



Universidad de Jaén

Trabajo fin de grado

ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS DE PANAL DE ABEJA FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Alumno: Hidalgo Peinado, Daniel

Tutor: Prof. D. Alberto J. García Collado

Dpto: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

RESUMEN

Debido al avance de la tecnología en los últimos años, la mayoría de piezas diseñadas en CAD (Computer Aided Design) se fabrican mediante impresión 3D, lo cual, además de ofrecer una alta precisión y calidad en los resultados obtenidos y reducir el coste del operario al automatizar el proceso, facilita la producción en serie de todo tipo de variantes, para así estudiar las ventajas e inconvenientes en cada uno de los casos [13].

El empleo de una estructura de panel de abeja (o como también se denominará en adelante, honeycomb) es una variante emergente, aunque los primeros archivos conocidos datan de 1638, cuando Galileo Galilei declaró el panal de abeja como la estructura perfecta en cuanto a robustez y ligereza.

A día de hoy, su empleo es cada vez más común, incluyendo sectores como la aviación y la automoción, además de su emergente empleo en la arquitectura, al aportar resistencia, rigidez y ligereza con un impacto medioambiental mínimo. Aplicándolo a nuestro estudio, se ha demostrado que dicha disposición otorga una mayor resistencia en tracción y compresión.

Con respecto a la impresión empleando la técnica FDM, que es una tecnología basada en filamentos en la que un cabezal extruye de forma precisa mediante el control por temperatura un material termoplástico por capas. En nuestro caso, emplearemos la impresora 3D Markforged Onyx Series, caracterizada por su versatilidad en la creación de piezas compuestas (en nuestro caso, fibra de vidrio o fiberglass), que poseen un gran rendimiento trabajando a alta temperatura (130 °C) [13].

Además, la incorporación de fibras de refuerzo otorga la posibilidad de crear piezas formadas por distintos componentes, variando así las propiedades y ofreciendo un amplio abanico de posibilidades.

El diseño de dicha estructura se ha realizado en Solidworks, fabricado mediante impresión 3D y testeado con la máquina universal de ensayos 'Instron', empleando una estructura honeycomb determinada, compuesta por matriz de nylon con fibra de carbono (Onyx) reforzada con fibra de vidrio continua.

ABSTRACT

As the technology keeps developing in the last few years, most of the designs featured in CAD are manufactured in 3D, which offers high precision, quality and decreases the operator costs due to the automatization, facilitating the mass production in order to analyze the advantages and disadvantages [13].

The idea of producing a honeycomb structure is an emerging variant, though the first researches date from the seventeenth century, as Galileo Galilei stated the honeycomb structure as the ideal one in terms of sturdiness and lightness performance.

Nowadays, this structure is acquiring fame, mainly in the automotive and aviation sector, and even in the architecture field, due to its strength, stiffness and lightness reducing its environmental impact. In connection to our project, this setup upgrades the results obtained in the traction-compression test.

The applied technology chosen for 3D printing is the FDM (Fused Deposition Modeling), based in filaments with a head, which extrude precisely controlled by temperature, layer-by-layer. Using the 3D-printed Markforged Onyx Series, distinguished by its versatility to manufacture composites parts (fiberglass) finding an acceptable behavior working at high temperatures (around 130°C) [13].

Furthermore, using fiberglass as a reinforcement material grants the chance to create composite parts, offering a wide range of possibilities.

In this project we have developed a customized honeycomb structure employing a micro carbon fiber filled nylon (Onyx) with fiberglass as a reinforcement material, using CAD software Solidworks, 3D manufacturing and tested with the universal testing machine 'Instron'.

Índice de contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	14
2. ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1 Estudios previos	18
2.2 Estructuras Honeycomb.....	22
2.3 Otras Estructuras Auxéticas.....	28
2.4 Materiales empleados	30
3. NORMATIVA EMPLEADA.....	32
4. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES	34
5. EQUIPAMIENTO.....	35
5.1 Diseño mediante Solidworks.....	35
5.2 Software de impresión Eiger 3D Markforged.....	35
5.3 Mallado empleando Altair HyperMesh.....	38
5.4 Modelado del problema con Abaqus.....	38
5.5 Máquina universal de ensayos Instron	39
5.6 Basler Video Recorder Software.....	41
5.7 Correlación de imágenes mediante VIC2D.	41
6. ENSAYOS REALIZADOS.....	41
6.1 Diseño mediante Solidworks.....	41
6.2 Software de impresión Eiger 3D Markforged.....	43
6.3 Mallado empleando Altair Hypermesh.....	47
6.4 Modelado del problema con Abaqus.....	49
6.5 Máquina universal de ensayos Instron	57
6.6 Basler Video Recorder	64
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	72

8. CONCLUSIONES	84
9. REFERENCIAS.....	87
10. FUTUROS PROYECTOS.....	88
ANEXO I: Mantenimiento de la Impresora 3D Markforged	89
ANEXO II: Composites Design Guide.	89
ANEXO III: Planos	95

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Proceso de fabricación de prototipos por capas [14].	14
Ilustración 2: Impresión de un riñón de animal artificial, funcional [14].	15
Ilustración 3: Prótesis artificial de una pierna.	15
Ilustración 4: Estructura de panal de abeja o honeycomb [11].	16
Ilustración 5: Simulación mediante elementos finitos de un ensayo de choque.	17
Ilustración 6: Coeficiente de Poisson [20].	18
Ilustración 7: Geometría de la estructura en panal de abeja [4].	19
Ilustración 8: Sketch del panal de abeja empleado en este estudio.	20
Ilustración 9: Modelado mediante elementos finitos [4].	20
Ilustración 10: Ensayos de compresión y tracción realizados, y reacciones generadas.	21
Ilustración 11: Tensiones y coeficientes de Poisson obtenidos [4].	21
Ilustración 12: Comparativa entre los resultados obtenidos.	22
Ilustración 13: Estructuras honeycomb mencionadas [1].	23
Ilustración 14: Evolución de las estructuras de panal de abeja [1].	23
Ilustración 15: Pérdidas en la transmisión del sonido en una placa plana.	24
Ilustración 16: Ejemplos de estructuras con alto coeficiente de absorción del sonido [1].	25
Ilustración 17: Hex Tower [15].	25
Ilustración 18: Representación de las propiedades aislantes.	26
Ilustración 19: Publicaciones anuales sobre este tipo de estructuras.	26
Ilustración 20: Topología de ciertas estructuras fabricadas mediante sinterizado [1].	27
Ilustración 21: Estructura honeycomb hexagonal híbrida para mejorar sus propiedades mecánicas.	27
Ilustración 22: Configuración interna de una estructura honeycomb.	28
Ilustración 23: Dos tipos de estructuras auxéticas [2].	28
Ilustración 24: Curvas tensión – deformación en cada caso para los ángulos descritos.	29
Ilustración 25: Resultados obtenidos con datos experimentales y FEM [2].	29

Ilustración 26: Curva tensión-deformación para los composite base [8].	31
Ilustración 27: Curva tensión-deformación para los materiales de refuerzo [8].	32
Ilustración 28: Modos de rotura aceptados por la norma.	34
Ilustración 29: Gráfica Tensión – Deformación de muestra [16].	34
Ilustración 30: Patrón de relleno triangular.	35
Ilustración 31: 4 capas apiladas de Onyx en la base y parte superior.....	36
Ilustración 32: Configuración de fibra isotrópica.	36
Ilustración 33: Configuración de fibra concéntrica.	37
Ilustración 34: Refuerzo en contornos externos exclusivamente.	37
Ilustración 35: Refuerzo en contornos externos e internos.....	37
Ilustración 36: Empleo de 1 anillo exterior concéntrico.	38
Ilustración 37: Interfaz gráfica Altair HyperMesh.	38
Ilustración 38: Control por carga vs control por desplazamiento.	40
Ilustración 39: Máquina universal de ensayos ‘Instron’	40
Ilustración 40: Controles para desplazamiento de las mordazas.....	40
Ilustración 41: Pantalla inicial software VIC-2D.	41
Ilustración 42: Dimensiones de una celdilla.....	42
Ilustración 43: Modelado de la estructura en Solidworks.	43
Ilustración 44: Representación de la estructura en Markforged.	44
Ilustración 45: Vista interna de la estructura en panal de abeja.	45
Ilustración 46: Detalles preliminares de la impresión en 3D.	45
Ilustración 47: Vista preliminar.	46
Ilustración 48: Impresión de una capa de fibra de vidrio.....	46
Ilustración 49: Estructura de panal de abeja resultante.	47
Ilustración 50: Parámetros configurables del software Altair HyperMesh.....	47
Ilustración 51: Representación de los elementos barra.....	48
Ilustración 52: Implementación de las propiedades en Notepad++.	50

Ilustración 54: Propiedades de la fibra de vidrio.....	50
Ilustración 55: Comprobación de la asignación de materiales.	51
Ilustración 56: Distribución de capas internas en la estructura.....	51
Ilustración 57: Mallado resultante en Abaqus.	52
Ilustración 58: Edit Model Attributes.	52
Ilustración 59: Restricción de movilidad en la parte inferior de la estructura.....	53
Ilustración 60: Zoom parte inferior de la estructura.....	53
Ilustración 61: Mallado parte superior estructura.....	54
Ilustración 62: Distribución de cargas de presión en la parte superior de la estructura.	55
Ilustración 63: Parámetros del 'Step'	55
Ilustración 64: Modificación de parámetros adicionales.	56
Ilustración 65: Campo de desplazamientos.	57
Ilustración 66: Colocación de la estructura en la máquina de ensayos.	58
Ilustración 67: Displays activos.	59
Ilustración 68: Configuración del método de ensayo empleado.	59
Ilustración 69: Configuración del ensayo.	60
Ilustración 70: Almacenamiento de datos de los ensayos.	60
Ilustración 71: Datos extraídos de BlueHill 2.	61
Ilustración 72: Ensayos realizados para una carga de 150N.	62
Ilustración 73: Ensayos realizados para una carga de 500N.	62
Ilustración 74: Ensayos realizados para una carga de 900N.	63
Ilustración 75: Ensayos realizados para carga de rotura.....	63
Ilustración 76: Estructura honeycomb tras aplicar la carga de rotura.....	64
Ilustración 77: Montaje para la obtención de imágenes.....	65
Ilustración 78: Lectura de imágenes y ajuste de 'Subset' y 'Step'.	66
Ilustración 79: Selección del área de estudio.....	67
Ilustración 80: Calibración del ensayo.....	67

Ilustración 81: Start Analysis.	68
Ilustración 82: Remove Rigid Motion.	69
Ilustración 83: Smooth.	69
Ilustración 84: Colocación del extensómetro.	70
Ilustración 85: Strain computation.	71
Ilustración 86: Resultados de deformación obtenidos en el ensayo mediante VIC2D.	71
Ilustración 87: Deformación obtenida en VIC-2D.	72
Ilustración 88: Comparación de los resultados obtenidos en Abaqus y VIC2D.	73
Ilustración 89: Comparación de resultados.	74
Ilustración 90: Nodos analizados.	75
Ilustración 91: Configuración de las cargas en el archivo .inp	75
Ilustración 92: Report Field Output.	76
Ilustración 93: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 1.	77
Ilustración 94: Nodo 504.	78
Ilustración 95: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 2.	78
Ilustración 96: Nodo 2396.	79
Ilustración 97: Zoom del nodo 2396.	79
Ilustración 98: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 3.	80
Ilustración 99: Nodo 2807.	81
Ilustración 100: Zoom nodo 2807.	81
Ilustración 101: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 4.	82
Ilustración 102: Nodo 7929.	83
Ilustración 103: Zoom nodo 7929.	83
Ilustración 104: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 5.	84
Ilustración 105: Coeficiente de Poisson para cada nodo.	85
Ilustración 106: Máximo desplazamiento horizontal para cada nodo.	86
Ilustración 107: Máximo desplazamiento vertical para cada nodo.	86

Ilustración 108: Estructura honeycomb modificada.	88
Ilustración 109: Tamaño máximo permitido para imprimir una pieza.	90
Ilustración 110: Restricciones para la impresión de piezas.....	90
Ilustración 111: Espesor mínimo para el empleo de la fibra de vidrio.....	90
Ilustración 112: Longitudes características mínimas para realizar la impresión.....	91
Ilustración 113: Condiciones de cargas para una pieza en particular.....	91
Ilustración 114: Colocación de la pieza para facilitar la impresión.	91
Ilustración 115: Achaflanado de una pieza.	92
Ilustración 116: Ejemplo de aplicación de cargas sobre una pieza.	92
Ilustración 117: Refuerzo del material.	93
Ilustración 118: Trabajo de las fibras a tracción.	93
Ilustración 119: Flexión de vigas.	94
Ilustración 120: Compresión de una pieza.	94

Índice de tablas

Tabla 1: Dimensiones de la estructura en mm.	19
Tabla 2: Propiedades elásticas de la fibra de vidrio.....	48
Tabla 3: Propiedades plásticas de la fibra de vidrio.....	48
Tabla 4: Propiedades elásticas del Onyx.....	49
Tabla 5: Propiedades plásticas del Onyx.....	49

1. INTRODUCCIÓN

La impresión en 3D es relativamente un campo innovador, ya que sus inicios se remontan a 1976, con la impresora de inyección de tinta. A lo largo de las últimas décadas, se ha ido perfeccionando la técnica, creándose una gran variedad de aplicaciones de la tecnología de impresión 3D. Cabe destacar a Charles Hull, cofundador de 3D Systems, inventor de la estereolitografía. En estas décadas de constante desarrollo, destacamos algunos hitos importantes [14]:

- Fabricación de prototipos capa por capa (1992): La primera máquina fue desarrollada por 3D Systems, cuyo funcionamiento se basaba en un láser ultravioleta que solidificaba un fotopolímero, con un alto grado de imperfección en las piezas obtenidas.

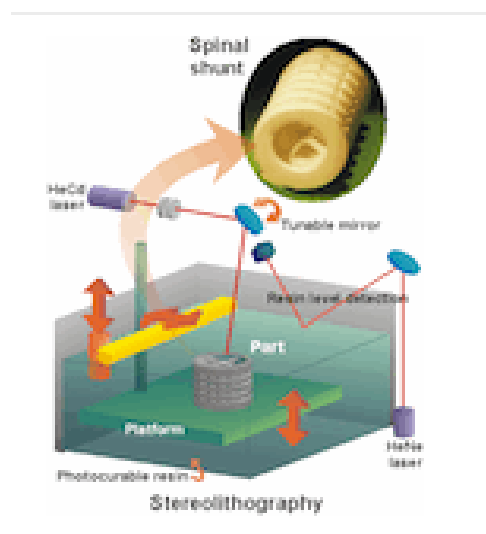


Ilustración 1: Proceso de fabricación de prototipos por capas [14].

- Fabricación de un riñón 3D artificial (2002): Diseño de un riñón en miniatura de animal totalmente funcional, capaz de filtrar sangre y producir orina diluida.

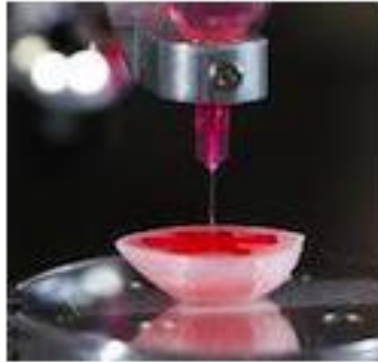


Ilustración 2: Impresión de un riñón de animal artificial, funcional [14].

- Impresión de prótesis (2008): Se consiguió por primera vez que una persona caminara empleando una pieza impresa en 3D, con todos sus componentes (rodilla, pie, etc.) sin necesidad de montaje previo.



Ilustración 3: Prótesis artificial de una pierna.

En cuanto al empleo de las estructuras de panal de abeja, o honeycomb, por definición están formados por estructuras hexagonales, con lo que se consigue alcanzar un alto grado de solidez en la pieza empleando la cantidad mínima de material y reduciendo así costes. En el resultado final obtenido, se reduce la densidad del material, pero en cambio aumenta la resistencia a compresión y cortante [11].

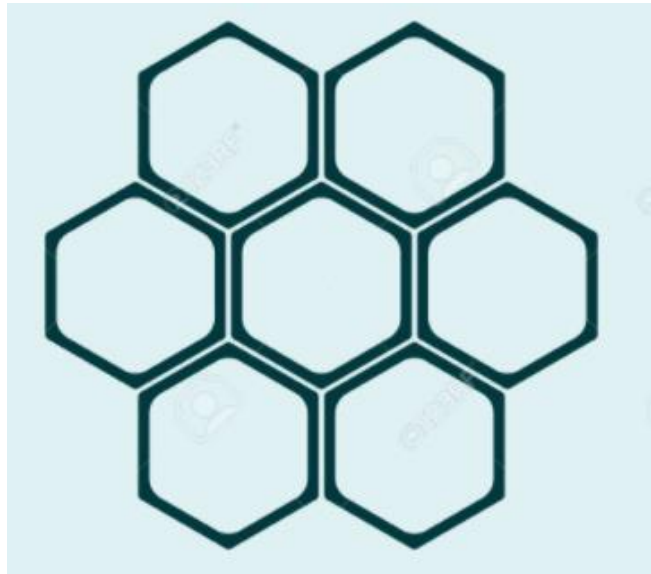


Ilustración 4: Estructura de panal de abeja o honeycomb [11].

Para obtener una alta resistencia, es necesario el empleo de placas interconectadas entre sí. Relacionado con nuestro estudio, también encontramos ejemplos en la naturaleza, como en los caparazones de las tortugas, y en la parte interna de estructuras óseas [14].

En cuanto al ámbito ingenieril, destacamos como más importantes los siguientes hitos:

- En 1726, Jacob Leupold redacta los primeros estudios sobre los efectos de las estructuras honeycomb, incluyendo una publicación de una construcción en vigas de sándwich de Schildknecht.
- En 1915, Hugo Junkers patentó por primera vez las estructuras de panal de abeja con fines aeronáuticos, permitiendo soportar mayores cargas con el empleo de celdas triangulares o hexagonales.
- En 1983, Hadl consigue elaborar los primeros panales mediante extrusión de forma hexagonal.

Sus principales propiedades son la rigidez y la reducción de peso, además de una gran resistencia a compresión debido a la configuración hexagonal. En cuanto a

las propiedades mecánicas, éstas varían según la dirección en la que se emplee la carga, aunque por lo general permitirá una tensión alta y una densidad baja [11].

Los primeros análisis en elementos finitos (FEA) son muy recientes en comparación a otros campos similares, ya que datan de la década de 1950, desarrollados inicialmente por el matemático Richard Courant, mediante el empleo del método de Ritz. Con el paso de tiempo se ha ido perfeccionando la técnica, llegando a desarrollar un conjunto de programas con los que se obtienen resultados muy precisos [14].

Su aplicación en el campo de la ingeniería es muy amplio, tal como la aeronáutica, biomecánica o automoción. Éste último campo quizás es el más conocido de todos, ya que la mayoría de los 'Crash Test' o ensayos de choque emplean esta metodología.

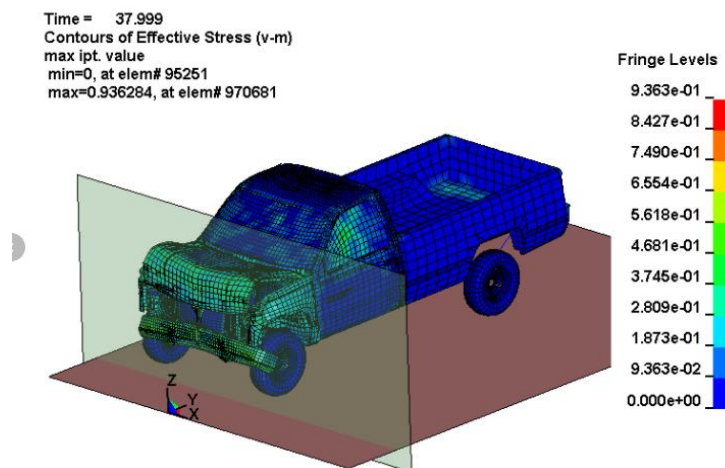


Ilustración 5: Simulación mediante elementos finitos de un ensayo de choque.

Dentro de la ingeniería mecánica, el empleo de FEM en una simulación estructural ayuda a tener una idea de cómo va a transcurrir el ensayo sin necesidad de realizarlo físicamente, pudiendo así implementar mejoras en el diseño antes de realizar el test definitivo, como reducción de peso, materiales y costos, mostrando además posibles taras del diseño. Para nuestro caso, emplearemos tanto Abaqus como Hypermesh, ambos software de pago, además del diseño mediante Solidworks.

La impresión 3D mediante deposición fundida, FDM ('Fused Deposition Modeling'), o FFF ('Fused Filament Fabrication'), data sus inicios en la década de los

80, cuya empresa líder en el sector es Stratasys, empleando termoplásticos para fabricar piezas resistentes, duraderas y dimensionalmente estables [13].

Como método de impresión se empleó la impresora 3D Markforged One Onyx Series, caracterizada por imprimir piezas en material compuesto que son 10 veces más resistentes que el plástico, debido a la incorporación de, para nuestro caso, hilos continuos de fibra de vidrio, conformando un material compuesto, aunque también podría incluirse fibra de carbono o Kevlar, entre otros, mejorando así las propiedades mecánicas [14].

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Estudios previos

Este estudio se basó en un artículo publicado en 15 de Abril de 2020, denominado '3D Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Auxetic Honeycomb Structures', Chao Quan et al, en el que se analiza una estructura auxética, esto es, la realización de ensayos que dan como resultado un coeficiente de Poisson negativo.

Inicialmente, se define el coeficiente de Poisson como el cociente entre la deformación longitudinal que sufre el material en sentido perpendicular al de la fuerza aplicada y la deformación longitudinal perpendicular al anterior.

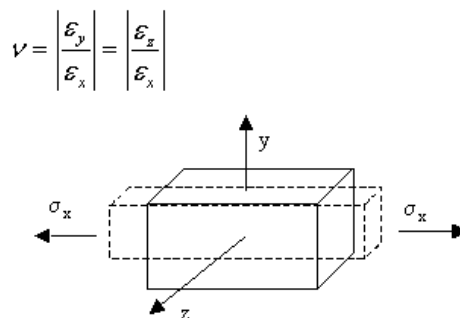


Ilustración 6: Coeficiente de Poisson [20].

Es una propiedad adimensional característica de cada material, y por definición éste valor se encuentra comprendido entre 0 y 0.5. Por ejemplo, para el acero, el valor es de 0.3. Para ello, se diseñó, fabricó y testeó una estructura de panal de abeja

compuesta por CFRTPC (composites termoplásticos con fibra reforzada y continua) con composite base, Kevlar R como material de refuerzo y PLA puro como material termoplástico, con un único patrón de impresión con el fin de asegurar la continuidad de la fibra en el proceso [4].

Dicha estructura de panal de abeja tiene la forma y dimensiones que se muestran en las ilustraciones a continuación.

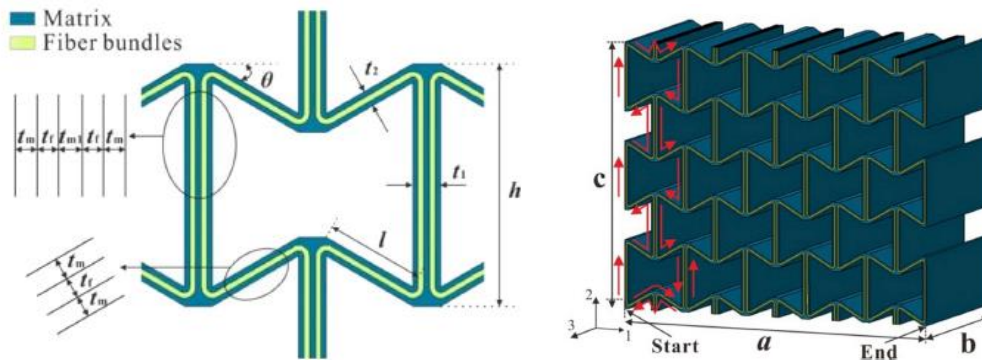


Ilustración 7: Geometría de la estructura en panal de abeja [4].

H	l	t ₁	t ₂	θ	a	B	C
20.52	8.45	2.36	1.38	30	96.80	50	79.34

Tabla 1: Dimensiones de la estructura en mm.

Para la impresión 3D se utilizó la impresora CFRTPC 3D, mientras que la evaluación de las propiedades mecánicas se realizó mediante la máquina universal de ensayos 'MTS', controlada mediante desplazamiento con una velocidad de 2mm/min. La realización de ensayos a tracción y compresión se realizó con la misma máquina, girando 90° la estructura para aplicar las fuerzas en la dirección 1 (eje X) y en la dirección 2 (eje Y) [4].

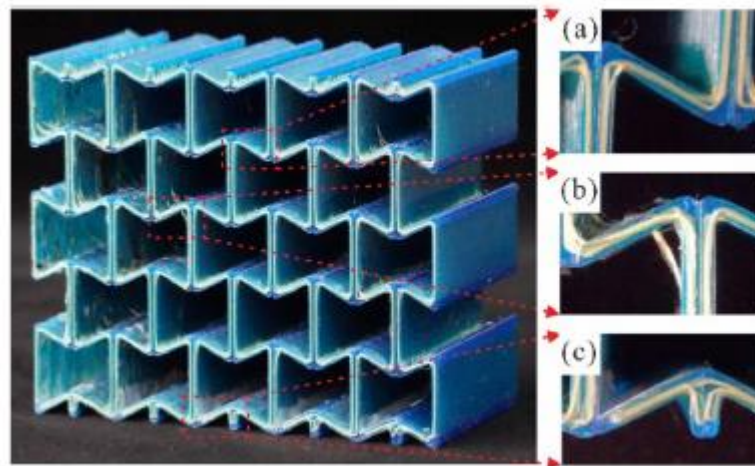


Ilustración 8: Sketch del panal de abeja empleado en este estudio.

Para el modelado mediante elementos finitos (FEM) se empleó Abaqus únicamente, incluyendo asignación de propiedades, mallado y simulación. Se modeló como material isotrópico y sin incluir ninguna deformación plástica, con elementos C3D8R.

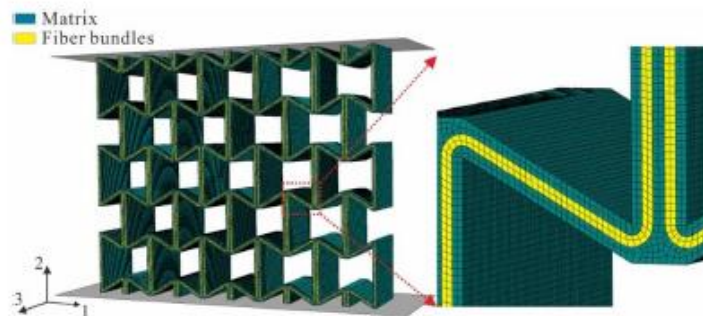


Ilustración 9: Modelado mediante elementos finitos [4].

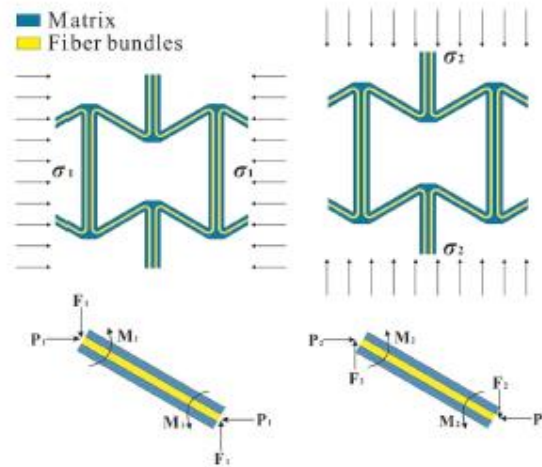


Ilustración 10: Ensayos de compresión y tracción realizados, y reacciones generadas.

Así, los resultados obtenidos se muestran en la siguientes gráficas:

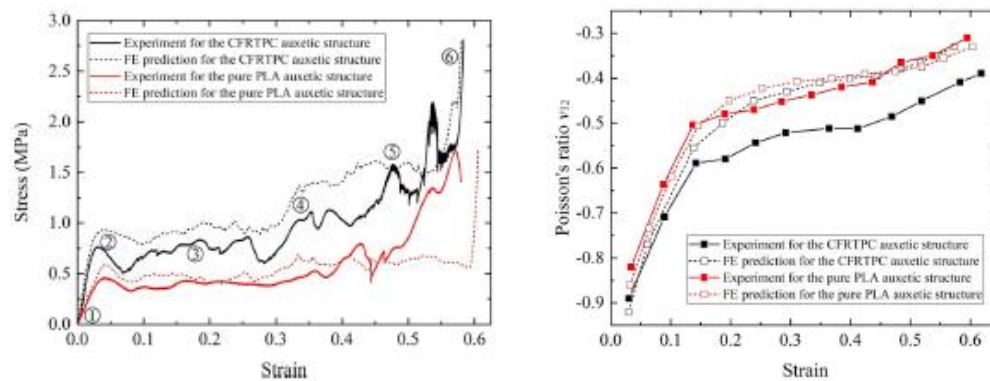


Ilustración 11: Tensiones y coeficientes de Poisson obtenidos [4].

A método de comprobación, se comparó los resultados obtenidos con en los ensayos con los experimentales, obteniendo la siguiente ilustración.

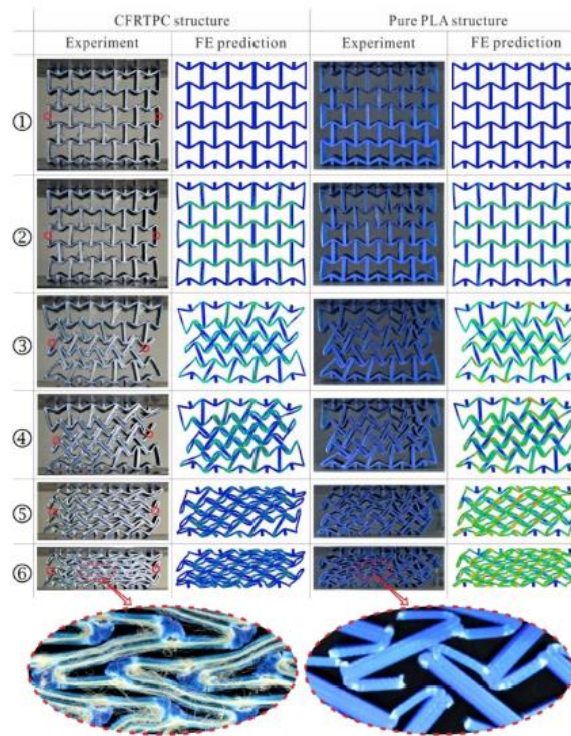


Ilustración 12: Comparativa entre los resultados obtenidos.

Así, se concluyó en este estudio que las estructuras CFRTPC tenían un coeficiente de Poisson más bajo, mostrando un alto incremento de la rigidez a compresión y energía de absorción en las direcciones verticales y horizontales [4]. Partiendo de esta base, se inicia este estudio.

2.2 Estructuras Honeycomb

Como gran parte de los descubrimientos, la estructura honeycomb es uno de los casos más representativos de cómo la naturaleza es un 'laboratorio' que proporciona una gran cantidad de soluciones efectivas, formadas mediante celdas hexagonales unidas y distribuidas de forma uniforme [1].

Cabe destacar que una estructura honeycomb no tiene por qué estar formada exclusivamente por celdas hexagonales, sino que también pueden ser triangulares, cuadradas o incluso circulares, siendo las tres primeras las más eficientes para soportar cargas estructurales.

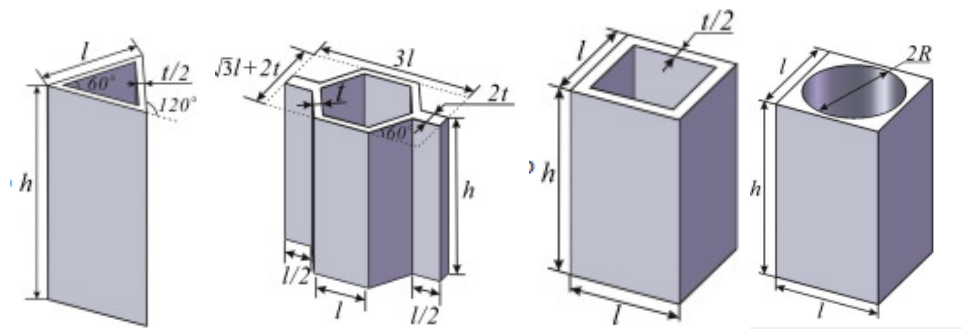


Ilustración 13: Estructuras honeycomb mencionadas [1].

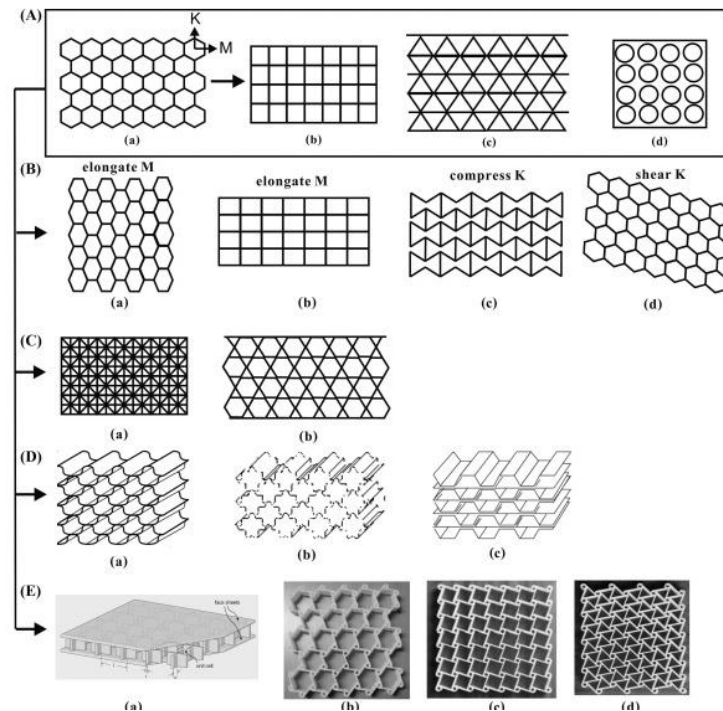


Ilustración 14: Evolución de las estructuras de panal de abeja [1].

Analizando las propiedades mecánicas de dicha estructura, se aprecia que los principales factores de influencia son el material, el tipo de estructura, la porosidad y la densidad relativa. Por ejemplo, un estudio de Zhu y Mills, en el cual se analizó la compresión uniaxial en el plano, empleando la misma estructura pero con un amplio rango de materiales (desde metal hasta polímeros), afirmando así una fuerte dependencia de esta propiedad.

En términos de análisis de la celda empleada para la formación de la estructura, Fleck y Qiu realizaron una serie de ensayos para predecir el comportamiento elastoplástico de una celosía en 2D empleando distintas configuraciones, y obteniendo como resultados que, empleando celdas hexagonales se deformaban mediante flexión, mientras que las estructuras triangulares fallaban en los nodos que interconectaban las celdas [1].

Para encontrar la primera vez que se planteó este problema desde un punto de vista matemático hay que remontarse al siglo III A.C aproximadamente, cuando Papo de Alejandría (290-350 A.C) propuso el siguiente axioma: ‘La mejor manera de dividir un plano en regiones de igual área y utilizando el mínimo perímetro total es empleando un teselado hexagonal’.

Analizando las propiedades acústicas, se detecta que al golpear una onda de sonido este tipo de estructuras, se divide en tres partes (efecto de dispersión del sonido, energía absorbida por la misma y reflejada). [1].

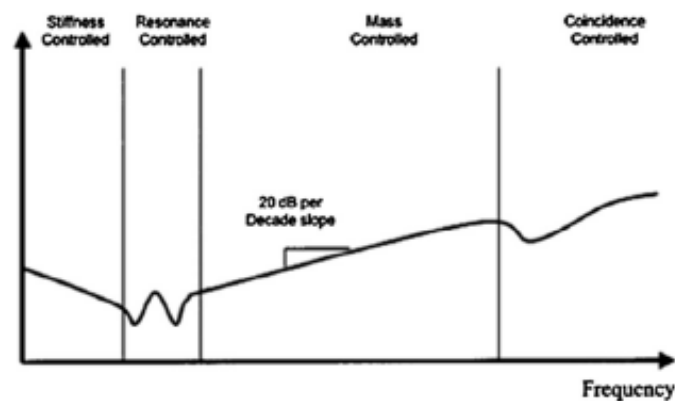


Ilustración 15: Pérdidas en la transmisión del sonido en una placa plana.

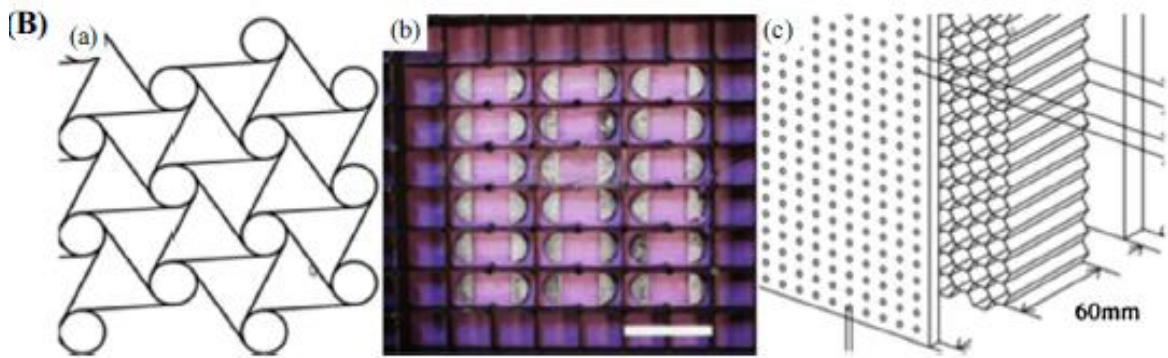


Ilustración 16: Ejemplos de estructuras con alto coeficiente de absorción del sonido [1].

En el ámbito de la arquitectura, esta configuración en panal de abeja se emplea como parámetro totalmente innovador, con una forma de tubo hexagonal, consiguiendo así un importante ahorro de energía, ser respetuoso con el medio ambiente, y proporcionando propiedades contra terremotos.

Uno de los ejemplos más ilustrativos se encuentra en la 'Hex Tower', diseñada por el arquitecto Michel Rojkind, que se encuentra en Santa Fe (México), compuesto por 10 torres residenciales, incluyendo tiendas comerciales en sus cuatro primeras plantas. Como se aprecia, tiene una estructura muy innovadora, compuesta por múltiples hexágonos que se cierra en su parte inferior [15].

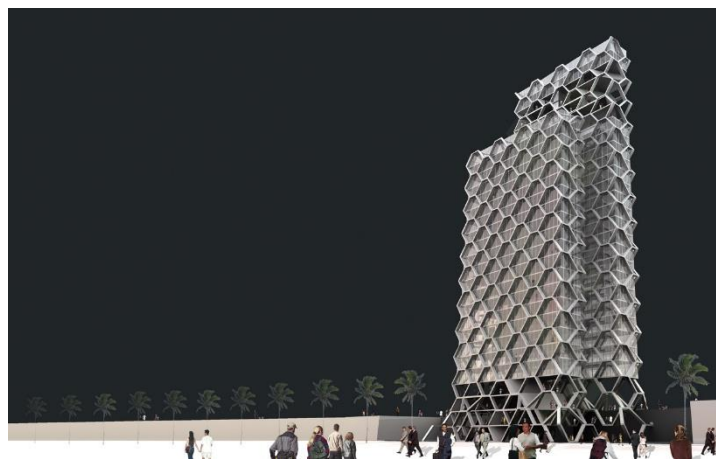


Ilustración 17: Hex Tower [15].

Además, como se ha comentado anteriormente, también se hace uso de sus propiedades aislantes para, por ejemplo, colectores solares, cubiertas para tejados, calentamiento de superficies o iluminación para edificios.

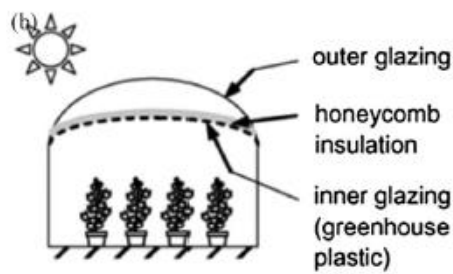


Ilustración 18: Representación de las propiedades aislantes.

En estos últimos años de constante desarrollo, se han empleado una gran variedad de materiales, incluyendo fibra de vidrio, Kevlar reforzado con plástico, polipropileno y metales (por lo general, aluminio). Esto, unido al avance de las tecnologías, reducción de costes y mejora de los procesos de fabricación, ha propiciado un aumento considerable, año a año, de los estudios relacionados con estas estructuras en panal de abeja.

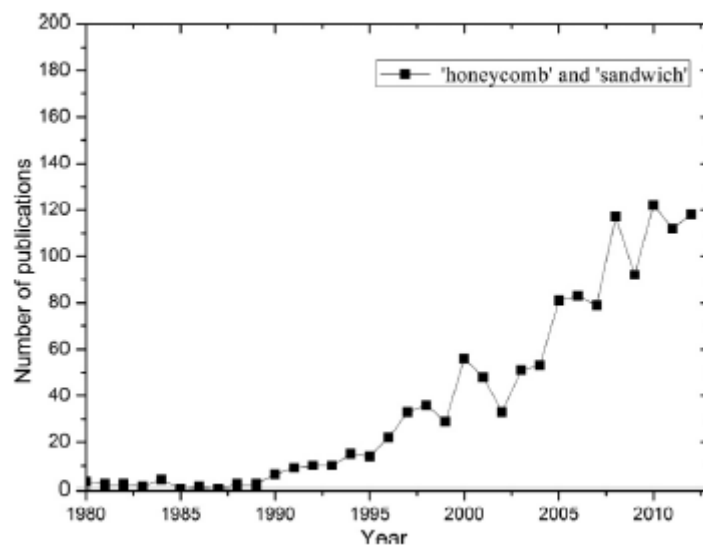


Ilustración 19: Publicaciones anuales sobre este tipo de estructuras.

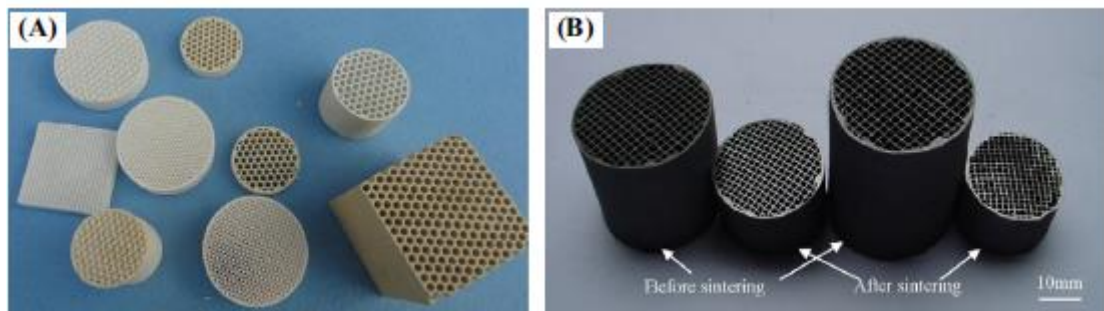


Ilustración 20: Topología de ciertas estructuras fabricadas mediante sinterizado [1].

Dentro de las futuras aplicaciones, destaca las superficies superhidrofóbicas, caracterizadas por su porosidad única, tanto a nivel micromolecular y nanomolecular, además de una baja resistencia a la fluencia, ideal para aplicaciones como deshielo, resistencia a la corrosión o a la conducción.

Por ello, lo más interesante es que podrían evitar la acumulación de hielo en aviones y otras estructuras, evitando así el desgaste que se produciría y gastos estratosféricos para conseguir el deshielo de dicha superficie, que además no serían recursos muy limpios con el medio ambiente [1].

Mientras, los avances científicos en este campo se centran en el desarrollo de forma más comercial de productos con este tipo de estructura, incluyendo su fabricación, comportamiento y optimización del diseño para potenciar así sus propiedades mecánicas, térmicas y aislantes), incluyendo la optimización del diseño.

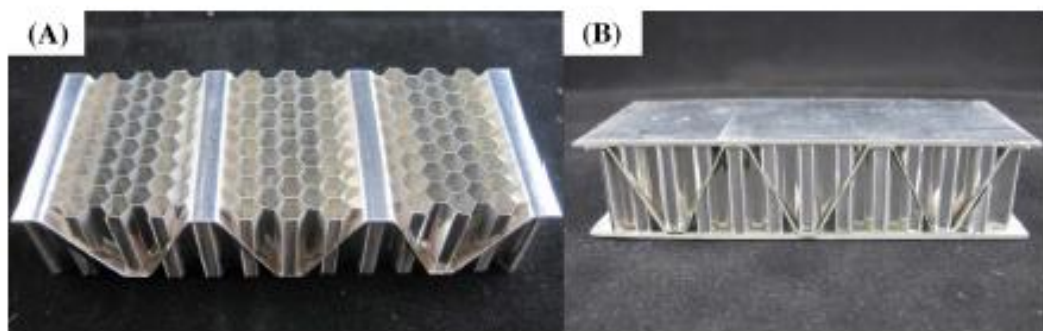


Ilustración 21: Estructura honeycomb hexagonal híbrida para mejorar sus propiedades mecánicas.

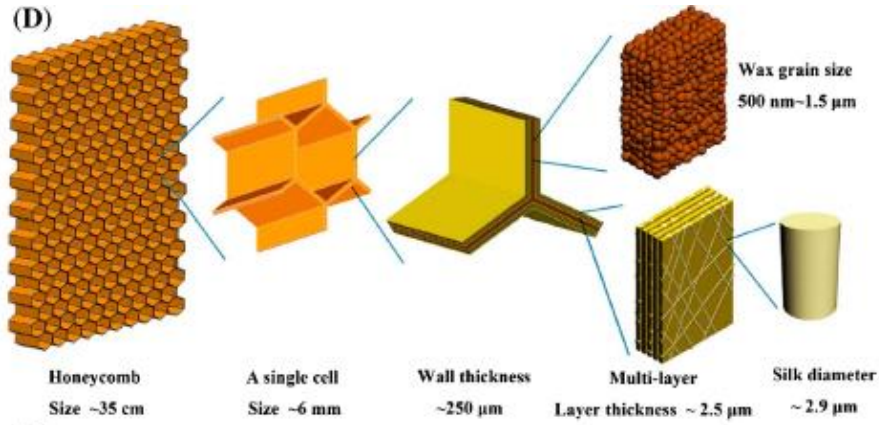


Ilustración 22: Configuración interna de una estructura honeycomb.

2.3 Otras Estructuras Auxéticas

Este fenómeno se encuentra en gran variedad de artículos, ya que su versatilidad a efectos prácticos es muy importante [2].

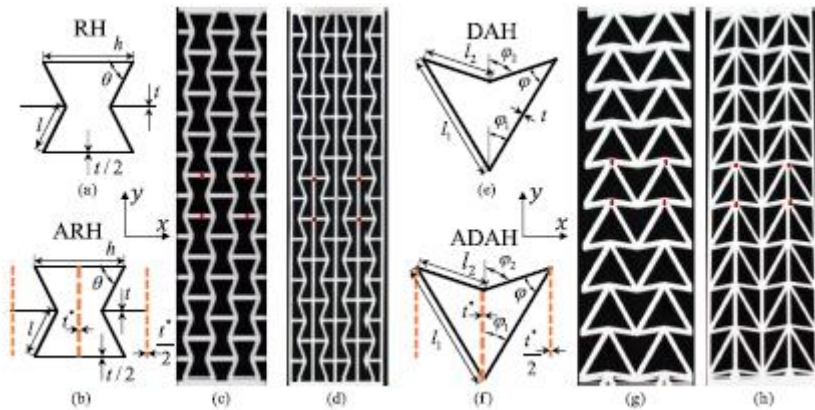


Ilustración 23: Dos tipos de estructuras auxéticas [2].

En la ilustración superior se aprecian las estructuras más comunes, cada una con su nomenclatura correspondiente, que se pasarán a describir a continuación:

- RH: Classical Re-entrant Honeycomb.
- ARH: Augmented Re-entrant Honeycomb.
- DAH: Double Arrowhead Honeycomb.
- ADAH: Augmented Double Arrowhead Honeycomb.

Tras aplicar los desarrollos teóricos correspondientes, las gráficas extraídas se muestran a continuación:

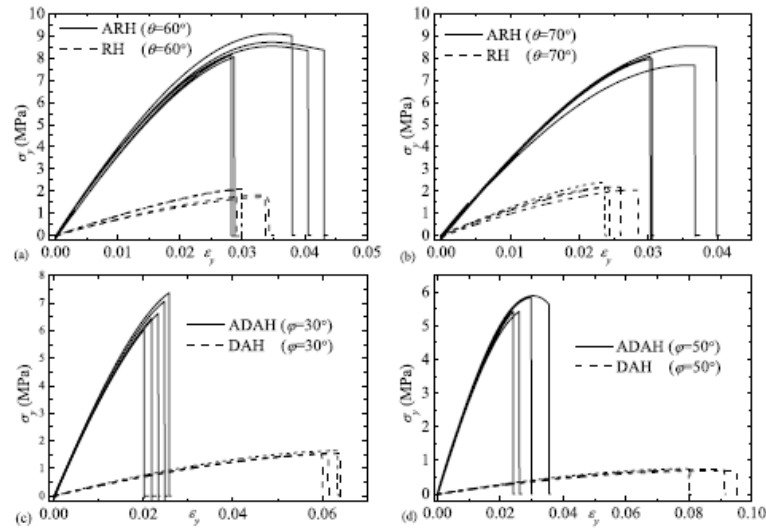


Ilustración 24: Curvas tensión – deformación en cada caso para los ángulos descritos.

Estos resultados posteriormente se contrastan con los experimentales. Para ello, se empleó ensayos uniaxiales (cargas de tracción/compresión) con una 'Instron5565' y una velocidad de ensayo de 1mm/min, además de una posterior correlación de imágenes con DICM (Método Digita de Correlación de Imágenes) [2].

Esto último, a su vez, se contrastará con un modelo testado mediante FEM, con el fin de que la correlación entre los ensayos teóricos y experimentales sean correctos.

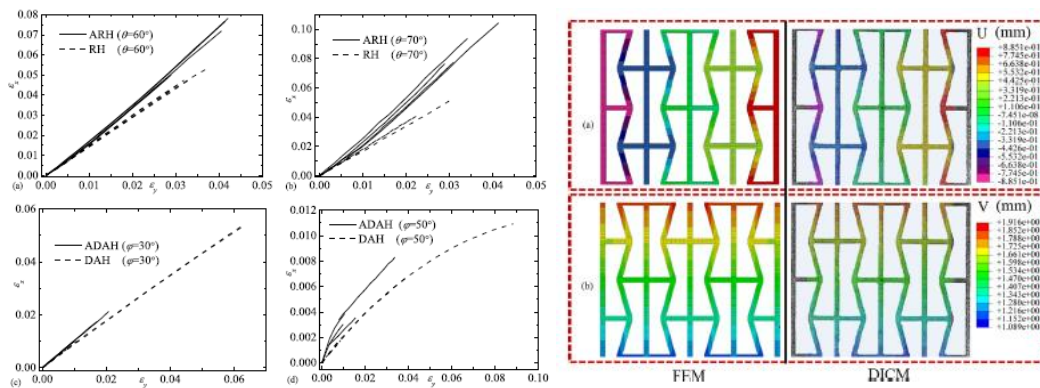


Ilustración 25: Resultados obtenidos con datos experimentales y FEM [2].

Se aprecia que los resultados obtenidos numéricamente y experimentalmente son similares, lo cual da fe de la correcta programación de ambos, obteniendo una

similitud de los valores obtenidos para el coeficiente de Poisson (negativo), y mejorando algunas propiedades como el módulo de Young [2].

2.4 Materiales empleados

En este trabajo se ha empleado un material compuesto por Onyx (composite base) y fibra de vidrio (material de refuerzo), dispuesto en capas alternas. Ambos materiales son proporcionados por la empresa que fabrica la impresora, Markforged [8].

- Composite base:

Los composite base empleados en Markforged son similares a los termoplásticos que emplean la técnica MDF (Modelado por Deposición Fundida). La impresión se puede realizar empleando únicamente este material, o reforzándolo con otro material. A continuación se realizará una breve descripción de cada uno de ellos:

1.1. Onyx:

Es una microfibra de nylon continua, que posee 1.4 veces la resistencia y rigidez de un ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), y además puede ser reforzado con otro material, como por ejemplo fibra de carbono, fibra de vidrio, Onyx o fibra de vidrio HSHT (High Strength High Temperature).

1.2. Onyx FR:

Posee propiedades mecánicas similares al descrito anteriormente. Es ideal para aplicaciones donde se requieren propiedades ignífugas, ligereza y resistencia. Posee un límite elástico de 71 MPa.

1.3. Onyx ESD:

Se define como una variante del Onyx, que cumple los exigentes criterios de seguridad ESD (Electrostatic Discharge Safety) ofreciendo un buen acabado superficial, dureza y rigidez. Posee un límite elástico de 83 MPa, siendo el más alto en este apartado.

1.4. Nylon:

Puede ser reforzado con cualquier tipo de fibra continua de las que se verán a continuación, lo que muestra su polivalencia, y su empleo se centra en casos en los que se requieran operaciones de trabajo no lesivas, o incluso cosméticos. Posee un límite elástico de 50 MPa.

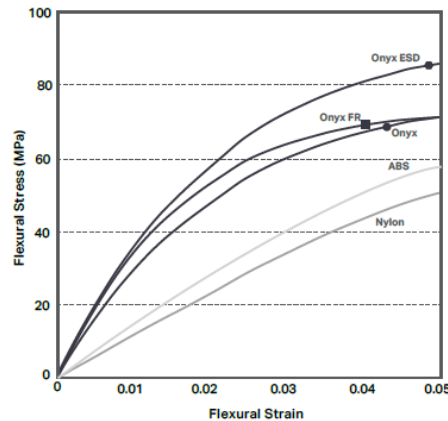


Ilustración 26: Curva tensión-deformación para los composite base [8].

- Fibra continua:

Se insertan en la pieza a través de una segunda boquilla. A diferencia de los composite base, no se puede fabricar una pieza únicamente con estos materiales, y se emplean como material de refuerzo de un material base como Onyx [8].

2.1. Fibra de carbono:

Se considera el material con la mayor relación carga-peso de todos los materiales de refuerzo analizados, con un módulo de elasticidad de 540 MPa. Su principal uso es como reemplazo de piezas de aluminio mecanizadas.

2.2 Fibra de vidrio:

Considerado el material de refuerzo con fibra continua ideal para principiantes, es el que tiene la mejor relación calidad-precio, ideal para

la fabricación de herramientas robustas. Su límite elástico se sitúa en 200 MPa.

2.3. Kevlar:

Caracterizado por su excelente durabilidad, lo hace el material óptimo para piezas sometidas a cargas cíclicas. Con una rigidez similar a la fibra de vidrio pero mucho más dúctil, puede ser empleado para una amplia variedad de aplicaciones.

2.4. Fibra de vidrio HSHT:

La fibra de vidrio HSHT (High Strength High Temperature) posee una resistencia similar a la del aluminio y una gran tolerancia a altas temperaturas, donde se emplea principalmente. En este caso, cinco veces más duro y siete veces más rígido que el Onyx, con un límite elástico de 420 MPa.

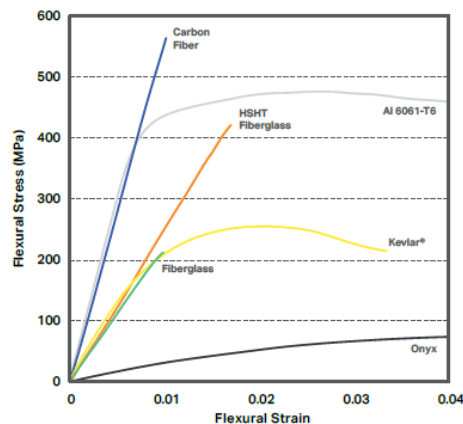


Ilustración 27: Curva tensión-deformación para los materiales de refuerzo [8].

3. NORMATIVA EMPLEADA

La normativa empleada para este ensayo es la ASTM D3039, para los ensayos de tracción, que determina el comportamiento a tracción de composites reforzados con fibra distribuida de forma simétrica. Dicho ensayo de referencia se basa en una probeta delgada que contiene una sección superior e inferior rectangular, que se

sujeta en las mordazas y se somete a una carga monótona, aumentándola progresivamente [16].

Se establece que la duración del ensayo debe de estar entre 1 y 10 minutos para considerarlo como válido. Para este estudio se aplicó la condición publicada en el apartado 11.3.2, que establece que, en control por desplazamiento, la velocidad del ensayo debe de ser de 2mm/min.

Los cálculos de referencia se muestran con las siguientes ecuaciones [16]:

1. Tensile Stress/ Tensile Strength: Cociente entre la carga máxima antes de la rotura de la probeta y la sección transversal de la misma.

$$F^{\text{tu}} = P^{\text{max}}/A$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad (\text{Fórmula 3.1})$$

2. Tensile Strain / Ultimate Tensile Strain: Se toman valores de este parámetro para cada uno de los puntos analizados, obtenido como el cociente entre la deformación entre la longitud inicial.

$$\epsilon_i = \delta_i/L_0 \quad (\text{Fórmula 3.2})$$

3. Tensile Chord Modulus of Elasticity:

$$E^{\text{chord}} = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad (\text{Fórmula 3.3})$$

4. Poisson's Ratio: Cociente negativo entre la deformación lateral y longitudinal.

$$\nu = -\Delta\epsilon_l/\Delta\epsilon_l \quad (\text{Fórmula 3.4})$$

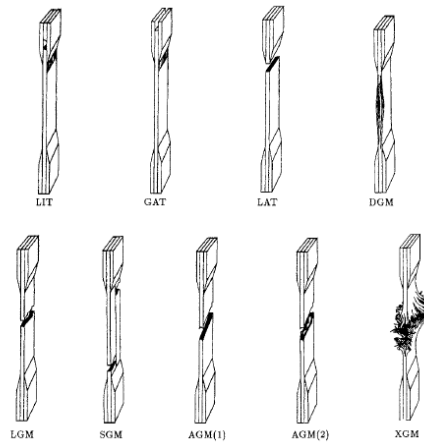


Ilustración 28: Modos de rotura aceptados por la norma.

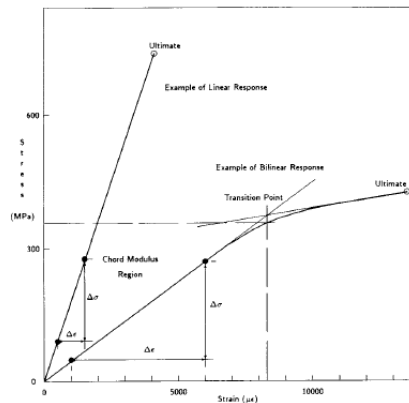


Ilustración 29: Gráfica Tensión – Deformación de muestra [16].

4. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES

El objetivo de este estudio es analizar la versatilidad de cada uno de los programas empleados, entre los que se incluye Solidworks, Abaqus, Hypermesh o BlueHill 2, entre otros.

Como motivación personal, se ha buscado representar el proceso completo desde que se diseña una pieza hasta que se obtienen los resultados finales y su posterior análisis, partiendo del diseño mediante CAD, fabricación mediante impresión 3D, análisis mediante FEM, realización de ensayos a tracción, y análisis de los resultados obtenidos con el fin de comprobar que se asemeja las simulaciones realizadas a los ensayos realizados.

5. EQUIPAMIENTO

5.1 Diseño mediante Solidworks.

Solidworks permite diseñar piezas y ensamblajes, además de planos técnicos, con el fin de visualizar los resultados antes de fabricar, pudiendo así evaluar el impacto ambiental generado por el diseño, simular en situaciones reales y optimizar su desempeño, corrigiendo así posibles errores que incrementaría el precio de producción. También ofrece soluciones para industria de plásticos, de lámina delgada, eléctrica, simulaciones e incluso un apartado para análisis mediante elementos finitos.

5.2 Software de impresión Eiger 3D Markforged

Por definición, la impresora 3D Markforged nos ofrece la opción de emplear el software Eiger [10].

Importando la pieza del programa anterior en formato .STL, se le pueden asignar las siguientes propiedades:

- Material: Material principal del que se va a componer la pieza.
- Reinforcement Material: Material de refuerzo empleado.
- Layer Height: altura de capa. Puede variar entre 0.1, 0.125 y 0.2 mm.
- Fill Pattern: Configuración geométrica que se repite en el interior de la pieza.

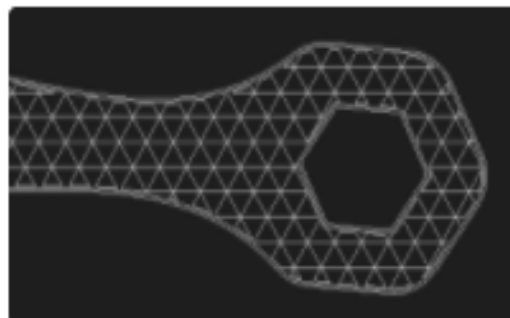


Ilustración 30: Patrón de relleno triangular.

- Fill Density: Densidad de relleno. Varía desde el 0-100%.

- Roof and Floor Layers: Número de capas de material de Onyx colocadas en la parte superior e inferior de la pieza. De forma predeterminada, este valor es de 4.



Ilustración 31: 4 capas apiladas de Onyx en la base y parte superior.

- Wall Layers: Similar a ‘Concentric fiber rings’ pero aplicados al Onyx. Define el número de anillos exteriores del material plástico empleados en cada capa.

Una vez introducimos estos parámetros más genéricos, seleccionando la opción ‘Part View’ se aprecia la configuración interna de la pieza, pudiendo a su vez modificar también los siguientes parámetros [10].

- Fiber Fill Type: Patrón del material de refuerzo empleado. Por defecto, el programa ofrece como opciones configuración isotrópica o concéntrica.

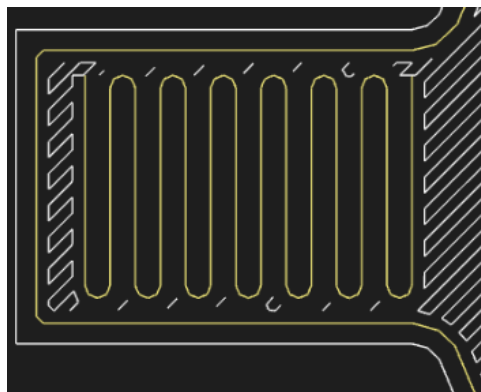


Ilustración 32: Configuración de fibra isotrópica.

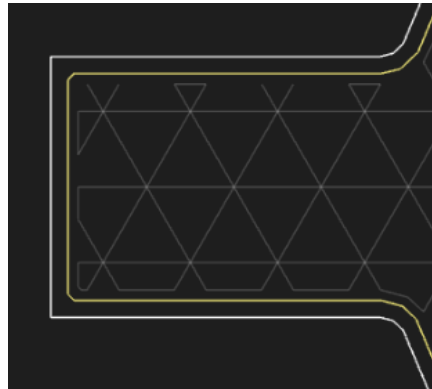


Ilustración 33: Configuración de fibra concéntrica.

- Walls to Reinforce: Elección del tipo de paredes donde se quiere aplicar el material de refuerzo. Se puede elegir tanto huecos internos (Inner Holes Only), externas (Outer Shell Only), o incluir todas las paredes (All Walls). Por defecto, esta última configuración es la recomendada por el software.

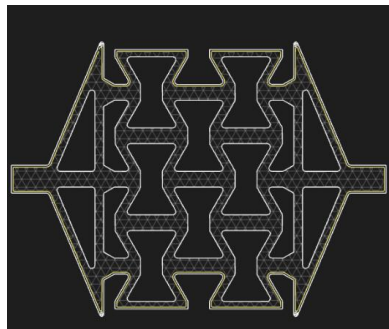


Ilustración 34: Refuerzo en contornos externos exclusivamente.

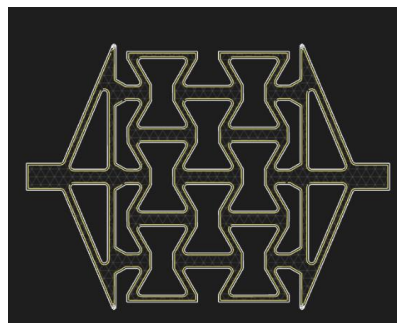


Ilustración 35: Refuerzo en contornos externos e internos.

- Concentric Fiber Rings: Número de anillos exteriores concéntricos.

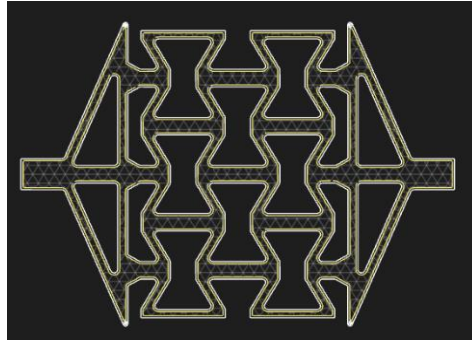


Ilustración 36: Empleo de 1 anillo exterior concéntrico.

- Start Rotation Percent: Punto de inicio de extrusión en la pieza. Este parámetro es el que menos influye de todos los vistos anteriormente.

5.3 Mallado empleando Altair HyperMesh

Altair HyperMesh pertenece al paquete del software 'Altair HyperWorks', y es un preprocesador de elementos finitos, útil para la generación de modelos más complejos y de mayor tamaño. Además, posee un plus que le otorga gran importancia en el sector de la industria, al aceptar la lectura de varios tipos de archivos procedentes de programas como Nastran, Abaqus o Ansys, entre otros.

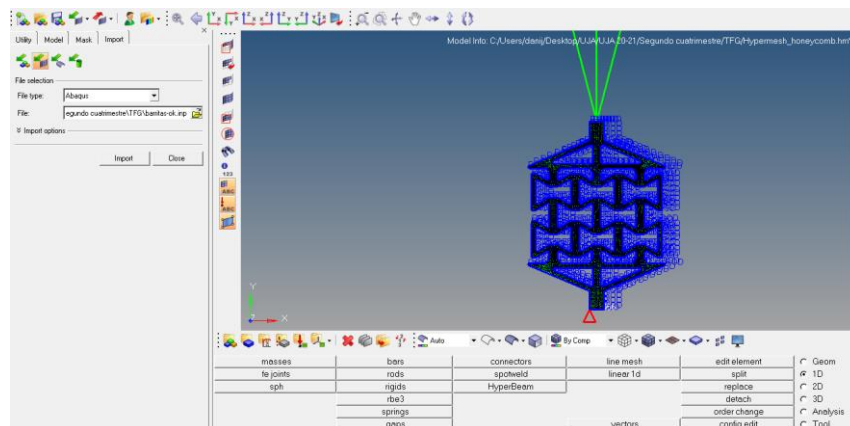


Ilustración 37: Interfaz gráfica Altair HyperMesh.

5.4 Modelado del problema con Abaqus

Probablemente es el software más conocido para la realización de simulaciones mediante elementos finitos consiguiendo, entre otras cosas, analizar problemas de

contactos entre sólidos, mecánica de fluidos, o realizar cálculos estructurales estáticos, tanto lineales, no lineales o dinámicos.

Cabe destacar que Abaqus es un software adimensional, esto es, la concordancia a la hora de poner las unidades queda a cargo del usuario. Por ejemplo, al emplear el 'Sketch' para diseñar una pieza, si se introducen las dimensiones de la misma en mm, y las cargas en Newton, al lanzar la simulación se obtendrán tensiones correspondientes a MPa (N/mm^2) y las deformaciones sufridas serán en mm.

Además, por defecto se establece que las direcciones principales asignadas son:

- Eje x: 1
- Eje y: 2
- Eje z: 3

Esto se aprecia por ejemplo, en el módulo de aplicación de carga, donde hay que tener cuidado en la asignación de la misma.

5.5 Máquina universal de ensayos Instron

Para la realización de los ensayos de tracción y compresión se emplea la máquina universal de ensayos 'Instron', que incluye sistemas electromecánicos e hidráulicos para ensayos estáticos.

Cabe destacar que los ensayos se realizan mediante control por desplazamiento en lugar de por carga, ya que éste primer método es más seguro en el caso de que la probeta rompa de forma inesperada, debido a que si estuviese controlado por la carga, en el momento de la rotura generaría una carga excesiva sin resistencia ninguna (ya que la probeta habría roto), y podría dañar seriamente la maquinaria.

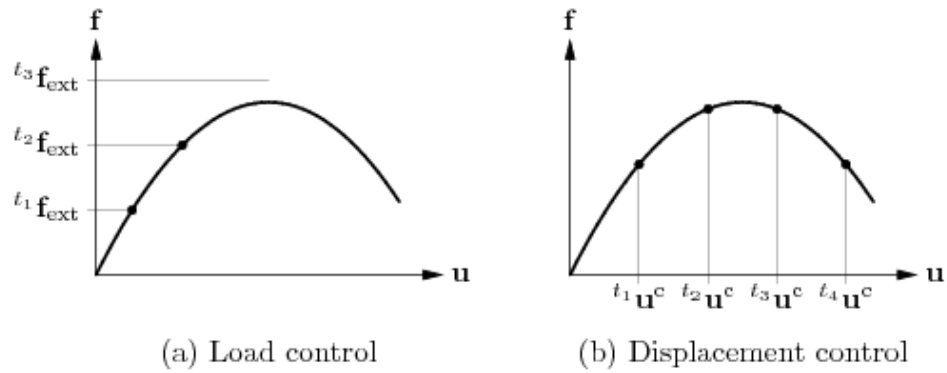


Ilustración 38: Control por carga vs control por desplazamiento.



Ilustración 39: Máquina universal de ensayos 'Instron'.



Ilustración 40: Controles para desplazamiento de las mordazas.

El software empleado para la realización de ensayos es el BlueHill2.

5.6 Basler Video Recorder

Para la obtención de imágenes se ha empleado una cámara convencional para la captura de imágenes, además del programa Basler Video Recorder Software, que captura imágenes del ensayo completo con una frecuencia de un segundo y las almacena. También tiene disponible la opción de tomar un video para ver la realización del ensayo, para así poder verlo de forma más descriptiva.

Así, se pueden modificar algunos parámetros para obtener imágenes más o menos nítidas, en función de la pieza estudiada y la luz incidente en el ensayo, entre otros parámetros. De forma automática, éstas se guardan en la carpeta definida para su posterior post-procesado.

5.7 Correlación de imágenes mediante VIC2D.

Una vez se ha realizado el paso anterior para la obtención y almacenamiento de imágenes mediante el montaje expuesto anteriormente, se emplea el software VIC-2D para obtener de forma exacta los desplazamientos sufridos en el ensayo [3] [12].

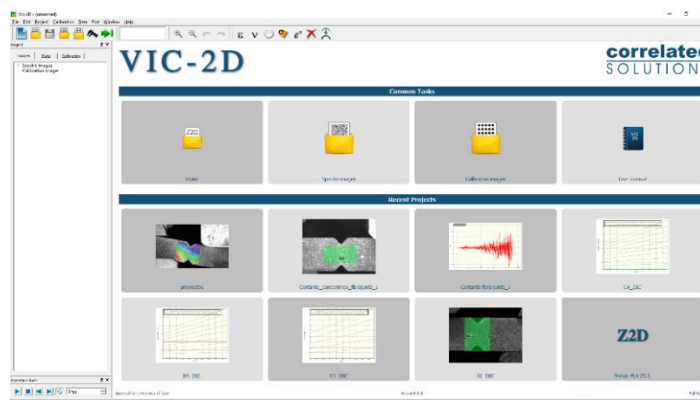


Ilustración 41: Pantalla inicial software VIC-2D.

6. ENSAYOS REALIZADOS

6.1 Diseño mediante Solidworks

Inicialmente, se buscó generar una estructura honeycomb similar a la de la ilustración inferior, aunque modificando algunas medidas, ya que para utilizar la

impresora 3D, el espesor mínimo de la pieza debe de ser de 3.6 mm, por lo que se ha intentado mantener la geometría inicial lo máximo posible, respetando este parámetro.

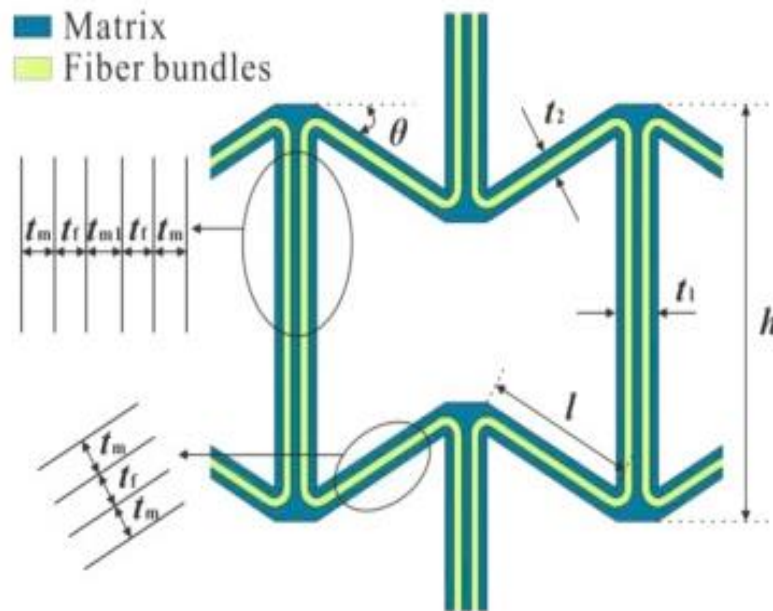


Ilustración 42: Dimensiones de una celdilla.

Así, las medidas empleadas son las siguientes:

- t_1 : 6.844 mm
- t_2 : 4.0 mm
- h : 29.75 mm
- θ : 30°
- l : 10.25 mm

Para ello, se ha empleado el software Solidworks. Inicialmente, se diseñó una única celda, aplicando posteriormente simetría lineal para reproducir el resto y una extrusión de 10 mm.

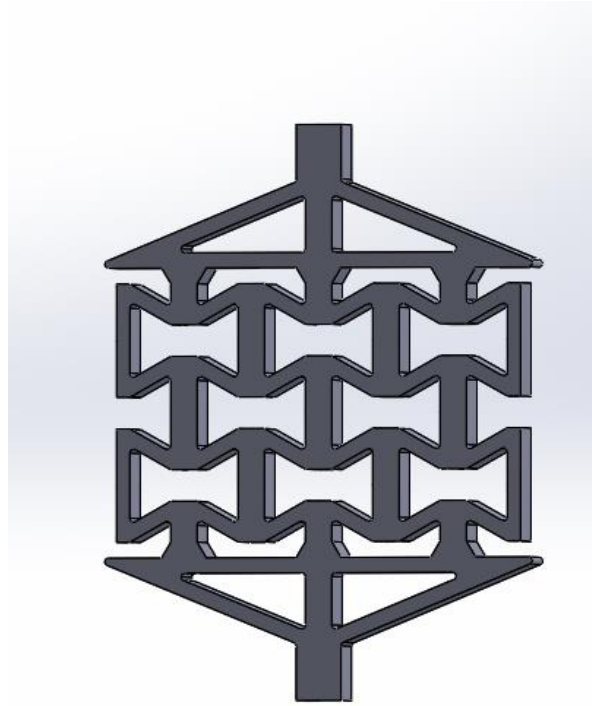


Ilustración 43: Modelado de la estructura en Solidworks.

Inicialmente se planteó unas dimensiones menores para así poder incluir más celdas dentro de la estructura interna, pero debido a que la impresora tiene una limitación de espesor de 4mm, ésta fue la medida de referencia, a partir de la cual se redefinieron el resto.

6.2 Software de impresión Eiger 3D Markforged

A continuación, se importa en formato .STL al software Eiger, donde los parámetros característicos para su impresión serán los siguientes:

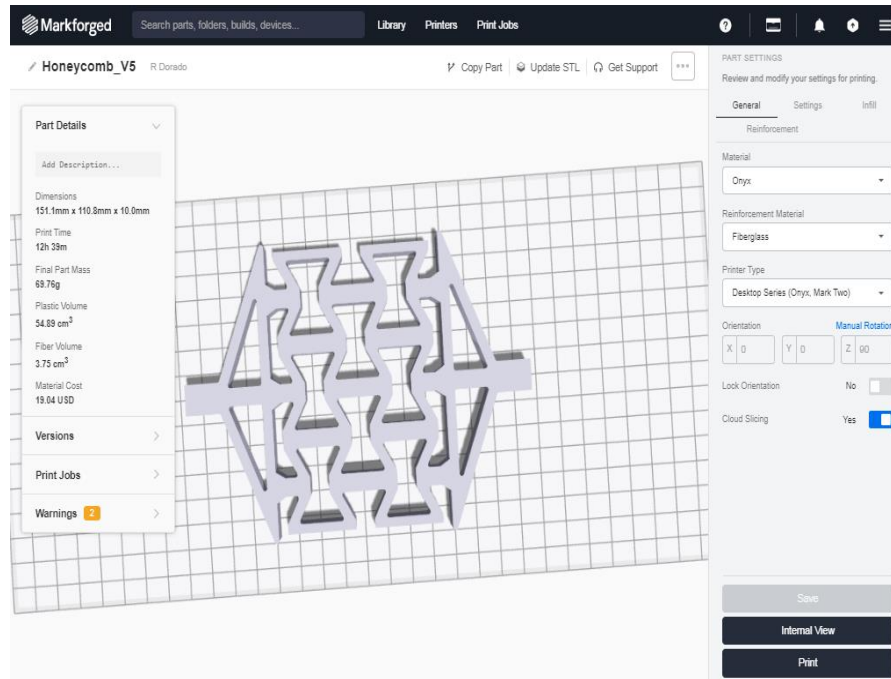


Ilustración 44: Representación de la estructura en Markforged.

- Material: Onyx
- Reinforcement Material: Fiberglass
- Layer Height: 0.1 mm
- Fill Pattern: Triangular Fill
- Fill Density: 37%
- Roof and Floor Layers: 4
- Wall Layers: 1

Para los parámetros internos:

- Fiber Fill Type: Concentric Fiber
- Walls to Reinforce: All Walls
- Concentric Fiber Rings: 1
- Start Rotation Percent: 0

Como se observa en la ilustración inferior, se obtiene un total de 100 capas, entre las que se han intercalado de forma alterna (comenzando por la capa número 5 y sus múltiplos) fibra de vidrio como refuerzo. Al colocar únicamente un anillo de fibra de vidrio exterior, se consigue reducir en gran medida la cantidad empleada de este material.

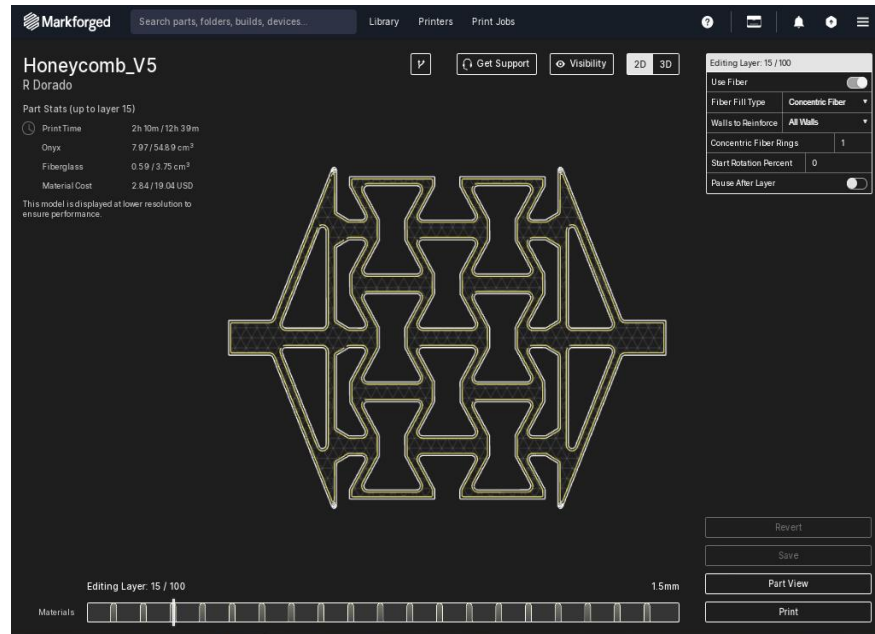


Ilustración 45: Vista interna de la estructura en panal de abeja.

Una vez acabado este proceso, observamos los detalles preliminares:

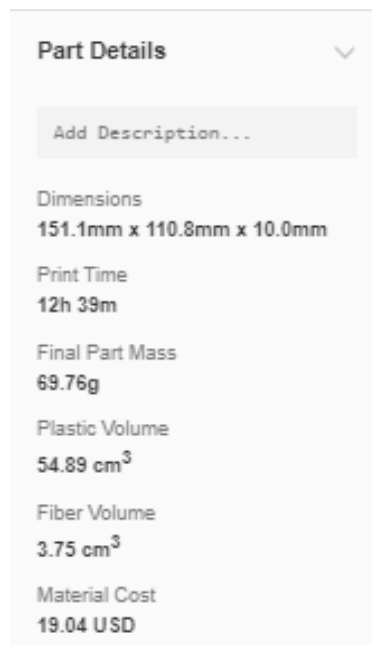


Ilustración 46: Detalles preliminares de la impresión en 3D.

Debido a la complejidad de la geometría empleada, las dimensiones y el número de capas a imprimir, el tiempo de impresión es considerablemente alto, cercano a las trece horas.

Es conveniente destacar que el precio de coste estimado se obtiene partiendo de los precios de venta de los materiales establecidos por Markforged. Tras validar estos resultados, se procede a imprimir la pieza, exportando la pieza en fichero .MFP para su posterior lectura en la impresora.

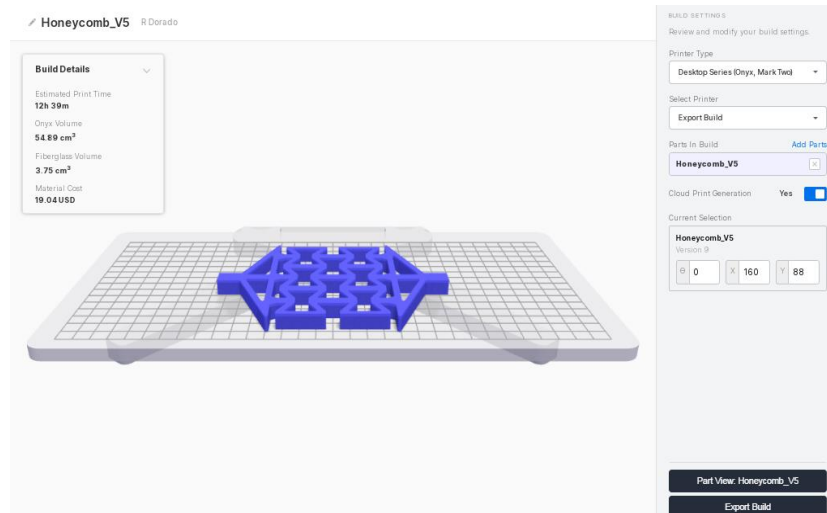


Ilustración 47: Vista preliminar.

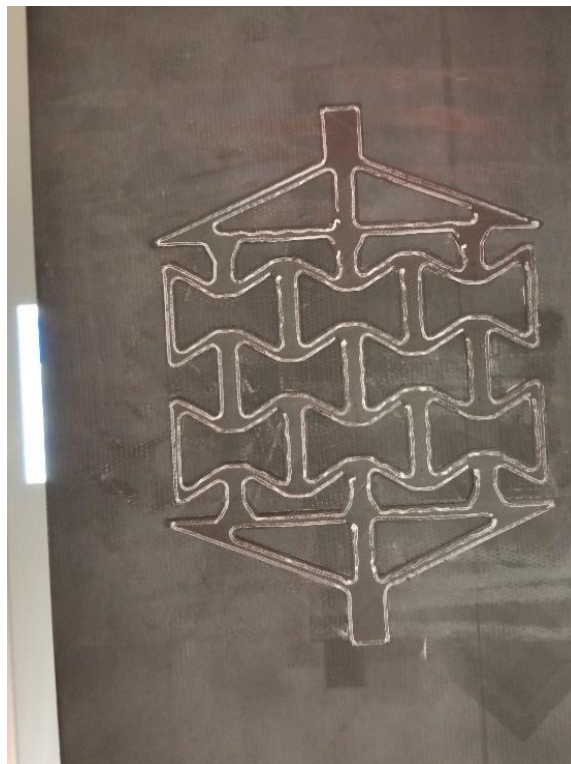


Ilustración 48: Impresión de una capa de fibra de vidrio.

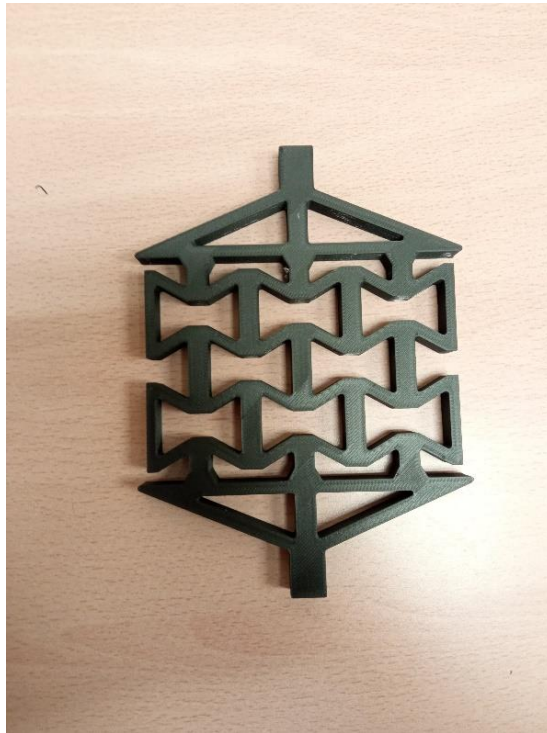


Ilustración 49: Estructura de panal de abeja resultante.

6.3 Mallado empleando Altair Hypermesh

Este programa fue escogido para el mallado en lugar de Abaqus debido a que se asignan las propiedades de los elementos barra, o como también se denominarán en adelante, 'rod', ya que son elementos que solo trabajan a tracción y a compresión, lo cual representa de forma muy precisa la fibra de vidrio (no trabaja a flexión).

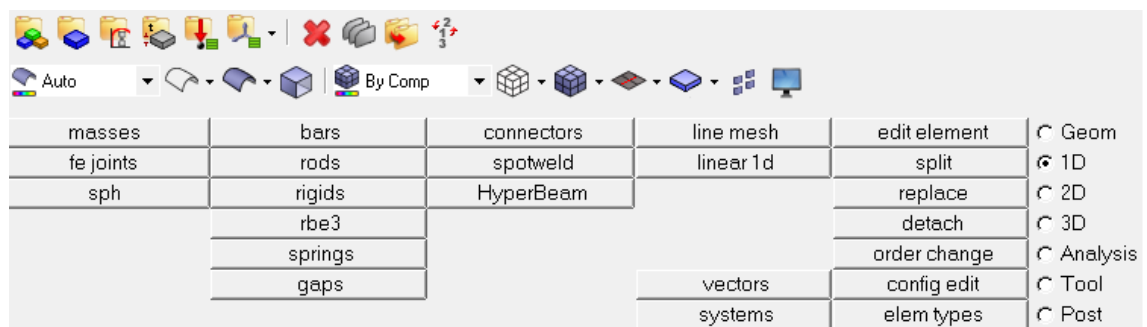


Ilustración 50: Parámetros configurables del software Altair HyperMesh.

Inicialmente se importa el formato desde el diseño en Solidworks, asignando únicamente en el perímetro exterior e interior las propiedades de cada barra, intentando representar con la mayor exactitud lo generado en la impresión 3D.

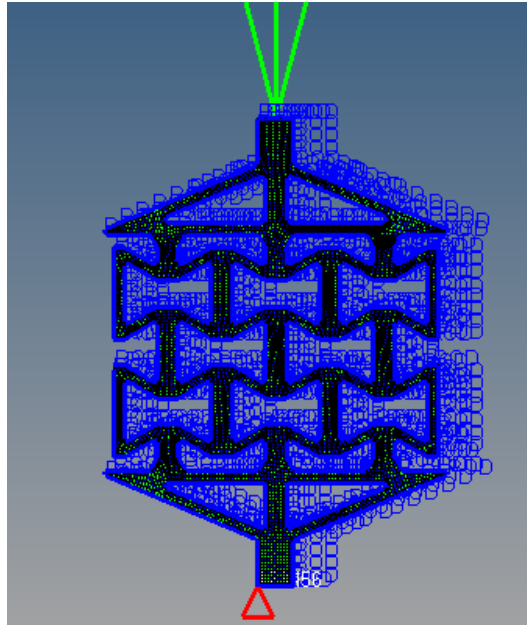


Ilustración 51: Representación de los elementos barra.

A continuación, se crea el material en la opción 'Materials', asignando las propiedades elásticas y plásticas de la fibra de vidrio, ya que se trata del recubrimiento exterior.

Las propiedades elásticas se obtienen del 'data sheet' proporcionado por la empresa Markforged, pero debido a que las propiedades plásticas se muestran en forma de gráfica tensión-deformación, habrá que extrapolar los datos de forma aproximada para poder introducirlos en el programa.

Módulo de Elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson
590	0.3

Tabla 2: Propiedades elásticas de la fibra de vidrio.

Tensión (MPa)	Deformación (mm)
180	0
185	0.009
200	0.01
205	0.011

Tabla 3: Propiedades plásticas de la fibra de vidrio.

Al acabar este procedimiento, se importa un fichero .inp con los datos actualizados, que será el que posteriormente se implementará en Abaqus para lanzar la simulación.

6.4 Modelado del problema con Abaqus

Este apartado se puede dividir en dos subapartados, ya que se empleó primero la interfaz 'command' para asignar las propiedades elásticas y plásticas del composite base (Onyx), ya que al tener una sección compuesta y haberse asignado previamente las propiedades de la fibra de vidrio empleando otro software, es más adecuada esta interfaz.

Posteriormente se empleó la interfaz gráfica de Abaqus para asignar la carga distribuida y las condiciones de contorno, además de lanzar las simulaciones.

Debido al gran número de líneas de texto, se emplea el programa 'NotePad++' para la editar el fichero en 'command', con el fin de facilitar la búsqueda de texto y la edición del mismo. Así, las propiedades del material base también se obtienen del 'data sheet', en un proceso similar al de la fibra de vidrio.

Módulo de Elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson
2400	0.104

Tabla 4: Propiedades elásticas del Onyx.

Tensión (MPa)	Deformación (mm)
30	0
44	0.02
53	0.025
60	0.03
63	0.035
68	0.04
69	0.045

Tabla 5: Propiedades plásticas del Onyx.

```

**
** MATERIALS
**
*MATERIAL, NAME=Material-1
*ELASTIC, TYPE = ISOTROPIC
2400 ,0.104 ,0.0
*PLASTIC
30,0
44,0.02
53,0.025
60,0.03
63,0.035
68,0.04
69,0.045

```

Ilustración 52: Implementación de las propiedades en Notepad++.

Una vez terminado el mallado empleando Hypermesh, busco el archivo y ejecuto el job desde 'command' en lugar de emplear la interfaz gráfica.

```

C:\Users\dani\j\Desktop\Abaqus+simulaciones>abaqus job=barritas-ok
Old job files exist. Overwrite? (y/n): y

```

Ilustración 53: Lanzamiento de la simulación mediante Abaqus command.

Una vez localizado, se modifica el fichero .inp con los datos resultantes de la simulación, donde se aprecia perfectamente los dos materiales que forman dicha estructura, 'Material-1' para Onyx y 'Fiberglass', para la fibra de vidrio, asociando cada material a la sección correspondiente.

```

*SOLID SECTION, ELSET=barritas, MATERIAL=FIBERGLASS
0.18
*MATERIAL, NAME=FIBERGLASS
*ELASTIC, TYPE = ISOTROPIC
590, 0.3
*PLASTIC
180,0
185,0.009
200,0.01
205,0.011

```

Ilustración 54: Propiedades de la fibra de vidrio.

Como comprobación de que la asignación de propiedades se ha realizado correctamente, se abre la interfaz gráfica y dentro del apartado 'Materials', se aprecia que aparecen dos materiales, tal y como se muestra en la ilustración inferior.

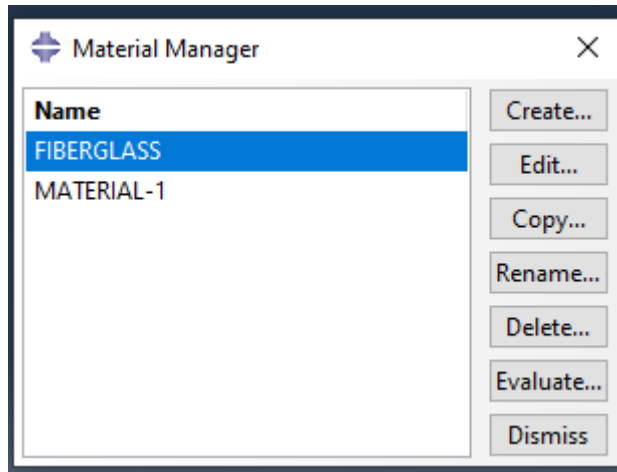


Ilustración 55: Comprobación de la asignación de materiales.

Debido a la configuración de capas empleada, se colocó una capa de fibra de vidrio cada 0.5mm. Para programar esto en Abaqus, se empleó la interfaz gráfica, aplicando secciones cada 0.5mm con la opción 'View Cut Manager'.

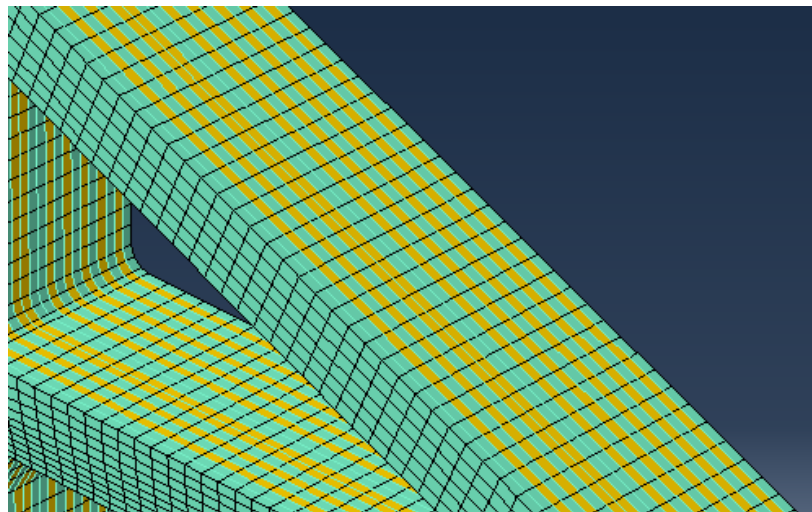


Ilustración 56: Distribución de capas internas en la estructura.

A continuación se pasa a la interfaz gráfica, y se importa en fichero .inp en Abaqus (File- Import- Model), en el que ya se muestra la estructura con el mallado realizado.

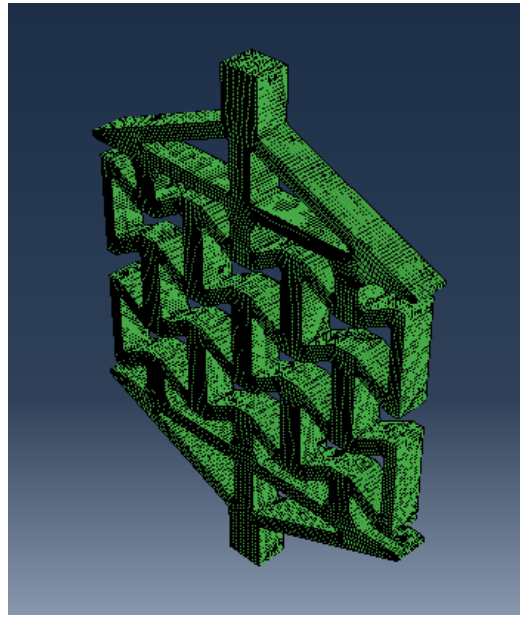


Ilustración 57: Mallado resultante en Abaqus.

Debido a que el diseño de la pieza y el mallado se han realizado en un programa externo, al importar la pieza en la interfaz gráfica, es necesario antes de nada marcar la casilla 'Do not use parts and assemblies in input files', tal y como se muestra en la ilustración a continuación, ya que en caso contrario podría surgir un error a posteriori que impediría lanzar la simulación.

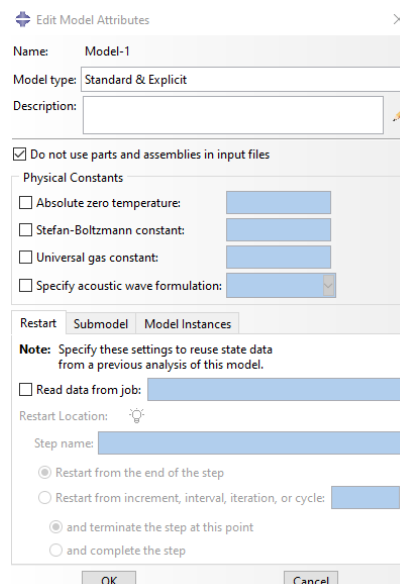


Ilustración 58: Edit Model Attributes.

Se introducen las condiciones de contorno y cargas. Para evitar crear una singularidad al aplicar dichas condiciones en un único punto, se aplican restricciones

de movilidad para los desplazamientos en cada uno de los nodos que forman el mallado en la cara inferior, dando un total de 275, en el Step 'Initial'.

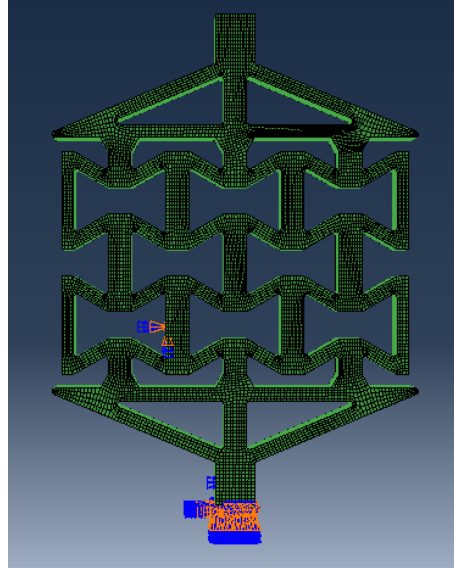


Ilustración 59: Restricción de movilidad en la parte inferior de la estructura.

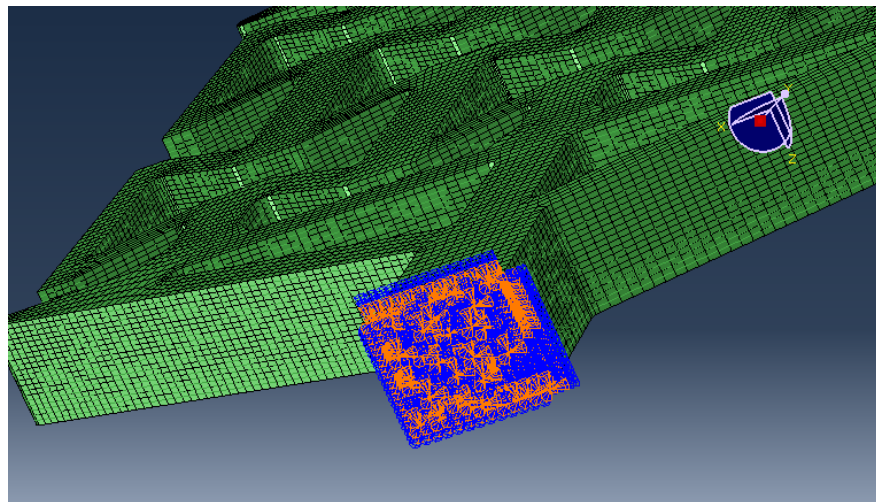


Ilustración 60: Zoom parte inferior de la estructura.

Para la colocación de las cargas empleadas en el ensayo, se concluyó como la opción más precisa emplear unas cargas distribuidas de presión antes que cargas puntuales en cada nodo (facilitando de la misma forma el lanzamiento de la simulación). Con el mallado empleado, se puede apreciar en la ilustración a

continuación que se emplean un total de 360 subdivisiones (20x18). A su vez, las medidas de dicho plano son de 11.62x10 mm.

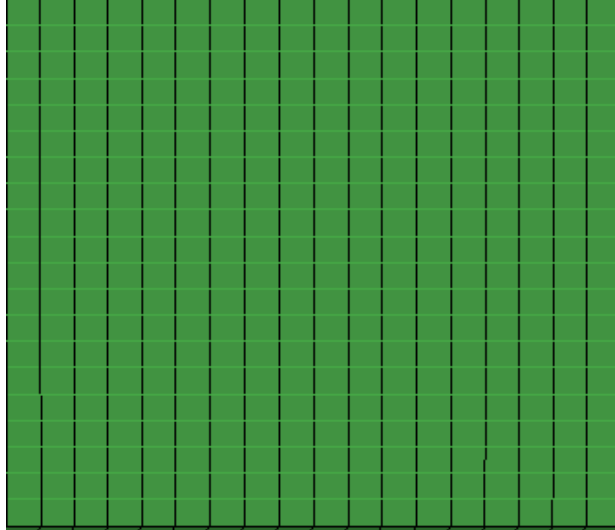


Ilustración 61: Mallado parte superior estructura.

Si se quisiera emplear una carga total de tracción de 1043 N, se realiza la siguiente operación:

$$Carga\ total\ (MPa) = \frac{1043\ N}{11.62 \times 10\ (mm^2)} = 8.98\ MPa \quad (Fórmula\ 6.4.1)$$

$$Carga\ individual\ (MPa) = \frac{8.98\ MPa}{360\ subdivisiones} = 0.02493\ MPa. \quad (Fórmula\ 6.4.2)$$

Por tanto, la carga que presión que habría que introducir en total en cada subdivisión sería de 0.02493 MPa. El signo negativo indica la dirección de la aplicación de la carga.

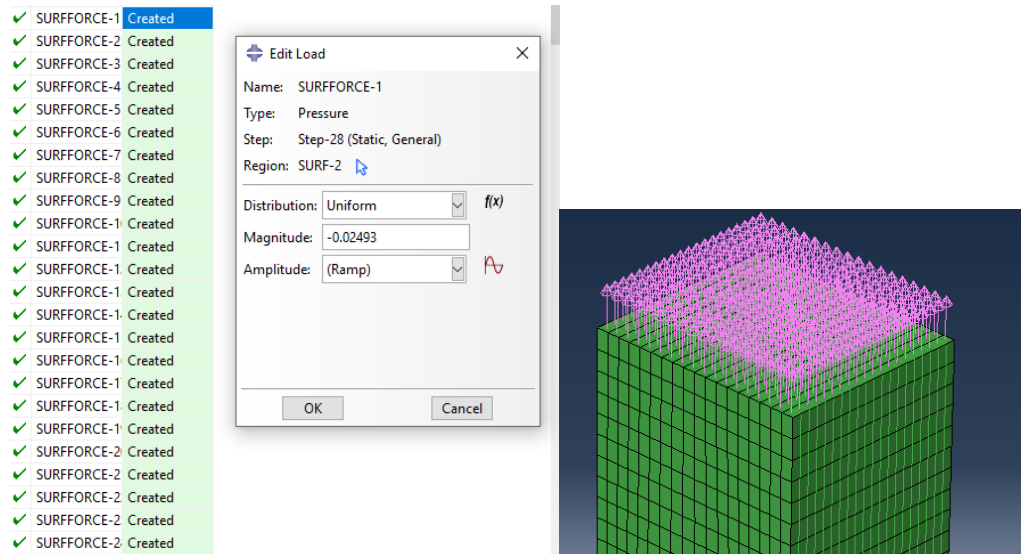


Ilustración 62: Distribución de cargas de presión en la parte superior de la estructura.

El gran número de elementos en el mallado y puntos de aplicación para las cargas y condiciones de contorno propició que se tuviera que modificar el 'Step' partiendo de un valor inicial del 0.05% de la carga aplicada total, y con un incremento mínimo para cada iteración de 10^{-10} .

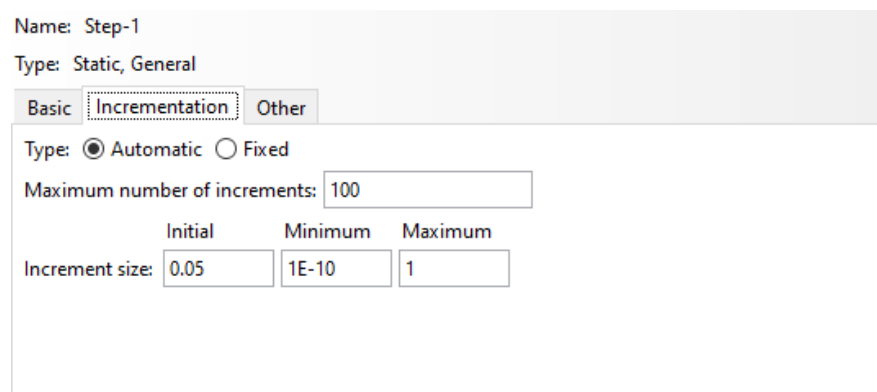


Ilustración 63: Parámetros del 'Step'.

Aun así, lanzando la simulación no se consigue la convergencia debido a que se alcanza el valor máximo permitido para el parámetro I_A que por defecto es de 5, por lo que hay que modificarlo dentro del apartado 'Step- Other- General Solution Controls- Manager- Step1', dándole un valor de 30 y observando su comportamiento.

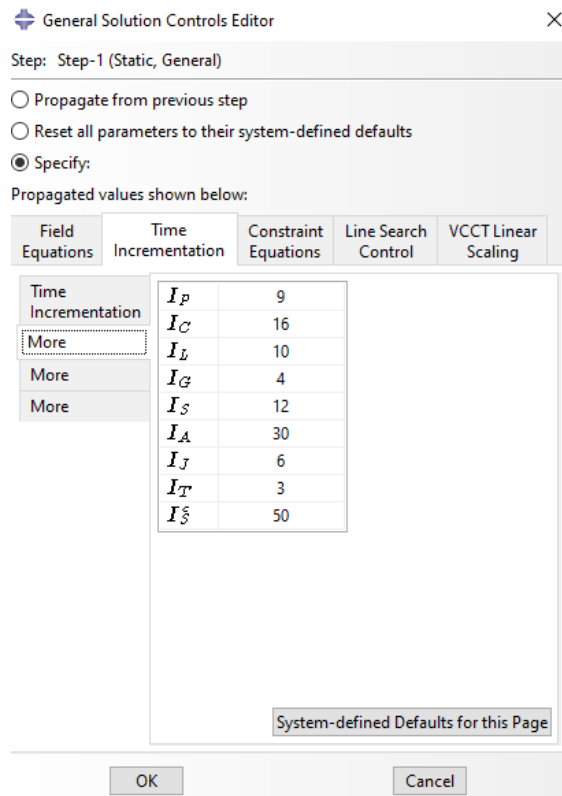


Ilustración 64: Modificación de parámetros adicionales.

Una vez llegado a este punto, se lanza la simulación y se observa que, aunque sí se consigue lanzar la simulación y realizar unas 10 iteraciones, no se aplica más de un 0.1 de la carga total, por lo que la simulación no se realiza al completo.

Para corregir esto, únicamente se modifican otros parámetros internos hasta que se alcanzan valores cercanos a la simulación completa, entorno a 99%.

Una vez se ha configurado todo, se procede a lanzar la simulación, obteniendo el siguiente campo de desplazamientos para la componente vertical:

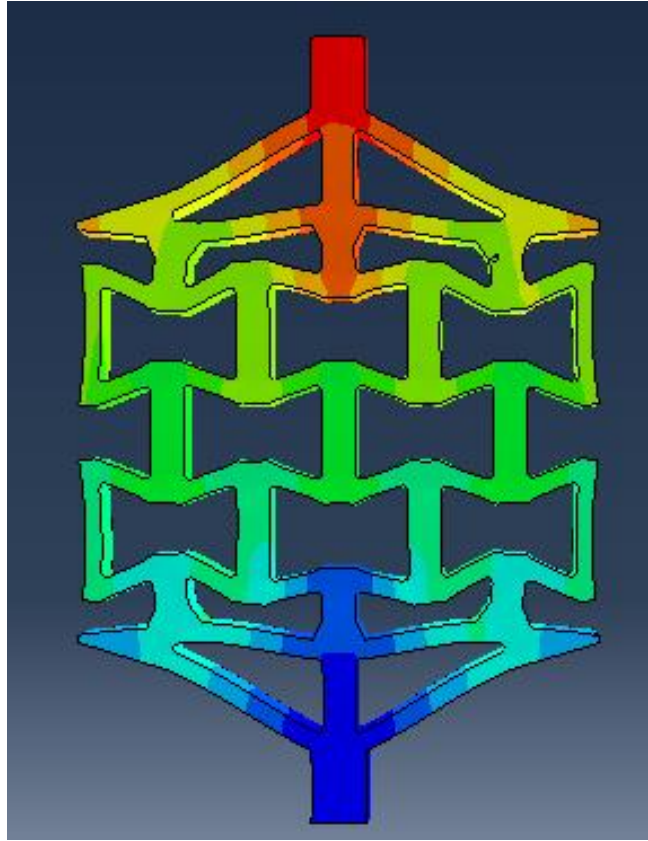


Ilustración 65: Campo de desplazamientos.

Se aprecia que, conforme se aumenta la coordenada Y, el desplazamiento es mayor, lo cual es lógico, ya que la parte inferior de la estructura está anclada (tiene impedido el desplazamiento en todas las direcciones aunque no el giro) y la carga de tracción se realiza en la parte superior de la estructura.

6.5 Máquina universal de ensayos Instron

Antes de empezar, es necesario motear la estructura de blanco para así poder realizar el post-procesado de resultados correctamente. Posteriormente, se coloca con las mordazas de tracción y se conecta la máquina y el ordenador del laboratorio de medios continuos.

Cabe destacar que, debido a las mordazas que se emplearon, surgió un problema al colocar la estructura y hubo que limar la parte de sujeción (tanto inferior como superior).



Ilustración 66: Colocación de la estructura en la máquina de ensayos.

A continuación se coloca la cámara para obtener las imágenes y se emplea el programa 'Basler Video Recording Software', configurado para obtener imágenes cada segundo y almacenarlos en la carpeta del ensayo correspondiente.

Las siguientes ilustraciones muestran la configuración de los ensayos empleando Bluehill 2. Para comenzar, se establecen las unidades del sistema internacional, dejando únicamente como displays activos la extensión y carga.

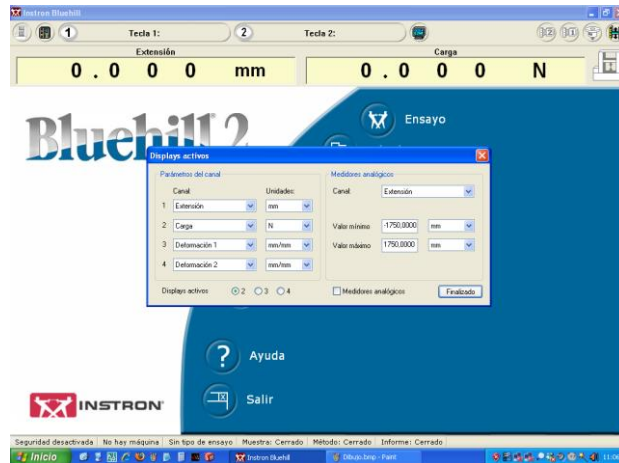


Ilustración 67: Displays activos.

Después se configura el ensayo acorde a la normativa empleada para el mismo. En este estudio se empleó una de las configuraciones preestablecidas para los ensayos de tracción/cortante de las probetas, ya que se identificó como la más idónea. Así, lo más destacable es que la velocidad del ensayo es de 2mm/min. En las ilustraciones siguientes se muestran dos ensayos distintos, para así poder comparar y observar la versatilidad de esta función.

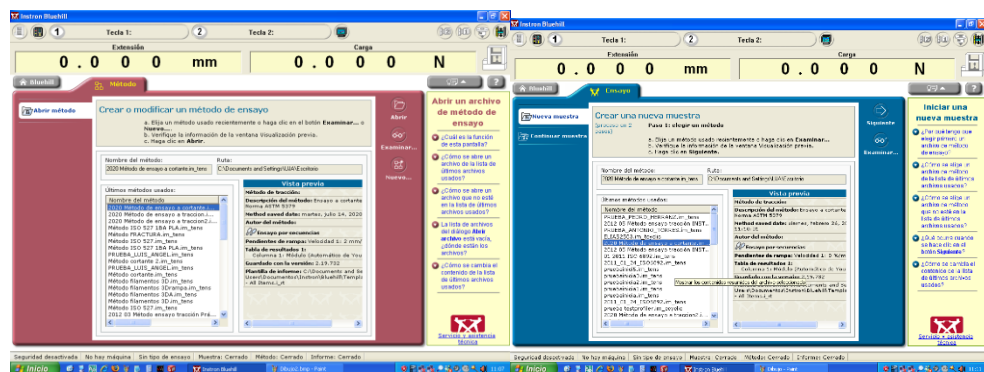


Ilustración 68: Configuración del método de ensayo empleado.

Si se desean cambiar alguno de los displays ó información aportada por el software dentro del ensayo escogido, es necesario recurrir al apartado 'Método'.

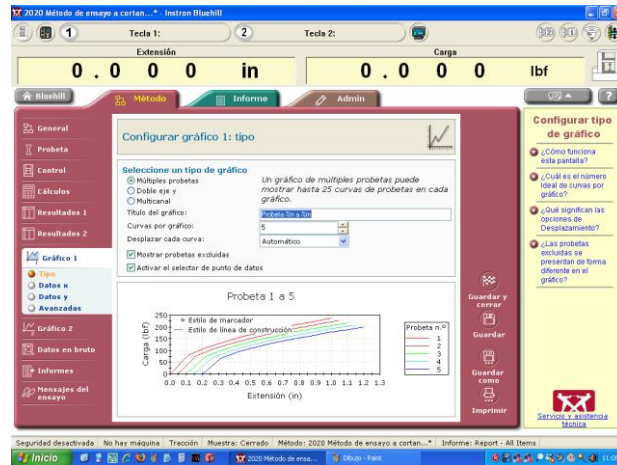


Ilustración 69: Configuración del ensayo.

Por último, se escoge el directorio en el que se van a guardar los datos.

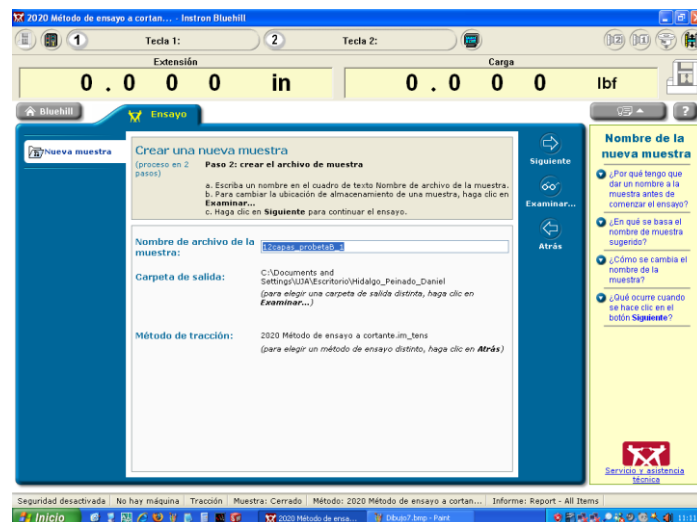


Ilustración 70: Almacenamiento de datos de los ensayos.

Antes de comenzar el ensayo, se asegura que las mordazas estén bien sujetas y se aplica una precarga, además de resetear la deformación a 0. Como el programa genera automáticamente una gráfica tensión – deformación y un fichero Excel con los desplazamientos, este paso previo se aplica para conseguir que el ensayo comience en el origen de coordenadas.

Tiempo (sec)	Extensión (mm)	Carga (N)
0	0	38,89102
3	0,05263	49,30708
6	0,10504	59,43842
9	0,15763	69,54907
12	0,21	79,62179
15	0,26241	89,59159
18	0,31509	99,90885
21	0,36746	110,35253
24	0,41991	120,45189
27	0,47259	130,49799
30	0,52505	140,5126
33	0,5775	150,24905
36	0,63018	160,09354
39	0,68259	169,50994
42	0,73505	179,0058
45	0,78763	188,51115
48	0,83991	197,65005
51	0,8925	207,07511
54	0,94505	216,0708
57	0,99741	225,1446

Ilustración 71: Datos extraídos de BlueHill 2.

En la ilustración anterior se aprecia que se graban los datos de los ensayos cada tres segundos, además de obtener también el tiempo empleado, lo cual para nuestro estudio carece de importancia.

Como a priori no se conocía la carga de rotura de la estructura, se han realizado los siguientes ensayos, con el fin de incrementar la carga paulatinamente hasta la rotura, ya que la máquina trabaja mediante control por desplazamiento. El procedimiento se basa en carga y descarga de la estructura, sin incluir ninguna otra variante.

- Ensayo 1 y 2: Carga de 100N.

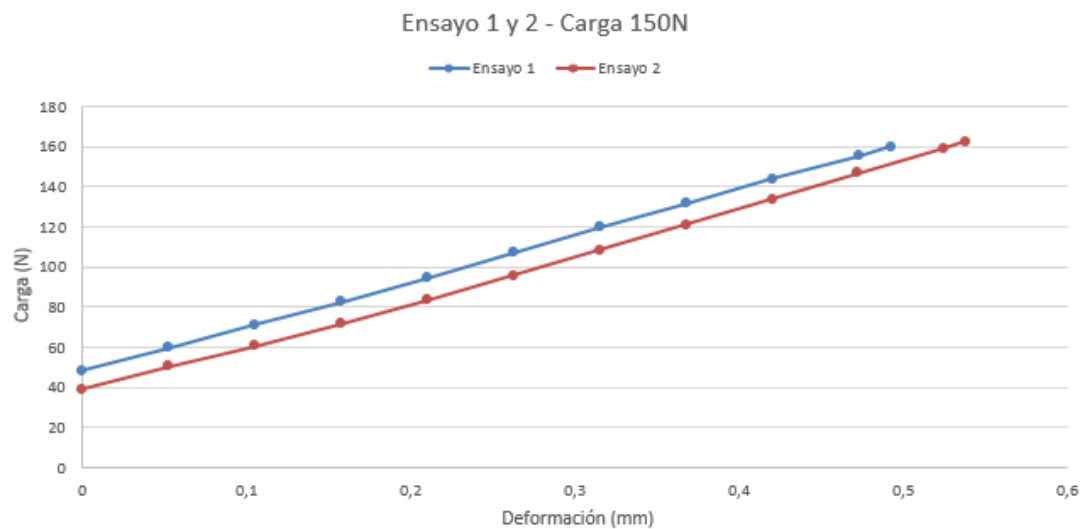


Ilustración 72: Ensayos realizados para una carga de 150N.

Se aprecia que, aunque la pendiente es la misma, la carga en la que se inicia cada ensayo es distinta por la precarga.

- Ensayo 3 y 4: Carga de 500N.

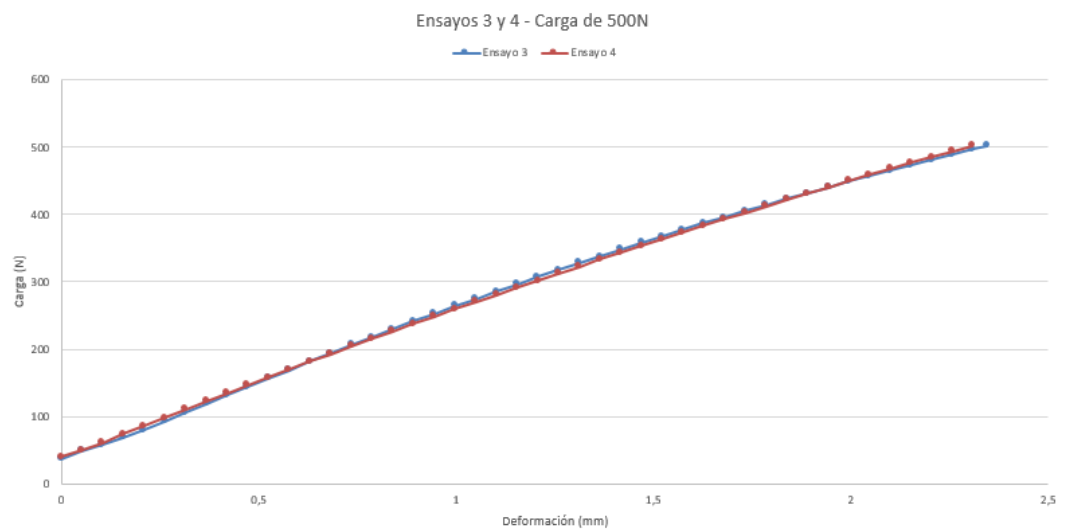


Ilustración 73: Ensayos realizados para una carga de 500N.

- Ensayo 5 y 6: Carga de 900N.

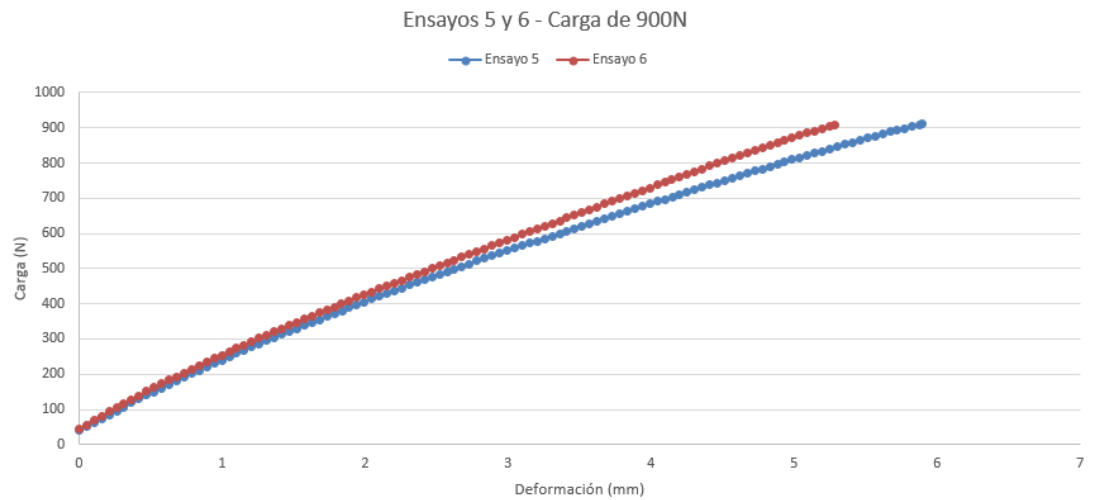


Ilustración 74: Ensayos realizados para una carga de 900N.

- Ensayo 7: Carga de rotura.

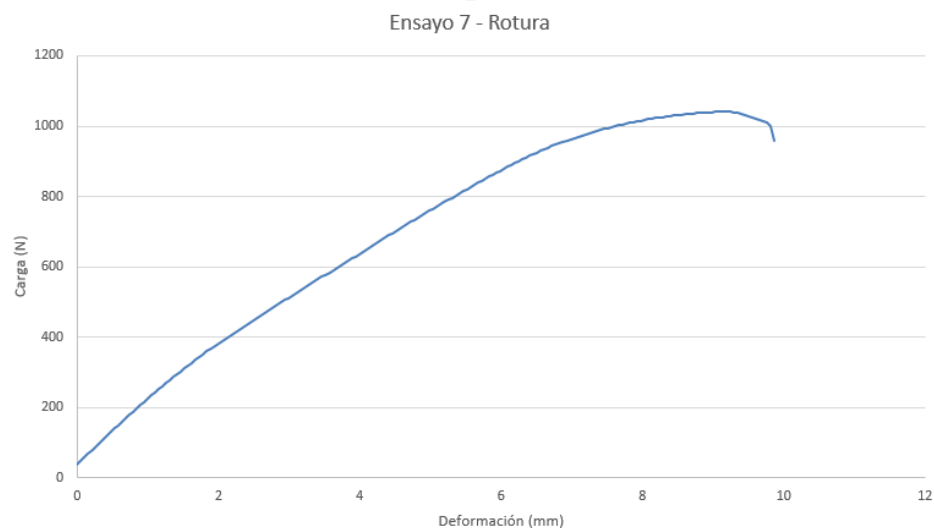


Ilustración 75: Ensayos realizados para carga de rotura.

Como se aprecia, se realizaron dos ensayos para cada carga, para así obtener mayor precisión. También, al ser un ensayo experimental, cada dato se muestra de forma aislada (puntos), junto con la línea de tendencia de forma orientativa.

Cabe destacar que conforme se aumenta la carga, aumenta también la deformación sufrida. En los ensayos 1,2,3 y 4, la deformación es totalmente lineal, por lo que estaríamos dentro de la zona elástica. La deformación plástica empieza a estar presente a partir de aquí, siendo más pronunciada conforme aumenta la carga.

Por último, en el séptimo ensayo, se llevó a la estructura hasta la carga de rotura, pudiendo observar un tramo elástico – lineal, una deformación plástica y por último un pequeño descenso de la carga aplicada, produciéndose la rotura del honeycomb a 1043N aproximadamente.



Ilustración 76: Estructura honeycomb tras aplicar la carga de rotura.

Se puede ver que el fallo se produjo en la parte superior de la estructura debido a su configuración triangular, quedando así la estructura interna igual a simple vista.

6.6 Basler Video Recorder

Como ya se ha mencionado anteriormente, el montaje para la obtención de imágenes consiste en una cámara con un trípode, que es regulable tanto en enfoque como en altura, conectada a su vez a un ordenador para el almacenamiento de las mismas, con un foco para dar más luz a los ensayos y una cartulina negra de fondo.



Ilustración 77: Montaje para la obtención de imágenes.

6.7 Correlación de imágenes mediante VIC2D.

Se cargan el lote de imágenes obtenidas con el programa de captura anteriormente mencionado con la opción 'Speckle images', y posteriormente 'Images', eliminando las primeras antes de quitar el folio en blanco (momento en el que comienza el ensayo) y las últimas una vez ha roto la estructura, ya que no aportan ninguna información relevante.

La configuración de los parámetros 'Subset' y 'Step' se dejan por defecto, ya que el programa lo recalcula por sí mismo para obtener los mejores resultados.

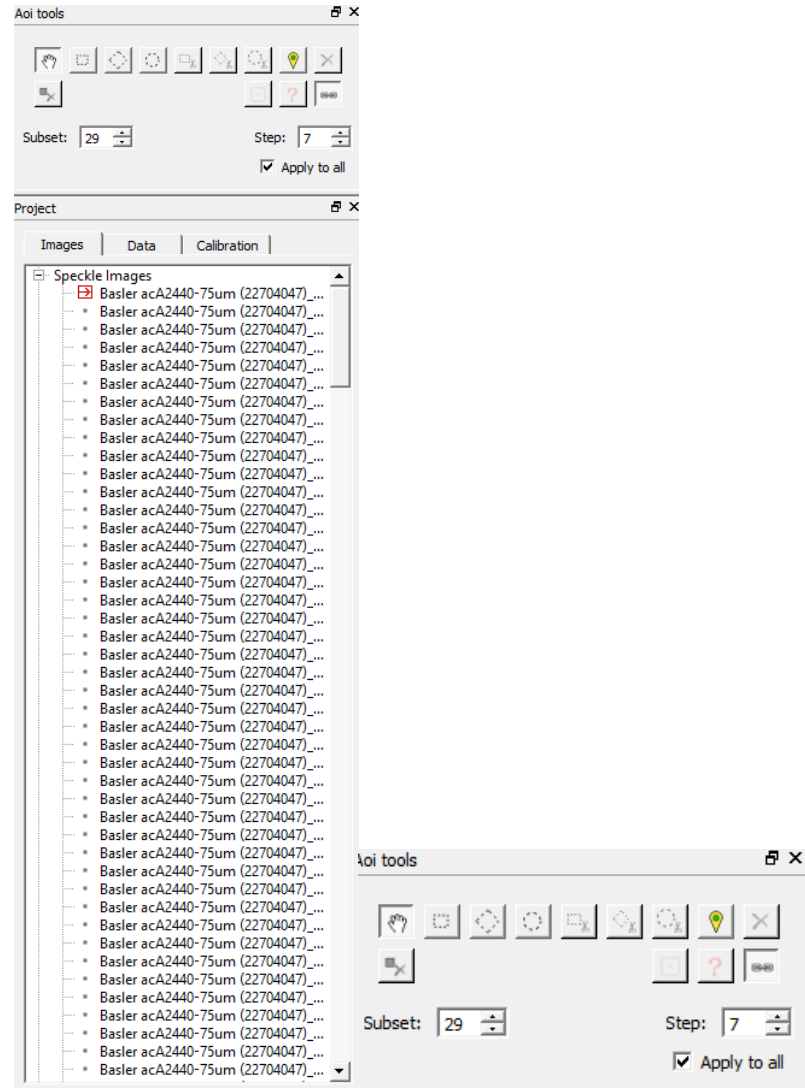


Ilustración 78: Lectura de imágenes y ajuste de 'Subset' y 'Step'.

Después se selecciona el área de interés en el que se quieren obtener la deformación mediante 'Image – Create Polygon', con cuidado de no dejar huecos entre medias. Cuanto más preciso sea el área seleccionada, mejores serán los resultados obtenidos y menor el tiempo de procesado.

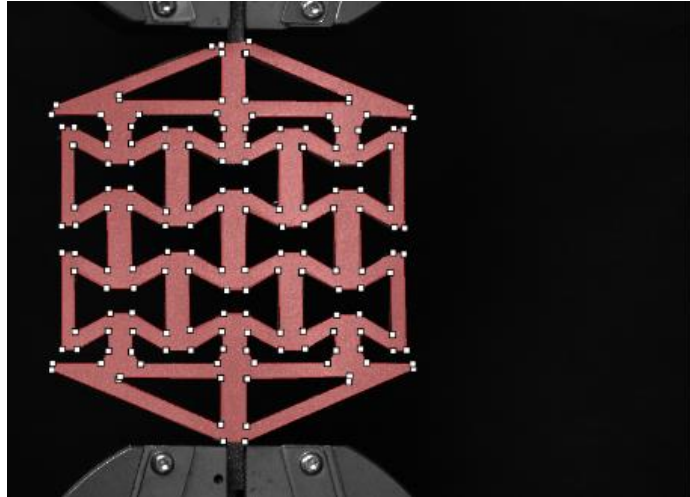


Ilustración 79: Selección del área de estudio.

Es importante calibrar bien la pieza antes de nada, con 'Calibration', seleccionando la distancia entre los dos extremos más alejados de la pieza, y dando el valor real de la misma, para que el programa calcule de forma automática la relación de píxeles entre la ilustración inferior y el caso real.

Como es lógico, cuanto mayor precisión en la medida, mejores serán los resultados obtenidos, y más en este estudio, ya que las deformaciones van a ser inferiores incluso al milímetro.

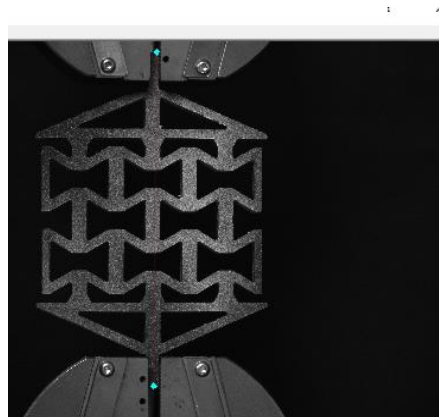


Ilustración 80: Calibración del ensayo.

Tras este paso, ya podemos empezar el análisis, 'Data – Start Analysis'. Debido al gran número de imágenes y a la complejidad de la estructura, el tiempo empleado para este paso fue de unos siete minutos aproximadamente.

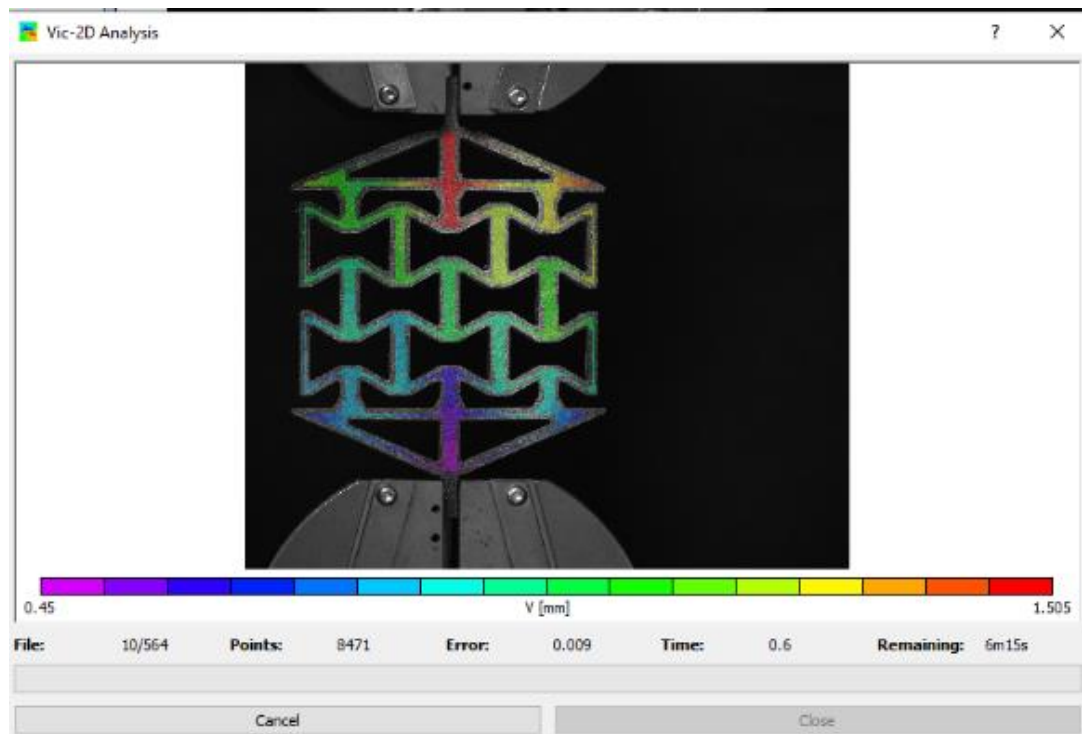


Ilustración 81: Start Analysis.

Por defecto, el programa ofrece una serie de herramientas previas al post-procesado de imágenes, eliminando así el ruido o posibles interferencias ocasionadas. Se accede mediante 'Postprocessing Tools – Remove rigid motion' y 'Postprocessing Tools – Smooth', aplicado para todas las capturas del ensayo.

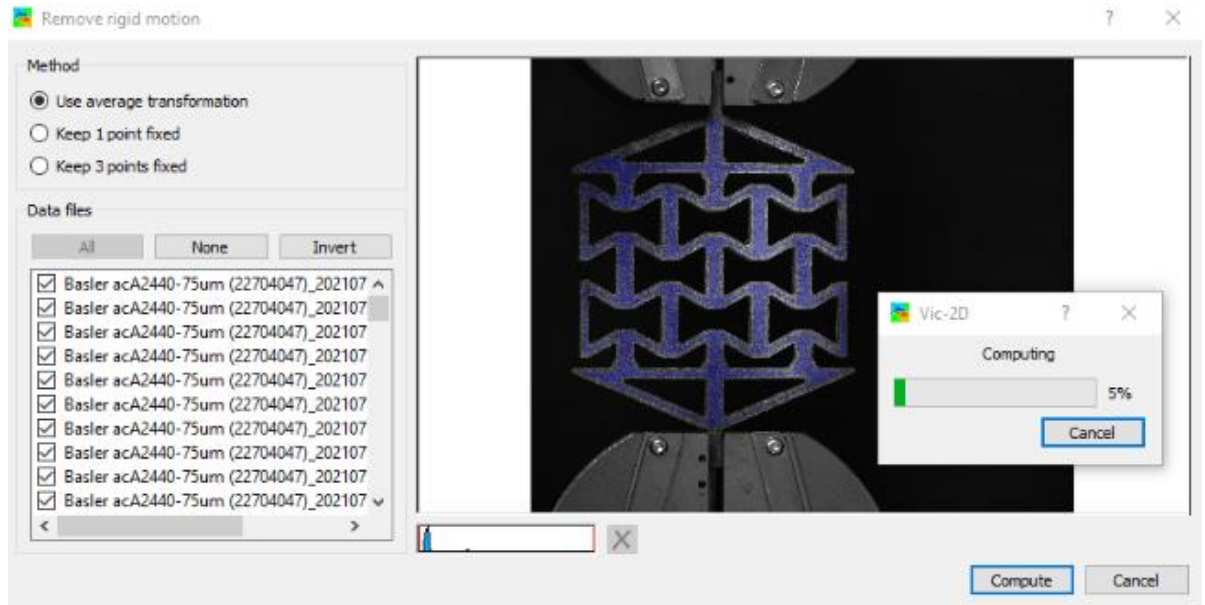


Ilustración 82: Remove Rigid Motion.

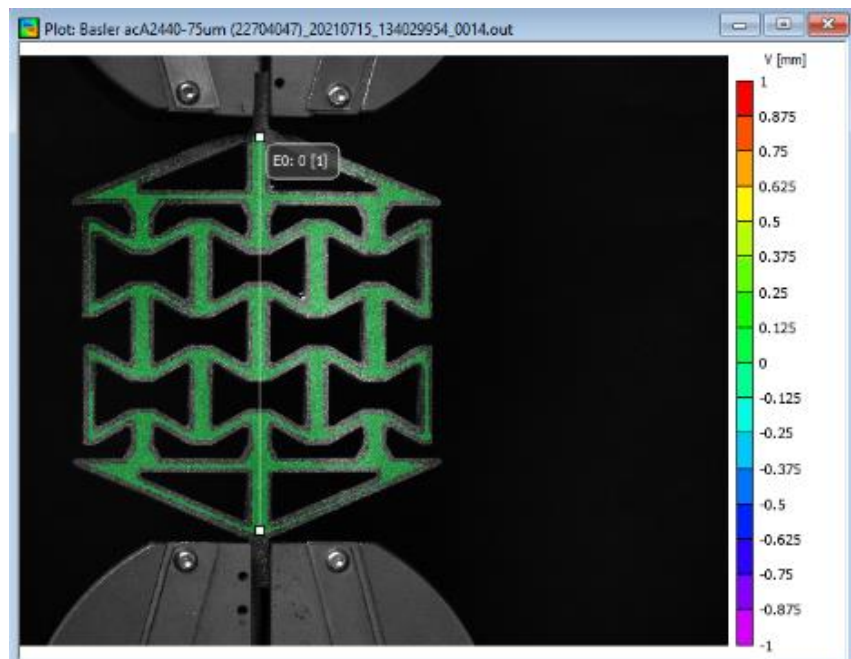


Ilustración 83: Smooth.

Para el siguiente paso se debe colocar el extensómetro en la primera captura, empleando 'Data – Contour', y seleccionando la variable de interés (para nuestro caso, lo más relevante será el campo de desplazamientos (V_2) y deformaciones verticales (ϵ_2), ya que es el sentido en el que se aplica la carga de tracción. La primera captura

mostrará por defecto un campo de desplazamientos totalmente uniforme, ya que es cuando se empieza a aplicar la carga, mientras que la última captura será la de referencia (ilustración siguiente), ya que muestra la deformación total.

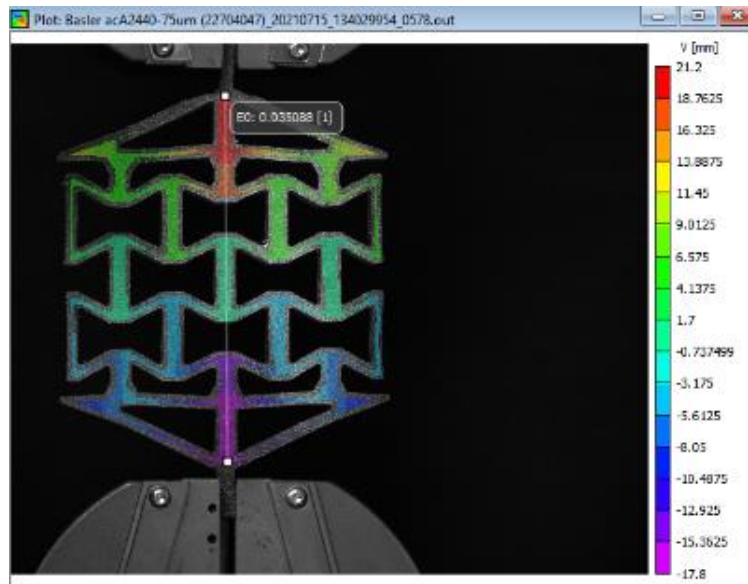


Ilustración 84: Colocación del extensómetro.

A la derecha se aprecia una escala de colores, que representa de forma visual el desplazamiento vertical de la estructura, encontrando así una gran similitud con la visualización de resultados de Abaqus, pudiendo comparar ambos casos.

Para obtener la deformación en la pieza (Strain) es necesario un análisis adicional, para así medir esta variable.

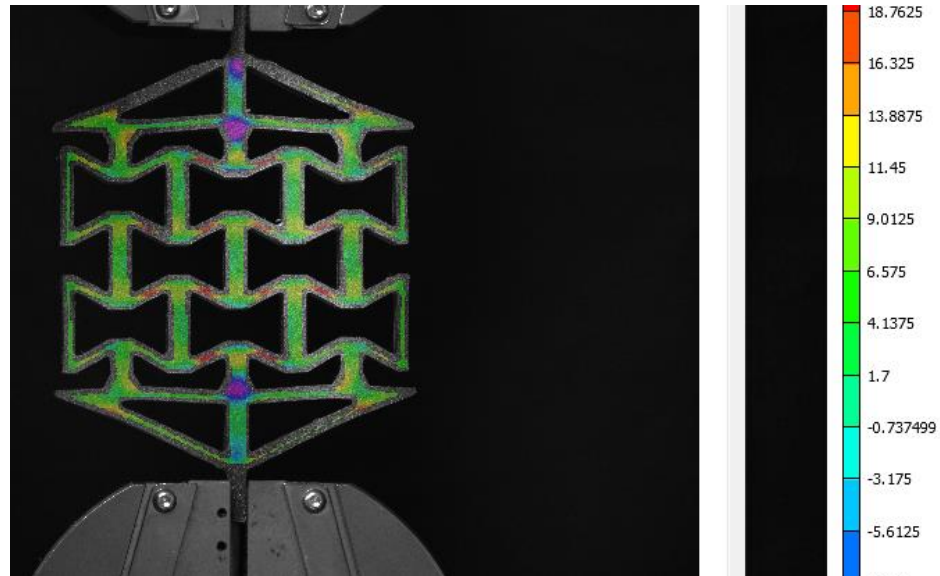


Ilustración 85: Strain computation.

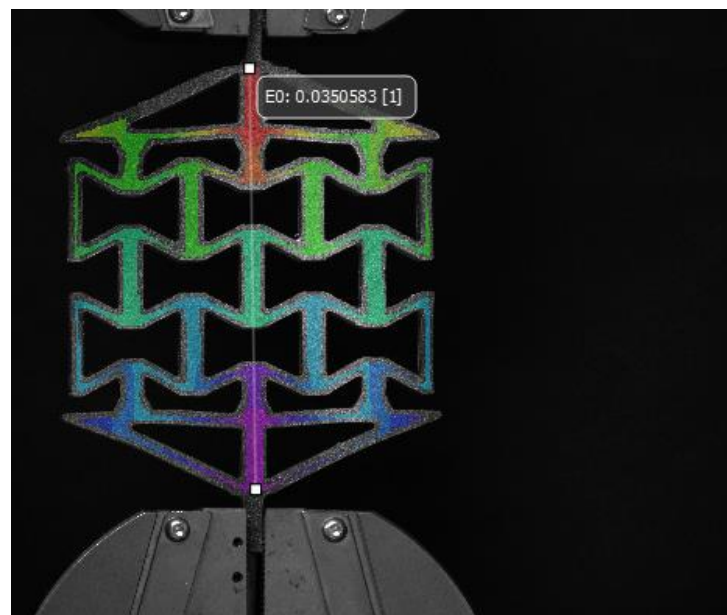


Ilustración 86: Resultados de deformación obtenidos en el ensayo mediante VIC2D.

Por último, para obtener los valores mostrados anteriormente de forma más precisa, se extraen las gráficas de desplazamientos y deformación ('Plot Extractions').

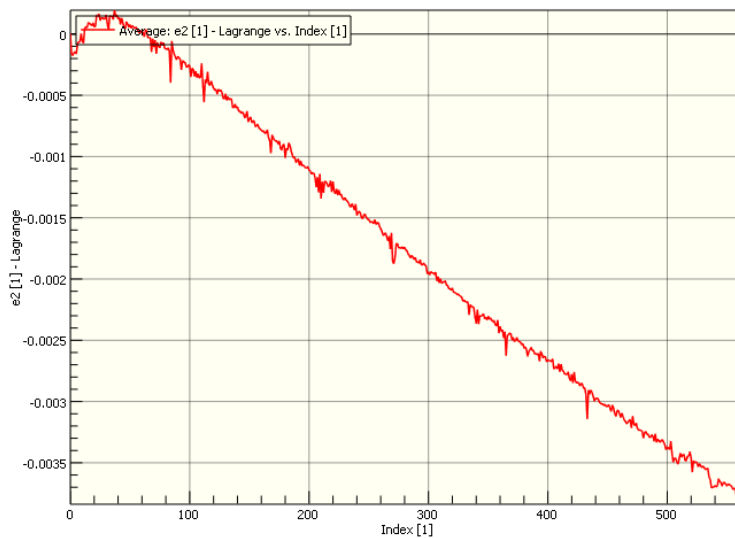


Ilustración 87: Deformación obtenida en VIC-2D.

Así, se obtiene una deformación (en valor absoluto) de 0.0036mm.

Por último, me gustaría destacar que estos últimos tres apartados (simulaciones, ensayos y correlación de imágenes) se han realizado de manera simultánea, aunque para su explicación los haya dividido. Por ejemplo, al realizar la simulación en Abaqus, la carga máxima de rotura que se configuró es de 1043N, que se calculó en relación a los ensayos de tracción, aunque esto venga explicado posteriormente en la memoria.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Previamente se desea comprobar que los resultados obtenidos en el ensayo experimental como en la simulación son similares. Para ello, recopiló los datos obtenidos anteriormente (para el ensayo de rotura a 1043N):

- Máximo desplazamiento vertical obtenido en Abaqus (simulación): 0.0036mm.
- Máximo desplazamiento vertical obtenido en VIC2D (experimental): 0.00346mm.

Minimum	-536.243E-06	0.
At Node	197841	205280
Maximum	561.045E-06	3.46374E-03
At Node	148317	68418
Total	-544.112E-03	344.191

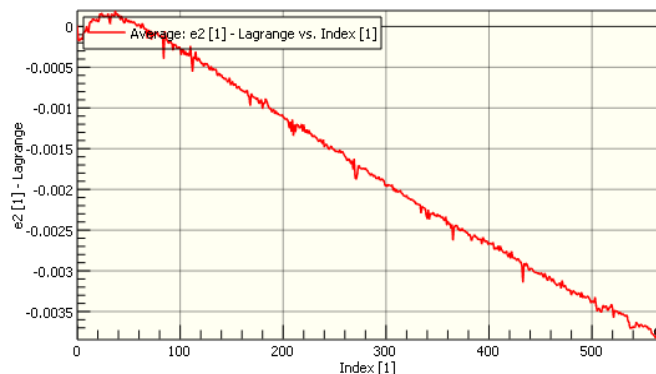


Ilustración 88: Comparación de los resultados obtenidos en Abaqus y VIC2D.

Debido a que las deformaciones en este ensayo son mínimas, se expresa la deformación en porcentaje para calcular aproximadamente el error entre ambos métodos:

$$\text{Deformación (\%)} = \frac{0.0036 - 0.00346}{0.0036} \times 100 = 3.89\% \quad (\text{Fórmula 7.1})$$

A la vista de los resultados, se obtiene una excelente correlación entre los datos obtenidos de forma experimental y numérica, cosa que el artículo previo no consigue.

Por tanto, los campos de desplazamientos obtenidos mediante el análisis numérico y experimental son los siguientes:

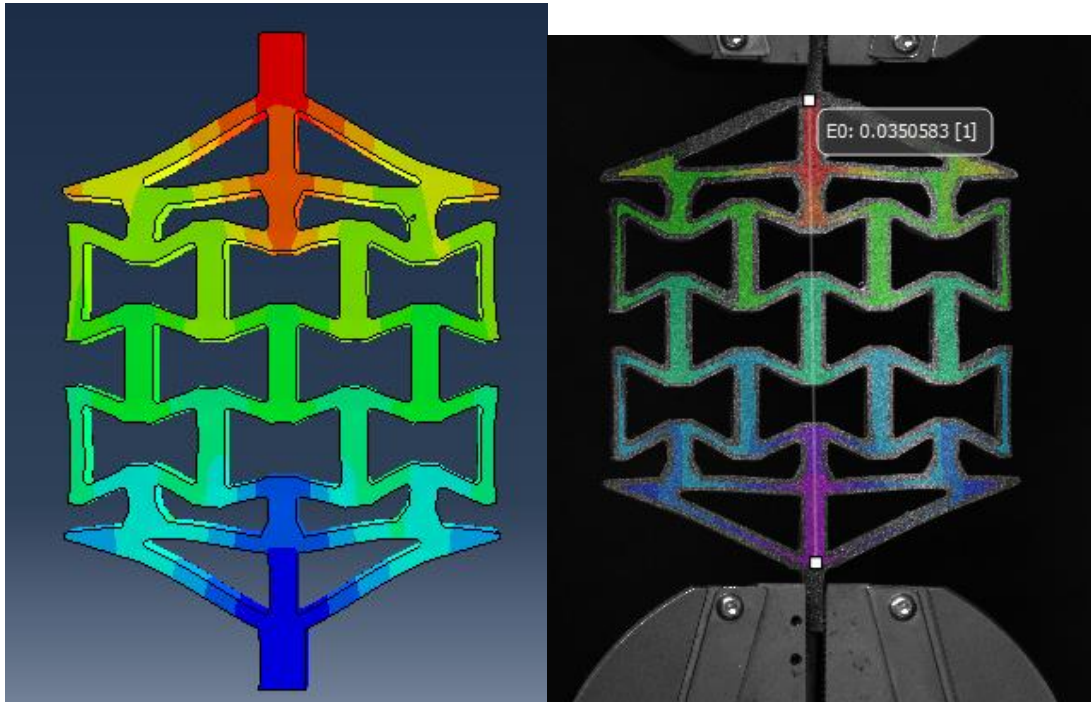


Ilustración 89: Comparación de resultados

A continuación, con el fin de desarrollar una serie de gráficas representativas de las propiedades de la estructura de panal de abeja y así poder obtener un análisis más preciso, se comparará la variación de la presión a la cual se somete la estructura y el coeficiente de Poisson con respecto al desplazamiento vertical (U_2). Para ello, se realizan distintos ensayos, cambiando únicamente la carga distribuida de presión y viendo los desplazamientos en el eje horizontal (U_1) y vertical (U_2).

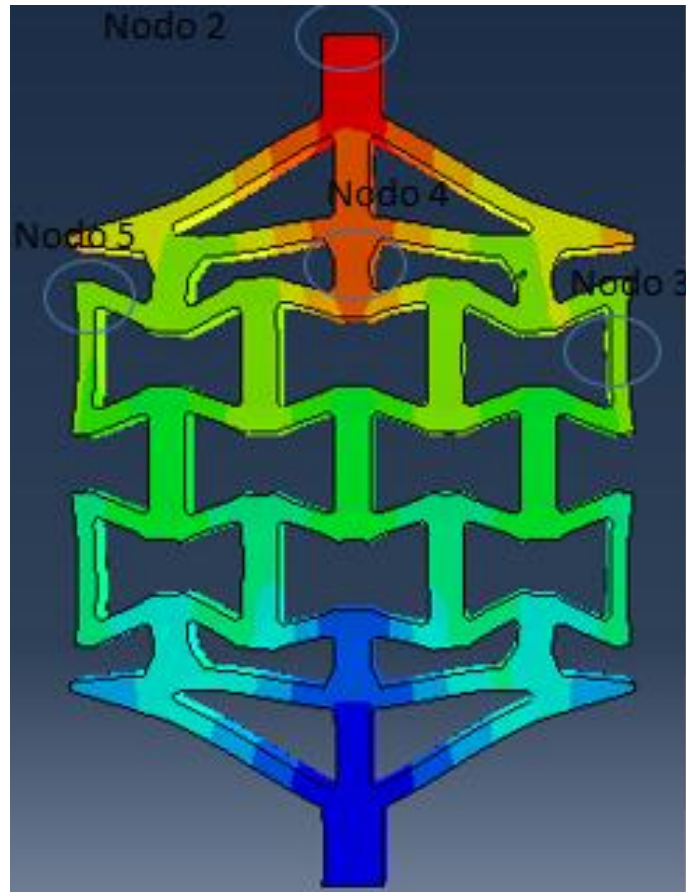


Ilustración 90: Nodos analizados.

Dicho proceso es muy metódico: Empleando el programa 'NotePad++', se abre el fichero con extensión .inp que se quiere modificar, donde entre otros parámetros, aparecen las condiciones de contorno y las cargas empleadas. Basta con modificar las cargas en cada punto, abrir la interfaz gráfica de nuevo, importar la pieza, lanzar la simulación, y mediante la opción 'Report Field Output', obtener el desplazamiento en U1 y U2, ya que el programa de por sí detecta el punto de máximo valor y el nodo en el que se produce, facilitando así en gran medida los cálculos.

```
435194 *Surface, type=ELEMENT, name=SURF-159
435195 _SURF-159_S5, S5
435196 *Surface, type=ELEMENT, name=SURF-160
435197 _SURF-160_S5, S5
435198 *Surface, type=ELEMENT, name=SURF-161
435199 _SURF-161_S5, S5
```

Ilustración 91: Configuración de las cargas en el archivo .inp

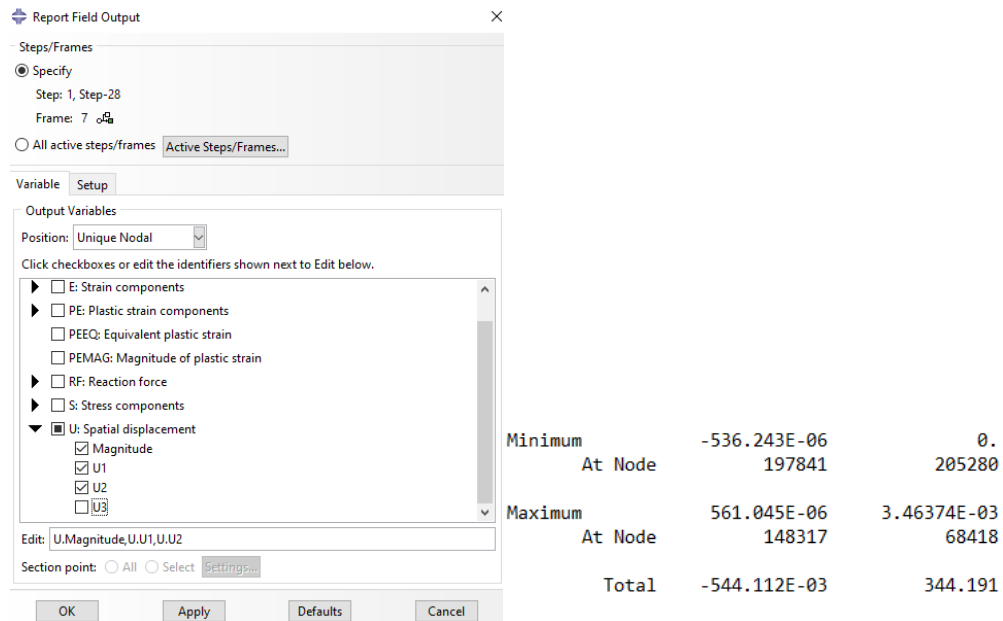


Ilustración 92: Report Field Output.

Aunque pueda parecer más complicado intercalar ambos programas, es de gran utilidad, ya que se consigue reducir el tiempo de programación de cada ensayo en una media hora aproximadamente.

Así, para cada nodo en particular se aplicarán distintas cargas de tracción, comenzando desde 0 hasta 8.98 MPa, que es la correspondiente a la presión de rotura de la probeta en los ensayos (1043 N).

- **Nodo 1:** Para esta primera aproximación de resultados se escogieron los puntos de mayor desplazamiento vertical y horizontal, de la forma explicada anteriormente. Se obtienen los siguientes resultados:

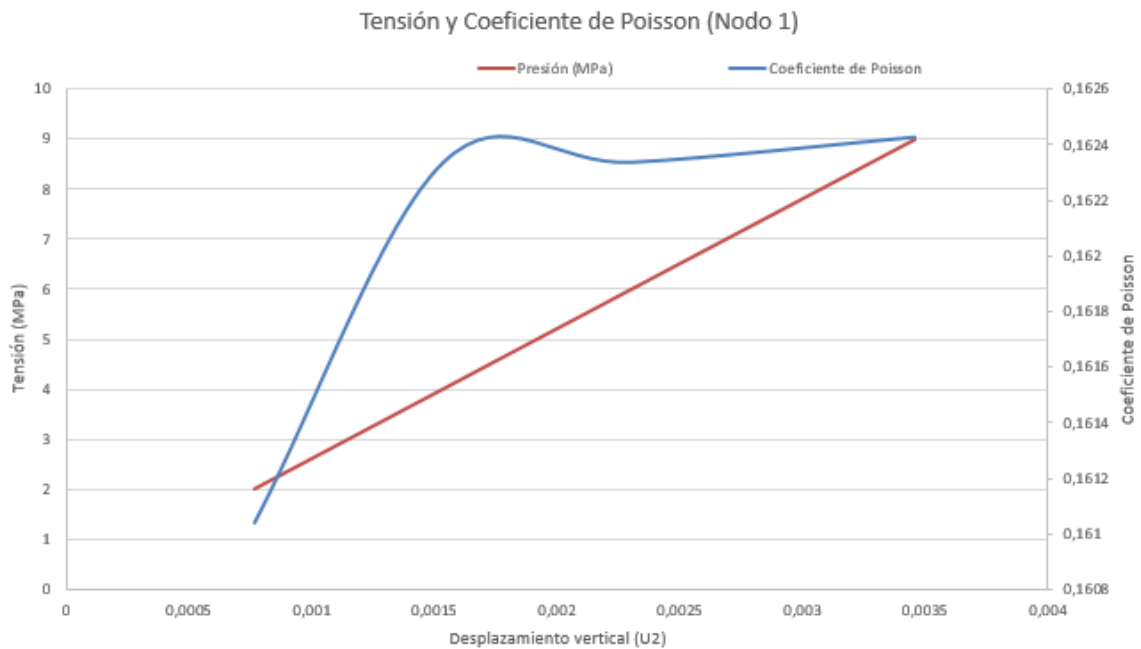


Ilustración 93: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 1.

Se aprecia que la tensión aumenta de forma lineal conforme aumenta la deformación, mientras que el coeficiente de Poisson toma valores centrados en 0.162 con un error muy pequeño, lo cual es lógico ya que debería dar como resultante un valor intermedio entre el coeficiente de Poisson de la fibra de vidrio y del Onyx.

También se podría pensar que, al estudiar valores de desplazamientos máximos, el coeficiente de Poisson en este caso será máximo también, pero esto no tiene por qué ser así, ya que en cualquier otro punto se puede dar una combinación de valores que desmienta esto.

- Nodo 2: Para este punto se buscó el de mayor desplazamiento vertical de la estructura, el cual corresponde al nodo 504, como se muestra en las ilustraciones a continuación.

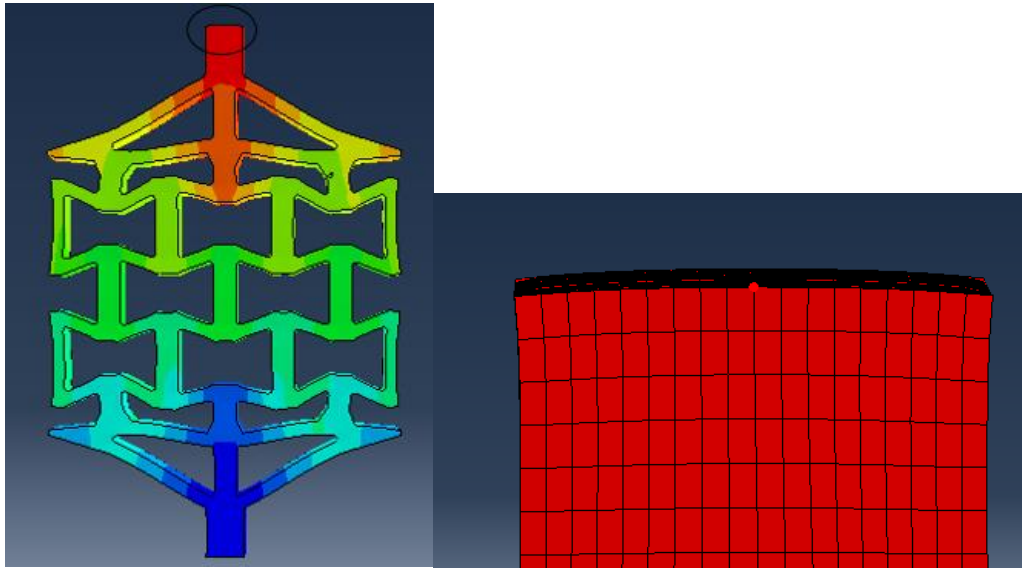


Ilustración 94: Nodo 504.

Los resultados obtenidos se plasman en la siguiente gráfica:

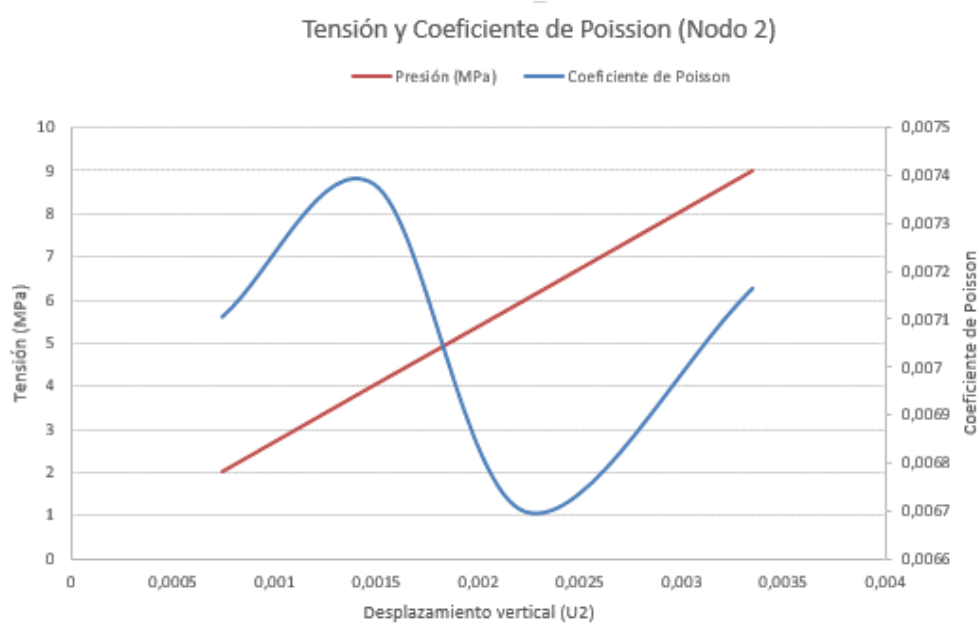


Ilustración 95: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 2.

De nuevo, se aprecia una relación lineal entre la tensión y la deformación vertical, pero en este caso el Poisson toma valores más pequeños, lo cual se podía presuponer, ya que como se ha definido anteriormente, la deformación vertical en ese punto es máxima, por tanto el cociente $U1/U2$ se reduce.

- Nodo 3: Al contrario que en el caso anterior, en el nodo 2396 se visualiza el máximo desplazamiento horizontal de la pieza.

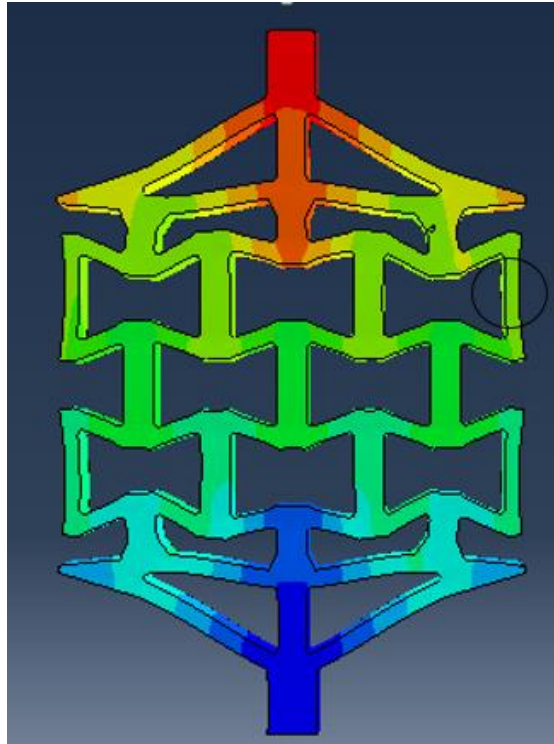


Ilustración 96: Nodo 2396.

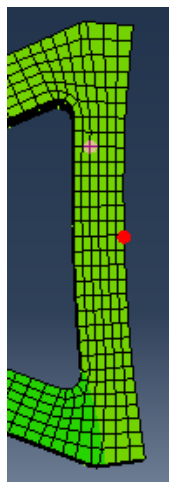


Ilustración 97: Zoom del nodo 2396.

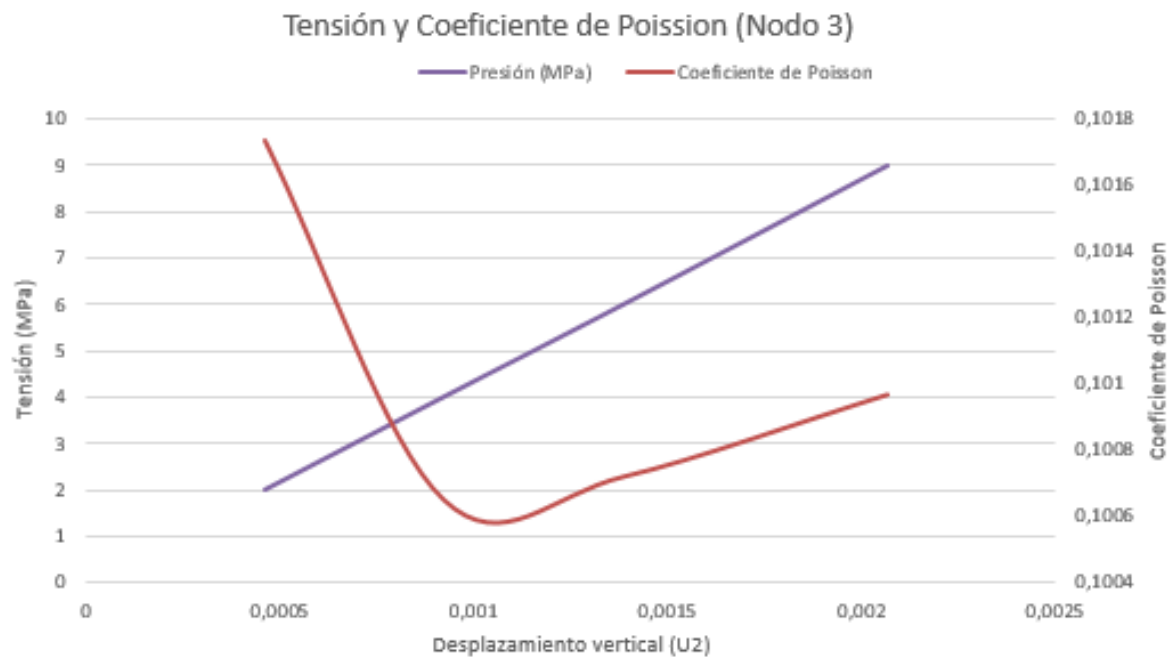


Ilustración 98: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 3.

Destaca que el Poisson en este caso es mayor que en el nodo 2, debido a que el desplazamiento horizontal juega un papel más importante (como era de esperar), aunque el desplazamiento vertical también hay que tenerlo en cuenta.

- **Nodo 4:** En este nodo se busca observar el campo de desplazamientos en un punto centrado en la estructura, para así ver el comportamiento de dicha zona central ante las cargas aplicadas.

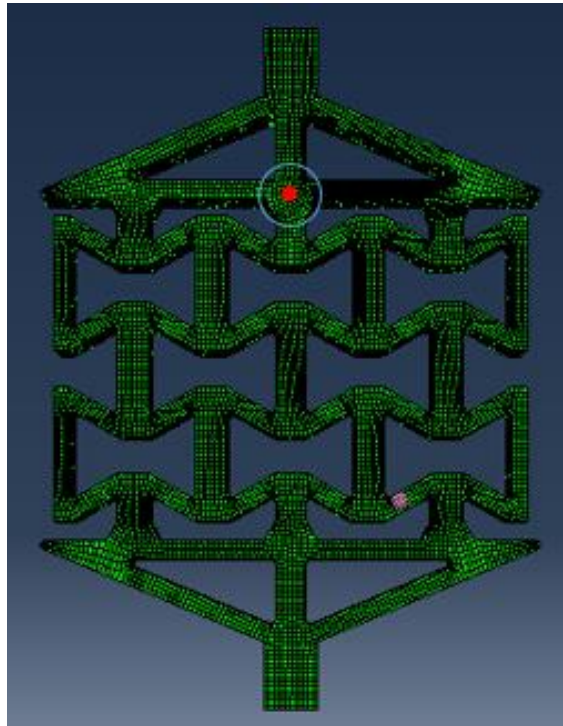


Ilustración 99: Nodo 2807.

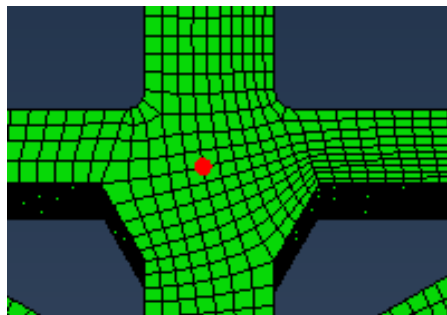


Ilustración 100: Zoom nodo 2807.

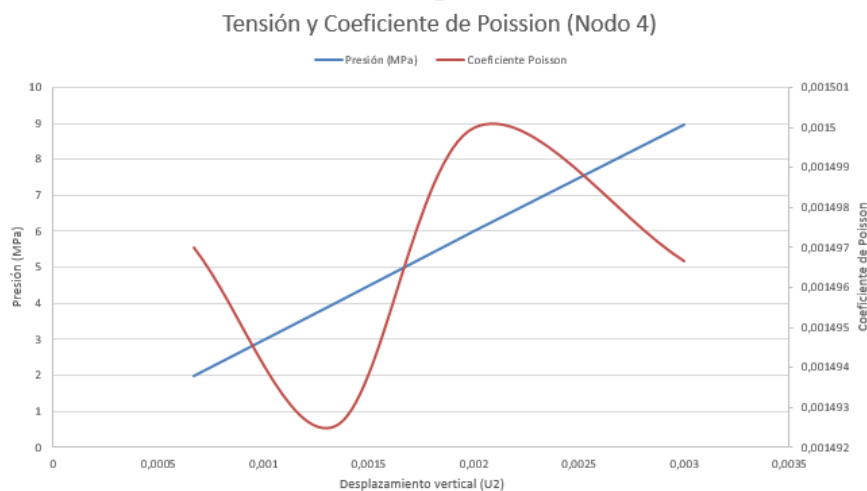


Ilustración 101: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 4.

Como conclusión se aprecia que el valor del coeficiente de Poisson es cercano a dos órdenes de magnitud menor que en los cálculos anteriores. Esto es debido principalmente a que el desplazamiento horizontal es bastante menor que el vertical (lo cual se puede presuponer, teniendo en cuenta que dicha zona central de la estructura no va a sufrir una fuerte sollicitación de esfuerzos).

- Nodo 5: La última comprobación guarda una gran similitud con la del nodo 2396 analizado previamente, ya que se pretende observar si se cumple algún criterio de simetría en el campo de desplazamientos con respecto al eje vertical.

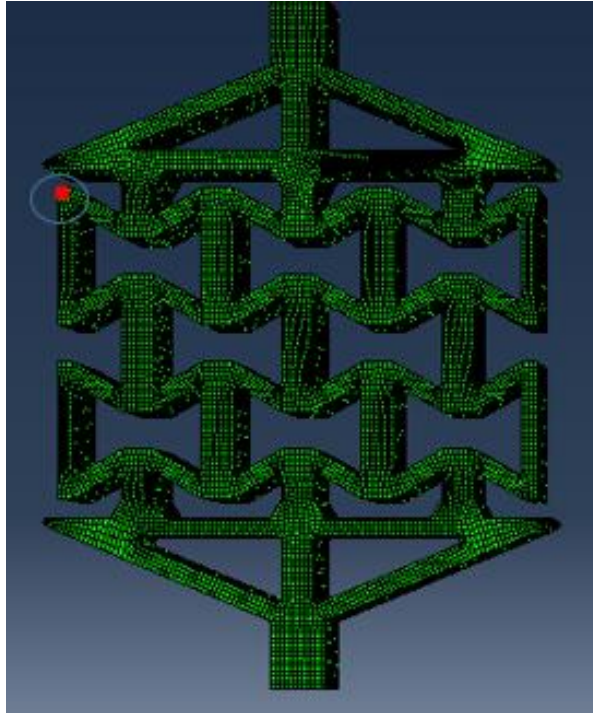


Ilustración 102: Nodo 7929.

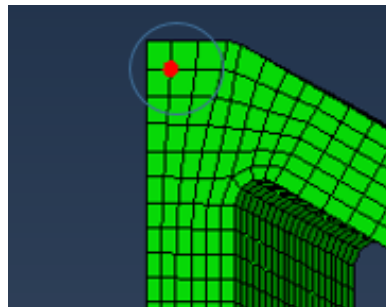


Ilustración 103: Zoom nodo 7929.

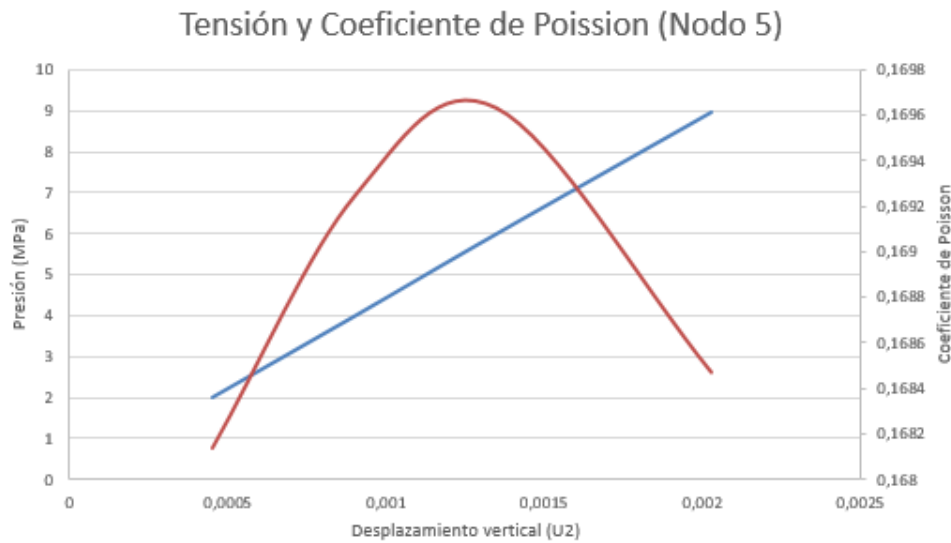


Ilustración 104: Gráfica Tensión y Coeficiente de Poisson para el Nodo 5.

Se aprecia que el valor para el coeficiente de Poisson no es el mismo, ya que no se han cogido nodos exactamente homólogos para ambos análisis, y debido a que los desplazamientos son muy reducidos, una pequeña desviación puede mostrar un gran error. Aún así, se mantiene una correspondencia en los datos obtenidos.

8. CONCLUSIONES

La finalidad principal de comprobar los desplazamientos en estos cinco nodos es, aparte de observar el comportamiento de la estructura en distintos puntos, asegurar la correlación de datos entre las simulaciones y los ensayos numéricos. Efectivamente, se aprecia que se cumple dicha relación, al tener errores de un 7% como máximo.

Además, en todos los nodos analizados, se cumple que la relación entre la tensión y la deformación es lineal, y el coeficiente de Poisson oscila entre valores muy próximos, con un error apreciable en la tercera cifra decimal (lo cual da pruebas de que tanto la simulación como los ensayos se han realizado correctamente).

El máximo desplazamiento y el máximo valor del coeficiente de Poisson se obtiene en el último nodo analizado, con un valor medio de 0.169 aproximadamente. Teniendo en cuenta que se trata de un material compuesto, es un valor más que

aceptable, ya que combina los coeficientes de la fibra de vidrio y onyx (0.3 y 0.104, respectivamente).

Por último, debido a las mordazas empleadas y la falta de experiencia con este tipo de estructuras, se aprecia que la carga de rotura no fue tan alta como la esperada, ya que la estructura rompió por la parte triangular (que inicialmente se diseñó como apoyo), y no se llegó a forzar completamente la estructura de panal de abeja, no pudiendo apreciar así su completa versatilidad.

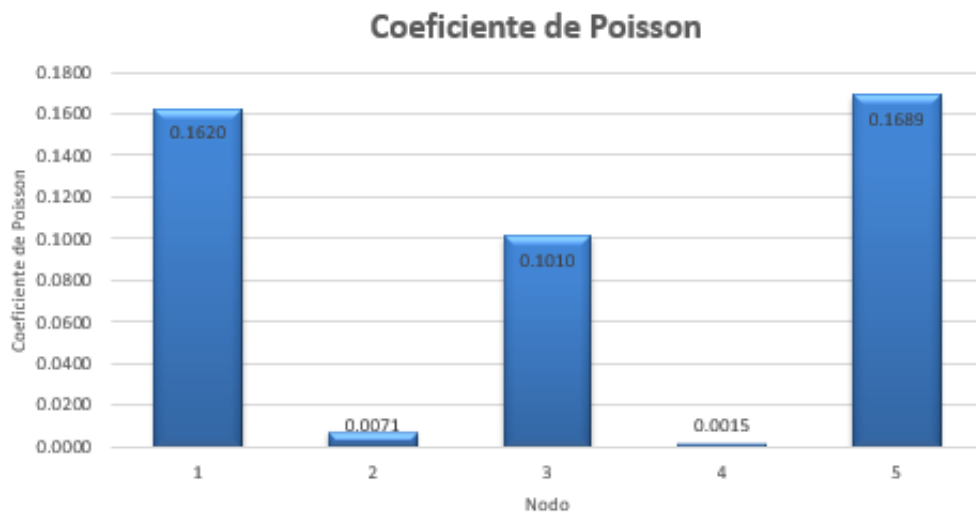


Ilustración 105: Coeficiente de Poisson para cada nodo.

Los valores obtenidos para el Poisson varían mucho en función del nodo analizado, esto es debido a que, a priori, no se puede predecir la relación entre el desplazamiento horizontal y vertical (definición del coeficiente de Poisson).

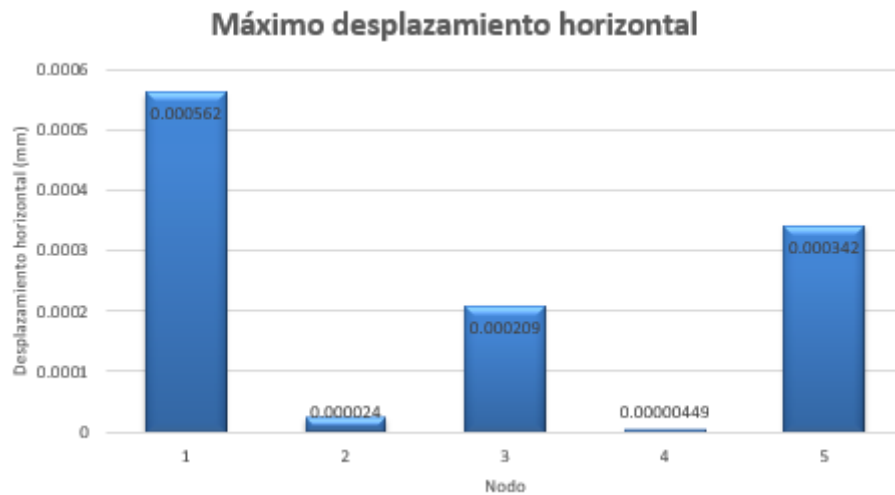


Ilustración 106: Máximo desplazamiento horizontal para cada nodo.

Para el nodo 1 (punto de máximo desplazamiento de la estructura), se cumple que el desplazamiento horizontal es el mayor. Además, aunque se han analizado nodos en los que se buscaba un valor similar para dicho desplazamiento horizontal (nodo 5), el desplazamiento vertical también es considerable.

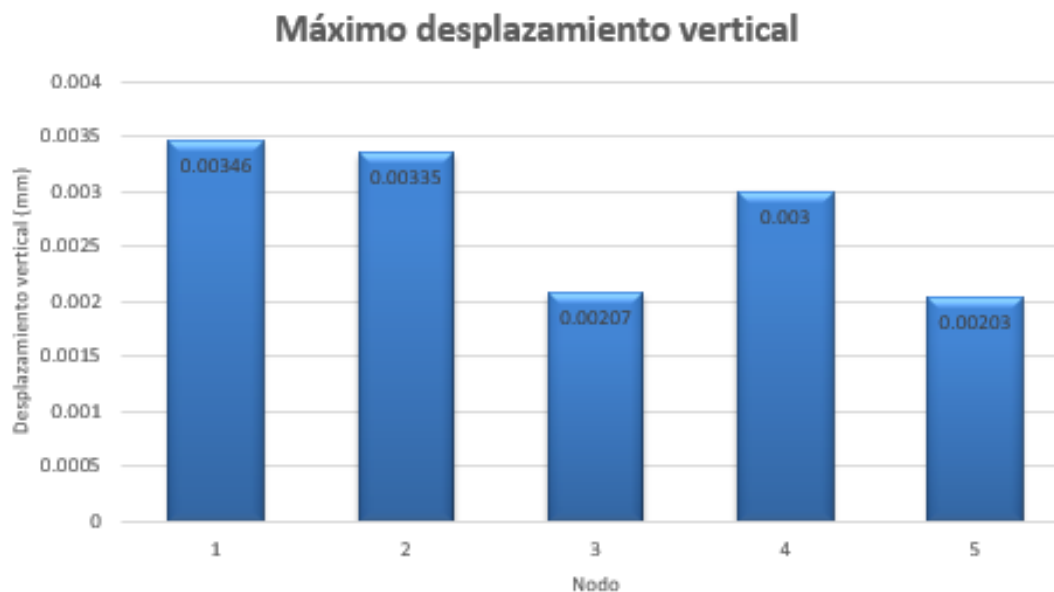


Ilustración 107: Máximo desplazamiento vertical para cada nodo.

De nuevo, para el nodo 1 (punto de máximo desplazamiento de la estructura), se cumple que el desplazamiento vertical es el mayor, aunque también habría que tener en cuenta este mismo parámetro en el nodo 2, ya que toma valores muy próximos.

9. REFERENCIAS

- [1] *'Bioinspired engineering of honeycomb structure – Using nature to inspire human innovation'*; Qiancheng Zhang et al.
- [2] *'Novel Auxetic Structures with Enhanced Mechanical Properties'* – Xiang Li, Quingsong Wang, Zhenyu Yang, Zixing Lu.
- [3] *'VIC 2D v6 Reference Manual'* – Correlated Solutions
- [4] *'3D Printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures'*; Chan Quan et al.
- [5] *'Abaqus/CAE User's Manual v6.11'* – Abaqus.
- [6] *'Abaqus Keywords Reference Manual v6.11'* – Abaqus.
- [7] *Programa de mantenimiento preventivo para Markforged Onyx One 3D*
- [8] *'Composites Data Sheet'* – Markforged
- [9] *'Design Guide for 3D Printing with Composites'* – Markforged
- [10] *'Eiger User Manual'* – Markforged
- [11] *'Honeycomb, la herencia de las abejas'*, - Meka3 mecanizado y soluciones.
- [12] *'A Good Practices Guide for Digital Image Correlation'* – I. Jones.
- [13] *'Modelado por Deposición Fundida'* – Materialise.
- [14] *'Breve historia de la impresión 3D'* - Impresoras3d.com
- [15] *'Hex Tower'* – Rojkind Arquitectos.
- [16] *'Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials ASTM-D3039'*
- [17] *'Caracterización mecánica de probetas impresas con material de alto módulo elástico'* – Ismael González Lozano.
- [18] *'Análisis de probetas de tracción y cortante fabricadas en FDM y reforzadas mediante fibra de vidrio continua'* – Baltasar García Galiano.

[19] 'Análisis mecánico de probetas fabricadas en FDM mediante fibra de vidrio continua' – Antonio González Ruiz.

[20] 'Coeficiente de Poisson' – Mecapedia.

10. FUTUROS PROYECTOS

Debido al problema que se presentó al tener que limar los extremos para que encajara con las mordazas disponibles, se diseñó una nueva estructura, solventando este problema y modificando ciertas partes de la misma, con el fin de que aguantara una mayor carga antes de romper.

Así, se redondeó la parte triangular de la estructura, otorgándole una mayor rigidez, y se alargó los extremos de la misma, para facilitar el agarre de las mordazas para los ensayos de tracción. La distribución interna de las capas de fibra de vidrio seguirá siendo la misma (intercaladas cada 5 capas), manteniendo así el espesor total de la pieza en 10mm.

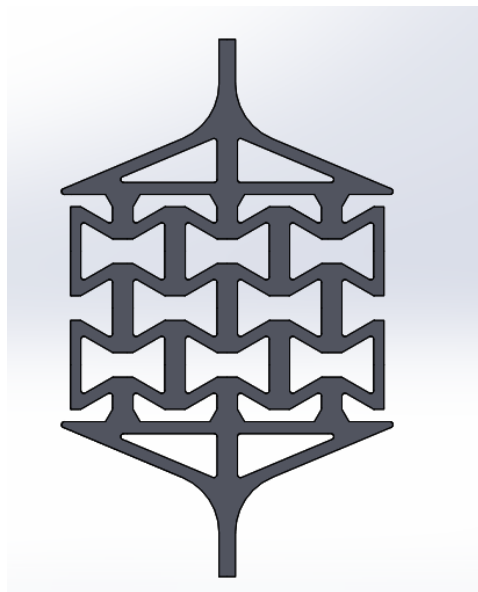


Ilustración 108: Estructura honeycomb modificada.

A priori, con esta configuración conseguiría soportar una mayor carga antes de la rotura. Se deja para futuros estudios demostrar esta hipótesis planteada.

ANEXO I: Mantenimiento de la Impresora 3D Markforged

El proveedor ofrece una pequeña guía sobre los criterios a seguir para el correcto uso de la impresora. Destaca una división inicial a diario, corto y largo plazo [7].

En cuanto al cuidado diario, destaca lavar la bandeja de impresión una vez al día con jabón y una esponja humedecida, además de verificar que no haya quedado material plástico o fibra de impresiones anteriores, y nivelar la plataforma, ya que ha podido sufrir algún tipo de variación al quitar la bandeja [7].

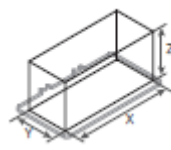
Para el mantenimiento a largo plazo, se requiere:

- Sustituir las boquillas de impresión para plástico cada 3-6 meses o tras 1000 horas de impresión, y cada 1-3 meses o 500 horas de impresión para la boquilla de fibra.
- Comprobar la tensión de las correas cada 250 horas de impresión
- Sustituir los tubos Bowden y de suministro cada 1000 horas de impresión, en el caso del suministro de plástico, y realizarlo con más frecuencia para el caso de los tubos que contengan fibra (cada 500 horas).

ANEXO II: Composites Design Guide.

En este anexo se pretenden mostrar los parámetros genéricos empleados en la impresora 3D Markforged. Estos criterios se aplican para un tamaño de capa de 100 micras, o lo que es lo mismo, 0.1 mm.

El máximo tamaño de pieza permitido para imprimir debe ser menor de las dimensiones de 320x132x154 mm, que es el tamaño de la mesa de impresión [9].



Maximum part size
Desktop Series
X: 320 mm (12.60")
Y: 132 mm (5.20")
Z: 154 mm (6.06")

Ilustración 109: Tamaño máximo permitido para imprimir una pieza.

Para el caso de piezas en las que requieran alguna geometría más compleja, el mínimo ángulo de inclinación que puede tener una pieza para poder imprimirse sin necesidad de soportes de ayuda. Por defecto, el software coloca soportes para cualquier ángulo menor de 45° , aunque no sea estrictamente necesario. El mínimo diámetro para una circunferencia (tanto exterior como interior) es de 1.6 mm [9].

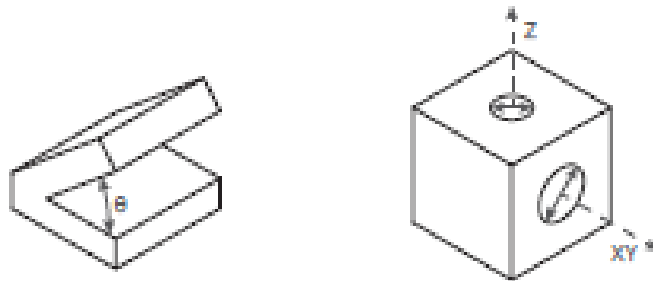


Ilustración 110: Restricciones para la impresión de piezas.

Uno de los problemas que surgió al diseñar la pieza fue que el espesor mínimo en el artículo de investigación que se tomó como referencia era de 2.36 mm, pero según se muestra en la ilustración inferior, éste debe de ser mayor de 3.6 mm para poder incluir la fibra de vidrio.

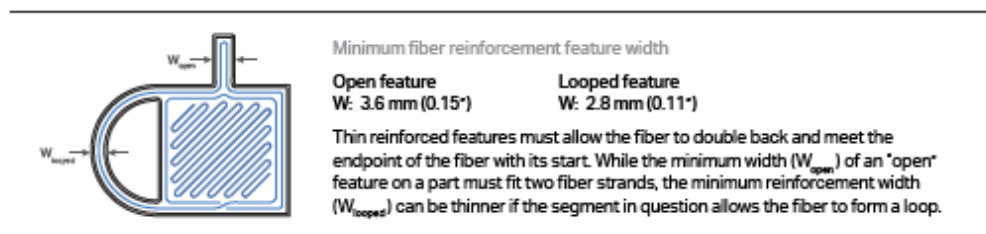


Ilustración 111: Espesor mínimo para el empleo de la fibra de vidrio.

La longitud mínima de fibra empleada es de 45mm (cantidad mínima de fibra que la boquilla puede depositar y cortar), mientras que el área mínima es de 90mm^2 independientemente de la geometría del material.



Ilustración 112: Longitudes características mínimas para realizar la impresión.

Como pauta general, el fabricante presenta una serie de consideraciones que se deberían tener en cuenta antes de realizar la impresión de cualquier pieza, entre las que se encuentran [9]:

- Determinar las condiciones de carga: Los composites impresos en 3D son más duros en planos paralelos a la bandeja de impresión, especialmente si están reforzados con fibra en capas alternas.

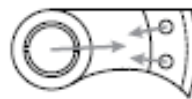


Ilustración 113: Condiciones de cargas para una pieza en particular.

- Identificar dimensiones críticas: Prioridad en la localización de estas partes, para situarlas en el mismo plano que la bandeja y así obtener una impresión óptima
- Maximizar la superficie de contacto pieza – bandeja: Esto elimina en gran parte el uso de soportes externos y favorece la adhesión entre ambos.



Ilustración 114: Colocación de la pieza para facilitar la impresión.

- Eliminar, en lo posible, el uso de soportes y prestar especial atención a los voladizos.
- Incluir chaflanes: Favorece la transición entre distintas superficies y reduce la concentración de tensiones en esquinas. Por ejemplo, en la ilustración

que se muestra a continuación, redondeando las esquinas se consigue, aparte de una mejora estética, facilitar la impresión de la misma, ya que como se ha comprobado en estudios previos, al mantener superficies con puntas, la boquilla no deposita correctamente el material y se forman imperfecciones.

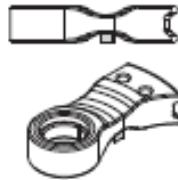


Ilustración 115: Achaflanado de una pieza.

- Tener en cuenta la cola de impresión: Se recomienda imprimir piezas con un bajo tiempo de impresión (menor de 3 horas) durante el día y para las piezas con mayor necesidad, imprimirlas por la noche, fuera de la jornada laboral.

También es interesante analizar los pasos a tener en cuenta para analizar el refuerzo de fibra continua a incluir en la pieza [9].

- Identificar las condiciones de carga: Analizar cómo las cargas afectan a fenómenos en la pieza como pandeo, flexión o tracción.

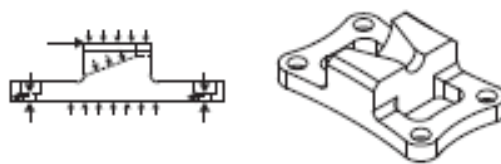


Ilustración 116: Ejemplo de aplicación de cargas sobre una pieza.

- Orientación de la impresión: En el caso, por ejemplo, de que se tuviera una pieza sometida a cargas repartidas sobre múltiples ejes, una opción sería plantearse dividir la pieza o modificar el diseño de la misma.
- Determinar las áreas de refuerzo del material: Establecidas en función de varios parámetros, como las condiciones de carga.

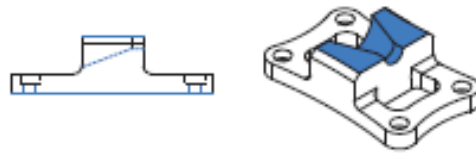


Ilustración 117: Refuerzo del material.

- Equilibrar las capas de fibra de refuerzo incluidas en la pieza: En el caso de que sólo una parte de la pieza tenga fibras de refuerzo, puede darse el fenómeno de que dicho lado tenga una sección transversal diferente al lado opuesto.
- Posicionamiento interno de las fibras: Viene a resumir que es importante revisar si la posición de las fibras es la preestablecida inicialmente, para así contener fibra en las partes deseadas y no en otras, lo cual podría dar resultados no esperados.

Para analizar el comportamiento de la fibra de refuerzo, se puede generalizar conociendo que tienen unas mejores propiedades a tracción, ya que cuando se someten a compresión o flexión, ofrecen una muy baja resistencia [9].

- Tracción: Se recomienda que la distribución de las capas de fibra de vidrio a lo largo de la pieza sea constante. El software de impresión 'Eiger' mencionado anteriormente facilita este proceso, con la función 'Concentric Fiber Ring' o 'Fiber Angles', en el caso de que se trate de una distribución de fibra isotrópica.



Ilustración 118: Trabajo de las fibras a tracción.

- Flexión: La teoría de flexión en vigas muestra que, cuando se aplica una carga de este tipo a una viga, las fibras correspondientes a la capa inferior trabajan a tracción, mientras que las fibras de la capa superior lo hacen a compresión, lo cual se puede compensar fácilmente colocando fibras de refuerzo en la capa superior e inferior, que serán las zonas con mayor sollicitación de prestaciones,

empleando de nuevo las funciones del software 'Eiger' vistas en el apartado anterior.



Ilustración 119: Flexión de vigas.

- Compresión: El aspecto más perjudicial en este tipo de cargas es la distribución de fuerzas a la que está sometida la estructura. Para solventar este problema, se empleará las funciones 'Concentric Reinforcement' en las superficies con cargas transversales, además de 'Isotropic/Concentric Fiber' para las superficies superiores e inferiores que estén sometidas a cargas verticales

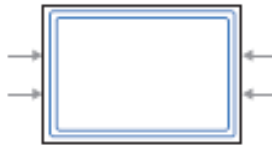
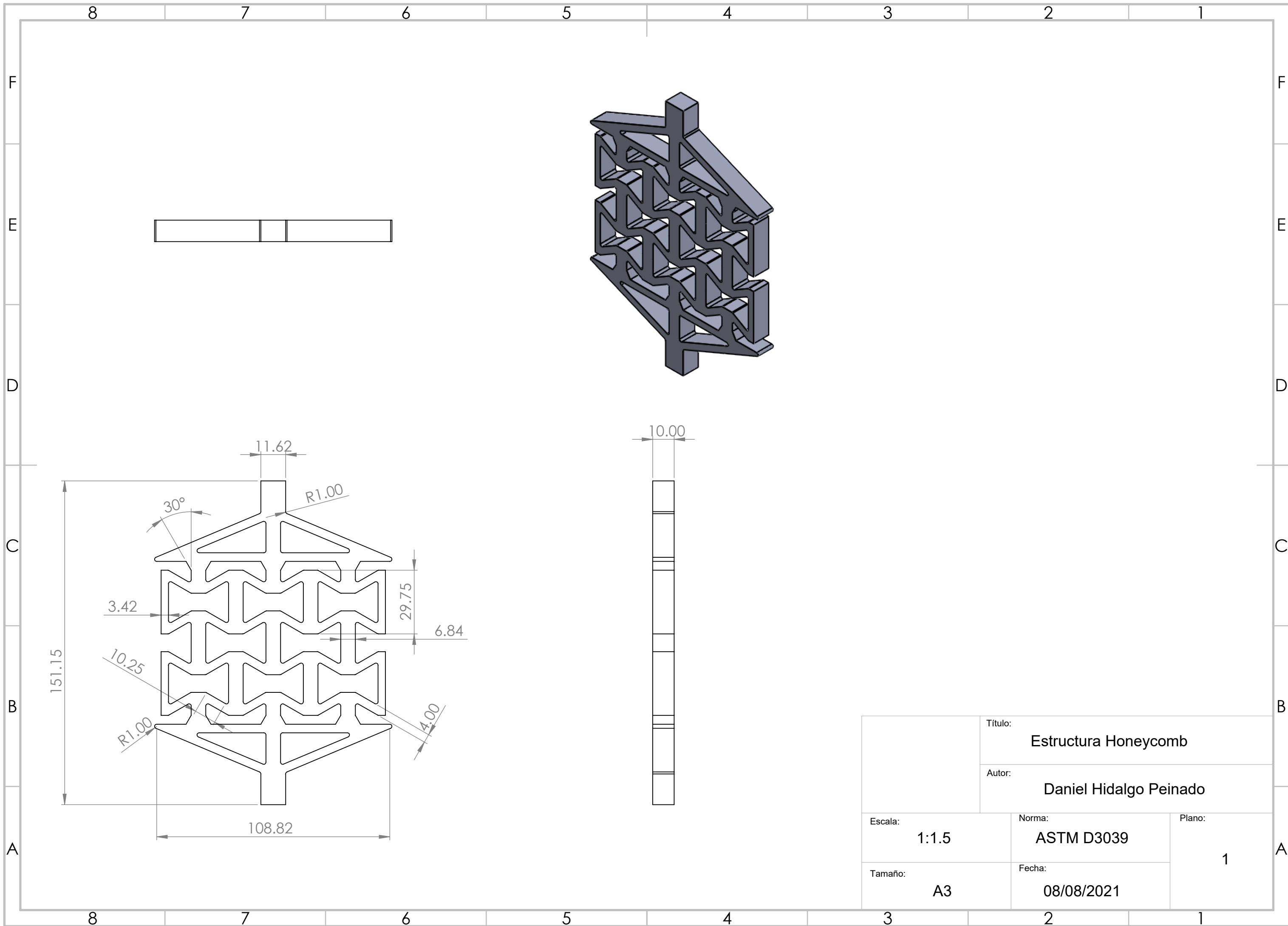
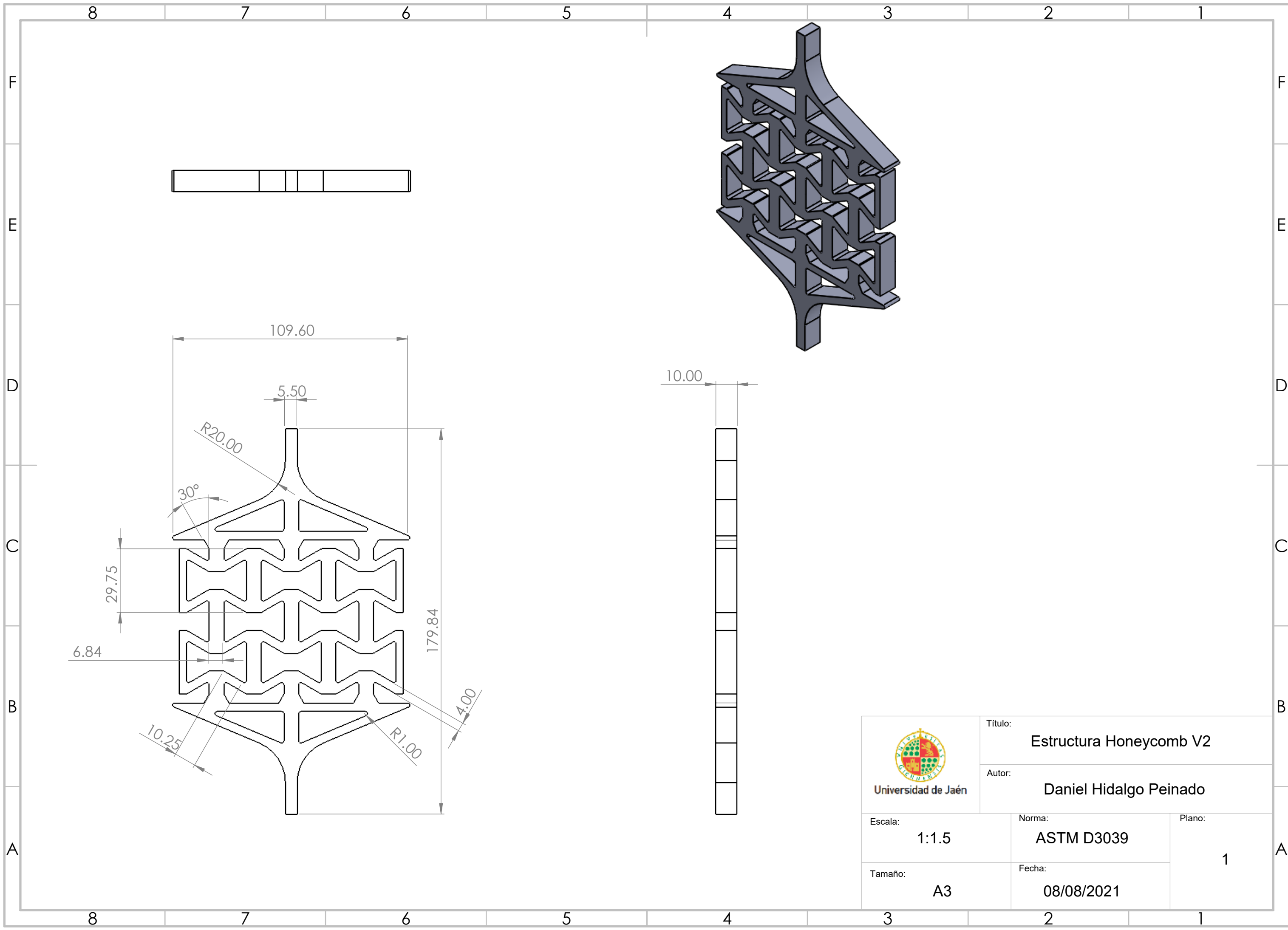


Ilustración 120: Compresión de una pieza.

ANEXO III: Planos



	Título: Estructura Honeycomb	
	Autor: Daniel Hidalgo Peinado	
Escala: 1:1.5	Norma: ASTM D3039	Plano: 1
Tamaño: A3	Fecha: 08/08/2021	



 Universidad de Jaén	Título: Estructura Honeycomb V2	
	Autor: Daniel Hidalgo Peinado	
Escala: 1:1.5	Norma: ASTM D3039	Plano: 1
Tamaño: A3	Fecha: 08/08/2021	