



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

## **FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL MECÁNICA DE PANELES SANDWICH ULTRALIVIANOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DIEGO ANDRÉS RODRÍGUEZ OCARANZA

PROFESOR GUÍA:  
Rubén Fernández Urrutia

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Viviana Meruane Naranjo  
Alí Akbarifakhrabadi

SANTIAGO DE CHILE  
2023

# FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL MECÁNICA DE PANELES SANDWICH ULTRALIVIANOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

## Resumen

Los metamateriales son materiales inteligentemente diseñados que poseen propiedades inusuales o extraordinarias desde el punto de vista ingenieril, únicamente por la forma de diseño y no a su material de composición. Diseños inteligentes de los núcleos de paneles tipo sándwich pueden proporcionar supresión de ciertas bandas de frecuencias vibratorias, alta rigidez y resistencia mecánica y a su vez ser ultraliviano, propiedades importantes desde el punto de vista estructural que ya han sido parte de diseños ingenieriles en la industria aeronáutica, espacial, automotriz, ferroviaria, sistemas de energía eólica, entre otros.

Los paneles tipo sándwich son estructuras de tres capas, donde dos capas livianas y rígidas abrazan un núcleo liviano más grueso, que será fabricado de metamaterial para este trabajo en particular. La fabricación será mediante impresión 3D de resina.

En consideración de lo expuesto, el objetivo general de este trabajo es caracterizar propiedades y comportamiento mecánico de paneles tipo sandwich fabricados con impresoras 3D de resina y evaluar la incidencia del tiempo de curado. Esto, debido a que conocer con certeza las propiedades mecánicas de estos metamateriales es clave en la investigación de supresión de bandas de frecuencia o Band Gaps en paneles tipo Sándwich.

Los objetivos específicos son modelar en software CAD el panel tipo sandwich y su núcleo, imprimir probetas de ensayo y paneles tipo sandwich en 3D con resina y caracterizar las propiedades mecánicas; El módulo de Young, resistencia a la flexión, densidad y como cambia a lo largo de la estructura y si el proceso de curado de la resina posee alguna incidencia en estas propiedades, tanto de las probetas como de los paneles.

La metodología general del presente trabajo inicia con la modelación computacional de los paneles tipo sandwich, en particular, de la geometría del núcleo. Esto se desarrollará en software tipo CAD y Matlab o python. Luego, se procede a generar un modelo de formato .stl para que pueda ser impreso en la impresora de resina de FONDECYT, ubicada en el Fablab. Con esto, se realizan ensayos mecánicos a probetas y paneles sándwich para la obtención de las propiedades mecánicas de estos metamateriales, ya que son clave en la caracterización vibratoria y supresión de bandas de frecuencias de los paneles.

*Memoria dedicada a mi linda familia, mis buenos amigos, por los que están y por los que se fueron, cada una de mis mascotas y en especial a Hamlet, mi gato.*

***Saludos***

# Agradecimientos

*“Si veo más lejos es porque he subido a hombros gigantes”*

-I. Newton

En primer lugar, quiero agradecer la amistad, el amor y el dolor que me acompañó estos 6 años de mi vida universitaria. Todo esto me ayudó a crecer y a entender que lo único que se, es que efectivamente, nada sé. Agradecer a la vida que me permitió conocer personas maravillosas con un corazón de oro, que si bien algunas se fueron, me enseñaron valiosas lecciones que guardo con amor en mi corazón.

Agradecer el apoyo incondicional de mi familia, mis abuelitos y mis padres, a mi mamá que me apoyó estando muy enferma, que todos los días rezo para que mejore su estado de salud y a mi papá, que siempre estuvo a mi lado. Agradezco que son buenas personas y que me amaron antes de que fuera inteligente. también agradezco a todos y cada uno de mis amigos, que no saben lo orgulloso que estoy de todos ellos. Me siento realmente afortunado de coincidir con personas extraordinarias.

Finalmente, agradecer a mis profesores guía Rubén Fernández y co-guía Viviana Meruane, por su infinita paciencia, responsabilidad y tiempo.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Antecedentes básicos: Metamateriales en paneles sándwich . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivo general . . . . .	2
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.4. Alcances . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Paneles tipo sándwich con núcleos celulares . . . . .	3
2.1.1. Materiales celulares . . . . .	4
2.1.2. Metamateriales . . . . .	4
2.1.3. Paneles Sándwich . . . . .	5
2.2. Estructuras nucleares de Paneles Sándwich . . . . .	6
2.2.1. Simetría y zona irreducible de Brillouin . . . . .	6
2.2.2. Imposición de la simetría e IBZ a la estructura Pirámide central . . . . .	7
2.3. Modelación e Impresión en 3D . . . . .	9
2.3.1. Estereolitografía . . . . .	9
2.3.2. Resina <i>Rigid 10k</i> . . . . .	10
2.4. Caracterización Mecánica . . . . .	12
2.4.1. Ensayo de Tracción . . . . .	13
2.4.2. Ensayo de Flexión . . . . .	15
2.5. Microscópio electrónico de barrido . . . . .	16
<b>3. Metodología</b>	<b>18</b>
3.1. Modelamiento de probetas . . . . .	18
3.2. Impresión de probetas . . . . .	20
3.2.1. Lavado y poscurado de probetas . . . . .	20
3.3. Caracterización de probetas . . . . .	20
3.3.1. Caracterización mecánica . . . . .	20
3.3.2. Caracterización física: Densidad . . . . .	21
3.4. Datos a usar en el modelo de optimización de Band Gaps . . . . .	21
3.5. Modelamiento de panel tipo sándwich . . . . .	21
3.6. Impresión de Paneles Sándwich . . . . .	22
3.7. Caracterización de paneles sándwich . . . . .	22
3.7.1. Caracterización mecánica . . . . .	23
3.7.2. Caracterización física: Densidad . . . . .	23

3.8. Análisis en microscópio electrónico de barrido . . . . .	23
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>24</b>
4.1. Modelamiento de probetas . . . . .	24
4.2. Impresión de probetas . . . . .	24
4.2.1. Lavado y poscurado de probetas . . . . .	25
4.3. Caracterización mecánica de probetas . . . . .	25
4.3.1. Ensayo de tracción . . . . .	26
4.3.2. Ensayo de compresión . . . . .	31
4.3.3. Ensayo de flexión . . . . .	37
4.3.4. Caracterización física: Densidad . . . . .	44
4.4. Datos usados para el modelo de optimización de Band Gaps . . . . .	46
4.5. Modelamiento de Paneles . . . . .	47
4.6. Impresión de Paneles . . . . .	50
4.7. Caracterización mecánica de paneles sándwich con núcleo tipo Pirámide central	50
4.7.1. Ensayo de flexión . . . . .	51
4.7.2. Caracterización física: Densidad . . . . .	56
4.8. Análisis en microscópio electrónico de barrido . . . . .	57
4.8.1. Formas y texturas de la superficie de probetas . . . . .	58
4.8.2. Formas y texturas de la superficie de paneles sándwich . . . . .	59
4.8.3. Composición química de la resina Rigid 10k Resin . . . . .	61
<b>5. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>64</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Rigidez y resistencia a la flexión relativa y peso de estructura tipo sándwich [2] en relación al espesor de la placa rígida $t$ . . . . .	4
2.2.	Datos de las propiedades de la Rigid 10K Resin[9] . . . . .	11
2.3.	Compatibilidad de la resina Rigid 10K Resin[9] . . . . .	12
3.1.	Número de probetas por ensayo . . . . .	19
4.1.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	27
4.2.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	28
4.3.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	29
4.4.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	30
4.5.	Módulo de elasticidad para probetas ensayadas en tracción . . . . .	30
4.6.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	33
4.7.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	34
4.8.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	35
4.9.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	36
4.10.	Módulo de elasticidad para probetas ensayadas en compresión . . . . .	36
4.11.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	38
4.12.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	39
4.13.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	40
4.14.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	41
4.15.	Módulo de elasticidad para probetas ensayadas en flexión. . . . .	41
4.16.	Módulo de Young para los ensayos mecánicos realizados. . . . .	43
4.17.	Tabla comparativa módulos elásticos . . . . .	44
4.18.	Datos de la probeta de flexión . . . . .	44
4.19.	Datos de la probeta de compresión . . . . .	45
4.20.	Factores de radio y altura para los elementos de viga del panel sándwich. . . . .	46
4.21.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	52
4.22.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	52
4.23.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	53
4.24.	Cálculo del módulo de Young . . . . .	54
4.25.	Módulo de elasticidad para paneles ensayados en flexión . . . . .	54
4.26.	Datos de paneles sándwich con núcleo pirámide central . . . . .	56
4.27.	Composición química de Rigid 10k Resin . . . . .	62

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Paneles tipo sándwich con distintas configuraciones de núcleos [1] . . . . .	3
2.2.	Ejemplo de material celular con celdas estocásticas, microestructura de un hueso esponjoso [3] . . . . .	4
2.3.	Ejemplo de materiales [4] . . . . .	5
2.4.	Ejemplo de panel sándwich [5] . . . . .	6
2.5.	Estructuras nucleares de los paneles sándwich estudiadas [6] . . . . .	6
2.6.	Estructuras nucleares de los paneles sándwich estudiados [6] . . . . .	7
2.7.	Vista isométrica de la estructura pirámide central coloreado según su IBZ [6] .	8
2.8.	IBz de la estructura presentada en 2D [6] . . . . .	8
2.9.	Esquema impresión SLA obtenida de <i>www.creativity.com</i> . . . . .	9
2.10.	Impresora Formlab que se usará en este proyecto [8] . . . . .	10
2.11.	Esquema ensayo de tracción [10] . . . . .	13
2.12.	Curva ensayo de tracción [11] . . . . .	14
2.13.	Esquema ensayo de flexión. . . . .	15
2.14.	Microscopio electrónico de barrido. Geología, FCFM. . . . .	17
3.1.	Metodología general. . . . .	18
3.2.	Dimensiones probeta ISO D638 . . . . .	19
3.3.	Dimensiones probeta ISO D790 . . . . .	19
3.4.	Dimensiones probeta cilíndrica para compresión . . . . .	20
3.5.	IBz de la estructura Piramide central generada en inventor . . . . .	21
3.6.	Núcleo del panel generado por patrones simétricos de la IBz en inventor . . .	22
3.7.	Celda básica del panel sándwich con núcleo tipo pirámide central. . . . .	22
4.1.	Modelamiento de probetas para ensayos mecánicos. . . . .	24
4.2.	Probetas impresas en bandeja de Formlab, Fablab U. de Chile . . . . .	25
4.3.	Lavado de probetas impresas . . . . .	25
4.4.	Configuración del ensayo de tracción . . . . .	26
4.5.	Curva de tracción para probeta no curada. . . . .	26
4.6.	Curva de tracción para probeta curada 10 minutos. . . . .	27
4.7.	Curva de tracción para probeta curada 30 minutos. . . . .	28
4.8.	Curva de tracción para probeta curada 120 minutos. . . . .	29
4.9.	Módulo de Young VS tiempo de curado de la probeta. . . . .	30
4.10.	Fractura probetas para el ensayo de tracción . . . . .	31
4.11.	Configuración del ensayo de compresión . . . . .	32
4.12.	Curva de compresión para probeta no curada. . . . .	32
4.13.	Curva de compresión para probeta curada 10 minutos. . . . .	33
4.14.	Curva de compresión para probeta curada 30 minutos. . . . .	34
4.15.	Curva de compresión para probeta curada 120 minutos. . . . .	35
4.16.	Módulo de Young VS tiempo de curado de la probeta. . . . .	36

4.17.	Configuración del ensayo de 3 puntos . . . . .	37
4.18.	Curva de flexión para probeta no curada. . . . .	38
4.19.	Curva de flexión para probeta curada 10 minutos. . . . .	39
4.20.	Curva de flexión para probeta curada 30 minutos. . . . .	40
4.21.	Curva de flexión para probeta curada 120 minutos. . . . .	41
4.22.	Módulo de Young VS tiempo de curado de la probeta. . . . .	42
4.23.	Fractura en probeta ensayada a flexión. . . . .	42
4.24.	Módulo de Young para los ensayos mecánicos vs. tiempo de curado de probetas	43
4.25.	Densidad de probetas de flexión y compresión con respecto al tiempo de curado.	45
4.26.	Diagrama de banda obtenido para el panel sándwich tipo pirámide central con las propiedades mecánicas y físicas de Rigid 10k Resin . . . . .	47
4.27.	Factores de radio y altura para el panel sándwich obtenidos del modelo. . . .	48
4.28.	Parámetros generales del modelo. . . . .	48
4.29.	IBZ núcleo tipo pirámide central. . . . .	49
4.30.	Panel sándwich modelado en inventor. . . . .	49
4.31.	Panel sándwich en “Preform” . . . . .	50
4.32.	Panel sándwich impreso . . . . .	50
4.33.	Ensayo de flexión para el panel sándwich. . . . .	51
4.34.	Curva de flexión para panel no curado. . . . .	51
4.35.	Curva de flexión para panel curado 10 minutos. . . . .	52
4.36.	Curva de flexión para panel curado 30 minutos. . . . .	53
4.37.	Curva de flexión para panel curado 120 minutos. . . . .	54
4.38.	Módulo de Young VS tiempo de curado del panel. . . . .	55
4.39.	Fractura del panel. . . . .	55
4.40.	Densidad VS tiempo de curado del panel. . . . .	56
4.41.	Densidad VS tiempo de curado de paneles y probetas. . . . .	57
4.42.	Configuración de probetas fracturadas para observarlas en el microscópio elec- trónico de barrido. . . . .	58
4.43.	Probetas cobfiguradas en el microscopio electrónico de barrido. . . . .	58
4.44.	Fracturas en probetas en diferentes escalas. Cada una es un Zoom de la anterior.	59
4.45.	Zona de estudio del panel sándwich. . . . .	60
4.46.	Fracturas en paneles en diferentes escalas. . . . .	61
4.47.	Espectro analizado para obtener la composición química de la resina Rigid 10k	62
4.48.	Análisis químico de la resina. . . . .	62

# Capítulo 1

## Introducción

El desarrollo y la evolución implica la constante gestación de nuevas necesidades y urgencias, las cuales, a lo largo del tiempo, han puesto a trabajar el ingenio del ser humano. En este sentido, el descubrimiento de nuevos materiales y técnicas de fabricación y manufactura han sido factores claves en el desarrollo de nuevas tecnologías.

Un área potenciada por la manufactura aditiva es la fabricación de piezas y estructuras complejas, como lo son los metamateriales, a costos y tiempos de fabricación realmente acotados. Estos materiales son fabricados con el objetivo de alcanzar propiedades inusuales y extraordinarias, provenientes de su forma de diseño y no del material que lo compone.

Dentro de las aplicaciones estructurales de los metamateriales están los paneles tipo sándwich con núcleos últralivianos impresos con metamateriales. Estos también poseen control de vibraciones, los que teóricamente pueden suprimir ciertas bandas de frecuencia (band gaps).

Para probar lo anterior, la supresión de bandas de frecuencias en paneles tipo sándwich impresos en 3D es clave conocer con certeza las propiedades mecánicas de la resina y determinar si el tiempo de poscurado de esta incide en las propiedades mecánicas del material, y por tanto, las propiedades vibratorias. La caracterización mecánica de este material resulta imprescindible para poder diseñar estos metamateriales.

### 1.1. Motivación

Últimamente se han desarrollado diferentes técnicas de manufactura aditiva inteligente en materiales conocidos, para fabricar materiales con propiedades extraordinarias que escapan de lo convencional.

La innovación en el campo de los metamateriales podría traer grandes beneficios al mundo de la ingeniería, en particular, este proyecto de investigación propone que ciertos metamateriales pueden suprimir bandas de frecuencia, lo que puede ser beneficioso para estructuras que suelen fallar por fatiga causada por vibraciones. Estos diseños ingenieriles, que se proponen en el presente trabajo, son proyectados para el uso en industrias como la aeroespacial, automotriz, ferroviaria, eólica, minera, entre otros.

## **1.2. Antecedentes básicos: Metamateriales en paneles sándwich**

Los metamateriales son materiales artificiales que poseen propiedades extraordinarias debido a la geometría con el que son diseñados y no del material que lo compone.

Por otro lado, los paneles tipo sándwich son estructuras de tres capas, dos láminas delgadas de material rígido y entre ellas un núcleo grueso con un material liviano. Esta configuración reparte los esfuerzos de tracción y compresión en las láminas, y la flexión en el núcleo, por lo que el material de el núcleo debe ser lo suficientemente rígido para mantener la distancia entre las placas constante.

Al componer un material híbrido, es decir, paneles con núcleo de metamaterial, se logra, en teoría, la supresión de ciertas bandas de frecuencias vibratorias a lo largo del panel sándwich.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

El objetivo general de esta memoria es caracterizar el módulo de Young y la densidad de paneles tipo sándwich fabricados con impresoras 3D de resina.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de esta memoria son:

- Diseñar pánels tipo sándwich por CAD para la generación de STLs imprimibles.
- Imprimir probetas y paneles sándwich en resina SLA.
- Caracterizar propiedades mecánicas de probetas de resina y de paneles tipo sándwich.
- Evaluar la incidencia del tiempo de curado en las propiedades mecánicas de la resina en probetas de ensayo y en paneles sándwich.

## **1.4. Alcances**

Los alcances de esta memoria son:

- Caracterización de propiedades mecánicas de las probetas y de los paneles, en particular, la densidad, módulo de Young.
- Evaluación de la incidencia del tiempo de curado de la resina en las propiedades mecánicas de las probetas y de los paneles tipo sándwich.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Paneles tipo sándwich con núcleos celulares

Los paneles tipo sándwich con núcleos celulares constan de dos placas de un material denso y rígido que contiene un arreglo definido de elementos viga con una geometría en particular.

Dentro de las posibilidades de aplicación de materiales celulares, los paneles tipo sándwich tienen una gran relevancia debido al abanico de posibilidades que estos brindan, mecánica y vibratoriamente hablando. En este caso, el material tipo celular será usado como núcleo del panel tipo sándwich, con el fin de juntar y acentuar las propiedades de ambos en conjunto.

Ejemplo de estas estructuras se representan en la siguiente figura.

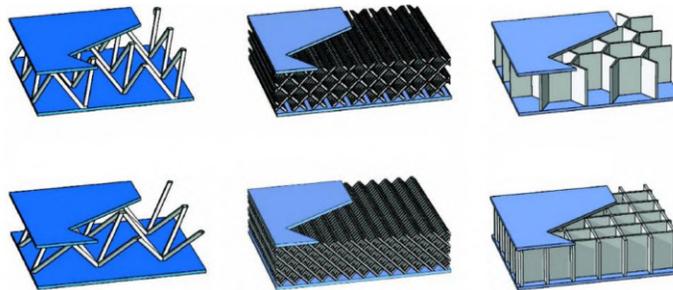


Figura 2.1: Paneles tipo sándwich con distintas configuraciones de núcleos [1]

Ejemplo de las propiedades mecánicas se puede ver en la siguiente tabla, que presenta la rigidez a flexión de un panel tipo sándwich con un núcleo tipo panal, y su resistencia en comparación a una placa sólida de las mismas dimensiones. Se puede observar una considerable mejora en las propiedades de rigidez y resistencia a la flexión mientras que el peso de la estructura es prácticamente constante.

Tabla 2.1: Rigidez y resistencia a la flexión relativa y peso de estructura tipo sándwich [2] en relación al espesor de la placa rígida  $t$ .

Espesor panel	$t$	$2t$	$4t$
Rigidez a la flexión relativa	1	7.00	37.00
Resistencia a la flexión relativa	1	3.50	9.20
Peso relativo	1	1.03	1.06

Para comprender y contextualizar los núcleos celulares en paneles tipo sándwich, es necesario entender el principio de estos materiales, su existencia en la naturaleza y donde encontrarlos.

### 2.1.1. Materiales celulares

Los materiales celulares poseen arreglos de celdas que se repiten de manera periódica, ya sea ordenada o aleatoriamente. Estos materiales fueron inspirados de la naturaleza, como lo son, panales de abejas, esponjas marinas, madera, hueso esponjoso, entre otros. En este sentido, la evolución de millones de años ha permitido la optimización de estos arreglos celulares naturales, como es el caso de la estructura porosa del núcleo óseo (huesos), que alcanzan una eficiencia estructural mucho mayor debido a su estructura celular periódica.

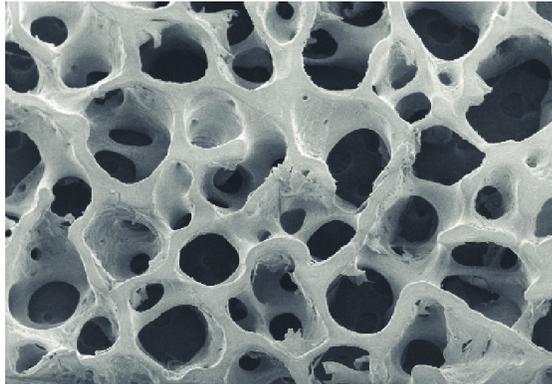


Figura 2.2: Ejemplo de material celular con celdas estocásticas, microestructura de un hueso esponjoso [3]

Un ejemplo de estos materiales celulares son los metamateriales, los cuales poseen arreglos de celdas dispuestas de manera ordenada y periódica. Estos arreglos poseen geometrías determinadas que proporcionan a la pieza o estructura comportamientos inusuales, distintos (en general) a si fueran construidos de manera convencional, es decir, sin arreglos celulares.

### 2.1.2. Metamateriales

Los metamateriales usan el mismo principio que los materiales celulares, vistos en el punto anterior. Los metamateriales son materiales artificiales que poseen propiedades extraordinarias y fuera de lo común debido a la geometría y forma en que son diseñados y no del material que lo compone. Así, estos materiales celulares poseen geometrías ordenadas y periódicas a

lo largo de su estructura.

Un ejemplo de metamateriales y de diferentes geometrías que definen la estructura del material celular estan representadas en la siguiente figura.

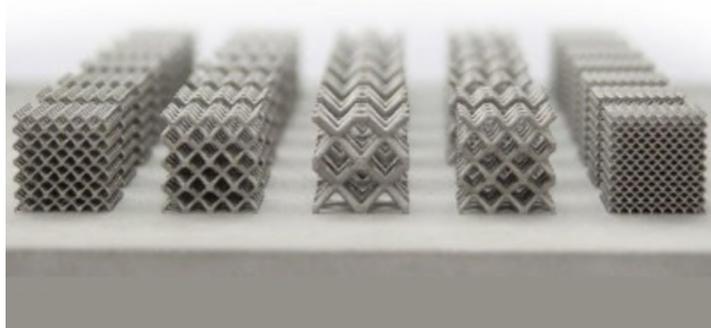


Figura 2.3: Ejemplo de materiales [4]

Cabe destacar que esta área de la ingeniería está en una fase inicial de desarrollo, por lo que el objetivo principal de la investigación es la innovación y creación de nuevos metamateriales. Ejemplo de este desarrollo es el trabajo de investigación de metamateriales celulares en núcleos de paneles sándwich, que teóricamente, otorgan la capacidad de suprimir bandas de frecuencias vibratorias en la estructura.

### 2.1.3. Paneles Sándwich

Los paneles tipo sándwich son estructuras que poseen tres capas, dos láminas delgadas de material rígido y entre ellas un núcleo grueso con un material liviano (simulando la estructura de un sándwich). También, el panel sándwich puede tener todas sus capas un mismo material pero con un núcleo impreso con alguna geometría definida, es decir, de un metamaterial celular.

La configuración de tres capas reparte los esfuerzos de tracción y compresión en las láminas, y la flexión en el núcleo, por lo que el material de el núcleo debe ser lo suficientemente rígido para mantener la distancia entre las placas constante. Así, se obtiene un panel con mayor rigidez, resistencia a la flexión y considerablemente más liviano que una placa de las mismas dimensiones que el panel.

Un ejemplo de panel sándwich con diferentes materiales en sus capas queda representado en la siguiente imagen.

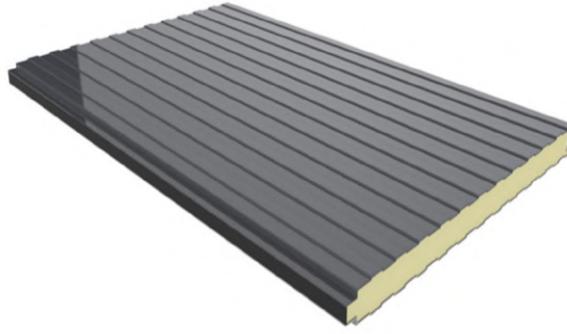
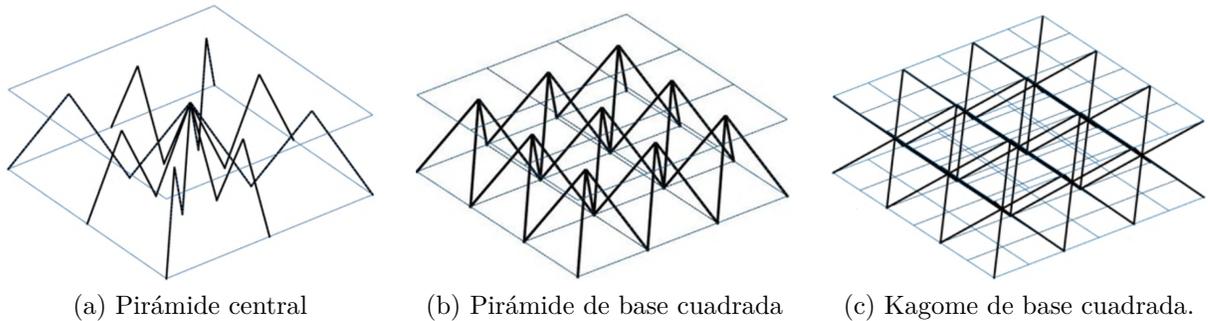


Figura 2.4: Ejemplo de panel sándwich [5]

Por último, esta investigación ha trabajado con distintas estructuras nucleares en los núcleos de los paneles sándwich. Estos núcleos quedan determinados por diferentes estructuras y geometrías como se verá a continuación.

## 2.2. Estructuras nucleares de Paneles Sándwich

Actualmente, se ha trabajado y modelado tres geometrías nucleares para los paneles tipo sándwich para la optimización de Band Gaps fonónicos. Estas estructuras son:



(a) Pirámide central

(b) Pirámide de base cuadrada

(c) Kagome de base cuadrada.

Figura 2.5: Estructuras nucleares de los paneles sándwich estudiadas [6]

Para la presente memoria, se estudiarán las propiedades mecánicas de la estructura (a) Pirámide central. Para entender el modelamiento de esta celda unitaria, es necesario comprender sus simetrías y la zona irreducible de Brillouin.

### 2.2.1. Simetría y zona irreducible de Brillouin

La zona irreducible de Brillouin (IBZ por sus siglas en inglés), a grandes rasgos, es el menor volumen dentro de la celda unitaria que caracteriza completamente la estructura periódica. Si a esta zona se le aplican todas las simetrías reflectivas que presenta la red, la celda unitaria queda completamente definida. [6].

Para entender esto, se presenta el diagrama de la figura 2.12. En esta figura se tiene una celda unitaria de  $4 \times 4$  representada en (a) y se colorean los distintos elementos que la conforman en (b) (elementos arbitrarios para simplificar la explicación). De esta celda, se muestran los ejes de simetría que describe la red, en la Figura 2.12(b) los cuales son

arriba/abajo, izquierda/derecha y simetría de  $45^\circ$ . A partir de la aplicación de las simetrías mencionadas sobre la red, se logra encontrar la IBZ como muestra la Figura 2.12(c), donde el triángulo sombreado muestra los elementos que la conforman, los cuales se pueden apreciar de mejor manera en la Figura 2.12(d). [6]

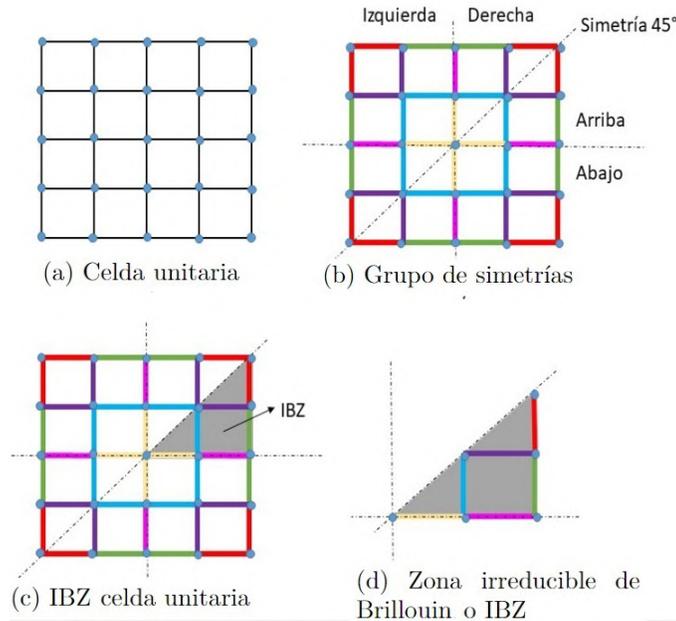


Figura 2.6: Estructuras nucleares de los paneles sándwich estudiados [6]

Finalmente, la zona irreducible de Brillouin o IBZ es la mínima porción de la celda que es capaz de describir la celda unitaria y todos sus elementos tipo viga aplicando las sucesivas simetrías mostradas en la figura 2.12 (b).

### 2.2.2. Imposición de la simetría e IBZ a la estructura Pirámide central

La geometría de la pirámide central está representada en la figura 2.11 (a). En esta estructura, se aprecia un enrejado compuesto por 24 elementos viga.

En la siguiente figura, se presenta una vista isométrica de la estructura con los distintos elementos viga coloreados.

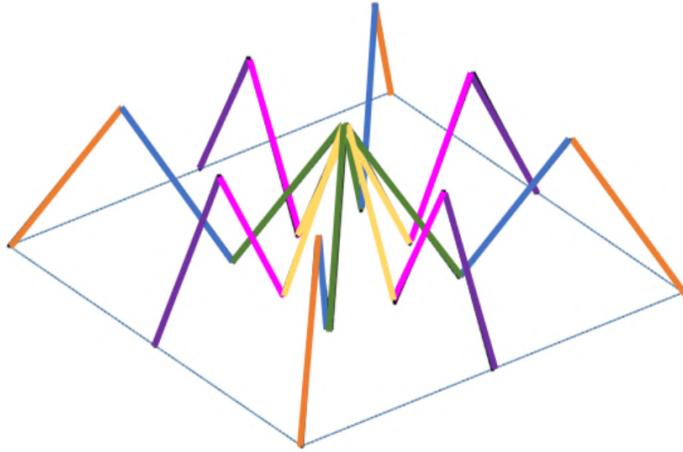


Figura 2.7: Vista isométrica de la estructura pirámide central coloreado según su IBZ [6]

La IBZ de esta estructura queda formada por 6 elementos de viga diferentes, cada uno coloreado con un color diferente el cual caracteriza a los elementos relacionados de la celda. En la siguiente figura se representa la IBz coloreada para la presente estructura.

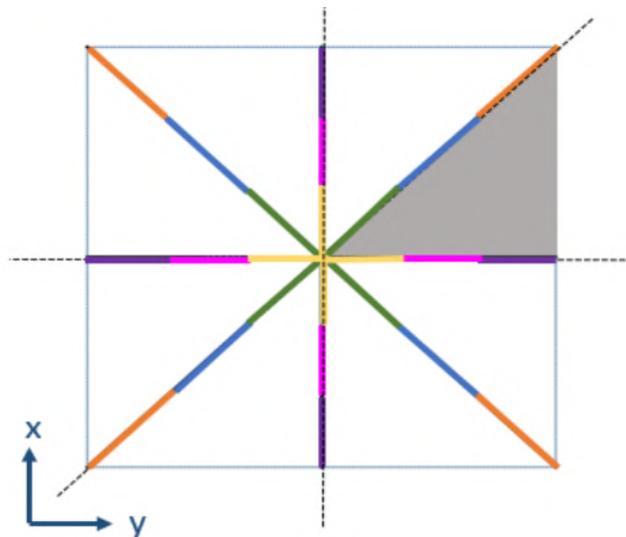


Figura 2.8: IBz de la estructura presentada en 2D [6]

Se puede apreciar, en la figura 2.14, que la IBz queda representada por 6 elementos viga, por lo que las dimensiones de la celda y sus elementos viga quedan determinados por 6 factores de radio representados por  $f_i$  donde  $i$  va de 1 a 6 y un elemento  $f_L$  que modifica la distancia entre las placas.

Estas estructuras, en general, podrían resultar complejas de fabricar, más aún si se trata de paneles sándwich con núcleos ultralivianos donde todas las capas son del mismo material, con geometrías definidas y continuas, además de ser pequeñas en dimensiones. Es por esto que para la fabricación de estas estructuras, se ocupará una técnica avanzada de manufactura aditiva conocida como Impresión 3D en resina SLA. Esta otorgará una gran resolución en las estructuras, un factor clave para el estudio en la predicción de Band gaps.

## 2.3. Modelación e Impresión en 3D

### 2.3.1. Estereolitografía

La impresión en 3D por resina, o estereolitografía (SLA) es una técnica de manufactura aditiva avanzada que se ha vuelto muy popular entre ingenieros ya que ofrece una resolución de impresión muy superior a FDM, o impresión 3D convencional.

En la impresión por resina o SLA, la pieza se imprime mediante la cura selectiva del líquido tipo resina mediante fotopolimerización UV capa por capa de la pieza. El líquido es almacenado en el tanque de la impresora y la bandeja es la que sostiene la deposición invertida del material solidificado. Este proceso se hace mediante impresoras de barrido de láser como la adjunta en la siguiente figura.

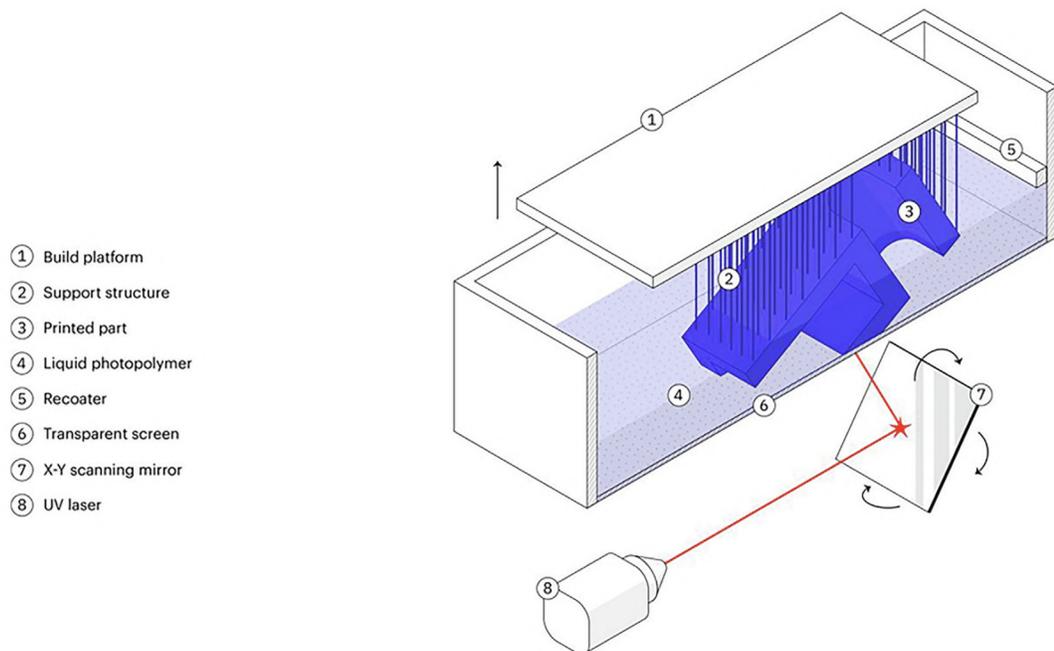


Figura 2.9: Esquema impresión SLA obtenida de [www.creality.com](http://www.creality.com)

El rayo láser barre la superficie de la resina líquida de acuerdo al modelo 3D del archivo formato .stl. Al entrar en contacto con esta radiación del tipo ultravioleta UV, la resina líquida reordena sus cadenas poliméricas para solidificarse, proceso conocido como fotopolimerización. El total de ciclos de impresión corresponde a cada capa del modelo que se solidifica mediante radiación UV, hasta obtener el volumen completo de la pieza.

La impresión por estereolitografía se realiza en reversa. La plataforma se sumerge en la bandeja de resina después de cada capa solidificada mientras que el láser actúa de abajo hacia arriba[7]. Un ejemplo de impresora está representada en la siguiente figura.



Figura 2.10: Impresora Formlab que se usará en este proyecto [8]

Por último, el proceso de limpieza del material curado en la impresora. Esta corresponde a la limpieza con un disolvente (generalmente alcohol isopropílico). Finalmente el proceso de poscurado, un tratamiento que tiene como finalidad eliminar el exceso de resina que no solidificó.

El excelente acabado y resolución que ofrece este tipo de manufactura aditiva da la posibilidad de fabricar estructuras complejas en poco tiempo. La capacidad de fabricar piezas con altura de capa de 0,01 mm de espesor da la oportunidad de generar paneles sándwich de alta resolución y sin soportes innecesarios dentro del material celular, que pueda modificar o alterar la geometría del núcleo del metamaterial.

Para el presente trabajo, se trabajará con una resina SLA, en particular de la resina *Rigid 10k Resin*. Este tipo de resina, una vez curada con radiación ultra violeta, se compone de una matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio, como se verá en el siguiente punto.

### 2.3.2. Resina *Rigid 10k*

Las resinas SLA son un material ingenieril de impresión 3D, vienen en estado líquido y solidifican al reaccionar con radiación ultravioleta (UV) mediante fotopolimerización.

La *Rigid 10k Resin* es una resina SLA está reforzada con vidrio, siendo es el material más rígido del catálogo de formlabs para ingeniería. Esta resina esta hecha para el diseño de piezas industriales de precisión que deben soportar una carga considerable sin doblarse. Posee un acabado liso y mate y es muy resistente al calor y a los productos químicos.

Las propiedades de la resina a utilizar quedan representadas en la siguiente tabla. Estos datos fueron obtenidos de piezas impresas con la Form 3, con alturas de capa de 100  $\mu m$ . Las piezas se sometieron a poscurado con una Form Cure a 70  $^{\circ}C$  durante 60 minutos. La sección “UV + térmico” fue lo mismo, agregando un curado térmico adicional a 90  $^{\circ}C$  durante 125 minutos.

Tabla 2.2: Datos de las propiedades de la Rigid 10K Resin[9]

<b>Propiedades mecánicas</b>	<b>No poscurada</b>	<b>UV1</b>	<b>UV+Termico</b>	<b>Norma ensayo</b>
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
<b>Propiedades térmicas</b>				
Temperatura de flexión bajo carga a 0,45 MPa	65 °C	163 °C	218 °C	ASTM D648-16
Temperatura de flexión bajo carga a 1,8 MPa	56 °C	82 °C	110 °C	ASTM D648-16
Coefficiente de expansión térmica, 0-150 °C	48 $\frac{\mu m^{\circ}C}{m}$	47 $\frac{\mu m^{\circ}C}{m}$	46 $\frac{\mu m^{\circ}C}{m}$	ASTM E831-13

Por último, se tiene la compatibilidad de la resina con disolventes para el proceso de curado:

Tabla 2.3: Compatibilidad de la resina Rigid 10K Resin[9]

Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)	Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)
Ácido acético, 5 %	<0,1	Isoctano (gasolina)	0
Acetona	<0,1	Aceite mineral ligero	0,2
Alcohol isopropílico	<0,1	Aceite mineral pesado	<0,1
Lejía (~5 % NaOCl)	0,1	Agua salada (3,5 % NaCl)	0,1
Acetato de butilo	0,1	Solución de hidróxido de sodio (0,025 % PH 10)	0,1
Gasóleo	0,1	Agua	<0,1
Éter monometílico de dietilenglicol	0,4	Xileno	<0,1
Aceite hidráulico	0,2	Ácido fuerte (HCl concentrado)	0,2
Skydrol 5	0,6	Éter monometílico de tripropilenglicol	0,4
Peróxido de hidrógeno (3 %)	<0,1		

Si bien la resina está caracterizada en las tablas anteriores correspondientes al datasheet de la resina facilitada por *Formlabs*, no existe información con respecto a la densidad vs. el tiempo de curado, y además, se desea corroborar o rectificar la información dada, debido a que se caracterizaron en otras condiciones ambientales.

Caracterizar física y mecánicamente la resina impresa en las mismas condiciones de laboratorio que los paneles sándwich, es clave para el desarrollo de la investigación debido a que el modelo de optimización de Band Gaps se alimenta de parámetros como el módulo de Young y la densidad del material a utilizar.

## 2.4. Caracterización Mecánica

La caracterización mecánica de materiales consiste en aplicar diferentes tipos de esfuerzos a probetas de ensayo y observar como se comporta el material en términos de las deformaciones que sufre esta probeta. Existen muchos ensayos mecánicos, y en general, todos los materiales conocidos ya están caracterizados mecánicamente. Sin embargo, para esta memoria, se estudiarán los siguientes ensayos:

- Ensayo de Tracción
- Ensayo de Compresión

- Ensayo de Flexión

### 2.4.1. Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta, la cual debe ser medida su área transversal y largo con anterioridad, a tracción en una máquina de ensayos mecánicos.

La aplicación de esta fuerza de tracción se logra por que la probeta de ensayo es sujeta por sus extremos por una mordaza móvil en lo alto fija en la base. Esto se representa en la siguiente figura:

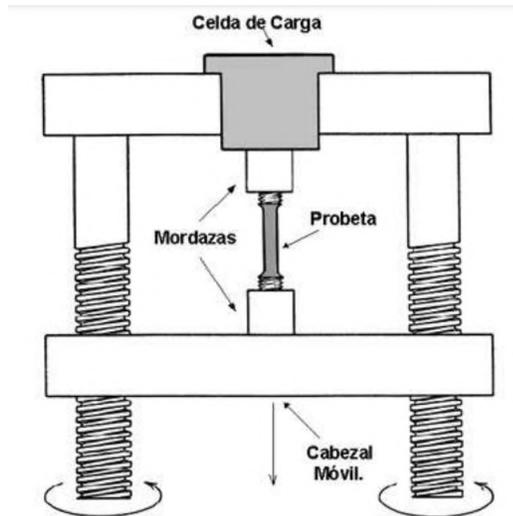


Figura 2.11: Esquema ensayo de tracción [10]

La máquina de tracción, en general, poseen un graficador o plotter integrado, el que es capaz de guardar los datos del comportamiento de la probeta en tiempo real durante la tracción. El comportamiento esperado de la probeta de resina se presenta en la siguiente figura:

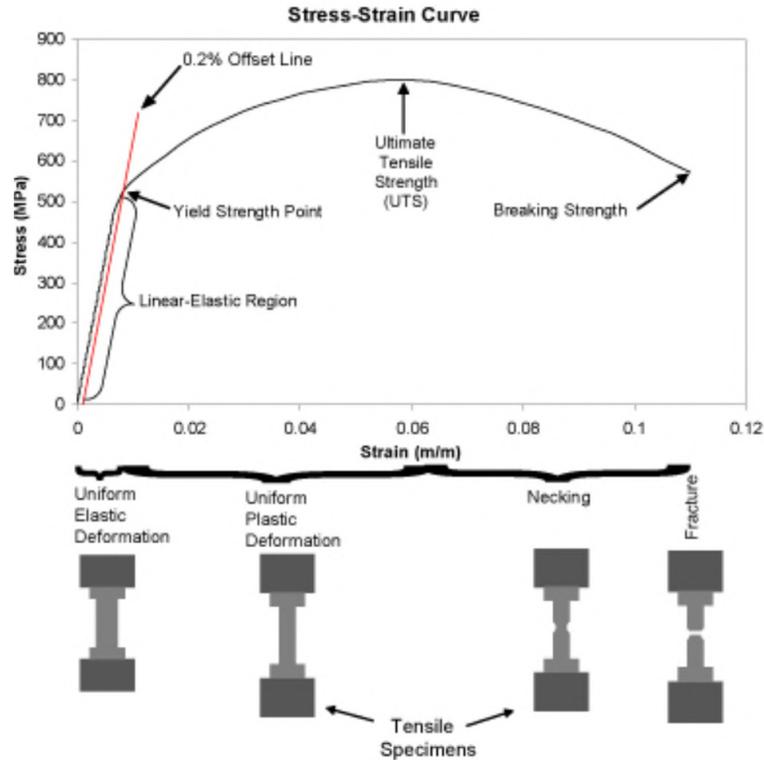


Figura 2.12: Curva ensayo de tracción [11]

En la figura anterior se observa una zona de comportamiento lineal, llamada zona elástica. La zona no lineal es cuando el material ya no se comporta elásticamente, por lo que sus cambios morfológicos son permanentes. En este punto, se alcanza el “punto de fluencia” o “límite de fluencia” y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{FL} = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Con:

- F: Fuerza aplicada en el punto de fluencia [N]
- $A_0$ : Área inicial transversal de la probeta [ $m^2$ ]

Con estos datos, se puede caracterizar el módulo de Young del material. El módulo de Young es una constante característica de cada material que relaciona esfuerzo con deformación. Esto se puede ver en la siguiente ecuación que rige el fenómeno:

$$E = \frac{\sigma_{FL}}{\epsilon} \quad (2.2)$$

Para el ensayo de **Compresión** se definen las mismas ecuaciones.

## 2.4.2. Ensayo de Flexión

Siguiendo la misma metodología anterior, se calcula la resistencia a la flexión. La forma de realizarlo y su curva característica es:

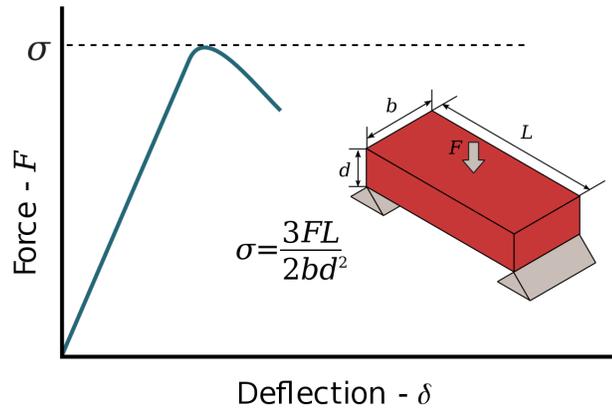


Figura 2.13: Esquema ensayo de flexión.

La probeta, o en este caso, el panel sándwich debe ser sometido a una fuerza de flexión. Como se observa en la figura anterior, la fuerza aplicada disminuye en el punto que el material sufre una flexión. Este esfuerzo máximo de flexión se modela de la siguiente manera:

$$\sigma_{flexion} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (2.3)$$

Con:

- F: Fuerza aplicada [N]
- L: Largo de la probeta [m]
- b: Ancho de la probeta [m]
- c: Espesor de la probeta [m]

Luego, el módulo de Young por flexión se calcula de la siguiente manera:

$$E_{flexion} = \frac{PL_0^3}{48\delta_{max}I} \quad (2.4)$$

Con:

- P: Fuerza aplicada en la deflexión máxima [N]
- $L_0$ : Distancia de soportes [mm]
- $\delta_{max}$ : Deflexión máxima [mm]
- I: Inercia a flexión [mm<sup>3</sup>]. Se define como:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.5)$$

Donde:

- b: Ancho de la pieza [mm]
- h: Espesor [mm]

Luego de caracterizar mecánicamente las probetas de ensayo de resina, se estudiarán las propiedades mecánicas de los paneles tipo sándwich. Finalmente, se estudiarán las formas y texturas de las probetas y paneles que fallaron, además de la composición química en la zona de fractura con el objetivo de corroborar y cuantificar el reforzamiento con vidrio de la resina, y cuanto esto puede afectar a las propiedades mecánicas y físicas de la resina. Todo esto haciendo uso de un microscópio electrónico de barrido.

## 2.5. Microscópio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido es una herramienta que permite observar objetos demasiado pequeños para ser observados a simple vista, a escalas nanométricas. A diferencia de un microscópio óptico, que utiliza la luz y el principio de refracción, el microscópio electrónico de barrido utiliza electrones para formar una imagen.

Para esto, el equipo cuenta con un filamento capaz de generar un haz de electrones que llegan a la superficie de la muestra. Luego, con diferentes detectores, se recogen los electrones generados de la interacción con la superficie de la muestra y así crear una imagen que refleja las características superficiales de esta. La información que entregan los electrones corresponden a la textura y composición química superficial de la muestra.

Las diferentes formas para obtener información vienen dadas por[12]:

- **Electrones secundarios:** producidos cuando el electrón pasa cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionando la suficiente energía a uno o varios de los electrones interiores (de la muestra) para saltar fuera de su orbital y escapar. Estos electrones proporcionan información topográfica de la muestra.
- **Electrones retrodispersados:** producidos cuando un electrón choca directamente con un núcleo atómico de la muestra, siendo repelido en sentido contrario. Estos entregan un mapa con información sobre la composición superficial de la muestra.
- **Electrones Auger:** producido cuando un electrón llena el vacío de un electrón secundario. Esto provoca un exceso de energía y es corregido emitiendo un nuevo electrón de la capa más externa. Estos electrones son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra.
- **Rayos X:** en el proceso descrito anteriormente, el exceso de energía también puede ser balanceada mediante la emisión de rayos X; característicos de cada elemento, por lo que se utilizan para obtener información sobre la composición de la muestra.

Un ejemplo de este microscopio queda representado en la siguiente figura.



Figura 2.14: Microscopio electrónico de barrido. Geología, FCFM.

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo, se realizará una descripción de los métodos y pasos que se seguirán para cumplir con los objetivos planteados en la sección 1.3. En la siguiente figura se puede ver, a grandes rasgos, la metodología que se empleará en este trabajo de título. Cabe destacar que este trabajo será un proceso iterativo para lograr optimizar las propiedades del panel tipo sándwich.

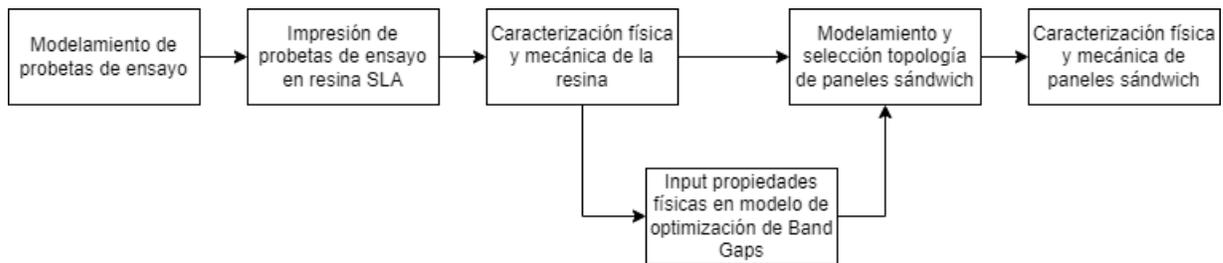


Figura 3.1: Metodología general.

### 3.1. Modelamiento de probetas

En primer lugar, se procederá a modelar probetas de ensayo en *Inventor Autodesk* según normas ISOD638 para las pruebas de tracción y compresión e ISOD790 para el ensayo de flexión. Luego, se imprimirán en la impresora 3D de resina. Finalmente, se someterán a un proceso de limpieza y poscurado con tiempos variables.

Se cronometrarán tiempos de poscurado diferentes por cada 2 probetas con el objetivo de evaluar la incidencia del tiempo de curado en las propiedades mecánicas y físicas del material, ya que las se debe corroborar y/o rectificar las propiedades declaradas de resina rigid 10k de la tabla 2.1.

Para esto, se estima que se usarán los siguientes tiempos y número de probetas.

Tabla 3.1: Número de probetas por ensayo

Ensayo mecánico			
$t_{curado}$ [min]	Tracción	Compresión	Flexión
0	2	2	2
10	2	2	2
30	2	2	2
120	2	2	2

La probeta usada para tracción seguirá la geometría de la norma ISO D638 modificada. Las dimensiones serán:

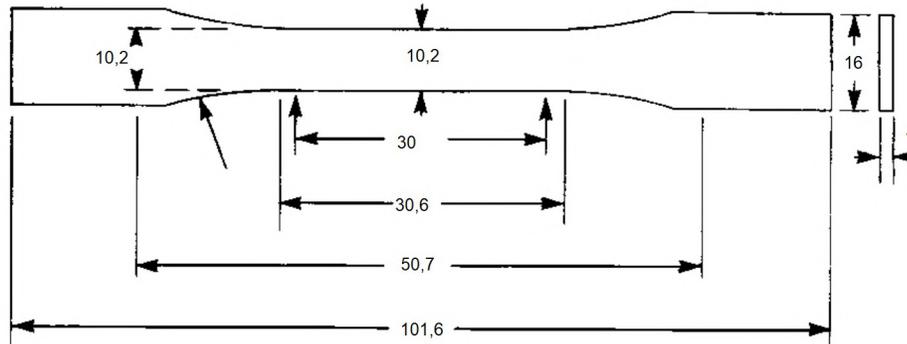


Figura 3.2: Dimensiones probeta ISO D638

Por otro lado, la probeta usada para el ensayo de flexión 3 puntos seguirá la geometría según la norma ISO D790 modificada. Las dimensiones serán:

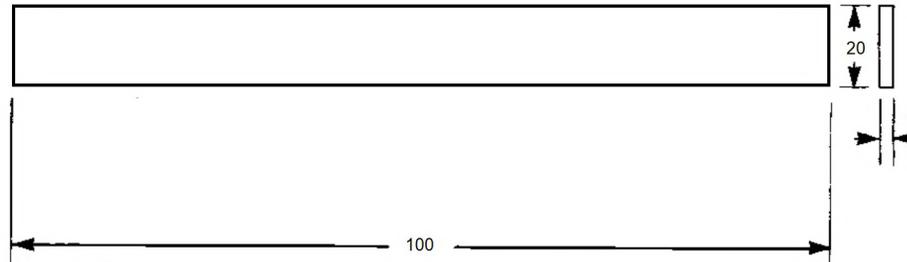


Figura 3.3: Dimensiones probeta ISO D790

Finalmente, se hará una prueba de compresión a una probeta cilíndrica, con el fin de obtener en paralelo la densidad del material.

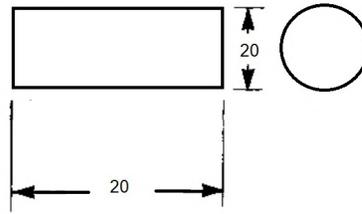


Figura 3.4: Dimensiones probeta cilíndrica para compresión

Estas probetas de ensayo serán impresas en una impresora Formlab perteneciente a FONDECYT, modelo en la figura 2.7 con resina SLA Rigid 10k. Una vez terminado ese proceso, se lavarán en alcohol isopropílico y después se someterán a distintas sesiones de poscurado, como lo indicado en la tabla 3.1. Posteriormente a esto, se procederá con ensayar las probetas en la máquina multipropósito Zwick/Roell.

## 3.2. Impresión de probetas

Con el programa computacional para la modelación de la impresión 3D, *Preform*, se ajustan las piezas imprimibles en la impresora *Formlab*. La impresora, perteneciente a FONDECYT está ubicada en el laboratorio de fabricación digital de la Universidad de Chile (Fablab).

### 3.2.1. Lavado y poscurado de probetas

Posterior a la impresión, se procede a lavar las probetas impresas con alcohol isopropílico en la lavadora de la impresora *Formlab*. Debido a problemas con la impresión, se indicó desde la empresa que las piezas fueran lavadas sin la bandeja, para evitar que se adhieran a esta.

Finalmente, se procede a poscurar las probetas según los tiempos representados en la tabla 3.1, a 60°C.

## 3.3. Caracterización de probetas

### 3.3.1. Caracterización mecánica

Con la Máquina de ensayos de tracción “Zwick/Roell” ubicada en el laboratorio del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Chile, DIMEC, se procederá realizar los ensayos mecánicos mencionados con la celda de carga más baja disponible 10[kN].

- Ensayo de tracción Segpun ISO D638. Las mordazas móviles se ajustan a las aletas de las probetas. Posteriormente, se inicia el ensayo de tracción. Un programa computacional mide la deformación de la probeta versus la carga en tracción que esta aplica.
- Ensayo de flexión, según la norma ISOD790. El ensayo consta de apoyos de flexión donde descanza la probeta. Luego una punta de flexión realiza esfuerzo en la probeta hasta la rotura.

- Ensayo de compresión, según la norma ISOD638. Se somete a compresión la probeta de ensayo. La configuración del ensayo consta de ubicar la probeta de compresión entre dos discos de compresión de la máquina de ensayos mecánicos.

### 3.3.2. Caracterización física: Densidad

A las probetas de ensayo de flexión y compresión se calcula el volumen (dado por sus dimensiones) y se mide la masa para determinar su densidad con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.1)$$

### 3.4. Datos a usar en el modelo de optimización de Band Gaps

Para el modelo de optimización de Band Gaps[6] desarrollado por Vicente Galvéz, se inyectan los parámetros encontrados por la caracterización mecánica y física de la resina. El modelo entregará los parámetros para la fabricación de los paneles tipo sándwich.

### 3.5. Modelamiento de panel tipo sándwich

Para el modelamiento del panel tipo Sándwich, se debe obtener la geometría de núcleo óptima con el Script de Matlab desarrollado por Vicente Galvéz [6], inyectando parámetros como el módulo de Young y la densidad del material. El panel a estudiar será el que posee un núcleo de estructura de pirámide central.

En primer lugar, se generan la IBz y sus elementos viga que lo componen.

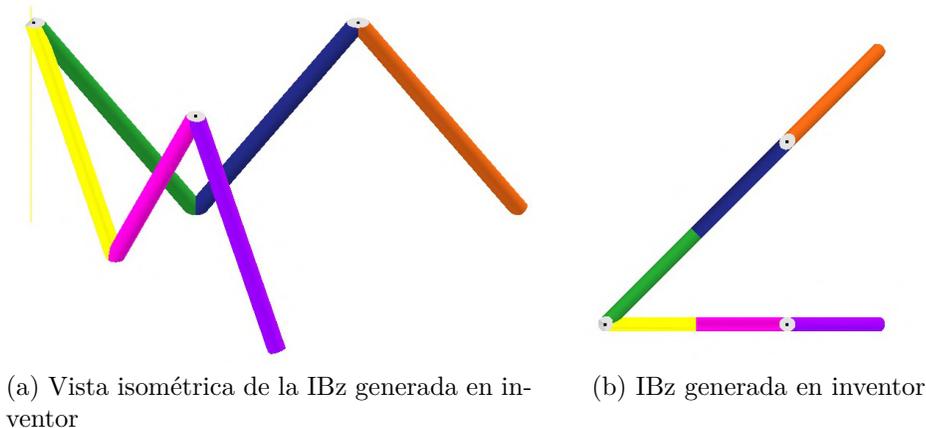


Figura 3.5: IBz de la estructura Piramide central generada en inventor

Luego, con las sucesivas reflexiones mostradas en la figura 2.12 (b), se genera la geometría nuclear del panel.

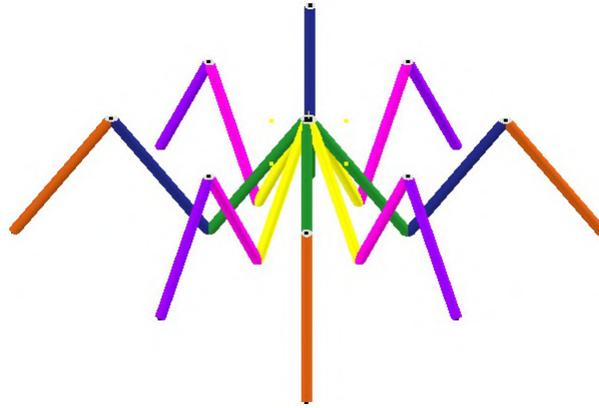


Figura 3.6: Núcleo del panel generado por patrones simétricos de la IBz en inventor

Y por último, se colocan las capas que hacen sándwich al núcleo presentado anteriormente.

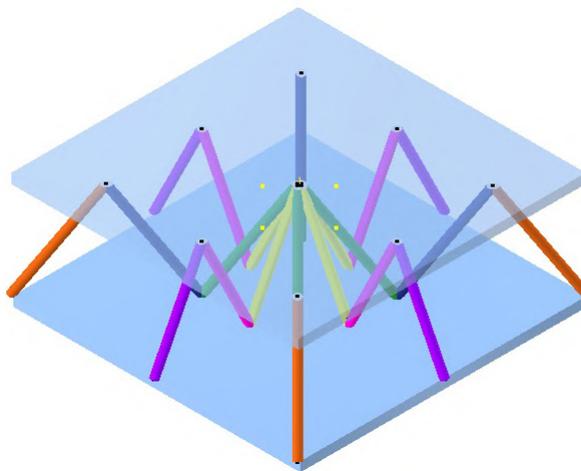


Figura 3.7: Celda básica del panel sándwich con núcleo tipo pirámide central.

Finalmente, se generará un archivo de formato .stl para que pueda ser impreso en una impresora 3D de resina. Posteriormente, se procede a realizar el ensayo de flexión a paneles tipo probetas de 2x6 celdas básicas.

### 3.6. Impresión de Paneles Sándwich

Se imprimirá el archivo stl del panel en la impresora 3D de resina ubicada en el laboratorio de fabricación digital (Fablab) de la Universidad de Chile, FCFM. Esto con el programa “Preform”.

### 3.7. Caracterización de paneles sándwich

### **3.7.1. Caracterización mecánica**

Una vez se tienen los paneles sándwich impresos, se caracterizarán mecánicamente para obtener el módulo de Young por flexión y su densidad.

Con la “Máquina de ensayos de tracción Zwick/Roell” ubicada en el laboratorio del DI-MEC, se procederá realizar los ensayos mecánicos mencionados con la celda de carga más baja disponible 10[kN]. Se realizaron 2 ensayos de flexión por tiempo de curado, similar a lo realizado en la tabla 3.1. La configuración de la medición consta del panel sándwich descansando en la plataforma con una separación de los puntos de base a 70 [mm].

### **3.7.2. Caracterización física: Densidad**

A los paneles de ensayo de flexión se calcula el volumen (dado por el software “Inventor”) y se mide la masa para determinar su densidad con la ecuación dada en (3.1).

## **3.8. Análisis en microscópio electrónico de barrido**

A las probetas y paneles ensayados (ya fracturados) se someterán a análisis superficial y químico en un microscópio electrónico de barrido, ubicado en el departamento de Geología de la Universidad de Chile, FCFM.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Modelamiento de probetas

Se presenta, en la siguiente figura, la modelación de las probetas de flexión, tracción y compresión en el software computacional *Preform* que serán usadas en la caracterización mecánica de la resina Rigid 10k.

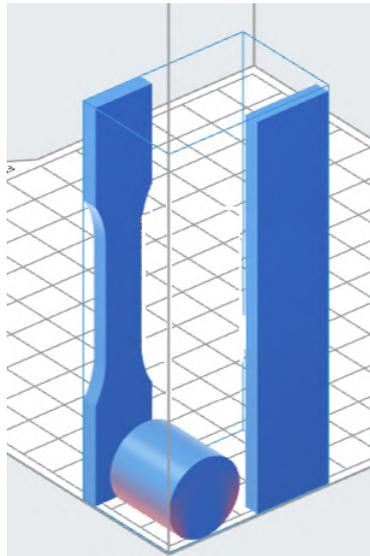


Figura 4.1: Modelamiento de probetas para ensayos mecánicos.

### 4.2. Impresión de probetas

Se imprimieron tantas probetas en *Formlab* según la tabla 3.1. A continuación se presenta el resultado de la impresión de probetas en bandeja y soportes.

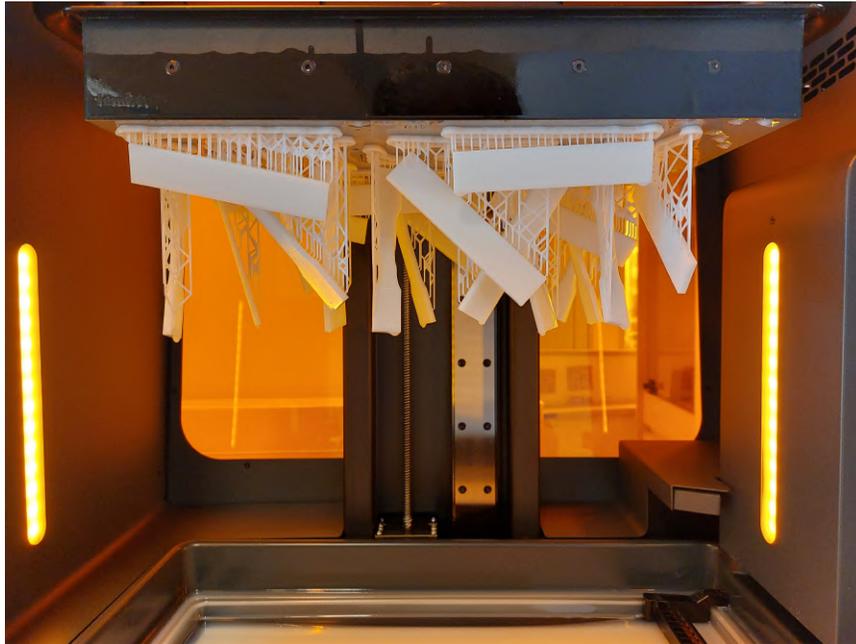


Figura 4.2: Probetas impresas en bandeja de Formlab, Fablab U. de Chile

#### 4.2.1. Lavado y poscurado de probetas

Luego de imprimir las probetas, se procede a despegarlas de la bandeja por recomendación de la empresa (encargada de *Formlab*) para luego lavarlas y poscurarlas.



Figura 4.3: Lavado de probetas impresas

### 4.3. Caracterización mecánica de probetas

### 4.3.1. Ensayo de tracción

En primer lugar, se configura la probeta para realizar el ensayo de tracción en la máquina multipropósito *Zwick/Roell*.

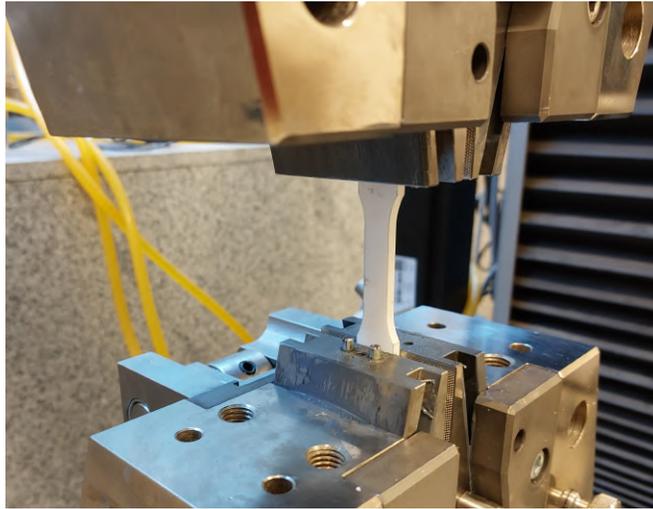


Figura 4.4: Configuración del ensayo de tracción

Para el primer caso, se caracterizan probetas que no fueron sometidas a un poscurado. Cabe destacar que se elimina del estudio la segunda probeta de ensayo pues hubo errores de medición y se estimó que sus resultados no fueron representativos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:



Figura 4.5: Curva de tracción para probeta no curada.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 1,5% y 2% para la probeta 1. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	1,50	6,198	0,764
	2,00	10,019	
Probeta 2	-	-	-
	-	-	
$E_{prom}$ [GPa]	0,764		
$\sigma_E$ [GPa]	-		

Para el segundo caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 10 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura

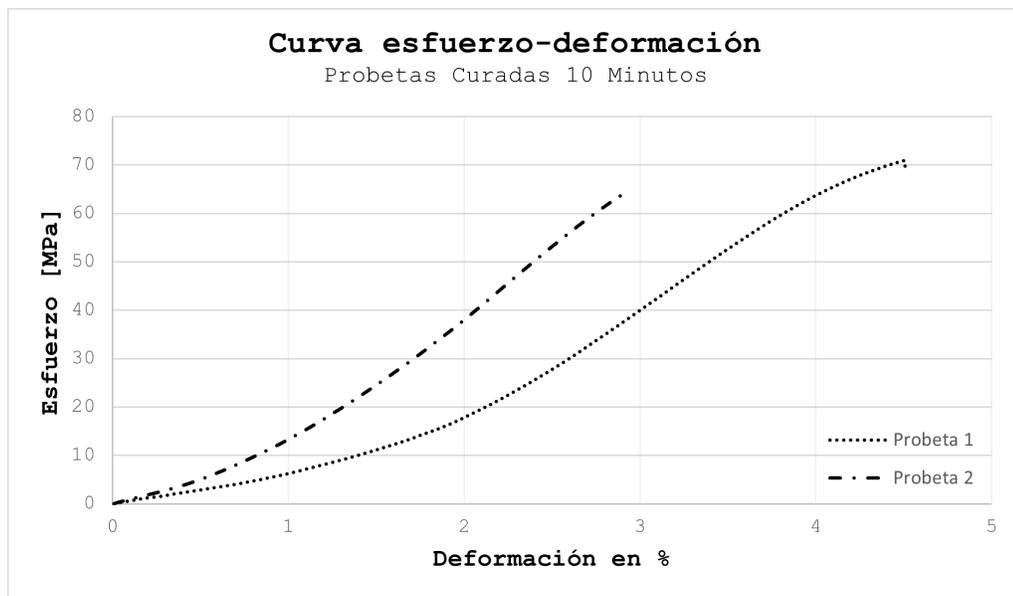


Figura 4.6: Curva de tracción para probeta curada 10 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, al igual que en el punto anterior, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 1,5% y 2% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.2: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	1,50	11,154	1,338
	2,00	17,841	
Probeta 2	1,50	24,560	2,693
	2,00	38,024	
$E_{prom}$ [GPa]	2,015		
$\sigma_E$ [GPa]	0,958		

Para el tercer caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 30 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura

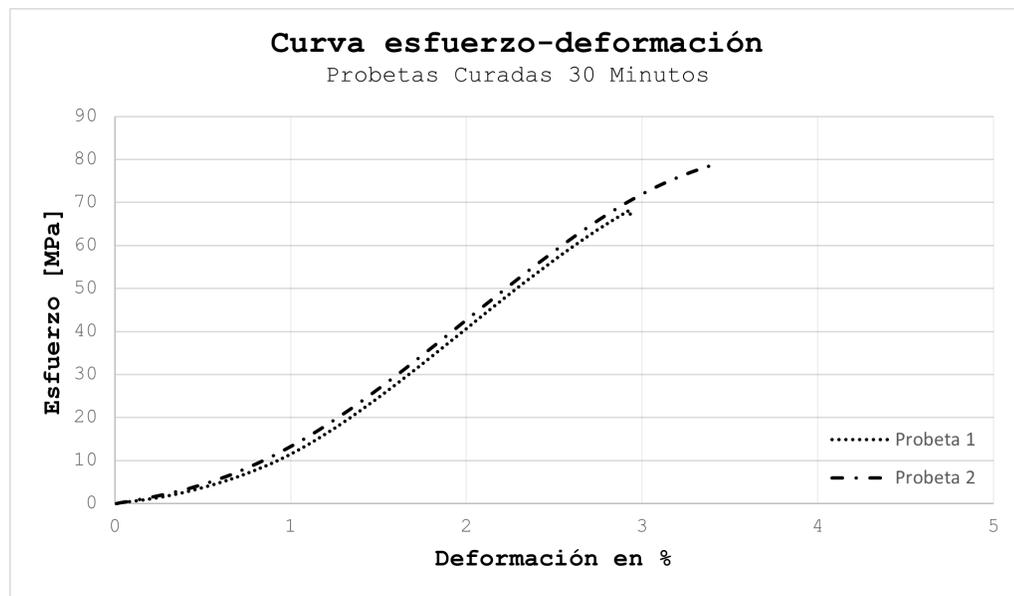


Figura 4.7: Curva de tracción para probeta curada 30 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, al igual que en el punto anterior, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 1,5% y 2% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	1,50	24,673	3,197
	2,00	40,658	
Probeta 2	1,50	26,688	3,201
	2,00	42,693	
$E_{prom}$ [GPa]	3,199		
$\sigma_E$ [GPa]	0,003		

Para el último caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 120 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura

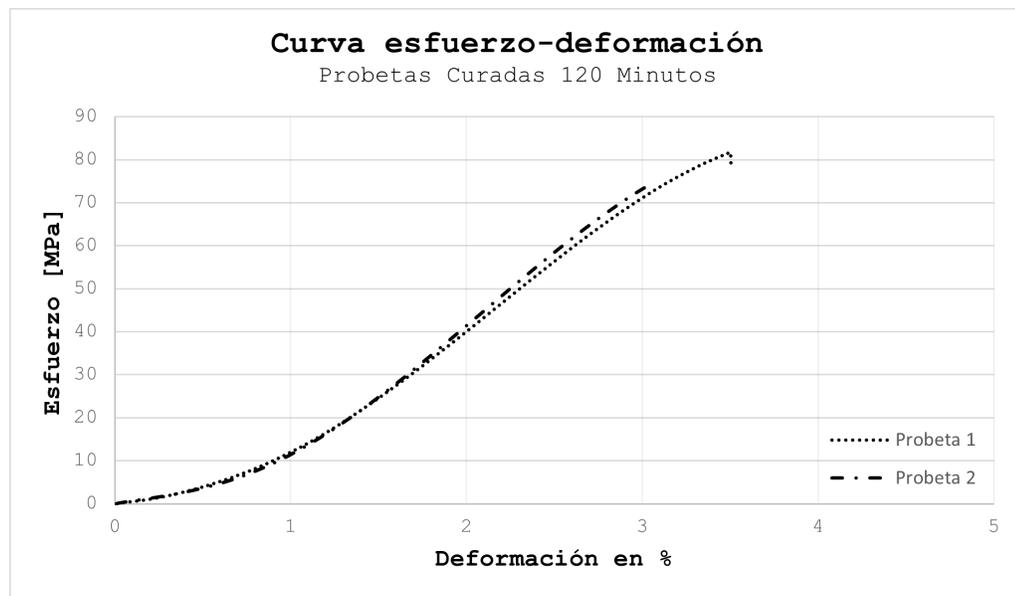


Figura 4.8: Curva de tracción para probeta curada 120 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, al igual que en el punto anterior, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 1,5% y 2% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	1,50	24,576	3,092
	2,00	40,039	
Probeta 2	1,50	24,798	3,325
	2,00	41,426	
$E_{prom}$ [GPa]	3,209		
$\sigma_E$ [GPa]	0,164		

Finalmente, los promedios para el módulo de Young de ambas probetas para todos los tiempos de poscurado quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.5: Módulo de elasticidad para probetas ensayadas en tracción

$t_{Curado}$ [min]	$E_{prom}$ [GPa]	$\sigma_E$
0	0,764	0,000
10	2,015	0,000
30	3,199	0,001
120	3,209	0,164

Luego, partir de la tabla anterior, se grafica el comportamiento del módulo de Young vs. el tiempo de poscurado de las probetas junto con la desviación estándar como el error asociado.

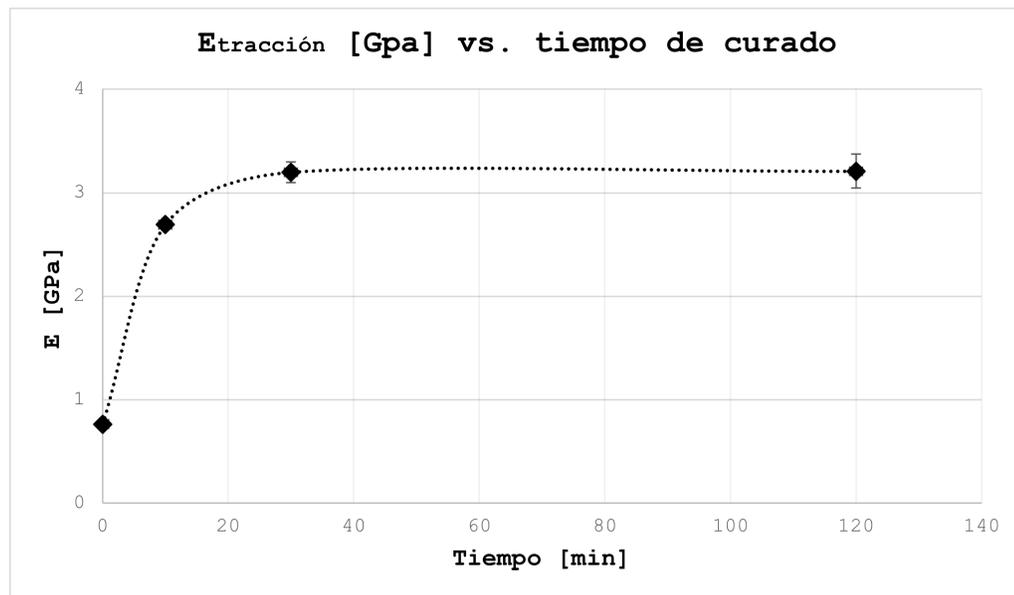


Figura 4.9: Módulo de Young VS tiempo de curado de la probeta.

Es posible ver que, para los gráficos que representan la curva de esfuerzo deformación de las probetas ensayadas en tracción (Figura 4.5 a 4.8), la resina polimérica es tiene un comportamiento **frágil**. La forma del gráfico indica que la probeta falla antes de entrar a la zona

plástica, alcanzando un límite elástico entre los 60-80 [Mpa].

El comportamiento frágil o de *Brittle Polymer* de la resina polimérica viene dado por las bajas deformaciones (menor al 4%), la fractura frágil (bajas deformaciones en las probetas y en algunos casos, fractura en más de una pieza), como se muestra en la siguiente figura:

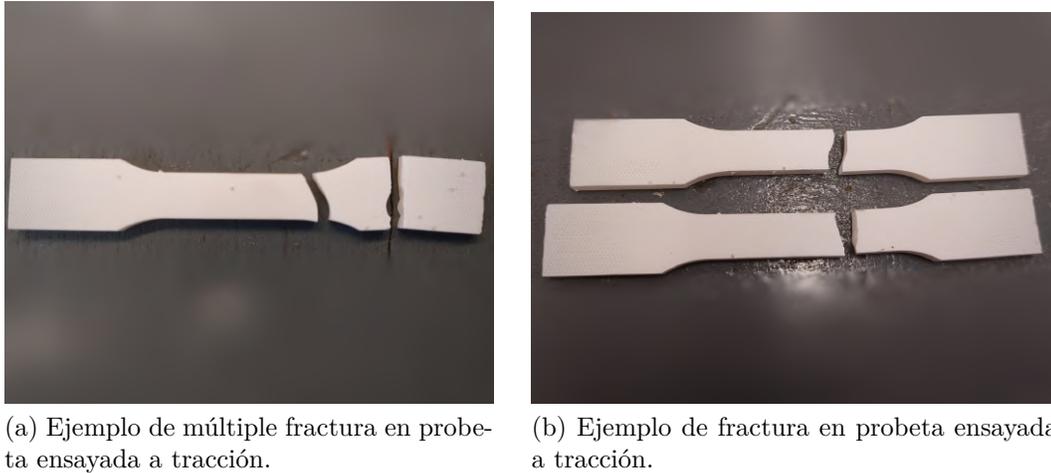


Figura 4.10: Fractura probetas para el ensayo de tracción

Para el gráfico de la figura 4.9, se tiene que el módulo elástico de la resina fotopolimerizada aumenta a mayor tiempo de poscurado de la probeta. Esto se debe a que el proceso de curado continua la fotopolimerización (reordenamiento de cadenas poliméricas) que se da en la impresión. Esto genera estructuras moleculares más compactas, por lo que el material en general se contrae. Esto genera una mayor densidad de enlaces covalentes cruzados dentro del material, por lo que el módulo elástico aumenta[13] al aumentar el tiempo de poscurado del material.

Por otro lado, es posible ver que resistencia a la rotura se comporta de manera similar a lo estipulado en la Tabla 2.1, que corresponde a la hoja de datos de la resina Rigid 10k. No así el alargamiento de rotura ni módulo de Young, donde el alargamiento resulta ser mayor, y por tanto el módulo de Young menor, con una diferencia de aproximadamente 7 [GPa].

### 4.3.2. Ensayo de compresión

En primer lugar, se configura la probeta para realizar el ensayo de compresión en la máquina multipropósito *Zwick/Roell*.



Figura 4.11: Configuración del ensayo de compresión

Para el primer caso, se caracterizan probetas que no fueron sometidas a un poscurado. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura

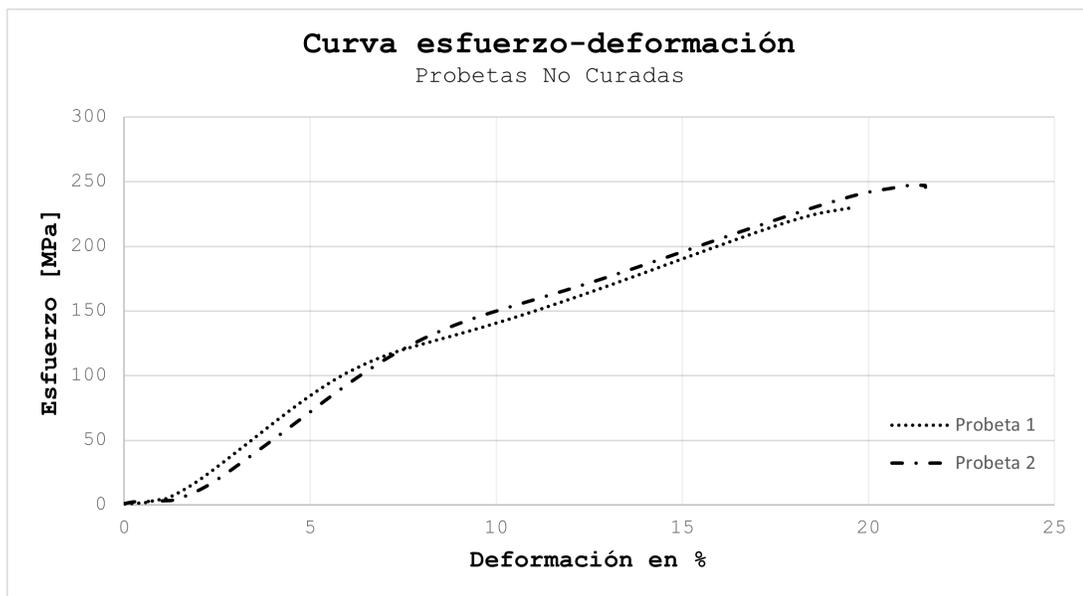


Figura 4.12: Curva de compresión para probeta no curada.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 4,9% y 5% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.6: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	4,9	69,261	2,143
	5,0	71,389	
Probeta 2	4,9	54,487	2,138
	5,0	56,610	
$E_{prom}$ [GPa]	2,141		
$\sigma_E$ [GPa]	0,003		

Para el segundo caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 10 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:

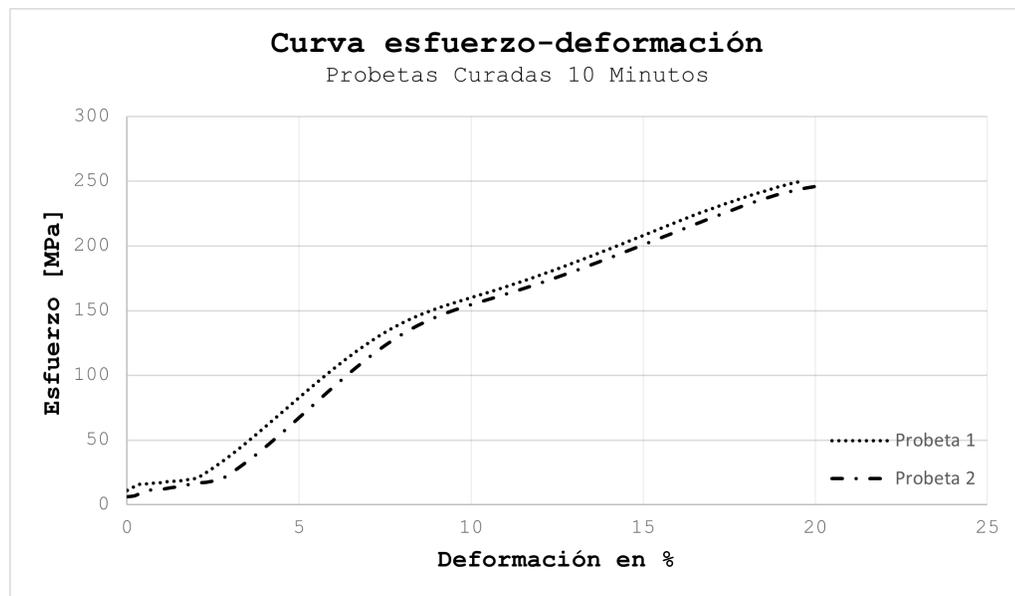


Figura 4.13: Curva de compresión para probeta curada 10 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 4,9% y 5% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.7: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	4,9	34,467	1,964
	5,0	36,431	
Probeta 2	4,9	28,706	1,940
	5,0	30,647	
$E_{prom}$ [GPa]	1,952		
$\sigma_E$ [GPa]	0,017		

Para el tercer caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 30 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:

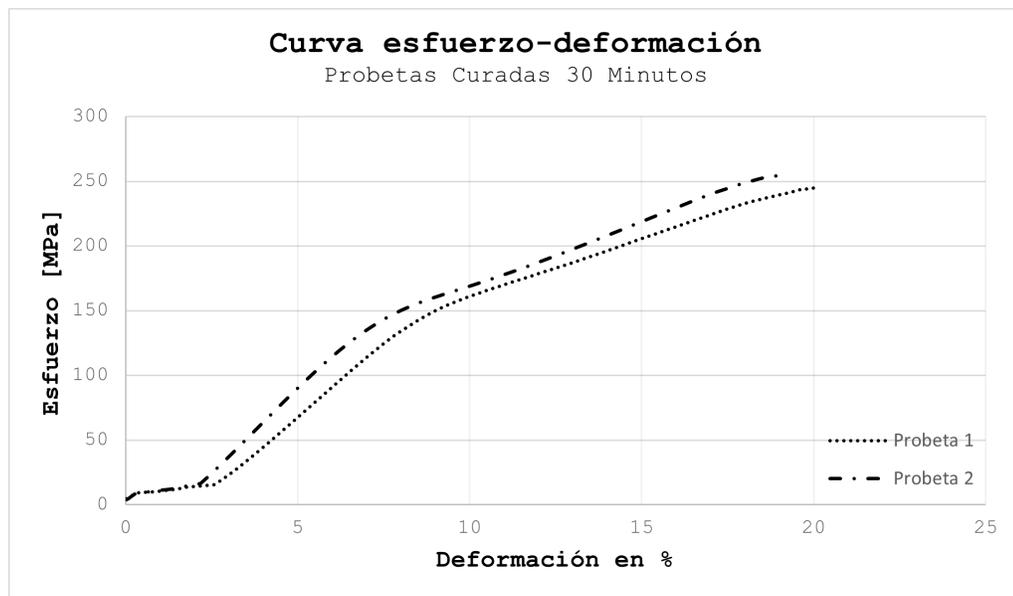


Figura 4.14: Curva de compresión para probeta curada 30 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 4,9% y 5% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.8: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	4,9	28,309	2,111
	5,0	30,421	
Probeta 2	4,9	43,764	2,668
	5,0	46,431	
$E_{prom}$ [GPa]	2,390		
$\sigma_E$ [GPa]	0,394		

Para el último caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 120 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:

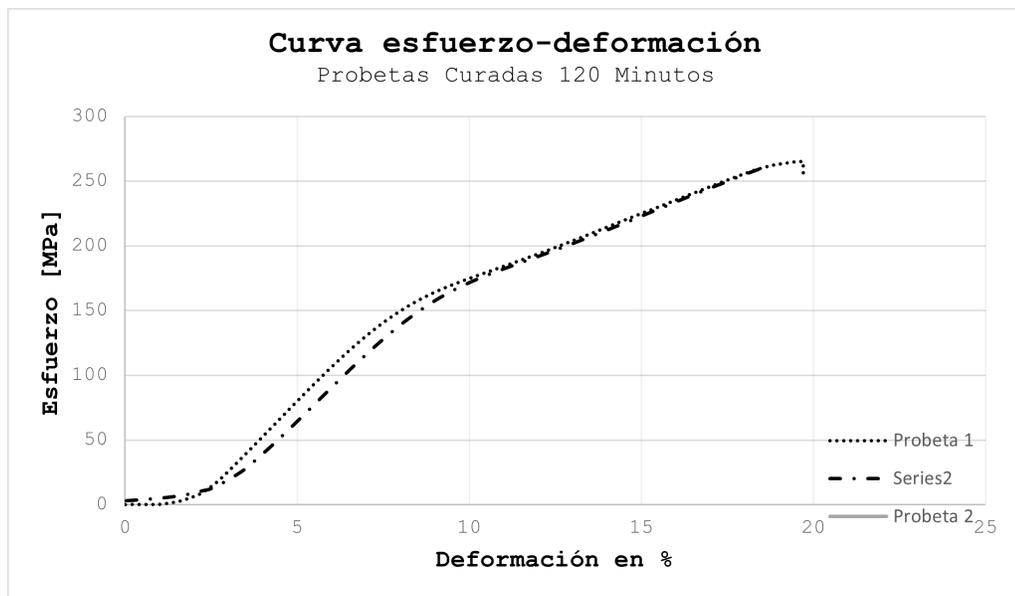


Figura 4.15: Curva de compresión para probeta curada 120 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.1) y (2.2). Gráficamente, se consideró la pendiente entre los puntos donde la deformación alcanza el 4,9% y 5% para ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.9: Cálculo del módulo de Young

	Deformación %	Esfuerzo [MPa]	E [GPa]
Probeta 1	4,9	77,243	2,713
	5,0	79,956	
Probeta 2	4,9	78,067	2,258
	5,0	80,324	
$E_{prom}$ [GPa]	2,486		
$\sigma_E$ [GPa]	0,322		

Finalmente, los promedios para el módulo de Young de ambas probetas para todos los tiempos de poscurado quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.10: Módulo de elasticidad para probetas ensayadas en compresión

$t_{Curado}$ [min]	$E_{prom}$ [GPa]	$\sigma_E$
0	2,141	0,003
10	1,952	0,017
30	2,390	0,394
120	2,486	0,322

Luego, partir de la tabla anterior, se grafica el comportamiento del módulo de Young vs. el tiempo de poscurado de las probetas junto con la desviación estándar como el error asociado.

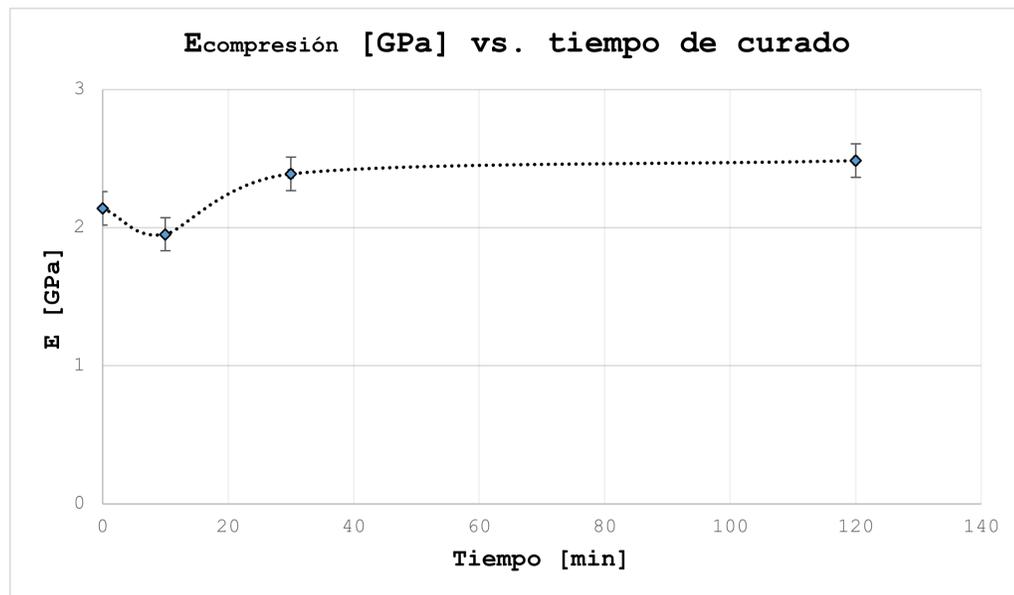


Figura 4.16: Módulo de Young VS tiempo de curado de la probeta.

Es posible ver que, para los gráficos que representan la curva de esfuerzo deformación de las probetas ensayadas en compresión (Figura 4.12 a 4.15), la resina polimérica posee un comportamiento **frágil**. La forma del gráfico indica que la probeta falla antes de entrar a la

zona plástica, alcanzando un límite elástico entre los 200 y 300 [Mpa].

El comportamiento frágil o de Brittle Polymer de la resina polimérica viene dado por, la fractura frágil (fractura explosiva en muchos fragmentos). No existe registro visual debido a que la probeta quedó pulverizada.

Para el gráfico de la figura 4.16, se tiene que el módulo elástico por compresión de la resina fotopolimerizada aumenta a mayor tiempo de poscurado de la probeta. Esto es similar a lo que pasa con el caso del módulo de tracción.

Por otro lado, no existe información en la hoja de datos de la resina sobre el módulo de Young en compresión. Sin embargo, los valores van desde los 10 [Gpa] hasta los 13,5 [Gpa]. Este valor, comparado con el módulo de Young en tracción (3,4-4,5 [Gpa]) se explica por que la disposición de las fibras que componen la resina están perpendiculares al esfuerzo en la matriz polimérica. Esto resulta en que el módulo de Young por compresión sea mayor al de tracción.

### 4.3.3. Ensayo de flexión

En primer lugar, se configura la probeta para realizar el ensayo de flexión en la máquina multipropósito *Zwick/Roell*.

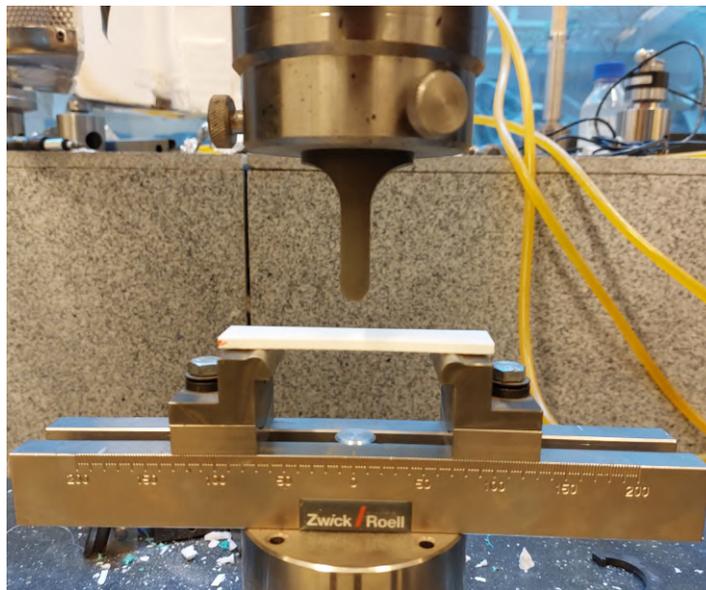


Figura 4.17: Configuración del ensayo de 3 puntos

Para el primer caso, se caracterizan probetas que no fueron sometidas a un poscurado. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura

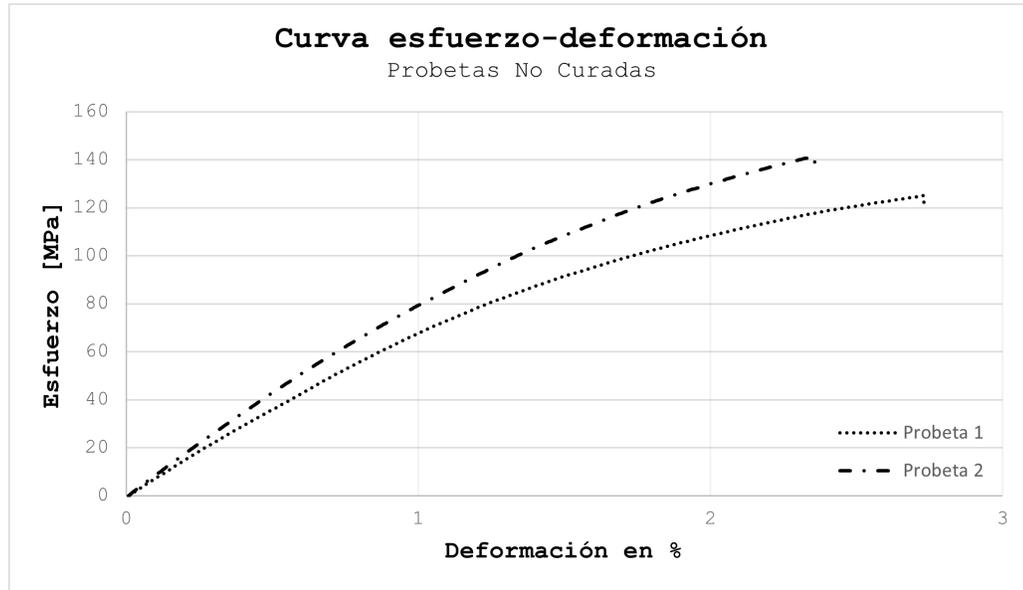


Figura 4.18: Curva de flexión para probeta no curada.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.11: Cálculo del módulo de Young

Probetas	$E_{prom}$ [GPa]
Probeta 1	4,963
Probeta 2	5,990
$E_{prom}$ [GPa]	5,476
$\sigma_E$ [GPa]	0,727

Para el segundo caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 10 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:

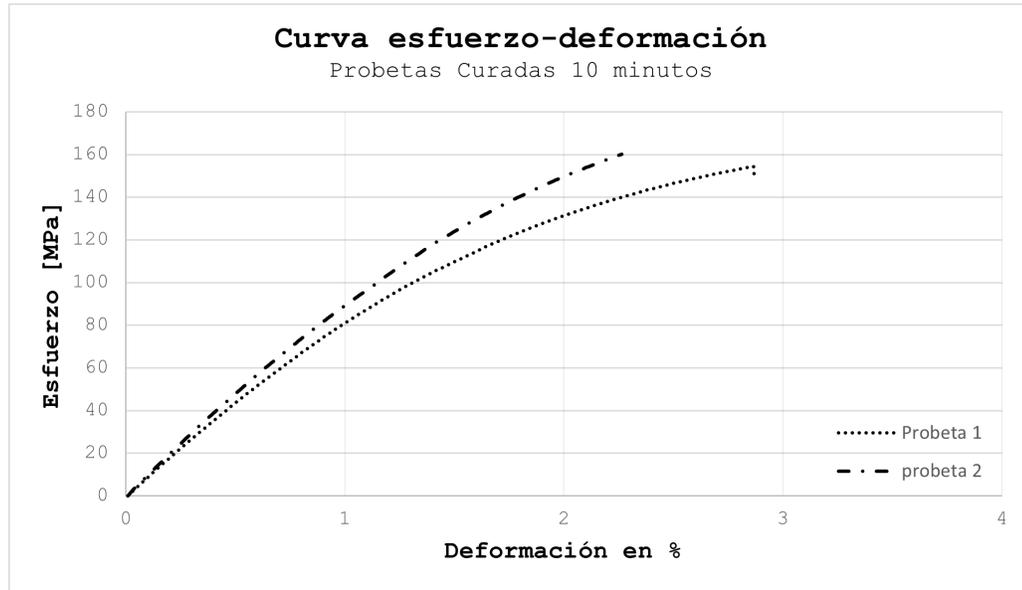


Figura 4.19: Curva de flexión para probeta curada 10 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.12: Cálculo del módulo de Young

Probetas	$E_{prom}$ [GPa]
Probeta 1	5,940
Probeta 2	6,797
$\bar{E}_x$ [GPa]	6,368
$\sigma_E$ [GPa]	0,606

Para el tercer caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 30 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:

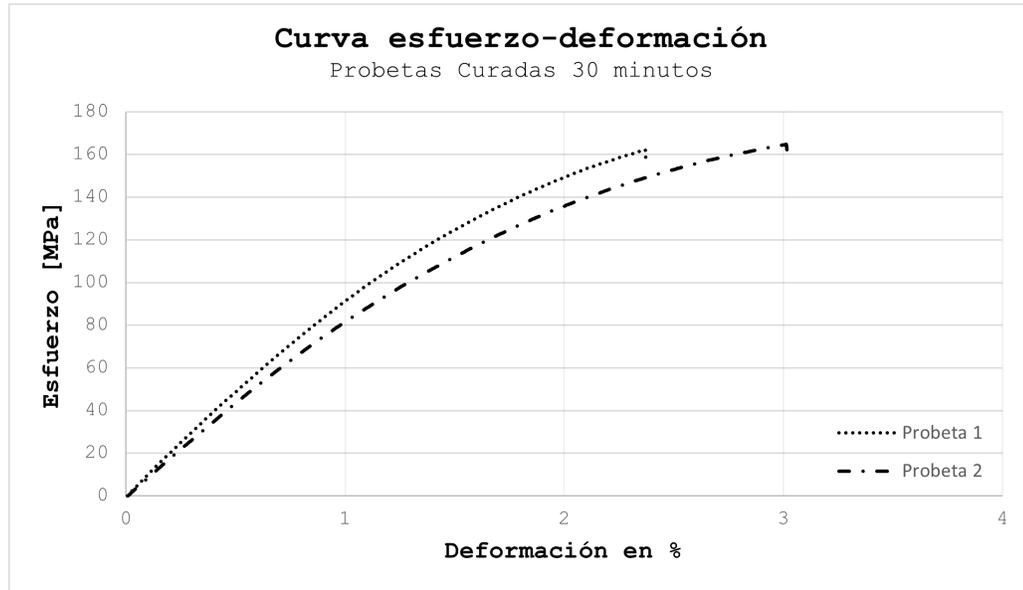


Figura 4.20: Curva de flexión para probeta curada 30 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.13: Cálculo del módulo de Young

Probetas	$E_{prom}$ [GPa]
Probeta 1	6,878
Probeta 2	5,901
$\bar{E}_x$ [GPa]	6,390
$\sigma_E$ [GPa]	0,691

Para el tercer caso, se caracterizan probetas que fueron sometidas a un poscurado de 120 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:

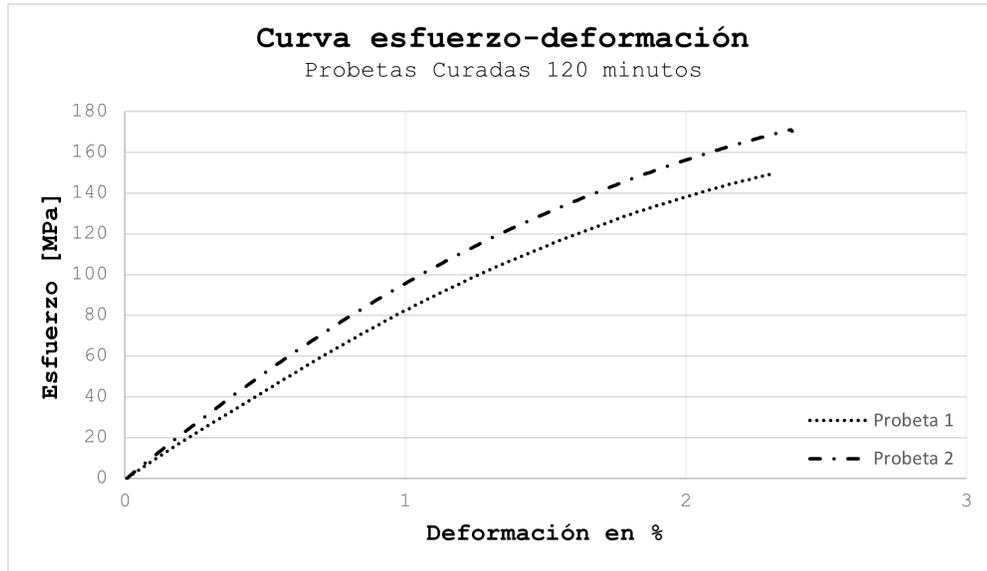


Figura 4.21: Curva de flexión para probeta curada 120 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambas probetas. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.14: Cálculo del módulo de Young

Probetas	$E_{prom}$ [GPa]
Probeta 1	6,139
Probeta 2	7,283
$\bar{E}_x$ [GPa]	6,711
$\sigma_E$ [GPa]	0,809

Finalmente, los promedios para el módulo de Young de ambas probetas para todos los tiempos de poscurado quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.15: Módulo de elasticidad para probetas ensayadas en flexión.

$t_{Curado}$ [min]	$E_{prom}$ [GPa]	$\sigma_E$
0	5,48	0,73
10	6,37	0,61
30	6,39	0,69
120	6,71	0,81

Luego, partir de la tabla anterior, se grafica el comportamiento del módulo de Young vs. el tiempo de poscurado de las probetas junto con la desviación estándar como el error asociado.

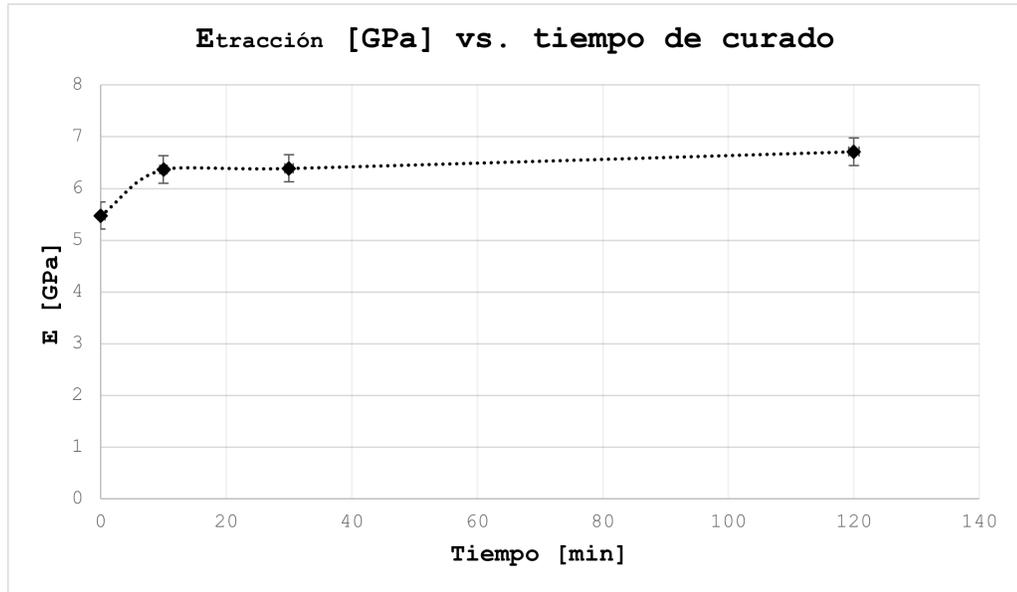


Figura 4.22: Módulo de Young VS tiempo de curado de la probeta.

Es posible ver que, para los gráficos que representan la curva de esfuerzo deformación de las probetas ensayadas en flexión (Figura 4.18 a 4.21), la resina polimérica posee un comportamiento **frágil**. Las probetas fallan alcanzando un esfuerzo de flexión entre los 120-180 [Mpa].

El comportamiento frágil o de *Brittle Polymer* de la resina polimérica viene dado por las bajas deformaciones (menor al 4%), la fractura frágil (bajas deformaciones en las probetas y en algunos casos, fractura en más de 1 pieza), como se muestra en la siguiente figura:

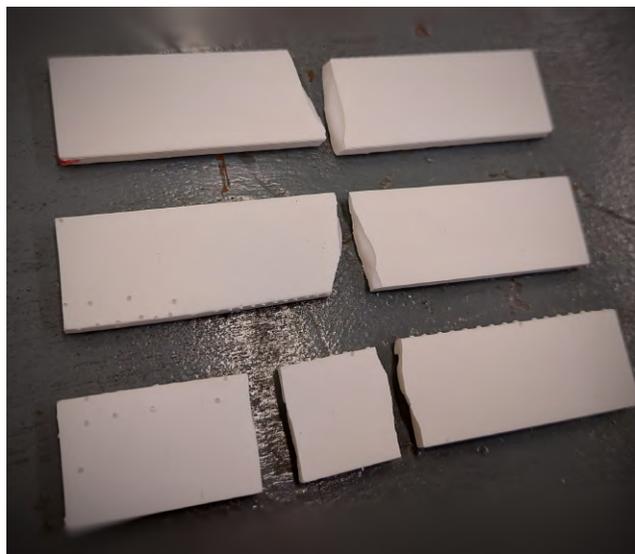


Figura 4.23: Fractura en probeta ensayada a flexión.

Para el gráfico de la figura 4.22, se tiene que el módulo elástico de la resina fotopolimerizada aumenta a mayor tiempo de poscurado de la probeta. Esto es similar a lo que pasa con el caso del módulo de tracción.

Por otro lado, es posible ver que resistencia máxima a la flexión no se comporta como lo estipulado en la Tabla 2.1, que corresponde a la hoja de datos de la resina Rigid 10k. Las resistencia máxima a la flexión encontradas dan un 50% mayores a los datos bibliográficos. Por otro lado, el módulo de Young resultan ser aproximadamente la mitad a los datos bibliográficos

Para concluir con los resultados de la caracterización de la resina, se elabora una tabla resumen con los valores del módulo de Young para todos los ensayos mecánicos realizados y por último, una tabla comparativa de las propiedades mecánicas encontradas vs. las propiedades que dicta el datasheet de la resina.

En primer lugar, se presenta la tabla resumen con los módulos elásticos para todos los ensayos mecánicos y para todos los tiempos de poscurado de las probetas.

Tabla 4.16: Módulo de Young para los ensayos mecánicos realizados.

$t_{curado}$ [min]	$E_{tracción}$ [GPa]		$E_{compresión}$ [GPa]		$E_{flexión}$ [GPa]	
	$E_{prom}$ [GPa]	$\sigma_E$	$E_{prom}$ [GPa]	$\sigma_E$	$E_{prom}$ [GPa]	$\sigma_E$
0	0,764	0,000	2,141	0,003	5,476	0,727
10	2,015	0,958	1,952	0,017	6,368	0,606
30	3,199	0,100	2,390	0,394	6,390	0,691
120	3,209	0,164	2,486	0,322	6,711	0,809

A partir de la tabla anterior, se grafica el módulo de Young para todos los ensayos mecánicos y para todos los tiempos de curado.

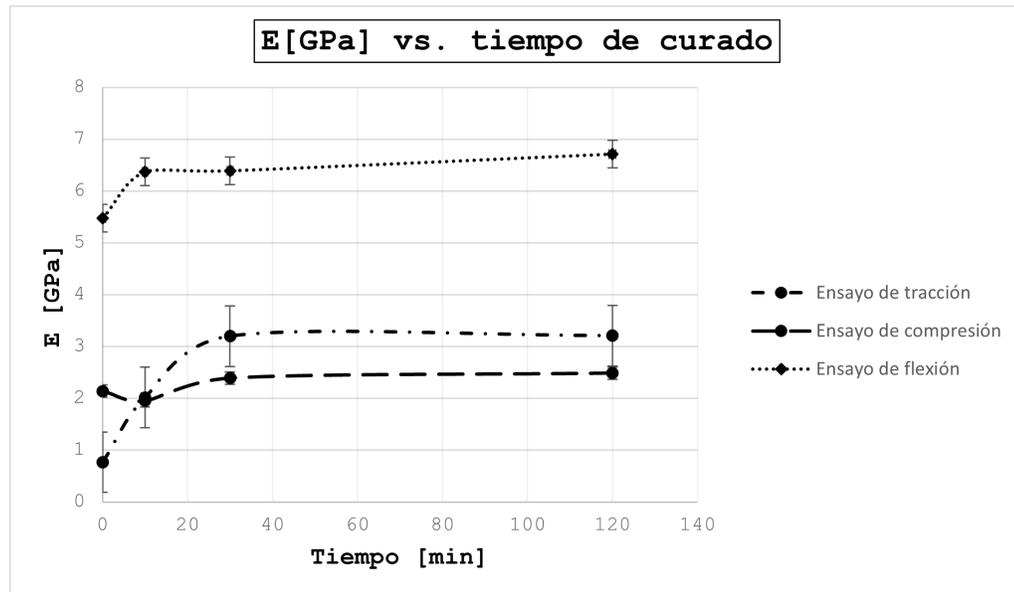


Figura 4.24: Módulo de Young para los ensayos mecánicos vs. tiempo de curado de probetas

De la figura anterior se puede observar que existen diferencias en los módulos de Young

para todos los ensayos mecánicos. Esto se debe principalmente a que la resina está reforzada con vidrio, y estas interfieren en la homogeneidad de los módulos elásticos. En particular, se explica por que la disposición de las fibras que componen la resina están perpendiculares al esfuerzo en la matriz polimérica. Esto resulta en que el módulo de Young por compresión sea mayor al de tracción.

Finalmente, se presenta la tabla comparativa que compara los resultados de los módulos elásticos encontrados vs. lo que dice el datasheet de la resina.

Tabla 4.17: Tabla comparativa módulos elásticos

	Resultados		Datasheet <i>Rigid 10K Resin</i>	
	No poscurada	$UV_1$	No poscurada	$UV_1$
Resistencia a la rotura por tracción	66,8 MPa	77,93 MPa	55 MPa	65 MPa
Módulo de tracción	0,76 GPa	3,2 GPa	7,5 GPa	10 GPa
Alargamiento de rotura	4,78 %	3,52 %	2 %	1 %
Resistencia a la flexión	133,18 MPa	160,83 MPa	84 MPa	126 MPa
Módulo de flexión	5,48 GPa	6,39 GPa	6 GPa	9 GPa

De la tabla anterior, se puede concluir que existen importantes diferencias entre los resultados encontrados y el datasheet de la resina. Es un aspecto relevante a considerar para esta línea de investigación, por lo que se recomienda aclarar estos resultados con la empresa correspondiente.

#### 4.3.4. Caracterización física: Densidad

Para las probetas de flexión y compresión, se calculó el volumen de la pieza, se midió el peso y volumen en una gramera de precisión para obtener la densidad de la resina según el tiempo de poscurado de las piezas. Se realizó una medición para cada probeta. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 4.18: Datos de la probeta de flexión

Probeta flexión						
Tiempo Curado (min)	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Largo (mm)	Volumen ( $mm^3$ )	Peso (gr)	Densidad ( $kg/m^3$ )
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 4.19: Datos de la probeta de compresión

Probeta Compresión					
Tiempo Curado (min)	Diametro (mm)	Largo (mm)	Volumen ( $mm^3$ )	Peso (gr)	Densidad ( $kg/m^3$ )
0	20	20	6283,19	11	1750,70
10	20	20	6283,19	11	1750,70
30	20	20	6283,19	11,06	1760,25
120	20	20	6283,19	11,07	1761,84

Luego, se grafica el comportamiento de la densidad vs. el tiempo de curado para ambas probetas.

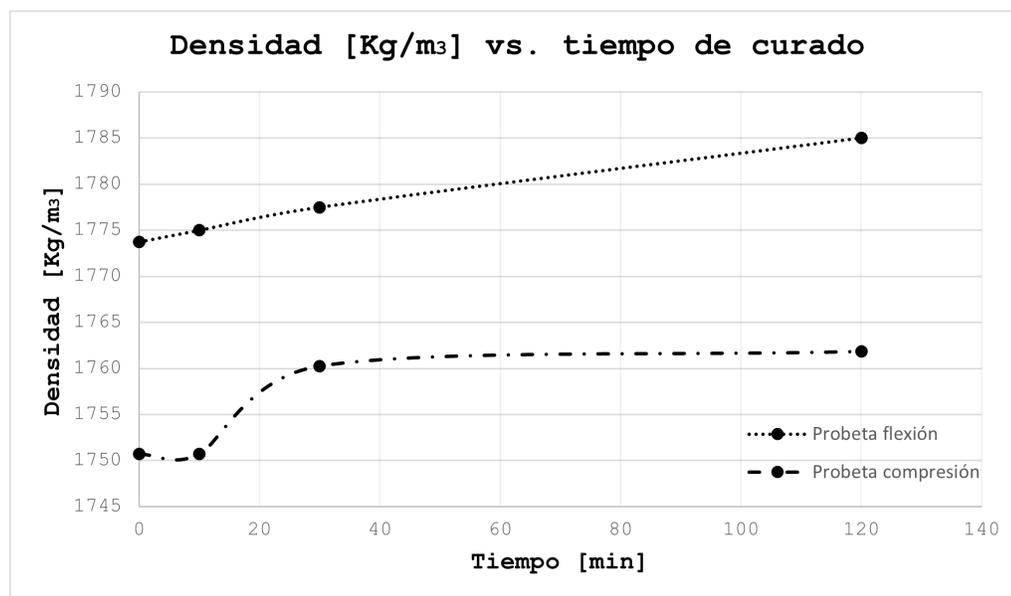


Figura 4.25: Densidad de probetas de flexión y compresión con respecto al tiempo de curado.

Para el gráfico de la figura 4.25, se tiene que la densidad de la resina fotopolimerizada aumenta a mayor tiempo de poscurado de la probeta. Esto se debe a que el proceso de curado continúa la fotopolimerización (reordenamiento de cadenas poliméricas) que se da en la impresión. Esto genera estructuras moleculares más compactas, por lo que el material en general se contrae, aumentando la masa volumétrica de la resina, es decir, su densidad.

Por otro lado, hay que destacar que un factor importante que incide en la densidad del material es el alto de la probeta a la hora de realizar un poscurado del material. Las probetas de compresión, con un diámetro de 20 mm poseen densidades considerablemente menores a las probetas de flexión, con un alto de 4 mm. Esto último se debe a que la probeta con mayor espesor no alcanza un poscurado óptimo hacia el centro de la pieza, por lo que las estructuras moleculares son menos compactas y por lo tanto las densidades son menores. La probeta de flexión, de espesor menor, alcanza mejores poscurados hacia el centro de la pieza, por lo que alcanza mayores densidades en comparación a la probeta de compresión.

Debido al punto anterior, y para efectos de la investigación en paneles sándwich ultralivianos, debe tenerse en consideración el grosor de las piezas a la hora de inyectar los parámetros en el modelo de optimización de Band Gaps. En este caso, se usarán los valores encontrados para la probeta de flexión, ya sea el módulo de Young y la densidad para los tiempos de poscurado de 120 minutos.

## 4.4. Datos usados para el modelo de optimización de Band Gaps

Para el modelo de optimización de Band Gaps[6] en el panel sándwich tipo Pirámide central se usaron los siguientes datos:

- $E_{flexión}=6,71$  [Gpa]. (Tabla 3.4)
- $\rho = 1785[kg/m^3]$  (Tabla 3.5).

En primer lugar, se usó el módulo de Young en flexión, debido a que, para la optimización de Band Gaps fonónicos (que son un fenómeno vibratorio) las vibraciones son principalmente en flexión en los elementos viga del núcleo del panel.

Por otro lado, se usó el módulo de Young y la densidad según el mayor tiempo de curado de la probeta más delgada, es decir, de la probeta de flexión. Esto se debe a que según el gráfico de la figura 3.45, se encontró que la densidad también depende del grosor de la pieza. Como el radio de los elementos viga del núcleo del panel sándwich y sus placas poseen grosores más bajos que la probeta de flexión, se estima que la densidad y el módulo de Young alcanzarán valores parecidos a las propiedades mostradas por las probetas de flexión curadas 120 min.

Finalmente, al correr la simulación para la optimización de Band Gaps, se obtienen los siguientes parámetros que definen los radios de los elementos viga del panel, como se explicó en la sección 2.2.4.

Tabla 4.20: Factores de radio y altura para los elementos de viga del panel sándwich.

Parámetros elementos viga	Factor radio/altura
$f_1$	1,38
$f_2$	1,22
$f_3$	1,77
$f_4$	0,99
$f_5$	1,16
$f_6$	1,69
$f_L$	1,00

Además de entregar el factor de altura entre placas  $L_c = 16.2$  mm y el factor en milímetros del radio, usado en el modelo  $r = 0,8$  mm.

Finalmente, se obtuvo el diagrama de bandas teórico obtenido del programa de optimización de Band Gaps.

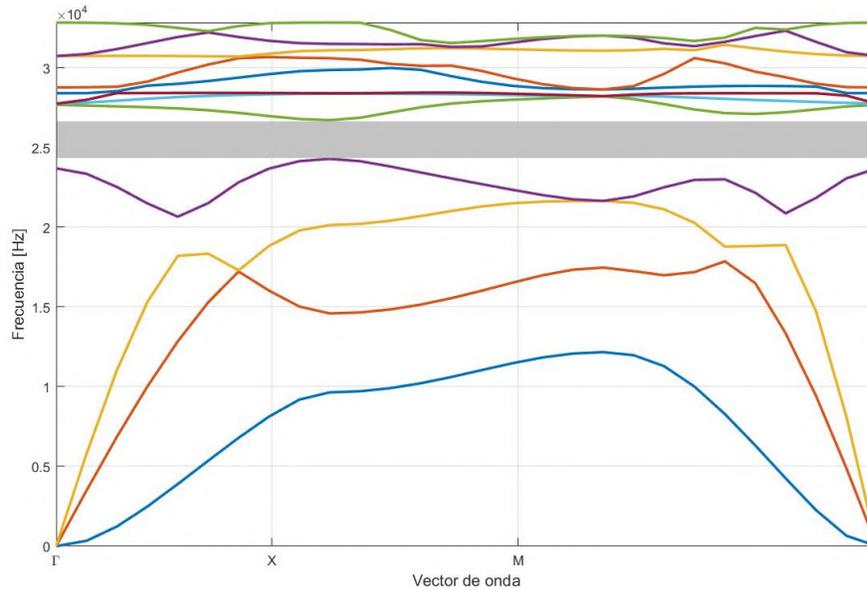


Figura 4.26: Diagrama de banda obtenido para el panel sándwich tipo pirámide central con las propiedades mecánicas y físicas de Rigid 10k Resin

El modelo elegido y obtenido por optimización de band gaps[6] posee un band gap teórico, como se puede ver en la figura anterior. Se puede observar que esta banda de está en frecuencias muy altas a lo esperado (pues se modeló como un panel infinito). Por otro lado, el band gap resulta ser no ficticio debido a que las líneas están claramente separadas.

Con los datos obtenidos de la tabla 4.18, se puede realizar modelos en software CAD para la modelación de paneles tipo sándwich con estructuras nucleares tipo pirámide central.

## 4.5. Modelamiento de Paneles

Una vez se corre el modelo de optimización de Band Gaps con los datos usados anteriormente, se procede a modelar los paneles sándwich con los parámetros obtenidos en la tabla 4.18 según el punto 3.4.

Para esto se usa el software *Autodesk Inventor 2022*, con licencia de estudiante. Se genera una pieza de formato IPT y se ingresan los parámetros obtenidos en el punto anterior.

Nombre de parámetro	Ecuación	Clave
▶ Parámetros del modelo		
- Parámetros del usuario		
f1	1,38 su	<input type="checkbox"/>
f2	1,22 su	<input type="checkbox"/>
f3	1,77 su	<input type="checkbox"/>
f4	0,59 su	<input type="checkbox"/>
f5	1,16 su	<input type="checkbox"/>
f6	1,69 su	<input type="checkbox"/>
fl	1 su	<input type="checkbox"/>

Actualización inmediata
 Actualizar
Más >>
Terminar

Figura 4.27: Factores de radio y altura para el panel sándwich obtenidos del modelo.

Nombre de parámetro	Ecuación	Clave
▶ Parámetros del modelo		
- Parámetros del usuario		
Lc	16,2 mm	<input type="checkbox"/>
Lz	$Lc / 3$ su	<input type="checkbox"/>
r	0,8 mm	<input type="checkbox"/>
test	23 mm	<input type="checkbox"/>

Actualización inmediata
 Actualizar
Más >>
Terminar

Figura 4.28: Parámetros generales del modelo.

Luego, se genera la IBZ del panel sándwich. En primer lugar, se construye el modelo 2D de la celda unitaria. En la siguiente imagen, se puede ver el modelo de la celda unitaria y los elementos viga que representan la IBZ del panel.

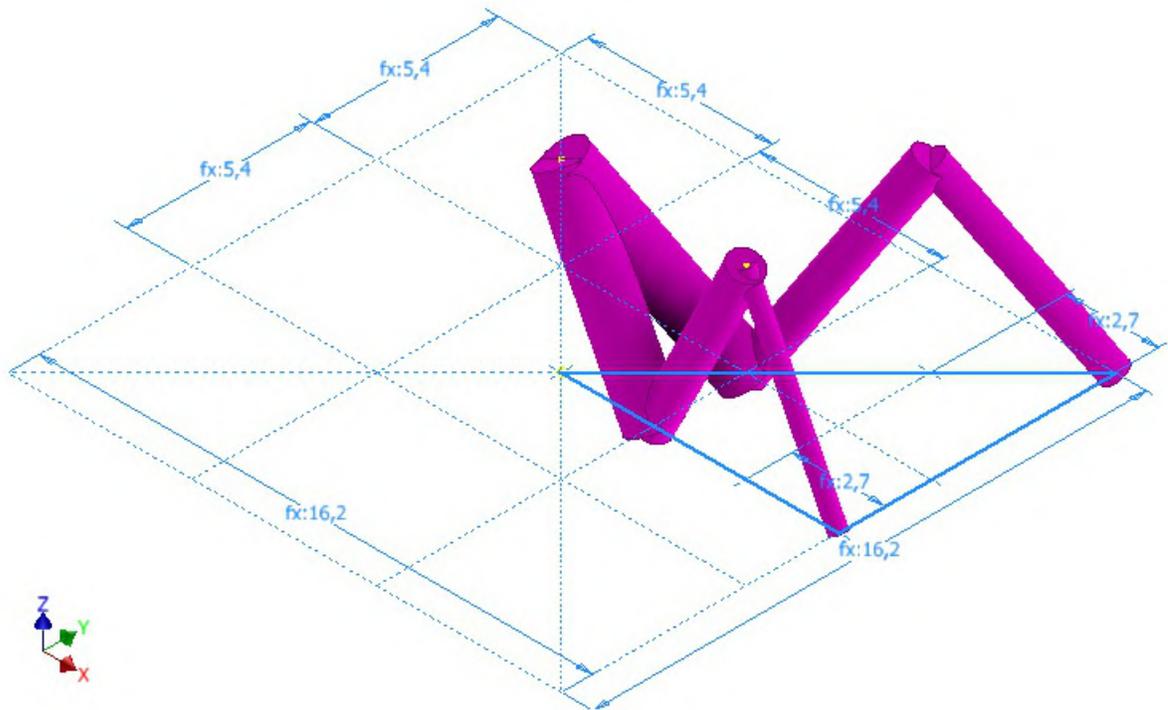


Figura 4.29: IBZ núcleo tipo pirámide central.

En líneas azules se puede ver el modelo 2D de la celda unitaria de la estructura nuclear pirámide central. Las funciones Fx representan las medidas con respecto a Lc según indica el modelo. Por otro lado, se generan los elementos viga de la IBZ con barridos de radios obtenidos de los parámetros establecidos en Inventor, de la figura 4.26.

Finalmente, con las simetrías correspondientes y agregando placas de 1mm de espesor, se genera una celda unitaria de panel sándwich.

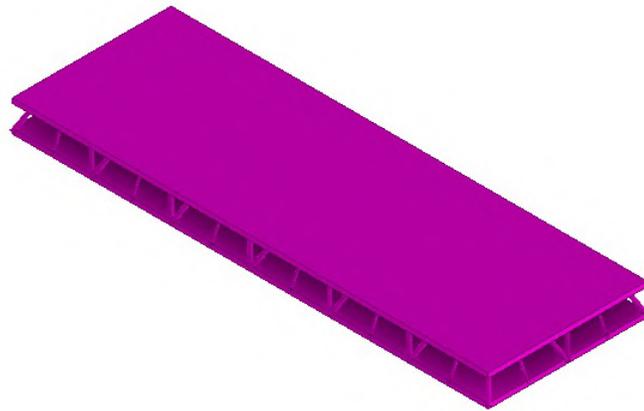


Figura 4.30: Panel sándwich modelado en inventor.

Finalmente, se exporta en formato stl para abrirlo en el software *Preform*. El panel junto con sus soportes queda representado en la siguiente figura:

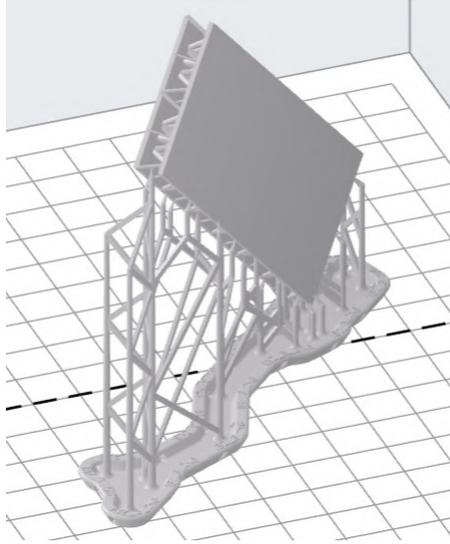


Figura 4.31: Panel sándwich en “Preform”

## 4.6. Impresión de Paneles

Se imprimió el panel obtenido del punto anterior en la impresora *Formlab*. Se lavaron por 10 min y luego se poscuraron según los mismos tiempos de la tabla 3.1. La impresión del panel queda representada en la siguiente figura.



Figura 4.32: Panel sándwich impreso

## 4.7. Caracterización mecánica de paneles sándwich con núcleo tipo Pirámide central

En primer lugar, se configura la probeta para realizar el ensayo de flexión en la máquina multipropósito *Zwick/Roell*.



Figura 4.33: Ensayo de flexión para el panel sándwich.

#### 4.7.1. Ensayo de flexión

Para el primer caso, se caracterizan los paneles que no fueron sometidos a un poscurado. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:



Figura 4.34: Curva de flexión para panel no curado.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambos paneles. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.21: Cálculo del módulo de Young

Paneles sándwich	$E_{prom}$ [GPa]
Panel 1	53,740
Panel 2	57,692
<hr/>	
$E_{prom}$ [GPa]	55,716
$\sigma_E$ [GPa]	2,794

Para el segundo caso, se caracterizan los paneles que fueron sometidos a un poscurado de 10 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:



Figura 4.35: Curva de flexión para panel curado 10 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambos paneles. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.22: Cálculo del módulo de Young

Paneles sándwich	$E_{prom}$ [GPa]
Panel 1	66,658
Panel 2	69,286
<hr/>	
$E_{prom}$ [GPa]	67,972
$\sigma_E$ [GPa]	1,858

Para el tercer caso, se caracterizan los paneles que fueron sometidos a un poscurado de 30 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura:



Figura 4.36: Curva de flexión para panel curado 30 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambos paneles. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.23: Cálculo del módulo de Young

Paneles sándwich	$E_{prom}$ [GPa]
Panel 1	78,153
Panel 2	83,791
<hr/>	
$E_{prom}$ [GPa]	80,972
$\sigma_E$ [GPa]	3,986

Para el último caso, se caracterizan los paneles que fueron sometidos a un poscurado de 120 minutos. La curva de esfuerzo deformación queda representada en la siguiente figura



Figura 4.37: Curva de flexión para panel curado 120 minutos.

Para el cálculo del módulo de Young, se usó la ecuación (2.4) y (2.5). Gráficamente, se consideró el promedio de las pendientes para toda la curva, en ambos paneles. Luego, el resultado para el módulo de Young calculado queda representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.24: Cálculo del módulo de Young

Paneles sándwich	$E_{prom}$ [GPa]
Panel 1	93,821
Panel 2	93,287
$E_{prom}$ [GPa]	93,554
$\sigma_E$ [GPa]	0,378

Finalmente, los promedios para el módulo de Young de ambos paneles para todos los tiempos de poscurado quedan representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.25: Módulo de elasticidad para paneles ensayados en flexión

$t_{curado}$ [min]	E prom [GPa]	$\sigma_E$
0	55,72	2,79
10	67,97	1,86
30	80,97	3,99
120	93,55	0,38

Luego, partir de la tabla anterior, se grafica el comportamiento del módulo de Young vs. el tiempo de poscurado de las probetas junto con la desviación estándar como el error asociado.

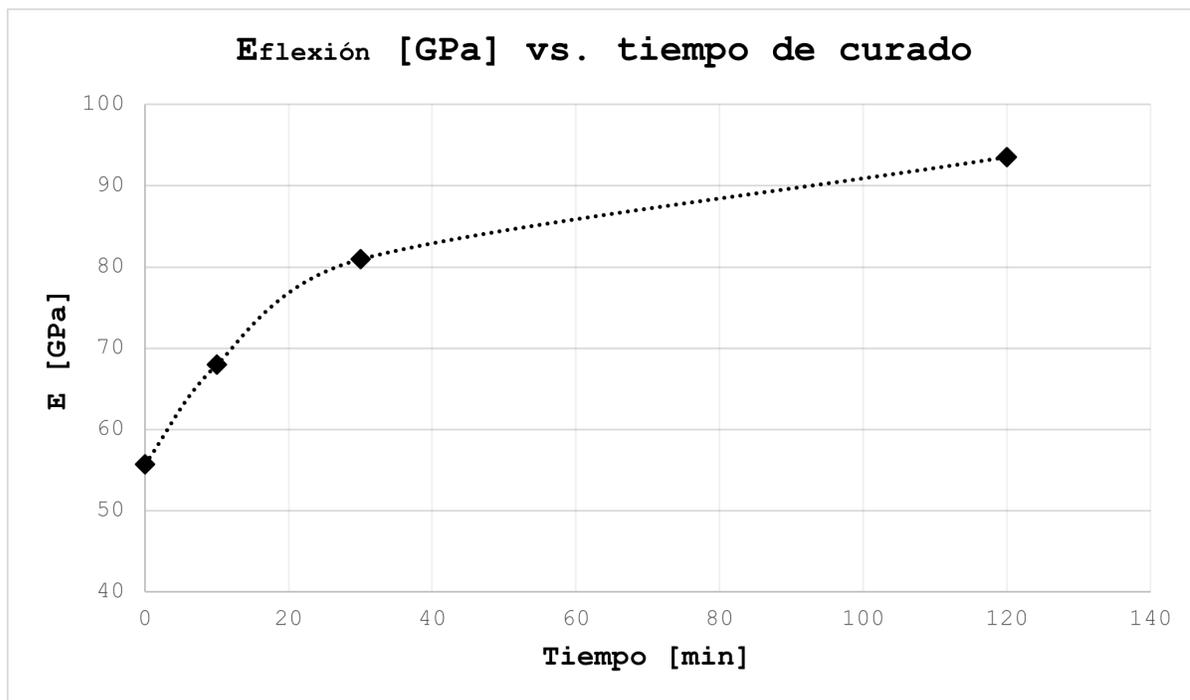


Figura 4.38: Módulo de Young VS tiempo de curado del panel.

Es posible ver que, para los gráficos que representan la curva de esfuerzo deformación de los paneles ensayados en flexión (Figura 4.34 a 4.37), la resina polimérica sigue comportandose como un material frágil. Los paneles fallan alcanzando un esfuerzo de flexión entre los 60 y 90 [Mpa]. Por otro lado, los peaks visibles en el gráfico corresponden a la falla de los elementos viga dentro del núcleo del panel. Se puede apreciar una fractura del panel en la siguiente figura:

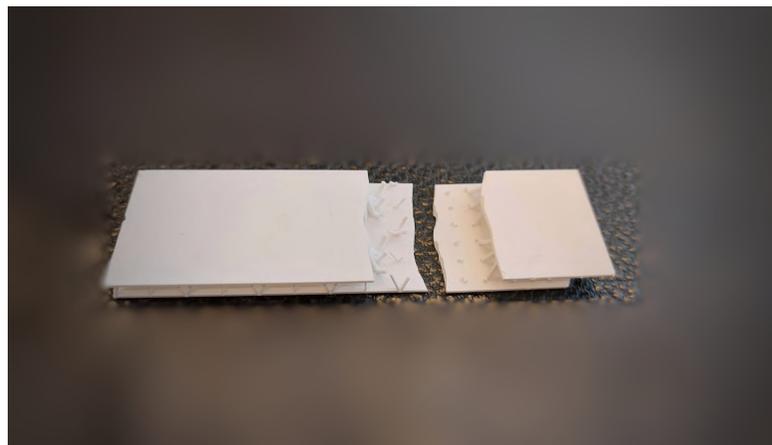


Figura 4.39: Fractura del panel.

Se puede apreciar que la deformación es considerablemente menor a lo que se da en las probetas ensayadas a flexión, y los esfuerzos máximos, si bien son más bajos, difieren en una menor proporción con respecto a la deformación, como se puede ver en la tabla 4.25. Esto da cuenta de un mejoramiento en las propiedades mecánicas del panel en términos de resistencia a flexión y módulo de Young.

### 4.7.2. Caracterización física: Densidad

Se obtuvo el volumen de los paneles gracias a “Autodesk inventor” y la masa con una gramera de precisión. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 4.26: Datos de paneles sándwich con núcleo pirámide central

Paneles Sándwich					
Tiempo Curado (min)	Volumen ( $mm^3$ )	Peso (gr)	Densidad ( $kg/m^3$ )	Promedio ( $kg/m^3$ )	$\sigma_\rho$ ( $kg/m^3$ )
0	7420,77	13,56	1827,30	1824,61	3,81
	7420,77	13,52	1821,91		
10	7420,77	13,56	1827,30	1819,22	11,43
	7420,77	13,44	1811,13		
30	7420,77	13,79	1858,30	1863,69	7,62
	7420,77	13,87	1869,08		
120	7420,77	13,90	1873,12	1867,06	8,58
	7420,77	13,81	1860,99		

Luego, graficando los datos de la densidad VS el tiempo de curado para ambos paneles sándwich.

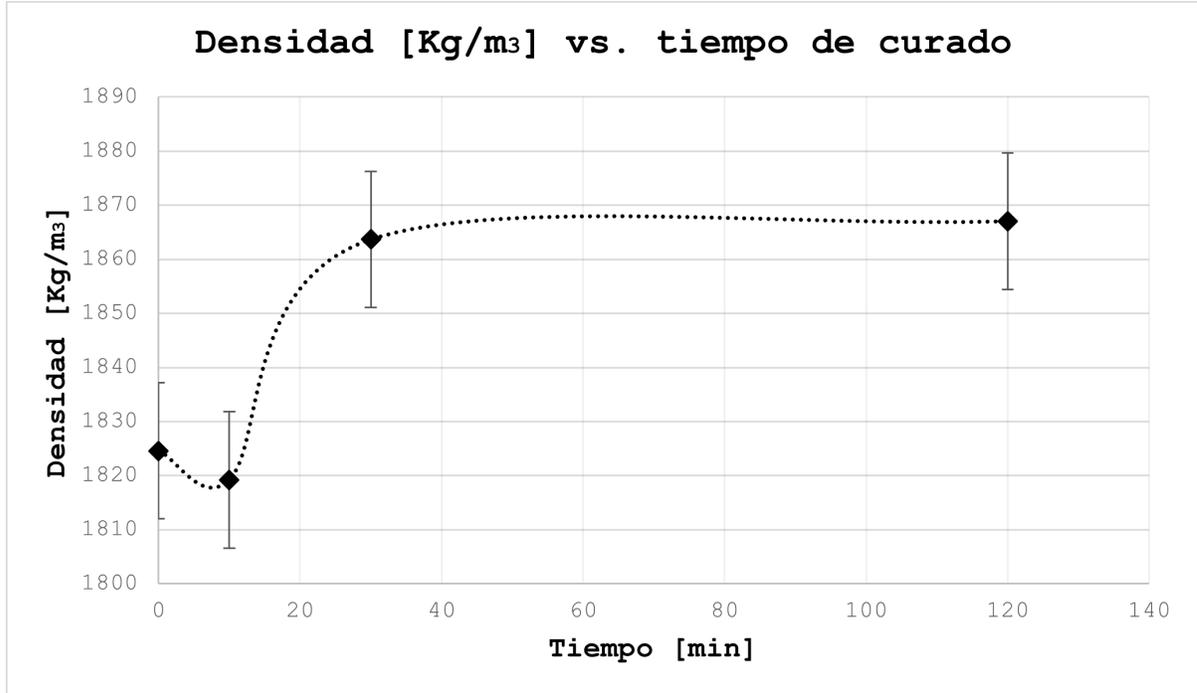


Figura 4.40: Densidad VS tiempo de curado del panel.

Para el gráfico de la figura 4.40, se tiene que la densidad de la resina fotopolimerizada aumenta a mayor tiempo de poscurado del panel. Esto se debe a que el proceso de cura-

do continua la fotopolimerización (reordenamiento de cadenas poliméricas) que se da en la impresión. Esto genera estructuras moleculares más compactas, por lo que el material en general se contrae, aumentando la masa volumétrica de la resina, es decir, su densidad.

Como se mencionó anteriormente, un factor importante que incide en la densidad del material es el alto de la probeta a la hora de realizar un poscurado del material. Las probetas de compresión, con un diámetro de 20 mm poseen densidades considerablemente menores a las probetas de flexión, con un alto de 4 mm, y estas a su vez, poseen menores densidades que los paneles, con grosores inferiores a 2 mm. En el siguiente gráfico se puede apreciar mejor la densidad de probetas y paneles.

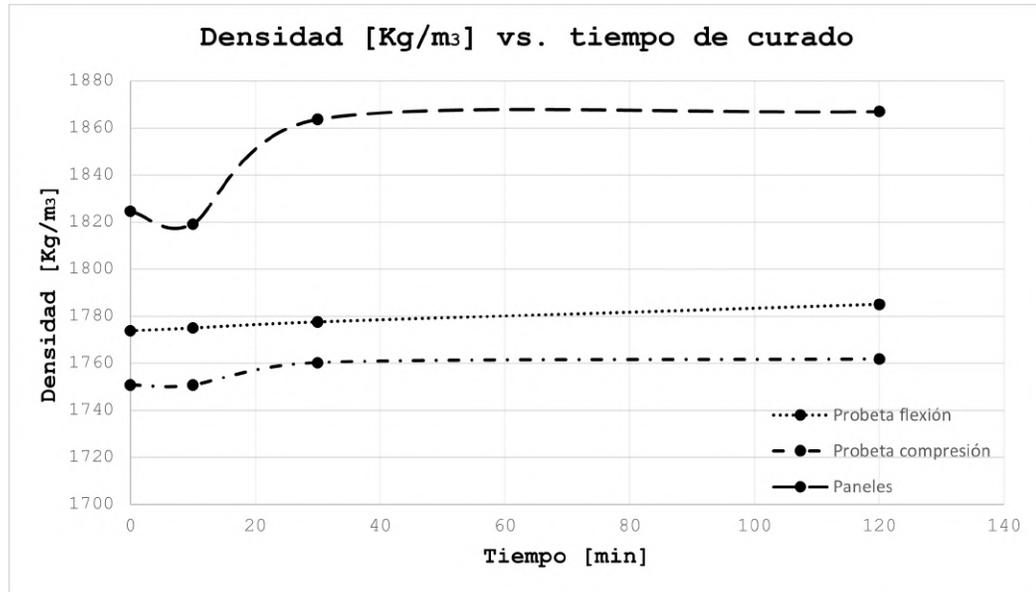


Figura 4.41: Densidad VS tiempo de curado de paneles y probetas.

Es por esto, que para efectos de la investigación en paneles sándwich ultralivianos, debe tenerse en consideración el grosor de las piezas a la hora de inyectar los parámetros en el modelo de optimización de Band Gaps.

## 4.8. Análisis en microscopio electrónico de barrido

Luego de ensayar las probetas y paneles, se procede a observar las características superficiales y la composición de la resina en la zona de fractura en el microscopio electrónico de barrido, ubicada en Geología de la FCFM de la Universidad de Chile.

En primer lugar, se toman las piezas fracturadas y se someten a vacío para inyectarles una capa de oro en la superficie, con el fin de otorgar un camino a los electrones que llegan a la pieza.



(a) Inyección de oro al vacío.



(b) Extracción de piezas con capa de oro.

Figura 4.42: Configuración de probetas fracturadas para observarlas en el microscopio electrónico de barrido.

Luego, se sitúan las probetas a observar en el microscopio electrónico de barrido.



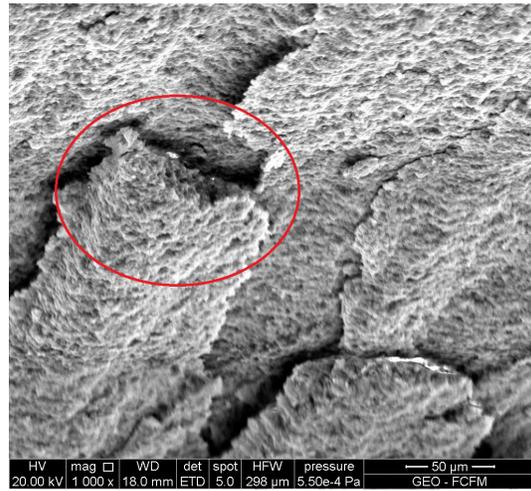
Figura 4.43: Probetas cobfiguradas en el microscopio electrónico de barrido.

#### 4.8.1. Formas y texturas de la superficie de probetas

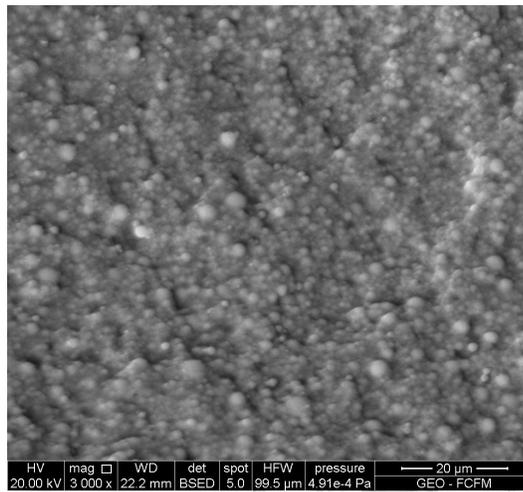
Para las probetas de flexión y compresión, se observó una fractura frágil, llegando a superficies fracturadas con abundante porosidad. Se presenta en las siguientes figuras.



(a) Fractura de la probeta, escala 2 mm



(b) Fractura de la probeta, escala 50  $\mu m$



(c) Fractura de la probeta, escala 20  $\mu m$

Figura 4.44: Fracturas en probetas en diferentes escalas. Cada una es un Zoom de la anterior.

Es posible ver en la Figura 4.38, a nivel macroscópico (a) una fractura con varias estrías, donde cada una de ellas presenta porosidad, como se puede ver en (b). Esta porosidad, vista en (c) a 20  $\mu m$  se debe al compuesto de vidrio ( $SiO_2$ ) que se logra visualizar como pequeñas esferas blanquecinas de aproximadamente 1  $\mu m$ . Este compuesto, muy abundante dentro de la matriz polimérica, explica el comportamiento frágil del material en las probetas y paneles sándwich vistos en los puntos anteriores.

#### 4.8.2. Formas y texturas de la superficie de paneles sándwich

Para los paneles, se observó los elementos de viga fracturados y su superficie. En primer lugar, se tienen los elementos de viga fracturados a nivel macroscópico. Para mejor entendimiento, se presenta la siguiente figura para observar la zona de estudio.

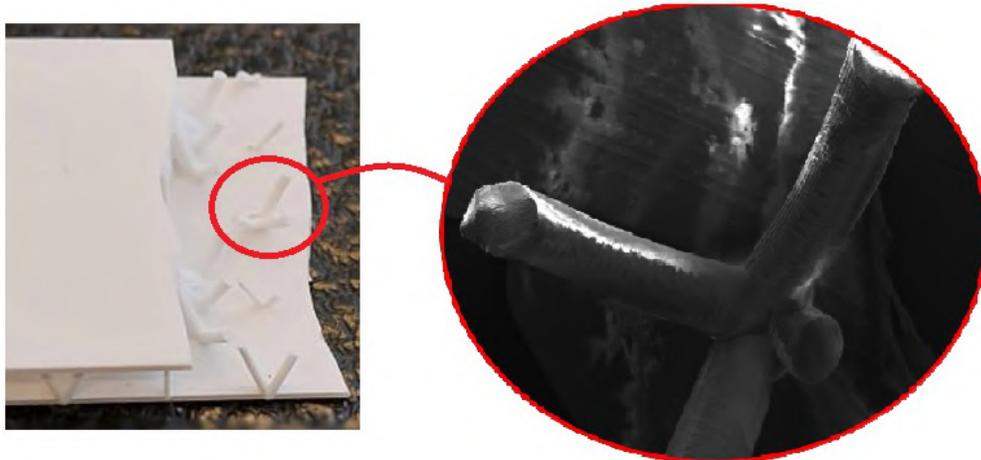
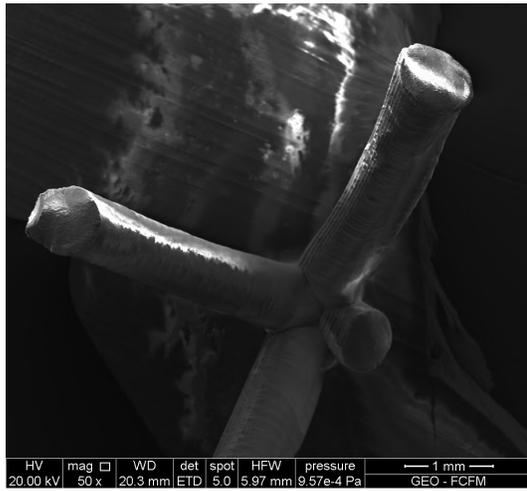
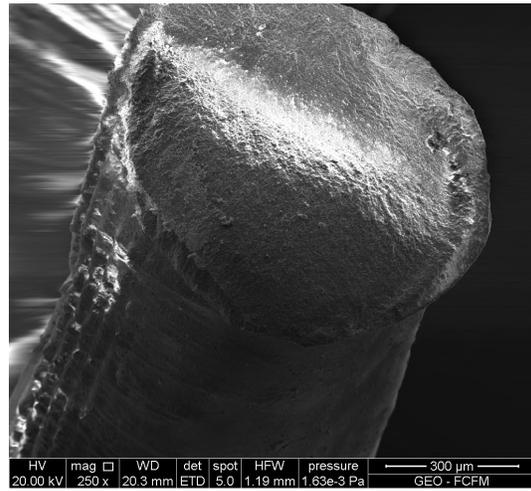


Figura 4.45: Zona de estudio del panel sándwich.

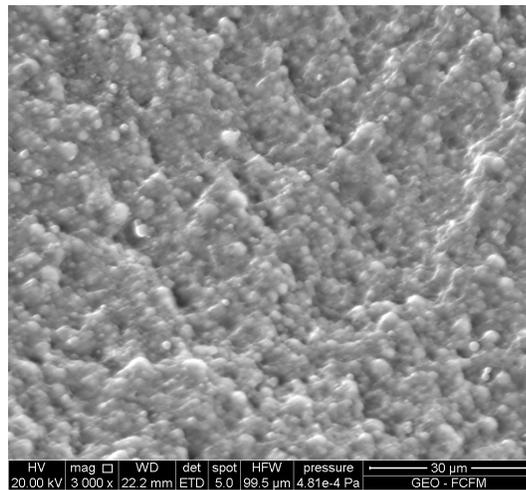
Luego, obtuvieron imágenes a diferentes escalas en zonas de interés del panel. Se representan en las siguientes figuras.



(a) Fractura de la probeta, escala 1 mm



(b) Fractura de la probeta, escala 300  $\mu\text{m}$



(c) Fractura de la probeta, escala 30  $\mu\text{m}$

Figura 4.46: Fracturas en paneles en diferentes escalas.

Es posible ver, en la figura 4.40, a nivel macroscópico (a) los elementos de viga fracturados del panel tipo sándwich con núcleo pirámide central. En (b) se puede ver la fractura de uno de los elementos de viga, e incluso se logra visualizar el patrón de impresión en la esquina inferior izquierda, la cual fue de 0.05 mm o 50  $\mu\text{m}$ . Finalmente, se puede observar en (c) que en la zona de fractura existe abundante compuesto de vidrio dentro de la matriz polimérica, lo que explica el comportamiento frágil en la fractura por flexión, visto en el punto 4.7.

La composición de vidrio, que se puede visualizar como bolas pequeñas y blanquecinas en las imágenes obtenidas por el microscopio electrónico de barrido, se conciden con la composición química de los constituyentes de la resina Rigid 10k Resin que se verá a continuación.

### 4.8.3. Composición química de la resina Rigid 10k Resin

La composición química de la resina se extrajo con el software computacional del microscopio electrónico de barrido. La imagen o sección de la probeta analizada es la siguiente:

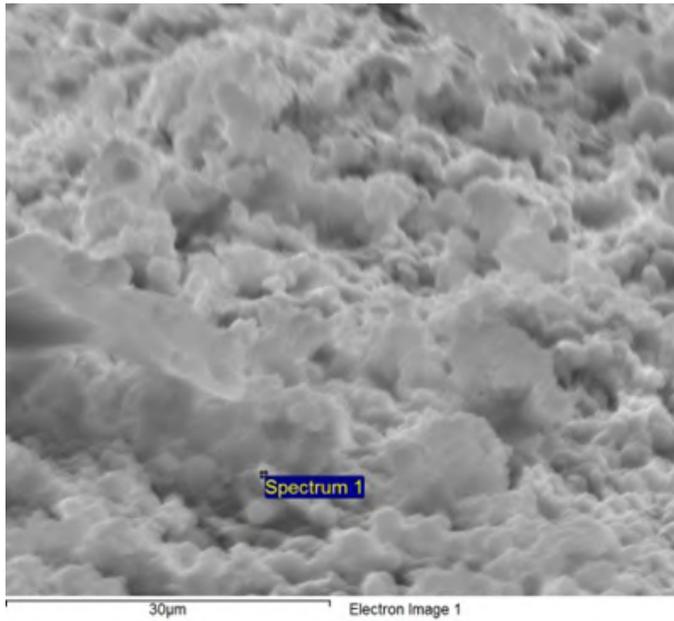


Figura 4.47: Espectro analizado para obtener la composición química de la resina Rigid 10k

Al analizar el espectro de la imagen anterior por el software computacional del microscópio, se obtuvo la siguiente composición química de la resina.

Tabla 4.27: Composición química de Rigid 10k Resin

Element	Weight %	Atomic %	Compd %	Formula
C K	17.07	23.34	62.53	CO <sub>2</sub>
Si K	16.97	9.92	36.30	SiO <sub>2</sub>
Au M	1.04	0.09	1.17	Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
O	64.92	66.65		
Totals	100.00			

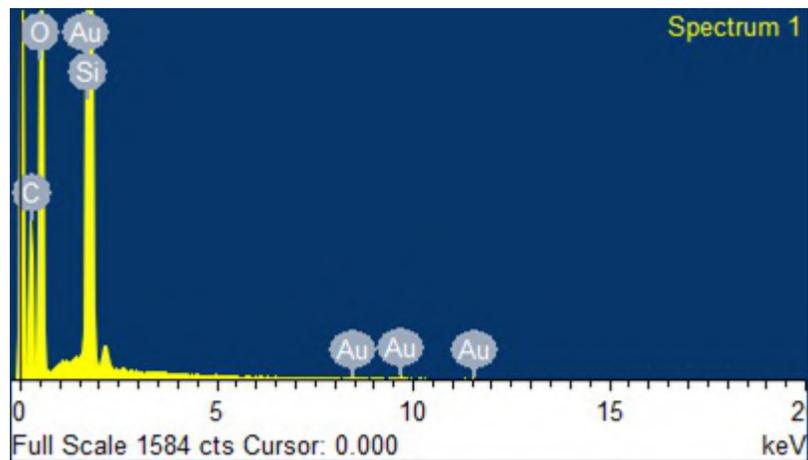


Figura 4.48: Análisis químico de la resina.

Se puede observar, en la tabla 4.27 y figura 4.48 que efectivamente existe una gran cantidad de Si y O, es decir, de partículas de vidrio. Por otro lado, la matriz en la que están estas partículas es polimérica, por lo que tiene sentido que exista C y O, por lo que el estudio está dentro de lo esperado, según lo que se oferta en el datasheet de la resina.

Por otro lado, se puede ver que existe oro dentro del análisis. Como se explicó anteriormente, en la figura 4.48, es necesario inyectar una capa de oro para el estudio en el microscopio electrónico, por lo que es lógico encontrar oro en la muestra.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajos futuros

Se logra modelar y caracterizar mecánicamente probetas y paneles tipo sándwich con núcleo de pirámide central, con el objetivo de encontrar las propiedades mecánicas y así, en trabajos futuros, modelar en elementos finitos estructuras tipo sándwich para buscar band gaps a través de sus respectivos diagramas de banda.

Se lograron encontrar las propiedades mecánicas del material usado para esta investigación, Rigid 10k Resin, las cuales difieren de la hoja de datos, pues las condiciones de operación, impresión y poscurado son diferentes a las expresadas en la hoja. Por otro lado, se determina la densidad, que no se reporta en la hoja de datos y que es un parámetro indispensable para el modelo de optimización de band gaps.

Para una primera iteración para el modelo de optimización de Band gaps, se usó la densidad encontrada en probetas, por lo que se sugiere como trabajo a futuro, trabajar con la densidad encontrada según las dimensiones del panel a utilizar. Como recomendación a corto plazo, es recomendable usar las propiedades físicas del panel sándwich, que fue de  $\rho = 1867,06$  ( $kg/m^3$ ) y de las propiedades mecánicas, el módulo de elasticidad por flexión de 5,71 [Gpa].

Con lo que respecta a las propiedades mecánicas de los paneles sándwich, se confirma que la técnica de impresión de metamateriales como forma de manufactura aditiva de estructuras puede mejorar considerablemente las propiedades mecánicas de la estructura en general.

Finalmente, se logra cumplir con los objetivos planteados al inicio de este trabajo, caracterizando mecánica y físicamente probetas y paneles tipo sándwich impresos con resina Rigid 10k Resin. Se recomienda, para trabajos futuros, trabajar con alguna resina no reforzada con vidrio, para obtener propiedades mecánicas más homogéneas para tracción, compresión y tracción, y en caso de seguir usando la *Rigid 10k Resin*, usar los últimos parámetros reportados para la modelación y optimización de Band gaps.

# Bibliografía

- [1] Schaedler, T. A. y Carter, W. B., “Architected cellular materials, annual review of materialsresearch, vol. 46, pp. 187–210,” 2016.
- [2] Palominos, L. D. Q., “Optimización de band-gap en materiales tipo sándwich,” 2020.
- [3] Narváez, “Hueso esponjoso 200x,” 2004.
- [4] Quinteros, M. . L., “Phononic band gap optimization in truss-like cellular structures using smooth p-norm approximations,” 2021.
- [5] S. J. Yeo, M. J. O. y Yoo, P. J., “Structurally controlled cellular architectures for high performance ultra-lightweight materials,” 2019.
- [6] Galvéz, V., “Desarrollo de modelos en elementos finitos en paneles tipo sandwich con núcleos ultralivianos para predecir band gaps,” 2021.
- [7] S, S., “Sla: Impresión 3d por estereolitografía,” 2017, <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/#!>
- [8] Formlabs, “Impresora formlabs,” 2022, <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3l/>.
- [9] formlabs, “Resinas para ingeniería: Rigid 10k resin,” 2020, <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001479-TDS-ES-0.pdf>.
- [10] Palma, R., “Ensayo de tracción.”
- [11] “Tensile properties.”, <https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Mechanical/Tensile.xhtml>.
- [12] “Microscopía electrónica de barrido.”, <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>.
- [13] Palma, R., “Ordenamiento atómico, energías de enlace y bases físicas del módulo de young,” 2020.