



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE PANELES TIPO SÁNDWICH ULTRALIVIANOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JUAN FELIPE FLORES GONZÁLEZ

PROFESORA GUÍA:
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA
RAFAEL RUIZ GARCÍA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Optimal Design of Ultralight Sandwich Panels with Cellular Truss Cores and
Large Phononic Band Gaps.
FONDECYT 1210442

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN

El término metamaterial se reserva para materiales, usualmente creados artificialmente, que presentan propiedades especiales en base a su estructura y geometría y no solo su composición. Dentro de la rama de metamateriales y debido a las interesantes propiedades mecánicas que presenta, existe un tipo que es interesante estudiar: los paneles sándwich. Debido a su bajo peso combinado con una alta rigidez y resistencia, en la actualidad los paneles sándwich pueden verse en aplicaciones automovilísticas, aeronáuticas e incluso aeroespaciales.

Los paneles sándwich consisten en una estructura compuesta de dos placas planas, entre estas se ubica un núcleo que puede ser a su vez un metamaterial. Una propiedad destacable en estos metamateriales es su posible capacidad de aislar vibraciones dentro de un rango de frecuencia determinado, entre otros factores, por la geometría del núcleo, propiedad denominada band gap fonónico. Esta característica tiene un gran potencial de aplicación en áreas de la ingeniería estructural donde se desea *evitar la propagación de vibraciones* desde una estructura a otra tal como pueden ser estudios de grabación, fuselajes de aviones o estructuras que posean un elemento rotatorio en general.

Este trabajo tiene como objetivo general evaluar un modelo teórico que predice la presencia y características de un band gap dependiendo de la estructura del panel sándwich. Se realizará comparando los modos de vibración obtenidos del modelo con modos obtenidos experimentalmente mediante la fabricación de un panel prototipo usando impresión por resina.

Primero se debe caracterizar mecánicamente la resina, en específico su módulo de elasticidad y densidad. Con estas propiedades se genera una base de datos, esta posee diferentes combinaciones de parámetros que definen un panel sándwich para luego elegir una de estas combinaciones; de forma paralela se encuentra una configuración de impresión que logre imprimir un panel sin fallas y fácil de posprocesar. Posterior a la manufactura del panel se realiza una prueba de excitación por martillo modal para obtener las frecuencias y formas modales, luego estas son comparadas con las frecuencias teóricas, después de esto, se realiza una variación en el modelo de elementos finitos del panel con el fin de acercarlo lo más posible al modelo experimental.

De los resultados obtenidos se concluye que el modelo no es capaz de predecir los modos de vibración del panel sándwich fabricado dentro de un rango de error razonable.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes Generales	3
2.1. Metamateriales	3
2.2. Materiales Celulares	3
2.3. Paneles Sándwich	4
2.3.1. Paneles Sándwich con núcleos en base a materiales celulares	4
2.4. Zona Irreducible de Brillouin y vector de onda	5
2.5. Band Gap fonónico	6
2.6. Excitación por martillo modal	7
2.7. Impresión 3D	8
2.7.1. Impresión 3D con Resina	8
2.8. Postprocesado	10
2.8.1. Lavado	10
2.8.2. Poscurado	10
2.9. Trabajos Anteriores	11
3. Metodología	13
3.1. Caracterización de la resina	13
3.2. Generación de candidatos de panel	13
3.3. Selección e impresión de Paneles	14
3.4. Prueba de excitación por martillo modal	15
3.5. Ajuste de parámetros	16
4. Resultados y Discusión	18
4.1. Caracterización de la resina	18
4.2. Impresión de Paneles	20
4.2.1. Selección de candidatos	20
4.2.2. Configuración de impresión	22
4.3. Modos de vibración	24
4.4. Ajuste de parámetros	25
4.4.1. Primera Iteración	25
4.4.2. Segunda Iteración	26

5. Conclusiones y trabajos futuros	28
Bibliografía	30
Anexo	32

Índice de Tablas

2.1.	Propiedades mecánicas de la resina Rigid 10K. [11]	10
4.1.	Módulo de Young resultante de ensayo de tracción.[13]	18
4.2.	Módulo de Young resultante de ensayo de compresión.[13]	18
4.3.	Módulo de Young resultante de ensayo de flexión.[13]	19
4.4.	Densidades calculadas para probetas de flexión.[13]	19
4.5.	Densidades calculadas para probetas de compresión.[13]	19
4.6.	Candidatos para fabricación.	20
4.7.	Modos de vibración para un panel una celda unitaria.	22
4.8.	Modos de vibración para el panel sándwich finito .	24
4.9.	Parámetros originales y sugeridos por FEMtools.	26
4.10.	Frecuencias del modelo de elementos finitos después del ajuste de parámetros.	26
4.11.	Parámetros originales y sugeridos por FEMTools para módulos elásticos. <i>NOTA: el sufijo p denota que corresponde a las placas y las designaciones numéricas denotan los elementos de viga.</i>	27
4.12.	Frecuencias del modelo de elementos finitos después del segundo ajuste de parámetros	27

Índice de Ilustraciones

2.1.	Materiales celulares. [3]	4
2.2.	Paneles sándwich con núcleos celulares periódicos. [4]	5
2.3.	Comparación de propiedades de paneles sándwich variando espesor del núcleo. [5]	5
2.4.	Simetría de la celda y zona irreducible de Brillouin. a)Celda unitaria. b)simetría axial respecto al centro. c) simetría reflectiva e IBZ. d) IBZ. [4]	6
2.5.	Ejemplos gráficos de un band gap fonónico.	7
2.6.	Excitación por martillo modal. [12]	8
2.7.	Diagrama de impresión por resina. [1]	9
2.8.	Diseño de núcleos estudiados.	12
2.9.	Elementos del núcleo para diseño de pirámide central.	12
3.1.	Probetas usadas para caracterización de la resina.	14
3.2.	Posición de los puntos de medición.	16
4.1.	Band gap teórico resultante del diseño elegido.	21
4.2.	Prototipo impreso.	23
4.3.	Función de Respuesta en Frecuencia experimental del panel fabricado.	24
5.1.	Par 1	32
5.2.	Par 2	33
5.3.	Par 3	33
5.4.	Par 4	34
5.5.	Par 5	34
5.6.	Par 6	35
5.7.	Par 7	35

Capítulo 1

Introducción

Por miles de años la humanidad ha logrado sus mayores avances tecnológicos gracias al dominio que tiene sobre los materiales presentes en este planeta, el hecho de que se aluda a las edades de piedra o bronce es una clara evidencia de ello. Tal como un simple filamento de bambú terminó con una era de luz de velas o gas, y los semiconductores nos catapultaron a la era digital, cada descubrimiento de materiales nuevos y exóticos trae consigo la posibilidad de mejorar la condición humana.

Asimismo, otro factor que ha hecho más versátil la manipulación de materiales son los sustanciales avances tecnológicos en la disciplina de la manufactura, en específico, de la manufactura aditiva. Estos avances permiten fabricar piezas que presentan estructuras y geometrías con un nivel de complejidad que nunca se ha visto previamente, y lo logran por costos relativamente bajos, lo que permite la masificación de esta aplicación. Esta nueva complejidad que se le puede dar a un diseño origina el desarrollo de metamateriales, materiales artificiales que presentan propiedades exóticas que provienen no de su composición, sino del diseño y geometría de estos.

Un tipo específico de metamateriales se destaca entre todos, estos son denominados paneles sándwich. Entre las peculiaridades estructurales que presentan estos metamateriales esáa su baja densidad, rigidez y resistencia a la tracción específicos y su superior capacidad de aislamiento térmico; todas propiedades que pueden ser bien aprovechadas en aplicaciones como automovilística, aeronáutica y aeroespacial.

Otra propiedad interesante presente en los paneles sándwich se da en el control de vibraciones, pues se pueden diseñar paneles que logran una supresión de vibraciones dentro de un cierto intervalo de frecuencias; este intervalo se denomina *band gap*. En este trabajo se pretende fabricar paneles sándwich usando manufactura aditiva y comprobar la existencia de band gaps de forma experimental que han sido previamente teorizados y modelados de forma teórica.

1.1. Motivación

Este trabajo se realiza dentro del contexto del proyecto FONDECYT 1210442 *Optimal design of ultralight sandwich panels with cellular truss cores and large phononic band gaps*, que se propone el desarrollar una metodología para el diseño de paneles sándwich con núcleos ultraligeros y band gaps que permitan el control y aislamiento de vibraciones.

Con esto en mente, lo que este trabajo propone aportar es llevar el diseño de este tipo de metamateriales desde el ámbito teórico o simulado hacia un contexto experimental, primeramente llegando a un método de manufactura viable de estos paneles sándwich y posteriormente verificando experimentalmente la presencia del fenómeno denominado band gaps.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el modelo numérico de forma experimental para paneles sándwich fabricados mediante impresión 3D en resina.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos planteados en este trabajo son:

- Encontrar una configuración para la correcta manufactura de paneles sándwich mediante impresión por resina.
- Obtener los modos de vibración de forma experimental para los paneles impresos.
- Comparar los resultados experimentales con los resultados numéricos para la presencia de band gaps.
- Ajustar los parámetros del modelo numérico acercándolo a los resultados experimentales.

1.3. Alcances

Este trabajo comprende los procesos desde la creación y diseño del modelo para ser impreso hasta el estudio de la respuesta vibratoria de dicho prototipo. Fuera de este estudio, se quedan la optimización de band gaps y la variabilidad de estos dependiendo de parámetros de impresión o postcurado.

Capítulo 2

Antecedentes Generales

Este capítulo expone los conceptos principales que deben ser entendidos para comprender a profundidad el propósito y objetivos del trabajo presentado. Se inicia con los conceptos de metamateriales y materiales celulares, pues entendiendo ambos se puede comprender que es un panel sándwich. Consecutivamente, se sigue con uno de los conceptos centrales de este trabajo, el band gap fonónico y como se propone detectar experimentalmente. Posteriormente, se explica el proceso de manufactura elegido para la fabricación de los paneles a estudiar. Finalmente, se describen los trabajos anteriores sobre los que se construye para cumplir los objetivos de esta memoria.

2.1. Metamateriales

Estos corresponden a materiales creados artificialmente que son provistos de propiedades poco comunes debido no solo a su composición, sino que también a su diseño y geometría, el patrón de organización y como se unen sus elementos. Como sus propiedades no dependen solo de su composición, estos pueden fabricarse usando materiales más convencionales y de bajo costo, permitiendo su masificación de forma económica.

Debido a las complejas geometrías que presentan algunos metamateriales, su estudio apenas está comenzando, siendo posible gracias al desarrollo de procesos de manufactura como la impresión 3D. Dichos procesos logran ser fieles a las geometrías complejas sin disparar los costos de fabricación[5], permitiendo así su masificación tanto para estudio como para su potencial aplicación.

2.2. Materiales Celulares

Son un tipo de material que consiste en estructuras de celda, la cual puede ser abierta o cerrada, que se repiten de forma periódica o estocástica (con un patrón de repetición es azaroso). Una ilustración de este tipo de estructuras puede verse en la figura 2.1. Estos materiales son inspirados en estructuras naturales que han sido probadas por la evolución; pueden ser encontrados en panales de abejas, corcho, esponjas marinas y estructuras óseas, en este último logran una relación peso-resistencia que no es encontrada fácilmente mediante materiales sintéticos[6].

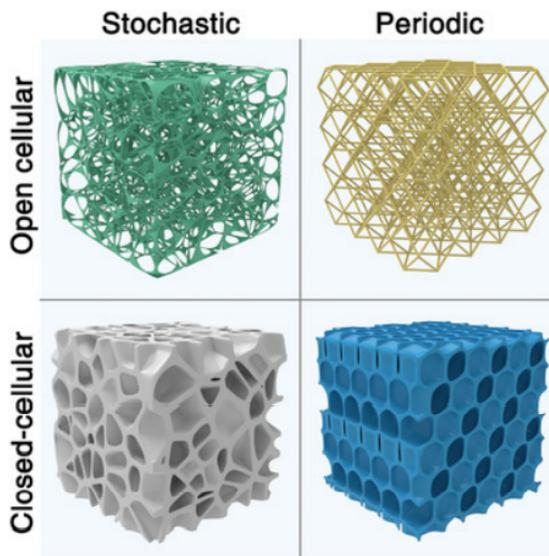


Figura 2.1: Materiales celulares. [3]

Cabe destacar que las configuraciones de los paneles celulares pueden presentarse en 2D, como estructuras similares a los paneles de abeja, o en 3D como estructuras en base a enrejados o de periodicidad más estocásticas como lo son los tejidos óseos. Debido a su estructura estos poseen una baja densidad, además de una mayor rigidez y resistencia, todas éstas propiedades que pueden encontrar un uso en industrias como la aeronáutica, donde siempre se está buscando una mayor resistencia específica en los materiales.

2.3. Paneles Sándwich

Este tipo de estructuras está compuesta de 3 capas adheridas, dos de éstas son láminas delgadas de un material rígido y denso; la tercera se posiciona entre éstas y corresponde a un núcleo. Este núcleo es una capa más gruesa, que gracias a su geometría, diseño o composición provee al metamaterial de propiedades que no se encuentran en los materiales originales. Las placas exteriores cumplen la función de resistir esfuerzos de tracción y compresión, mientras que la alta rigidez del núcleo permite que la distancia entre las placas sea constante, su adherencia a éstas evita deslizamiento entre las placas y el núcleo. Esto resulta en un material con mayor rigidez específica, que soporta mejor los esfuerzos de flexión equivalente siendo un material mucho más ligero que una placa solida de las mismas dimensiones.

2.3.1. Paneles Sándwich con núcleos en base a materiales celulares

Al aplicar los conceptos de metamateriales y materiales celulares se llega a un metamaterial que posee una excelente resistencia a la flexión, manteniendo una densidad muy baja comparada con materiales convencionales. Aquí el material celular actuará como el núcleo del panel sándwich, un ejemplo de esto puede verse en la figura 2.2, donde, de izquierda a derecha se tiene un núcleo periódico de célula abierta en 2D, en el medio uno de célula abierta en 3D y a la izquierda un núcleo periódico de célula cerrada en 2D (panal de abeja). En la figura 2.3 se puede observar la comparación de varias propiedades de un panel sándwich con un núcleo tipo panal al variar el espesor del núcleo. A partir de la misma figura se logra apreciar

que la resistencia a la flexión relativa aumenta considerablemente al aumentar este espesor, mientras que el peso relativo del panel en su totalidad apenas sufre un aumento significativo.

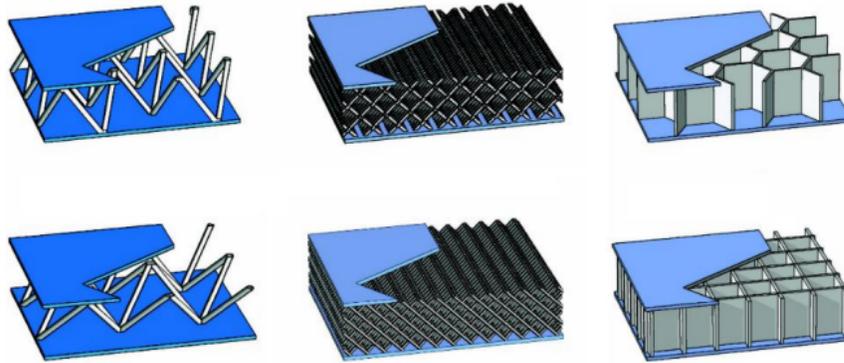


Figura 2.2: Paneles sándwich con núcleos celulares periódicos. [4]

			
Rigidez a la flexión relativa	1	7.0	37
Resistencia a la flexión relativa	1	3.5	9.2
Peso relativo	1	1.03	1.06

Figura 2.3: Comparación de propiedades de paneles sándwich variando espesor del núcleo. [5]

2.4. Zona Irreducible de Brillouin y vector de onda

La zona irreducible de Brillouin (IBZ) corresponde a la sección de la celda con la cual se puede construir en su totalidad usando operaciones de simetría. La importancia de este concepto radica en que como la celda unitaria puede representarse por una zona más pequeña, simular y estudiar esta zona es equivalente a simular y estudiar la celda completa ahorrando tanto cantidad de variables como tiempo computacional.

Para ejemplificar de mejor forma este concepto se tiene en la figura 2.4a una celda unitaria 4x4, en la figura 2.4b puede apreciarse como cada color utilizado representa un espesor de viga diferente, por lo que la primera reducción en la geometría, sin perder información, puede ser una simetría de 45° que pase por el centro. Otra operación de simetría puede hacerse de forma vertical y horizontal como lo muestran las líneas punteadas; éstas operaciones resultan en la IBZ de la celda destacada en la figura 2.4c. De esta forma una celda compuesta originalmente por 40 elementos puede ser representada por solo 6.

El vector de onda de una IBZ se puede definir con ayuda de la figura 2.4e. Se definen

los puntos Γ , X y M en los vértices de la IBZ para luego definir el vector de onda como el recorrido cerrado que se obtiene al moverse el perímetro de la IBZ pasando por los puntos anteriormente definidos.

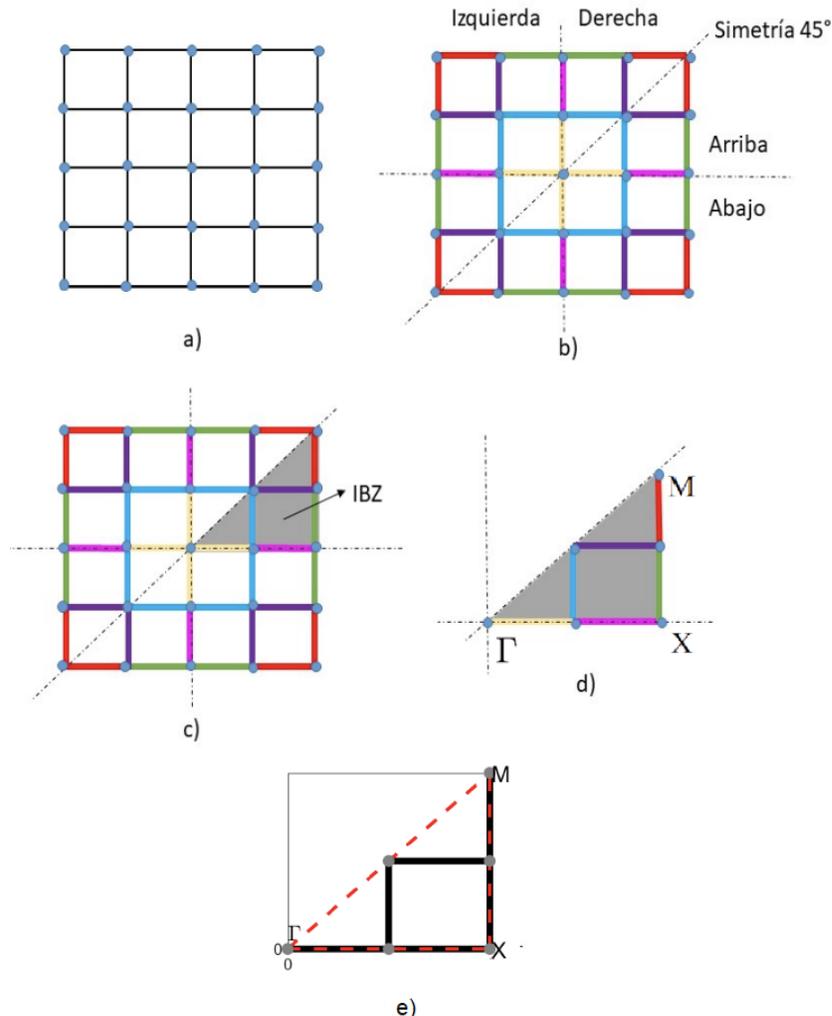


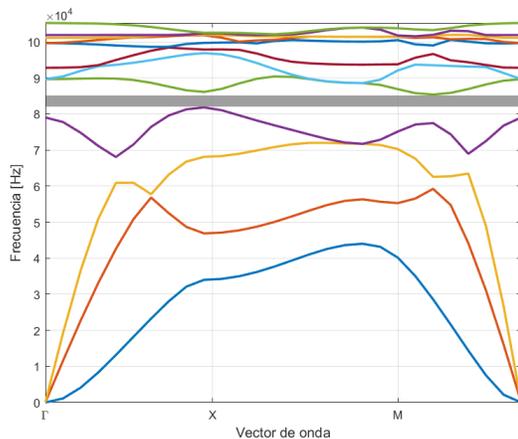
Figura 2.4: Simetría de la celda y zona irreducible de Brillouin. a)Celda unitaria. b)simetría axial respecto al centro. c) simetría reflectiva e IBZ. d) IBZ. [4]

2.5. Band Gap fonónico

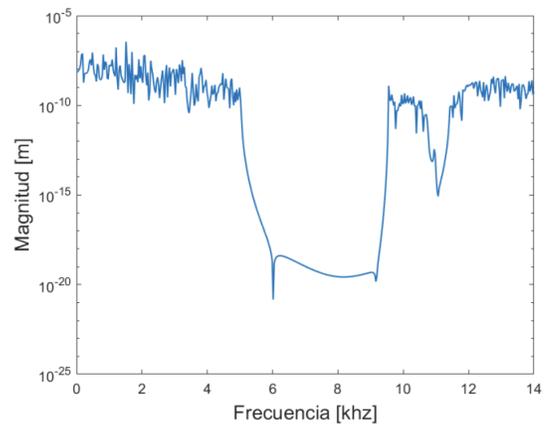
Formalmente un band gap fonónico alude a un rango de frecuencia en que las ondas mecánicas son suprimidas completamente en un material periódico, en este caso el material es denominado cristal fonónico o material con band gaps fonónicos[7]. De acuerdo a la literatura se concluyó que la existencia de estos band gaps se debe a un efecto que combina difracción de Bragg y Scattering de las ondas, ambos mecanismos que deben su presencia a la geometría y periodicidad del material[8], el análisis más detallado de dicho fenómeno se escapa de los alcances de este trabajo.

En términos simples, un band gap corresponde a un espacio vacío en el diagrama de bandas de frecuencias; este diagrama se construye de la siguiente forma: primero se identifica la zona irreducible de Brillouin. Teniendo esta zona se define el vector de ondas k como un vector cuya dirección indica hacia donde se propaga la onda y su magnitud corresponde al número de onda. Dentro de la IBZ puede trazarse al unir los vértices presentes en la misma; este vector contiene información sobre la simetría y forma de la celda, por lo que con esta representación se modela toda la celda. Posteriormente, la construcción del diagrama de bandas se reduce al cálculo de frecuencias naturales ω (problema de valores y vectores propios) en función del vector k de la celda. Un ejemplo de este diagrama de bandas puede verse ilustrado en la figura 2.5(a), donde en el eje horizontal se tiene el vector de ondas k y en el eje vertical la frecuencia; el band gap presente puede verse como un espacio entre las bandas destacado con una barra gris. En este caso el band gap tiene un ancho aproximado de 3 [kHz].

De forma experimental un buen método para detectar band gaps de forma cualitativa es mediante la obtención de la función de respuesta en frecuencia (FRF), cuya metodología se describe más adelante. Un ejemplo de este gráfico puede apreciarse en la figura 2.5(b), donde en el eje horizontal se tiene la frecuencia y en el eje vertical la magnitud de la respuesta. Puede observarse la presencia de un band gap aproximadamente entre los 6 y 9 [kHz], donde la magnitud baja en 10 ordenes de magnitud.



(a) Gráfico teórico.



(b) Gráfico experimental.

Figura 2.5: Ejemplos gráficos de un band gap fonónico.

2.6. Excitación por martillo modal

Para estudiar la respuesta en frecuencia de los paneles sándwich se necesita una forma de generar una excitación con suficientes contenidos de amplitud y frecuencia; para esto se elige la excitación por martillo.

Esta consiste en una configuración como la vista en la figura 2.6, donde un impacto con el martillo hacia el material a probar genera un pulso cuyo contenido en frecuencia depende del material tanto de la pieza a estudiar como de la punta del martillo. Los materiales

de la punta del martillo modal usualmente son goma, plástico o acero; además el rango de frecuencia contenido está directamente relacionado con las durezas de la punta y la de la pieza.

En la punta del martillo se sitúa un sensor de fuerza que mide la fuerza del impacto, ya que ésta se relaciona con la respuesta en frecuencia de la pieza. Además se sitúa un acelerómetro en la pieza que mida, valga la redundancia, la aceleración en este punto. Ambos sensores producen una carga de voltaje que posteriormente es transformada en una medición del fenómeno.

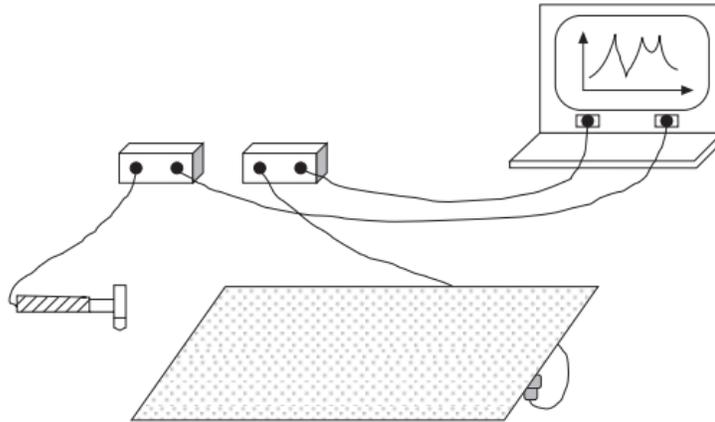


Figura 2.6: Excitación por martillo modal. [12]

2.7. Impresión 3D

Consiste en un proceso de manufactura aditiva basado en la deposición de capas de material una sobre otra hasta lograr un cuerpo tridimensional. Existen varios métodos de impresión 3D, pero uno de los más usados es el modelado por deposición fundida (FDM), del cual pertenece la impresión por extrusión de filamento, donde un extrusor calienta plástico desde un rollo para luego depositarlo en la forma de una sección transversal de la pieza por capas para crear el objeto deseado. Los materiales más accesibles para este tipo de manufactura son el PLA, ABS y PET-g.

Una de las mayores ventajas de este tipo de manufactura es su gran versatilidad en cuanto a la complejidad de la pieza; pues es capaz de crear geometrías complejas que son imposibles de replicar mediante procesos de manufactura sustractiva. Otra de sus ventajas es su capacidad de producir piezas de forma extremadamente rápida y barata comparado con métodos como el moldeo por inyección de plástico; lo que la hace idónea para aplicaciones de confección rápida de prototipos.

2.7.1. Impresión 3D con Resina

Otro tipo de manufactura aditiva por impresión 3D es la impresión por resina o estereolitografía (SLA); este método tiene algunas semejanzas con la extrusión de filamento pero ofrece resultados bastante diferentes. El método más común consiste en una placa sumergida en un foto-polímero (resina) que al ser excitado con un láser UV comienza el proceso de solidificación; este láser UV es enfocado mediante espejos que gracias a su movimiento logran curar

la capa completa del material, una vez el láser haya barrido toda la sección transversal la plataforma sube una distancia predeterminada y el proceso comienza con la siguiente sección transversal. Un diagrama de este proceso puede verse en la figura 2.7.

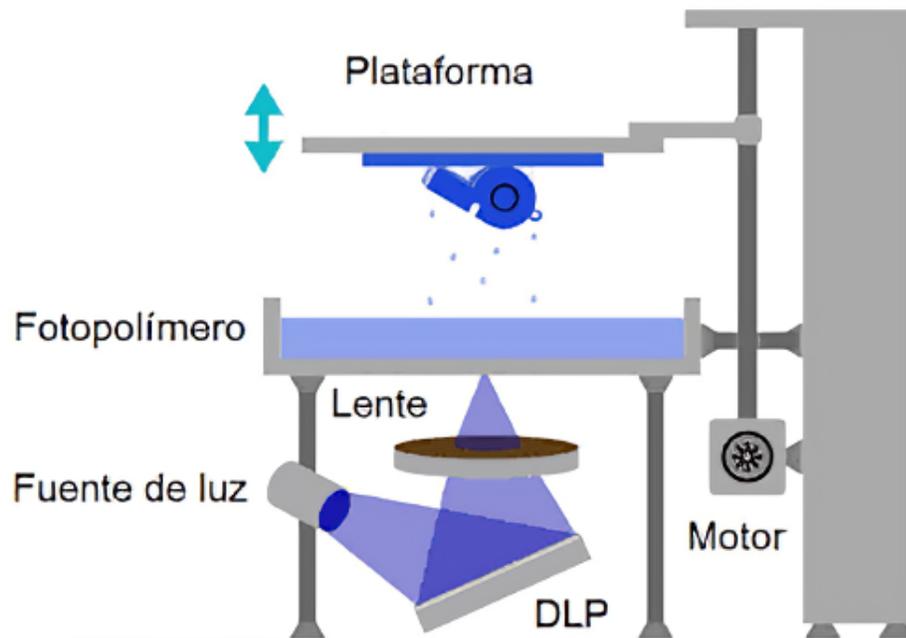


Figura 2.7: Diagrama de impresión por resina. [1]

La mayoría de las ventajas que presenta la impresión por resina por sobre el filamento se debe a la reducida altura de capa con la que se puede imprimir. Por un lado está el mayor nivel de detalle y mejor acabado superficial al que se puede llegar con impresión de resina y por otro está el hecho de que en comparación con piezas hechas en base a FDM las piezas fabricadas en SLA son isotrópicas; es decir, que sus propiedades mecánicas son las mismas en cualquier dirección.

Para este trabajo se tiene disponible la impresora Form 3L de la marca Formlabs; ésta es capaz de imprimir piezas de dimensiones de hasta 335x200x300mm, por lo que al momento de definir el tamaño de las muestras a estudiar se considerará dicha limitante.

El tipo de resina a utilizar será la tipo Rigid 10k, diseñada especialmente para prototipos funcionales rígidos y resistentes con aplicaciones en ingeniería aeronáutica y aeroespacial. Adicionalmente, ofrece resistencia y durabilidad elevadas comparada con resinas de uso normal, gracias a que está compuesta con partículas de vidrio que refuerzan el material una vez curado. Un resumen de las propiedades mecánicas de esta resina pueden verse en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas de la resina Rigid 10K. [11]

Propiedades mecánicas	No poscurada	UV1	UV+Termico	Norma ensayo
Resistencia a la rotura por tracción	55 MPa	65 MPa	53 MPa	ASTM D638-14
Módulo de tracción	7,5 GPa	10 GPa	10 GPa	ASTM D638-14
Alargamiento de rotura	2 %	1 %	1 %	ASTM D638-14
Resistencia a la flexión	84 MPa	126 MPa	103 MPa	ASTM D790-15
Módulo de flexión	6 GPa	9 GPa	10 GPa	ASTM D790-15
Resiliencia IZOD	16 $\frac{J}{m}$	16 $\frac{J}{m}$	18 $\frac{J}{m}$	ASTM D256-10
Resiliencia IZOD no entallada	41 $\frac{J}{m}$	41 $\frac{J}{m}$	41 $\frac{J}{m}$	ASTM D4812-11

2.8. Postprocesado

En el caso especial de las impresiones a partir de resina, se necesita un post tratamiento para las piezas un poco más extenso, este consiste en 2 partes, el lavado y el curado.

2.8.1. Lavado

Cuando la pieza termina de ser impresa esta sale de la plataforma con una capa de resina sin curar; esta resina tiene una consistencia viscosa y pegajosa por lo que la pieza no es utilizable. Para solucionar esto se trata la pieza por un proceso de lavado.

Según el fabricante de la impresora a usar[10] se recomienda usar alcohol isopropílico, aunque también pueden usarse químicos como TPM (Eter monometílico de tripropilenglicol) para disolver la resina sin curar de la superficie. Esto puede lograrse lavando manualmente, aunque se recomienda usar una máquina diseñada para esto (Formlabs Form Wash L) que sumerge la pieza en el solvente elegido y genera una corriente para asegurar una buena calidad de lavado.

Se debe mencionar que la extracción de los soportes que dan estabilidad a la pieza durante la impresión deben removerse después del lavado pero antes del poscurado, pues sino sería bastante más complejo dado que el curado endurece la resina de forma óptima.

2.8.2. Poscurado

Una vez removido el exceso de resina no solidificada se debe realizar un proceso de poscurado. Esto es debido a que el proceso de polimerización (principal mecanismo de solidificación de la resina) no ha sido completamente terminado por el láser de la impresora, por lo que la pieza no tiene las propiedades mecánicas óptimas que puede alcanzar.

Este proceso se logra exponiendo la pieza previamente lavada a calor y radiación UV, específicamente, Formlabs recomienda que para alcanzar propiedades mecánicas óptimas la resina mencionada en la sección 2.7.1 debe exponerse a un proceso de poscurado a 70°C por un tiempo recomendado de 60 minutos.

2.9. Trabajos Anteriores

Este trabajo se construye en base la Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico escrita por Vicente Gálvez Sidgman titulada "*Desarrollo de modelos en elementos finitos parametrizados de paneles tipo sándwich con núcleos ultralivianos para predecir band gaps*"[4]. Es del modelo creado en esta Memoria que se pretende obtener los modelos 3D de los paneles sándwich a estudiar. Dentro de este trabajo se estudian 3 diseños de núcleos ilustrados en la figura 2.8. A grandes rasgos, el trabajo busca desarrollar un modelo de elementos finitos para los 3 diseños mencionados anteriormente con el fin de predecir Band Gaps.

Un aspecto a destacar dentro del trabajo mencionado es que para lograr resolver el problema de optimización se requiere considerar dimensiones infinitas para el panel sándwich, lo cual por obvias razones no aplica para un ensayo experimental. Por esto mismo, deben definirse dimensiones para los paneles a imprimir de tal forma que la condición de paneles infinitos sea cumplida en algún grado.

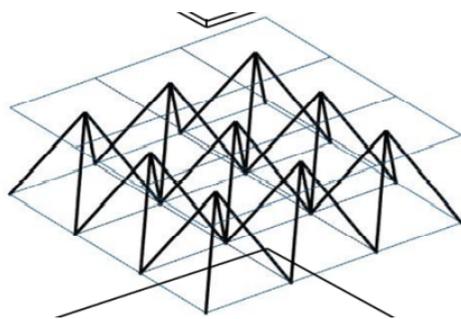
Cabe destacar que este modelo requiere ciertas propiedades mecánicas del material, en específico el módulo de Young, densidad y coeficiente de Poisson. Para el trabajo en cuestión, se utilizaron las propiedades del acero correspondientes a:

- módulo de Young/Elasticidad: $E= 2,1 \cdot 10^{11}$ [Pa]
- Densidad: $\rho=7.800$ [Kg/ m^3]
- Coeficiente de Poisson: $\nu=0,3$

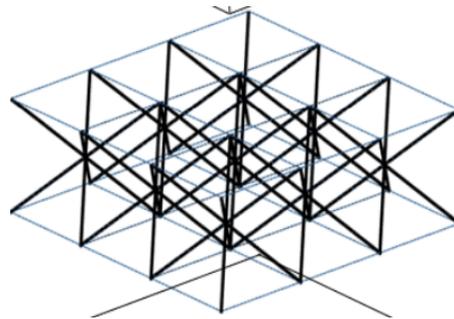
Para comprender de mejor forma cómo es que se define el núcleo de un panel sándwich se toma como ejemplo la geometría de pirámide central. Cada núcleo está compuesto de 6 elementos viga que pueden variar su espesor, en la figura 2.9 pueden diferenciarse cada uno de los 6 elementos en diferente color; de esta forma si se varía el espesor del elemento 1 todos los elementos viga de color naranja cambiarán su espesor al nuevo.

El modelo desarrollado toma valores de una base de datos y, en base a estos, fija tanto el espesor de los elementos viga como el tamaño de la celda unitaria para cada núcleo; posterior a esto, modela los paneles usando un paquete de herramientas en Matlab que permite simular el y seguido a esto calcular el diagrama de bandas correspondiente; otro programa separado toma los datos de las bandas y calcula la existencia de Band Gaps en estos.

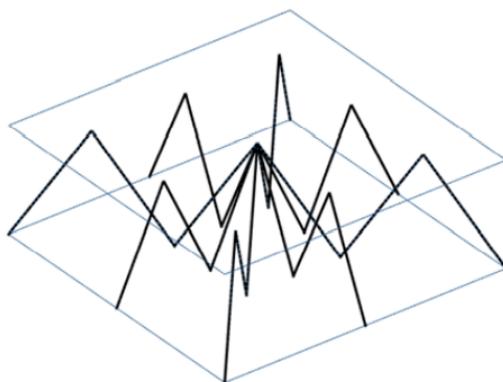
El presente trabajo pretende tomar como base el trabajo mencionado anteriormente y aplicarlo para la creación de un prototipo de panel sándwich con el fin de validar el modelo creado y posiblemente verificar la existencia experimental de Band Gaps.



(a) Pirámide base cuadrada.

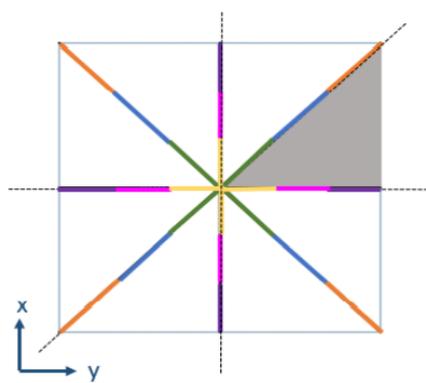


(b) Kagome.

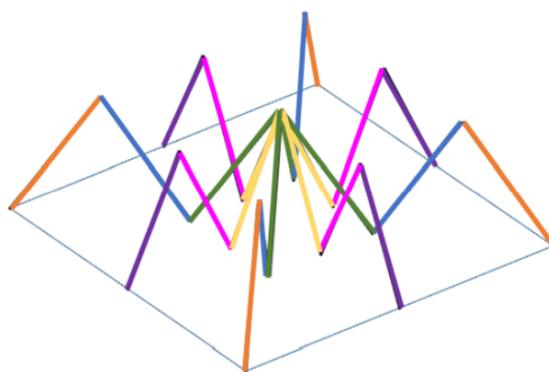


(c) Pirámide Central.

Figura 2.8: Diseño de núcleos estudiados.



Superior



Isométrica

f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6

Figura 2.9: Elementos del núcleo para diseño de pirámide central.

Capítulo 3

Metodología

A continuación se describen los pasos a seguir para el desarrollo de forma ordenada de este trabajo:

3.1. Caracterización de la resina

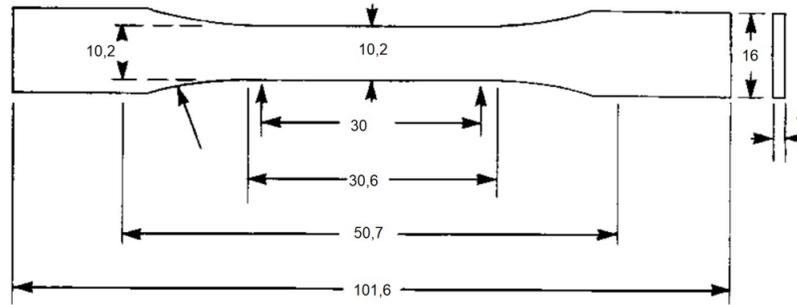
El primer paso para simular los paneles es el de caracterizar mecánicamente el material; el modelo en Matlab requiere el módulo de Young, la densidad y el coeficiente de Poisson. Los ensayos requeridos se realizan en conjunto con Diego Rodríguez, quien también trabaja con paneles sándwich. La metodología de forma resumida se describe a continuación:

Para la obtención del módulo de Young se realizan 3 tipos de ensayos diferentes, ensayos de tracción, compresión y flexión usando probetas como las vistas en la figura 3.1. Los ensayos se realizan para tiempos de curado de 0, 10, 30 y 120 [min] y para cada tiempo de curado y ensayo se tienen 2 probetas, lo que da un total de 24 probetas. Por otro lado, dado que el módulo del modelo es mucho menos sensible a cambios en el coeficiente de Poisson se decide mantener el valor anterior de este de $\nu = 0,3$. Finalmente, la densidad de la resina curada se mide utilizando las probetas de compresión y flexión ilustradas en las figuras 3.1(b) y 3.1(c) respectivamente, midiendo su masa con una escala digital y su volumen con su diámetro y altura ayudándose de un pie de metro.

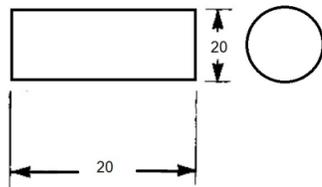
3.2. Generación de candidatos de panel

Habiendo caracterizado la resina a utilizar sigue la generación del diseño del panel a fabricar, para lograr encontrar un panel que sea imprimible y cuyo posible band gap y modos de vibración sean efectivamente medibles se decide generar una basta piscina de candidatos. Esto se logra utilizando como base códigos de Galvez.V[4]. De este paso se obtiene una lista que, por un lado, posee los parámetros de la celda del panel sándwich (espesores de cada tipo de elemento viga y el tamaño de la celda unitaria), y por otro lado, los primeros 10 modos de vibración y el band gap teórico calculado a lo largo del vector de onda basado en la IBZ de la celda.

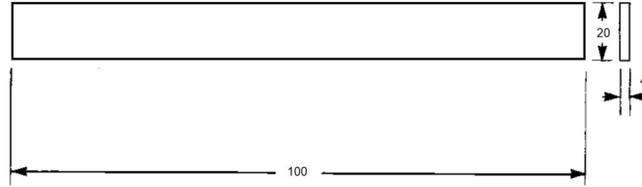
Tanto para esta etapa como para las siguientes se limita solo al estudio del diseño de panel sándwich correspondiente al de pirámide central, ilustrado en la figura 2.8(c) pues es el que



(a) Tensión (ISO D638)



(b)
Com-
pre-
sión



(c) Flexión (ISO D638)

Figura 3.1: Probetas usadas para caracterización de la resina.

presenta una mayor cantidad de band gaps teóricos y un mayor ancho promedio comparado con los otros diseños.

3.3. Selección e impresión de Paneles

Para esta sección ya teniendo la lista de candidatos a ser fabricados se tendrán en cuenta los siguientes criterios de selección:

- **Espesor de elementos viga:** Corresponde a los 6 espesores que definen el núcleo del panel sándwich, se tendrá en cuenta que los elementos viga sean lo suficientemente espesos como para ser imprimibles, especialmente en el caso de que estén conectados a un soporte en la impresión, pues si el soporte tiene un espesor similar al elemento viga es más probable que este se desprenda junto con el soporte afectando la simetría del panel. Por otro lado si los elementos viga son lo suficientemente espesos no se cumplirá la relación $\frac{\text{largo}}{\text{espesor}} > 10$, la cual es usada dentro de la simulación para considerar estos elementos como vigas y no sólidos; lo cual puede afectar negativamente la comparación entre resultados experimentales y teóricos.
- **Tamaño de celda unitaria:** Las condiciones de borde para la simulación requiere un panel infinito, lo cual claramente no es posible experimentalmente, por lo que para compensar esta disparidad sin importar el diseño a escoger el panel a imprimir corresponderá a una repetición de 10x10 veces la celda unitaria de este panel. Considerando esto y que la impresora disponible solo posee un espacio de 30x20x33,5 [cm] se tendrá en consideración que el panel efectivamente quepa dentro de este volumen manteniendo un

espacio razonable con el borde de la cama de impresión (entre 10 a 15mm) para evitar fallas en la impresión.

- **Posición y ancho del band gap teórico:** Dado que las frecuencias que pueden sonarse con el equipo disponible tiene límites, se preferirá diseños de panel cuyo band gap se presente en frecuencias lo más bajas posibles y cuyo ancho de band gap sea lo más ancho disponible; para esto se utiliza el concepto de band gap relativo, que se calcula como:

$$\omega_{rel} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{media}}$$

Dada la complejidad de las geometrías a imprimir, no es trivial la orientación en la que se imprimirán los paneles. Para lograr un buen resultado se decide, primeramente, imprimir celdas de prueba con dimensiones de celda unitaria de 30[mm] y espesor de elementos viga de 0,8[mm]. En base al análisis de esos resultados se variarán parámetros como la posición y espesor de los soportes tanto como la orientación del panel respecto a la cama de impresión. El proceso para llegar a una configuración viable de impresión se describirá más en detalle en la sección de Resultados y discusión.

Finalmente, la fabricación del panel prototipo tanto como los paneles de prueba se realiza mediante impresión por resina, usando la resina Rigid 10K de la empresa Formlabs y una impresora modelo Form 3L de la misma empresa. Factores como la altura de capa y el tiempo de poscurado se determinarán después de la caracterización mecánica de la resina, el lavado de cada pieza se realiza con la Form Wash L en alcohol isopropílico por 10 minutos.

3.4. Prueba de excitación por martillo modal

Habiendo fabricado el prototipo a trabajar, el siguiente paso corresponde a la prueba de excitación por martillo modal. Para obtener información sobre la función de respuesta en frecuencia y los modos de vibración del panel se medirá de la siguiente forma:

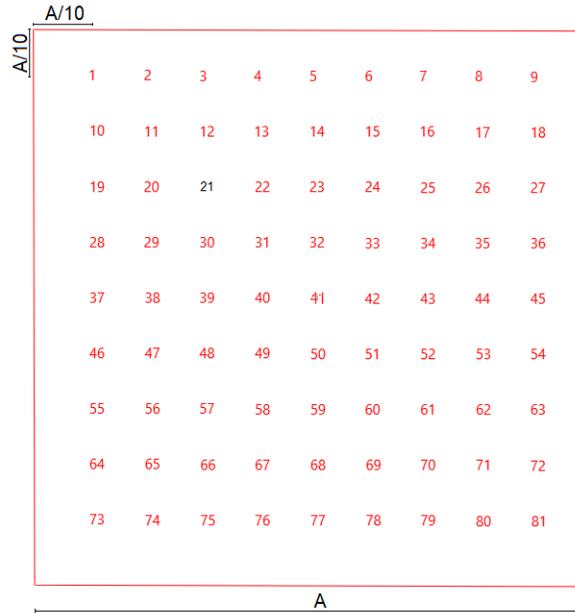


Figura 3.2: Posición de los puntos de medición.

En primer lugar, se marca con un plumón los puntos que se ven enumerados en la figura 3.2; si el tamaño del panel es de A , la distancia entre puntos tanto horizontal como verticalmente será $A/10$. Se posicionará el acelerómetro en el nodo 21 (destacado en negro en la figura 3.2) fijándolo con una pequeña cantidad de cera para una buena adherencia sin comprometer los datos de medición.

Posterior a esto se sitúa el panel en un arreglo de elásticos en el cual queda suspendido, lo cual equivale a condiciones de borde libres. Los datos obtenidos del acelerómetro no se verán afectados por el movimiento del panel suspendido en los elásticos pues son de muy baja frecuencia. Finalmente, para cada punto marcado se realiza la prueba que consiste en 5 excitaciones directamente en la posición del punto correspondiente con un tiempo entre cada excitación de aproximadamente 10 segundos, para así permitir que las vibraciones se propaguen y dispersen en el material; esto cuidando que el impacto entre el panel y la punta del martillo sea única y no existan rebotes que afecten las mediciones. Cabe mencionar que las excitaciones se realizan con la punta de technyl.

3.5. Ajuste de parámetros

Habiendo terminado la prueba de excitación por martillo modal se pasa al tratamiento de estos datos. Esto se realizará usando el software FEMtools. Con este software es posible el cálculo de la FRF del panel sándwich completo, integrando la información obtenida de la excitación del panel en los 81 puntos marcados. Además se contrastará el modelo creado a partir de la prueba de excitación por martillo y el modelo de elementos finitos creado en Matlab con la posibilidad de variar propiedades del modelo de elementos finitos con el fin de ajustarlo al modelo experimental. Esto último se vuelve importante considerando la incertidumbre en el cálculo de las propiedades mecánicas de la resina utilizada y el hecho de que estas pueden afectar en gran medida las propiedades en vibraciones del panel resultante.

Para introducir la incertidumbre en las propiedades mecánicas y las dimensiones finales se itera dentro de un espacio que permite variar las siguientes propiedades del panel:

- módulo de Young entre un 90 % y un 200 % del valor original (a ser fijado mediante la caracterización de la resina).
- Densidad entre un 80 % y un 120 % de su valor original (a ser fijado mediante la caracterización de la resina).
- Área transversal de los elementos viga entre un 90 % y un 110 %; se varía de forma independiente para cada uno de los 6 elementos con espesores diferentes.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes a los pasos descritos en la metodología definida anteriormente junto con su respectivo análisis y discusión en función con los objetivos planteados para este trabajo.

4.1. Caracterización de la resina

Luego de los ensayos mecánicos se llega a los siguientes resultados para el módulo de Young:

Tabla 4.1: Módulo de Young resultante de ensayo de tracción.[13]

Curado Probeta[min]	E_1 [Gpa]	E_2 [Gpa]	E_{prom} [Gpa]	σ_E
0	3,40	-	3,40	0,00
10	3,45	3,41	3,61	0,31
30	3,92	4,41	4,06	0,12
120	4,40	4,45	4,37	0,09

Tabla 4.2: Módulo de Young resultante de ensayo de compresión.[13]

Curado Probeta[min]	E_1 [Gpa]	E_2 [Gpa]	E_{prom} [Gpa]	σ_E
0	10,10	10,22	10,16	0,08
10	10,5	10,24	10,37	0,19
30	10,88	13,34	12,11	1,75
120	13,41	13,01	13,21	0,28

Al observar los valores promedio para los 3 tipos de ensayos puede verse que los valores para compresión son mucho más altos que para tracción y flexión; llegando a superarlos en promedio en un 197% para tracción y en un 149% para flexión; además, sobre el módulo resultante de los ensayos de tracción y flexión no puede asegurarse que poseen el mismo valor, por lo que la resina presenta módulos de elasticidad diferentes dependiendo del tipo de deformación que se realice.

Tabla 4.3: Módulo de Young resultante de ensayo de flexión.[13]

Curado Probeta[min]	E_1 [Gpa]	E_2 [Gpa]	E_{prom} [Gpa]	σ_E
0	3,44	4,51	3,98	0,76
10	4,06	5,32	4,69	0,89
30	5,15	4,11	4,63	0,73
120	4,88	5,42	5,15	0,38

Al contrastar estos resultados con las propiedades mecánicas de la tabla 2.1 puede verse que la tendencia es que el módulo de elasticidad medido sea menor al asegurado por la empresa Formlabs para las pruebas de flexión y tracción, incluso para un tiempo de curado superior al que se usa para sus pruebas. El único caso donde los valores se acercan al valor entregado es para los ensayos de compresión, donde son superados para un tiempo de curado superior a los 30[min](tabla 4.2). Una posible explicación para esto es el hecho de que la resina es un material compuesto con partículas de vidrio, lo que en esfuerzos de compresión daría una elevada resistencia pero al someterse a esfuerzos de tracción facilitaría su rotura.

Para la densidad luego de medir masa y volumen de las probetas de compresión y flexión se llega a los siguientes valores:

Tabla 4.4: Densidades calculadas para probetas de flexión.[13]

Tiempo Curado[min]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Largo [mm]	Volumen [mm^3]	Peso [gr]	Densidad [$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$]
0	20	4	100	8000	14,19	1773,75
10	20	4	100	8000	14,2	1775
30	20	4	100	8000	14,22	1777,5
120	20	4	100	8000	14,28	1785

Tabla 4.5: Densidades calculadas para probetas de compresión.[13]

Tiempo Curado[min]	Diámetro [mm]	Largo [mm]	Volumen [mm^3]	Peso [gr]	Densidad [$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$]
0	20	20	6283,19	11	1750,7
10	20	20	6283,19	11	1750,7
30	20	20	6283,19	11,06	1760,25
120	20	20	6283,19	11,07	1761,84

De las tablas anteriores puede verse que la densidad es un factor que varía con el tiempo de curado pero no en la misma escala que el módulo de elasticidad. Además de esto, independiente del tiempo, puede verse que la tendencia es que la densidad es ligeramente más alta para las probetas de flexión en comparación con las probetas de compresión. Este comportamiento puede deberse a la forma de cada probeta y como cada una se comporta en el poscurado; la probeta de flexión posee una mayor razón área/volumen, por lo que la radiación UV que bombardea la pieza logra penetrarla y fotopolimerizar la resina dentro de

la pieza, lo cual disminuye su volumen y mantiene su masa. Por otro lado, la elevada razón área/volumen de la probeta de compresión evita que la radiación UV penetre al interior de la pieza por lo que esta reducción en volumen no se logra. Es posible también que al endurecerse más rápido la superficie del cilindro no permite un cambio en el volumen interior, hecho que no ocurriría con la probeta de flexión pues al ser más delgada todo el material se endurecería aproximadamente a la misma velocidad.

Se nota que dado que las vibraciones que se propaguen por el panel sándwich lo harán predominantemente mediante la deformación de las placas superior e inferior el valor más apropiado para utilizar dentro de las simulaciones es el correspondiente al de flexión. Dado lo anterior, se decide usar el valor de 5.15[GPa] de la tabla 4.3 para simular la existencia de band gaps y los modos de vibración del panel sándwich a fabricar, de la misma forma se selecciona el valor de $1785[\frac{Kg}{m^3}]$ para la densidad, visto en la Tabla 4.4.

4.2. Impresión de Paneles

4.2.1. Selección de candidatos

La selección de candidatos se realiza con la generación de 2000 combinaciones de espesor y tamaño de celda unitaria; el espesor variará entre 0.5 y 1.5[mm] mientras que el tamaño de celda puede variar entre 15 y 30[mm]. En la tabla 4.6 pueden verse los primeros 10 candidatos en orden decreciente para el ancho del band gap.

Tabla 4.6: Candidatos para fabricación.

	e_1 [mm]	e_2 [mm]	e_3 [mm]	e_4 [mm]	e_5 [mm]	e_6 [mm]	L_c [mm]	$f_{max,bandgap}$ [KHz]	$\Delta_{bandgap}$ [KHz]	ω_{rel} []
1	1,11	0,97	1,42	0,47	0,93	1,35	16,20	25,50	2,42	10,0 %
2	1,08	0,50	1,29	0,64	0,95	1,07	16,18	26,17	1,97	7,8 %
3	1,41	1,22	1,59	0,41	1,19	1,41	16,01	24,10	1,58	6,8 %
4	1,21	0,46	1,34	0,99	0,78	1,47	16,06	23,34	1,57	7,0 %
5	0,60	0,86	1,57	1,10	0,70	1,52	17,61	19,13	1,57	8,5 %
6	0,71	0,82	1,59	0,48	1,36	1,27	17,26	20,06	1,56	8,1 %
7	1,60	0,53	1,40	0,71	1,54	1,59	18,17	20,01	1,52	7,9 %
8	1,20	0,65	1,25	0,54	0,48	1,52	16,78	25,67	1,51	6,1 %
9	0,70	1,14	1,48	0,44	1,01	1,40	15,85	21,70	1,45	6,9 %
10	0,87	0,50	1,19	0,79	0,49	1,46	16,30	25,08	1,29	5,3 %

De esta tabla puede comenzar a verse que las frecuencias naturales del panel son bastante más elevadas de lo esperado, por lo que el modelo comienza a presentar diferencias con pruebas experimentales desde este punto. Al comparar los espesores de los elementos viga (columnas e_1 a e_6 de la tabla 4.6) puede verse que la mayoría de candidatos presenta

espesores cercanos a $0.5[\text{mm}]$.

Dado que Preform recomienda que los puntos de contacto sean como mínimo $0.4[\text{mm}]$ se preferirán combinaciones que no estén bajo esta barrera, además, se impone que no más de uno de los espesores este cerca del límite y el resto sea cercano a $1[\text{mm}]$ para que así existan menos posibilidades de que se sitúen soportes en los elementos más delgados. Bajo este criterio, serían buenos candidatos los N° 1, 3 y 4. En cuanto al tamaño de la celda unitaria (L_c), todos los candidatos están entre 16 y $18[\text{mm}]$, por lo que no se descarta ninguno y el tamaño del panel final no será un problema en cuanto al volumen disponible en la impresora. Finalmente, dentro de las 3 combinaciones el N°1 es el que presenta el mayor band gap relativo por lo que este será el candidato a fabricar.

En la figura 4.1 puede verse ilustrado el gráfico de bandas del diseño elegido junto con su band gap asociado destacado en gris, junto a este se presentan los modos de vibración para la celda unitaria de un panel con el diseño elegido calculadas en Matlab y FEMtools.

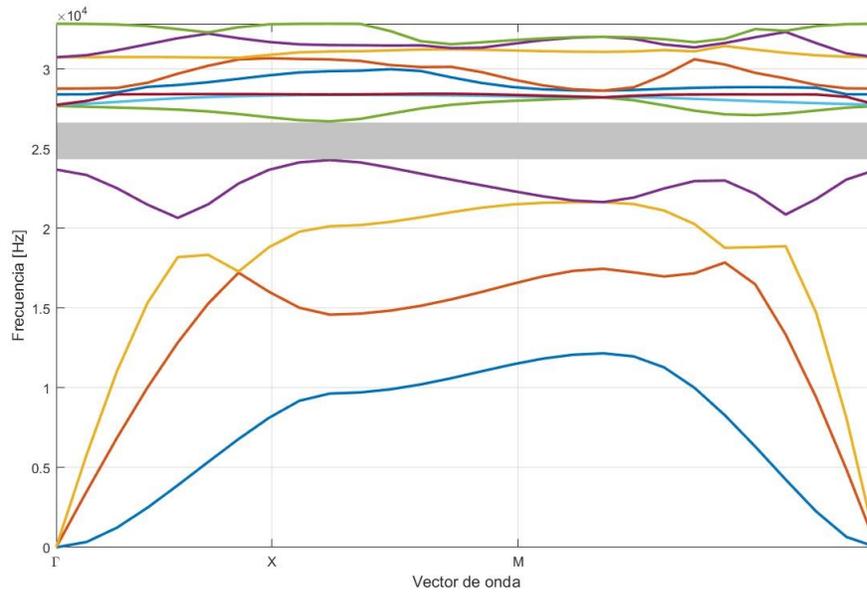


Figura 4.1: Band gap teórico resultante del diseño elegido.

Del band gap teórico en la figura 4.1 puede apreciarse que las frecuencias donde se presenta un band gap son muy altas para un panel infinito, cerca de un orden de magnitud más altas que lo esperado. Al verificar el cálculo de las frecuencias de resonancia para la celda unitaria se decide calcular estas frecuencias en el software FEMtools, llegándose a los resultados en la segunda columna de la tabla 4.7; cabe destacar que estas frecuencias no están asociadas por forma modal pues no todas las formas coinciden entre ambos conjuntos de frecuencias, aun así, las primeras 2 sí lo hacen; lo que descarta la posibilidad de que FEMtools detecte modos en frecuencias de $5,9[\text{KHz}]$ y $9,7[\text{KHz}]$ y Matlab no.

Al observar ambos pares de frecuencias se nota una clara diferencia entre estas, pues en modelo de Matlab comienzan a aparecer frecuencias de resonancia desde los $13[\text{KHz}]$ aproximadamente, mientras que para la simulación de FEMtools las frecuencias de resonancia

Tabla 4.7: Modos de vibración para un panel una celda unitaria.

Modos celda unitaria (Matlab)[KHz]	Modos celda unitaria (FEMtools)[Khz]
13,70	5,935
15,08	9,792
21,23	13,843
23,24	14,975
24,25	15,699
25,38	15,699
27,06	18,366
27,31	18,366
27,80	18,635

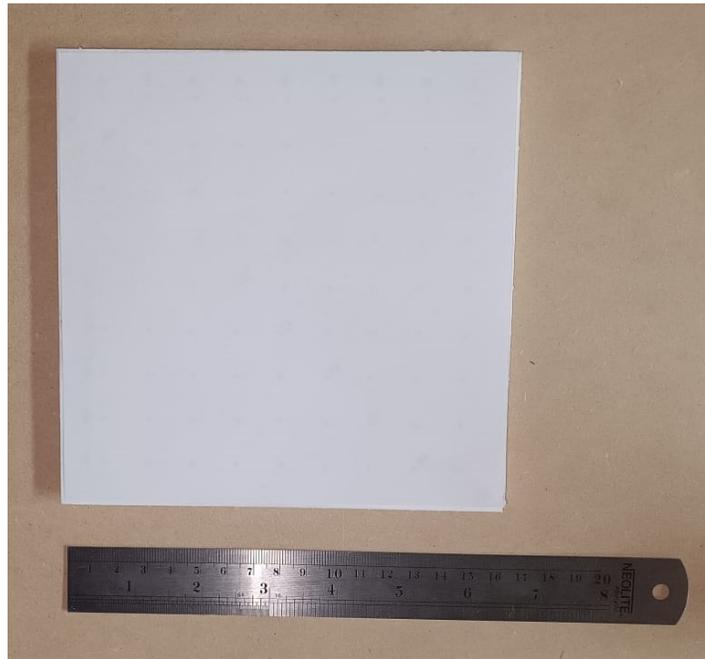
comienzan a aparecer desde los 6[KHz]. Ya por si solas las frecuencias donde se presenta el band gap en Matlab difieren de lo esperado; además de esto, al compararlas con las frecuencias de resonancia de la celda unitaria se aprecia una clara disonancia entre el modelo de Matlab y FEMtools, pues es de esperarse que estas últimas frecuencias sean ordenes de magnitud más altas que las del panel infinito meramente por las dimensiones. A lo anterior también debe agregarse que el modelo de elementos finitos usado en FEMtools para el cálculo de estas frecuencias es el mismo que crea Matlab para su simulación, exportado directamente del programa.

4.2.2. Configuración de impresión

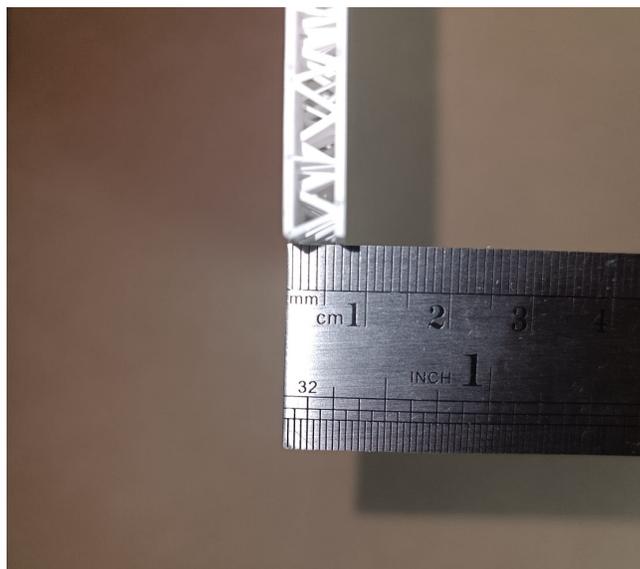
Se presenta el diseño final del panel sándwich impreso en la figura 4.2. Esta impresión se logra con las siguientes configuraciones en el software Preform:

- **Orientación del panel vertical e inclinado en aproximadamente 30° respecto a la cama de impresión:** esta orientación permite que existan menos soportes y la inclinación disminuye la cantidad de área que debe barrerse desde el inicio, mejorando la calidad de la impresión.
- **Espesor de capa de 0.05[mm]:** disminuye notoriamente la cantidad de soportes y permite un tamaño de panel mayor.
- **Soportes internos desactivados:** se descubre en las primeras iteraciones de impresión que es inviable remover los soportes internos por lo que se decide desactivarlos.
- **Tamaño de punto de contacto de 0.4[mm]:** es la mínima dimensión de punto de contacto posible que recomienda el software Preform antes de elevar un aviso, además facilita la extracción de los soportes sin afectar la estructura del panel.
- **El resto de configuraciones se mantienen por defecto.**

Adicionalmente, se realizó una edición manual de los puntos donde están en contacto los soportes y el panel para evitar en lo posible que un soporte este en el medio de un elemento



(a) Vista Superior.



(b) Vista Lateral.

Figura 4.2: Prototipo impreso.

viga; en especial si es uno de los que posee menor espesor. También se aumentó el tamaño de punto de contacto para los soportes que tocan las placas del panel para compensar el hecho de que se disminuye el punto de contacto de algunos soportes y se eliminan otros. Finalmente, los soportes se extraen posterior al lavado pero previo al poscurado, evitando que los elementos viga se vuelvan demasiado frágiles y posiblemente se desprendan con los soportes.

4.3. Modos de vibración

En esta sección se comparan los modos de vibración resultantes de la simulación de un **panel finito de 10x10 celdas unitarias** y los obtenidos experimentalmente mediante la prueba de excitación por martillo modal junto con los modos teóricos calculados por FEMtools para el mismo modelo FEA del panel finito, En la siguiente tabla pueden verse asociados por su forma modal:

Tabla 4.8: Modos de vibración para el panel sándwich **finito**.

Modos Teóricos (Matlab)[Hz]	Modos Teóricos (FEMtools)[Hz]	Modos Experimentales[Hz]
354,3	254,54	538,98
543	389,07	833,48
662,2	474,76	994,91
891,5	637,95	1323,5
1559	1111,8	2181,2
1869	1333,5	2573,1
2393	1702,2	3231,9

Adicionalmente, se muestra en la figura 4.3 la función de respuesta en frecuencia del panel impreso obtenida de la prueba de excitación por martillo modal, esta se construye con la suma normalizada de todas las FRF para cada punto excitado del panel sándwich, visto en la figura 3.2.

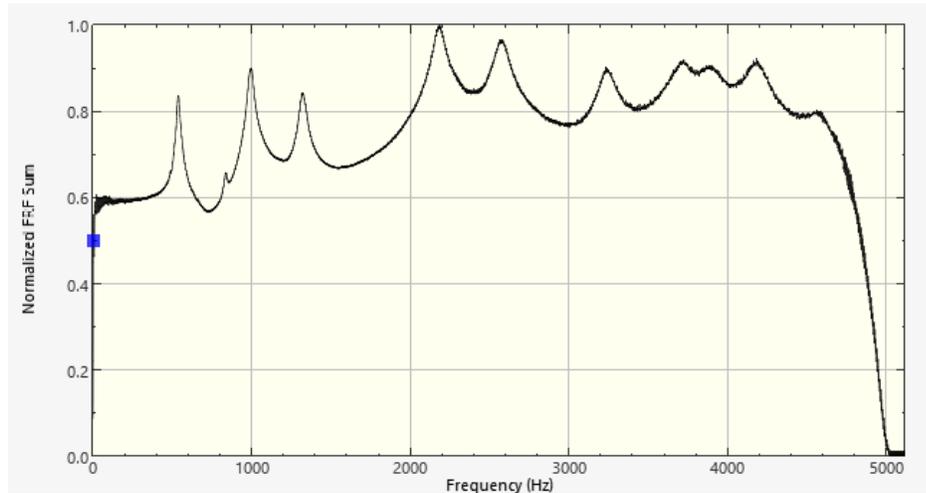


Figura 4.3: Función de Respuesta en Frecuencia experimental del panel fabricado.

De la función de respuesta en frecuencia de la figura 4.3 se observa la ausencia de un band gap de cualquier tipo; lo cual era de esperarse si se recuerda que según la figura 4.1 el band gap teórico para este panel correspondía a frecuencias de entre 25 a 28[KHz], muy por sobre el rango de la FRF obtenida. Además de esto, el haber cambiado la punta del martillo por

una de mayor dureza para aumentar el rango de frecuencia captado no hubiera resultado en la detección de un band gap, pues si las primeras frecuencias de resonancia experimentales se presentan en el rango entre 538 y 3231[Hz] se condiciona al band gap a estar cerca de este rango.

Se nota una clara discrepancia entre los modelos teóricos de Matlab, FEMtools y los resultados experimentales, siendo los últimos los que presentan una frecuencia más alta; aunque a diferencia del caso de paneles infinitos las frecuencias están dentro de los ordenes de magnitud esperados. Otro detalle que puede notarse entre los modos teóricos de FEMtools y los modos calculados experimentalmente es que se diferencian por un factor 2, es decir son aproximadamente el doble del otro. Se debe mencionar también que al igual que en el caso del análisis de los modos para la celda unitaria, el modelo de elementos finitos usado en FEMtools es el mismo que usa Matlab para el cálculo de estos modos de vibración.

4.4. Ajuste de parámetros

4.4.1. Primera Iteración

Finalmente para poder acercar el modelo de elementos finitos con los resultados experimentales se realiza una variación automática de los siguientes parámetros:

- Módulo de Young entre un 90 % y un 200 % del valor original para todo el panel sándwich (a ser fijado mediante la caracterización de la resina).
- Densidad entre un 80 % y un 120 % de su valor original(a ser fijado mediante la caracterización de la resina).
- Área transversal de los elementos viga entre un 90 % y un 110 %; se varía de forma independiente para cada uno de los 6 elementos con espesores diferentes, se nota también que la variación en $x\%$ en área no corresponde a un cambio de $x\%$ en el diámetro.

Los cambios sugeridos por el programa que acercan lo mejor posible el modelo de elementos finitos al experimental se muestran en la tabla 4.9. Además se adjunta la comparación entre frecuencias de resonancia del modelo de elementos finitos y las frecuencias obtenidas experimentalmente en la tabla 4.10.

Puede verse que las propiedades mecánicas varían bastante de las elegidas para la simulación de band gaps en la sección 3.2, lo que indicaría que el mecanismo por el que predominantemente se propagan las vibraciones dentro del panel no es flexión, sino una combinación entre éste y compresión; dado el elevado valor del módulo de Young sugerido. Este problema puede estar asociado al hecho de que la resina es un compuesto que presenta partículas de vidrio que se menciona en la sección 2.7.1; lo que provocaría la presencia de múltiples módulos de Young para diferentes esfuerzos ejercidos. A causa de esto, una medida a tomar para futuros estudios de paneles sándwich sería el uso de una resina no compuesta que presente módulos de Young similares para los 3 tipos de ensayos realizados.

De la misma tabla 4.9 puede verse que las dimensiones de los elementos viga cambian para poder acercar el modelo de elementos finitos al modelo experimental.

Tabla 4.9: Parámetros originales y sugeridos por FEMtools.

	Original	Sugerido	Diferencia[%]
E[Gpa]	5,15	10,3	99,6 %
$\rho[\frac{KG}{m^3}]$	1785	1428	-20,0 %
$e_1[mm]$	1,104	1,043	-5,5 %
$e_2[mm]$	0,974	1,269	30,4 %
$e_3[mm]$	1,417	0,966	-31,8 %
$e_4[mm]$	0,474	0,308	-35,1 %
$e_5[mm]$	0,930	0,565	-39,3 %
$e_6[mm]$	1,354	1,658	22,5 %

Tabla 4.10: Frecuencias del modelo de elementos finitos después del ajuste de parámetros.

Frecuencias de resonancia[Hz]	FEA	Experimentales	Error [%]
1	484	539	11,3 %
2	751	833	11,0 %
3	898	994	10,7 %
4	1.156	1.323	14,4 %
5	1.910	2.181	14,1 %
6	2.214	2.573	16,2 %
7	2.724	3.231	18,6 %

4.4.2. Segunda Iteración

En vista de los resultados anteriores puede decirse que no se logra un buen ajuste entre el modelo de elementos finitos y el modelo experimental. Dada la naturaleza del material y como se comporta de forma diferente al estar bajo diferentes esfuerzos es posible que el uso del modulo elástico obtenido mediante ensayos de flexión no sea el apropiado para los elementos viga presentes en el núcleo del panel sándwich. Aun mas, se esperaría que, dada su disposición dentro del panel, estos elementos experimenten esfuerzos de compresión al transmitir vibraciones desde una placa a otra.

Para comprobar esto se decide realizar una segunda iteración del ajuste de parámetros, esta vez manteniendo el área transversal de los elementos de viga y variando:

- Modulo de Young entre un 90 % y un 110 % del valor usado anteriormente (5,15[GPa]), llegando así al valor del modulo elástico encontrado en los ensayos de compresión. Esta variación se realizará de forma independiente para los 6 elementos de viga y el conjunto de elementos de placa del panel sándwich.
- Densidad entre un 90 % y un 110 % de su valor original(a ser fijado mediante la caracterización de la resina).

Al variar estos parámetros dentro del software FEMTools se llega a los valores mostrados en la tabla 4.11

Tabla 4.11: Parámetros originales y sugeridos por FEMTools para módulos elásticos. *NOTA: el sufijo p denota que corresponde a las placas y las designaciones numéricas denotan los elementos de viga.*

	Original	Sugerido	Diferencia [%]
E_p [Gpa]	5,15	10,81	110,0 %
E_1 [Gpa]	5,15	9,39	82,3 %
E_2 [Gpa]	5,15	10,82	110,0 %
E_3 [Gpa]	5,15	10,82	110,0 %
E_4 [Gpa]	5,15	8,24	60,1 %
E_5 [Gpa]	5,15	8,49	64,9 %
E_6 [Gpa]	5,15	6,79	31,9 %
ρ $[\frac{KG}{m^3}]$	1785,00	1606,50	-10,0 %

Junto con estos valores se comparan los modos de vibración del modelo de elementos finitos con los obtenidos experimentalmente en la tabla 4.12

Tabla 4.12: Frecuencias del modelo de elementos finitos después del segundo ajuste de parámetros

Frecuencias de resonancia[Hz]	FEA	Experimentales	Error [%]
1	450	539	19,6 %
2	698	833	19,5 %
3	840	995	18,4 %
4	1.092	1.324	21,2 %
5	1.835	2.181	18,8 %
6	2.144	2.573	20,0 %
7	2.659	3.232	21,6 %

Además de la tabla 4.12 se presentan en el Anexo 1 las formas modales experimentales(rojo) superpuestas con las formas modales del modelo de elementos finitos (azul). Se debe mencionar que una correspondencia perfecta significa que el modelo experimental se verá completamente por sobre el modelo de elementos finitos, llegando a la misma forma modal.

Al comparar los resultados de la tabla 4.11 puede apreciarse que el modulo elástico tiende a ser mas elevado que el seleccionado en base a ensayos de flexión, lo que sugiere que para todo el panel sándwich, incluyendo las placas superior en inferior, las vibraciones no se propagan predominantemente mediante esfuerzos de flexión. Además otro comportamiento interesante es que el modulo elástico de las placas también sugiere que las vibraciones dentro de esta se propagan mediante esfuerzos mixtos.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

Se logra evaluar de forma experimental el modelo teórico para la predicción de band gaps en paneles sándwich manufacturados a partir de manufactura aditiva en forma de impresión por resina. Se selecciona un diseño de panel sándwich en base a criterios que facilitaran tanto su impresión como la obtención de resultados experimentales.

Además de lo anterior se logra diseñar y manufacturar el panel seleccionado y asociado a esto se encuentra una configuración de impresión para este tipo de metamaterial que resulte en paneles que no comprometan su periodicidad. Esto permitió la obtención experimental de tanto las frecuencias y modos de resonancia al igual que la función de respuesta en frecuencia del prototipo fabricado.

Al contrastar los modos de vibración teóricos tanto para una celda unitaria como para un panel compuesto de repeticiones de esta celda se encuentran claras disparidades en los valores de frecuencia y, en el caso de celdas unitarias, de las formas modales. Dado lo anterior puede afirmarse que el modelo examinado no logra simular satisfactoriamente el comportamiento de un panel sándwich y por ende tampoco es capaz de simular el fenómeno de band gaps de forma confiable.

Del ajuste de parámetros efectuado se puede deducir que las vibraciones dentro del panel no se propagan solamente por esfuerzos de flexión, sino una combinación de esfuerzos; ligado a esto también puede afirmarse que la resina utilizada para la fabricación del panel sándwich experimental no es la adecuada, pues al estar compuesta con partículas de vidrio dificulta la obtención de propiedades mecánicas necesarias para la simulación previa. Por esto mismo se recomienda usar resinas no compuestas para futuros estudios experimentales con paneles sándwich o cualquier estudio que requiera una caracterización del material.

Un aspecto a considerar como fuente de incertidumbre es la baja cantidad de paneles con los que se realizó la prueba de excitación con martillo modal. Un mayor número de especímenes para analizar usando esta prueba permitiría entregar información sobre la confiabilidad con la que se logra llegar a propiedades mecánicas similares en la resina además de entregar mayor información con la que calcular los modos de vibración y múltiples funciones de respuesta en frecuencia.

Finalmente, debe considerarse que el problema que resuelve FEMTools en la iteración de

parámetros para acercar el modelo de elementos finitos al experimental no posee una única solución y en ocasiones puntuales estas soluciones son apreciablemente diferentes. Por lo anterior si se desea utilizar este método se recomienda realizar múltiples iteraciones con el fin de examinar el comportamiento de las soluciones que arroja el programa y llegar a un resultado mas preciso.

Bibliografía

- [1] Alkaios Bournias. What is SLA 3D printing?. 2020. [en línea] <<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/#sla-best-practices>> [consulta: 02 de Junio 2022]
- [2] Premium3D. Impresión 3d en resina o estereolitografía (SLA). 2021. [en línea] <<https://premium3d.co/impresion-3d-en-resina-o-estereolitografia-sla-como-funciona/>> [consulta: 02 de Junio 2022]
- [3] S. J. Yeo, M. J. Oh, and P.J Yoo. Structurally controlled cellular architectures for high-performance ultra-lightweight materials. *Advanced Materials*, vol. 31, no. 34, p. 1803670, 2019.
- [4] Galvez, V. S. 2021. Desarrollo de modelos en elementos finitos parametrizados de paneles tipo sándwich con núcleos ultralivianos para predecir band gaps. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [5] Quinteros Palominos L. D. 2020. Optimización de band-gap en materiales tipo sándwich. Tesis para optar al grado de Magíster en ciencias de la ingeniería, mención Mecánica. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [6] Oraib Al-Ketan, Reza Rowshan, Abdul Hai Alami. 2022. Biomimetic Materials for Engineering Applications.[en línea]. Encyclopedia of Smart Materials, Vol 3, p25-34. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00019-X>>[consulta: 03 d ejunio 2022]
- [7] Deymier P. A. 2013. Acoustic metamaterials and phononic crystals, vol 173. Springer Science & Business Media.
- [8] Sigalas M. & Kushwaha, M. & Economou, E. & Kafesaki, M. 2005. Classical vibrational modes in phononic lattices: Theory and experiment. *Zeitschrift Fur Kristallographie*, 220. 765-809.
- [9] Halkjær S. & Sigmund O. & Jensen J. 2006. Maximizing band gaps in plate structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 32. 263-275.
- [10] FORMLABS. Guide to Post-Processing and Finishing SLA 3D Prints. 2020. [en línea] <<https://formlabs.com/blog/post-processing-and-finishing-sla-prints/>>[consulta: 03 de junio 2022]
- [11] FORMLABS. Uso de la Rigid 10K Resin. 2020. [en línea] <<https://support.formlabs.com/s/article/Using-Rigid-10k-Resin?language=es>>[consulta: 07 de septiembre 2022]
- [12] Meruane V. Dinamica Estructural, Apuntes para el curso ME 706.
- [13] Rodríguez D. 2022. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL MECÁNICA DE PANELES SANDWICH ULTRALIVIANOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Universidad de Chile,

Anexo

FE Model
Test Model



Figura 5.1: Par 1

FE Model
Test Model

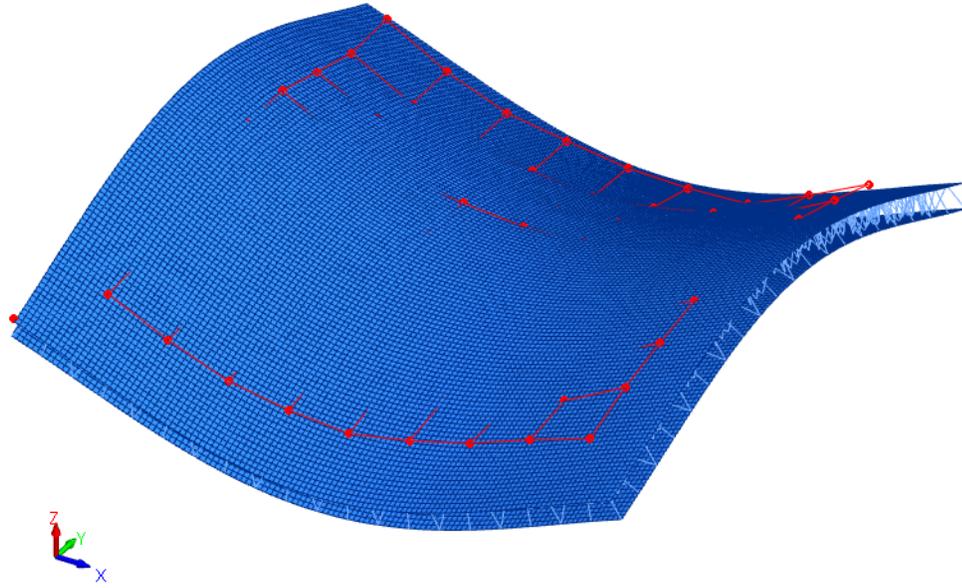


Figura 5.2: Par 2

FE Model
Test Model

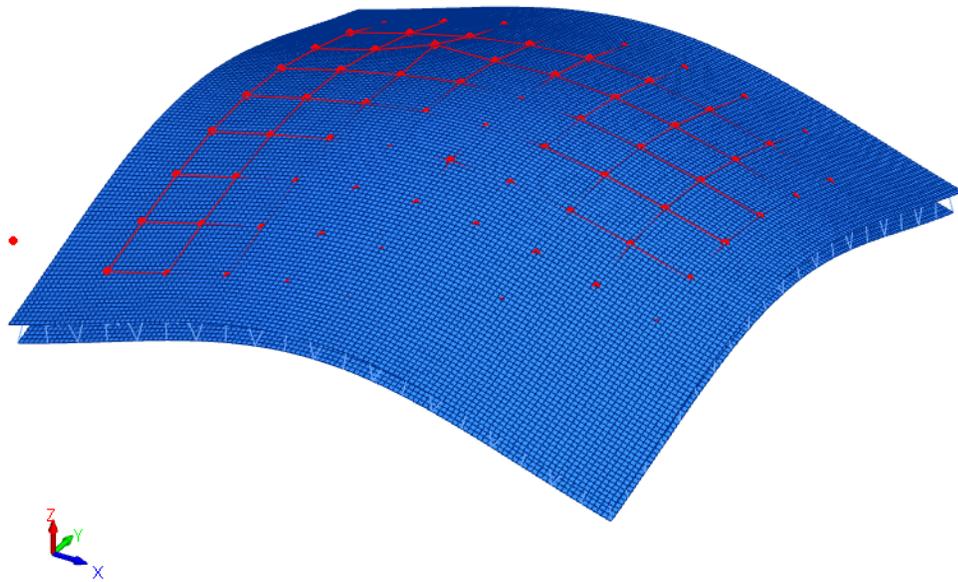


Figura 5.3: Par 3

FE Model
Test Model

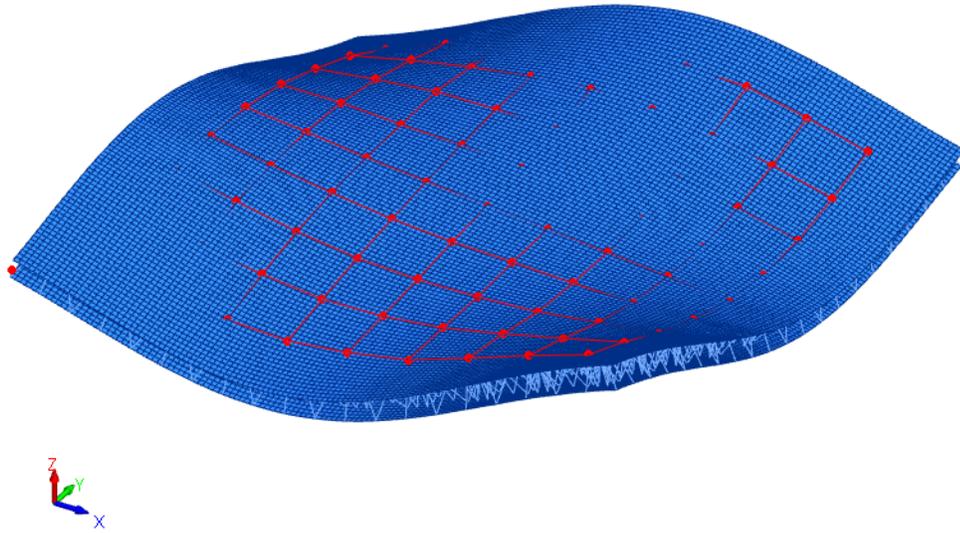


Figura 5.4: Par 4

FE Model
Test Model



Figura 5.5: Par 5

FE Model
Test Model

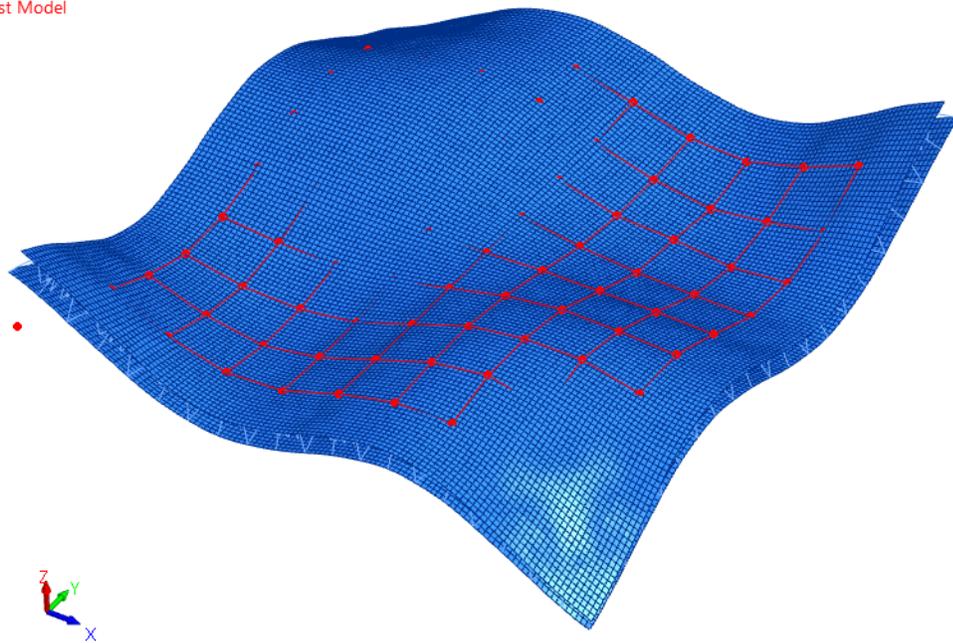


Figura 5.6: Par 6

FE Model
Test Model

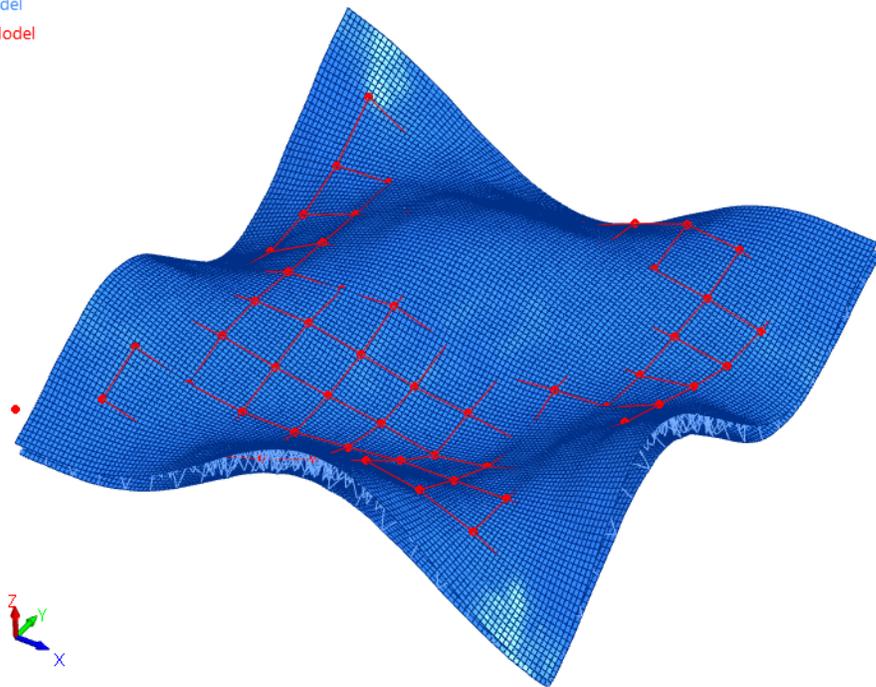


Figura 5.7: Par 7