

Optimización del procesamiento y evaluación mecánica de estructuras celulares auxéticas fabricadas por impresión 3D-DLP

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Autores

Gerónimo Huarte¹, Julián Maxit²

1: DNI: 43.184.977, Nro de legajo: 15100, Contacto: geronimohuarte@gmail.com

2: DNI: 42.778.602, Nro de legajo: 15639, Contacto: julianmaxit@gmail.com

Director

Dr. Ing. Federico Rueda

Co-directora

Dra. Ing. Camila Quintana

Universidad Nacional de Mar del Plata
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Materiales

Mar del Plata, diciembre de 2024



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Optimización del procesamiento y evaluación mecánica de estructuras celulares auxéticas fabricadas por impresión 3D-DLP

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Autores

Gerónimo Huarte¹, Julián Maxit²

1: DNI: 43.184.977, Nro de legajo: 15100, Contacto: geronimohuarte@gmail.com

2: DNI: 42.778.602, Nro de legajo: 15639, Contacto: julianmaxit@gmail.com

Director

Dr. Ing. Federico Rueda

Co-directora

Dra. Ing. Camila Quintana

Universidad Nacional de Mar del Plata
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Materiales

Mar del Plata, diciembre de 2024

Agradecimientos

Queremos agradecer al grupo de Ciencia e Ingeniería de Polímeros del INTE-MA por habernos abierto las puertas durante el desarrollo de este trabajo. Especialmente, a nuestros directores, el Dr. Ing. Federico Rueda y la Dra. Ing. Camila Quintana por su apoyo y predisposición.

A nuestras familias, a nuestros padres y hermanas, gracias por su apoyo incondicional y por estar siempre. A nuestros compañeros y amigos, por ayudarnos y acompañarnos en esta etapa.

También, agradecemos a todos los profesores que tuvimos a lo largo de la carrera, por su compromiso al enseñar.

¡Muchísimas gracias a todos y cada uno de ellos!

Índice

Resumen	<u>4</u>
Esquema de trabajo	<u>6</u>
Abreviaciones	<u>7</u>
1 Introducción y objetivos	<u>8</u>
1.1 Estructuras celulares	8
1.1.1 Estructuras auxéticas	10
1.2 Manufactura aditiva en la fabricación de estructuras celulares . . .	12
1.2.1 Método DLP	12
1.2.1.1 Propiedades de las piezas obtenidas por el método DLP . .	14
Objetivos	<u>15</u>
1.3 Objetivos generales	15
1.4 Objetivos específicos	15
2 Determinación de los parámetros de impresión y post- procesamiento	<u>16</u>
2.1 Descripción de los equipos y materiales	16
2.1.1 Impresora	16
2.1.2 Lavadora curadora	17
2.1.3 Resina	18
2.2 Determinación de los parámetros de impresión	18
2.3 Determinación de los parámetros de post-procesamiento	21
2.3.1 Estudio preliminar sobre la variabilidad de las propiedades de la resina	21
2.3.2 Caracterización físico-química de la resina	22
2.3.2.1 Análisis de FTIR	22

2.3.2.2	Modificación de la resina con un iniciador térmico	28
2.3.2.3	Ajuste del Modelo Conversión vs. T_g	31
2.3.2.4	Análisis termogravimétrico (TGA)	33
2.4	Influencia del post-curado UV, el tratamiento térmico y el tiempo en las propiedades mecánicas y grado de conversión	35
2.4.1	Metodología experimental	36
2.4.1.1	Detalles del ensayo de tracción	36
2.4.2	Resultados y discusión	37
2.4.2.1	Propiedades mecánicas en función del tiempo UV y TT	37
2.4.2.2	Grado de curado en función del tiempo UV y TT	40
2.4.2.3	Evolución de las propiedades mecánicas en el tiempo para las distintas condiciones de post-procesamiento	41
3	Generación, fabricación y evaluación mecánica de estructuras celulares	<u>44</u>
3.1	Generación y fabricación de las probetas	44
3.2	Evaluación mecánica de las estructuras celulares	49
3.2.1	Metodología experimental	50
3.2.1.1	Correlación digital de imágenes (DIC)	50
3.2.2	Análisis de resultados	52
4	Ajuste de modelo constitutivo del material y simulación computacional	<u>54</u>
4.1	Determinación de las propiedades mecánicas del material base y ajuste de modelo constitutivo	54
4.1.1	Metodología experimental	54
4.1.2	Análisis de resultados	54
4.1.3	Ajuste de modelo constitutivo	55
4.2	Simulación del ensayo de compresión uniaxial	56
5	Conclusiones	<u>65</u>

Resumen

Las estructuras celulares que presentan una relación de Poisson aparente negativa (RPN) son conocidas como estructuras auxéticas. Estas estructuras tienen la particularidad de expandirse lateralmente cuando se someten a tracción uniaxial y de contraerse lateralmente bajo compresión uniaxial, lo que les confiere propiedades mecánicas sobresalientes, especialmente en términos de absorción de energía, en comparación con las estructuras celulares tradicionales.

Dentro de la amplia gama de posibilidades que ofrece la manufactura aditiva para la fabricación de estructuras celulares a partir de diversos materiales, este trabajo se centra específicamente en el estudio de estructuras auxéticas poliméricas producidas mediante impresión 3D por procesamiento digital de luz (DLP). Para ello, se fabricaron y evaluaron probetas de una estructura celular hexagonal re-entrante auxética y, con fines comparativos, una estructura hexagonal tradicional tipo panal de abeja.

Inicialmente, se llevó a cabo una caracterización físico-química exhaustiva de la resina utilizada, junto con un análisis detallado de la influencia de las variables de procesamiento en las propiedades mecánicas del material. Esto permitió definir un procedimiento de fabricación que garantiza la estabilidad de las propiedades mecánicas de las piezas en el tiempo.

A continuación, se fabricaron las probetas celulares, en las cuales se variaron sistemáticamente dos parámetros geométricos de las celdas unidad: el espesor de pared y la altura. La evaluación y comparación del desempeño mecánico de ambos tipos de estructuras se realizó mediante ensayos de compresión uniaxial, determinándose en cada caso la rigidez y la energía absorbida por unidad de densidad aparente de las probetas ensayadas. Además, se implementó la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) para medir la relación de Poisson aparente de todas las estructuras, relacionando posteriormente este valor con la capacidad de absorción de energía.

También, se realizó una simulación numérica del comportamiento mecánico de las estructuras utilizando el software de elementos finitos Abaqus, con el objetivo de establecer una base para futuras evaluaciones de las estructuras en otros modos de carga, como parte de geometrías más complejas, o con variaciones en los parámetros geométricos de la celda unidad. Para ello, se calibró un modelo constitutivo elastoplástico con endurecimiento por deformación empleando los datos experimentales del material base, como el módulo elástico, la relación de Poisson, y la curva tensión real - deformación plástica.

Los resultados experimentales evidenciaron que, al comparar estructuras de iguales dimensiones, las auxéticas presentan una mayor absorción de energía

por unidad de densidad aparente que las no auxéticas. Asimismo, se observó una relación directa entre la relación de Poisson aparente y la capacidad de absorción de energía, siendo esta última mayor en estructuras con una relación de Poisson aparente cercana a cero.

En cuanto al modelado numérico, para algunas de las estructuras se obtuvo un resultado similar al experimental, mientras que una de ellas no replicó exactamente el resultado experimental. Además, se llevó a cabo una simplificación de la geometría utilizada para la simulación que permitió alcanzar el mismo resultado con un menor consumo de recursos computacionales y en menores tiempos.

Esquema de trabajo

Capítulo 1: Introducción

Se presenta formalmente el tema de estudio y se definen los objetivos del trabajo.

Capítulo 2: Determinación de los parámetros de impresión y post-procesamiento

Se realiza un estudio físico-químico del material base con el que se fabrican las estructuras. Se analizan las variables del proceso de fabricación que afectan a las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas. Se define un procedimiento de fabricación que permite obtener piezas cuyas propiedades mecánicas se mantienen estables en el tiempo.

Capítulo 3: Generación, fabricación y evaluación mecánica de estructuras celulares

Se presentan las estructuras tanto auxéticas como no auxéticas y la variación de sus parámetros de celda unidad.

Se evalúa y analiza el comportamiento mecánico en compresión uniaxial de las distintas estructuras.

Capítulo 4: Ajuste de modelo constitutivo del material y simulación computacional

Se ajusta un modelo constitutivo isotrópico elastoplástico con endurecimiento por deformación del material. Se realizan simulaciones del ensayo de compresión de las probetas. Se realiza un estudio de convergencia de las simulaciones y se simplifica la geometría de simulación. Se analizan comparativamente los resultados obtenidos en el ensayo real y en la simulación.

Capítulo 5: Conclusiones

Se realiza una conclusión general del trabajo.

Abreviaciones

DIC - Correlación Digital por Imágenes

DLP - Procesamiento Digital de Luz

DSC - Calorimetría Diferencial de Barrido

E - Módulo elástico

FTIR - Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

RPN - Relación de Poisson Negativa

SLA - Esteriolitografía

T_g - Temperatura de transición vítrea de un polímero

T_{g0} - Temperatura de transición vítrea de un sistema sin reaccionar

T_{g∞} - Temperatura de transición vítrea de un sistema completamente polimerizado

TGA - Análisis termogravimétrico

TT - Tratamiento térmico

UV - Ultravioleta

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Estructuras celulares

Se denomina estructura celular a un cuerpo compuesto por células o celdas huecas unidas entre sí por paredes sólidas. Estas celdas pueden ubicarse de manera paralela en una matriz bidimensional o bien en forma de red tridimensional. De esta forma, podemos distinguir dos grupos de estructuras celulares. Las estructuras celulares 2D (como los panales) tienen células dispuestas en paralelo en una dirección, mientras que las estructuras celulares 3D (como las espumas) están compuestas por células que se conectan entre sí compartiendo soportes o paredes en todo el espacio que ocupan.

Muchos de los materiales naturales que conocemos, como la madera, el coral, y el hueso están compuestos por estructuras celulares [1]. Las estructuras celulares se destacan por sobre los materiales densos debido a que poseen propiedades mecánicas específicas elevadas. La madera, por ejemplo, se destaca por ser liviana y a la vez presentar una elevada rigidez; las espumas poliméricas presentan características excepcionales en el campo de la absorción de energía; las espumas elastoméricas, se caracterizan por soportar grandes deformaciones y el corcho actúa como un gran aislante del calor, el sonido y la vibración [2].

Debido a su estructura formada por células huecas, estos materiales poseen una elevada porosidad. Esta característica genera que su densidad (densidad aparente) sea mucho menor a la de su material base [3], lo que los vuelve aptos para aplicaciones en las que el peso es una restricción.

De esta forma, los materiales con estructura celular son atractivos para muchas aplicaciones en la ingeniería, por sus propiedades mecánicas, térmicas, acústicas y electromagnéticas. Como consecuencia de esto, son implementados en diversas industrias pero sobre todo en el campo de la absorción de energía y atenuación de cargas.

Dentro de las estructuras celulares bidimensionales se destaca un grupo muy estudiado: las estructuras celulares de panal de abejas o *honeycomb*. En la actualidad, existen diversas estructuras de panal de abejas, las cuales incluyen unidades triangulares, cuadradas, hexagonales y circulares. Algunas de estas estructuras se observan en la figura 1.1.

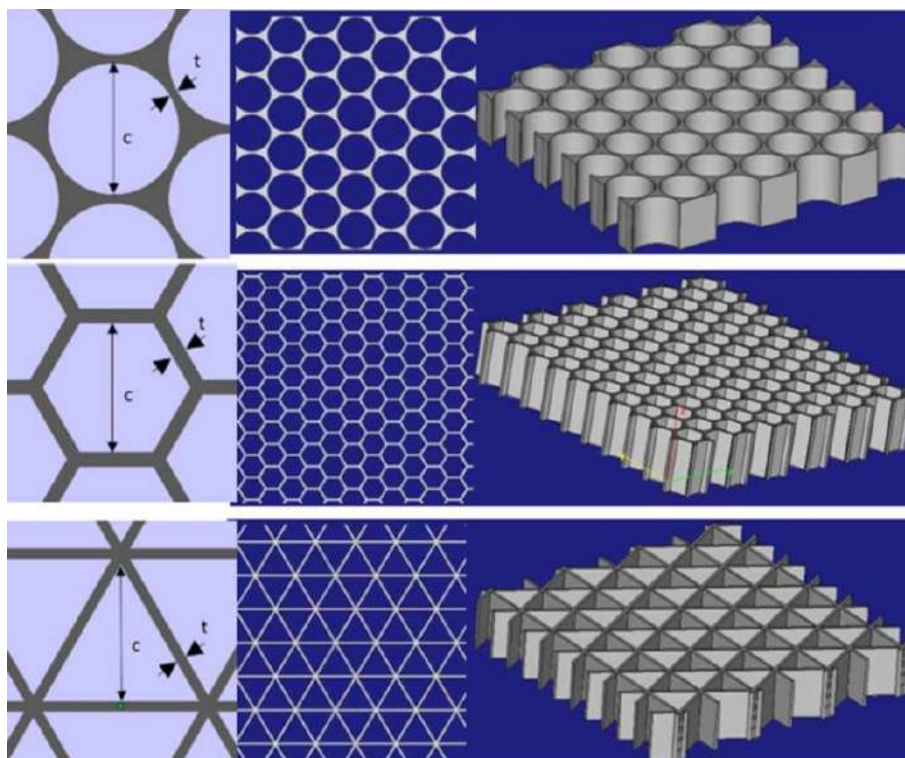


Figura 1.1: Distintos tipos de estructuras celulares de panal de abejas.

Como resultado de su estructura formada por celdas, los paneles poseen propiedades mecánicas muy provechosas para una amplia gama de aplicaciones. Dentro de sus propiedades mecánicas más relevantes, se destacan la resistencia al impacto y la absorción de energía [4, 5]. A su vez, la modificación de las características geométricas del panal, como el tamaño de la celda o de las paredes celulares, conllevan a una alteración de sus propiedades mecánicas.

Si bien su estructura esta basada en los paneles que las abejas construyen, en el año 1914 Höfler y Renyi propusieron la primera patente de aplicación estructural del panal hexagonal, lo que desencadenó un auge de aplicaciones a gran escala. Desde entonces y hasta la actualidad, las estructuras celulares de panal de abejas han sido aplicadas en sectores de lo más variados, como la construcción, la industria aeroespacial, e incluso los vehículos ferroviarios [6].

En las últimas dos décadas, se han investigado las respuestas mecánicas básicas de los materiales de panal bajo diferentes condiciones de carga como compresión y pandeo [7, 8]. Sus propiedades mecánicas han sido investigadas a través de pruebas experimentales, simulaciones numéricas y análisis teóricos. A su vez, se han llevado a cabo optimizaciones que han permitido una mejora considerable de su rendimiento [9].

En los últimos años, el rápido desarrollo de diversas técnicas de manufactura aditiva ha abierto la puerta a la fabricación de panales con topologías y geometrías complejas, que no pueden obtenerse por métodos de fabricación tradicionales. Consecuentemente, estos avances han promovido la investigación experimental para estudiar en profundidad el comportamiento de cada tipo de panal [10].

En cuanto a su comportamiento mecánico, las estructuras celulares pueden

subclasificarse en dos grupos: las tradicionales y las auxéticas. Las estructuras celulares tradicionales presentan un comportamiento mecánico convencional, es decir, al ser sometidas a compresión uniaxial se expanden lateralmente y al ser sometidas a esfuerzos de tracción uniaxial se contraen lateralmente.

Por su parte, las estructuras celulares auxéticas poseen un comportamiento mecánico particular, que a continuación desarrollaremos.

1.1.1 Estructuras auxéticas

Las estructuras auxéticas son un tipo de estructuras celulares particulares que se caracterizan por presentar relación de Poisson aparente negativa (RPN). La relación de Poisson (ν) es una constante elástica que describe el vínculo entre la deformación transversal y axial que experimenta un material al ser sometido a tensiones. Su ecuación se define a continuación:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{transversal}}}{\varepsilon_{\text{axial}}} \quad (1.1)$$

De este modo, la RPN característica de las estructuras auxéticas indica que al aplicar compresión uniaxial, la estructura también se estrechará en la dirección transversal. De la misma forma, al aplicar tracción uniaxial en una estructura auxética, se expandirá en dirección transversal al esfuerzo aplicado. Este comportamiento es opuesto al que exhiben las estructuras celulares tradicionales, que presentan contracción transversal al ser sometidas a esfuerzos de tracción uniaxial y se expanden lateralmente al ser sometidas a compresión uniaxial. En la figura 1.2, se realiza una comparación entre el comportamiento de una estructura auxética y el de un material convencional.

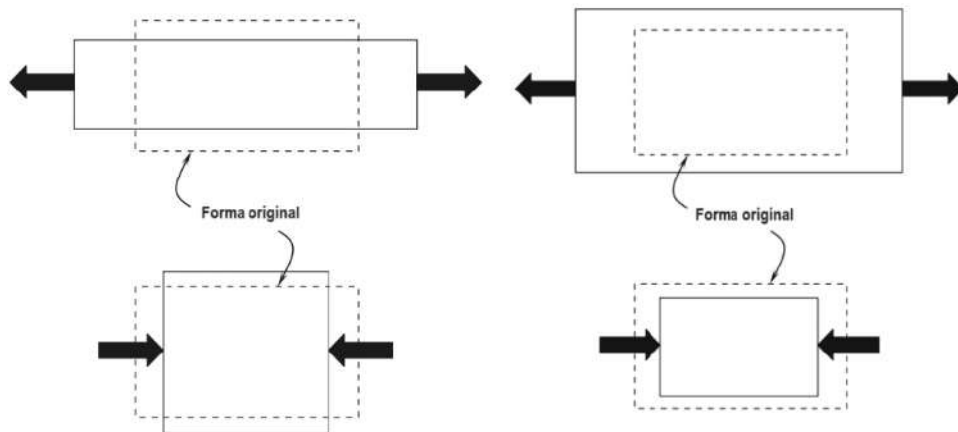


Figura 1.2: Comportamiento de un material no auxético (izquierda) y uno auxético (derecha).

Como fue mencionado, el comportamiento mecánico de las estructuras celulares no sólo es dependiente del material base del que esta construida la estructura sino también de la forma, tamaño y disposición de sus celdas. Entonces, la relación de Poisson que se obtiene de un ensayo mecánico de una estructura celular se denomina relación de Poisson aparente. Esta denominación indica que no se trata de una propiedad intrínseca del material base sino de una propiedad de la estructura. La relación de Poisson aparente hace

referencia entonces al comportamiento macroscópico de la estructura celular. De esta forma, una estructura celular puede exhibir comportamiento auxético a pesar de ser fabricada a partir de un material convencional.

En lo que respecta a su desarrollo histórico, las estructuras con RPN han sido estudiadas desde su descubrimiento en 1848 y finalmente el término “auxetic” fue introducido por Evans en 1991 [11].

En la actualidad existen diversos tipos de estructuras que exhiben comportamiento auxético, entre los cuales se destacan las estructuras re-entrantes, formadas por ángulos internos “entrantes” y las estructuras quirales, compuestas por nodos circulares donde confluyen las paredes rectas. Algunas de las estructuras auxéticas típicas se observan en la figura 1.3.

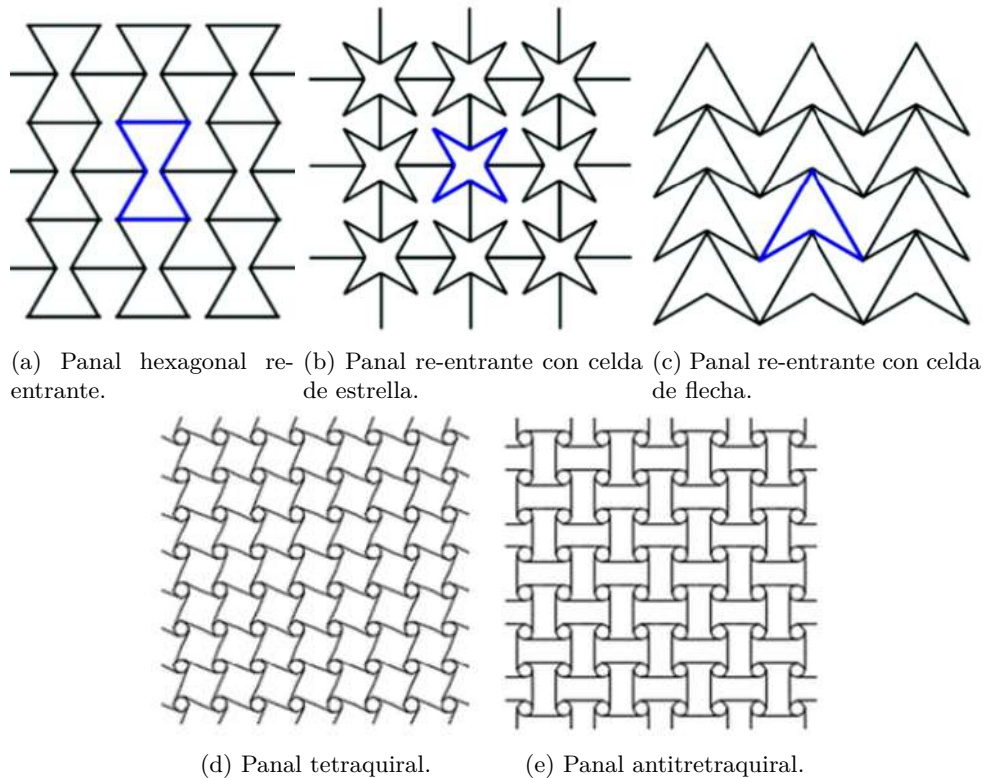


Figura 1.3: Ejemplos de estructuras auxéticas.

Como resultado de su RPN, las estructuras auxéticas presentan propiedades mecánicas únicas. En comparación a los materiales tradicionales, presentan un mayor módulo de corte, mayor resistencia a la indentación, mayor tenacidad a la fractura y mayor absorción de energía. Producto de sus características distintivas, son utilizadas en variadas aplicaciones, como núcleos para paneles sándwich, filtros inteligentes, absorbentes mecánicos, absorbentes de sonido, aplicaciones magnéticas e industrias médicas.

El comportamiento auxético, genera que la estructura posea una elevada absorción de energía. Esto se debe a que, al aplicar un esfuerzo compresivo uniaxial la estructura se contrae lateralmente, lo que genera que la pieza se densifique y se vuelva compacta, favoreciendo la absorción de energía. El mismo comportamiento tiene lugar cuando una estructura auxética se somete a cargas de impacto [12]. Este comportamiento se observa en la figura 1.4.

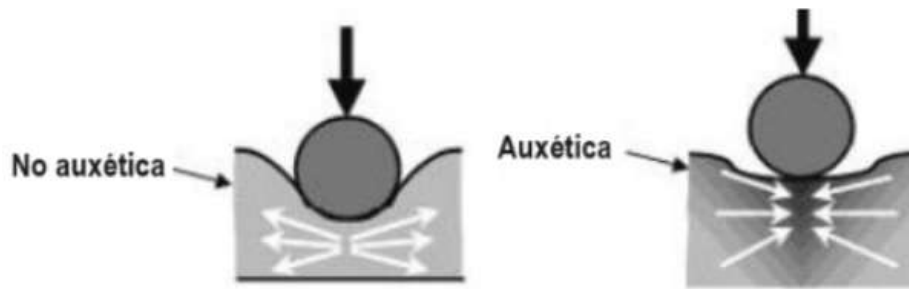


Figura 1.4: Comportamiento frente al impacto.

Por estas cualidades mencionadas, al realizar una evaluación mecánica comparativa entre una estructura celular auxética y una tradicional, es esperable que la primera muestre un desempeño superior en términos de absorción de energía.

1.2 Manufactura aditiva en la fabricación de estructuras celulares

La manufactura aditiva presenta un gran potencial para la fabricación de estructuras celulares, por su capacidad para obtener piezas de geometrías complejas, lo cual es una restricción en muchos de los métodos tradicionales.

En diferentes investigaciones, se han utilizado distintas técnicas de manufactura aditiva para la fabricación de estructuras auxéticas. Se han implementado técnicas como *Selective Laser Melting* (SLM) para fabricar piezas auxéticas a partir de polvos metálicos y aleaciones [13] o *Selective Laser Sintering* (SLS) para piezas cerámicas. Para producir estructuras auxéticas poliméricas, se han utilizado técnicas como *Fused Deposition Modeling* (FDM) en la que se utilizan polímeros termoplásticos [14] y otras como la *estereolitografía* (SLA) que usa un láser para fotopolimerizar una resina [15].

En el presente trabajo, se explora el potencial de fabricación de estructuras auxéticas mediante impresión 3D por procesamiento digital de luz (DLP), que es una variante del método SLA.

Fundamentalmente, se lleva a cabo la puesta a punto de la técnica de manufactura y se investiga en profundidad la relación entre los parámetros de post-procesamiento con las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas. El objetivo central de la puesta a punto es establecer un procedimiento de manufactura que permita obtener estructuras con propiedades mecánicas estables en el tiempo.

1.2.1 Método DLP

La tecnología de impresión 3D-DLP es un proceso en el que se utiliza luz para foto-polimerizar una resina líquida. Mediante la adición sucesiva de capas de resina, se obtiene una pieza tridimensional. Respecto a otras técnicas de manufactura aditiva, el método DLP se destaca por su excelente resolución, lo cual permite obtener piezas con buena terminación y buen acabado superficial.

El equipo de impresión DLP en la mayoría de los casos consta de una placa metálica, denominada plataforma o placa de impresión, que se desplaza en un eje vertical formado por una rosca de alta precisión. Por debajo de la plataforma se encuentra una batea que posee fondo transparente, donde se coloca la resina líquida. Debajo de la batea se ubica la pantalla por medio de la cual se proyecta la luz. Inicialmente la plataforma desciende, se sumerge en la batea llena de resina y se ubica a una distancia del fondo que puede ser ajustada, luego la pantalla proyecta la luz y produce que la pequeña capa de resina que se encuentra entre el fondo de la batea y la plataforma cure y quede adherida a la placa. Posteriormente, la plataforma asciende, permitiendo que la resina líquida vuelva a ubicarse por debajo de ella, y se repite el proceso. De esta forma, cada capa se adhiere a la anterior y se obtiene una pieza tridimensional [16]. Para generar el archivo de impresión, la geometría es digitalizada y dividida en capas mediante un software denominado “laminador”. El esquema típico puede observarse en la figura 1.5.



Figura 1.5: Esquema de impresora DLP *bottom-up*.

Las impresoras DLP comerciales, como la que se utilizará en el presente trabajo, poseen ciertos parámetros que pueden ser ajustados por el usuario. La correcta selección de estos parámetros permitirá obtener piezas libres de defectos, como burbujas o mala adhesión entre capas, y con buen acabado superficial.

Los parámetros típicos son:

- Exposición inicial
- Tiempo de exposición
- Altura ascendente
- Velocidad del motor

- Número de capas de exposición inferior

Una vez finalizado el proceso de impresión, las piezas deben limpiarse para eliminar restos de resina no polimerizada. Además, se someten a un proceso de post-curado UV, donde el objeto es iluminado con luz ultravioleta dentro de una cabina para completar el proceso de polimerización. Para llevar a cabo los procesos de lavado y post-curado, comúnmente se utiliza una cabina lavadora-curadora.

1.2.1.1 Propiedades de las piezas obtenidas por el método DLP

Como se mencionó anteriormente, en el método DLP se utilizan resinas fotocurables, que pertenecen a la familia de los polímeros termorrígidos. Habitualmente, esta técnica de impresión se utiliza para fabricar piezas decorativas. Por lo tanto, no se suele evaluar el grado de curado alcanzado en las piezas, pues no son diseñadas para soportar esfuerzos mecánicos y es suficiente con que el polímero se encuentre en estado sólido y no se deforme por su propio peso.

Sin embargo, cuando se busca que las piezas fabricadas cumplan una función estructural y sobre todo cuando se busca caracterizar el comportamiento de las piezas a través técnicas de la mecánica experimental, es necesario que el polímero haya alcanzado un grado de conversión que garantice propiedades mecánicas estables en el tiempo.

Si bien es común someter a las piezas a un proceso de post-curado UV luego de la impresión, con el objetivo de reanudar y continuar con el proceso de polimerización, es posible que dependiendo de la resina utilizada, no pueda alcanzarse un curado completo solo con el uso de luz. En esos casos, una alternativa para alcanzar un grado de curado mayor, es utilizar adicionalmente una fuente de calor. En estudios previos, se ha comprobado que las resinas alcanzan mayores grados de conversión cuando se utiliza adicionalmente un tratamiento térmico [17]. Esto significa que, si la resina todavía contiene radicales pendientes de reaccionar, al aplicar una fuente de calor la reacción de curado puede continuar gracias a la movilidad que genera el incremento de temperatura. De esta manera, la combinación de luz UV seguida de un tratamiento térmico permite obtener reacciones con un mayor grado de conversión [18].

En este trabajo se estudió la influencia del post-procesamiento, tanto UV como térmico, en las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas. Fundamentalmente, se orientó el estudio a la búsqueda de un procedimiento de fabricación que permita obtener piezas con propiedades mecánicas estables en el tiempo.

Objetivos

1.3 Objetivos generales

En primer lugar, poner a punto la técnica de manufactura de impresión DLP para obtener piezas con propiedades mecánicas estables y reproducibles en el tiempo. Además, investigar el comportamiento mecánico de estructuras celulares auxéticas producidas por impresión 3D - DLP sometidas a compresión uniaxial.

1.4 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Estudiar la influencia del post-procesamiento en las propiedades mecánicas de las piezas.
- Caracterizar el comportamiento auxético de las estructuras mediante técnicas de la mecánica experimental.
- Analizar comparativamente las propiedades mecánicas de las estructuras tradicionales y las auxéticas, como asimismo, investigar la influencia de las características geométricas de las estructuras en su capacidad de absorción de energía.
- Realizar simulaciones numéricas del ensayo de compresión uniaxial de las estructuras auxéticas utilizando el software de elementos finitos Abaqus, con el fin de establecer una base para futuras evaluaciones de las estructuras.

Capítulo 2

Determinación de los parámetros de impresión y post-procesamiento

En este capítulo se describen las etapas para ajustar los parámetros de impresión y realizar el post-procesamiento de piezas obtenidas por DLP, asegurando propiedades mecánicas estables y reproducibles en el tiempo.

En la fase inicial, se determinaron los parámetros de la impresora para garantizar que las piezas fabricadas no presenten defectos como burbujas, alabeos, mala adhesión entre las capas o deficiencias en la calidad superficial. El proceso de ajuste de estos parámetros se realizó utilizando geometrías de calibración, las cuales permitieron identificar el conjunto de variables más relevantes para optimizar la impresión.

El siguiente paso fue evaluar el post-procesamiento, un proceso que se realiza en una lavadora curadora utilizando exposición a luz UV y, en algunos casos, tratamiento térmico posterior. En esta etapa se realizó un análisis físico-químico exhaustivo del material base ya que se observó que sus propiedades mecánicas variaban en función de dos factores: el tiempo de exposición UV en la cámara y el tiempo transcurrido entre dicho post-curado y el ensayo.

Por lo anteriormente mencionado, se realizaron análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), para determinar la identidad química de la resina, el grado de conversión alcanzable bajo luz UV y los tiempos necesarios para estabilizar dicho grado de curado.

A partir de los resultados del FTIR, se evaluaron distintas condiciones reales de exposición UV y tratamiento térmico, buscando estabilizar las propiedades mecánicas en el tiempo.

2.1 Descripción de los equipos y materiales

2.1.1 Impresora

La impresora empleada corresponde al modelo Halot Sky de la marca Creativity (ver figura 2.1). Este equipo ofrece una precisión en la altura de capa que varía entre 0,01 y 0,05 mm, cuenta con una resolución 4K (3840 x 2400 píxeles) y utiliza proyección de luz monocromática de 405 nm con una intensidad de $4000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Su volumen máximo de impresión es de 192 x 120 x 200 mm.

El principio de funcionamiento de esta impresora fue descrito previamente en la introducción, siendo los parámetros básicos:

- **Exposición inicial:** Es el tiempo que la primera capa de la impresión está expuesta a la luz UV. Este tiempo suele ser más largo para asegurar que la primera capa se adhiera correctamente a la plataforma de construcción.
- **Tiempo de exposición:** Es el tiempo que cada capa posterior (después de la inicial) está expuesta a la luz UV. Este tiempo debe ser lo suficientemente largo para que la resina se cure adecuadamente y forme una capa sólida, pero no demasiado largo para evitar problemas como sobreexposición o pérdida de detalle.
- **Altura ascendente:** Es la distancia que se eleva la plataforma entre capas. Una altura adecuada permite que la resina fluya nuevamente en la base de impresión antes de exponer la siguiente capa. Este parámetro puede afectar la suavidad del proceso de impresión.
- **Número de capas de exposición inferior:** Especifica cuántas capas iniciales tendrán un tiempo de exposición más largo. Estas capas adicionales reforzadas ayudan a garantizar una adhesión sólida entre la impresión y la plataforma, especialmente para piezas más grandes o complejas.
- **Velocidad del motor:** Controla la velocidad a la que la plataforma se eleva y desciende entre capas. Una velocidad más baja puede reducir tensiones en la impresión y mejorar la calidad, mientras que una velocidad alta puede acelerar el proceso pero con mayor riesgo de fallos.



Figura 2.1: Impresora Creality Halor Sky

2.1.2 Lavadora curadora

Se utilizó una lavadora curadora también de la marca Creality, modelo UW-02 (ver figura 2.2). Este equipo se utiliza tanto para el proceso de lavado, como para el post-curado adicional una vez que las piezas salen de la impresora.



Figura 2.2: Lavadora curadora Creality UW-02

En el modo de lavado, la pieza se coloca dentro de una canasta metálica que está sumergida en alcohol isopropílico. El equipo posee una hélice que produce un flujo del líquido para eliminar la resina no polimerizada.

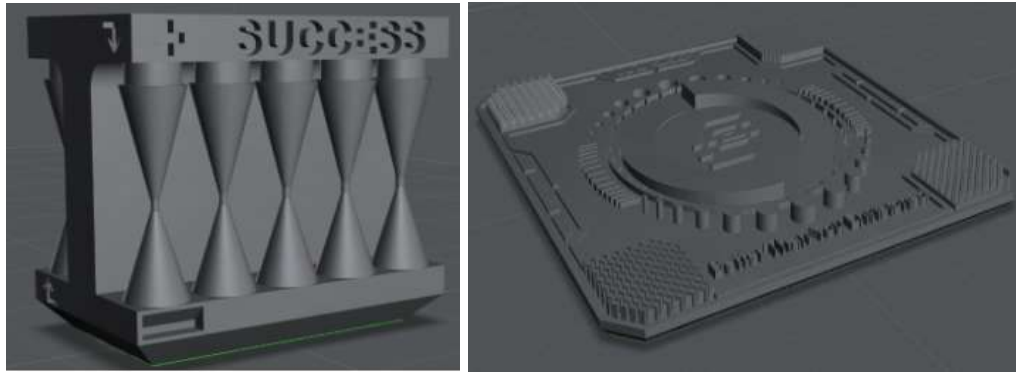
En el modo de curado, la pieza se coloca sobre una plataforma giratoria y es iluminada por medio de una pequeña torre de luz UV de forma homogénea. A diferencia de otras lavadoras curadoras comerciales, en este equipo, el único parámetro que se puede ajustar es el tiempo de exposición UV, es decir, que no se puede realizar un termocurado simultáneo.

2.1.3 Resina

La resina empleada es la estándar Creality Plus. Los detalles de la composición química de la misma no son proporcionados por el fabricante. Respecto a sus parámetros específicos de impresión y post-curado, sólo se hallan recomendaciones genéricas y orientadas a la fabricación de piezas decorativas.

2.2 Determinación de los parámetros de impresión

Con el fin de encontrar el conjunto de parámetros óptimos para esta impresora y resina en particular, existen las geometrías de calibración. Estas pueden observarse en las figuras 2.3a y 2.3b. Se eligió geometría en forma de placa con el fin de reducir los tiempos de impresión.



(a) Conos de calibración.

(b) Placa de calibración.

Figura 2.3: Geometrías de calibración.

El objetivo de imprimir estas geometrías fue obtener detalles que sólo se logran cuando los parámetros de impresión son los correctos. Respecto a los parámetros seleccionados, los valores para la exposición inicial y el número de capas de exposición inferior fueron fijados en 15 segundos y dos capas, respectivamente, mientras que el espesor de capa se mantuvo en 0.05 mm. En cuanto al tiempo de exposición de las capas, se analizaron cuatro variantes: 1.7, 2, 2.3 y 2.5 segundos.

Los parámetros de altura ascendente y velocidad del motor se ajustaron con valores suficientemente altos y bajos, respectivamente, para permitir un flujo adecuado de la resina debajo de la pieza en proceso. Si se selecciona una altura demasiado pequeña o una velocidad demasiado alta, es posible que la resina no fluya correctamente, lo que puede resultar en capas incompletas. Además, una velocidad demasiado alta podría generar un esfuerzo excesivo al despegar la pieza de la batea, lo que podría dañarla. En este caso, se utilizaron 8 milímetros de altura ascendente y una velocidad de 8 milímetros por segundo.

Los resultados de las placas de calibración fabricadas se observan en la figura 2.4.

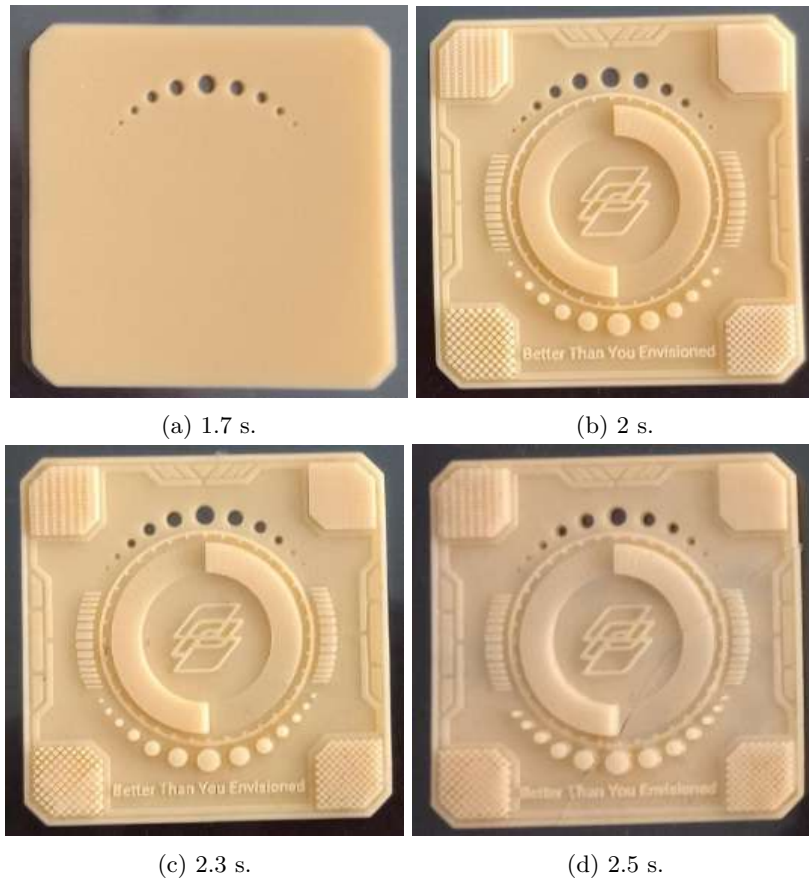


Figura 2.4: Placas de calibración con diferentes tiempos de exposición por capa (en segundos).

Como puede observarse en la figura 2.4, las placas que fueron expuestas con 2.5, 2.3 y 2 segundos por capa resultaron exitosas, sin embargo, la placa obtenida con 2 segundos de exposición presentó un mayor nivel de detalle.

Por otro lado, la placa expuesta con 1.7 segundos por capa no resultó satisfactoria. Aunque la base fue impresa, las capas superiores no adquirieron la rigidez necesaria para despegarse de la batea y adherirse a la cama de impresión. Como consecuencia, la impresión se quedó adherida al film de la batea y fue removida durante la limpieza de la impresora.

Si bien se determinó que un tiempo de exposición de 2 segundos es suficiente, se tomó un criterio conservador y se optó por utilizar un tiempo de 2,5 para asegurar la obtención de la pieza.

Los parámetros definidos para la impresión fueron:

- Exposición inicial: 15 segundos
- Tiempo de exposición: 2.5 segundos
- Altura ascendente: 8 milímetros
- Velocidad del motor: 8 milímetros/segundo
- Número de capas de exposición inferior: 2 capas

2.3 Determinación de los parámetros de post-procesamiento

2.3.1 Estudio preliminar sobre la variabilidad de las propiedades de la resina

A diferencia de los parámetros de impresión, cuyo ajuste puede realizarse basándose en recomendaciones de usuarios o fabricantes de resinas para piezas decorativas, el ajuste de los parámetros de post-procesamiento para piezas sometidas a esfuerzos mecánicos en la técnica DLP es una tarea más compleja. Durante esta etapa, se define el grado de curado final alcanzado por las piezas, lo cual resulta determinante para sus propiedades mecánicas.

Inicialmente, se asumió un tiempo de post-curado de 10 minutos, pues el fabricante menciona que un tiempo de 6 minutos debería ser suficiente, dependiendo de factores como el tamaño, el color y la densidad de la resina [19]. Sin embargo, se observó que las piezas impresas seguían despidiendo un olor considerable después del post-curado. Esto sugirió que no se había alcanzado un curado completo o estable. Para comprobar esta hipótesis, se imprimieron probetas de tracción, las cuales fueron post-curadas variando el tiempo de 10 a 40 minutos de exposición por lado progresivamente, y se ensayaron mecánicamente. Los resultados mostraron que no existía un tiempo específico en el que las propiedades se estabilizaran, sino que estas continuaban evolucionando con el tiempo de post-curado (ver figura 2.5).

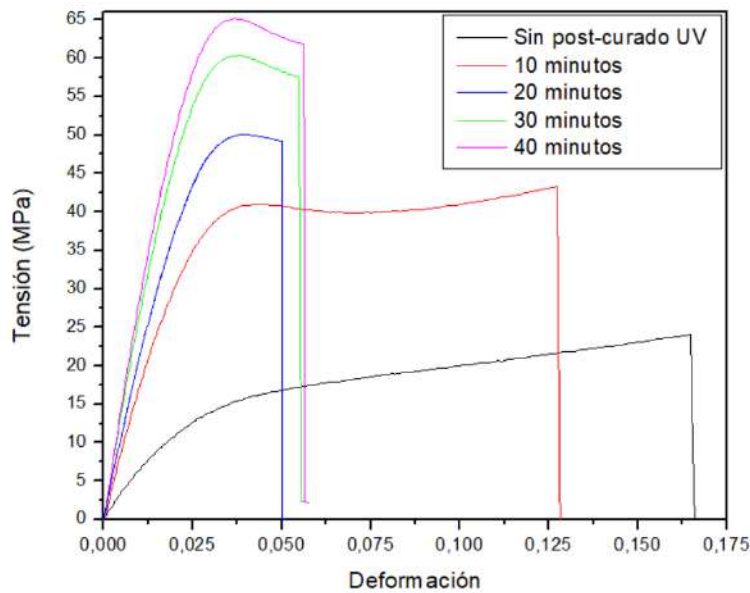


Figura 2.5: Curvas tensión-deformación para distintos tiempos de post-curado UV

La tensión y la deformación, ambas ingenieriles, se calcularon según las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$\sigma_{\text{ing}} = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{\text{ing}} = \frac{L}{L_0} \quad (2.2)$$

Siendo:

- “F” la fuerza instantánea
- “A” el área inicial
- “L” la longitud instantánea
- “L₀” La longitud inicial

En esta instancia, se plantearon los siguientes interrogantes: ¿se alcanza un grado de curado máximo bajo las condiciones utilizadas? o en todo caso ¿existe un tiempo de exposición UV en el que el curado se estabiliza?. Para responder a los mismos se procedió al estudio que se detalla a continuación.

2.3.2 Caracterización físico-química de la resina

2.3.2.1 Análisis de FTIR

Introducción a la técnica FTIR

La técnica FTIR permite identificar la composición química del material y estudiar los cambios en los enlaces moleculares durante el proceso de curado. El principio de FTIR se basa en las vibraciones de los átomos de una molécula al ser irradiados con luz infrarroja, lo que genera señales específicas que corresponden a la energía absorbida por los enlaces moleculares. Estas vibraciones incluyen estiramientos y flexiones que dependen de la estructura química de la muestra [20].

Modos de operación de FTIR

Existen dos modos principales de operación en FTIR:

1. Reflectancia Total Atenuada (ATR):

En este modo, la muestra se coloca en contacto con un cristal de alta refracción. La luz infrarroja se refleja internamente en el cristal y genera una onda evanescente que interactúa con la muestra, produciendo el espectro infrarrojo. Es ideal para materiales opacos como plásticos o sólidos gruesos, pero presenta menor sensibilidad y mayor ruido en comparación con otros métodos [21].

2. Transmisión:

En este modo, el haz infrarrojo pasa a través de la muestra, y el espectrofotómetro mide la cantidad de luz absorbida en cada longitud de onda. Este método es más sensible, pero requiere muestras delgadas y semi-transparentes. Si la muestra es opaca o gruesa, el análisis no es posible [21].

Metodología experimental

Aunque la resina líquida contiene pigmento, se comprobó que utilizando una capa suficientemente delgada es posible emplear el método de transmisión sin interferencias significativas. Luego, se procedió con el ensayo en este modo. El equipo utilizado es el espectrofotómetro Nicolet 6700. La Figura 2.6 muestra el equipo y las configuraciones usadas.



(a) Arreglo para evaluar fotocurado.



(b) Arreglo para evaluar termocurado.

Figura 2.6: Distintas disposiciones para el ensayo FTIR.

Parámetros del ensayo:

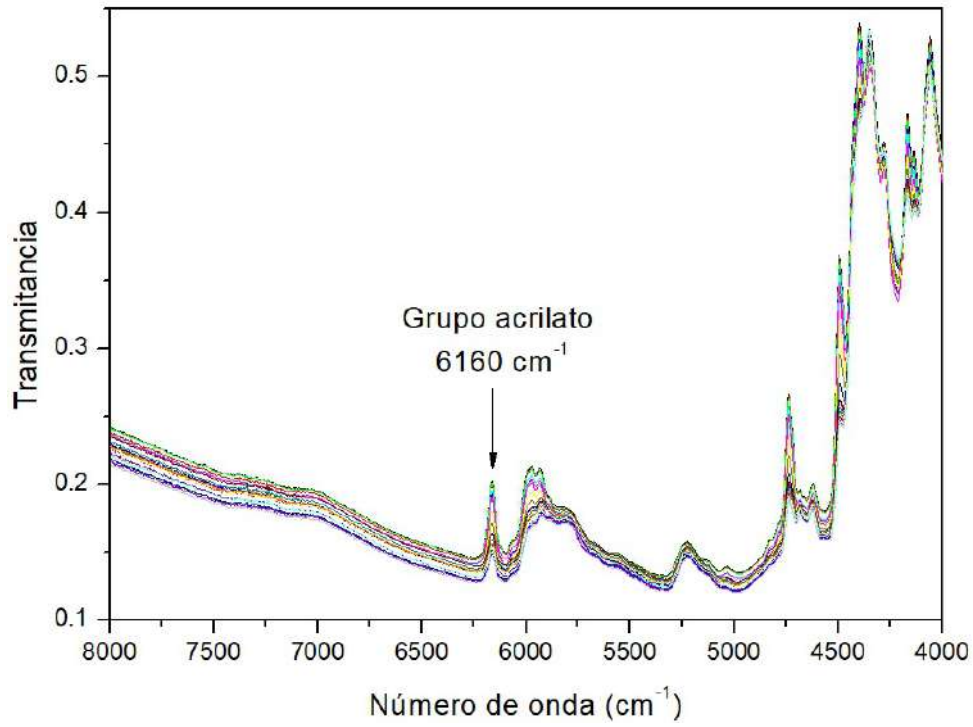
- Barrido de número de onda: 4000-8000 cm^{-1}
- Resolución: 4 cm^{-1}
- Número de barridas por corrida: 32
- Tiempo de espera entre *background*: 600 min
- Número de capas de exposición inferior: 2 capas

Preparación y ejecución del ensayo:

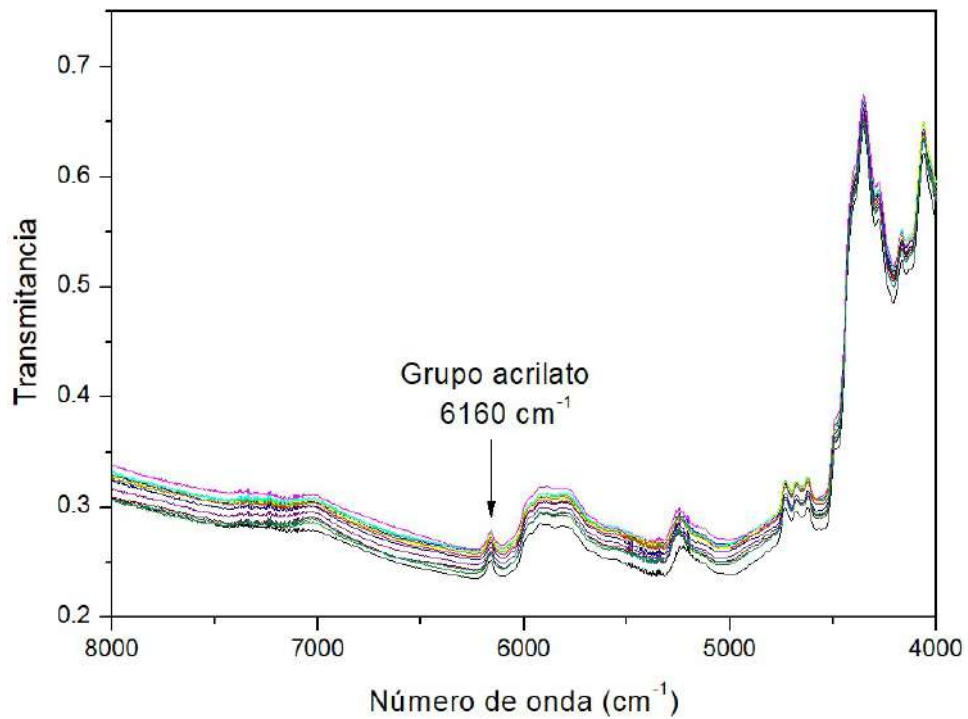
1. Línea base: Se realizó un barrido inicial con el vidrio del porta-muestras para obtener la línea base o calibración (background).
2. Preparación de la muestra: La resina se colocó en un molde de film de 0.6 mm de grosor con un agujero circular de 2 cm de diámetro, sellado con vidrios para evitar derrames.
3. Fotocurado: Se irradió la muestra con luz LED (125 mA) durante intervalos de 60 segundos, con un total de 20 minutos de exposición. Se realizaron corridas FTIR después de cada intervalo para registrar los espectros de transmitancia.
4. Termocurado: Posteriormente, la muestra se colocó en una estufa a 120 °C durante 20 minutos para evaluar el efecto térmico en la conversión.

Análisis de resultados

Luego de realizados los ensayos de FTIR en modo transmisión, se obtuvieron los espectros de transmitancia correspondientes, como puede observarse en la figura 2.7a y figura 2.7b. Cada curva corresponde a una corrida del ensayo, pudiéndose observar claramente la variación a nivel general de algunos picos.



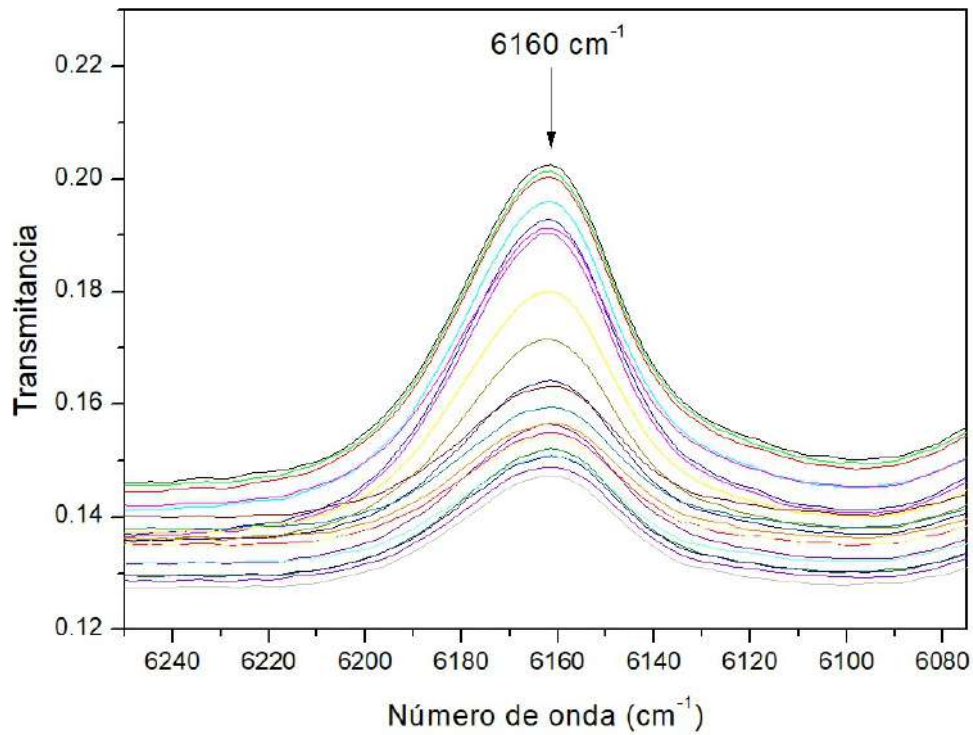
(a) Espectro de FTIR obtenido durante el fotocurado.



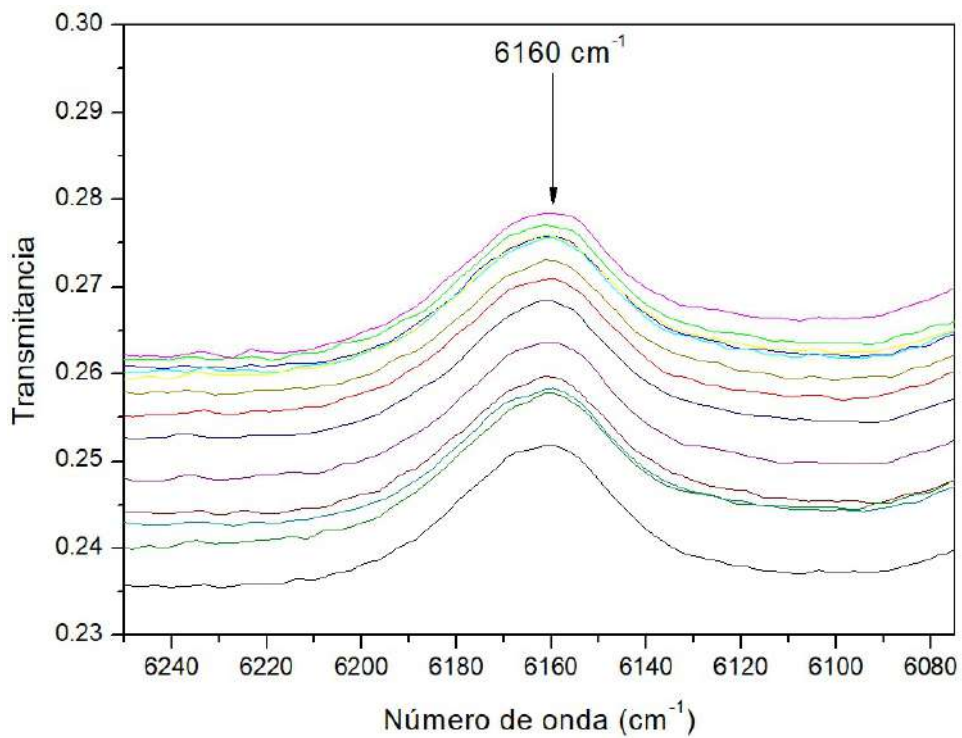
(b) Espectro de FTIR obtenido durante el termocurado.

Figura 2.7: Espectros FTIR en modo transmisión.

Para mayor claridad, se realizaron gráficos con el pico acrilato aislado para poder ver en detalle su evolución. Estos pueden observarse en la figura 2.8a y 2.8b.



(a) Espectro de FTIR obtenido durante el fotocurado.



(b) Espectro de FTIR obtenido durante el termocurado.

Figura 2.8: Evolución del pico acrilato (6160 cm^{-1}) en los ensayos FTIR.

Los espectros obtenidos reflejan cambios en picos específicos, como el ubicado en 6160 cm^{-1} , correspondiente al grupo acrilato. Este pico se utilizó para

calcular la conversión de la resina mediante la ecuación:

$$\alpha = 1 - \frac{H_i}{H_0} \quad (2.3)$$

Donde:

- α el grado de conversión entre cero y uno
- H_i la altura del pico acrilato a cada momento
- H_0 la altura inicial del pico acrilato

El gráfico de conversión muestra un comportamiento sigmoideal típico de cinéticas de polimerización por radicales libres (ver figura 2.9). Inicialmente, la reacción avanzó lentamente, seguida de un crecimiento exponencial a los 5 minutos de exposición UV y una fase final asintótica donde la conversión se estabilizó.

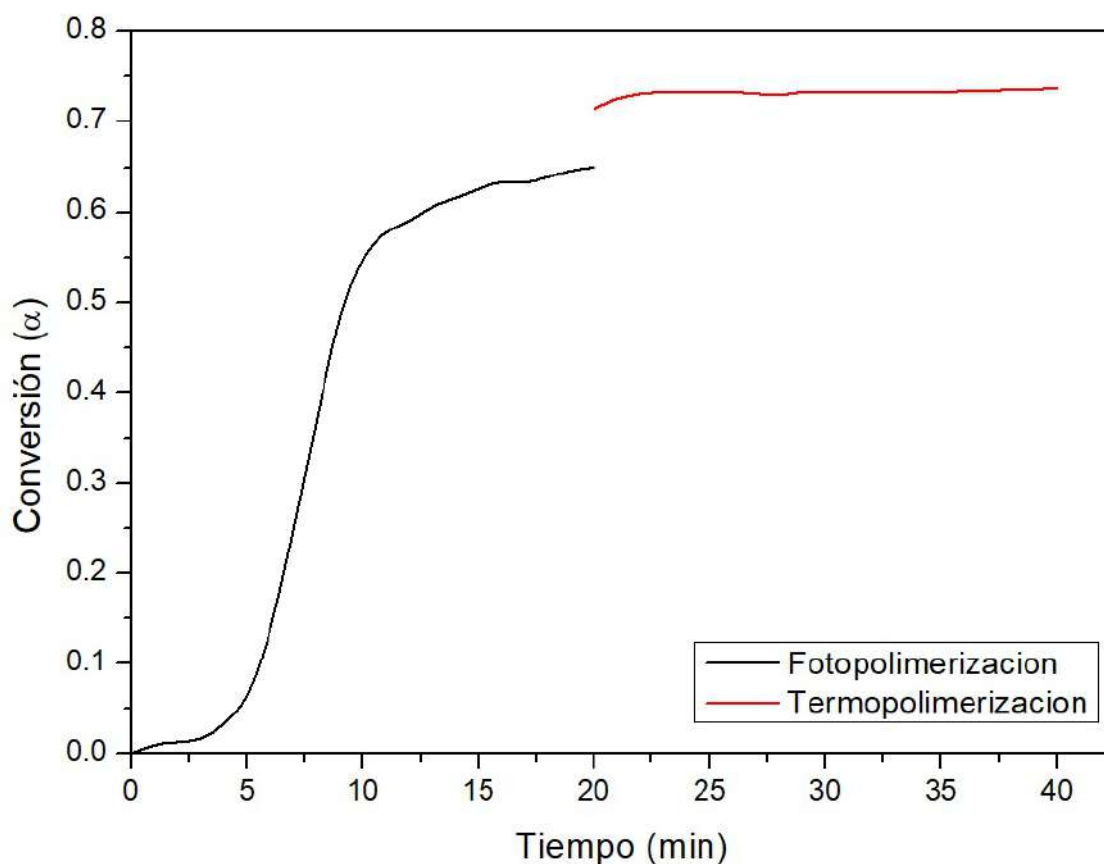


Figura 2.9: Conversión de la muestra irradiada con UV y posteriormente termocurada

Resultados del fotocurado:

- Conversión máxima alcanzada con UV: 65 %
- Limitaciones: La reacción se ralentiza debido al agotamiento de radicales libres y al aumento en la viscosidad de la resina.

Resultado del termocurado:

- Incremento adicional en la conversión: 8 % (alcanzando un 73 % total).

Una posible explicación de este resultado es que el calor aumenta la movilidad de las cadenas poliméricas, permitiendo un incremento en la conversión de la reacción. De esta manera, el termocurado mostró ser una estrategia efectiva para aumentar la conversión en resinas parcialmente curadas por UV.

2.3.2.2 Modificación de la resina con un iniciador térmico

Con el objetivo de determinar el grado de curado máximo alcanzable por esta resina, se modificó la formulación utilizando peróxido de benzoílo (PBO) como iniciador térmico. El mencionado compuesto, genera radicales a una temperatura aproximada de 60 °C. Se añadió a la resina en una proporción del 2 % en peso. Luego del termocurado realizado en una estufa, la muestra se sometió a un análisis de FTIR. La obtención del valor de conversión es importante para prever la evolución de la reacción bajo distintas condiciones, como se explicará luego.

A continuación, se describe el procedimiento para preparar esta mezcla.

Metodología experimental

Preparación de la mezcla:

- Se taró una balanza analítica con un vial limpio que serviría como contenedor de la mezcla.
- Dentro del vial tarado, se pesaron 0.0200 g de peróxido de benzoílo (PBO) en forma de polvo.
- Con una pipeta desechable, se añadió cuidadosamente 0.9937 g de resina al vial.

Mezclado:

- Fuera de la balanza, la mezcla se agitó con una varilla de vidrio durante aproximadamente 5 minutos, hasta que no quedaran restos sólidos visibles.
- Durante el mezclado, se aplicó calor con la mano al frasco para facilitar la disolución del iniciador térmico en la resina.
- Con una pipeta desechable, se añadió cuidadosamente 0.9937 g de resina al vial.

Preparación de la muestra:

- Se colocó una goma con un orificio circular (de aproximadamente 2 cm de diámetro y 1 mm de altura) sobre un portaobjetos de vidrio para contener la resina.
- La resina preparada se vertió dentro del orificio de la goma, llenándolo hasta formar un ligero menisco hacia arriba.

- Se colocó otro portaobjetos de vidrio sobre la goma, cuidando de no dejar burbujas de aire atrapadas, y se aseguró la estructura con un gancho en cada lado, ver figura 2.10.



Figura 2.10: Muestra para termo-curado de resina modificada con PBO.

Curado térmico:

- La muestra preparada se llevó a una estufa Memmert UFE-550 y se sometió a una temperatura de 120 °C durante 3 horas y 20 minutos.

Análisis de resultados

En la figura 2.11 se muestran los resultados del ensayo de FTIR correspondiente.

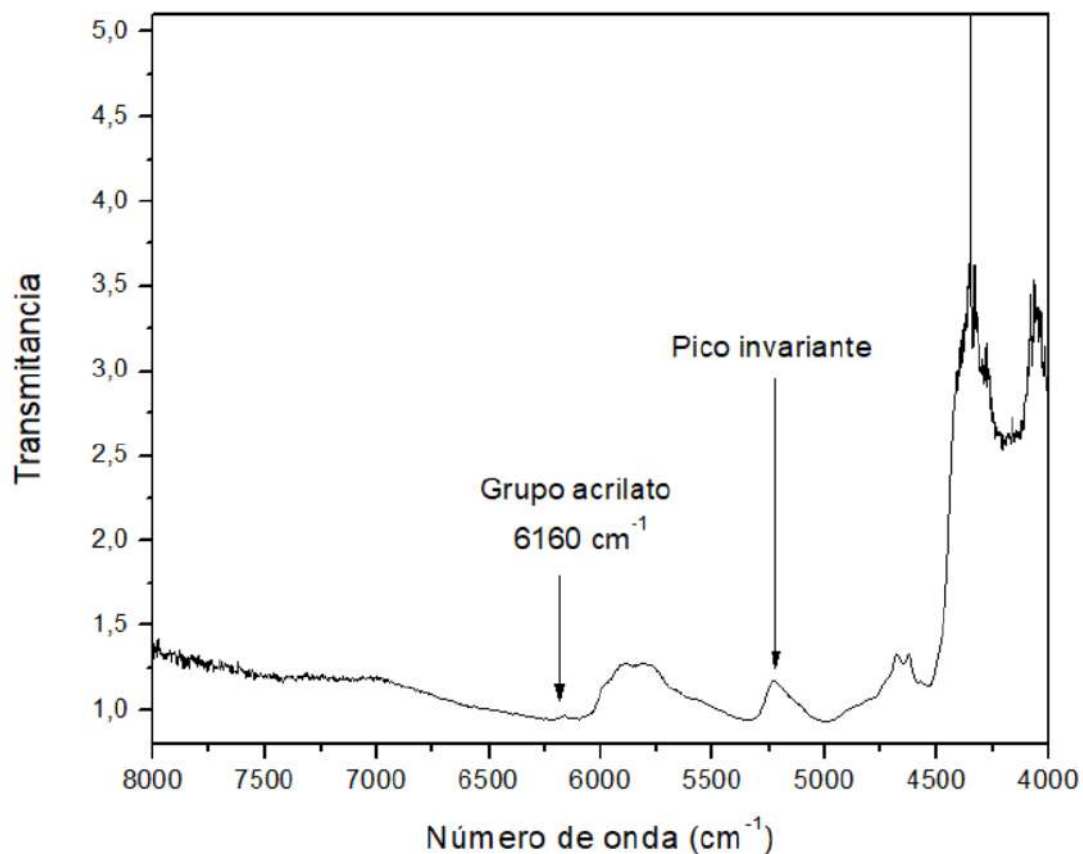


Figura 2.11: Muestra completamente curada utilizando PBO

A partir del gráfico, se calculó nuevamente la conversión de acuerdo con la ecuación 2.4. En este caso, se realizó una normalización en función de la altura del pico invariante señalado en el gráfico.

$$\alpha = 1 - \frac{H_i \cdot H_{inv1}}{H_0 \cdot H_{inv2}} \quad (2.4)$$

Siendo:

- α el grado de conversión entre cero y uno
- H_i la altura del pico acrilato a cada momento
- H_0 la altura inicial del pico acrilato
- H_{inv1} la altura del pico invariante en el ensayo de caracterización de curado de la resina
- H_{inv2} la altura del pico invariante en este ensayo

$$\alpha = 1 - \frac{0,020 \cdot 0,0237}{0,054 \cdot 0,0227} = 0,96 \quad (2.5)$$

El resultado obtenido de la ecuación 2.5 arrojó una conversión máxima de 96 %. Se trata de una conversión que puede aproximarse a una reacción

completa, ya que lograr una conversión del 100 % suele ser muy complicado y en ocasiones inalcanzable debido a que las cadenas poliméricas son tan grandes que dificultan la difusión de monómeros u otras cadenas por la matriz de resina (impedimento estérico) [22].

Hasta ahora, el análisis de la evolución de la resina, tanto bajo irradiación UV como con su modificación mediante PBO, proporcionó información valiosa sobre la cinética de curado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las condiciones experimentales que se utilizaron no son necesariamente equivalentes a las de la cámara de post-curado (sección 2.1.2), lo que limita la extrapolación directa de estos datos. Por esta razón, se planteó investigar el grado de curado alcanzable bajo condiciones más representativas. Por simplicidad, y para no depender exclusivamente del FTIR en cada condición evaluada, se buscó ajustar un modelo de la literatura que relaciona el grado de conversión con la temperatura de transición vítrea (T_g), obtenible a partir de análisis térmicos por calorimetría diferencial de barrido (DSC).

2.3.2.3 Ajuste del Modelo Conversión vs. T_g

El modelo T_g -conversión permite estimar el grado de conversión de una pieza a partir de su T_g . Se trata de una ecuación matemática que relaciona esta propiedad térmica de un polímero termorrígido con su grado de curado [23].

La ecuación que describe esta relación es la siguiente:

$$\frac{T_g - T_{g0}}{T_{g\infty} - T_{g0}} = \frac{\lambda \cdot x}{1 - (1 - \lambda) \cdot x} \quad (2.6)$$

Donde:

- T_{g0} es la temperatura de transición vítrea del sistema sin reaccionar
- $T_{g\infty}$ es la temperatura de transición vítrea de la red completamente curada
- $\lambda = \frac{\Delta C_{p0}}{\Delta C_{p\infty}}$ es el cociente entre los cambios en la capacidad calorífica isobárica durante la transición vítrea para los sistemas completamente polimerizados y no reaccionados.

Metodología experimental

Los análisis de DSC se realizaron utilizando el equipo Perkin Elmer Pyris 1 con el fin de obtener los parámetros de la ecuación 2.6. La muestra del sistema sin curar fue una gota de resina líquida. Mientras que la muestra del sistema completamente curado fue aquella obtenida en el experimento anterior (resina modificada con PBO y termocurada hasta el 96 %).

Las condiciones del ensayo de DSC fueron las siguientes:

- Estabilización de temperatura a -60,00 °C
- Comienzo de adquisición de datos (tiempo, temperatura y flujo de calor)

- Primer calentamiento hasta 180,00 °C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min
- Enfriamiento hasta temperatura inicial a 10°C/min
- Segundo calentamiento hasta nuevamente 180,00 °C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min

Análisis de resultados

Como puede apreciarse en las figuras 2.12 y 2.13, los registros obtenidos no permitieron identificar claramente los parámetros para ajustar el modelo, siendo directamente imposible en el caso de la resina líquida.

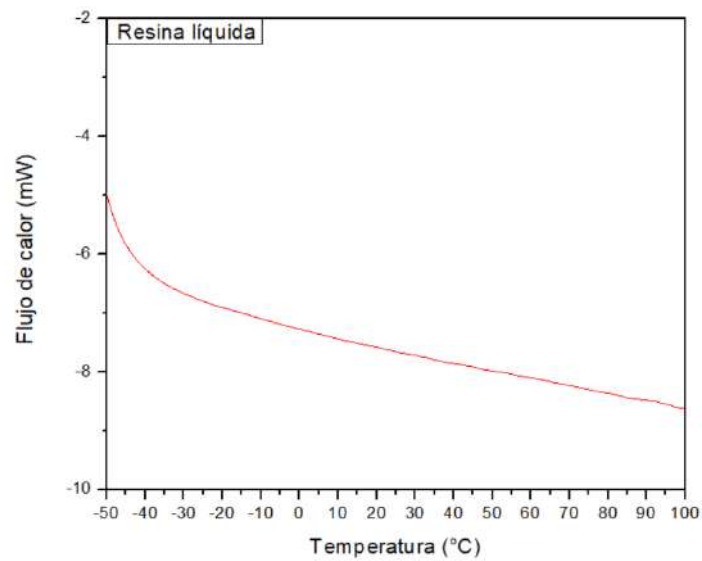


Figura 2.12: Curva de DSC de la resina líquida.

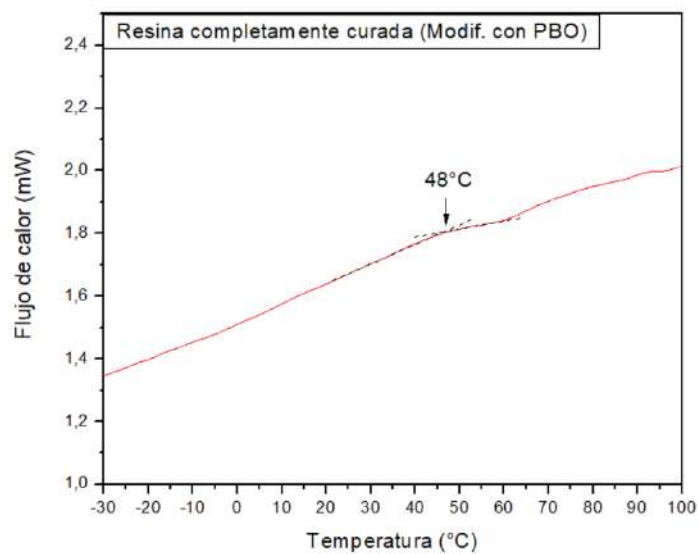


Figura 2.13: Curva de DSC de la resina completamente curada (modificada con PBO).

El único parámetro que pudo identificarse fue la $T_{g\infty}$, como se aprecia en la figura 2.13. Los restantes (T_{g0} y λ), se obtuvieron del trabajo “Core-crystalline nanoribbons of controlled length via diffusion-limited colloid aggregation” [23], que ajusta un modelo T_g -conversión para una resina similar.

Los valores finalmente utilizados fueron:

- $T_{g0} = -36\text{ °C}$
- $T_{g\infty} = 48\text{ °C}$
- $\lambda = 0.348$

La ecuación ajustada se expresa como:

$$\frac{T_g + 36\text{ °C}}{84\text{ °C}} = \frac{0,348 \cdot x}{1 - 0,652 \cdot x} \quad (2.7)$$

En la figura 2.14, se presenta la curva obtenida con esta ecuación.

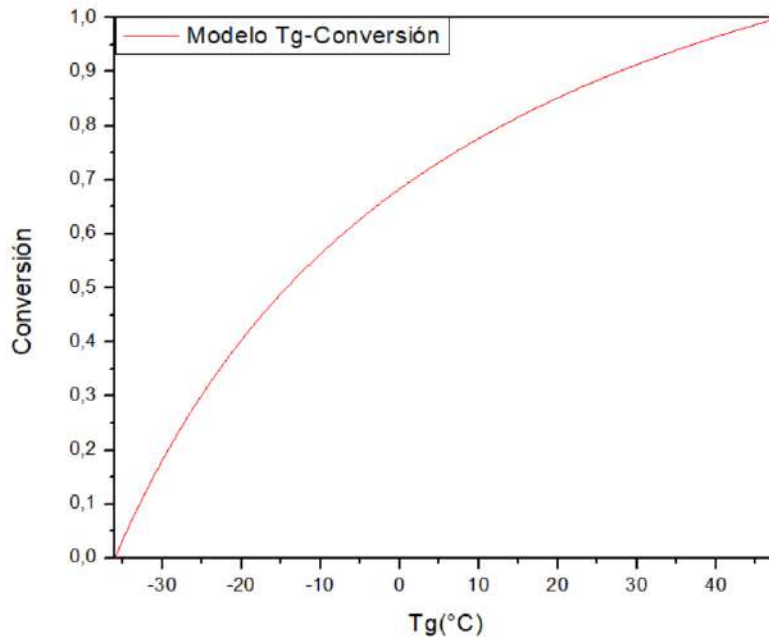


Figura 2.14: Curva del modelo T_g -conversión

Ahora bien, con el modelo ajustado, sería posible determinar el grado de conversión de las probetas sometidas a nuevas condiciones de post-procesamiento sólo con la identificación de la T_g por medio de un ensayo DSC.

2.3.2.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

Introducción a la técnica TGA

El análisis termogravimétrico se usa para caracterizar las propiedades físicas y químicas de los materiales, en función de la temperatura, en una atmósfera controlada.

La técnica TGA, permite medir cómo la masa de una muestra cambia a lo largo del tiempo o cómo responde al aumento de temperatura. Esta medición proporciona información como transiciones de fase, absorción, adsorción, desorción, humedad, reacciones químicas, evaporación de volátiles y descomposición térmica [24]. Generalmente se calienta a una velocidad constante (dinámico) o se deja a la muestra a una temperatura fija (isotérmico).

Metodología experimental

El ensayo se realizó en el equipo Shimadzu TGA-50. En la figura 2.15, se observa el equipo usado.



Figura 2.15: Equipo TGA utilizado.

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

- La atmósfera del ensayo fue aire
- Se utilizaron 5,048 mg de resina líquida
- La estabilización del equipo se realizó a 30 °C
- El calentamiento se realizó hasta los 900 °C
- Se utilizó una velocidad de calentamiento de 10°C/min

Análisis de resultados

Los resultados del ensayo TGA se muestran en la figura 2.16.

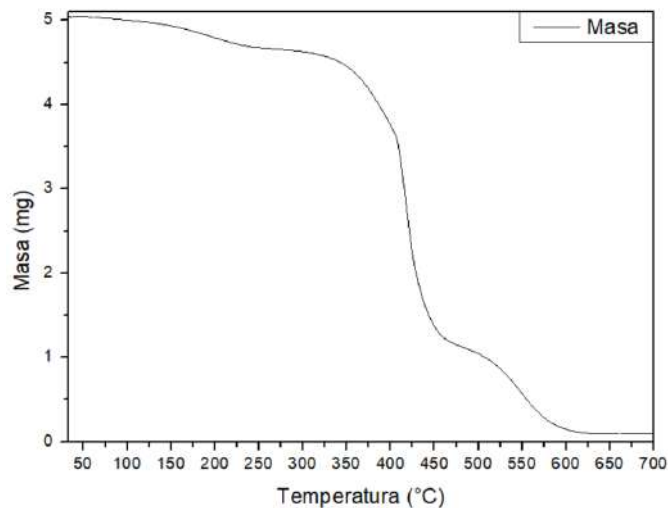


Figura 2.16: Evolución de la masa en función de la temperatura.

En el rango de temperaturas 30-150 °C, se observa una pérdida de masa del 3%. Luego, se evidencia una pérdida de masa de 8% entre los 150 y 300°C. Esto pudo deberse tanto a la pérdida de humedad como a la liberación de algún volátil. Finalmente, la pérdida de masa observada luego de los 300°C corresponde a la degradación de la mayor parte de la resina.

2.4 Influencia del post-curado UV, el tratamiento térmico y el tiempo en las propiedades mecánicas y grado de conversión

En esta sección, el objetivo fue evaluar las condiciones reales de exposición UV en la cámara y del tratamiento térmico, analizando tanto su impacto en las propiedades mecánicas como en el grado de conversión alcanzado.

Como se mencionó previamente, las condiciones de curado UV provistas por la cámara lavadora-curadora pueden diferir significativamente de las utilizadas en los ensayos de FTIR, lo que influye en el grado de conversión alcanzado. En el FTIR, se curó una delgada lámina que estabilizó su plateau en una conversión del 65%, mientras que en la cámara se procesan piezas de mayor espesor, lo que podría limitar la irradiación UV efectiva y reducir el grado de conversión.

Por otro lado, a diferencia de otras cámaras comerciales que combinan simultáneamente el post-curado UV y un tratamiento térmico (TT), este equipo permite únicamente ajustar el tiempo de exposición a UV. Por esa razón, se descartó la posibilidad de incluir un iniciador térmico para promover el termocurado en simultáneo al fotocurado y, en su lugar, se implementó un tratamiento térmico posterior al mismo.

Como se observó previamente, este tratamiento tiene la capacidad de desplazar ligeramente el plateau de conversión hacia valores más altos (ver figura 2.9).

Si bien se sabía que con esta estrategia (UV más TT) no se lograría alcanzar un curado completo (siendo el FTIR el límite superior esperado), el objetivo

principal era garantizar un grado de curado constante en el tiempo, ya que las propiedades mecánicas están directamente relacionadas con este parámetro.

2.4.1 Metodología experimental

Para este análisis, se imprimieron una serie de probetas de tracción, las cuales fueron expuestas a distintos tiempos de irradiación UV en la cámara de post-curado. La mitad de estas probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico adicional.

Las condiciones evaluadas se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Condiciones de post-procesamiento.

Condición	Tiempo de post-curado UV	Tratamiento térmico
10 UV	10 min	No
10 UV TT	10 min	80°C (2 h)
40 UV	40 min	No
40 UV TT	40 min	80°C (2 h)

La temperatura del TT se determinó por prueba y error. En principio se probó con una temperatura de 120°C, al igual que en el ensayo de FTIR, pero las muestras obtenidas se fragilizaban demasiado, lo mismo sucedió con una temperatura de 100°C. Por este motivo, se decidió por 80°C. El tiempo del TT se estableció como aquel suficiente para que se establezca la temperatura de las muestras (2 horas).

Se fabricaron 4 réplicas por condición. En el mismo día de realizado el post-procesamiento (día 1), dos probetas de cada condición se sometieron a tracción uniaxial, mientras que un fragmento cada una de ellas se analizó por DSC para determinar su T_g y consecuentemente su grado de curado.

Luego de una semana del post-procesamiento (día 7), se ensayaron las dos probetas restantes de cada condición.

2.4.1.1 Detalles del ensayo de tracción

La geometría y dimensiones de las probetas se muestra en la figura 2.17. Las medidas se encuentran en milímetros.

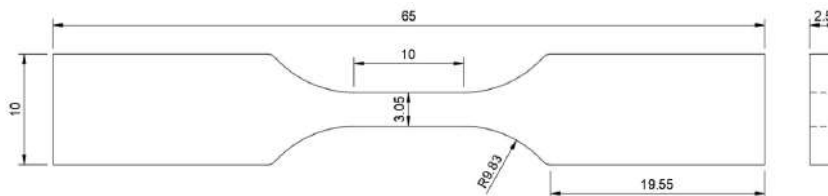


Figura 2.17: Dimensiones de la probeta de tracción.

Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina de ensayos universales Instron, modelo 4467 (ver Figura 2.18), a una velocidad de 1 mm/min, adquiriendo los registros de carga vs. desplazamiento de la travesa correspondientes. Los mismos fueron utilizados para obtener las curvas de tensión vs. deformación ingenieril.

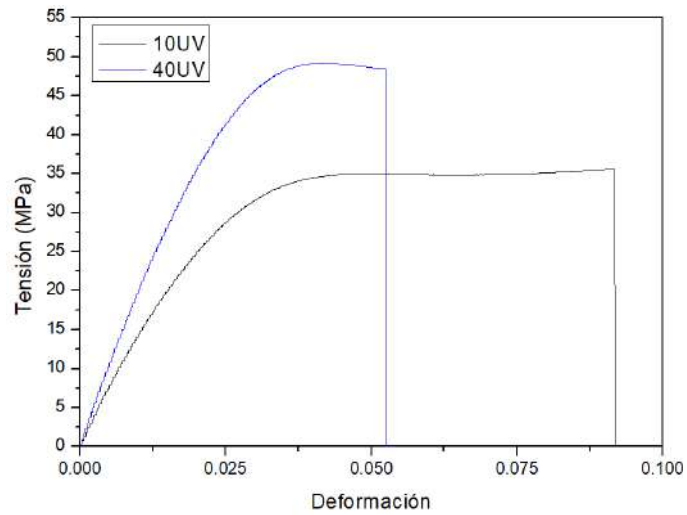


Figura 2.18: Instron 4467.

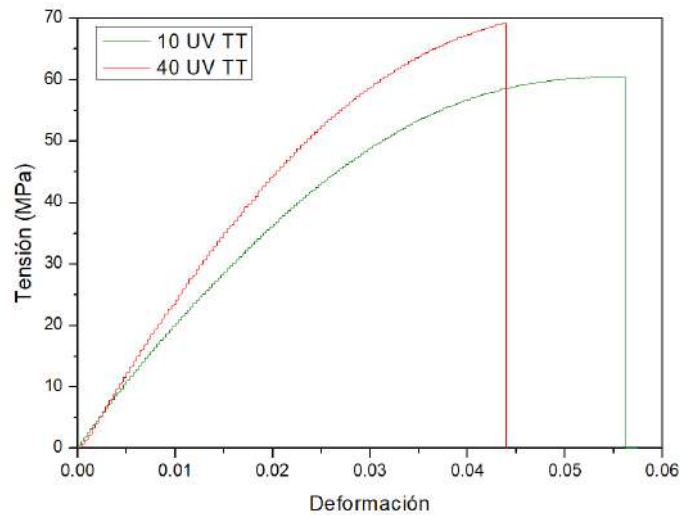
2.4.2 Resultados y discusión

2.4.2.1 Propiedades mecánicas en función del tiempo UV y TT

A continuación se presentan las curvas de tensión-deformación correspondientes a las probetas ensayadas en el “día 1”. Aunque se realizaron ensayos en duplicado para cada condición, se muestra una sola curva representativa de cada caso, dado que la dispersión entre las réplicas fue despreciable. Las Figuras 2.19a y 2.19b comparan los resultados para los dos tiempos de exposición UV, sin y con TT respectivamente. Las tensiones y deformaciones se calcularon según las ecuaciones 2.1 y 2.2.



(a) Curvas de tracción con distintos tratamientos UV.

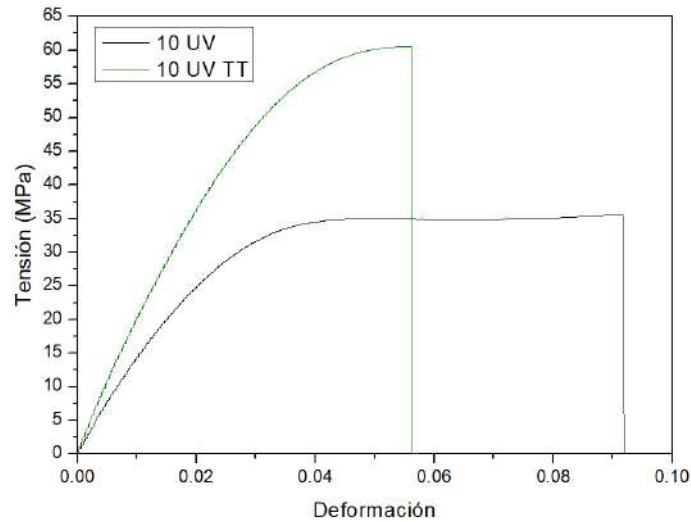


(b) Curvas de tracción con distintos tratamientos UV y mismo TT.

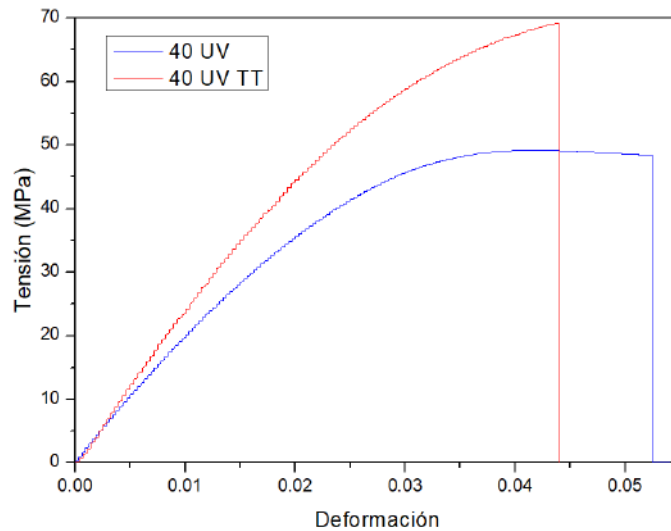
Figura 2.19: Influencia de post tratamientos UV con y sin TT.

En las figuras previas, se observa que tanto el módulo elástico como la tensión máxima del material aumentan al aumentar el tiempo de exposición UV.

Las Figuras 2.20a y 2.20b comparan los resultados de aplicar o no un TT para los dos tiempos de exposición UV evaluados respectivamente.



(a) Curvas de tracción con 10 min UV con y sin TT.



(b) Curvas de tracción con 40 min UV con y sin TT.

Figura 2.20: Influencia de tratamiento térmico en probetas de tracción.

Análogamente al análisis anterior, se evidencia que tanto el módulo elástico como la tensión máxima aumentan al someter al material fotocurado a un TT. La tabla 2.2 resume los resultados promedio. Las propiedades fueron calculadas según la norma ISO 527-1:2012 [25].

Tabla 2.2: Propiedades del material según post procesamiento.

Condición	Módulo elástico [GPa]	σ_m [MPa]
10UV	1,23	35,63
10UV-TT	1,79	60,50
40UV	1,77	49,16
40UV-TT	2,26	69,18

Los resultados evidencian una clara dependencia de las propiedades mecánicas del material con tiempo de exposición UV y el TT.

2.4.2.2 Grado de curado en función del tiempo UV y TT

Las figuras 2.21 y 2.22 muestran el registro de flujo de calor y temperatura obtenidos del DSC realizados a las muestras de 10 UV, 10 UV TT del “día 1”. Los DSC correspondientes a las probetas 40 UV y 40 UV TT no permitieron detectar temperaturas de transición vítrea con claridad.

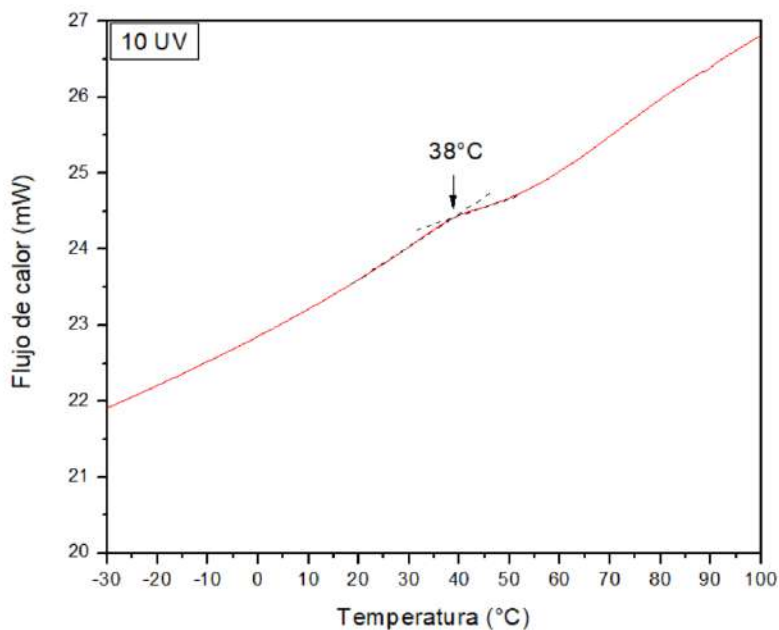


Figura 2.21: Curva de DSC de la muestra 10 UV

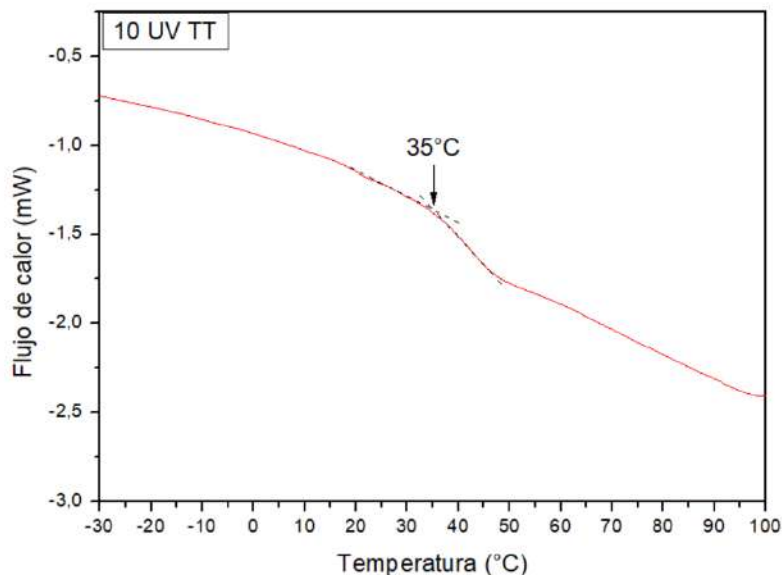


Figura 2.22: Curva de DSC de la muestra 10 UV TT

Los valores de T_g obtenidos fueron de 10 UV: 38°C, 10 UV TT: 35°C.

Al introducir dichos valores en el modelo de la sección 2.3.2.3, los grados de conversión hallados fueron de 95 y 94 % respectivamente.

Este resultado merece una breve discusión. Como se mencionó previamente, se hubiese esperado que las conversiones alcanzadas sean menores a la que se determinó como límite superior en el FTIR (73 % con el TT), dado que en ese caso se fotocuró una fina lámina, mientras que en la cámara UV se curaron probetas de tracción con un espesor mayor. Una posible explicación es que, dadas las considerables dificultades experimentales presentadas al ajustar el modelo de conversión vs. T_g , y considerando que la mayoría de los datos utilizados provienen de literatura para otra resina, los valores obtenidos a partir de esta ecuación podrían ser poco realistas.

Más allá de esto, aunque no se conozca con certeza el grado de curado alcanzado, sí queda en evidencia que los valores de T_g obtenidos para las distintas condiciones son muy cercanos entre sí. Se debe tener en cuenta que la T_g es un indicador del grado de entrecruzamiento en los polímeros termorrígidos, ya que a mayor densidad de entrecruzamientos, mayor es la restricción en el movimiento de las cadenas poliméricas, lo que eleva la T_g . Por lo tanto, las diferencias mínimas en los valores de T_g implicarían que las muestras tienen una estructura de red comparable y, consecuentemente, grados de curado similares bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, esto no se condice con lo observado en la sección 2.4.2.1, donde se evidenció que las probetas 10 UV y 10 UV TT presentaban propiedades mecánicas muy distintas y por ende grados de conversión diferentes.

Estos resultados, permiten concluir que la técnica de DSC, con los equipos disponibles y con este tipo de resina, no fue lo suficientemente sensible como para tener una lectura de T_g confiable y por consiguiente, una lectura del grado de conversión objetiva. Por estos motivos, se consideró innecesario continuar evaluando la evolución del grado de curado en el tiempo y se propuso evaluar únicamente la evolución de las propiedades mecánicas en el tiempo.

2.4.2.3 Evolución de las propiedades mecánicas en el tiempo para las distintas condiciones de post-procesamiento

En la figura 2.23, se observa la evolución de las propiedades mecánicas en el tiempo para cada una de las condiciones de post-tratamiento. Nuevamente, las tensiones y deformaciones se calcularon según las ecuaciones 2.1 y 2.2.

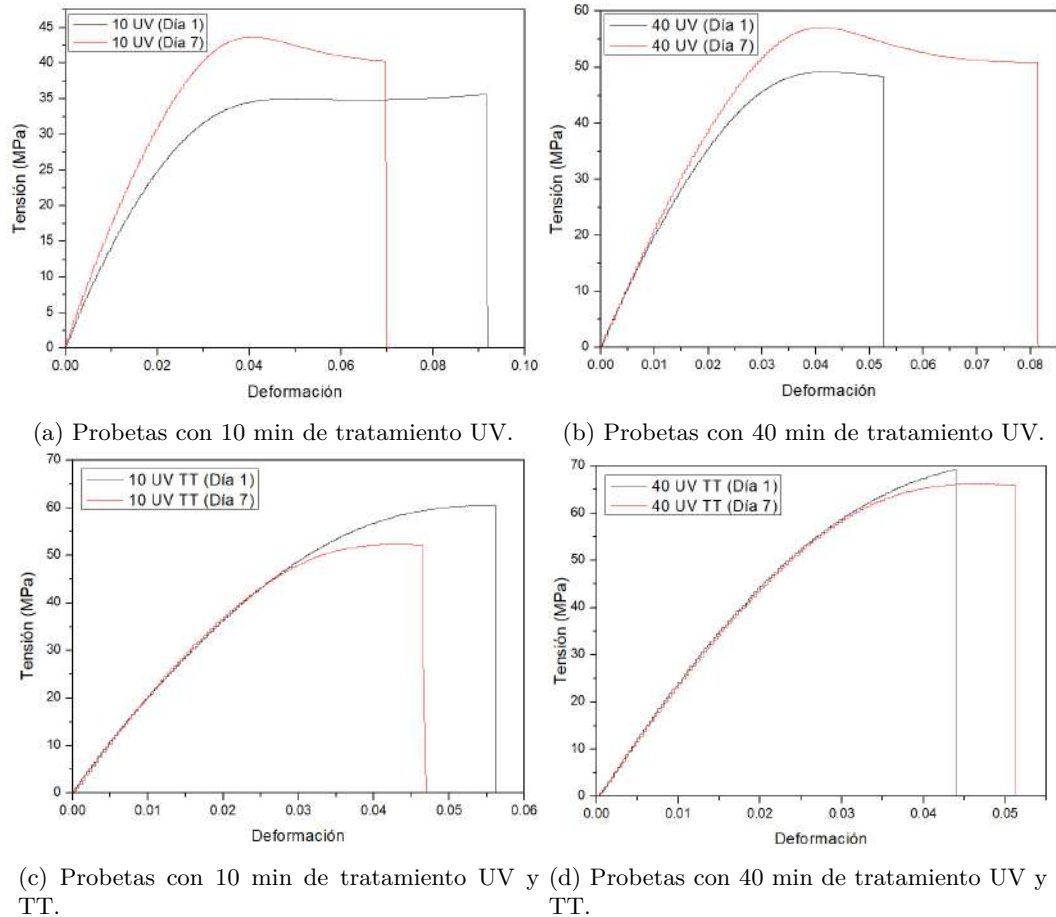


Figura 2.23: Comparación de curvas entre el día 1 y 7.

A continuación, la tabla 2.3 se encuentran los resultados obtenidos al día 7 y en la tabla 2.4 se muestran las diferencias relativas porcentuales de las propiedades medidas entre el día 1 y día 7.

Tabla 2.3: Propiedades del material según post procesamiento en el día 7.

Condición	Módulo elástico [GPa]	σ_m [MPa]
10UV	1,53	43,61
10UV-TT	1,86	52,27
40UV	1,95	57,14
40UV-TT	2,23	66,22

Tabla 2.4: Diferencias relativas en las propiedades mecánicas del material

Condición	Dif. relativa en el módulo elástico (%)	Dif. relativa en la tensión máxima (%)
10UV	24,13	22,40
10UV-TT	4,02	13,60
40UV	9,94	16,23
40UV-TT	1,37	4,28

Como puede observarse en la tabla 2.4, el tratamiento térmico provocó

menores variación de propiedades mecánicas en el tiempo. La probeta 40UV-TT presentó variación de E y tensión máxima menores al 5%.

Finalmente, se evidencia que la combinación de 40 minutos de exposición UV y un TT de 2 horas a 80°C, permite obtener propiedades mecánicas estables y reproducibles en el tiempo.

Estas condiciones de procesamiento serán utilizadas en los siguientes capítulos para obtener las probetas a evaluar mecánicamente.

Capítulo 3

Generación, fabricación y evaluación mecánica de estructuras celulares

En este capítulo se describe el proceso de generación, fabricación y determinación de propiedades mecánicas de las estructuras celulares tanto auxéticas como no auxéticas.

En la fase inicial, se llevó a cabo la generación de las probetas, utilizando el software de diseño asistido por computadora *Autodesk Fusion 360*. Las probetas generadas son distintas variantes de una estructura celular hexagonal re-entrante auxética y una estructura hexagonal tradicional tipo panal de abeja.

La siguiente etapa fue la fabricación de las probetas, que se llevó a cabo conforme al procedimiento de fabricación definido en el capítulo 2.

Finalmente, se llevaron a cabo ensayos cuasi-estáticos de compresión y se determinó, para cada una de las probetas, su capacidad de absorción de energía. Además, se analizó la influencia de las características geométricas y de la RPN en la capacidad de absorción de energía.

3.1 Generación y fabricación de las probetas

La generación de las estructuras consiste en el dibujo de las mismas utilizando un software CAD (diseño asistido por computadora), en este caso *Autodesk Fusion 360* y el laminado, o división en capas de las geometrías tridimensionales resultantes. Esto último se llevó a cabo con el software “*Lychee Slicer*”, con el cual se generaron además los archivos con la información digitalizada de las estructuras para que pueda ser procesada por el software propio de la impresora. Las estructuras se diseñaron variando dos parámetros geométricos: el espesor de pared y la altura de las celdas, de acuerdo al diseño de experimentos mostrado en la tabla 3.1.

La nomenclatura de cada probeta tiene la forma “a.b.c”, donde:

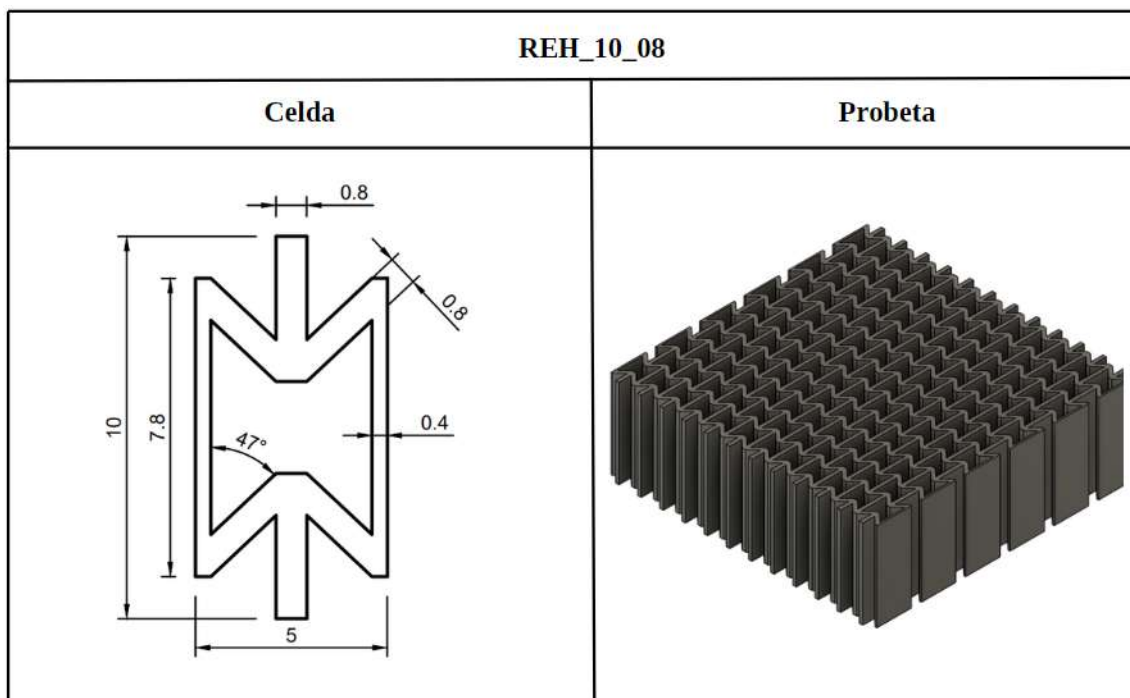
- “a” indica el tipo de estructura. “NH” para las hexagonales no auxéticas y “REH” para las reentrantes hexagonales auxéticas

- “b” indica la altura de la celda en milímetros
- “c” indica el espesor de la pared de la celda

Tabla 3.1: Parámetros geométricos de cada estructura.

Estructura	Altura de celda (mm)	Ancho de pared (mm)
NH_10_08	10	0,8
NH_10_12	10	1,2
REH_10_08	10	0,8
REH_10_12	10	1,2
REH_15_08	15	0,8
REH_15_12	15	1,2

En la figura 3.1 se detallan las probetas fabricadas, y las características geométricas de las celdas. Todas las medidas corresponden a milímetros.



(a) REH.10.08.

REH_10_12	
Celda	Probeta

(b) REH.10.12.

REH_15_08	
Celda	Probeta

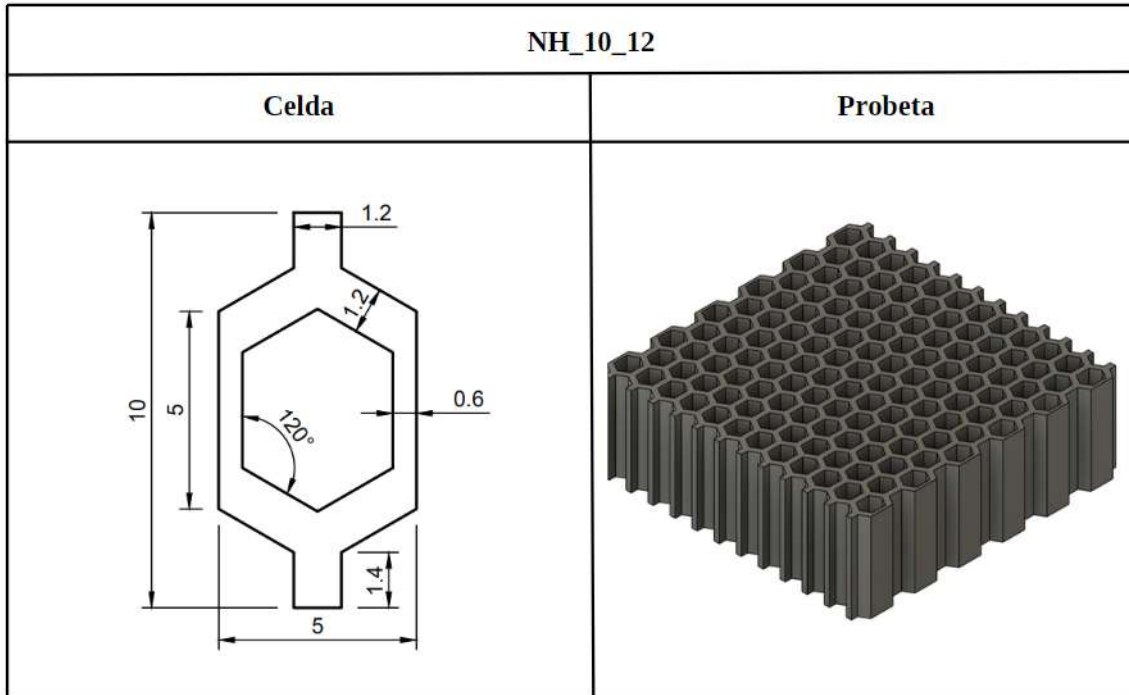
(c) REH.15.08.

REH_15_12	
Celda	Probeta

(d) REH.15.12.

NH_10_08	
Celda	Probeta

(e) NH.10.08.



(f) NH.10.12.

Figura 3.1: Celdas y probetas de las estructuras auxéticas y no auxéticas diseñadas.

Como se observa, todas las celdas diseñadas mantienen una relación 2:1 entre la altura y el ancho. Todas las probetas presentan las mismas dimensiones, 60 mm de altura, 60 mm de base y 20 mm de espesor.

Luego del proceso de generación, se llevó a cabo la fabricación de las probetas utilizando el procedimiento definido en el capítulo 2.

Además, se registró el peso de cada estructura antes y después de la realización del tratamiento térmico, para determinar si existen pérdidas de masa. Los resultados se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Variación de masa en estructuras celulares con el tratamiento térmico.

Estructura	Probeta	Masa pre TT (g)	Masa post TT (g)	Cambio relativo (%)
REH_15_12	1	29,7709	29,5084	0,88
	2	30,2543	29,9722	0,93
	3	30,6713	30,3797	0,95
REH_15_08	1	21,2699	21,0435	1,06
	2	22,5074	22,2761	1,03
	3	21,9682	21,7236	1,11
REH_10_12	1	51,2297	50,8077	0,82
	2	50,1534	49,7207	0,86
	3	49,4904	49,0606	0,87
REH_10_08	1	36,6536	36,2462	1,11
	2	35,8043	35,3623	1,23
	3	37,4738	37,0397	1,16
NH_10_12	1	36,4647	36,1303	0,92
	2	36,8920	36,5396	0,96
	3	35,7525	35,4284	0,91
NH_10_08	1	26,1960	20,9659	1,11
	2	26,0860	36,5396	1,43
	3	25,4585	25,1300	1,29

Como puede observarse, en todos los casos existe una pérdida de masa del 1% aproximadamente, consistente con los resultados del TGA (sección 2.3.2.4). La pérdida de este volátil luego del TT probablemente sea la causa por la cual las propiedades mecánicas se estabilizan.

3.2 Evaluación mecánica de las estructuras celulares

Para la evaluación mecánica de las estructuras se realizaron ensayos cuasiestáticos de compresión de las mismas. Si bien es posible realizar el ensayo en dos distintas direcciones, como se observa en la figura 3.2, en este trabajo se evaluó únicamente la dirección 1, debido a que en estudios anteriores, esta dirección presentó mejores resultados en cuanto a la absorción de energía [26].

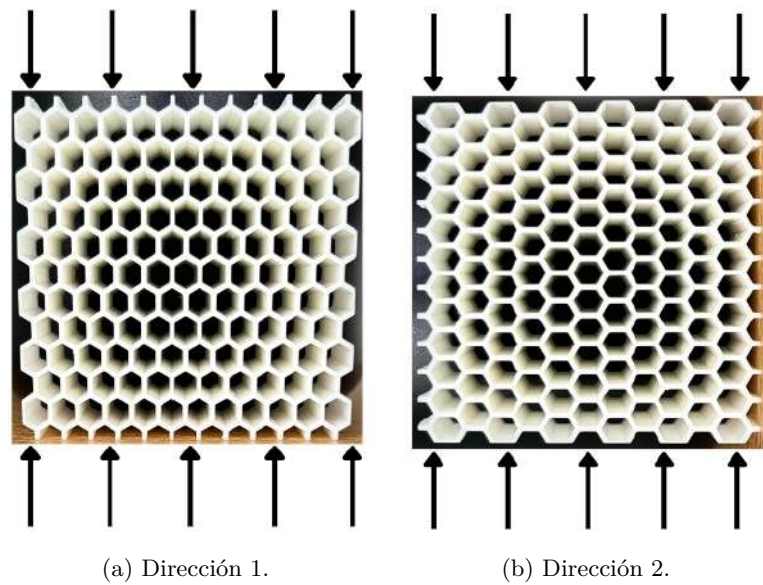


Figura 3.2: Direcciones de ensayo de las estructuras.

3.2.1 Metodología experimental

El ensayo de compresión se llevó a cabo en la máquina de ensayos universal Instron, modelo 4467. Se utilizó una velocidad de compresión de 1 mm/min. En la figura 3.3 se observa la configuración experimental del ensayo.

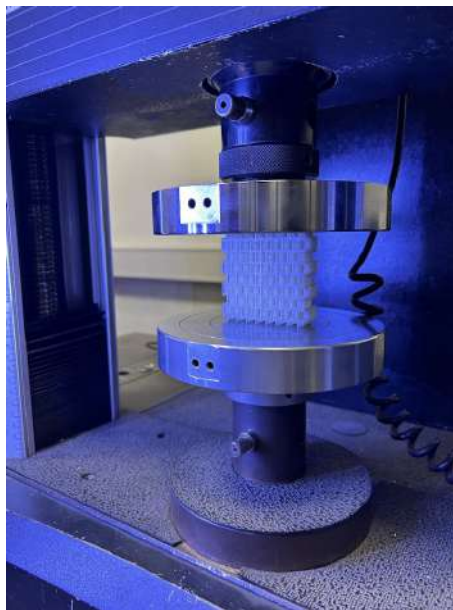


Figura 3.3: Configuración experimental del ensayo.

3.2.1.1 Correlación digital de imágenes (DIC)

Esta técnica, considerada como un tipo de extensometría óptica (sin contacto), se vale del análisis de imágenes para medir la deformación y el desplazamiento de los objetos. Básicamente, mediante la misma se comparan

imágenes digitales de un objeto antes y después de su deformación, siguiendo patrones superficiales de puntos, mejor conocidos por su denominación en inglés como *speckles*, para obtener desplazamientos, deformaciones, velocidades y aceleraciones entre otras cosas. En este trabajo, la técnica de DIC se utilizó para obtener las RPN en la celda central de las estructuras auxéticas. La figura 3.4 muestra el *speckle* generado sobre una de las estructuras. Cabe destacar que se exploraron varias configuraciones para finalmente poder obtener este valor.

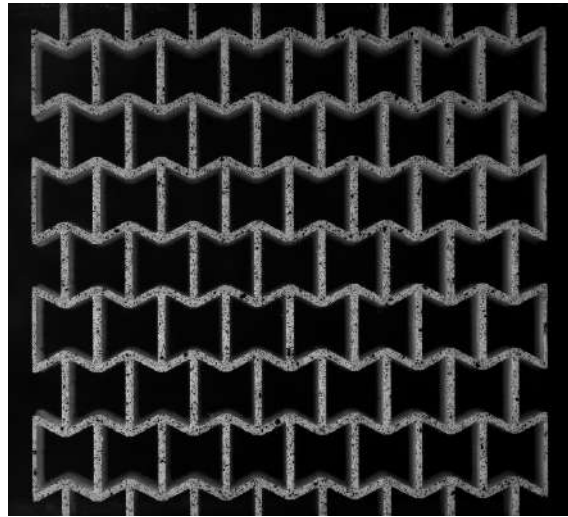


Figura 3.4: Estructura REH_15_08 con *speckle*.

En la figura 3.5, se observa la utilización de extensómetros virtuales para la estimación de la relación de Poisson aparente del espécimen.

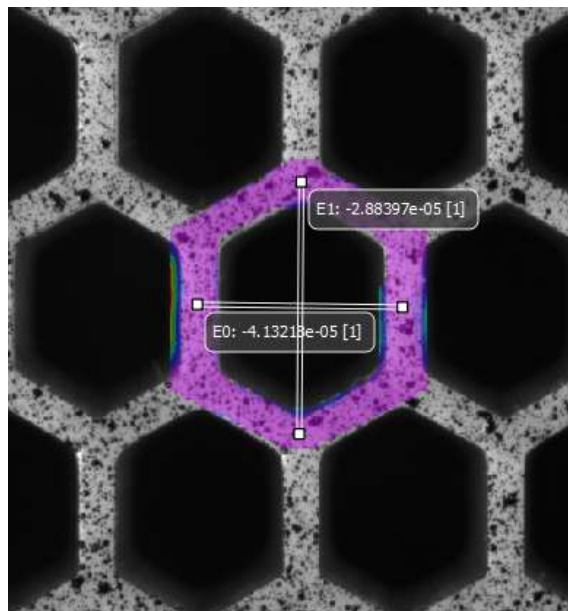


Figura 3.5: Extensómetros virtuales colocados en la celda central de una estructura NH_10_08.

3.2.2 Análisis de resultados

En la figura 3.6, se observan los gráficos de fuerza-desplazamiento obtenidos. Al igual que en la sección 2.4.2.1 se realizaron ensayos en duplicado para cada condición y se muestra una sola curva representativa de cada caso, dado que la dispersión entre las réplicas fue despreciable.

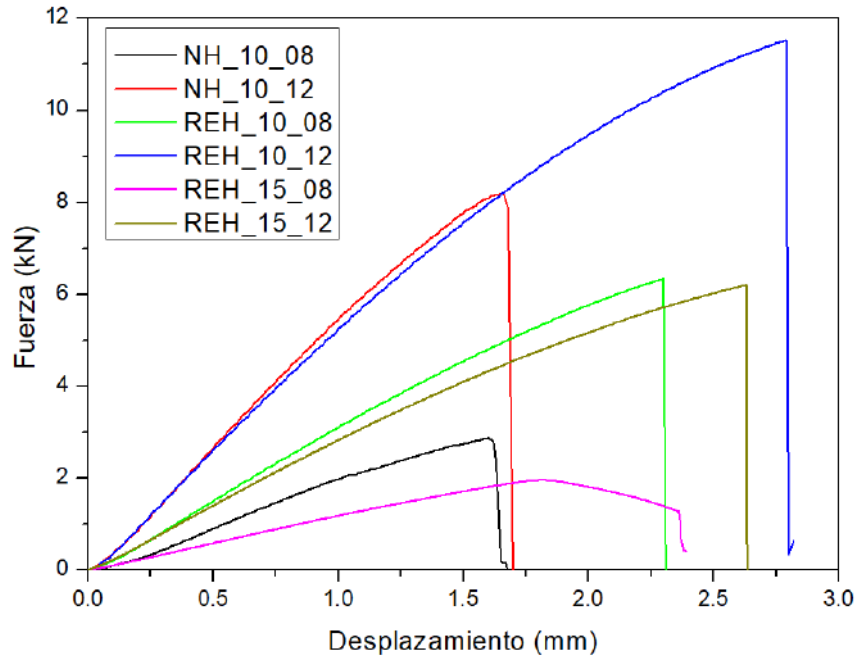


Figura 3.6: Compresión de estructuras celulares.

En trabajos anteriores se observó que las estructuras auxéticas presentaban una clara etapa de densificación sobre el final del ensayo, lo que permitía observar el comportamiento auxético [26, 27, 28]. Esta etapa supone un aumento significativo de la carga antes de la rotura [26, 27, 28]. En este trabajo no fue posible observar la densificación de la estructura, posiblemente debido a la baja capacidad de deformación plástica que presenta la resina.

En la tabla 3.3 se resumen los resultados promedio de las estructuras ensayadas. La energía absorbida por cada estructura se calculó según la ecuación 3.1.

$$Energia = \int FdD \quad (3.1)$$

Además, se realizó el cociente entre la energía absorbida por la estructura y su densidad aparente para obtener una propiedad específica.

Tabla 3.3: Propiedades de las estructuras celulares.

Estructura	Densidad aparente (g/cm ³)	Rigidez (kN/mm)	Energía abs./densidad ap. (J · cm ³ /g)	Poisson aparente
NH_10_08	0,359	2,2	7,5	0,48
NH_10_12	0,501	5,2	13,2	0,38
REH_10_08	0,503	2,8	11,1	-0,22
REH_10_12	0,693	5,0	22,8	-0,06
REH_15_08	0,301	1,2	7,2	-0,35
REH_15_12	0,413	2,5	22,0	-0,20

Como se ve en la tabla, las estructuras auxéticas presentan mayor absorción de energía que sus equivalentes no auxéticas, de las mismas dimensiones.

Respecto a la relación entre el coeficiente de Poisson aparente y la energía absorbida, se observa que mientras más cercano a cero es el valor del coeficiente de Poisson, mayor absorción de energía presenta la estructura.

Para las estructuras auxéticas, puede notarse que un menor tamaño de celda y paredes de mayor tamaño (mayor densidad aparente), provocan una mayor absorción de energía por unidad de densidad aparente.

Por otro lado, los resultados mostraron que el parámetro geométrico con mayor influencia en la energía absorbida es el espesor de pared.

Finalmente, entre las estructuras evaluadas, se pudo concluir que la estructura que mayor absorción de energía por unidad de densidad aparente presenta es la REH_10_12, es decir, la de menor altura de celda y mayor espesor respecto a los evaluados.

Capítulo 4

Ajuste de modelo constitutivo del material y simulación computacional

En este capítulo, se describen las etapas para determinar las propiedades mecánicas del material base de las estructuras, el ajuste de un modelo constitutivo y las simulaciones del ensayo de compresión uniaxial.

Inicialmente, se realizaron ensayos de tracción uniaxial del material de base, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. Consecuentemente, se ajustó un modelo constitutivo elastoplástico isotrópico con endurecimiento por deformación, utilizándose los parámetros obtenidos de los ensayos de tracción.

Finalmente, se realizaron simulaciones del ensayo compresión uniaxial y la verificación del modelo de elementos finitos, que se llevó a cabo comparando las curvas de fuerza-desplazamiento obtenidas por medio de la simulación con las experimentales.

4.1 Determinación de las propiedades mecánicas del material base y ajuste de modelo constitutivo

4.1.1 Metodología experimental

Con el fin de determinar las propiedades mecánicas del material de base, se llevaron a cabo ensayos de tracción a distintas velocidades de deformación. Se utilizaron velocidades de 1, 5 y 10 mm/min y se realizaron tres repeticiones de cada una.

Se utilizó la técnica de DIC para medir las deformaciones en el cuello de la probeta con precisión, determinar el coeficiente de Poisson y estimar la tensión real.

4.1.2 Análisis de resultados

A continuación se observan los resultados obtenidos, se muestra solo una curva de cada velocidad debido a la baja dispersión en los resultados.

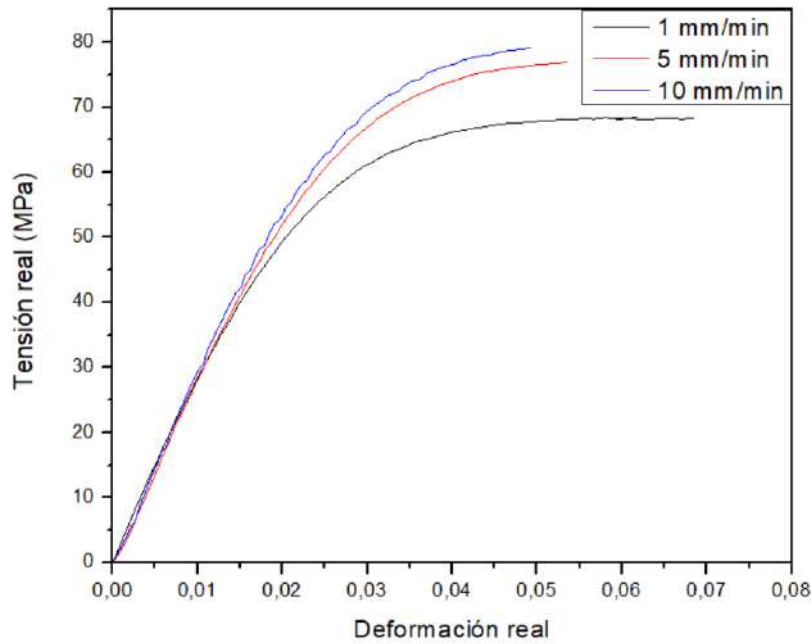


Figura 4.1: Ensayo de tracción a distintas velocidades de travesa.

La tensión real se calculó mediante la ecuación 4.1 utilizando la deformación real medida por DIC. Se consideró que las deformaciones en el ancho y espesor de la probeta fueron iguales.

$$\sigma_{\text{real}} = \frac{\sigma_{\text{ing}}}{(1 + \epsilon_{xx})^2} \quad (4.1)$$

Como muestra la figura 4.1, las curvas mantienen un módulo de Young (E) similar. Sin embargo, en el rango de deformación plástica, se observa que el comportamiento mecánico es sensible a la velocidad de deformación.

En la tabla 4.1 se resumen los resultados obtenidos de los ensayos de tracción a distintas velocidades.

Tabla 4.1: Propiedades del material base según la velocidad de deformación.

Velocidad de deformación (mm/min)	E (GPa)	Poisson
1	2,67	0,45
5	2,77	0,41
10	2,82	0,41

4.1.3 Ajuste de modelo constitutivo

El modelo constitutivo que se empleó, es el isotrópico elastoplástico con endurecimiento por deformación. Está detallado en la sección 4.3.2 *Isotropic elasto-plasticity* del manual de teoría de Abaqus [29].

Si bien el comportamiento mecánico del material muestra ser sensible a la velocidad de deformación, se optó por utilizar un modelo sin dependencia con la velocidad de deformación, con el fin de simplificar el modelo utilizado.

De esta forma, para el ajuste se utilizaron sólo los parámetros obtenidos del ensayo de tracción realizado a 1 mm/min.

Las propiedades del régimen elástico se listan a continuación:

- Modulo de Young (E) = 2670 MPa
- Coeficiente de Poisson = 0,45

Además, fue necesario definir la curva tensión-deformación plástica, que modela el comportamiento plástico del material. Los datos se observan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Propiedades plásticas (Tensión - Deformación plástica)

Deformación plástica	Tensión real (MPa)
0	43,045
0,00191	46,572
0,00390	50,009
0,00669	54,144
0,00893	56,751
0,01051	58,468
0,01562	62,684
0,01940	64,775
0,02468	66,416
0,02806	67,193
0,03279	67,718
0,03644	68,064
0,04024	68,199
0,04412	68,226
0,05209	68,276

4.2 Simulación del ensayo de compresión uniaxial

Las simulaciones del ensayo de compresión uniaxial fueron realizadas en el software de análisis por elementos finitos Abaqus. En todos los casos se realizó un estudio de convergencia modificando la distancia entre los nodos de las caras del espécimen de 0,8 a 0,4 mm. En el espesor de la probeta se utilizó una distancia entre los nodos de 5 mm.

Se realizaron cuatro instancias de simulación. Inicialmente se dispuso la geometría celular completa junto con prismas que emulan ser los platos de compresión, como segunda instancia se simuló solo la geometría sin los prismas, luego un cuarto de geometría celular y finalmente un modelo bidimensional. Siendo cada una, una optimización de la anterior. Para las simulaciones realizadas con geometrías tridimensionales se utilizaron elementos cuadráticos C3D20R (ver manual [30]), mientras que para la simulación de la geometría 2D se utilizaron elementos CPE8R (ver manual [31]).

Simulación con la geometría completa y platos de compresión

En la primera instancia de simulación se dispuso la geometría REH_15_08 completa, y se utilizaron prismas definidos como cuerpos rígidos cumpliendo la función de los platos de compresión de los ensayos experimentales. En la figura 4.2 puede observarse la disposición de los elementos.

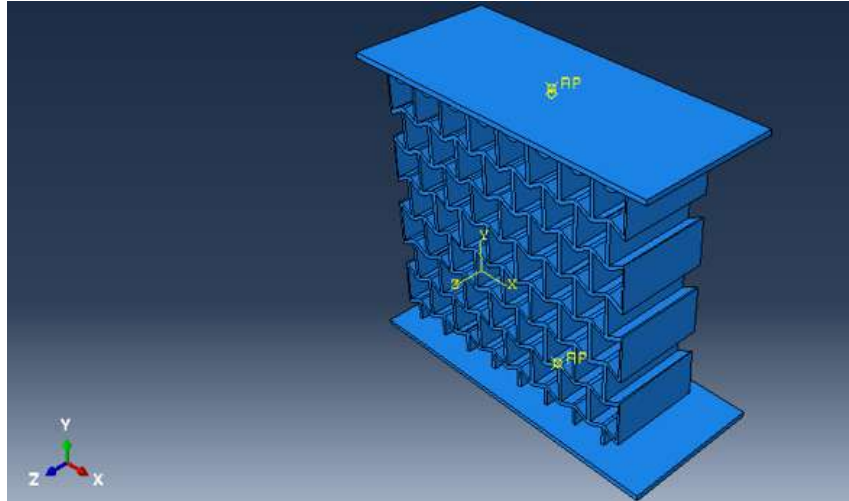


Figura 4.2: Modelo estructura celular y platos de compresión.

Las condiciones de contorno fueron las siguientes:

- Prisma superior sometido a un desplazamiento vertical en Y de 3 mm, con las rotaciones en todos los ejes impedidas.
- El contacto del prisma superior e inferior con la geometría celular fue definido contacto sin fricción tipo *tie*.
- Prisma inferior sometido a restricciones de movimiento y rotaciones en todas las direcciones (empotramiento).

Los resultados de estas simulaciones y su comparación con la curva experimental se muestran a continuación:

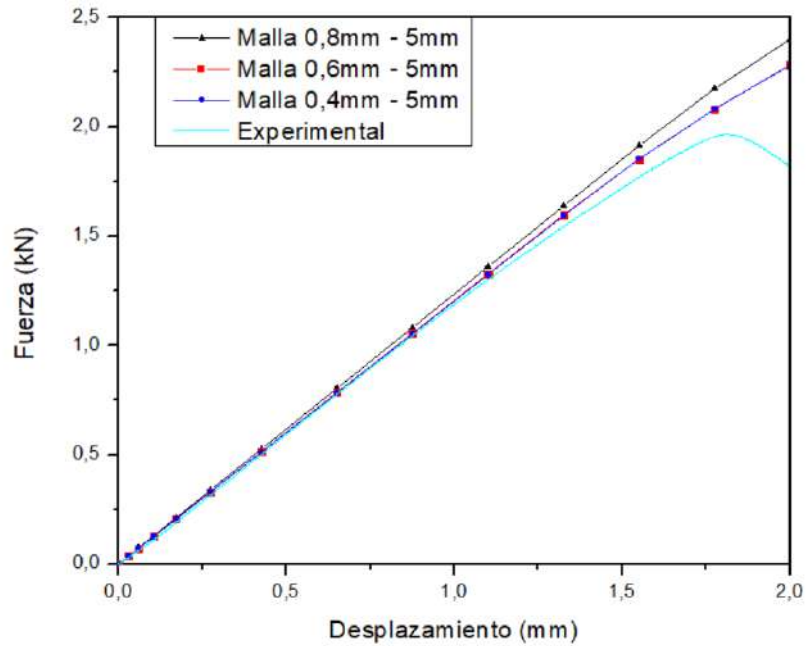


Figura 4.3: Comparación entre el ensayo experimental y simulación para geometría con platos de compresión.

Al realizar la comparación de los resultados de la simulación con los de los ensayos testigo, se observa que resultan similares, lo cual indica que la simulación representa satisfactoriamente el comportamiento real de la estructura.

No obstante, se trata de un arreglo muy ineficiente debido a que involucra interacciones de contacto entre superficies y los prismas presentan igual malla que la estructura lo que genera una gran cantidad de nodos que no son relevantes. En consecuencia, se genera un consumo de recursos computacionales muy elevado y los tiempos de procesamiento resultan inaceptables.

Simulación con la geometría completa sin platos de compresión

Como primera simplificación del modelo, se quitaron los prismas que emulan los platos de compresión, como puede observarse en la figura 4.4.

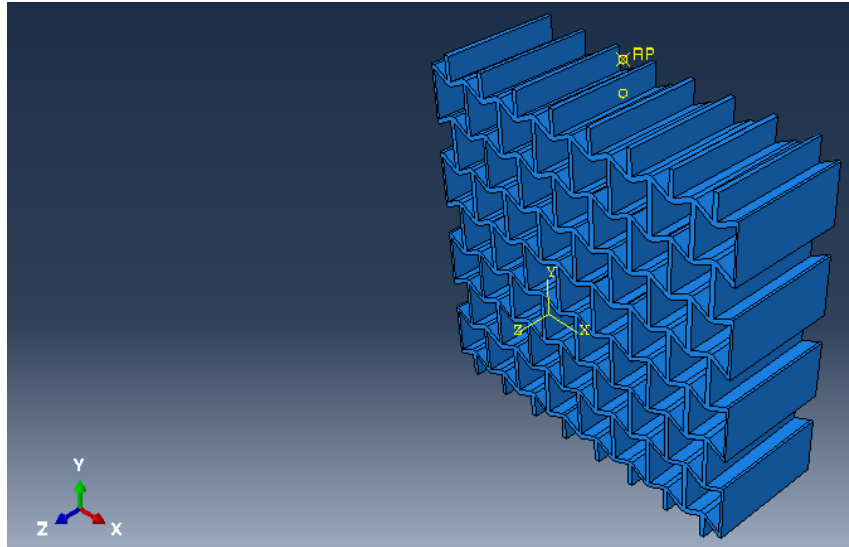


Figura 4.4: Modelo estructura celular completa, sin platos de compresión.

Para esta nueva situación las condiciones contorno fueron las siguientes:

- Caras superiores se desplazan 3 mm en Y. Desplazamientos en los ejes X y Z impedidos. Rotaciones permitidas en todos los ejes.
- Caras inferiores con movimientos en eje Y impedidos y rotaciones impedidas en todos los ejes.

El mallado para la estructura celular se mantuvo de la misma manera que la realizada para la simulación anterior.

Los resultados se observan en la figura 4.5.

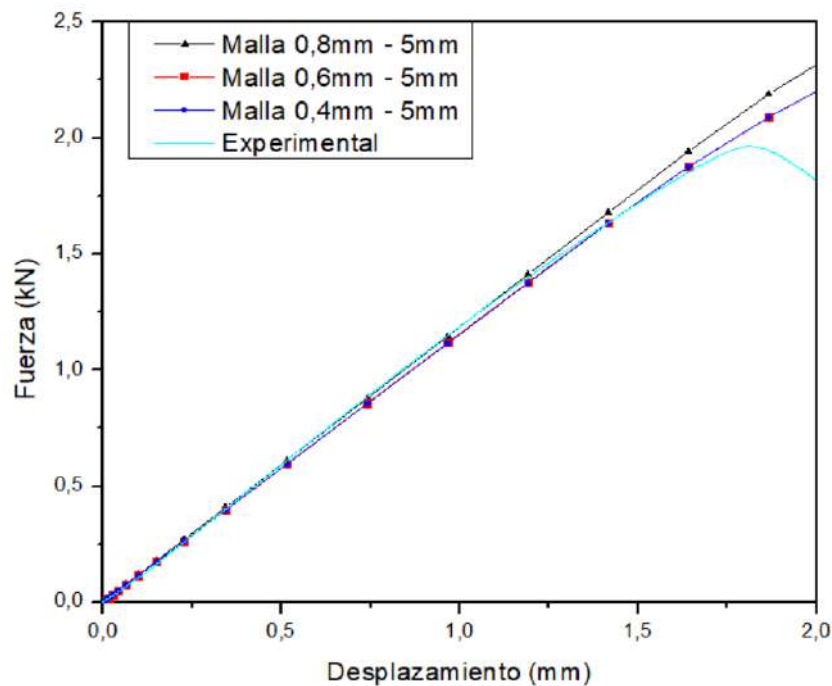


Figura 4.5: Comparación entre el ensayo experimental y simulación para geometría celular completa.

En cuanto a la comparación entre las curvas obtenidas de la simulación y la experimental, se observa que este modelo sigue siendo una buena representación del comportamiento real de la estructura. Además, el resultado obtenido con este modelo es idéntico al obtenido con el modelo anteriormente descrito, esto indica que la simplificación del arreglo es correcta y no errores.

En lo que respecta al procesamiento de la simulación, la simplificación del arreglo generó una gran disminución en el tiempo de procesamiento y en los recursos computacionales utilizados.

Simulación con un cuarto de geometría

Seguidamente, se continuó con la intención de buscar una disposición más eficiente. Para ello, se redujo la estructura a un cuarto a través de cortes en planos perpendiculares XY e YZ, para aprovechar su característica de simetría geométrica y simplificar aún más el arreglo.

En la figura 4.6 puede observarse la nueva disposición.

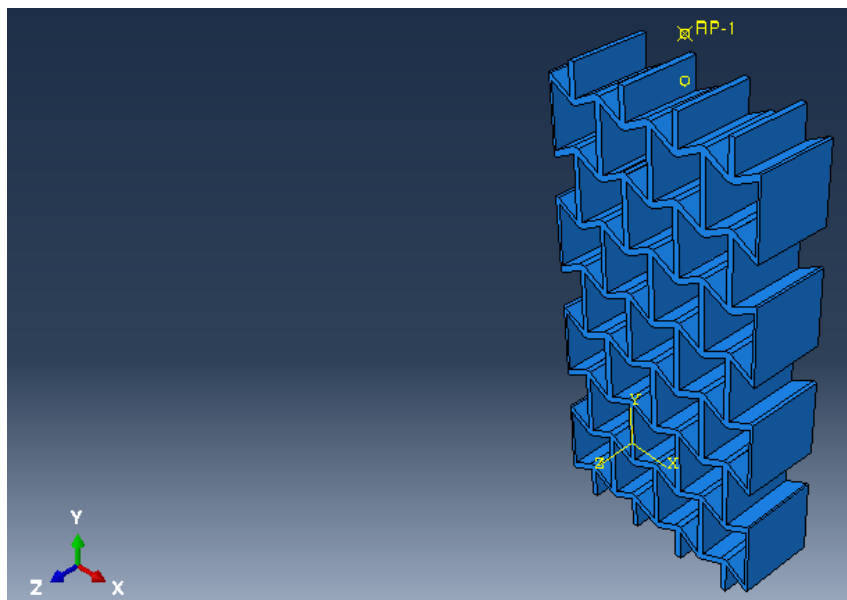


Figura 4.6: Modelo de un cuarto de estructura.

Para esta nueva situación las condiciones contorno fueron las siguientes:

- Caras superiores se desplazan 3 mm en Y hacia abajo, desplazamientos en los ejes X y Z impedidos. Rotaciones permitidas en todos los ejes.
- Caras inferiores con movimientos en eje Y impedidos y rotaciones impedidas en todos los ejes.
- La cara en el plano ZY donde se realizó el corte presenta simetrías con respecto al eje X (desplazamientos en X, rotaciones en Z e Y impedidos).
- La cara en el plano XY de corte presenta simetrías con respecto al eje Z (desplazamientos en Z, rotaciones en X e Y impedidos).

Los resultados obtenidos se observan en la figura 4.7.

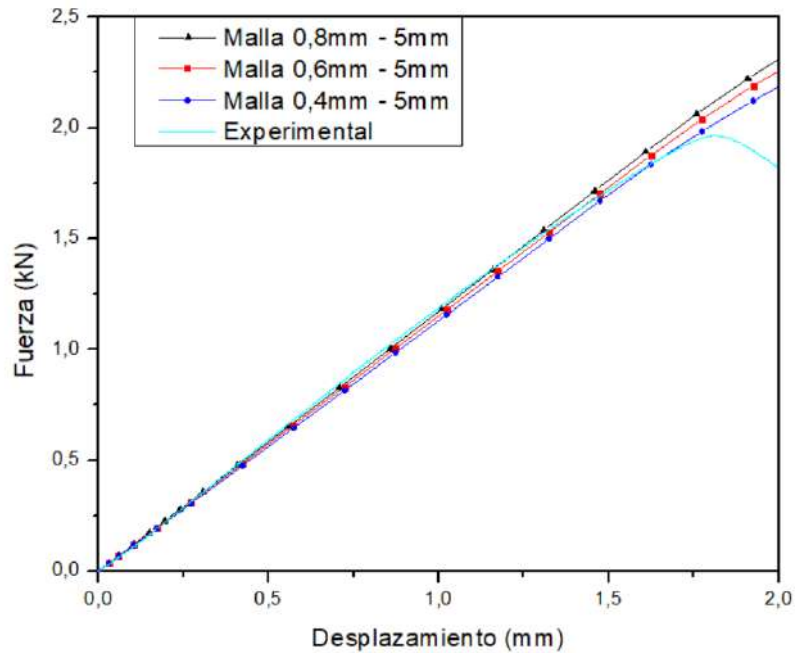


Figura 4.7: Comparación entre el ensayo experimental y simulación con un cuarto de geometría.

Nuevamente, la simulación representa correctamente el comportamiento real de la estructura. Como es esperable, esta simplificación de la geometría disminuyó en gran medida el tiempo de procesamiento, sobretodo por la gran disminución en el número de nodos comparado con las geometrías anteriores.

Además, en este caso, se estudió otra característica de la malla: la distancia entre los nodos ubicados en el espesor de la estructura, que hasta esta instancia era de 5 mm.

Al realizar diversas simulaciones, se observó que el aumento o disminución en la distancia entre nodos en el espesor de la estructura no alteraba el resultado obtenido. Esto indica que en el ensayo de compresión la estructura está en un estado de deformación plana o *plane strain*, y por ende no hay deformaciones en el espesor.

Simulación con geometría 2D

Por lo anteriormente mencionado, se tomó la decisión de reducir la estructura 3D a un boceto 2D, con el objetivo de continuar la simplificación del modelo. Cabe recalcar que si bien el mallado es en dos dimensiones, en el software se introduce la dimensión del espesor y se aplica la condición de deformación plana. En la figura 4.8 se observa el modelo 2D, en el cual se redujo la estructura a la mitad mediante un corte.

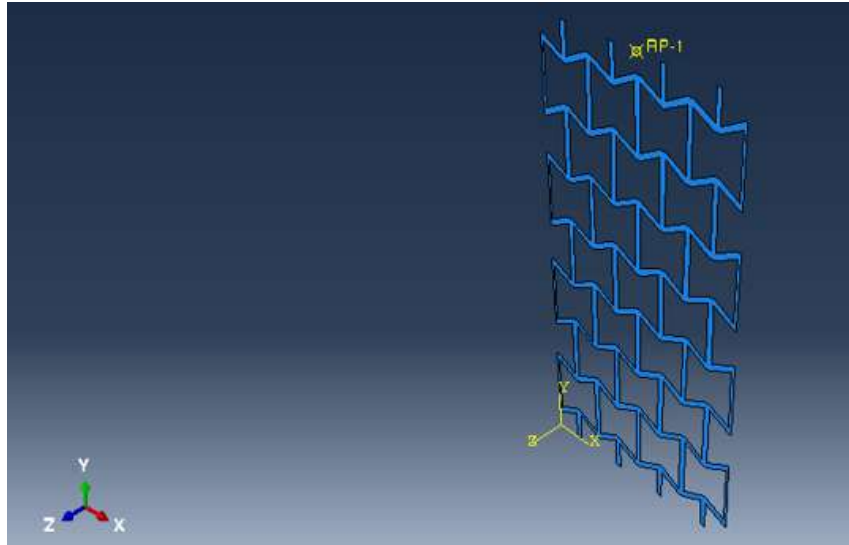


Figura 4.8: Modelo 2D de la estructura.

Las condiciones de contorno fueron las siguientes:

- Aristas inferiores con desplazamiento en X y giro en Z impedido.
- Aristas de el lado derecho simetría respecto del eje X (desplazamientos en X, rotaciones en Z e Y restringidos)
- Aristas superiores con desplazamiento de 3 mm en Y hacia abajo, rotación en Z impedido.

En la imagen 4.9 se se observan las curvas obtenidas por medio de la simulación con el modelo 2D, con distintas mallas, y una de las curvas resultantes del ensayo real de la estructura.

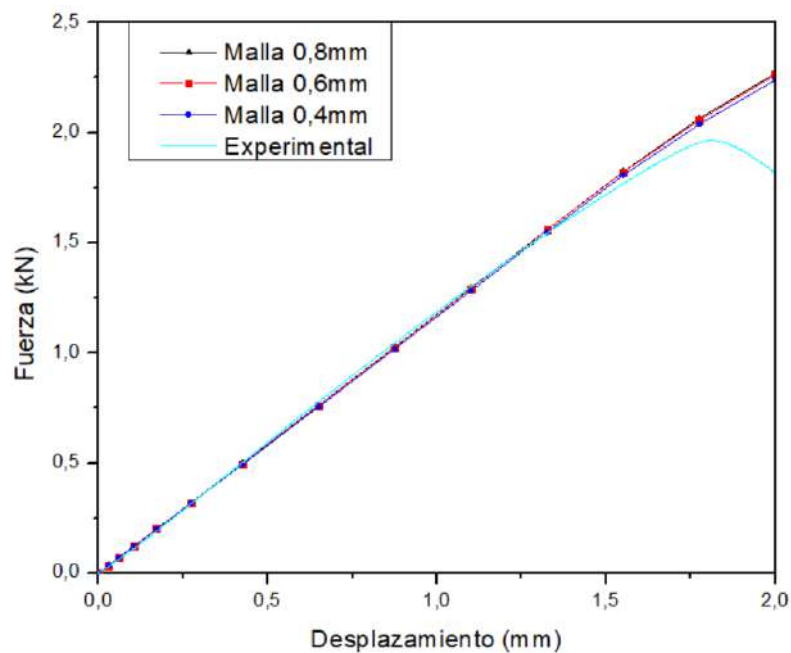


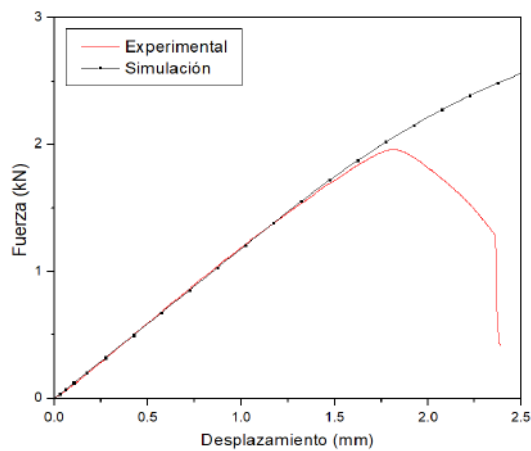
Figura 4.9: Comparación entre el ensayo experimental y simulación con un cuarto de geometría.

En las curvas obtenidas, se observa que el modelo nuevamente representa correctamente el comportamiento real de la estructura y por ello las curvas obtenidas de la simulación son muy similares a la curva experimental. Esta simplificación permitió disminuir los tiempos de procesamiento por debajo de un minuto.

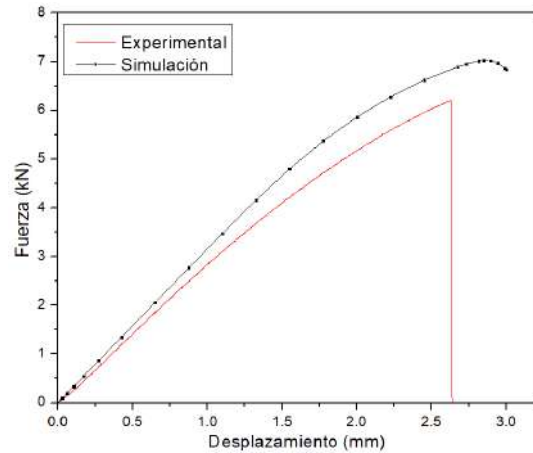
Comparación de todas las estructuras celulares

Una vez realizada la simplificación del último modelo, se realizaron las simulaciones de todas las estructuras auxéticas restantes con su modelo 2D.

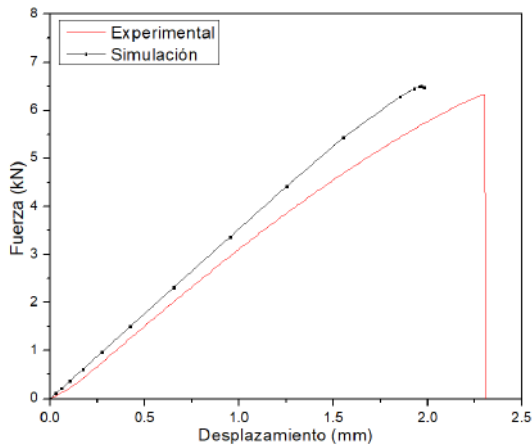
En la figura 4.10 se muestra la comparación de los resultados de la simulación de cada estructura con su ensayo real.



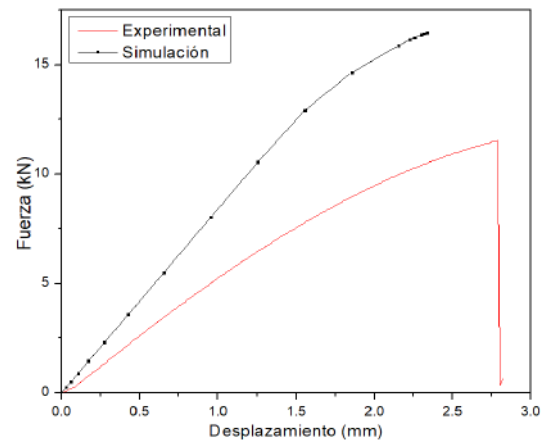
(a) Simulación vs. Experimental REH_15_08.



(b) Simulación vs. Experimental REH_15_12.



(c) Simulación vs. Experimental REH_10_08.



(d) Simulación vs. Experimental REH_10_12.

Figura 4.10: Comparación entre curvas experimentales y simulación optimizada para cada geometría.

Como puede observarse en las figuras, la simulación de la estructura REH_15_08, que fue analizada previamente en esta sección, posee una correspondencia casi punto a punto con una de las curvas experimentales, a excepción del rango donde la fuerza comienza a disminuir.

Las estructuras REH_15_12 y REH_10_08 presentan bajas diferencia si se comparan las simulaciones y los ensayos reales.

Finalmente, la geometría REH_10_12 no presentan correspondencia entre las simulaciones y los ensayos experimentales, pudiendo deberse a la excesiva simplicidad del modelo adoptado.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo, se abordó la manufactura mediante la técnica DLP, evaluación mecánica y simulación de estructuras auxéticas hexagonales reentrantes, además de la caracterización físico-química y mecánica de la resina utilizada para su fabricación. Los resultados obtenidos permiten destacar los siguientes puntos:

Evaluación de los parámetros de impresión

Respecto a la evaluación de los parámetros de impresión, se logró identificar al tiempo de exposición de las capas como el parámetro más relevante para garantizar una impresión adecuada. Además, la evaluación de los distintos tiempos de exposición permitieron determinar que un tiempo de 2 s es suficiente para la obtención de piezas libres de defectos y con buen acabado superficial. Finalmente, se tomó un criterio conservador y se optó por utilizar un tiempo de 2,5 s para llevar a cabo las impresiones.

Caracterización físico-química del material

En cuanto a la caracterización físico-química del material, el análisis por FTIR evidenció que la resina alcanza un grado de conversión máximo del 65 % al aplicarle un post-tratamiento UV, y un 73 % cuando se aplica, además, un tratamiento térmico. Adicionalmente, el análisis por FTIR permitió obtener la curva de la cinética de curado de la resina.

Para poder determinar el grado de curado de las piezas impresas sin la necesidad de realizar ensayos de FTIR, se intentó por ajustar un modelo de grado de conversión en función de la T_g . Esta herramienta resulta muy útil para conocer el grado de conversión en cualquier ambiente de post-curado sólo con una medida de T_g , generalmente obtenida por DSC. Sin embargo, las dificultades asociadas a la sensibilidad del equipo DSC limitaron la precisión en la determinación de las T_g de la resina líquida y de la completamente curada, lo que afectó al ajuste del modelo. Finalmente, algunos parámetros no pudieron ser determinados experimentalmente y fueron obtenidos de estudios previos realizados a otras resinas.

Además, existieron dificultades para implementar el modelo. En muchos casos, las T_g que se detectaban no eran repetitivas dentro de muestras con el mismo tratamiento. Por otro lado, las T_g que se detectaron con claridad y que

resultaron repetitivas, no mostraron variaciones detectables entre muestras que objetivamente tenían grados de conversión diferentes.

Estos resultados, permitieron concluir que la técnica de DSC, con los equipos disponibles y con este tipo de resina, no era lo suficientemente sensible como para tener una lectura de T_g confiable y por consiguiente, una lectura del grado de conversión objetiva.

Influencia del post-procesamiento en las propiedades mecánicas

En cuanto a la influencia del post-procesamiento, se identificó una clara influencia del grado curado y del tiempo en las propiedades mecánicas de la resina.

El criterio finalmente adoptado para optimizar las condiciones de post-curado, fue encontrar la combinación de tiempo de curado UV y tratamiento térmico en estufa, a partir del cual las propiedades mecánicas en tracción se estabilizaran. Este método, demostró ser el más adecuado para optimizar las condiciones de post-curado y obtener muestras con propiedades mecánicas estables en el tiempo.

Finalmente, se definió un procedimiento de fabricación óptimo, compuesto por 40 minutos de exposición UV y un tratamiento térmico de 2 horas a 80 °C.

Evaluación mecánica de estructuras celulares

En esta etapa, se logró la generación e impresión efectiva de estructuras celulares auxéticas. Los ensayos de compresión uniaxial junto con el uso de DIC, permitieron evidenciar el comportamiento auxético característico. Por su parte, las estructuras auxéticas mostraron ser las más eficientes en la absorción de energía por unidad de densidad aparente. Además, se determinó que un coeficiente de Poisson más cercano a cero favorece la absorción de energía.

Entre los parámetros geométricos evaluados, el espesor de pared se identificó como el factor más influyente en la absorción de energía.

Finalmente, se estableció que la estructura REH_10_12, de mayor espesor de pared y menor altura de celda, presentó la mayor absorción de energía por unidad de densidad aparente entre las estructuras evaluadas.

Simulación de estructuras celulares

En relación a las simulaciones, se utilizó un modelo isotrópico elastoplástico con endurecimiento por deformación. El ajuste del modelo se llevó a cabo utilizando los resultados obtenidos de ensayos de tracción uniaxial del material.

Este modelo permitió replicar el comportamiento mecánico de algunas de las estructuras ensayadas experimentalmente, sin embargo, para una de las estructuras, no se obtuvo el mismo resultado, lo cual podría atribuirse a que el modelo implementado es demasiado simple.

No obstante, se llevó a cabo una optimización de las simulaciones mediante la simplificación de la geometría utilizada. Este enfoque no solo mantuvo la calidad de los resultados obtenidos, sino que también redujo significativamente los tiempos de procesamiento y el esfuerzo computacional.

Bibliografía

- [1] Yongle Sun y QM Li. «Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling». En: *International Journal of Impact Engineering* (2018).
- [2] Lorna Jane Gibson. «The elastic and plastic behaviour of cellular materials». Tesis doct. Cambridge University, 1981. DOI: 10.17863/cam.14049. URL: <https://doi.org/10.17863/CAM.14049>.
- [3] Michael F Ashby y Lorna J Gibson. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge University, 1997, págs. 2-10.
- [4] Qiang Gao et al. «Multi-objective crashworthiness optimization for an auxetic cylindrical structure under axial impact loading». En: *Materials & Design* (2018). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.063>.
- [5] Shuai Chen et al. «A novel gradient negative stiffness honeycomb for recoverable energy absorption». En: *Composites Part B: Engineering* (2021). DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108745>.
- [6] Benhuai Li et al. «Experimental study of a honeycomb energy-absorbing device for high-speed trains». En: *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers. Part F, Journal Of Rail And Rapid Transit* 234 (2019). DOI: 10.1177/09544409719882564. URL: <https://doi.org/10.1177/09544409719882564>.
- [7] Youdong Xing et al. «Energy absorption and optimization of Bi-directional corrugated honeycomb aluminum». En: *Composites Part B: Engineering* (2021). DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108914. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108914>.
- [8] Zhixin Huang, Xiong Zhang y Chongyi Yang. «Experimental and numerical studies on the bending collapse of multi-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes». En: *Composites Part B: Engineering* (2019). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107527. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107527>.
- [9] T. N. Tran et al. «Crashworthiness analysis and optimization of standard and windowed multi-cell hexagonal tubes». En: *Structural and Multidisciplinary Optimization* (2020). DOI: 10.1007/s00158-020-02794-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02794-y>.
- [10] Asliah Seharang, Abdul Hadi Azman y Shahrum Abdullah. «A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts». En: *Advances in Mechanical Engineering* (2020). DOI: 10.1177/1687814020916951. URL: <https://doi.org/10.1177/1687814020916951>.
- [11] Ken E Evans. «Auxetic polymers: a new range of materials». En: *Endeavour* 15.4 (1991), págs. 170-174. ISSN: 0160-9327. DOI: [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(91\)90123-S](https://doi.org/10.1016/0160-9327(91)90123-S). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016093279190123S>.
- [12] Raúl Jiménez Espada. «Modelización de estructuras auxéticas». En: *Universidad Carlos III de Madrid* (2017).
- [13] Kusum Meena y Sarat Singamneni. «A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects». En: *Materials & Design* 173 (2019), pág. 107779. ISSN: 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107779>.

- [14] Swapnil Vyavahare, Soham Teraiya y Shailendra Kumar. «FDM manufactured auxetic structures: An investigation of mechanical properties using machine learning techniques». En: *International Journal of Solids and Structures* 265-266 (2023), pág. 112126. ISSN: 0020-7683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112126>.
- [15] D. Varas et al. «Experimental analysis at different loading rates of 3D printed polymeric auxetic structure based on cylindrical elements». En: *Polymer Testing* 119 (2023), pág. 107930. ISSN: 0142-9418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107930>.
- [16] Ben Redwood, Filemon Schffer y Brian Garret. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017, págs. 27, 28, 36, 73, 77, 78, 101.
- [17] Yildirim H. Bağis y Frederick A. Rueggeberg. «Effect of post-cure temperature and heat duration on monomer conversion of photo-activated dental resin composite». En: *Dental Materials* 13.4 (1997), págs. 228-232. DOI: 10.1016/s0109-5641(97)80033-4. URL: [https://doi.org/10.1016/s0109-5641\(97\)80033-4](https://doi.org/10.1016/s0109-5641(97)80033-4).
- [18] S H Park y C S Lee. «The difference in degree of conversion between light-cured and additional heat-cured composites.» En: *PubMed* 21.5 (1996), págs. 213-217. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9484175>.
- [19] Creality. *How Long to Cure Resin Prints?* Accedido: 2024-12-03. 2024. URL: <https://store.creality.com/blog/how-long-to-cure-resin-prints?srsltid=AfmBOopEAD4C0fxSghAL-sddkoWybTcNqobk6QaKkm4orKnZAK-2V-J5>.
- [20] Enrique Saldivar-Guerra y Eduardo Vivaldo-Lima. *Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing*. John Wiley & Sons, 2013.
- [21] Da-Wen Sun. *Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control*. Academic Press, 2009, págs. 146-173.
- [22] Alexandra Jacqueline Aquino Valverde. «Efectividad de fotopolimerización usando lámparas led: Una revisión de la literatura». En: *Revista Científica Odontológica* 10.3 (2022), e120. DOI: 10.21142/2523-2754-1003-2022-120. URL: <https://doi.org/10.21142/2523-2754-1003-2022-120>.
- [23] Ruth N. Schmarsow et al. «Core-crystalline nanoribbons of controlled length via diffusion-limited colloid aggregation». En: *Soft Matter* 15.23 (2019), págs. 4751-4760. DOI: 10.1039/c9sm00615j. URL: <https://doi.org/10.1039/c9sm00615j>.
- [24] Gabbott Paul. *Principles and Applications of Thermal Analysis*. Blackwell Pub, 2008. DOI: 10.1002/9780470697702.
- [25] ISO. *ISO 527-1:2019 - Plastics — Determination of tensile properties*. Norma Internacional. 2019.
- [26] Amer Alomarah et al. «Compressive properties of 3D printed auxetic structures: experimental and numerical studies». En: *Virtual And Physical Prototyping* 15.1 (2019), págs. 1-21. DOI: 10.1080/17452759.2019.1644184. URL: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1644184>.
- [27] Ross Johnston y Zafer Kazanci. «Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression». En: *Additive Manufacturing* 38 (2020). DOI: 10.1016/j.addma.2020.101783. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101783>.
- [28] Sohail Gohar et al. «Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses». En: *Journal Of Materials Research And Technology* 15 (2021), págs. 394-408. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.149. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.149>.
- [29] Dassault Systèmes. *Abaqus Theory Manual*. Accedido: noviembre de 2024. 2009. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/stm/default.htm?startat=ch04s03ath104.html>.
- [30] Dassault Systèmes. *Abaqus User's Manual, Version 6.6*. Accedido: 2024-12-03. 2009. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt06ch22s01alm01.html>.

- [31] Dassault Systèmes. *Element Library: Abaqus User's Manual, Version 6.6*. Accedido: 2024-12-03. 2009. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt06ch22s01ael02.html>.