1A(i)+M3P1A(i))./3;
    P2A(i,:) = (M1P2A(i)+M2P2A(i)+M3P2A(i))./3;
    P3A(i,:) = (M1P3A(i)+M2P3A(i)+M3P3A(i))./3;
    % Fuerza, posiciones 1 a 3
    P1F(i,:) = (M1P1F(i)+M2P1F(i)+M3P1F(i))./3;
    P2F(i,:) = (M1P2F(i)+M2P2F(i)+M3P2F(i))./3;
    P3F(i,:) = (M1P3F(i)+M2P3F(i)+M3P3F(i))./3;
end

%% Smoothing de los datos recogidos, útil para quitar la gran cantidad
de
%% ruido que hay en los datos y para limpiarlos. útil también en el
cálculo
%% de la función de transferencia.
smoothing = input('¿Deseas suavizar los datos originales? (S/N)
{Recomendable suavizar}: ','s');
if(smoothing == 'S' || smoothing == 's')
    metodo = 'loess';
    P1A = smoothdata(P1A,metodo);P2A = smoothdata(P2A,metodo); P3A =
smoothdata(P3A,metodo);

```

```

    P1F = smoothdata(P1F,metodo);P2F = smoothdata(P2F,metodo); P3F =
smoothdata(P3F,metodo);
else
end

% Representación de las medidas de la muestra:
figure(1);
subplot(2,3,1)
plot(f,P1A)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Aceleración (m/s^2)')
grid
title('Posición 1')
subplot(2,3,2)
plot(f,P2A)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Aceleración (m/s^2)')
grid
title('Posición 2')
subplot(2,3,3)
plot(f,P3A)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Aceleración (m/s^2)')
grid
title('Posición 3')

subplot(2,3,4)
plot(f,P1F)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Fuerza (N)')
grid
title('Posición 1')
subplot(2,3,5)
plot(f,P2F)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Fuerza (N)')
grid
title('Posición 2')
subplot(2,3,6)
plot(f,P3F)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Fuerza (N)')
grid
title('Posición 3')

%% Procesado

% Para poder realizar la función de transferencia necesitamos dividir un
% desplazamiento entre una fuerza. Para obtener el desplazamiento hay que
% derivar dos veces los datos de aceleración que tenemos.

```

```

% Obtención de los datos de desplazamiento a partir de los de
aceleración.
% Usamos integración numérica (cumtrapz).
% Según Brüel la frecuencia de muestreo es 2,56 veces la frecuencia
máxima
% medida.
Fs = 2.56*f(end);
% Con esto obtenemos el tiempo de muestreo, que es un parámetro necesario
% para poder calcular la integral numérica
Ts = 1/Fs;
% Ahora tenemos que realizar la integración numérica dos veces para los
% datos de aceleración y así sacar el desplazamiento:
% Primera derivada, Velocidad:
VelP1 = cumtrapz(Ts,P1A);
VelP2 = cumtrapz(Ts,P2A);
VelP3 = cumtrapz(Ts,P3A);
% Segunda derivada, Desplazamiento:
DesplP1 = cumtrapz(Ts,VelP1);
DesplP2 = cumtrapz(Ts,VelP2);
DesplP3 = cumtrapz(Ts,VelP3);

% Calculamos las funciones de transferencia en los 3 puntos medidos,
según
% Brüel es la compliancia del sistema (o FRF):
HP1 = DesplP1./P1F;
HP2 = DesplP2./P2F;
HP3 = DesplP3./P3F;

figure(2);
subplot(2,3,1)
plot(f,VelP1);
xlabel('Frecuencia (hz)')
ylabel('Velocidad (m/s)')
title('Posición 1')
grid
subplot(2,3,2)
plot(f,VelP2);
xlabel('Frecuencia (hz)')
ylabel('Velocidad (m/s)')
title('Posición 2')
grid
subplot(2,3,3)
plot(f,VelP3);
xlabel('Frecuencia (hz)')
ylabel('Velocidad (m/s)')
title('Posición 3')
grid
subplot(2,3,4)
plot(f,DesplP1);
xlabel('Frecuencia (hz)')

```

```

ylabel('Desplazamiento (m)')
title('Posición 1')
grid
subplot(2,3,5)
plot(f,DesplP2);
xlabel('Frecuencia (hz)')
ylabel('Desplazamiento (m)')
title('Posición 2')
grid
subplot(2,3,6)
plot(f,DesplP3);
xlabel('Frecuencia (hz)')
ylabel('Desplazamiento (m)')
title('Posición 3')
grid

% Gráficas de la función de transferencia. Limitamos el eje x a la 'zona
de
% interés', fuera de ahí la gráfica se sale de los límites
% límite de frecuencia:
lim = 1200;
index = find(f==lim);

figure(3);
subplot(3,1,1)
plot(f,HP1,'k')
xlim([0 lim])
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('H(f)')
title('Función de transferencia Posición 1')
grid
subplot(3,1,2)
plot(f,HP2,'k')
xlim([0 lim])
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('H(f)')
title('Función de transferencia Posición 2')
grid
subplot(3,1,3)
plot(f,HP3,'k')
xlim([0 lim])
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('H(f)')
title('Función de transferencia Posición 3')
grid

% Frecuencias de resonancia mecánicas dentro del rango ampliado de
% análisis:
% En el primer punto de medida:
rHP1 = HP1(1:index);
[m1 i1] = max(rHP1);

```

```

f1 = f(i1); w1=2*pi*f1;
% En el segundo punto de medida:
rHP2 = HP2(1:index);
[m2 i2] = max(rHP2);
f2 = f(i2); w2=2*pi*f2;
% En el tercer punto de medida:
rHP3 = HP3(1:index);
[m3 i3] = max(rHP3);
f3 = f(i3); w3=2*pi*f3;

% La rigidez estática, k, se puede obtener despejando la frecuencia de
resonancia
% mecánica. Para ello necesitamos la masa m de cada una de las muestras.
disp(' ')
prompt = 'Introduce la masa media de las muestras (en gramos): ';
m = input(prompt);
m = m*10^-3; %Pasamos de gramos a Kg
disp(' ')

% Rigidez (en N/m)
k1 = m*(w1^2);
k2 = m*(w2^2);
k3 = m*(w3^2);

LF = input('Deseas hacer el cálculo del Loss Factor mediante método
visual? (S/N): ','s');
if(LF == 'S' || LF == 's')
    disp(['Puede que este método NO funcione correctamente para todas las
curvas...'])
    disp(' ')
    % Cálculo del loss factor (usamos los datos de aceleración en lugar
de la
    % FRF:
    % Primero encontramos los picos en frecuencia para la aceleración
    figure(4);
    plot(f(1:round(length(f)./2)),P1A(1:round(length(P1A)./2)));
    xlabel('Frecuencia (Hz)')
    ylabel('Aceleración')
    title('Selecciona el máximo correspondiente a la frecuencia
fundamental (1-3)')
    [locs1 pks1] = ginput(1);
    figure(5);
    plot(f(1:round(length(f)./2)),P2A(1:round(length(P2A)./2)));
    xlabel('Frecuencia (Hz)')
    ylabel('Aceleración')
    title('Selecciona el máximo correspondiente a la frecuencia
fundamental (2-3)')
    [locs2 pks2] = ginput(1);
    figure(6);
    plot(f(1:round(length(f)./2)),P3A(1:round(length(P3A)./2)));
    xlabel('Frecuencia (Hz)')

```

```

ylabel('Aceleración')
title('Selecciona el máximo correspondiente a la frecuencia
fundamental (3-3)')
[locs3 pks3] = ginput(1);

close.figure(4),figure(5),figure(6))

% Indexamos las frecuencias
[d4,locs1] = min(abs(f-locs1));
[d5,locs2] = min(abs(f-locs2));
[d6,locs3] = min(abs(f-locs3));

% Ahora con esos picos, vamos a calcular el 3dB Bandwidth, viendo a
que
% frecuencias la amplitud máxima cae 0.707 veces tanto a un lado como
a
% otro de la curva, con eso sacamos el loss factor:
% Margen:
M = 200;
A = round(locs1-M); B = round(locs1+M);
C = round(locs2-M); D = round(locs2+M);
E = round(locs3-M); F = round(locs3+M);

figure(7);
plot(f(A:B),P1A(A:B));
hold on
plot(f(A:B),ones(length(A:B)).*(pks1*0.707));
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Aceleración')
xlim([f(A) f(B)])
title('Loss Factor: Selecciona los 2 puntos de corte con la curva
horizontal (1-3)')
[f3dB1 ~] = ginput(2);

figure(8);
plot(f(C:D),P2A(C:D));
hold on
plot(f(C:D),ones(length(C:D)).*(pks2*0.707));
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Aceleración')
xlim([f(C) f(D)])
title('Loss Factor: Selecciona los 2 puntos de corte con la curva
horizontal (2-3)')
[f3dB2 ~] = ginput(2);

figure(9);
plot(f(E:F),P3A(E:F));
hold on
plot(f(E:F),ones(length(E:F)).*(pks3*0.707));
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Aceleración')
xlim([f(E) f(F)])

```

```

    title('Loss Factor: Selecciona los 2 puntos de corte con la curva
horizontal (3-3)')
    [f3dB3 ~] = ginput(2);

    close(figure(7),figure(8),figure(9))

    LF1 = (abs(f3dB1(1)-f3dB1(2)))./f1;
    LF2 = (abs(f3dB2(1)-f3dB2(2)))./f2;
    LF3 = (abs(f3dB3(1)-f3dB3(2)))./f3;
    disp('Loss Factor: ')
    LF = [LF1 LF2 LF3];
    oLF = isoutlier(LF);
    if(oLF(1)==1)
        disp('Atención: El Loss Factor en la posición 1 es outlier')
    else
        if(oLF(2)==1)
            disp('Atención: El Loss Factor en la posición 2 es outlier')
        else
            if(oLF(3)==1)
                disp('Atención: El Loss Factor en la posición 3 es
outlier')
            end
        end
    end
    disp(['El Loss Factor en la posición 1 es: ', num2str(round(LF1,3))])
    disp(['El Loss Factor en la posición 2 es: ', num2str(round(LF2,3))])
    disp(['El Loss Factor en la posición 3 es: ', num2str(round(LF3,3))])
else
    disp(['Has elegido seguir sin calcular el Loss Factor...'])
end
disp(' ')
disp('Rigidez: ')
k = [k1 k2 k3];
ok = isoutlier(k);
if(ok(1)==1)
    disp('Atención: La rigidez en la posición 1 es outlier')
else
    if(ok(2)==1)
        disp('Atención: La rigidez en la posición 2 es outlier')
    else
        if(ok(3)==1)
            disp('Atención: La rigidez en la posición 3 es outlier')
        end
    end
end
disp(['La Rigidez Estática en la posición 1 es: ',
num2str(round((k1./1000),0)), ' kN/m'])
disp(['La Rigidez Estática en la posición 2 es: ',
num2str(round((k2./1000),0)), ' kN/m'])
disp(['La Rigidez Estática en la posición 3 es: ',
num2str(round((k3./1000),0)), ' kN/m'])

% Cálculo de módulo de Young:

```



```

% Para el cálculo necesitamos el espesor de las muestras, en nuestro caso
% todas son idénticas, circulares y de 4mm de espesor:
e0 = 4*(10^-3); % En metros
% También conocemos el radio de la muestra circular, 4cm:
a = 4*(10^-2); % En metros
% Con los datos del peso de la muestra podemos conocer la densidad:
% Calculamos el volumen de la muestra:
v = pi*(a^2)*e0; % En m3
% Deducimos la densidad:
rho = m/v; % En Kg/m3

% Según el libro de Recuero y la norma ASTM E756, y considerando que el
% coeficiente de Poisson para un material rígido es 0.1 o menos; podemos
% considerar el módulo de Young como (consideramos la fórmula donde hay una
% placa apoyada en su contorno circular):
% En teoría habría que elegir un número de modo n, elegiremos n=1, el
% primer modo:
nm = 1;
% El coeficiente depende de como esté apoyada la placa:
coef = 0.172;
% El módulo de Young es:
E1 = (0.99*(a^4)*(f1^2)*rho)/((coef^2)*(nm^4)*(e0^2));
E2 = (0.99*(a^4)*(f2^2)*rho)/((coef^2)*(nm^4)*(e0^2));
E3 = (0.99*(a^4)*(f3^2)*rho)/((coef^2)*(nm^4)*(e0^2));

disp(' ')
disp('Módulo de young: ')
E = [E1 E2 E3];
oE = isoutlier(E);
if(oE(1)==1)
    disp('Atención: El módulo de Young en la posición 1 es outlier')
else
    if(oE(2)==1)
        disp('Atención: El módulo de Young en la posición 2 es outlier')
    else
        if(oE(3)==1)
            disp('Atención: El módulo de Young en la posición 3 es
outlier')
        end
    end
end
disp(['El módulo de Young en la posición 1 es: ',
num2str(round((E1./1000000),2)), ' MPa'])
disp(['El módulo de Young en la posición 2 es: ',
num2str(round((E2./1000000),2)), ' MPa'])
disp(['El módulo de Young en la posición 3 es: ',
num2str(round((E3./1000000),2)), ' Mpa'])

% Cálculo de la rigidez a la flexión:
D1 = (2.*E1.*(e0/2)^3)./(3*(1-(0.1^2)));

```

```

D2 = (2.*E2.*(e0/2)^3)./(3*(1-(0.1^2)));
D3 = (2.*E3.*(e0/2)^3)./(3*(1-(0.1^2)));
disp(' ')
disp('Rigidez a la flexión: ')
D = [D1 D2 D3];
oD = isoutlier(D);
if(oD(1)==1)
    disp('Atención: La rigidez a flexión en la posición 1 es outlier')
else
    if(oD(2)==1)
        disp('Atención: La rigidez a flexión en la posición 2 es
outlier')
    else
        if(oD(3)==1)
            disp('Atención: La rigidez a flexión en la posición 3 es
outlier')
        end
    end
end
end
disp(['La rigidez a flexión en la posición 1 es: ', num2str(round(D1,1)),
' Pa*m³'])
disp(['La rigidez a flexión en la posición 2 es: ', num2str(round(D2,1)),
' Pa*m³'])
disp(['La rigidez a flexión en la posición 3 es: ', num2str(round(D3,1)),
' Pa*m³'])

```

## 7.2. Hojas de características del equipo utilizado

# Model 2311 Isotron<sup>®</sup> force sensor

Endevco

## SPECIFICATIONS

The following performance specifications are typical values, referenced at +75°F (+24°C), 4 mA, and 100 Hz, unless otherwise noted.

DYNAMIC CHARACTERISTICS	Units	-1	-10	-100	-500
RANGE, F.S.	lbf	+5000/-500 [1]	+500/-500	+50/-50	+10/-10
	N	+22 000/-2200	+2200/-2200	+220/-220	+44/-44
VOLTAGE SENSITIVITY, Typical	mV/lbf	1	10	100	500
FREQUENCY RESPONSE					
Resonance Frequency	kHz	75			
MAXIMUM COMPRESSION	lbf (N)	+15 000 (+66 000)	+10 000 (+44 000)	+1000 (+4400)	+200 (+880)
MAXIMUM TENSION	lbf (N)	-500 (-2200)	-500 (-2200)	-500 (-2200)	-200 (-880)

## OUTPUT CHARACTERISTICS

OUTPUT POLARITY	Compression force produces positive output, tension force produces negative output				
DC OUTPUT BIAS VOLTAGE	Vdc	+9 to +12			
OUTPUT IMPEDANCE	$\Omega$	$\leq 100$			
FULL SCALE OUTPUT VOLTAGE	V	$\pm 5$			
RESIDUAL NOISE	equiv. lbf rms	0.07	0.007	0.0007	0.00014
GROUNDING	Signal ground connected to case				

## POWER REQUIREMENT

COMPLIANCE VOLTAGE	Vdc	+18 to +24
SUPPLY CURRENT	mA	+2 to +10

## ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

TEMPERATURE RANGE	-67°F to +257°F (-55°C to +125°C)	
HUMIDITY	Epoxy sealed	
SINUSOIDAL VIBRATION LIMIT	g pk	5000
SHOCK LIMIT	g pk	10 000

## PHYSICAL CHARACTERISTICS

DIMENSIONS	See Outline Drawing	
WEIGHT	gm (oz)	28 (1)
CASE MATERIAL	17-4 PH Stainless Steel	
CONNECTOR/CABLE	Side mounted 10-32 receptacle, mates with Endevco 3000 Series Cable	
MOUNTING THREADS	1/4-28 UNF-2B, 0.175 deep	
MOUNTING TORQUE	lbf-in (Nm)	24 (2.7)

## CALIBRATION

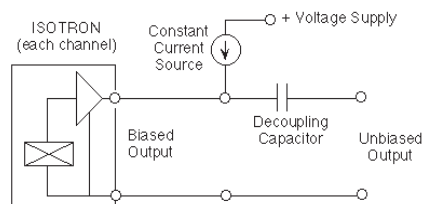
SUPPLIED:	
VOLTAGE SENSITIVITY	mV/lbf

## ACCESSORIES

EHM 1213	MOUNTING STUD, 1/4-28 to 1/4-28, 0.38" length
EHM 1214	IMPACT CAP, stainless steel
Model 3061-120 (10 ft)	CABLE ASSEMBLY

## NOTES

1. Tension rating is limited by the transducer design.
2. Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.



Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.



©ENDEVCO CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA  
(800) 982-6732 • (949) 493-8181 fax (949) 661-7231 • www.endevco.com • Email: applications@endevco.com

0805

**MEGGITT**  
smart engineering for  
extreme environments

Specifications – CLLD Accelerometer Type 4508 Family (top connector)

Type Number		4508-B	4508-B-003	4508-B-001	4508-B-002	4508-B-004	
<b>General</b>							
Weight	gram	4.8	4.9	4.8	4.8	4.8	
	oz	0.17		0.17	0.17	0.17	
Voltage Sensitivity (at 159.2 Hz, 4 mA supply current)	mV/ms <sup>-2</sup>	10 ± 5%		1 ± 5%	100 ± 10%	50 ± 5%	
	mV/g	98 ± 5%		9.8 ± 5%	980 ± 10%	490 ± 5%	
Frequency Range	Amplitude (±10%)	0.3 to 8000		0.1 to 8000	0.4 to 8000	0.2 to 8000	
	Phase (±5°)	Hz	2 to 5000		0.5 to 5000	2 to 5000	1 to 5000
Mounted Resonance Frequency	kHz	25		25	25	25	
Max. Transverse Sensitivity (at 30 Hz, 100 ms <sup>-2</sup> )	%	<5		<5	<5	<5	
Transverse Resonance Frequency	kHz	>18		>18	>18	>18	
Max Operational Continuous Sinusoidal Acceleration (± peak)	kms <sup>-2</sup>	0.7		7	0.07	0.15	
	g	70	71	700	7	14	
TEDS / Data Matrix Code		Yes		Yes	Yes	Yes	
<b>Electrical</b>							
Bias Voltage (at full temp. and curr. range)	V	13 ± 1		13 ± 1	13 ± 2	13 ± 2	
Power Supply	Constant current	mA	2 to 20		2 to 20	2 to 20	
	Unloaded supply voltage	V	24 to 30*		24 to 30*	24 to 30*	
Output Impedance	Ω	30		30	30	30	
Start-up time (to final bias ±10%)	s	<5		<50	<5	<5	
Residual Noise (inherent rms broadband noise in the specified frequency range)	μV	<35		<8	<150	<80	
	μg	<350		<800	<150	<160	
Noise (spectral)	mms <sup>-2</sup> /√Hz (μg/√Hz)	10 Hz	0.15 (15)		0.25 (25)	0.08 (8)	0.08 (8)
		100 Hz	0.035 (3.5)		0.06 (6)	0.02 (2)	0.02 (2)
		1000 Hz	0.02 (2)		0.035 (3.5)	0.01 (1)	0.01 (1)
<b>Environmental</b>							
Operating Temperature Range	°C	-54 to +121		-54 to +121	-54 to +100	-54 to +100	
	°F	-65 to +250		-65 to +250	-65 to +212	-65 to +212	
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°C	0.06		0.06	0.12	0.12	
Temperature Transient Sensitivity (3 Hz Lower Limiting Freq. (-3 dB, 6 dB/octave))	ms <sup>-2</sup> /°C	0.3		0.3	0.3	0.3	
	g/°F	0.0165		0.0165	0.0165	0.0165	
Magnetic Sensitivity (50 Hz, 0.038 T)	ms <sup>-2</sup> /T	3		3	3	3	
	g/kG	0.03		0.03	0.03	0.03	
Base Strain Sensitivity (at 250 με in base plane)	ms <sup>-2</sup> /με	0.005 <sup>†</sup>		0.005 <sup>†</sup>	0.005 <sup>†</sup>	0.005 <sup>†</sup>	
	g/με	0.0005 <sup>†</sup>		0.0005 <sup>†</sup>	0.0005 <sup>†</sup>	0.0005 <sup>†</sup>	
Max. Non-destructive Shock (± peak)	kms <sup>-2</sup>	50		50	50	50	
	g	5000		5000	5000	5000	
<b>Mechanical</b>							
Case Material		Titanium ASTM Grade 2					
Piezoelectric Sensing Element		PZ 23	PZ 23	PZ 27	PZ 27		
Construction		ThetaShear					
Sealing		Hermetic					
Electrical Connector		Top, 10–32 UNF-2A					
Mounting Slots (pairs)		1	0	1	1	1	
Dimensions (excluding connector)	mm (in)	10 × 10 × 10 (0.4 × 0.4 × 0.4)					

\* Min. +18 V DC (reduced measuring range)

† Mounted on adhesive tape 0.09 mm thick

**Note:** All values are typical at 25 °C (77 °F), unless measurement uncertainty is specified. All uncertainty values are specified at 2σ, that is, expanded uncertainty using a coverage factor of 2)

**Polarity:** Positive (for an acceleration in the direction of the engraved arrows)

## Vibration Test System TV 50009

### TECHNICAL PARAMETERS Vibration exciter S 50009

Rated peak force $S_{pk}$	9 N
Frequency range	2-20000 Hz
Main resonance frequency	> 13000 Hz
Max. displacement Peak-Peak <sup>1</sup>	3 mm <sup>1</sup>
Max. velocity Sine	1.5 m/s
Max. acceleration Sine	60 g
Suspension stiffness	4 N/mm
Effective moving mass	0.015 kg
Total mass without/with trunnion	1.7 kg / 2.2 kg
Armature coupling thread size	M4

1) Specimen mass has an impact on the possible maximum displacement

### SCOPE OF DELIVERY, OPTIONS AND FEATURES OF THE SYSTEM

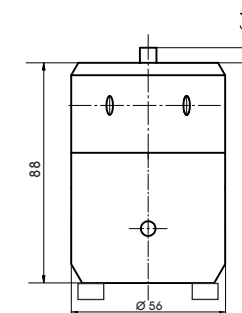
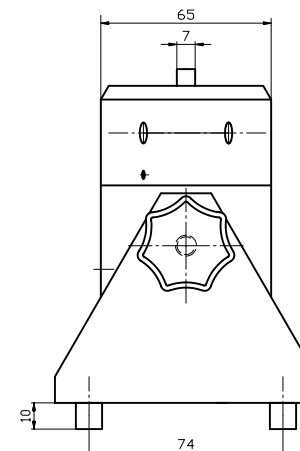
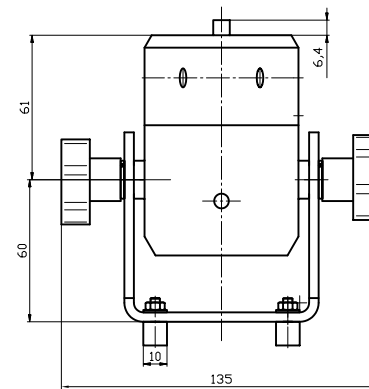
**Scope of delivery:**  
Vibration exciter 9 N  
Power amplifier 200 VA  
Connection cable (3 m(9.8 ft))  
Power cable (1.5 m(4.9 ft))  
for amplifier (CEE 7/7 connector)

**Options:**  
Trunnion mount (see right picture above)  
Cable extension  
Factory acceptance test

**Features:**  
Vibration isolation  
High cross-axial stiffness  
Minimum maintenance effort  
Made in Germany  
Service hotline



S 50009 (Example drawing) (mm)



### TECHNICAL PARAMETERS Power Amplifier DA 200

Output power $P_{RMS}$	200 VA
Frequency range	1.5 - 22000 Hz
Voltage-/Current mode	yes/no
Voltage $P_{RMS}$ , max.	30 V
Current $P_{RMS}$ , max.	10 A
Signal input voltage $P_{RMS}$	7 V
Distortion	< 0,1 %
Signal to noise ratio	> 90 dB
Total mass	3.5 kg
Dimensions (WxHxD)	390 x 80 x 260 mm
Power supply (Standard)	1 ~ / N / PE 100...264 V 50..60 Hz CEE 7/7
Recommended fuse protection (Standard)	10 A slow
Max. power consumption at 230 V	50 VA (operation with S 50009)
Interlocks:	Overload, Temperature, Clipping

**Features:**  
High Signal to noise ratio of >90 dB  
Low distortion factor of < 0.1 %  
Safety management system monitors functions as temperature, overcurrent and overvoltage



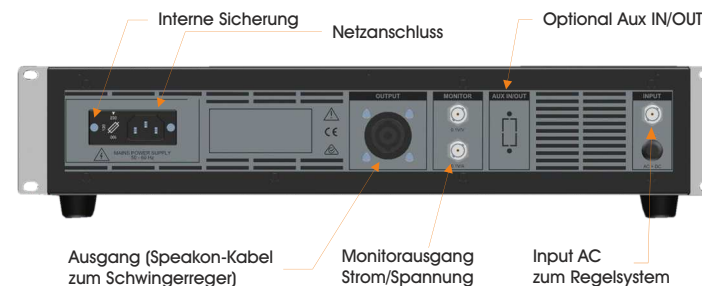
## TECHNISCHE PARAMETER Verstärker BAA 60

Sinusdauerleistung <sub>RMS</sub> *	60 VA
Frequenzbereich	2 Hz - 20 kHz
Spannungs-/Strom-Modus	ja/nein
Spannung <sub>RMS</sub> , max.	16 V
Strom <sub>RMS</sub> , max.	3,8 A
Signaleingangsspannung <sub>RMS</sub>	< 5 V
Klirrfaktor	< 0,1 %
Signal-/Rauschabstand	> 90 dB
Gesamtmasse	12 kg
Maße (BxHxT)	483 x 90 x 450 mm
Stromversorgung (Standard)	1~ / N / PE 230 V ± 5% 50 Hz, SCHUKO-Stecker
Empfohlene Absicherung (Standard)	16 A träge
Max. Leistungsaufnahme bei 230 V (Vollast)	140 VA
Max. Leistungsaufnahme bei 230 V (bei Betrieb mit Schwingprüfanlage TV 50009)	50 VA
Schutzeinrichtungen:	Überstrom, Temperatur, Clipping

### Eigenschaften:

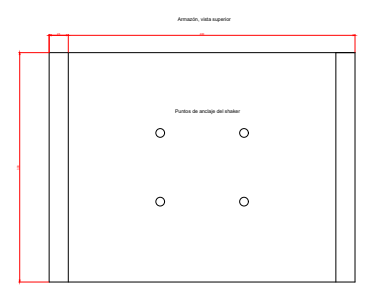
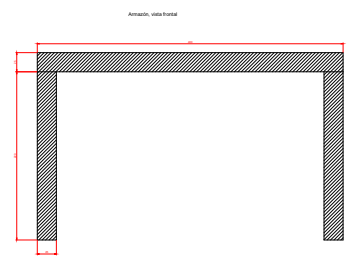
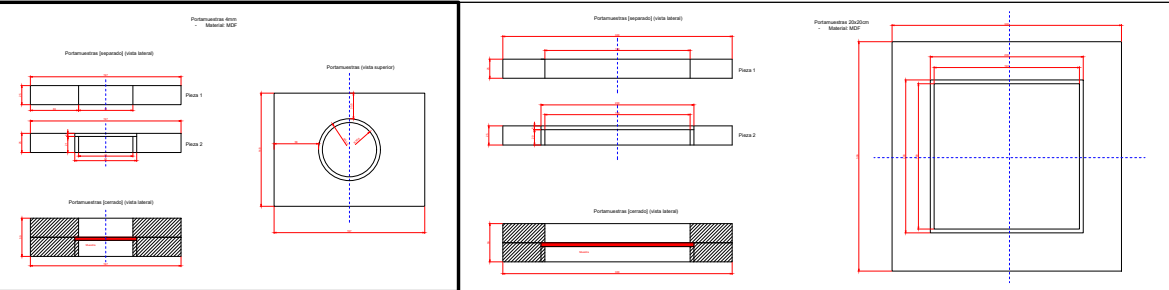
- TIRA Analogverstärker steuern alle auf dem Markt zu findenden permanentmagnet-erregten Schwingerreger an
- Hoher Signal-/Rauschabstand von >90 dB
- Niedriger Klirrfaktor von < 0,1 %
- Beleuchtetes Multifunktionsdisplay
- Sicherheitsmanagement überwacht Temperatur, Überstrom und Schwingweg
- Wählbare Betriebsspannungsbereiche (Einstellung 100 V, 120 V oder 230 V ab Werk)
- Einstellbare Strombereichsbegrenzung
- Anschlusskabel Länge 1,5 m mit Schukostecker

\* Theoretische Maximalleistung

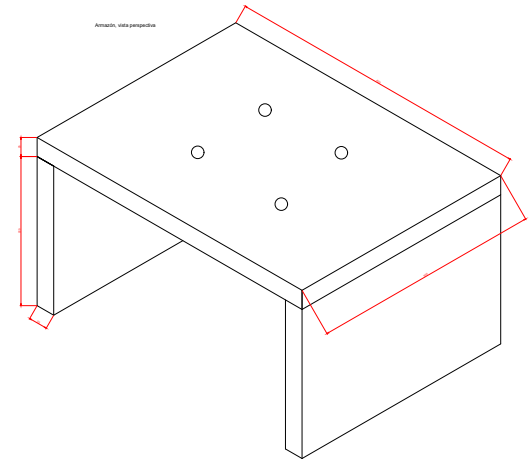
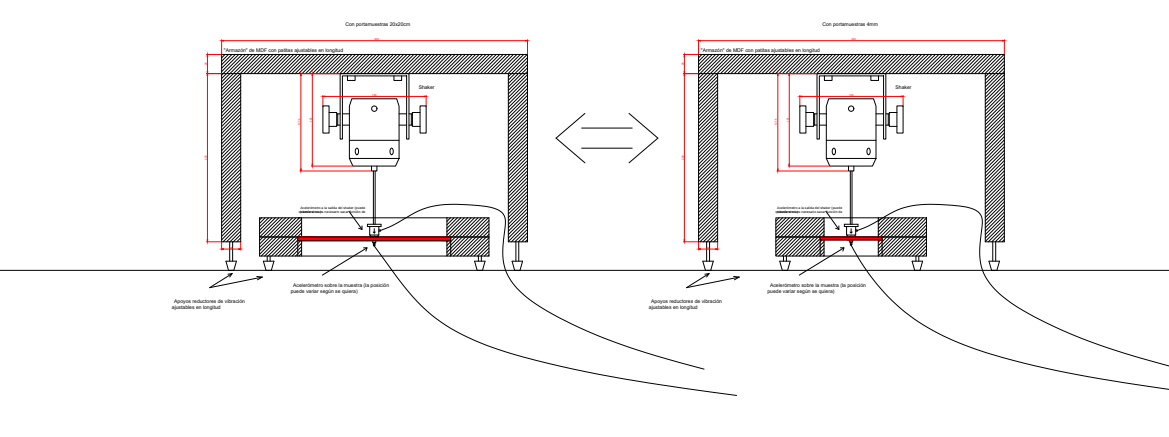


### **7.3.** Planos y renders de la plataforma experimental

PORTAUESTRAS

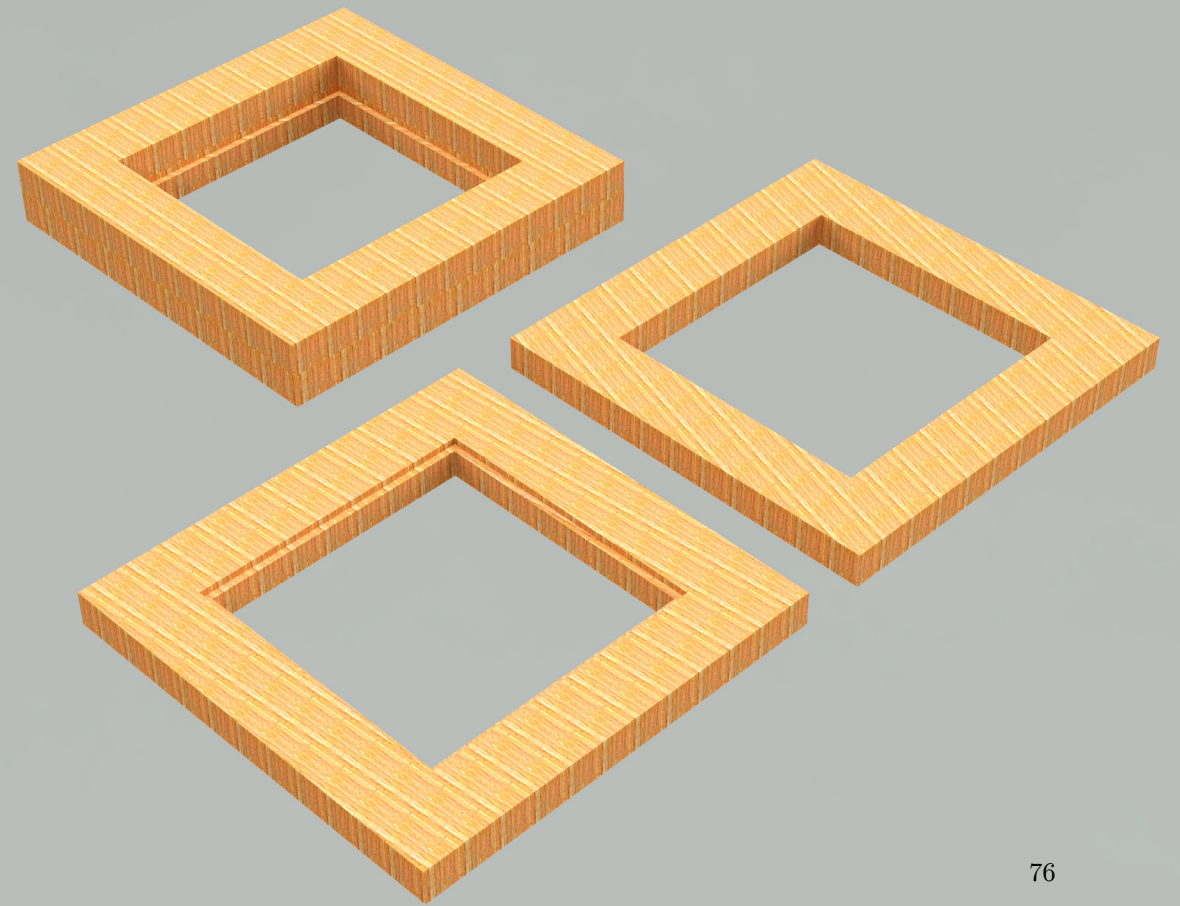
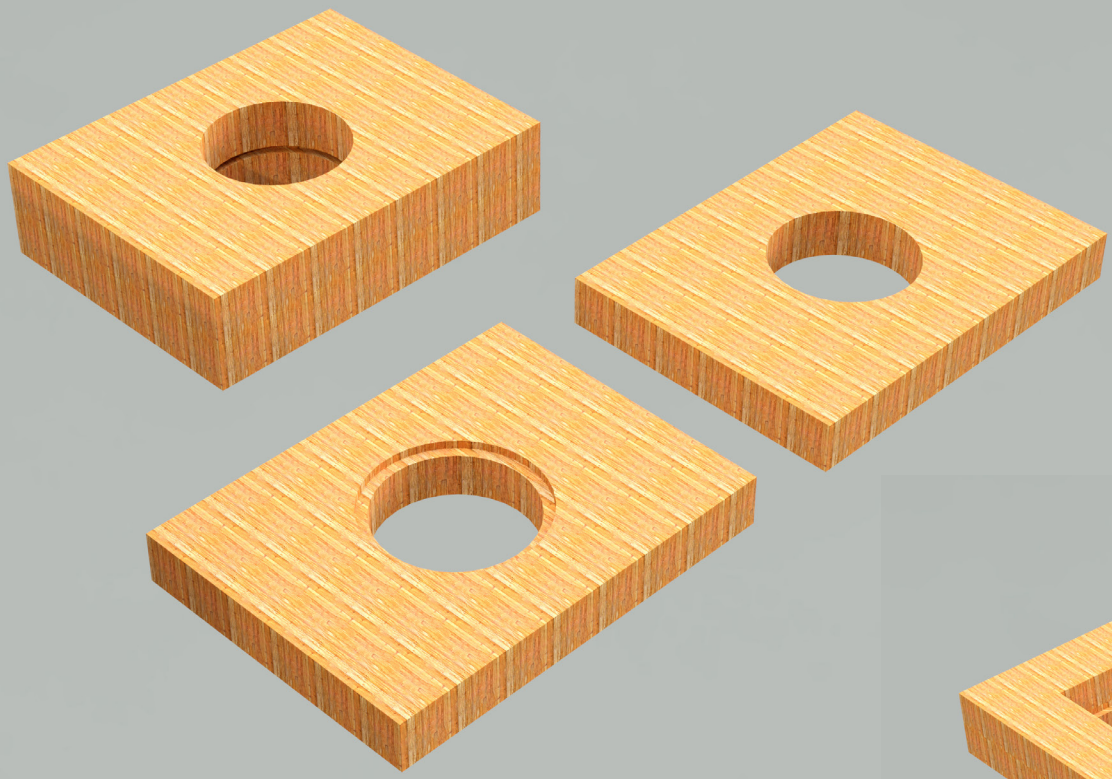


UNA SOLA CONFIGURACIÓN, 2 TIPOS DIFERENTES DE PORTAUESTRAS



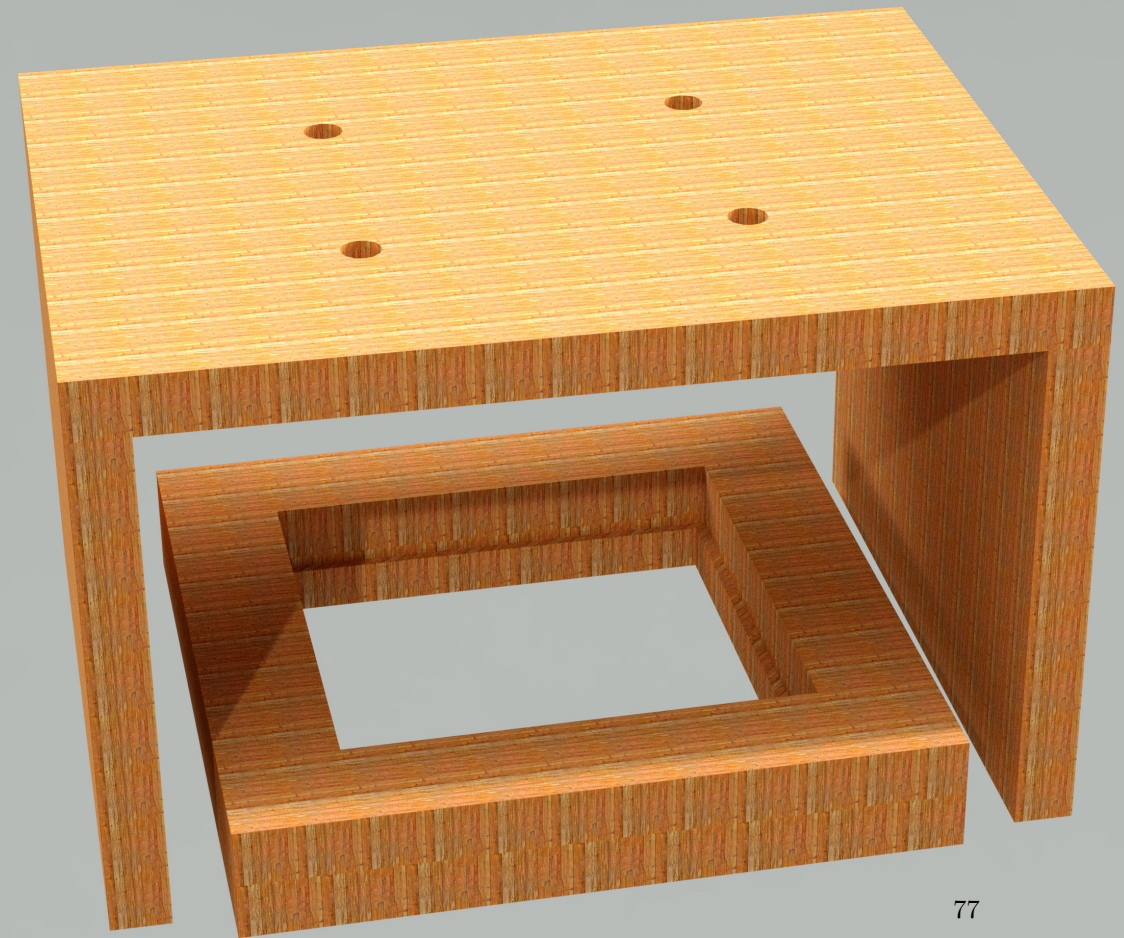
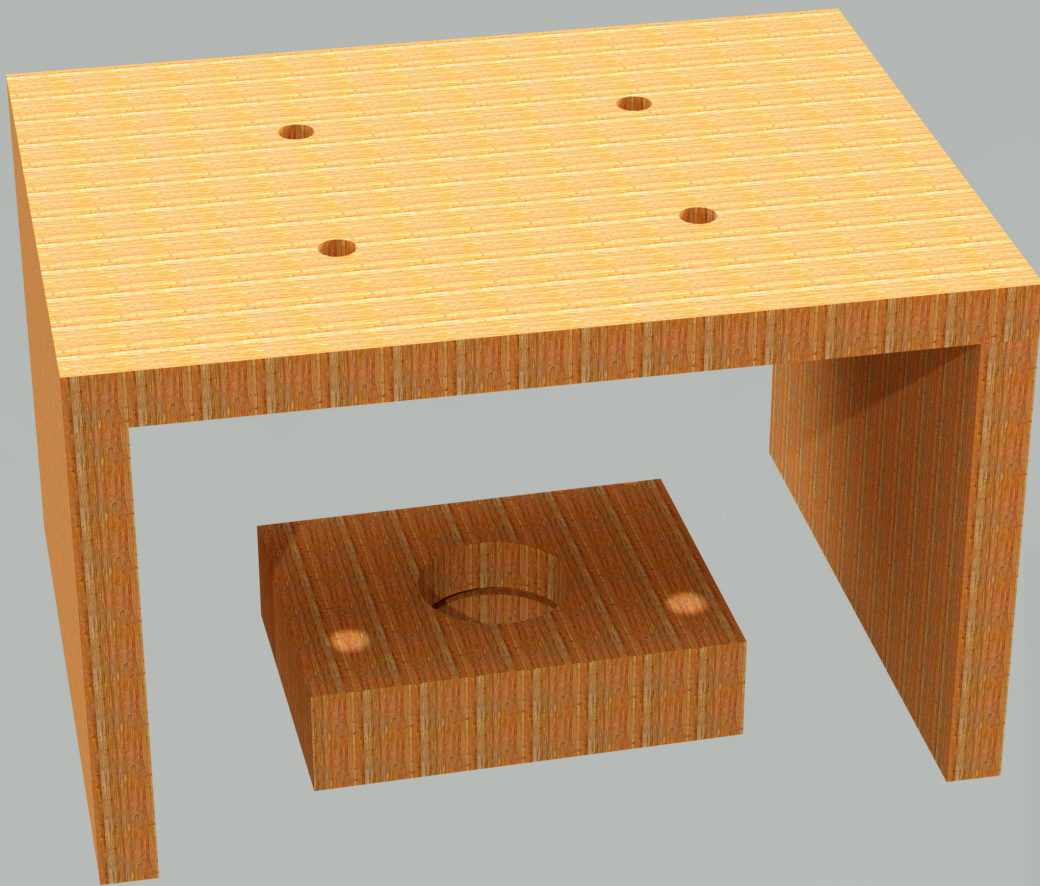


Portamuestras para discos de 8cm de diámetro



Portamuestras para muestras de 20x20 cm

Armazón + portamuestras 8cm



Armazón + portamuestras 20x20cm

