



“Simulación, prototipado y ensayos a flexión de vigas tipo sándwich con núcleo de material celular”

Rodríguez Chancusi, Diego Fernando

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Pérez Rosales, José Emilio

28 de Febrero del 2023

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

TESIS RODRÍGUEZ CHANCUSI DIEGO FERNANDO

< 1%
Similitudes

2%
0% similitudes entre comillas

1%
Idioma no reconocido

<p>Nombre del documento: TESIS RODRÍGUEZ CHANCUSI DIEGO FERNANDO.pdf ID del documento: 534a201ded0d454d7898eaea29034d2edeecf085 Tamaño del documento original: 6,21 Mo</p>	<p>Depositante: DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE Fecha de depósito: 15/2/2023 Tipo de carga: Interface fecha de fin de análisis: 15/2/2023</p>	<p>Número de palabras: 14.911 Número de caracteres: 97.287</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 www.sciencedirect.com Quantitative 3D structural analysis of the cellular microstr...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (47 palabras)
2	 cidesi.repositorioinstitucional.mx	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (31 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 e-ciencia.urjc.es IV Jornada de Promoción a la Investigación Básica para Estudiantes ...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (15 palabras)
2	 repositorio.espe.edu.ec Validación de elementos poliméricos sometidos a cargas c...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (16 palabras)
3	 repositorio.espe.edu.ec Análisis de la incidencia de aditivos de fracción líquida en ...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)
4	 www.elsevier.es	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- 1  <https://xometry.eu/es/impresion-3d>
- 2  <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- 3  <https://www.elsevier.es/es-revista-quintessence-tecnica-33-articulo-fusion-selectiva-por-laser-el>
- 4  <https://rapidfab.ricoh-europe.com/es/tecnologias/fdm/>
- 5  <https://www.researchgate.net/figure/Honeycomb-Sandwich-Panel-Honeycomb-structures-are>





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Simulación, prototipado y ensayos a flexión de vigas tipo sándwich con núcleo de material celular”**, fue realizado por el señor **Rodríguez Chancusi, Diego Fernando**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de febrero del 2023.

Firma:



Ing. Pérez Rosales, José Emilio

C. C. 1706481957



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Rodríguez Chancusi, Diego Fernando**, con cédula de ciudadanía n°1722647334, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Simulación, prototipado y ensayos a flexión de vigas tipo sándwich con núcleo de material celular”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 7 de febrero del 2023.

Firma

Rodríguez Chancusi, Diego Fernando

C.C.: 1722647334



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Yo **Rodríguez Chancusi, Diego Fernando**, con cédula de ciudadanía n° 1722647334, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Simulación, prototipado y ensayos a flexión de vigas tipo sándwich con núcleo de material celular”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 7 de febrero del 2023.

Firma

Rodríguez Chancusi, Diego Fernando

C.C.:1722647334

Dedicatoria

Quisiera dedicar esta tesis a mi madre Anita que ha sabido trasmitirme el cariño, la ternura, paciencia y dedicación en hacer las cosas. A mi padre Fernando, que ha sido ejemplo de perseverancia y lucha en esta vida. A los dos que se esforzaron de gran manera para asegurar que yo tuviera una educación de calidad. Ellos han sido una fuente de inspiración y me han dado la fortaleza necesaria cuando he pensado en rendirme, los cuales continuamente me brindan el apoyo moral, espiritual y emocional.

A mi hermana, abuelitos, familiares, mentores, amigos y compañeros de clase que compartieron sus conocimientos y palabras de consejo y aliento para terminar esta gran etapa.

Este trabajo es fruto de innumerables y arduos sacrificios. A través del esfuerzo y constancia, este proyecto está dedicado de todo corazón y con orgullo a las personas que sirven de inspiración en esta vida, entre ellos mi tutor y mis maestros que con su sabiduría y paciencia me han transmitido los conocimientos y han sabido encaminarme por el camino correcto.

Y por último, dedico este proyecto a Dios que me ha dado una guía, la fuerza, la protección, la sabiduría, las habilidades, las oportunidades y por darme una vida saludable.

Diego Fernando Rodríguez Chancusi

Agradecimiento

Agradezco a mi padre Fernando por su constante esfuerzo, trabajo y dedicación, lo cual se ha convertido en un ejemplo a seguir. A mi madre Anita que ha sido una guía amorosa por sus cuidados. Agradecido con los dos, por todo lo que han hecho por mí, por tomarse el tiempo en su enseñanza diaria ya que sin ustedes este proyecto no podría haberse dado, ustedes son mi inspiración.

Agradezco a mis profesores y mis mentores que me han ayudado a desarrollar mis capacidades intelectuales y reflexivas y con su paciencia han sabido transmitir el conocimiento acerca de la hermosa carrera de ingeniería mecánica.

Gracias a mi hermana, abuelitos, familia, novia y amigos que siempre han apoyado mis sueños, lo cual estoy muy agradecido de tenerlos en mi vida.

Diego Fernando Rodríguez Chancusi

Nomenclatura

<i>TPMS</i>	Superficie mínima triple periódica
<i>AM</i>	Manufactura aditiva
<i>FDM</i>	Modelado por deposición fundida
<i>SLA</i>	Estereolitografía
<i>SLM</i>	Fusión selectiva por láser
<i>FDM</i>	Modelado por deposición fundida “fused deposition modeling”
DOE	Diseño de experimentos
IPA	Alcohol isopropílico
CAD	Computer Aided Design
DMLS	Direct metal laser sintering
FFF	Fabricación de filamentos fundidos

Contenido

Reporte de similitud de contenido	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Nomenclatura.....	8
Resumen	19
Abstract	20
Capítulo I Generalidades.....	21
Introducción	21
Justificación e Importancia	24
Antecedentes.....	24
Alcance.....	26
Objetivos.....	27
<i>Objetivo General</i>	27
<i>Objetivos Específicos</i>	27
Capítulo II Marco teórico	29
Superficies Mínimas	29

	10
<i>Arreglo Schwarz P</i>	31
<i>Arreglo cuadrado bidimensional</i>	32
<i>Arreglo hexagonal tridimensional</i>	33
Fabricación	33
<i>Manufactura aditiva</i>	33
Estereolitografía	34
<i>Resina</i>	35
Fusión selectiva con láser	36
Proceso de Modelado por deposición fundida	36
Estructura Sándwich	37
<i>Características de un panel sándwich</i>	37
<i>Elementos constituyentes de una estructura sándwich</i>	38
Diseño en software Ansys Workbench	39
<i>Static Structural</i>	39
<i>Space Claim</i>	40
Ensayos mecánicos	41
<i>Ensayos o pruebas a flexión</i>	42
Gráfico de fuerza-desplazamiento	43
<i>Propiedades mecánicas en los materiales</i>	44
Módulo de Young o de elasticidad	44

Relación de Poisson (μ):	47
Límite de proporcionalidad	47
Esfuerzo en vigas	47
Capítulo III Diseño Generativo de vigas de núcleo de material celular	48
Diseño Experimental	48
<i>Factores a considerar para la implementación del diseño experimental</i>	<i>48</i>
Proceso de creación de las probetas	50
<i>Geometría de la probeta:</i>	<i>50</i>
<i>Características de la resina:</i>	<i>50</i>
<i>Diseño de núcleo Schwarz P</i>	<i>52</i>
<i>Diseño de núcleo Hexagonal tridimensional</i>	<i>57</i>
<i>Diseño de núcleo cuadrado bidimensional</i>	<i>58</i>
Prototipado de vigas tipo sándwich	60
<i>Configuración de impresora</i>	<i>60</i>
<i>Impresión de probetas</i>	<i>62</i>
<i>Limpieza de la pieza impresa</i>	<i>66</i>
<i>Post-curado</i>	<i>68</i>
<i>Prefabricado de vigas tipo sándwich</i>	<i>69</i>
Pruebas a flexión	71
<i>Resultado experimental de los ensayos a flexión de las probetas</i>	<i>72</i>

<i>Resumen del resultado experimental del ensayo a flexión de las probetas</i>	83
Capítulo IV Propiedades elásticas efectivas del núcleo	85
Propiedades Efectivas del núcleo	85
Análisis computacional	89
<i>Diseño generativo de probetas en software CAD</i>	89
Estudio de independencia de malla	96
<i>Calidad de la malla</i>	97
<i>Determinación analítica del desplazamiento máximo para viga de núcleo sólido</i>	98
<i>Comparativa de resultados</i>	99
Resultados de la simulación numérica	100
Capítulo V Análisis de resultados	101
Análisis de errores	102
Correlación de gráficas	104
Conclusiones	111
Recomendaciones	113
Bibliografía	114

Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Combinaciones de factores y niveles para aplicación en el diseño experimental</i>	49
Tabla 2	<i>Características de impresora Form 3 de Formlabs</i>	61
Tabla 3	<i>Diseño experimental para el prefabricado de vigas sándwich</i>	70
Tabla 4	<i>Resumen de resultados de la simulación numérica del ensayo a flexión en viga de núcleo sólido</i>	96
Tabla 5	<i>Tamaño de elementos y esfuerzo de Von Mises</i>	97
Tabla 6	<i>Convergencia de malla</i>	98
Tabla 7	<i>Comparación de resultados del desplazamiento analítico y del experimental</i>	99
Tabla 8	<i>Propiedades efectivas del núcleo</i>	99

Índice de Figuras

Figura 1 Estructura de tipo panal de abeja “honeycomb” de aluminio.....	22
Figura 2 Imágenes de estructuras similares a TPMS encontradas en la naturaleza.....	23
Figura 3 Arreglo Superficial de tipo Periódico.....	29
Figura 4 Arreglo Superficial de tipo enrejado o entramado.....	30
Figura 5 Arreglo TPMS.....	31
Figura 6 Arreglo Schwarz P.....	32
Figura 7 Arreglo cuadrado bidimensional.....	32
Figura 8 Arreglo hexagonal tridimensional.....	33
Figura 9 Impresión 3D mediante la tecnología de estereolitografía (SLA).....	34
Figura 10 Impresión 3D por estereolitografía.....	35
Figura 11 Representación esquemática del proceso de Fusión selectiva con láser.....	36
Figura 12 Representación esquemática del proceso de modelado por deposición fundida.....	37
Figura 13 Representación del panel tipo sándwich.....	38
Figura 14 Detalle de la composición de la estructura sándwich de panel tipo abeja o “Honeycomb”.....	39
Figura 15 Esquema de la prueba de flexión de tres puntos.....	43
Figura 16 Curva de esfuerzo-deformación idealizada para materiales dúctiles.....	44
Figura 17 Fuerzas de tracción.....	45
Figura 18 Fuerzas de compresión.....	46
Figura 19 Fuerzas en cortante.....	46
Figura 20 Fuerzas en torsión.....	46
Figura 21 Fuerzas en flexión.....	47
Figura 22 Factores y niveles para la aplicación del diseño experimental.....	48

Figura 23 <i>Esquema de la geometría de las probetas.</i>	50
Figura 24 <i>Datos de las propiedades de la Resina Standard Gray</i>	51
Figura 25 <i>Datos de las propiedades de la Resina High Temp</i>	51
Figura 26 <i>Análisis Static Structural en Ansys</i>	52
Figura 27 <i>Pestaña de "Engineering Data" y pestaña propiedades de material</i>	53
Figura 28 <i>Menú y submenú de Ansys para abrir una geometría</i>	53
Figura 29 <i>Parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular Schwarz P</i>	54
Figura 30 <i>Arquitectura schwarz P</i>	55
Figura 31 <i>Menú de opciones para la nueva arquitectura celular.</i>	55
Figura 32 <i>Menú de opciones: eliminar sólidos separados y convertir a sólidos</i>	56
Figura 33 <i>Parámetro geométrico "Facets/Shrinkwrap"</i>	56
Figura 34 <i>Núcleos Schwarz P con porosidades del 60% y 70%</i>	57
Figura 35 <i>Parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular Hexagonal tridimensional</i>	57
Figura 36 <i>Núcleos hexagonal tridimensional con porosidades del 60% y 70%</i>	58
Figura 37 <i>Parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular cuadrado bidimensional</i>	59
Figura 38 <i>Núcleos cuadrado bidimensional con porosidades del 60% y 70%</i>	60
Figura 39 <i>Impresora FORM 3 de Formlabs</i>	60
Figura 40 <i>Estructura celular Schwarz P en SpaceClaim</i>	62
Figura 41 <i>Estructura Schwarz P 60 % en Preform</i>	63
Figura 42 <i>Estructuras Schwarz P 60 % y 70% en Preform</i>	64
Figura 43 <i>Menú soportes en Preform</i>	64
Figura 44 <i>Estado de impresión de estructuras Schwarz P en la base de impresión</i>	65

Figura 45 Configuración de trabajo software Preform	66
Figura 46 Finalización de impresión de probetas Schwarz P.....	66
Figura 47 Base de impresión con probetas Schwarz P	67
Figura 48 Lavado de sólidos impresos con alcohol isopropílico	67
Figura 49 Dispositivo de Post-Curado	68
Figura 50 Núcleos celulares post curados	69
Figura 51 Láminas externas para el prefabricado de la viga tipo sándwich	69
Figura 52 Láminas externas y núcleos celulares	70
Figura 53 Prototipos de viga de núcleo de material celular.....	71
Figura 54 Configuración dimensional para el ensayo a flexión por tres puntos	72
Figura 55 Esquema del ensayo a flexión	73
Figura 56 Ensayo a flexión probeta N°1	73
Figura 57 Ensayo a flexión probeta N°2	74
Figura 58 Ensayo a flexión probeta N°3	74
Figura 59 Ensayo a flexión probeta N°4	75
Figura 60 Ensayo a flexión probeta N°5	75
Figura 61 Ensayo a flexión probeta N°6	76
Figura 62 Ensayo a flexión probeta N°7	76
Figura 63 Ensayo a flexión probeta N°8	77
Figura 64 Ensayo a flexión probeta N°9	77
Figura 65 Ensayo a flexión probeta N°10	78
Figura 66 Ensayo a flexión probeta N°11	78
Figura 67 Ensayo a flexión probeta N°12	79
Figura 68 Ensayo a flexión probeta N°13	79

Figura 69 <i>Ensayo a flexión probeta N°14</i>	80
Figura 70 <i>Ensayo a flexión probeta N°15</i>	80
Figura 71 <i>Ensayo a flexión probeta N°16</i>	81
Figura 72 <i>Ensayo a flexión probeta N°17</i>	81
Figura 73 <i>Ensayo a flexión probeta N°18</i>	82
Figura 74 <i>Ensayo a flexión probeta N°19</i>	82
Figura 75 <i>Resumen de resultados del ensayo a flexión en tres puntos</i>	83
Figura 76 <i>Gráfico de dispersión de resultados</i>	84
Figura 77 <i>Ensayo a flexión probeta con núcleo sólido</i>	85
Figura 78 <i>Diagrama desplazamiento vs fuerza probeta con núcleo sólido</i>	86
Figura 79 <i>Diagrama desplazamiento vs fuerza región lineal de la probeta con núcleo sólido</i> ...	86
Figura 80 <i>Fuerza última en la región lineal en el diagrama desplazamiento vs fuerza</i>	88
Figura 81 <i>Plano de componentes para ensayo a flexión de tres puntos</i>	89
Figura 82 <i>Ensamble del diseño CAD para el ensayo a flexión de tres puntos</i>	90
Figura 83 <i>Menú de opciones de “Static Structural” en Ansys Workbench</i>	90
Figura 84 <i>Ingreso de datos de las propiedades de los materiales a usar en Ansys Workbench</i> ..	91
Figura 85 <i>Menú de opciones de “Static Structural” en Ansys Workbench “Geometry”</i>	91
Figura 86 <i>Opciones y diseño generado en la pantalla “New DesignModeler Geometry”</i>	92
Figura 87 <i>Menú de opciones de “Static Structural” en Ansys Workbench “Model”</i>	92
Figura 88 <i>Asignación de materiales para los componentes mecánicos</i>	93
Figura 89 <i>Mallado en Ansys Workbench</i>	93
Figura 90 <i>Aplicación de fuerzas en modelo mecánico</i>	94
Figura 91 <i>Aplicación de soportes fijos en modelo mecánico</i>	94
Figura 92 <i>Resultados a determinar mediante análisis numérico del modelo mecánico</i>	95

Figura 93	<i>Resultados de la deformación de viga en simulación de ensayo a flexión</i>	95
Figura 94	<i>Resultados de la esfuerzo de Von Mises en simulación de ensayo a flexión</i>	96
Figura 95	<i>Calidad de malla</i>	97
Figura 96	<i>Estudio de independencia de malla</i>	98
Figura 97	<i>Resumen de resultados de análisis numérico en base al diseño experimental</i>	100
Figura 98	<i>Resumen de resultados de ensayos a flexión: experimental y por simulación</i>	101
Figura 99	<i>Gráfica de esfuerzo relativo para cada probeta</i>	102
Figura 100	<i>Determinación de error relativo de resultados experimentales y por simulación</i>	103
Figura 101	<i>Gráfica de Errores para cada estructura celular</i>	104
Figura 102	<i>Comparación de Núcleos celulares</i>	105
Figura 103	<i>Correlación de gráficas para la estructura Schwarz P</i>	106
Figura 104	<i>Correlación de gráficas para la estructura arreglo cuadrado</i>	107
Figura 105	<i>Correlación de gráficas para la estructura hexagonal tridimensional</i>	108
Figura 106	<i>Comparación de Fuerzas máximas alcanzadas en la experimentación</i>	109

Resumen

Las estructuras celulares basadas en la superficie mínima triple periódica (TPMS), enrejado y de tipo periódico han llamado cada vez más la atención debido a sus topologías controladas matemáticamente y sus propiedades mecánicas prometedoras. Las estructuras sándwich con topologías de núcleo con arreglo cuadrado, Schwarz P y hexagonal tridimensional se diseñan a través del software "Space Claim" de ANSYS y se fabrican utilizando una técnica de impresión 3D denominada estereolitografía. Las propiedades de flexión como el desplazamiento y esfuerzos de estas estructuras sándwich se evalúan mediante una prueba de flexión de tres puntos. Se desarrolla un modelo tridimensional para analizar el comportamiento de las estructuras sándwich bajo carga de flexión. Se emplea la formulación teórica para comparar con los datos experimentales y la simulación computacional. Se logra un buen acuerdo entre los datos experimentales concomitantes, la formulación teórica y la simulación numérica. Además, se lleva a cabo un estudio paramétrico integral para comprender el efecto de las topologías del núcleo, la porosidad y los parámetros geométricos en las propiedades de flexión según la arquitectura del núcleo propuesto.

Tanto la porosidad del núcleo como los materiales de las capas externas de las vigas tipo sándwich de cada núcleo exhiben un efecto significativo en las propiedades de flexión. La estructura de viga sándwich con núcleo de tipo "Schwarz P" con la porosidad del 60% tiene un mejor comportamiento mecánico en comparación con otras topologías de núcleo para diseños de viga tipo sándwich analizadas en esta investigación. Pero el núcleo que mejor resistencia ha presentado es del tipo "Arreglo cuadrado", que es significativamente mayor a otras topologías de núcleos celulares estudiadas en este proyecto.

En general, este estudio indica que las estructuras sándwich con núcleos de arreglo periódico y TPMS podrían diseñarse para brindar propiedades de flexión, reducción de peso y capacidad de absorción de energía deseables, y los hallazgos de este estudio brindan información sobre diseños futuros de estructuras sándwich novedosas para diversas aplicaciones de ingeniería.

Palabras clave: Viga sándwich, Space Claim, estructuras celulares, flexión, estereolitografía

Abstract

Cellular structures based on the triply periodic minimal surface (TPMS), lattice and periodic type have attracted increasing attention due to their mathematically controlled topologies and promising mechanical properties. Sandwich structures with square-array, Schwarz P and three-dimensional hexagonal core topologies are designed through ANSYS "Space Claim" software and fabricated using a 3D printing technique called stereolithography. The bending properties such as displacement and stresses of these sandwich structures are evaluated using a three-point bending test. A three-dimensional model is developed to analyze the behavior of the sandwich structures under bending load. The theoretical formulation is used to compare experimental data with computational simulation. Good agreement is achieved between the concomitant experimental data, theoretical formulation and numerical simulation. In addition, a comprehensive parametric study is carried out to understand the effect of core topologies, porosity and geometrical parameters on the bending properties according to the proposed core architecture.

Both the core porosity and the outer layer materials of the sandwich beam outer layers of each core exhibit a significant effect on the flexural properties. The sandwich beam structure with "Schwarz P" type core with the porosity of 60% has better mechanical behavior compared to other core topologies for sandwich beam designs analyzed in this research. But the core that has presented the best strength is the "Square Array" type, which is significantly higher than other cellular core topologies studied in this project. Overall, this study indicates that sandwich structures with periodic array and TPMS cores could be designed to provide desirable bending properties, weight reduction and energy absorption capacity, and the findings of this study provide insights into future designs of novel sandwich structures for various engineering applications.

Key words: sandwich beam, Space Claim, cell structures, flexion, stereolithography

Capítulo I Generalidades

Introducción

El presente proyecto se enmarca en la consecución de estructuras tipo sándwich sumamente livianas y rígidas que puedan servir para múltiples aplicaciones como mueblería, aeroespacial y estructuras diversas, siendo esta la primera investigación enfocada en el análisis de tres tipos de arreglos: cuadrado bidimensional, hexagonal tridimensional y Schwarz P.

Las estructuras sándwich ofrecen una variedad de atributos únicos, como una alta relación rigidez-peso, alta relación resistencia-peso y capacidad de absorción de energía. Por lo tanto, estas estructuras se utilizan cada vez más en la industria aeroespacial, automotriz, biomédica, de defensa, aplicaciones de aislamiento y construcción. Una estructura tipo sándwich típica tiene tres partes integrales: dos paneles frontales con alta rigidez y resistencia a la flexión, separados por un núcleo celular liviano. La introducción de un núcleo liviano que conecta los dos paneles frontales fortalece la resistencia a la flexión, la resistencia al pandeo, la rigidez al corte y la capacidad de absorción de energía de la estructura tipo sándwich.

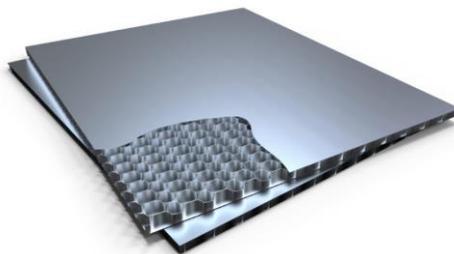
Las propiedades mecánicas de una estructura tipo sándwich están determinadas por sus materiales constitutivos, el diseño geométrico y la topología del núcleo, donde los paneles frontales soportan la carga y la flexión en el plano, mientras que el núcleo celular transmite la carga de compresión y corte transversal. Los núcleos de arquitectura celular se consideran de diseño convencional para estructuras sándwich y se prueban en condiciones de carga de flexión. Con los avances recientes en las tecnologías de manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés “Additive Manufacturing”), se ha vuelto factible fabricar núcleos celulares con arquitectura de topologías complejas, lo cual era difícil de lograr por medios convencionales. Estas estructuras celulares han atraído el interés de los investigadores debido a sus propiedades prometedoras, como su peso ligero, alta resistencia específica y gran tensión de densificación.

En el mercado actual ya existe la aplicación de paneles compuestos de arreglo periódico, uno de los más convencionales es el de tipo “honeycomb” como el de la figura 1, el cual se utiliza en el sector de astilleros y yates, construcción, vagones de ferrocarril, soporte de piedra, interiores, revestimientos, tecnología de iluminación y refrigeración los cuales tiene grandes beneficio como son: la elevada resistencia con bajo peso y que es un buen aislante térmico. Pero más recientemente, una nueva clase de estructuras celulares denominadas superficies mínimas triple periódicas (TPMS) ha llamado cada vez más la atención. Tales estructuras se han encontrado dentro de esqueletos de erizos de mar y alas de mariposas, como se muestra en la figura 2.

Estas superficies exhiben propiedades mecánicas atractivas, así como propiedades térmicas, que son prometedoras para servir como núcleo para estructuras tipo sándwich. Los investigadores de este estudio han analizado las propiedades mecánicas y la absorción de energía de varias estructuras de TPMS de forma experimental basándose en varios materiales originales, como titanio, aluminio y acero inoxidable, y también se han utilizado simulaciones numéricas. (Chenxi, Kate, Ma, H., & Phuong, 2021)

Figura 1

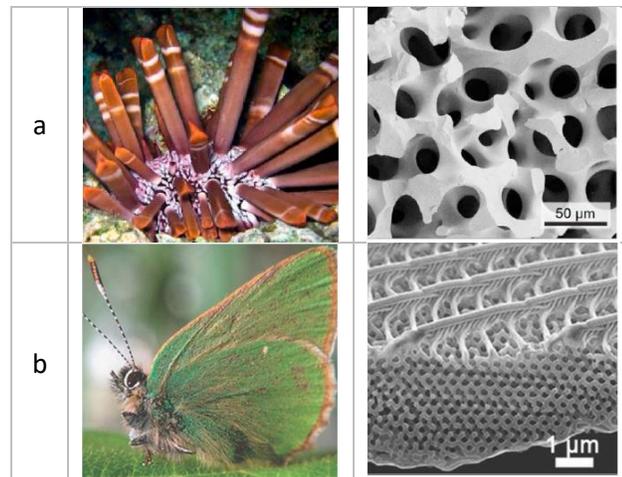
Estructura de tipo panal de abeja “honeycomb” de aluminio.



Nota. Imagen que representan una estructura de tipo panal de abeja “honeycomb” para diversas aplicaciones en la industria. Tomado de *Aluminium Honeycomb Panel: The Facade For Modern Construction*, por Vivaacp, 2011. <https://vivaacp.com/aluminium-honeycomb-panel-presenting-innovation/>

Figura 2

Imágenes de estructuras similares a TPMS encontradas en la naturaleza.



Nota. Imágenes que representan: (a) esqueleto de erizo de mar; y (b) alas de mariposa que muestran la naturaleza intrincada y complicada de la estructura biológica. Tomado de *3D printed sandwich beams with bioinspired cores: Mechanical performance and modelling* (p.2), por Chenxi et al. (2021).

Existe un sin número de estructuras nuevas existentes y no existentes en la naturaleza que son de tipo arreglo periódico, enrejados y de tipo TPMS (Superficie mínima triple periódica), y en base de modelos matemáticos se los puede generar a través de software computacionales o implementar a través del diseño generativo como es el caso del ANSYS “Space Claim”, el cual nos ayuda a construir membranas y cáscaras de estos tipos de estructuras en sólidos.

Es así que en esta investigación, nos enfocaremos en las propiedades de flexión de las estructuras sándwich con núcleos de tipo periódico: arreglo cuadrado bidimensional y hexagonal tridimensional, y de tipo TPMS: Schwarz P y brindaremos información sobre cómo la porosidad del núcleo de arreglo periódico, TPMS, los materiales de las capas externas y los parámetros geométricos afectan las propiedades de las vigas sándwich de núcleo de material celular.

En este estudio se realizará el diseño e impresión 3D de núcleo de material celular, el prefabricado de vigas tipo sándwich, su diseño experimental y pruebas a flexión, simulación

computacional, y se presentará una comparación entre resultados para determinar las conclusiones de los principales hallazgos encontrados en esta investigación.

Justificación e Importancia

El Presente trabajo de investigación se justifica puesto a que su desarrollo e investigación al finalizar el proyecto nos proporcionará información de las características mecánicas de paneles tipo sándwich, es decir se pretende establecer las características de los diferentes núcleos celulares, y que estos nos puedan proveer una sólida información del comportamiento mecánico de estos tipos de materiales compuestos, para que puedan ser aplicados en varios sectores de la industria como el de tipo naval, arquitectura, diseño de interiores, construcción, vagones de ferrocarril, revestimientos, refrigeración, etc. y que a su vez este proyecto pueda contribuir a futuras investigaciones para crear nuevas aplicaciones que beneficien al desarrollo productivo del país.

El proyecto permitirá realizar prototipos de vigas con núcleo de material celular, mediante el uso de la impresión 3D por estereolitografía, ya que por medio de la manufactura aditiva, la producción de diseños realizados por software se realiza en corto tiempo, y eso se traduce a bajos costos de fabricación al permitir la obtención de piezas con simetrías complejas, sin embargo hasta el momento se carece de información suficiente sobre el comportamiento mecánico de vigas tipo sándwich con núcleo de material celular.

Con el objetivo de desarrollar e innovar el proceso de construcción de estructuras tipo sándwich en sus varias aplicaciones actuales, se propone la investigación y análisis de las características de las vigas sándwich, usando varios materiales para el análisis del comportamiento en ensayos a flexión.

Antecedentes

En el proyecto de investigación, cuyo tema es: “Vigas sándwich impresas en 3D con núcleos bioinspirados: rendimiento mecánico y modelado”, realizado por Chenxi et al. (2021), los cuales han descrito que “los núcleos para paneles tipo sándwich, pueden ser los más importantes, respecto a las

aplicaciones estructurales de materiales arquitectónicos”, los autores han dado importancia al estudio de estructuras celulares similares y existentes en la naturaleza, entre estas estuvieron los núcleos TPMS “Primitive”, “Neovius” e “IWP”, los cuales fueron diseñados a través de modelación matemática e impreso en 3D mediante el proceso de manufactura aditiva por deposición fundida.

Se realizaron pruebas de flexión de tres puntos para comparar su rendimiento de flexión y el mecanismo de falla. También desarrollaron un modelo numérico y se observó una buena concordancia entre los datos numéricos y la formulación teórica en cuanto a la rigidez a la flexión. También se realizaron estudios paramétricos para explorar el efecto de la topología del núcleo, la densidad del núcleo y el espesor del panel frontal en las propiedades de flexión de las estructuras sándwich.

Los hallazgos clave de este trabajo se resumen a continuación:

- Los parámetros geométricos y la densidad relativa del núcleo tienen una influencia significativa en su rigidez a la flexión, carga máxima y capacidad de absorción de energía, mientras que la topología del núcleo tiene efectos limitados en la rigidez a la flexión pero afecta la carga máxima y la absorción de energía notablemente.
- Con un aumento en la densidad relativa del núcleo TPMS, la rigidez a la flexión, la resistencia y la capacidad de absorción de energía de las estructuras sándwich aumentan para los diseños con paneles frontales tanto gruesos como delgados, mientras que la topología del núcleo tiene un efecto limitado en estas propiedades para diseños con paneles frontales gruesos. Para estructuras sándwich con paneles frontales delgados, se observa una mayor resistencia a la flexión y capacidad de absorción de energía para el núcleo de “Neovius”.

En general, los resultados presentados en la investigación anteriormente descrita podrían brindar información sobre el diseño futuro de estructuras sándwich livianas con propiedades mecánicas prometedoras para diversas aplicaciones de ingeniería y que a su vez nos proveería de información para el desarrollo de nuestra investigación.

Alcance

La finalidad de esta investigación es evaluar y comparar el comportamiento mecánico de vigas tipo sándwich de núcleo de material celular (tipo periódico: cuadrado bidimensional y hexagonal tridimensional; y tipo TPMS: Schwarz P), a través de ensayos a flexión en tres puntos, para el análisis en la zona elástica de estos materiales. Es así, que para cumplir con el objetivo de esta investigación deberemos desarrollar paso a paso las siguientes etapas:

- En la primera etapa se va a revisar el fundamento teórico con respecto a los parámetros geométricos de las diferentes estructuras arquitectónicas, además se revisará el fundamento teórico con respecto a los materiales a usar y se generará el diseño experimental para un posterior análisis.
- En la segunda etapa, se efectuará el diseño generativo de los núcleos de las vigas de material celular mediante el software ANSYS “Space Claim”, considerando todos los parámetros geométricos para su desarrollo y con ayuda de un software CAD se realizará el diseño 3D del ensamble de vigas tipo sándwich y el ensamble del montaje en los tres puntos (bases y punzón) de cada probeta según el diseño de experimentos para su posterior simulación del ensayo a flexión.
- En la tercera etapa, a partir del diseño generado de las vigas con núcleo de material celular mencionado en la segunda etapa, se efectuará la respectiva impresión en 3D, limpieza y curado de los núcleos arquitectónicos mediante estereolitografía. Posteriormente se realizará la construcción del prototipo de las vigas tipo sándwich de material celular, basados en el diseño de experimentos, usando capas externas, alas o pieles de “resina high temp” y de “aluminio”.
- En la cuarta etapa se desarrollarán las pruebas mecánicas a los prototipos mediante la flexión de viga simplemente apoyada con carga puntual en el centro, utilizando la máquina de ensayos universales que se encuentra disponible en el Laboratorio de Mecánica de Materiales del

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

- En la quinta etapa, en base al ensayo de flexión realizado al núcleo sólido o prisma rectangular se analizarán las curvas fuerza vs desplazamiento en el rango lineal y se obtendrán de manera analítica las características mecánicas de esta, y para las gráficas de los resultados de los otros prototipos se identificará de manera gráfica la fuerza máxima y la deformación que se encuentra en la zona elástica (límite de proporcionalidad).
- En la sexta etapa, considerando la fuerza máxima del rango lineal para cada probeta y las propiedades mecánicas resultantes en la etapa anterior, se ejecutarán las simulaciones del ensayo a flexión de vigas con los diferentes núcleos de material celular en base al diseño experimental para identificar el comportamiento mecánico de cada uno de estos.
- En la séptima etapa se realizará un análisis y comparación de resultados entre simulación y los ensayos mecánicos de cada probeta y se determinarán sus conclusiones.

Objetivos

Objetivo General

Simular, prototipar y ensayar mediante pruebas de flexión vigas tipo sándwich con núcleo de material celular.

Objetivos Específicos

- Diseñar mediante software CAD y prototipar 3 núcleos de material celular mediante impresión 3D de sólidos por el proceso de la estereolitografía.
- Ensamblar las vigas tipo sándwich con los núcleos de material celular.
- Evaluar mecánicamente las vigas de núcleo de material celular y vigas tipo sándwich empleando pruebas de flexión.

- Simular y evaluar los núcleos de las arquitecturas de material celular, así como su aplicación en vigas tipo sándwich.
- Realizar un análisis comparativo de resultados entre simulación y ensayos mecánicos.

Capítulo II Marco teórico

En este capítulo se revisará la teoría que será la base para realizar el diseño y la prefabricación de las probetas de viga con núcleo celular. A su vez, se describirá el material que se empleará en el prototipado y se indicará las propiedades de flexión para nuestro estudio.

Superficies Mínimas

Son superficies definidas matemáticamente en dos o tres dimensiones, estas pueden ser de tipo periódico, enrejados y superficies triplemente periódicas (TPMS, por sus siglas en inglés). A continuación indicaremos en las tablas ejemplos gráficos de estos tipos de superficies.

Figura 3

Arreglo Superficial de tipo Periódico

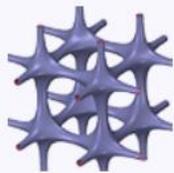
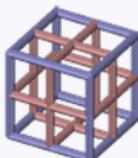
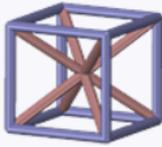
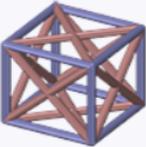
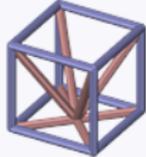
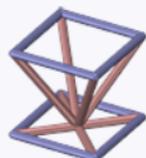
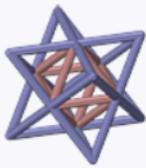
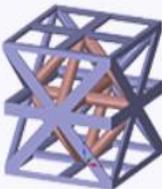
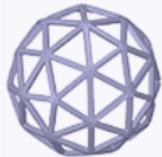
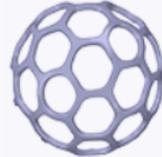
Arreglo Superficial de tipo periódico	
<p>Cuadrado</p>  <p>Patrón de relleno cuadrado bidimensional</p>	<p>Triángulo</p>  <p>Patrón de relleno triangular bidimensional</p>
<p>Hex</p>  <p>Patrón de relleno hexagonal bidireccional</p>	<p>Hex 3D</p>  <p>Patrón de relleno hexagonal tridimensional</p>

Nota. Esta figura muestra los diferentes arreglos superficiales bidimensionales y tridimensionales de tipo periódico. Tomado de *Ansys SpaceClaim 3D Modeling Software*, por Ansys, (2022).

<https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>

Figura 4

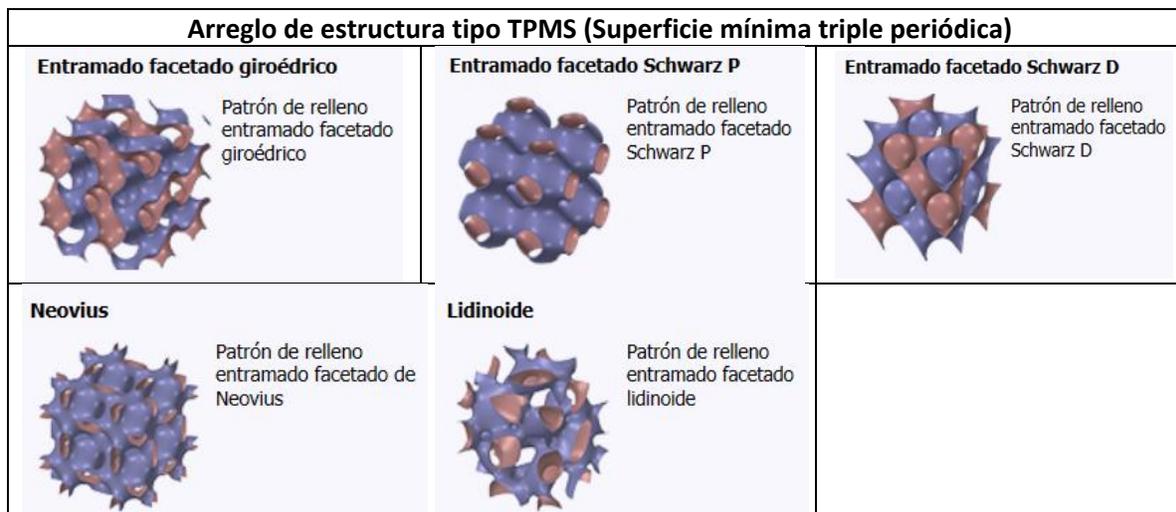
Arreglo Superficial de tipo enrejado o entramado

Arreglo Superficial de tipo enrejado o entramado		
<p>Reticula</p>  <p>Patrón de relleno entramado tridimensional</p>	<p>Entramado cúbico regular</p>  <p>Entramado cúbico simple.</p>	<p>Reticula de cubo con soportes laterales en cruz</p>  <p>Entramado cúbico con soportes transversales entre bordes en cada cara del cubo que encierra.</p>
<p>Reticula de cubo con soportes centrales</p>  <p>Entramado cúbico con soportes de todas las esquinas del cubo que interseca en el centro del cubo.</p>	<p>Reticula de cubo con soportes diagonales laterales</p>  <p>Entramado cúbico con soportes diagonales entre vértices en cada cara del cubo que encierra.</p>	<p>Reticula de cubo con centro inferior</p>  <p>Entramado cúbico con soportes que se unen en el centro de la cara inferior del cubo que encierra.</p>
<p>Reticula de cubo con centro inferior sin soportes verticales</p>  <p>Entramado cúbico con soportes que se unen en el centro de la cara inferior del cubo que encierra, pero sin soportes verticales.</p>	<p>Reticula de pirámide doble</p>  <p>Entramado de pirámide doble con soportes laterales.</p>	<p>Reticula de pirámide doble con cruz</p>  <p>Entramado de pirámide doble con soportes transversales internos.</p>
<p>Reticula diamante</p>  <p>Pirámide doble sin soportes laterales.</p>	<p>Reticula de pirámide doble y diagonales en caras</p>  <p>Pirámide doble en el centro del entramado con diagonales en caras del cubo que encierra.</p>	<p>Entramado octaédrico 2</p>  <p>Entramado octaédrico 2</p>
<p>Reticula facetada tetraédrica</p>  <p>Patrón de relleno entramado facetado tetraédrico tridimensional</p>	<p>Reticula facetada de superficie triangular</p>  <p>Patrón de relleno entramado facetado de superficie del triángulo</p>	<p>Reticula facetada de superficie hexagonal</p>  <p>Patrón de relleno entramado facetado de superficie hexagonal</p>

Nota. Esta figura muestra los diferentes arreglos superficiales con patrones tridimensionales de tipo enrejado o entramado. Tomado de *Ansys SpaceClaim 3D Modeling Software*, por Ansys, (2022). <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>

Figura 5

Arreglo TPMS



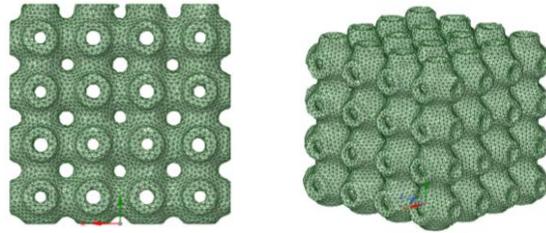
Nota. Esta figura muestra los diferentes arreglos superficiales con patrones tridimensionales de entramado facetado de tipo TPMS. Tomado de *Ansys SpaceClaim 3D Modeling Software*, por Ansys, (2022). <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>

Es así que vamos a definir las superficies y/o enrejados que vamos a utilizar en nuestra investigación.

Arreglo Schwarz P

La superficie Schwarz P se encuentra formada por 2 subespacios en forma de tubo, y son del tipo de superficie mínima periódica TPMS, los mismos que se encuentran unidos y poseen características geométricas iguales.

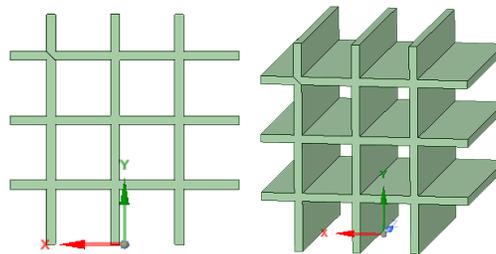
A este tipo de arreglo también se le ha denominado de tipo Primitivo, es por eso su sufijo “P”, la cual fue descrita inicialmente por Hermann Schwarz. Para estos tipos de arreglos al momento que se realiza una modificación en la celda unitaria en un sólido cualquiera, este forma figuras de familia de superficies mínimas. (Serrano, 2020).

Figura 6*Arreglo Schwarz P*

Nota. Figuras que representa el modelado de la arquitectura Schwarz P basado en aproximaciones trigonométricas, mediante el diseño generativo en Ansys “Space Claim”. Tomado de *Ansys SpaceClaim 3D Modeling Software*, por Ansys, (2022). <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>

Arreglo cuadrado bidimensional

Esta superficie se genera por la extrusión de un enrejado de forma cuadrada y exhibe ciertas características distintivas, el cual define su comportamiento tipo malla. Cada elemento de este arreglo se agrupa como una matriz de filas y columnas.

Figura 7*Arreglo cuadrado bidimensional*

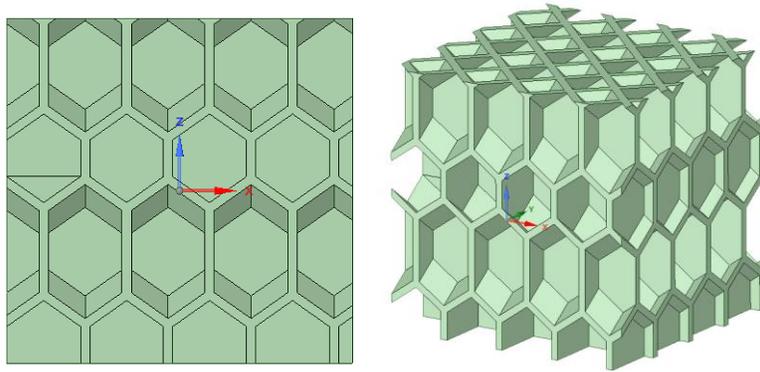
Nota. Figuras que representa el modelado de la arquitectura cuadrada bidimensional basado en aproximaciones trigonométricas, mediante el diseño generativo en Ansys “Space claim”. Tomado de *Ansys SpaceClaim 3D Modeling Software*, por Ansys, (2022). <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>

Arreglo hexagonal tridimensional

Esta superficie se genera por la extrusión de un enrejado de forma hexagonal tridimensional y exhibe ciertas características distintivas el cual define su comportamiento. Cada elemento de este arreglo se agrupa como una matriz de filas y columnas de manera tridimensional.

Figura 8

Arreglo hexagonal tridimensional



Nota. Figuras que representa el modelado de la arquitectura hexagonal tridimensional basado en aproximaciones trigonométricas, realizado en ANSYS “Space Claim”. Tomado de *Ansys SpaceClaim 3D Modeling Software*, por Ansys, (2022). <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>

Fabricación

Las estructuras de tipo enrejado y TPMS tienen una limitación al momento de su fabricación, ya que no es convencional la elaboración de este tipo de sólidos, pero actualmente tenemos nuevas tecnologías que nos ayudarán a la fabricación de estos elementos, es así que mediante manufactura o proceso aditivo (AM) podríamos obtener sin ningún inconveniente, sólidos de estructura compleja.

Manufactura aditiva

A partir del diseño asistido por computadora mediante un software “CAD”, la manufactura aditiva puede crear objetos con formas geométricas precisas. Indica Khalid, (2021), que la manufactura aditiva “se construyen capa por capa, de forma similar al proceso de impresión 3D, a diferencia de la

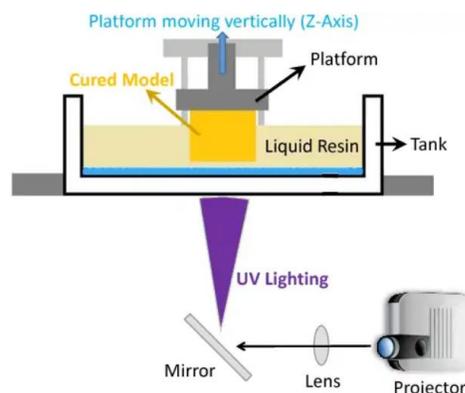
fabricación tradicional, que a menudo requiere mecanizado u otro proceso de manufactura para eliminar el exceso de material”.

Estereolitografía. La estereolitografía (SLA) es un método de manufactura aditiva, también conocido como impresión sólidos 3D a base de resina. Este método de impresión es una tecnología de fotocurado el cual se compone de los siguientes elementos: un tanque de depósito de resina, una base o estrado de construcción y una fuente de luz. Las máquinas de estereolitografía utilizan láseres u otras fuentes de luz para solidificar resina líquida en plástico sólido, un proceso capaz de producir prototipos de alta precisión y piezas que son isotrópicas, herméticas y con acabados suaves.

La impresión mediante SLA (en acrónimo por estereolitografía), se encuentra dentro de una familia denominada fotopolimerización en tanque, entre ellas se encuentra la máquina con técnica de modelado por deposición fundida y la de fusión selectiva por láser. Estas máquinas son fabricadas con el mismo fundamento técnico de impresión: usar fuentes de luz o láser para curar o endurecer la resina para que estos se conviertan en sólidos de alta resistencia mecánica. (Formlabs, 2022).

Figura 9

Impresión 3D mediante la tecnología de estereolitografía (SLA)



Nota. Imagen con los elementos de una máquina 3D por estereolitografía. Tomado de *Impresión 3D por estereolitografía*, por Xometry, 2022. <https://xometry.eu/es/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>

Resina. Las máquinas para impresión 3d mediante estereolitografía usan el material denominado resina, el cual al estar en contacto con una fuente de luz o láser se convierte en plástico endurecido. Formlabs (2022), indica que “la resina al endurecerse obtiene una gran resistencia a la deformación con el paso del tiempo”.

Los elementos impresos a base de resina de alta resistencia, una vez endurecidos tienen un sinnúmero de aplicaciones, entre estas están:

La fabricación de prototipos de productos o diseños, moldes, elementos mecánicos inclusive en el área de salud para crear implantes en la rodilla, implantes dentales, fabricación de prótesis, “Stents” o tubería diminuta que ayuda a los tratamientos de oclusión arterial, aplicaciones cráneo faciales, etc., los cuales por su diversas aplicaciones, se están estudiando para generar nuevos biomateriales a base de resinas, para ser usados en impresoras 3D. (Valenzuela et al., 2020)

Figura 10

Impresión 3D por estereolitografía



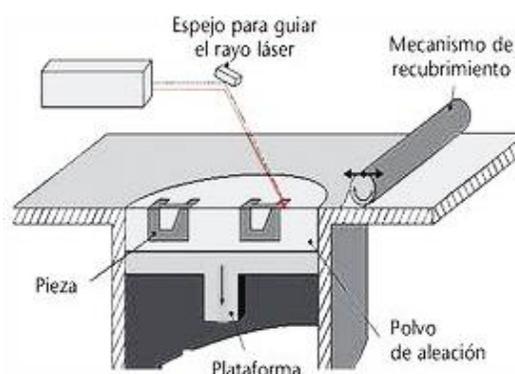
Nota. Imagen que representa la impresión de un elemento 3D, mediante estereolitografía a base de resina Standard Gray, tomado de: *Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*, por Formlabs, 2022.

<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>

Fusión selectiva con láser. La fusión selectiva por láser (SLM, por sus siglas en inglés “selective laser melting”) o la sinterización directa por láser (DMLS, por sus siglas en inglés “Direct metal laser sintering”) es una técnica de impresión 3D similar a la estereolitografía. Chang, et al., (2017) indica que este proceso “utiliza un láser de alta potencia para fundir y fusionar por completo polvos metálicos o de resina para prefabricar elementos de formas complejas con una densidad casi total (hasta un 99,9 % de densidad relativa)”.

Figura 11

Representación esquemática del proceso de Fusión selectiva con láser



Nota. Representación esquemática de una producción basada en la estratificación. Tomado de: *Fusión selectiva por láser para el procesamiento de polvo de aleación dental.* Por Strietzel, R. (2010). <https://www.elsevier.es/es-revista-quintessence-tecnica-33-articulo-fusion-selectiva-por-laser-el-X1130533910508257>

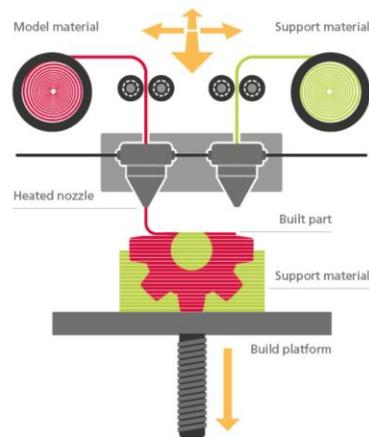
Proceso de Modelado por deposición fundida. La impresión 3D de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés “fused deposition modeling”), también conocida como fabricación de filamentos fundidos (FFF), es un proceso de manufactura aditiva que se lo usa a nivel industrial para la creación de prototipos y diseños con alta resistencia mecánica y de gran calidad de impresión.

Hubs, (2022) menciona que “el proceso de modelado por deposición fundida es una técnica de impresión la cual se encuentra relacionada con los procesos de extrusión de materiales”.

El proceso FDM construye partes capa por capa depositando selectivamente material fundido en un camino predeterminado y utiliza polímeros termoplásticos que vienen en forma de filamentos.

Figura 12

Representación esquemática del proceso de modelado por deposición fundida



Nota. Representación esquemática del proceso de manufactura aditiva y los componentes básicos de la máquina de tipo modelado por deposición fundida. Tomado de: *Fused Deposition Modelling*, por Ricoh, (2021). <https://rapidfab.ricoh-europe.com/es/tecnologias/fdm/>

Estructura Sándwich.

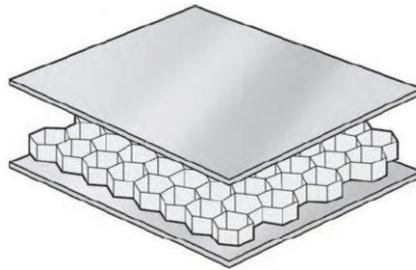
Características de un panel sándwich.

En su investigación, menciona Malavía, J., (2012) que “las primeras estructuras compuestas eran de tipo sándwich (por su estructura). Estas estaban ensambladas mediante la unión de dos capas externas delgadas, que mantenían propiedades de alta resistencia a la tracción y flexión”, los cuales algunos autores lo han bautizado como pieles; también las estructuras sándwich cuentan con un elemento de mayor espesor que las capas externas, el cual es de material de baja densidad, y que corresponde al núcleo de esta estructura. La resistencia mecánica del núcleo respecto a la de las pieles o capas externas es muy inferior, al igual que su peso específico.

La constitución de las estructuras sándwich puede ser de diversos materiales y su núcleo puede tener varias topologías. Actualmente en construcciones navales, aeronáuticas y de automovilismo, varias de sus construcciones se realizan con fibras y diversos materiales compuestos.

Figura 13

Representación del panel tipo sándwich



Nota. Representación de un panel tipo sándwich con núcleo honeycomb o panal de abeja. Tomado de *Analysis of Honeycomb sandwich panels*, por Tiwari, N. (2017).

https://www.researchgate.net/figure/Honeycomb-Sandwich-Panel-Honeycomb-structures-are-natural-or-man-made-structures-that_fig1_332343698

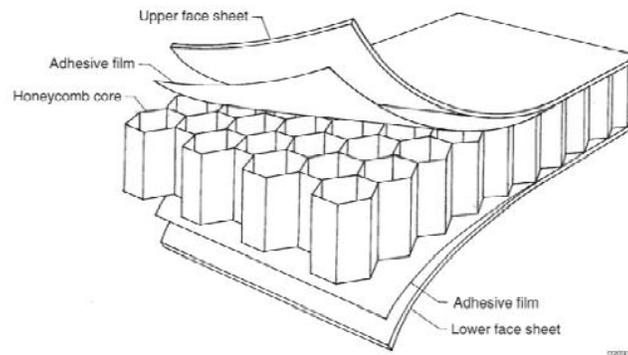
Elementos constituyentes de una estructura sándwich.

En general, los paneles o estructuras compuestas tipo sándwich constan de tres elementos con dos o más materiales que consisten en dos capas exteriores delgadas, llamadas pieles, unidas a un núcleo rígido de baja densidad, sumamente ligero.

Una mayor separación entre las capas externas del panel incrementa el momento de inercia del núcleo, lo cual también produce un aumento porcentual en su peso. La configuración de estas dimensiones, crea una arquitectura más eficiente para que tenga un mejor comportamiento mecánico, es decir, pueda aumentar su resistencia a la flexión y a cargas de pandeo.

Figura 14

Detalle de la composición de la estructura sándwich de panel tipo abeja o "Honeycomb".



Nota. Representación de la estructura de una estructura compuesta tipo sándwich con núcleo de tipo celular "Honeycomb". Tomado de *Concept modelling of a honeycomb sandwichbeam-like structure*, por Mallavia, J. (2013).

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3844/359581.pdf?sequence=1>

Diseño en software Ansys Workbench

Para la resolución de problemas mecánicos, en donde sus componentes poseen diferentes topologías y tienen una complejidad alta de análisis, es necesario usar herramientas tecnológicas para corroborar resultados analíticos.

Ansys Workbench es un software que usa solución numérica por elementos finitos para resolver varios tipos de problemas de ingeniería. Los problemas que se pueden resolver en este software son de tipo: dinámico, estático, estructurales, termodinámicos, mecánica de fluidos, entre otros. (Stolarski, Nakasone, & Yoshimoto, 2018)

Este software consta de una etapa de diseño, mallado, simulación y post procesado.

Static Structural

En Ansys, se pueden realizar análisis bajo soluciones numéricas, en donde Ansys Workbench implementa un estudio estático estructural para la resolución de problemas complejos en ingeniería

estructural. Este software permite determinar soluciones para encontrar esfuerzos, deformaciones, reacciones en estructuras, etc.

Un análisis estructural basado en simulación, permite a los usuarios evaluar la integridad estructural de un diseño, pero para tener una alta validez de resultados de estos modelos, es necesario aplicar las condiciones según la naturaleza de estudio, estos pueden ser:

- Fuerzas y presiones.
- Fuerzas de inercia en estado estacionario (como la gravedad o la velocidad de rotación).
- Desplazamientos.
- Soportes.
- Temperaturas (para tensión térmica).
- Propiedades mecánicas.

Por lo tanto el software Ansys Static Structural nos ofrece un análisis estructural, el cual nos permite a los usuarios resolver problemas complejos de ingeniería estructural mediante un análisis de elementos finitos de manera rápida con buenos resultados en su post procesado.

Space Claim

Mediante el software que proporciona Ansys “Space Claim”, este nos ayuda a realizar un modelado tridimensional de manera sencilla e intuitiva para el usuario, con herramientas eficaces similares a programas CAD tradicionales. En Ansys, (2022), nos indica que “estas herramientas brindan soporte para la creación de geometrías complejas, en la extrusión de sólidos para finalmente poder dar una solución numérica en tiempos optimizados a la hora de la simulación”.

Ansys Space Claim es la herramienta CAD más versátil del mundo. Permite que los usuarios de todas las prácticas diferentes usen y aprovechen una herramienta de diseño 3D.

Este software rápido, fácil de usar e innovador está ganando cada vez más atención no solo en Estados Unidos, sino también en Europa. Space Claim, se ha posicionado como líder en el mercado de

software de simulación de ingeniería, el cual forma parte de la familia de productos de Ansys y proporciona una solución eficiente para una variedad de cálculos de simulación para usuarios de todas las industrias.

Ensayos mecánicos

La prueba de materiales es una parte fundamental de la ciencia e ingeniería de materiales, para comprender los límites de los materiales mediante la determinación de sus propiedades físicas y mecánicas. La información recopilada durante las experimentaciones de laboratorio es útil para ingenieros e investigadores los cuales permite determinar los materiales apropiados para diversas aplicaciones.

Hay muchas pruebas que se pueden realizar en los materiales para determinar sus propiedades. Las pruebas pueden ser destructivas o no destructivas. Las pruebas destructivas a menudo se realizan para determinar una propiedad específica del material/componente que se está probando. Por lo general, requieren que se fabrique una pieza de prueba con una forma específica y esta se destruya durante la prueba.

Ejemplos de pruebas destructivas son las pruebas de tracción, las pruebas de flexión, las pruebas de impacto y las pruebas de fatiga. También se realizan ensayos de dureza en probetas (destructivas). Además, las pruebas de dureza a menudo se realizan en componentes reales (no destructivas). (Hofer, 2022)

Las pruebas o ensayos no destructivos, como sugiere el nombre, no dañan el material o el componente durante las pruebas y aún pueden usarse después de las pruebas sin cambios en la calidad o la propiedad. Estas pruebas generalmente se realizan durante el servicio del componente para garantizar que las propiedades del material no hayan cambiado con el tiempo y que aún sea seguro usarlo en su aplicación. Ejemplos de pruebas no destructivas son las pruebas de líquidos penetrantes, las

pruebas de rayos X, las pruebas de rayos gamma, las pruebas de partículas magnéticas y las pruebas ultrasónicas.

Ensayos o pruebas a flexión

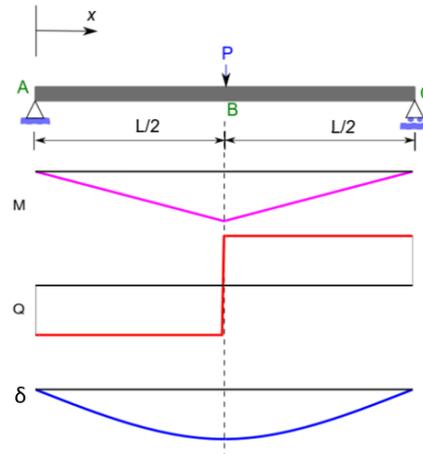
La prueba de flexión de 3 puntos, también conocida como prueba de flexión o prueba de viga transversal, mide el comportamiento de los materiales en una geometría de carga de viga simple. Este tipo de prueba proporciona información sobre cómo responden los materiales a una combinación de fuerzas de tensión, compresión y corte, y los resultados son útiles en ingeniería estructural y civil.

Cervera & Blanco, (2001), menciona que “las propiedades que se pueden calcular a partir de la prueba de flexión incluyen el esfuerzo por flexión, la deflexión por flexión, el módulo elástico y la tenacidad a la fractura”. Debe tenerse en cuenta que las propiedades del material recopiladas a partir de la prueba de flexión serán diferentes a los datos recopilados de otras formas de pruebas, como la tracción y la compresión, debido a las diferentes geometrías de carga. Al igual que la prueba de flexión de 3 puntos, la prueba de flexión de 4 puntos y la prueba de flexión en voladizo son otras técnicas que se pueden utilizar para estudiar el esfuerzo de flexión de los materiales y su deflexión.

La prueba de flexión de tres puntos como indica la siguiente figura es un experimento clásico en mecánica, utilizado para medir el módulo de Young de un material en forma de viga. La viga, de longitud L , descansa sobre dos soportes de rodillos y está sujeto a una carga concentrada P en su centro.

Figura 15

Esquema de la prueba de flexión de tres puntos



Nota. Esquema de la prueba de flexión de tres puntos, con gráficos de momento flector M, esfuerzo cortante Q y deflexión δ . Tomada de *Simp Supp Beam Point Load*, por Wikimedia Commons, (2022).

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SimpSuppBeamPointLoad.svg>

Se puede verificar que la deflexión δ en el centro de la viga es:

$$\delta = \frac{P L^3}{48 E I} \quad (1)$$

Donde E es el módulo de Young, P es la carga, L es la longitud, e I es la inercia definida por:

$$I = \frac{1}{12} b h^3 \quad (2)$$

Donde b es el ancho y h es la altura de la viga. Midiendo la deflexión central δ y la fuerza aplicada P, y conociendo la geometría de la viga, es posible calcular el módulo de Young del material.

Gráfico de fuerza-desplazamiento. Si la fuerza aplicada P se grafica contra el desplazamiento central δ , se obtiene una línea recta siempre que permanezcamos dentro del límite elástico del material (es decir, la viga vuelve a su forma original después de la deformación). La pendiente de esta línea es

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{48EI}{L^3} \quad (3)$$

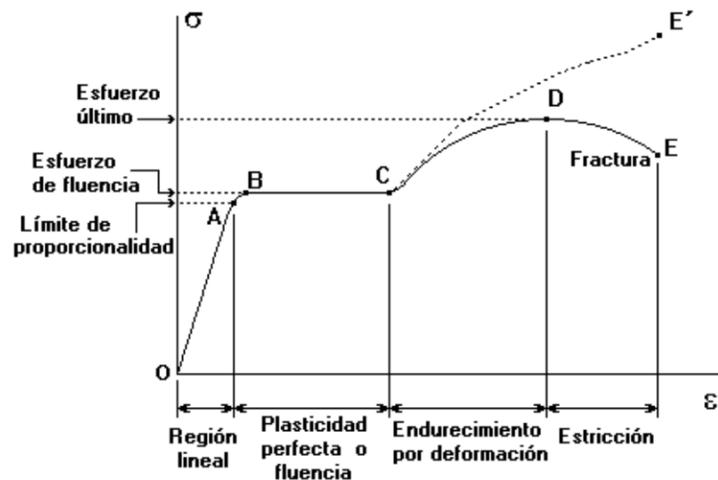
Hay algunos beneficios al usar la ecuación (4) en lugar de la ecuación (2) para estimar E . Podemos tomar varias medidas de P y δ , y tratar con sensatez el error experimental al encontrar una línea que mejor se ajuste a partir de la cual obtengamos el gradiente $dP/d\delta$. También hay menos necesidad de calibración, ya que solo necesitamos conocer los cambios en los valores medidos.

Propiedades mecánicas en los materiales

Módulo de Young o de elasticidad. Para Cervera & Blanco, (2021) menciona que “el módulo de Young nos indica la medida de rigidez de una material. En otras palabras, describe qué tan rígido es un material o qué tan fácilmente se dobla o se estira”. El módulo de Young corresponde a una propiedad intensiva de los materiales.

Figura 16

Curva de esfuerzo-deformación idealizada para materiales dúctiles



Nota. Representación del diagrama esfuerzo vs deformación unitaria. Tomado de *Curva de esfuerzo deformación idealizada para materiales dúctiles*, por Acevedo, et al., (2019).

https://www.researchgate.net/figure/Curva-de-esfuerzo-deformacion-idealizada-para-materiales-ductiles_fig1_331310495

La pendiente del diagrama tensión-deformación dentro de la zona elástica se denomina “módulo de Young”. Este parámetro depende únicamente del tipo de material. Así mismo, el módulo de

Young será la relación que existe entre la variación del esfuerzo dividido por la variación de la deformación unitaria.

Beer et al. (2010), menciona que “Robert Hooke mediante el uso de resortes descubrió que un incremento en el esfuerzo produce un incremento proporcional en la deformación”, relacionando los siguientes elementos:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

En donde:

σ Es la tensión o esfuerzo

E Es el módulo de elasticidad

ε Es la deformación unitaria

De este análisis proviene la “Ley de Hooke” que indica que al momento que un material elástico es sometido a una fuerza, este sufrirá una deformación unitaria, la cual es proporcional a la fuerza aplicada.

A continuación vamos a analizar las fuerzas que pueden aplicarse a diferentes elementos, los cuales producirán diferentes esfuerzos, por lo tanto se tienen las siguientes fuerzas de aplicación:

- Fuerzas en tensión (tracción): Son las fuerzas en sentido opuesto que intentan alargar el material.

Figura 17

Fuerzas de tracción



- Fuerzas en compresión: Contrario a la fuerza de tensión, estas fuerzas de sentido opuestos intentan comprimir el material.

Figura 18

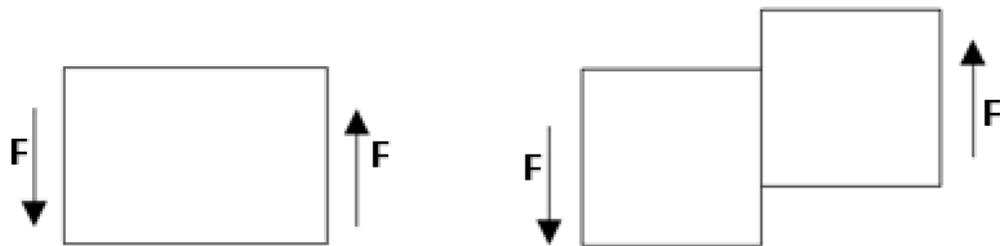
Fuerzas de compresión



- Fuerza en cortante: Son fuerzas que ocasionan cizalladura en el material

Figura 19

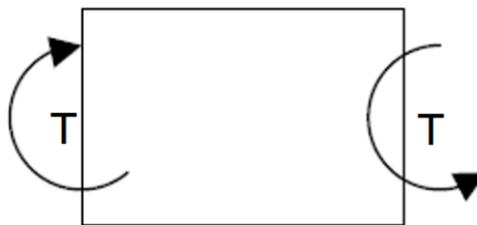
Fuerzas en cortante



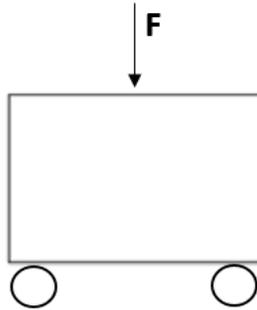
- Fuerza en torsión: Son fuerzas externas que intentan dar una rotación alrededor del mismo.

Figura 20

Fuerzas en torsión



- Fuerza en flexión pura: Cuando se aplica una fuerza perpendicular a su eje longitudinal, esta produce una flexión en el material.

Figura 21*Fuerzas en flexión*

Relación de Poisson (μ): Es la relación que muestra como varía la sección transversal de un material bajo algún esfuerzo, este valor está comprendido entre 0 a 0.5.

Límite de proporcionalidad. Se define como el esfuerzo máximo donde hay proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones.

Esfuerzo en vigas. El esfuerzo en vigas cuando se produce flexión se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad (5)$$

En donde:

σ Esfuerzo.

M Momento flector.

c Distancia desde la fibra más externa al eje neutro.

I Inercia

Capítulo III Diseño Generativo de vigas de núcleo de material celular

Diseño Experimental

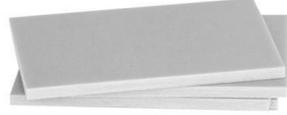
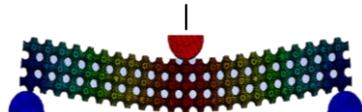
Para dar un mejor análisis en el comportamiento de las estructuras, es necesario el diseño experimental, ya que este nos permite obtener información específica para alcanzar nuestros objetivos.

Factores a considerar para la implementación del diseño experimental

Para nuestro proyecto, se han considerado los siguientes factores y niveles:

Figura 22

Factores y niveles para la aplicación del diseño experimental

Arquitectura del núcleo		Material de las alas	
Sólido		Aluminio	
Schwarz p			
Arreglo cuadrado bidimensional		Resina	
Arreglo hexagonal tridimensional			
Porosidad		Estructura de la viga	
60%		Viga sándwich	
70%		Núcleo	

Nota. Es figura muestra los factores, niveles y variables para la aplicación del diseño experimental.

La combinación de los niveles por cada factor se muestra en la siguiente tabla, dándonos un total de 19 probetas a diseñar y prefabricar. Esto con el fin de poder obtener datos que nos indiquen el comportamiento que cada una de estas puede presentar en los ensayos a flexión.

Tabla 1*Combinaciones de factores y niveles para aplicación en el diseño experimental*

Nro de probetas	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
1	Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A
2	Schwarz P	Núcleo	N/A	70%
3	Schwarz P	Núcleo	N/A	60%
4	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	70%
5	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	60%
6	Schwarz P	Viga sándwich	Aluminio	70%
7	Schwarz P	Viga sándwich	Aluminio	60%
8	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%
9	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	60%
10	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	70%
11	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	60%
12	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Aluminio	70%
13	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Aluminio	60%
14	Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%
15	Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	60%
16	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Lámina de resina	70%
17	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Lámina de resina	60%
18	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Aluminio	70%
19	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Aluminio	60%

Nota. Esta tabla indica la combinación de los factores, niveles y variables para la aplicación del diseño experimental.

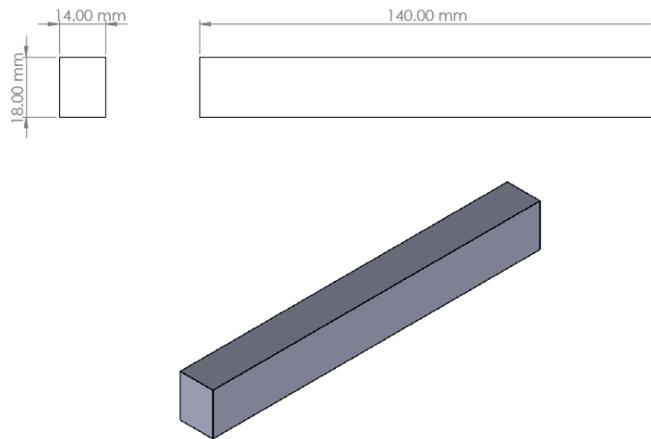
Proceso de creación de las probetas

Geometría de la probeta:

La geometría de las probetas a generar se basa en las dimensiones del plano de la siguiente figura.

Figura 23

Esquema de la geometría de las probetas.



Nota. Se tomará como referencia las medidas de este plano para la elaboración de los núcleos celulares.

Características de la resina:

A continuación se presentan los datos de las propiedades del material de las resinas a utilizar en las siguientes figuras.

Figura 24

Datos de las propiedades de la Resina Standard Gray

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12 %	6.2 %	12 %	6.2 %	ASTM D 638-10
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
Impact Properties					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	427 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	497 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07

Nota. Esta gráfica nos indica las propiedades mecánicas de la Resina Standard Gray. Tomada de: *Material data sheet* Standard, por Formlabs, (2022). <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Standard-DataSheet.pdf>

Figura 25

Datos de las propiedades de la Resina High Temp

	METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ⁵	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁶	
Mechanical Properties				
Ultimate Tensile Strength	20.9 MPa	58.3 MPa	51.1 MPa	ASTM D 638-14
Elongation at break	14 %	3.3 %	2.4 %	ASTM D 638-14
Tensile modulus	0.75 GPa	2.75 GPa	2.9 GPa	ASTM D 638-14
Flexural strength at break	24.1 MPa	94.5 MPa	93.8 MPa	ASTM D 790-15
Flexural modulus	0.69 GPa	2.62 GPa	2.62 GPa	ASTM D 790-15
Impact Properties				
Notched IZOD	32.8 J/m	18.2 J/m	24.2 J/m	ASTM D 256-10
Thermal Properties				
Thermal Expansion (0-150 °C)	118.1 (µm/m°C)	79.6 (µm/m°C)	74 (µm/m°C)	ASTM E 831-13

Nota. Esta gráfica nos indica las propiedades mecánicas de la High Temp. Tomado de: *Material data sheet* High Temp, por Formlabs, (2022). <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Standard-DataSheet.pdf>

Diseño de núcleo Schwarz P

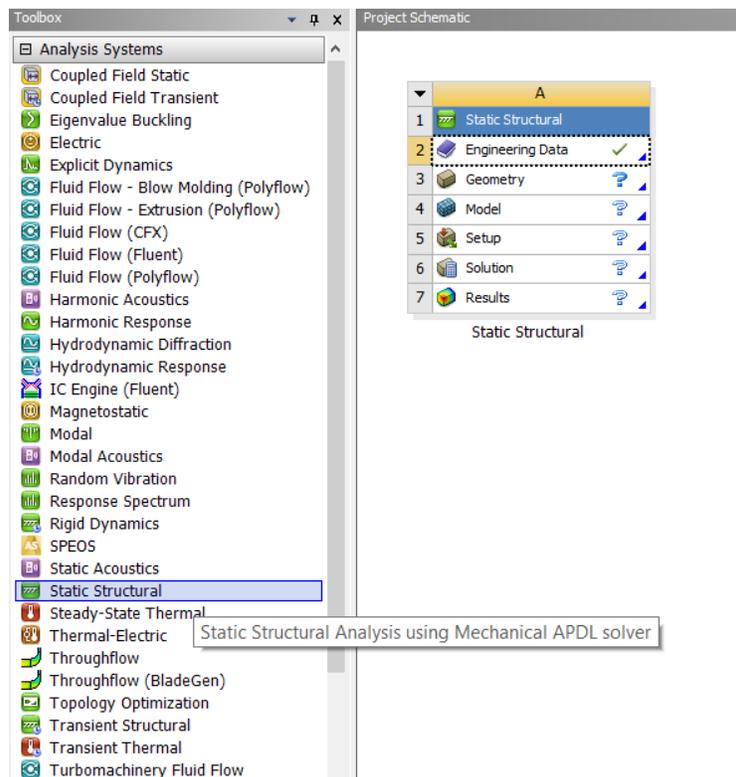
Para la creación de la probeta seguiremos los siguientes pasos:

Se realiza un sólido, con las medidas indicadas en la figura 19 en cualquier software CAD y se procede a guardar en formato “STL” e “igs” o “x_t”.

Se abre el software Ansys Workbench, en el cual realizaremos un análisis estático (“Static Structural”).

Figura 26

Análisis Static Structural en Ansys



A continuación se debe pulsar en la opción “Engineering Data”, la cual abrirá una pestaña en la que podemos seleccionar los materiales a usar y/o agregar un nuevo material que no se encuentra en la librería, en este caso debemos de ingresar los datos de la hoja de datos de cada resina.

Figura 27

Pestaña de “Engineering Data” y pestaña propiedades de material

The image shows two screenshots from a software application. The top screenshot is titled "Outline of Schematic A2: Engineering Data" and displays a table with columns A, B, C, D, and E. Row 2 is highlighted, showing "Material" with a sub-row for "Resina Standard gray" and another for "Structural Steel". The "Structural Steel" row is selected, and its properties are shown in the bottom screenshot.

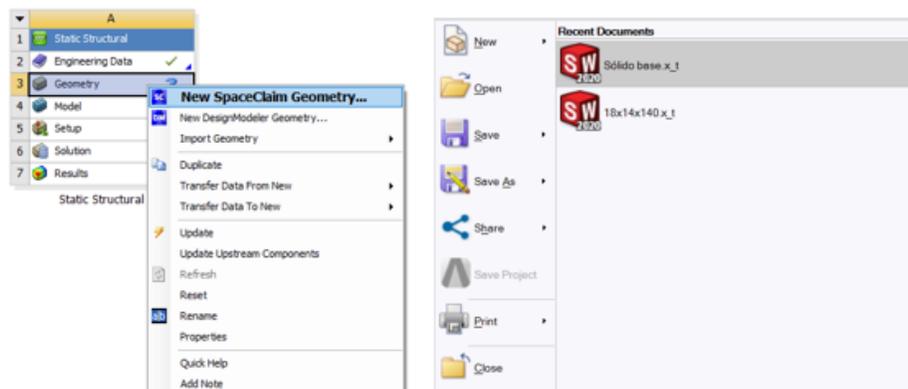
The bottom screenshot is titled "Properties of Outline Row 4: Structural Steel" and displays a table with columns A, B, C, D, and E. The table lists various material properties and their values and units.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.3	
Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Se cierra esa pestaña, y el siguiente paso será editar la geometría base con “geometry/New Space Claim Geometry”, en el cual una vez dentro se procede a abrir el sólido inicial denominado “sólido base.xt”

Figura 28

Menú y submenú de Ansys para abrir una geometría

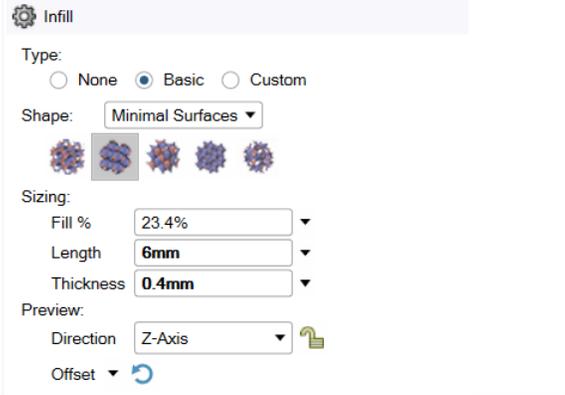
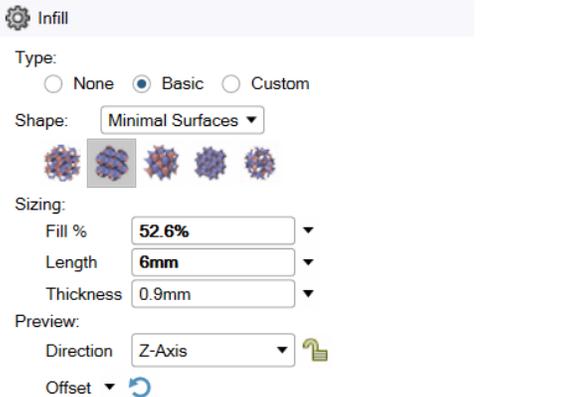


En el Software SpaceClaim, utilizaremos la opción “Facets”, en la cual dentro de esta, habrá una pestaña denominada “Shell”, esta se encargará de dar la forma celular a nuestro sólido base.

Para obtener un porcentaje de porosidad del 60% y 70% respectivamente, se debe configurar los siguientes parámetros de medida.

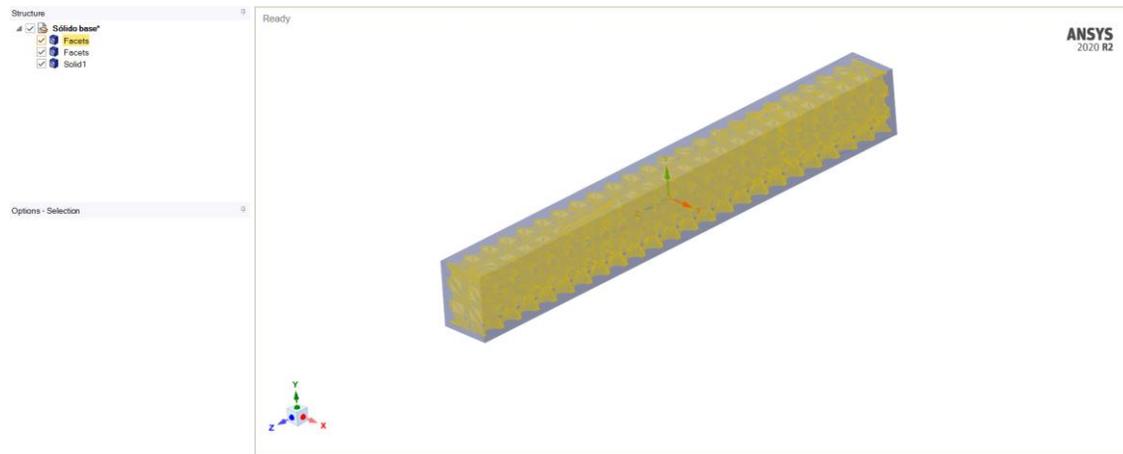
Figura 29

Parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular Schwarz P

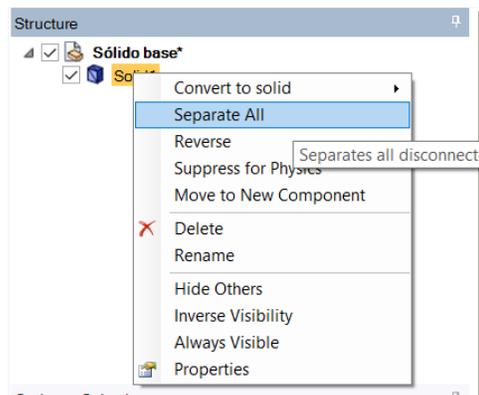
Porosidad	Parámetros
60%	 <p>Infill</p> <p>Type: <input type="radio"/> None <input checked="" type="radio"/> Basic <input type="radio"/> Custom</p> <p>Shape: Minimal Surfaces</p> <p>Sizing:</p> <p>Fill %: 23.4%</p> <p>Length: 6mm</p> <p>Thickness: 0.4mm</p> <p>Preview:</p> <p>Direction: Z-Axis</p> <p>Offset</p>
70%	 <p>Infill</p> <p>Type: <input type="radio"/> None <input checked="" type="radio"/> Basic <input type="radio"/> Custom</p> <p>Shape: Minimal Surfaces</p> <p>Sizing:</p> <p>Fill %: 52.6%</p> <p>Length: 6mm</p> <p>Thickness: 0.9mm</p> <p>Preview:</p> <p>Direction: Z-Axis</p> <p>Offset</p>

Nota. Menú de opciones dentro de la herramienta “Facets/Shell” de Ansys Space Claim, que indica los parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular Schwarz P.

Para la configuración con una porosidad del 60% se tendrá la siguiente figura, y se oprime el botón “complete”.

Figura 30*Arquitectura schwarz P*

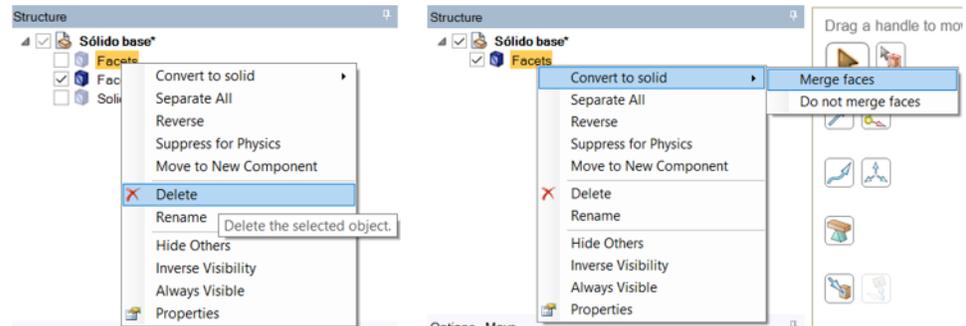
Posteriormente, se debe de separar los elementos que quedan cuando se ha realizado la anterior operación.

Figura 31*Menú de opciones para la nueva arquitectura celular.*

Eliminar los sólidos que no son necesarios para este análisis, posterior a eso se debe de convertir a sólido como indica la siguiente figura.

Figura 32

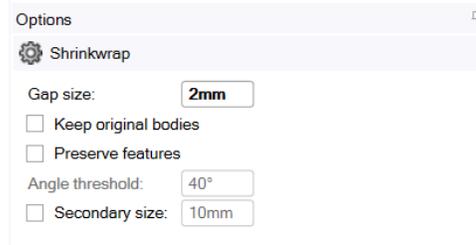
Menú de opciones: eliminar sólidos separados y convertir a sólidos



Cuando la probeta cuenta con estructuras complejas, se recomienda usar la opción “Facets/Shrinkwrap” con la siguiente configuración.

Figura 33

Parámetro geométrico "Facets/Shrinkwrap"



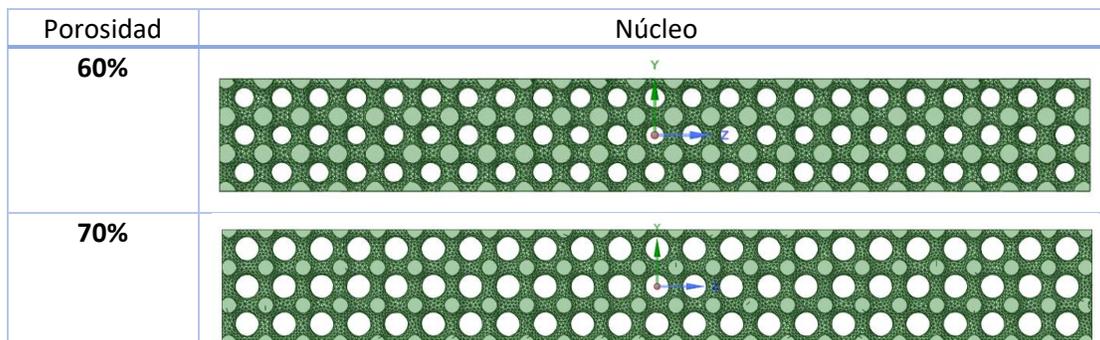
Nota. Esta opción se recomienda usar cuando la geometría de la superficie mínima es compleja como la schwarz P, la cual nos ayuda a reducir el tiempo de procesamiento en posteriores simulaciones. Para otras superficies no es necesario usar esta opción.

Posterior a esto se procede a guardar en formato “STL” e “igs” o “x_t”, para usarlo en el análisis numérico.

A partir de los parámetros geométricos de porosidad que hayamos usado (60% y 70%), vamos a obtener los siguientes sólidos, los cuales son los núcleos para nuestras vigas tipo sándwich.

Figura 34

Núcleos Schwarz P con porosidades del 60% y 70%



Nota. Estructura celular TPMS “Schwarz P” generado en Ansys Space Claim.

Diseño de núcleo Hexagonal tridimensional

Para realizar los diseños de diferentes estructuras solo basta con cambiar la arquitectura que deseamos diseñar y modificar los parámetros geométricos de la pestaña “Facets/Shell”, a continuación indicamos los parámetros geométricos para la creación de núcleos con porosidades del 60% y 70%.

Figura 35

Parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular Hexagonal tridimensional

Porosidad	Parámetros
60%	
70%	

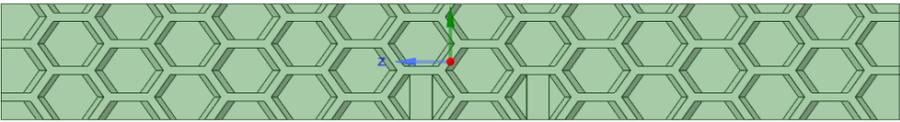
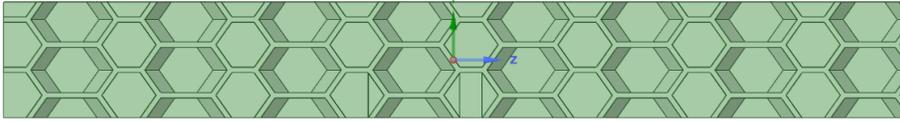
Nota. Menú de opciones dentro de la herramienta “Facets/Shell” de Ansys Space Claim, que indica los parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular Hexagonal tridimensional.

Realizando todos los pasos anteriormente descritos para la creación del núcleo celular Schwarz P, se obtendrán los siguientes sólidos:

P, se obtendrán los siguientes sólidos:

Figura 36

Núcleos hexagonal tridimensional con porosidades del 60% y 70%

Porosidad	Núcleo
60%	
70%	

Nota. Estructura celular “Arreglo hexagonal tridimensional” generado en Ansys Space Claim.

Estos son los núcleos para nuestras vigas tipo sándwich de tipo Hexagonal tridimensional, finalmente se procede a guardar en formato “STL” e “igs” o “x_t”, para usarlo más adelante.

Diseño de núcleo cuadrado bidimensional

De manera similar a los anteriores diseños de estructuras celulares, solo basta con cambiar la arquitectura que deseamos diseñar y modificar los parámetros geométricos de la pestaña “Facets/Shell”. A continuación indicamos los parámetros geométricos para la creación de núcleos con porosidades del 60% y 70%.

Figura 37

Parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular cuadrado bidimensional

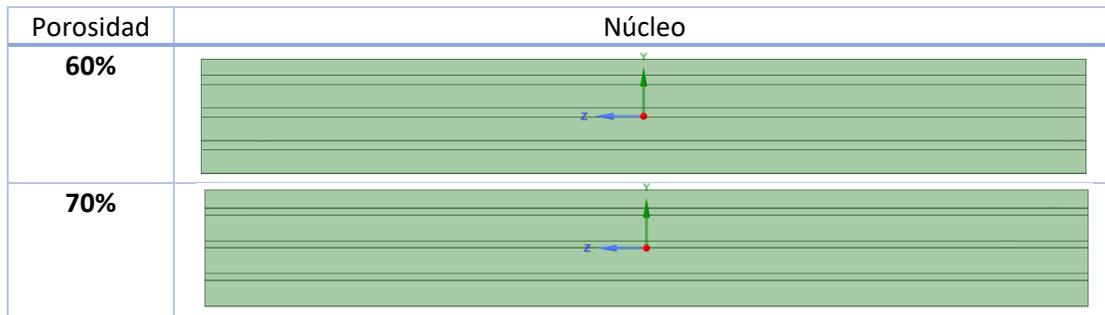
Porosidad	Parámetros
60%	
70%	

Nota. Menú de opciones dentro de la herramienta “Facets/Shell” de Ansys Space Claim, que indica los parámetros geométricos de porosidad para la estructura celular cuadrado bidimensional.

Realizando todos los pasos anteriormente descritos para la creación del núcleo celular Schwarz P, se obtendrán los siguientes sólidos.

Figura 38

Núcleos cuadrado bidimensional con porosidades del 60% y 70%



Nota. Estructura celular “Arreglo cuadrado bidimensional” generado en Ansys Space Claim.

Estos son los núcleos para nuestras vigas tipo sándwich de tipo cuadrado bidimensional, finalmente se procede a guardar en formato “STL” e “igs” o “x_t”, para usarlo más adelante.

Prototipado de vigas tipo sándwich

Configuración de impresora

La impresora que vamos a usar es la Form 3 de Formlabs, la cual tiene las siguientes características:

Figura 39

Impresora FORM 3 de Formlabs



Nota. Impresora SLA Form 3+ Tomado de *Form 3+ Impresiones rápidas y perfectas en todo momento*, por Formlabs, (2022). <https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3/>

Tabla 2*Características de impresora Form 3 de Formlabs*

Impresora mediante Estereolitografía	
Fabricante	Formlabs
Procedencia	Estados Unidos
Material Consumible	Resina
Tipo de Llenado	Automático
Tecnología de Impresión	Estereolitografía de Fuerza Baja (LFS)
Diámetro de Punto Láser	85 micras
Montado	Plug and Play
Dimensiones	405 x 375 x 530
Peso	17,5 Kg
Espesor de Capa	25 – 300 micras
Resolución	25 micras
Volumen Máximo de Impresión	145 x 145 x 185
Temperatura de Trabajo Interna	Auto calefacción hasta 35°C
Especificación Láser	Láser de clase 1.
Archivos de Entrada	STL, OBJ, FORM
Software	Preform
Conectividad	Wi – Fi, Ethernet, Cable USB 2.0
Sistema Operativo	Windows 7, Mac OS x 10.10., OpenGL 2.1
Especificaciones de Alimentación	100 – 240 V CA / 2,5 A / 50-60 Hz 220 W
Otros	Pantalla de Control, Aplicación Móvil,

Nota. Ficha técnica de las impresora 3D “form 3”. Tomado de *Especificaciones técnicas de las impresoras 3D de estereolitografía*, por Formlabs, (2022). <https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3/tech-specs/>.

Para configurar la impresora solamente es necesario introducir el tanque de resina, el cartucho de resina del mismo tipo y la base o plataforma de impresión en la impresora Form 3, y si la impresora lo

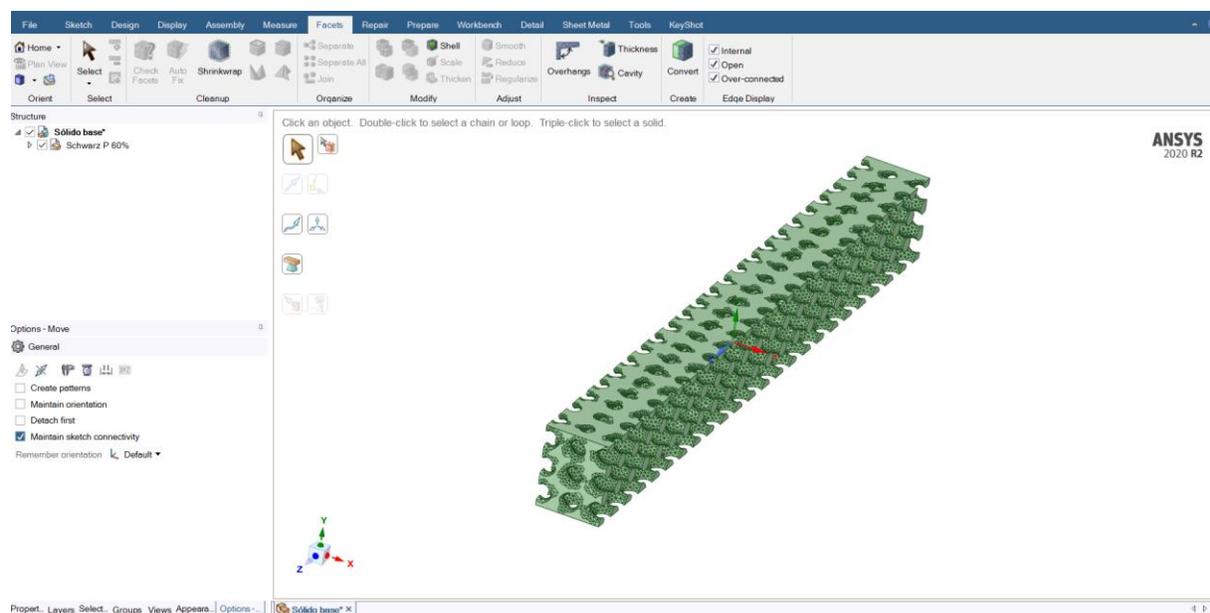
requiere se debe de nivelar con los discos niveladores de superficies que se encuentran en la parte inferior de la impresora.

Impresión de probetas

A partir de las probetas descritas en el diseño experimental, se deberá realizar la impresión mediante estereolitografía de los 19 núcleos celulares que fueron diseñados en Ansys SpaceClaim y guardados en formato “STL”, para posteriormente efectuar la limpieza, el curado y el prototipado de la viga tipo sándwich para finalmente realizar los ensayos mecánicos a cada uno de estos núcleos celulares y vigas tipo sándwich respectivamente.

Figura 40

Estructura celular Schwarz P en SpaceClaim

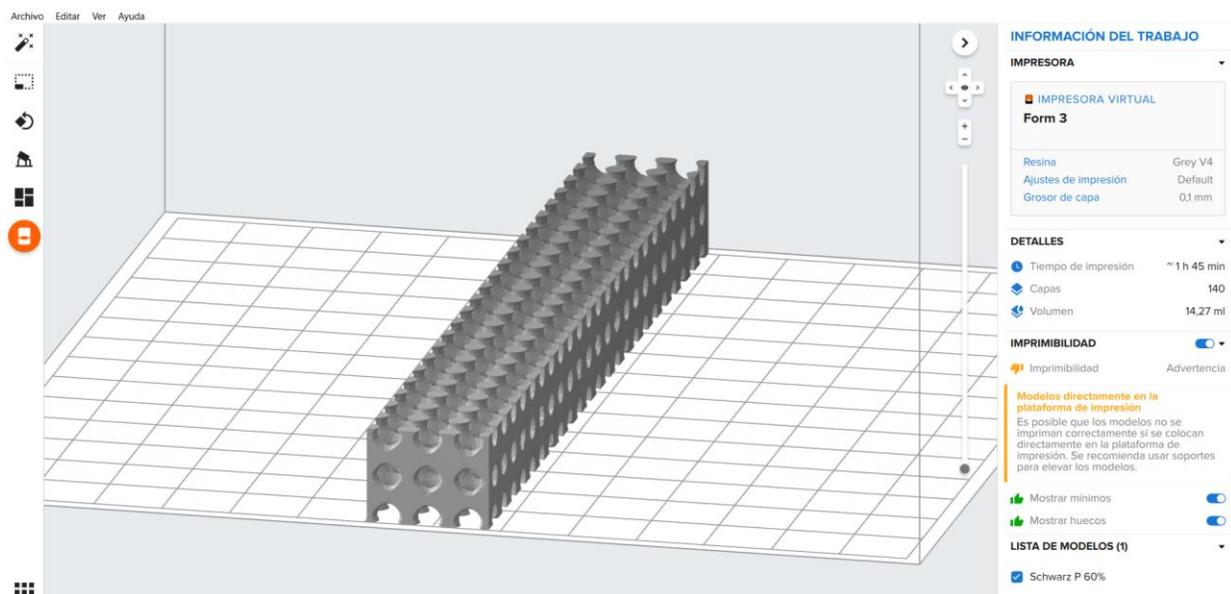


Nota. La figura muestra la estructura celular de superficie mínima Schwarz P en el software SpaceClaim.

Una vez guardado el sólido generado en formato “STL”, se procede a importarlo en el programa Preform.

Figura 41

Estructura Schwarz P 60 % en Preform

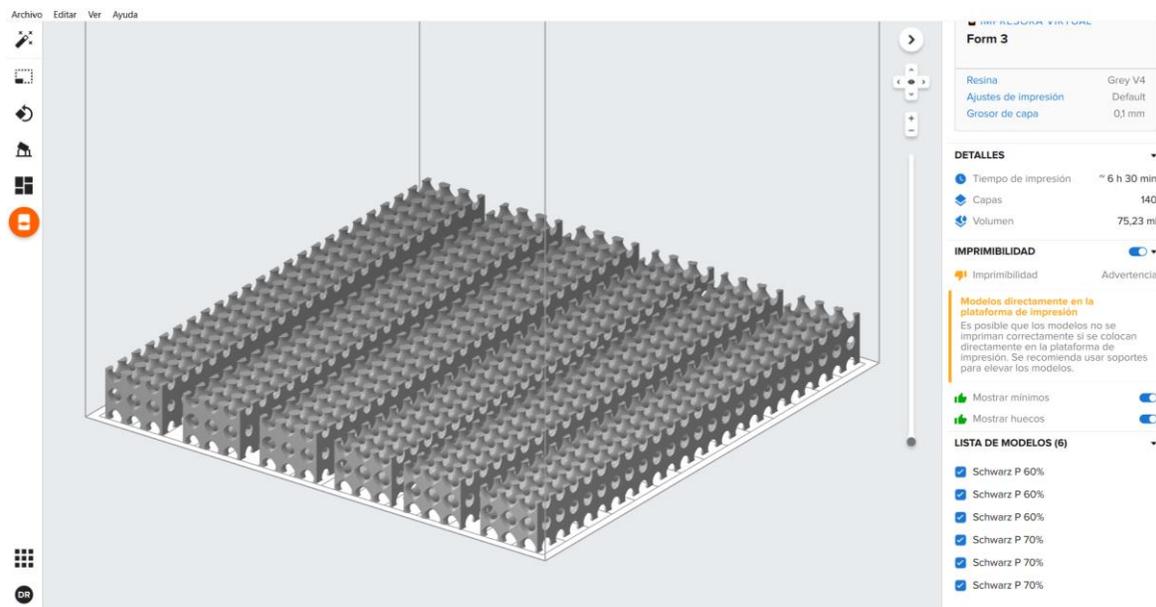


Nota. La figura muestra la Estructura celular de superficie mínima Schwarz P en el software de impresión Preform.

Debido a que existe espacio en la base de impresión, es recomendable añadir más sólidos celulares basándonos en el número de probetas descritas en el diseño experimental. Así por ejemplo, de la estructura celular Schwarz P, se imprimirán 6 núcleos, de los cuales 3 son con porosidad del 60% y los otros 3 son del 70%, esto para optimizar el tiempo de impresión, la limpieza y el post curado.

Figura 42

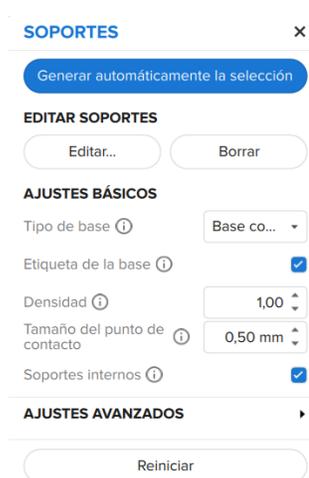
Estructuras Schwarz P 60 % y 70% en Preform



Para este tipo de estructuras y para que no afecte en su geometría final, el software de impresión recomienda colocar soportes, los cuales se añadirán en el menú soportes en la parte superior izquierda del software. Para optimizar la impresión se recomienda generar los soportes de forma automática “Generar automáticamente la selección”.

Figura 43

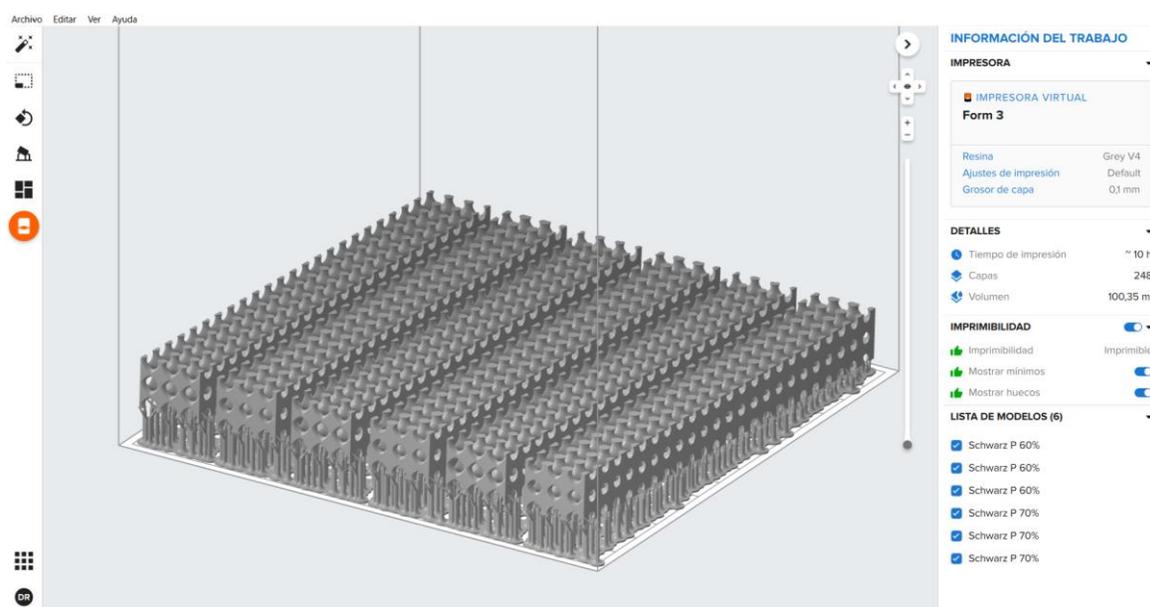
Menú soportes en Preform



El software Preform nos indicará si los sólidos se encuentran listos para generarse por estereolitografía, esto lo comprobamos cuando en la pantalla se indique que los sólidos colocados en la mesa virtual de impresión se encuentre en estado “imprimible”. Finalmente, nos queda la base de impresión de la siguiente manera:

Figura 44

Estado de impresión de estructuras Schwarz P en la base de impresión

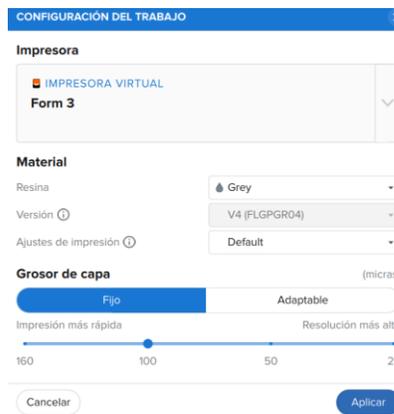


Para finalizar la configuración de trabajo, se debe de verificar que la impresora esté conectada por red o cable y que en la pestaña “impresora virtual” sea reconocida por el software Preform, así como su resina “Standard Grey”. Posteriormente, se mantendrán las configuraciones por “Default” acerca del grosor de capa para la impresión.

Como se observa en la anterior figura, todos los núcleos celulares poseen un ángulo de giro respecto a la base de 10 a 20 grados, esto con el objetivo de que la resina adherida a los sólidos, pueda caer nuevamente al tanque de impresión y así poder reducir el desperdicio.

Figura 45

Configuración de trabajo software Preform



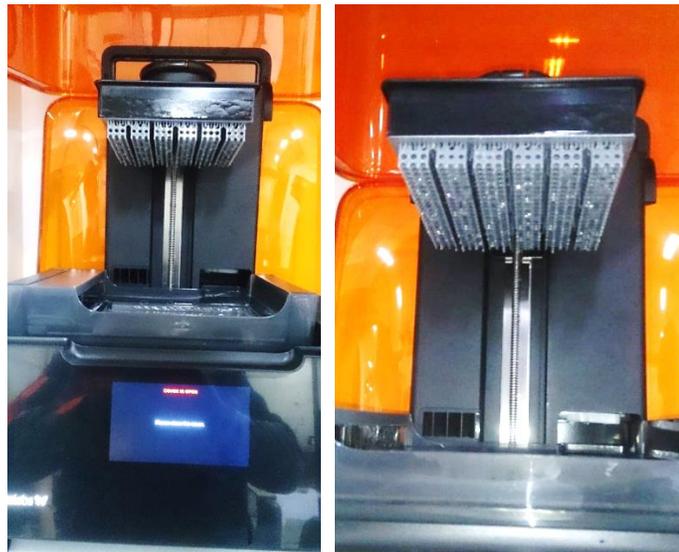
Una vez lista la última parte, dar clic en “empezar impresión” y aceptamos. Durante todo este proceso, la impresora debe de estar lista para imprimir. En la pantalla táctil de la impresora Form 3, se deberá confirmar la ejecución del trabajo para que empiece la impresión.

Limpieza de la pieza impresa

Una vez que la impresión haya terminado, abrir la cubierta de la impresora y retirar la base de impresión como muestra la siguiente figura.

Figura 46

Finalización de impresión de probetas Schwarz P



La base de la impresión se debe colocar en una superficie plana para retirar los núcleos celulares “Schwarz P” con espátula y pinza, empezando con los soportes que están sujetos a la base.

Figura 47

Base de impresión con probetas Schwarz P



Una vez ya retirado cada probeta de la base de impresión y retirado los soportes de cada núcleo celular, proceder a realizar la limpieza. Esta limpieza consiste en colocar en un tanque con alcohol isopropílico, éter monometílico de tripropilenglicol, o alcohol industrial los sólidos impresos totalmente sumergidos y lavar cualquier resto de la resina líquida existente en la pieza impresa. Para obtener mejores resultados se debe de agitar el tanque con el disolvente y con los sólidos impresos para que la resina se pueda desprender más fácilmente de estos.

Figura 48

Lavado de sólidos impresos con alcohol isopropílico



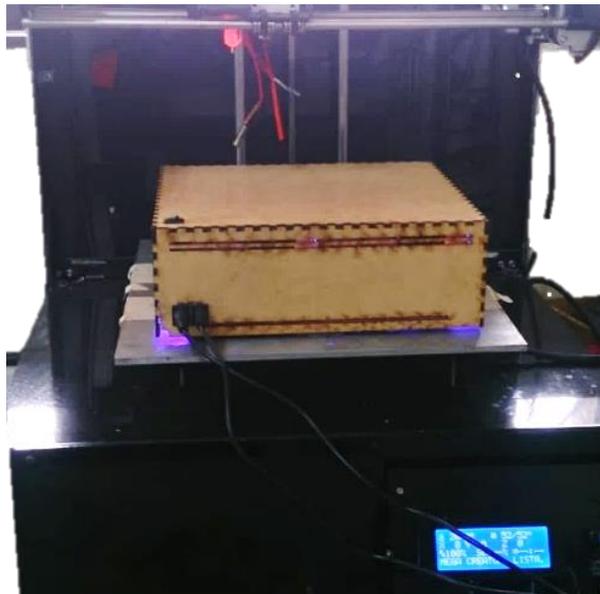
Una vez lavados en su totalidad los núcleos celulares, con ayuda de aire comprimido limpio, se pueden secar las piezas más rápidamente.

Post-curado

Una vez ya limpios los núcleos celulares, se procederá a curar estos sólidos. Esto es necesario para que las piezas impresas puedan alcanzar sus propiedades mecánicas óptimas como lo indica el proveedor. En base a la ficha técnica, se recomienda post-curar a una temperatura de 60°C en un tiempo de 30 minutos, con una lámpara de luz led UV.

Figura 49

Dispositivo de Post-Curado



Finalmente, los núcleos celulares nos quedan como la siguiente figura:

Figura 50

Núcleos celulares post curados

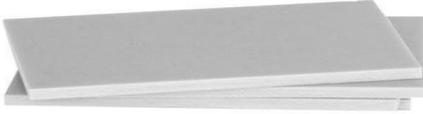
Núcleo celular	
Núcleo base	
Schwarz P 60% y 70%	
Hexagonal tridimensional 60% y 70%	
Cuadrado bidimensional 60% y 70%	

Prefabricado de vigas tipo sándwich

Una vez ya listos los núcleos celulares, se debe de recortar 6 láminas de aluminio de espesor 0.45mm con las siguientes medidas: 14x140 mm así mismo, se deberá imprimir con las mismas dimensiones 6 láminas de resina High temp, basándonos en el proceso de impresión, limpieza y curado similar a la de los núcleos celulares anteriormente descritos.

Figura 51

Láminas externas para el prefabricado de la viga tipo sándwich

Material de las capas externas, pieles o alas de la viga tipo sándwich	
Aluminio	
Resina	

Considerando el diseño experimental, se debe de prefabricar las probetas como indica la siguiente tabla.

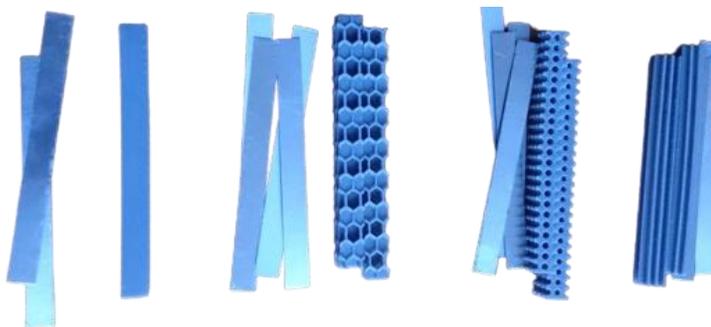
Tabla 3*Diseño experimental para el prefabricado de vigas sándwich*

Estructuras	Porosidad	Material alas
Schwarz P, hexagonal tridimensional, cuadrado bidimensional	70%	Lámina de resina
Schwarz P, hexagonal tridimensional, cuadrado bidimensional	60%	Lámina de resina
Schwarz P, hexagonal tridimensional, cuadrado bidimensional	70%	Aluminio
Schwarz P, hexagonal tridimensional, cuadrado bidimensional	60%	Aluminio

La película adhesiva que se va a utilizar para unir la capa externa, piel o alas de la viga con el núcleo celular será un sellador polímero MS de alta resistencia al corte y a la tracción.

El procedimiento para la prefabricación de la viga tipo sándwich es la siguiente:

- Una vez cortadas las láminas delgadas de aluminio o de resina high temp, limpiar con un desengrasante o con alcohol isopropílico las superficies a ser adheridas.

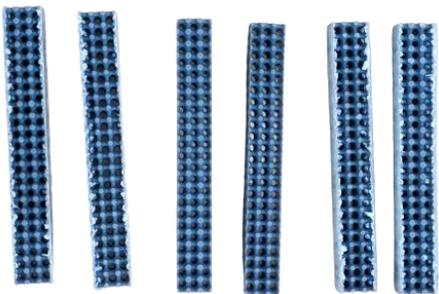
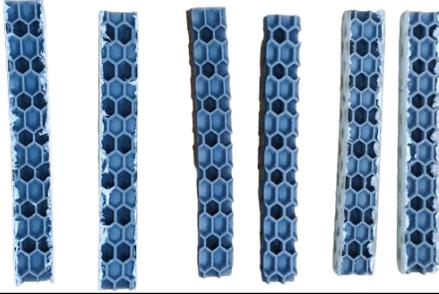
Figura 52*Láminas externas y núcleos celulares*

Nota. La figura nos indica los materiales a ser usados para la prefabricación de vigas sándwich de núcleos de material celular.

- Posteriormente colocar el pegamento “Sellador Polímero MS” en las superficies de contacto, evitando el exceso y juntar las superficies (Núcleo celular y lámina externa), todo esto en base a la probetas descritas en el diseño experimental.

Figura 53

Prototipos de viga de núcleo de material celular

Vigas sándwich de núcleo celular		
Topología	Núcleo celulares	Vigas sándwich
Schwarz P 60% y 70%		
Hexagonal tridimensional 60% y 70%		
Cuadrado bidimensional 60% y 70%		

Nota. Esta figura indica todas las probetas de núcleo de material celular a usar en los ensayos mecánicos.

Pruebas a flexión

El ensayo de flexión se lo realizará en la máquina de ensayos universales que se encuentra en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la cual tiene una distancia entre apoyos de 126 mm y la

aplicación de la fuerza será en el centro de la viga. Este ensayo consiste en aplicar una fuerza de manera perpendicular a las probetas, la cuales están simplemente apoyadas como indica la figura 54.

El ensayo a flexión se lo realiza en tres puntos a cada viga tipo sándwich.

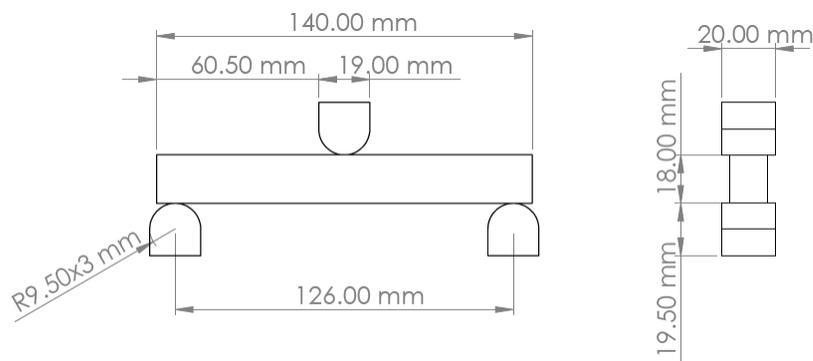
La realización de este ensayo nos sirve para conocer el comportamiento mecánico de las vigas y así poder determinar algunas de sus propiedades mecánicas principales, para posteriormente compararlas con resultados obtenidos a través de simulaciones.

Resultado experimental de los ensayos a flexión de las probetas

Los ensayos se realizaron mediante el siguiente esquema y bajo las mismas condiciones ambientales. El número de probetas a ensayar se definió en base al diseño experimental que se indica en la tabla número 1.

Figura 54

Configuración dimensional para el ensayo a flexión por tres puntos

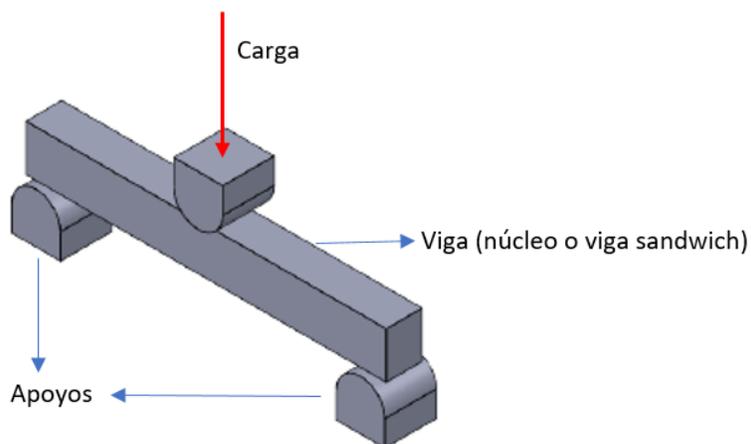


Nota. Plano para aplicación de ensayo a flexión en tres puntos.

El ensayo consiste en aplicar una carga con el punzón superior de la máquina de ensayos universales a la viga, la cual mantiene su longitud entre apoyo de 126mm como indica la siguiente figura:

Figura 55

Esquema del ensayo a flexión



Nota. Esquema del ensayo a flexión en base al plano de la figura 54.

A partir del número de probetas indicadas en el diseño experimental y a través del ensayo mecánico a flexión se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 56

Ensayo a flexión probeta N°1

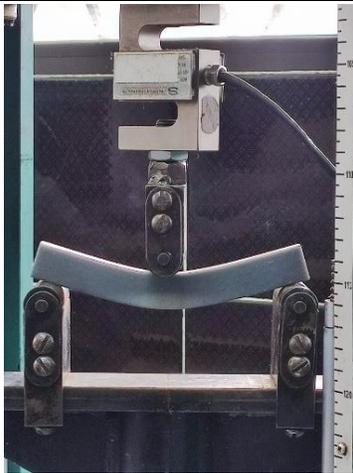
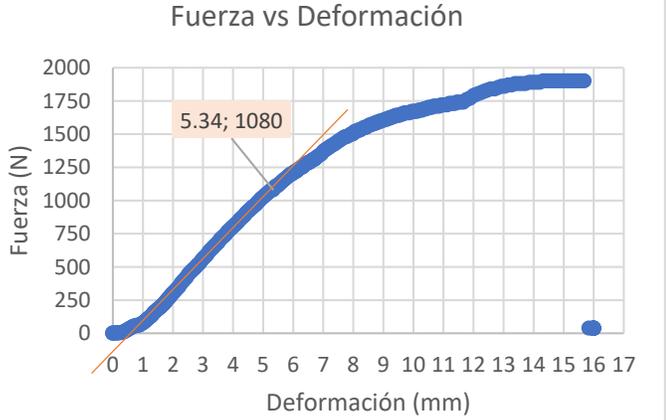
Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
1	Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A
Ensayo a flexión		Resultado		
		<p>Fuerza vs Deformación</p> 		

Figura 57

Ensayo a flexión probeta N°2

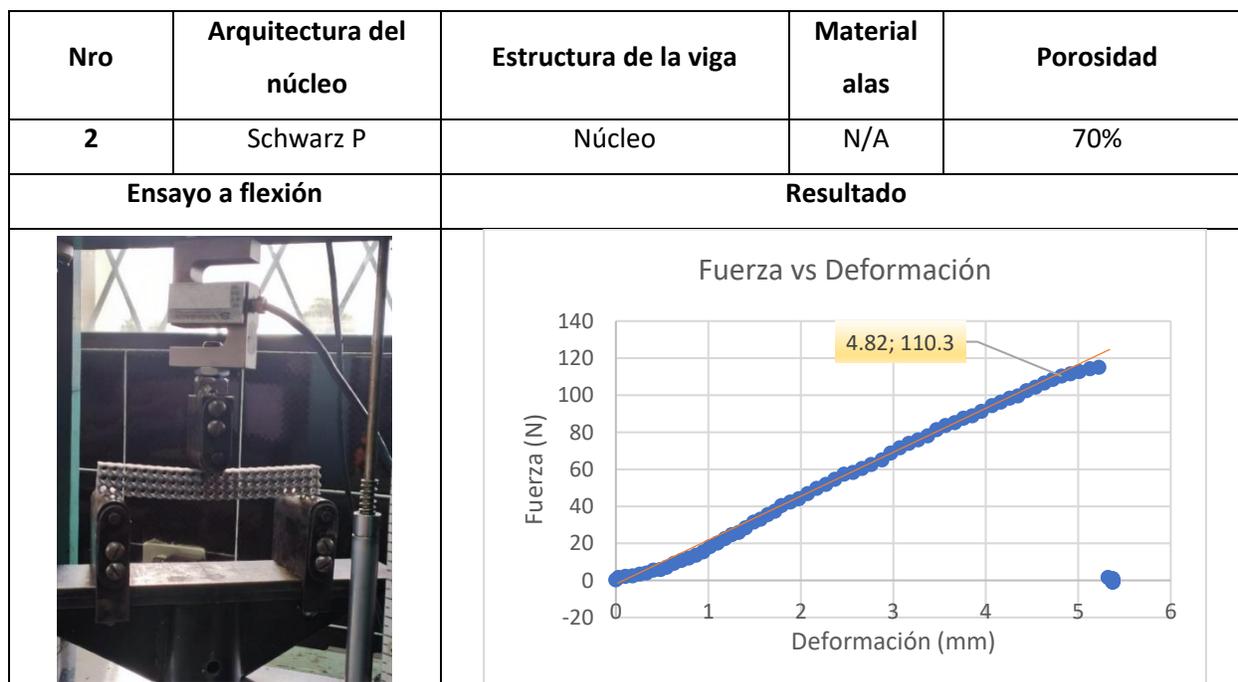


Figura 58

Ensayo a flexión probeta N°3

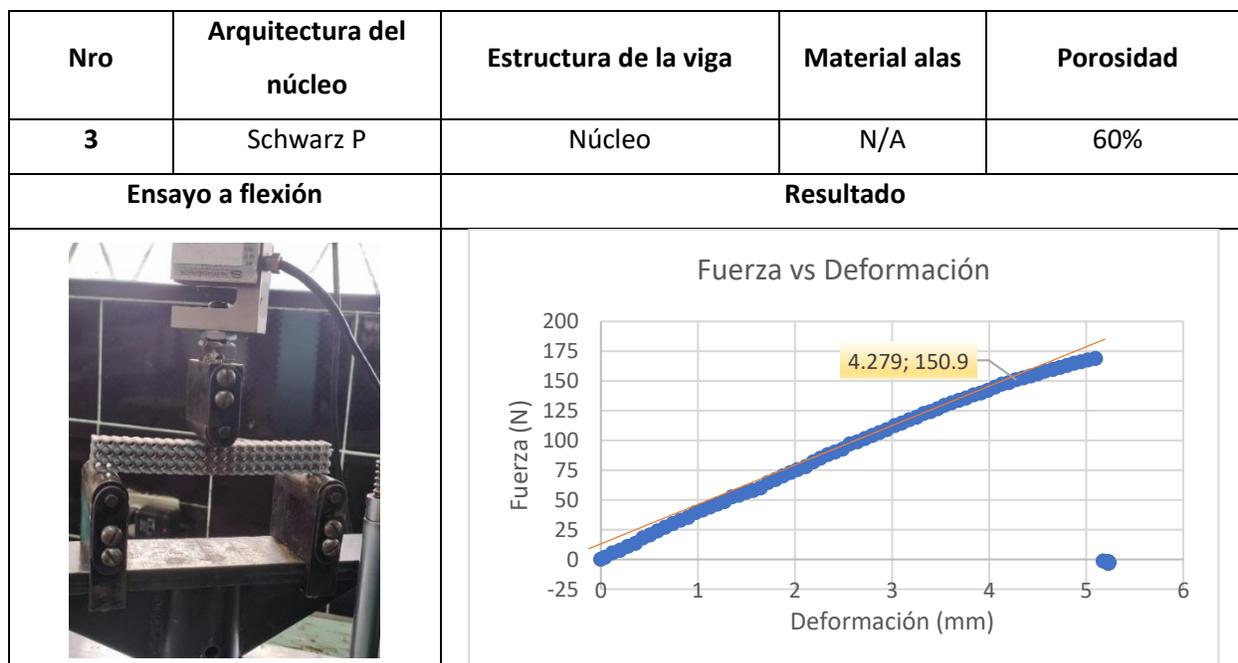


Figura 59

Ensayo a flexión probeta N°4

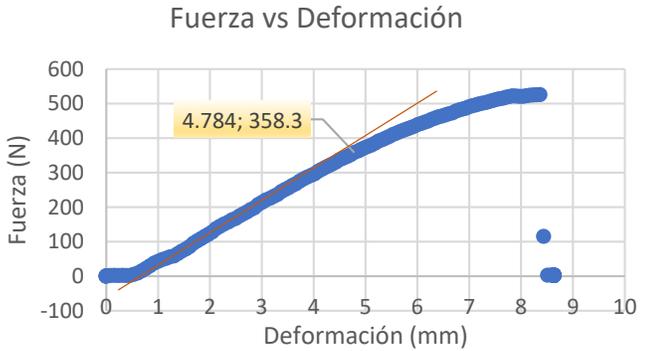
Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
4	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	70%
Ensayo a flexión		Resultado		
		<p>Fuerza vs Deformación</p> 		

Figura 60

Ensayo a flexión probeta N°5

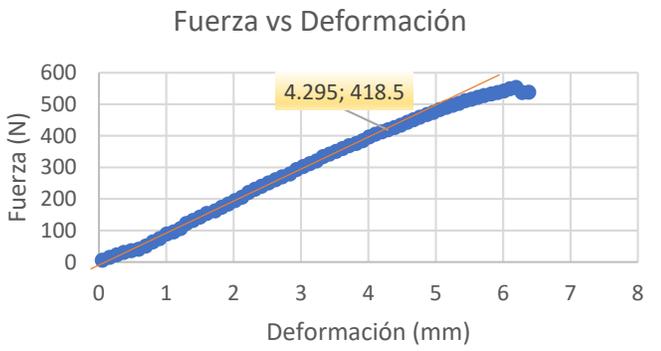
Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
5	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	60%
Ensayo a flexión		Resultado		
		<p>Fuerza vs Deformación</p> 		

Figura 61

Ensayo a flexión probeta N°6

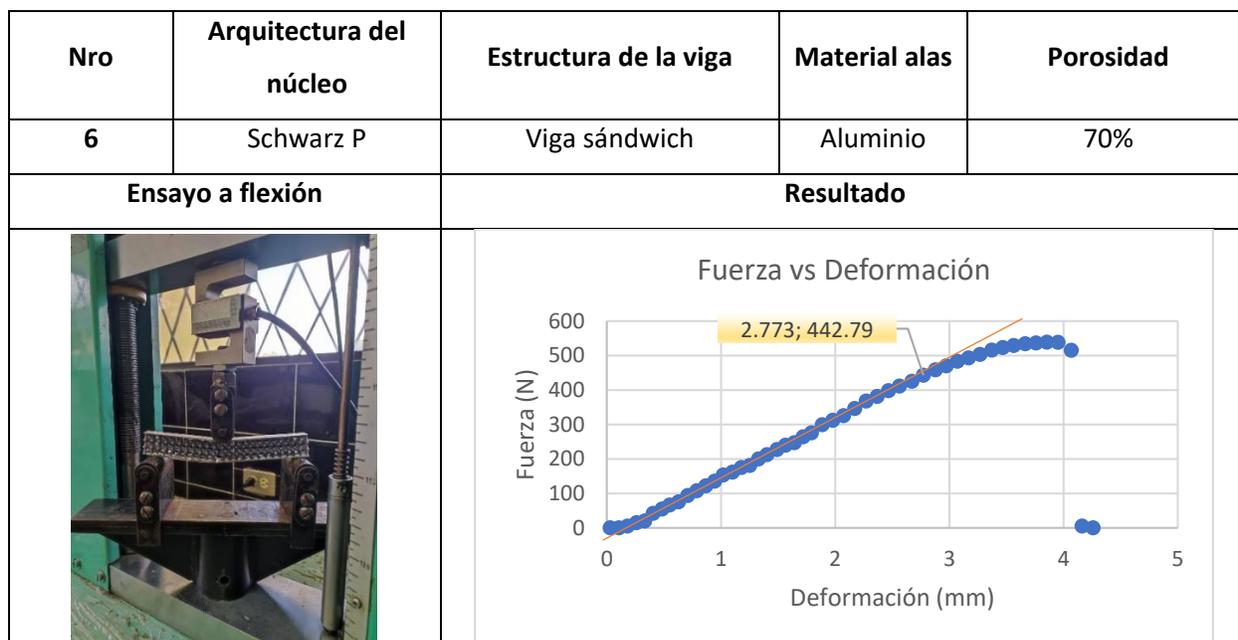


Figura 62

Ensayo a flexión probeta N°7

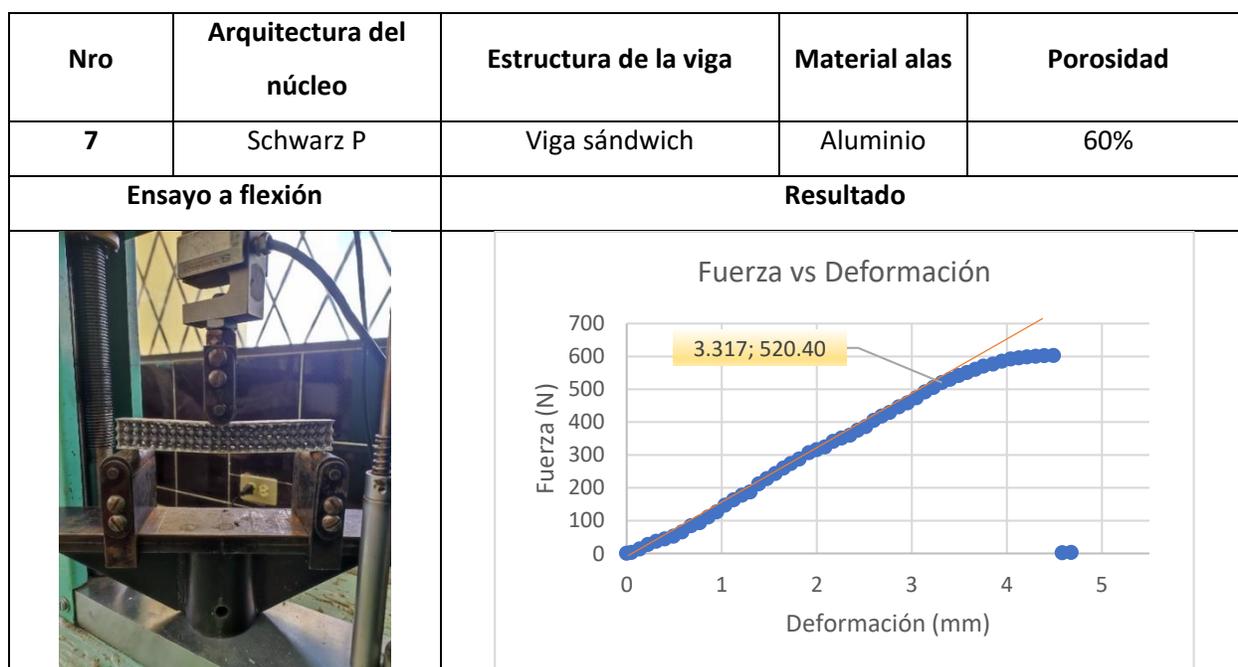


Figura 63

Ensayo a flexión probeta N°8

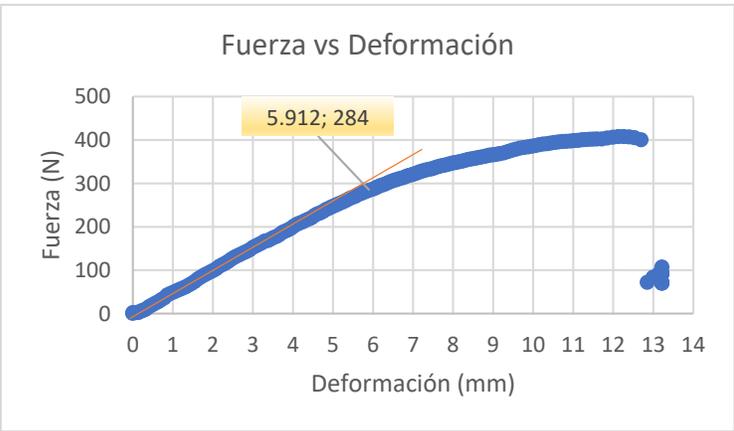
Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
8	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%
Ensayo a flexión		Resultado		
				

Figura 64

Ensayo a flexión probeta N°9

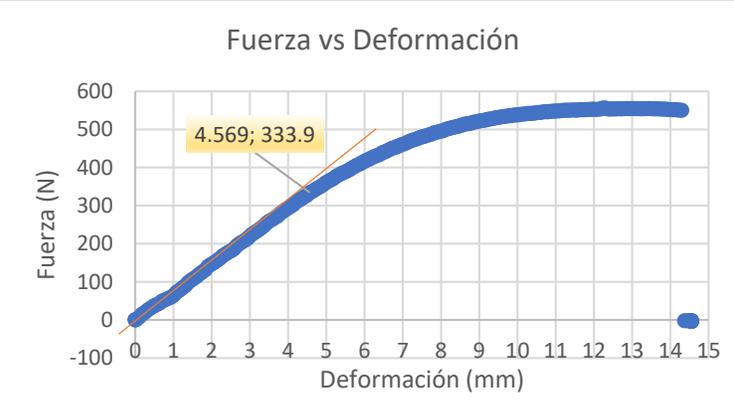
Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
9	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	60%
Ensayo a flexión		Resultado		
				

Figura 65

Ensayo a flexión probeta N°10

Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
10	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	70%
Ensayo a flexión		Resultado		
		<p>Fuerza vs Deformación</p> 		

Figura 66

Ensayo a flexión probeta N°11

Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad
11	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	60%
Ensayo a flexión		Resultado		
		<p>Fuerza vs Deformación</p> 		

Figura 67

Ensayo a flexión probeta N°12

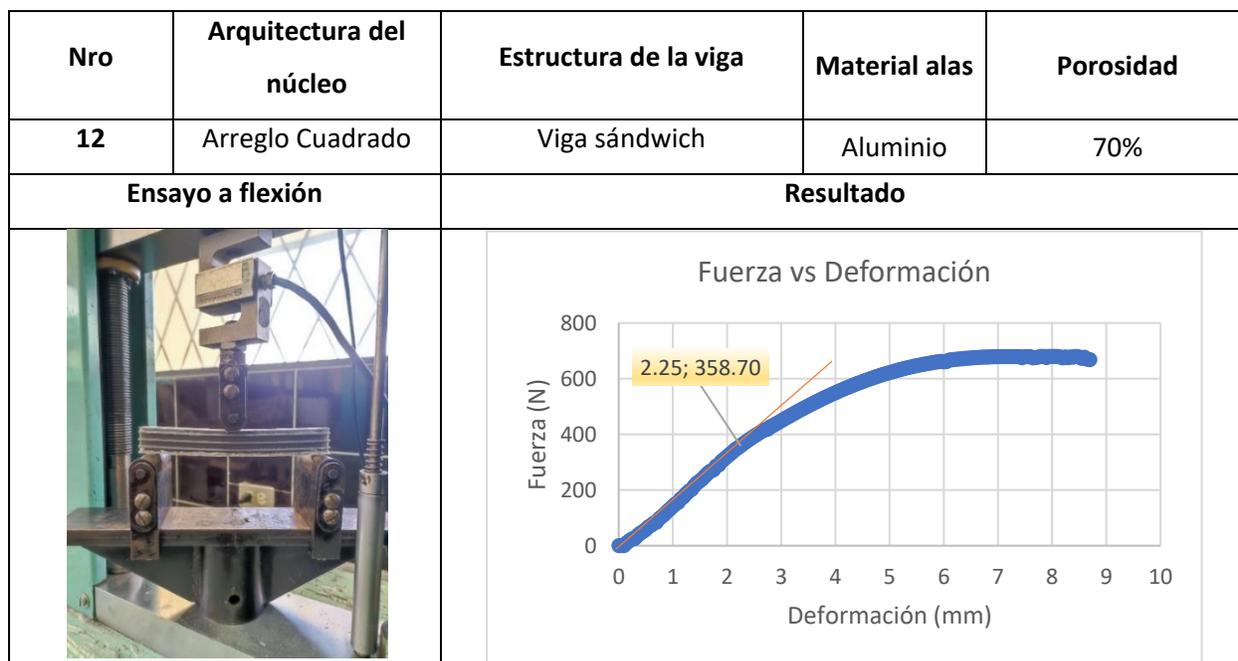


Figura 68

Ensayo a flexión probeta N°13

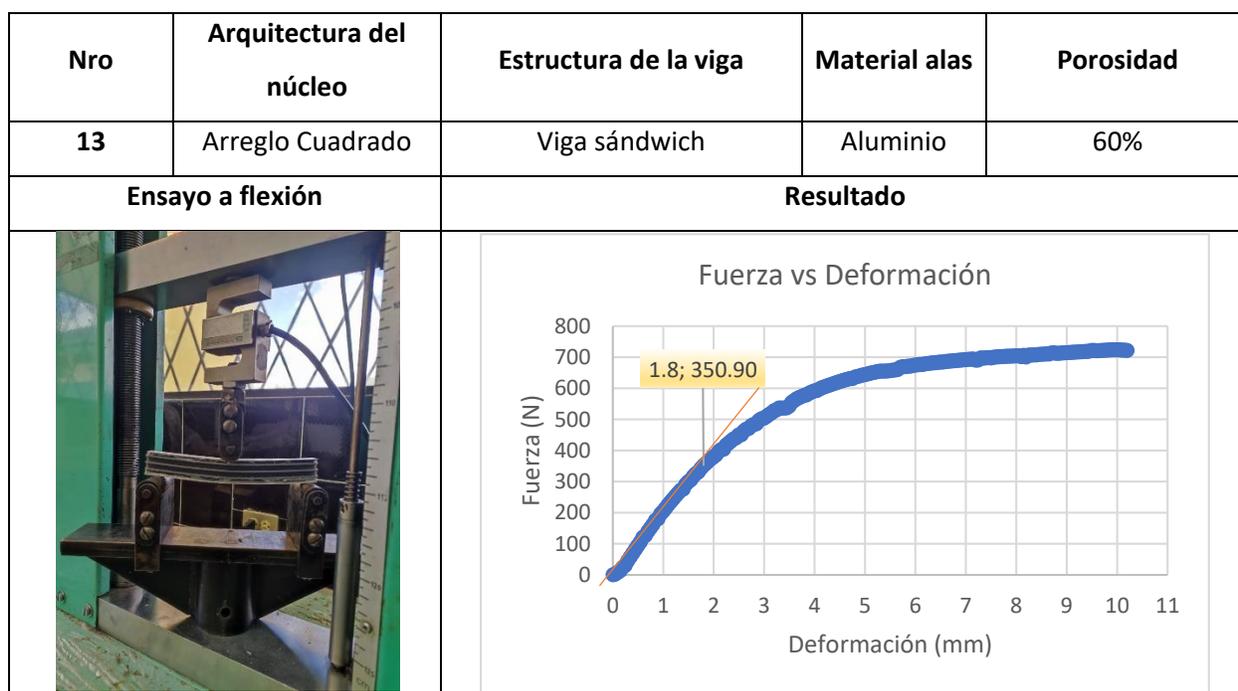


Figura 69

Ensayo a flexión probeta N°14

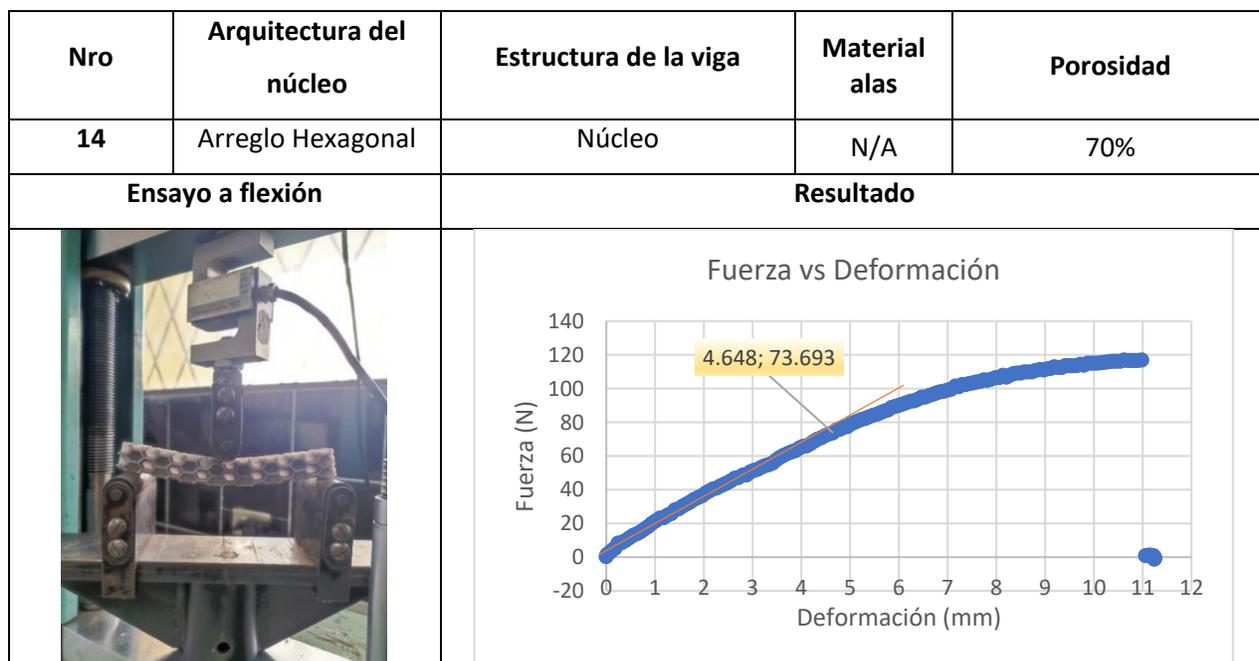


Figura 70

Ensayo a flexión probeta N°15

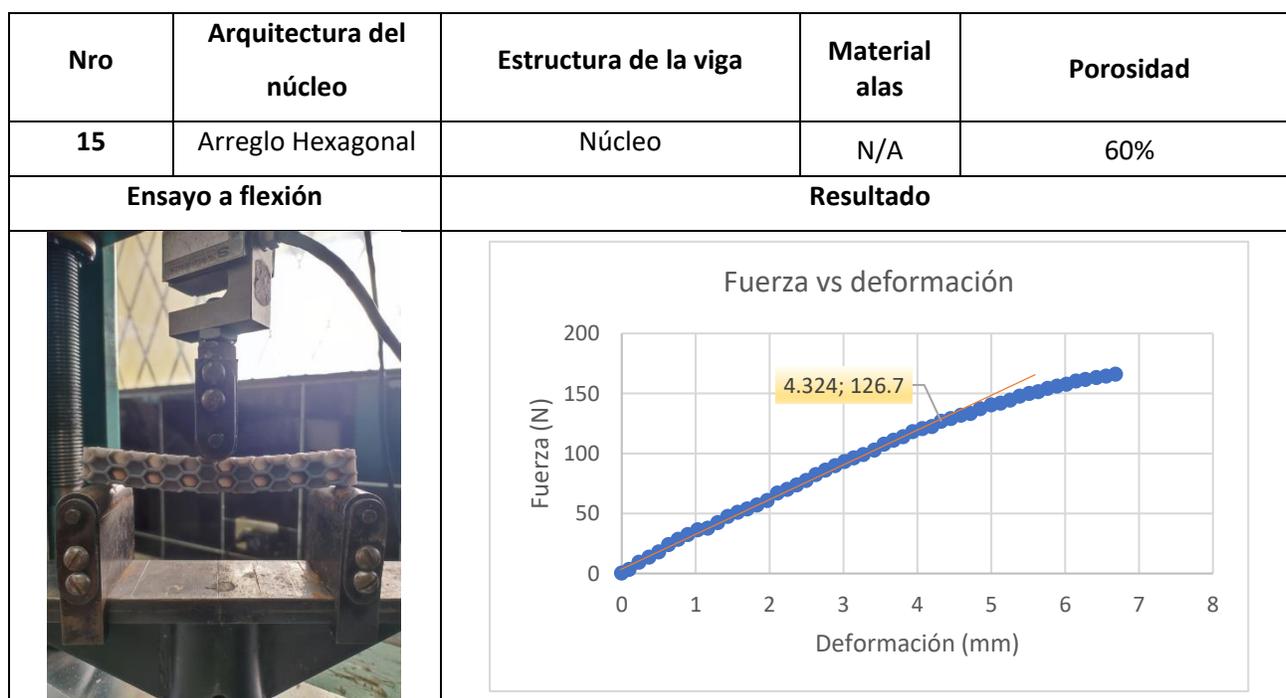


Figura 71

Ensayo a flexión probeta N°16

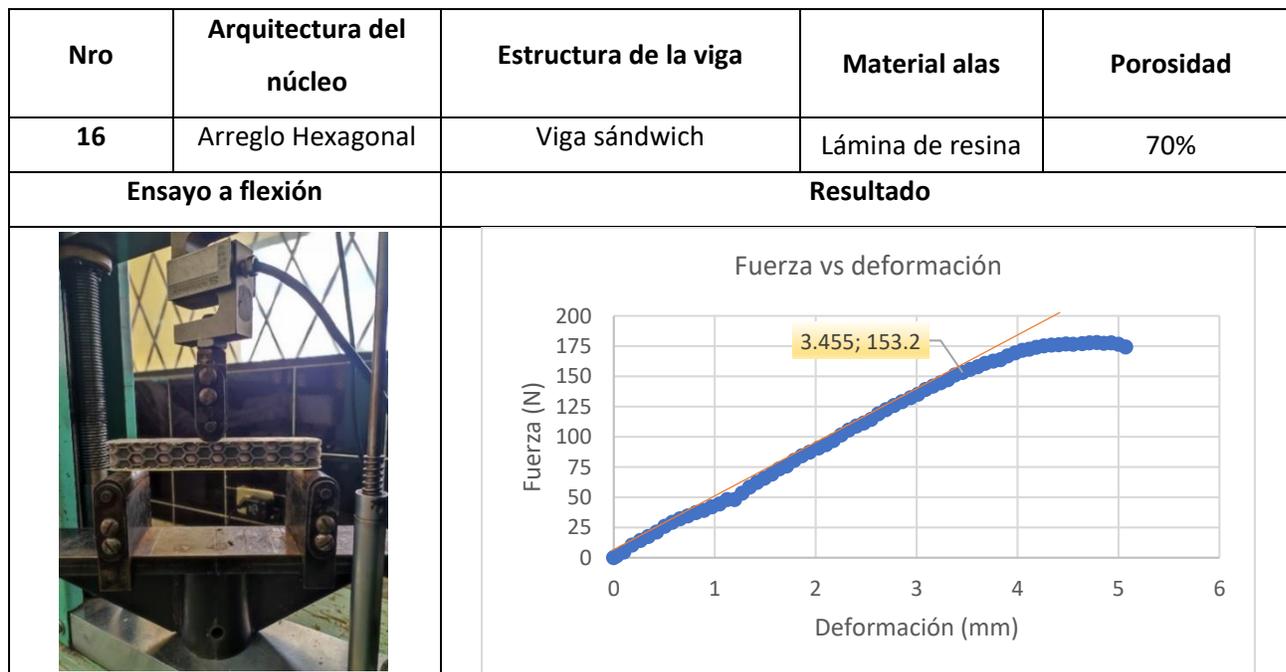


Figura 72

Ensayo a flexión probeta N°17

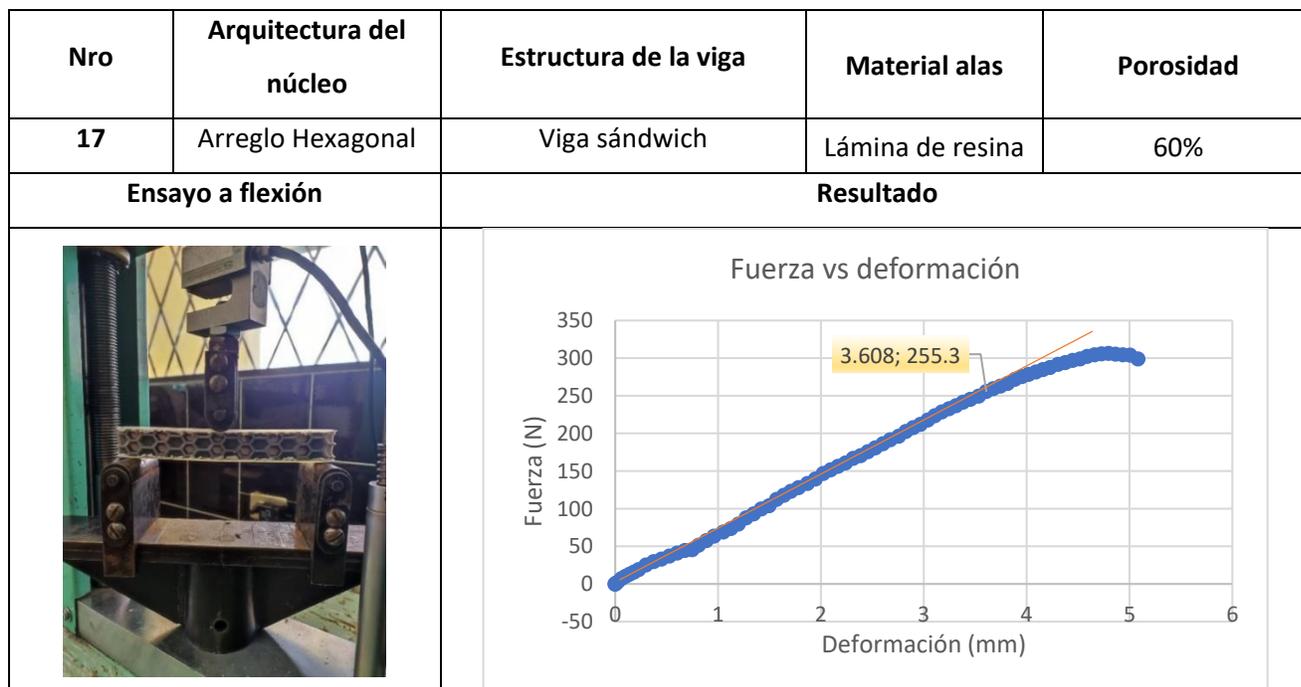


Figura 73

Ensayo a flexión probeta N°18

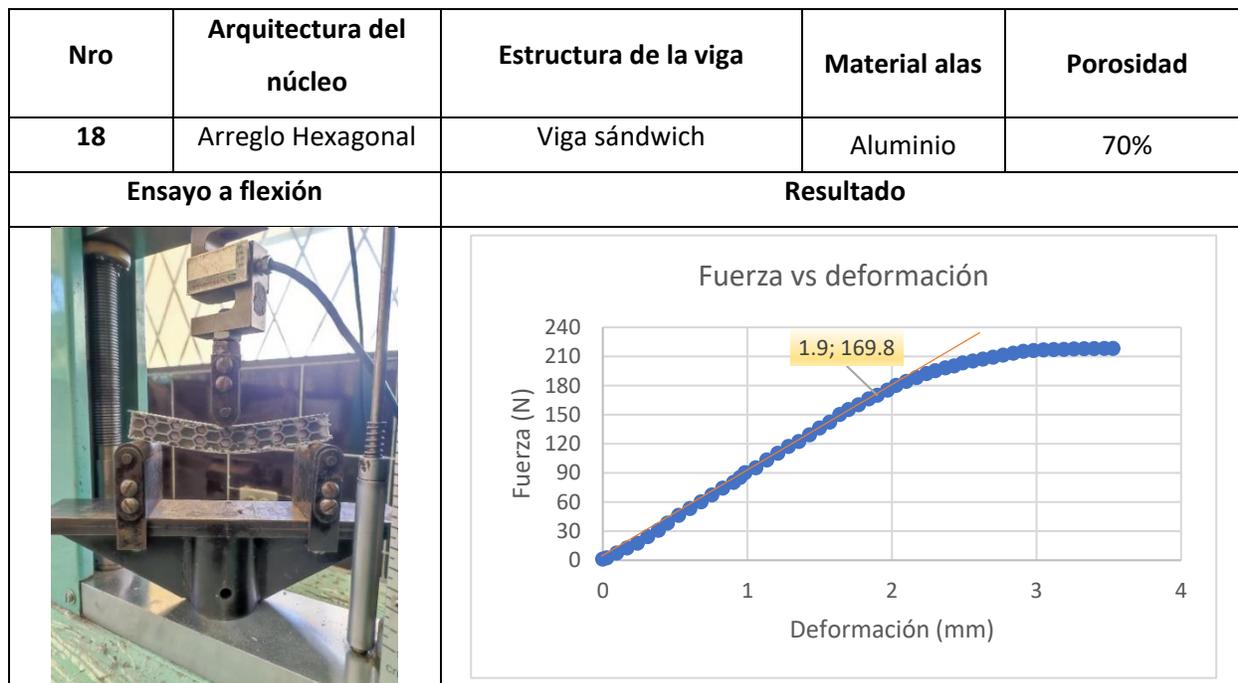
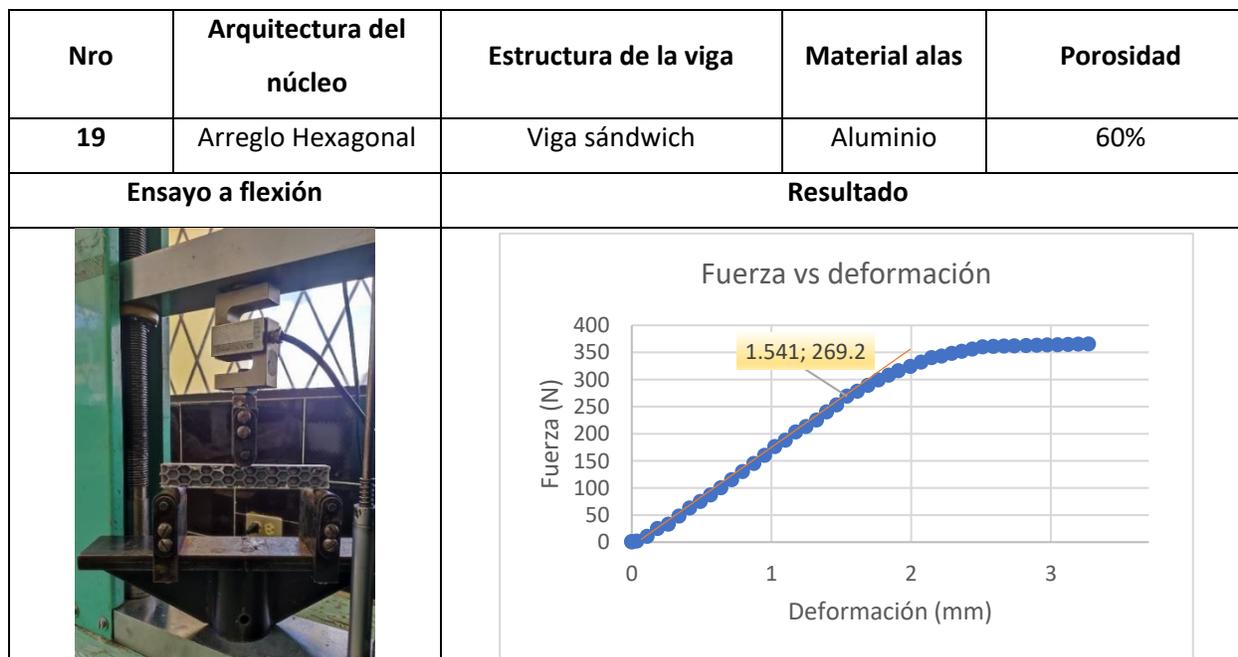


Figura 74

Ensayo a flexión probeta N°19



Resumen del resultado experimental del ensayo a flexión de las probetas.

A través de los ensayos a flexión realizados a cada probeta, en la siguiente figura se resumirá los resultados de cada uno de estos.

Figura 75

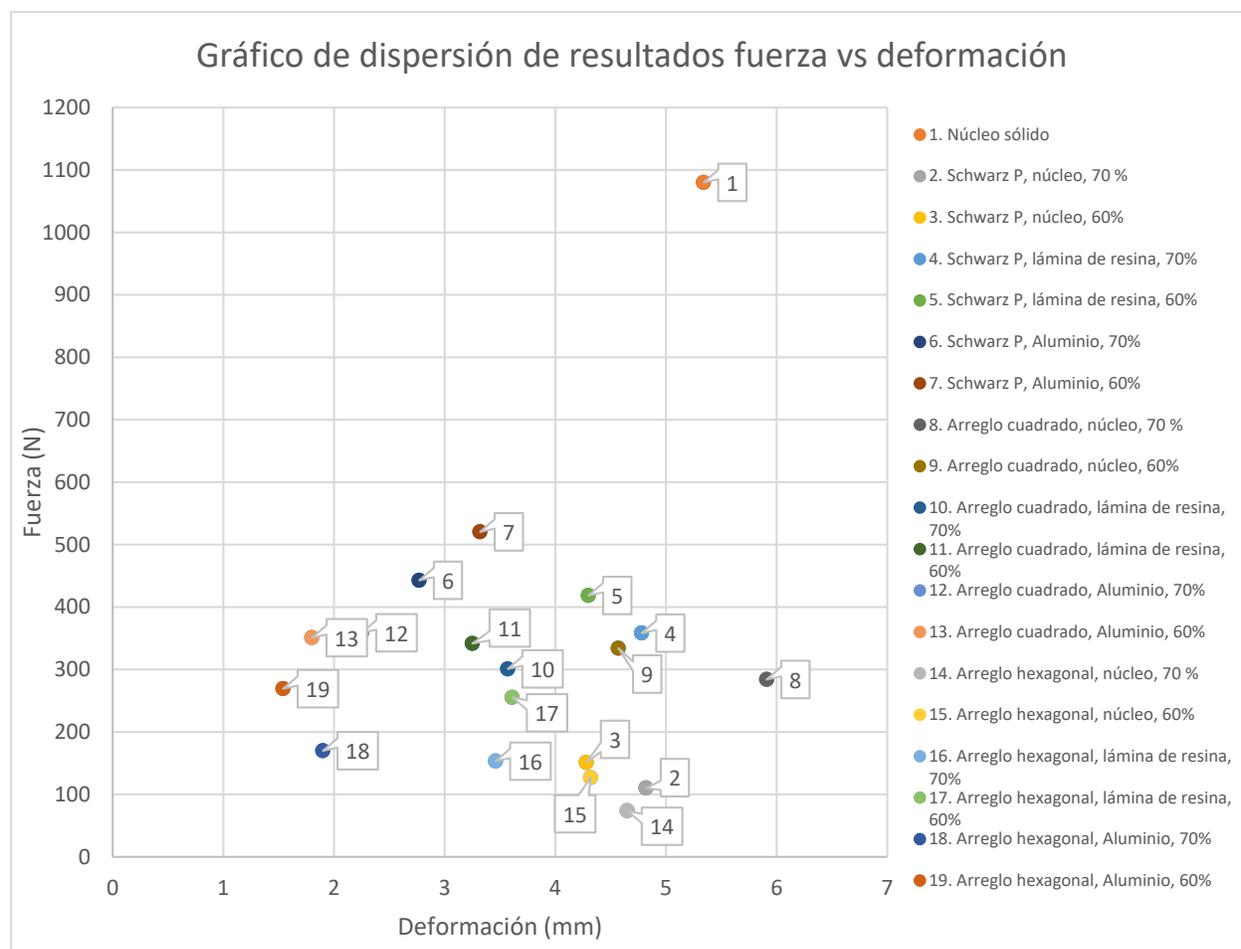
Resumen de resultados del ensayo a flexión en tres puntos.

Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material Alas/pieles	Porosidad %	Fuerza aplicada (N)	Desplazamiento experimental (mm)		
Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	1080	5.34		
			60%	110.3	4.82		
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	358.3	4.78		
			60%	150.9	4.28		
		Aluminio	70%	418.5	4.30		
			60%	442.79	2.77		
		Aluminio	70%	520.4	3.32		
			60%	442.79	2.77		
	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%	284	5.91	
				60%	333.9	4.57	
Viga sándwich		Lámina de resina	70%	300.9	3.57		
			60%	341.6	3.25		
		Aluminio	70%	358.7	2.25		
			60%	350.9	1.80		
		Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%	73.693	4.65
					60%	126.7	4.32
Viga sándwich	Lámina de resina		70%	153.2	3.46		
			60%	255.3	3.61		
	Aluminio		70%	169.8	1.90		
			60%	269.2	1.54		

Nota. Esta figura nos indica el resumen de resultados del ensayo a flexión en tres puntos, tomando como referencia la fuerza máxima en donde las probetas presentan un comportamiento elástico.

Figura 76

Gráfico de dispersión de resultados



Capítulo IV Propiedades elásticas efectivas del núcleo

Propiedades Efectivas del núcleo

Para determinar las propiedades mecánicas del material base utilizado para fabricar las estructuras sándwich, se caracterizan las propiedades a flexión de la primera probeta impresa (núcleo sólido). Las probetas a caracterizar se fabricaron en las mismas condiciones de diseño, impresión, limpieza y curado que todas las estructuras sándwich descritas anteriormente.

Figura 77

Ensayo a flexión probeta con núcleo sólido.



Nota. Viga de Resina "Standard Gray" sometida a flexión.

Al realizar el ensayo a flexión en la máquina de ensayos universales obtuvimos como resultado el siguiente diagrama:

Figura 78

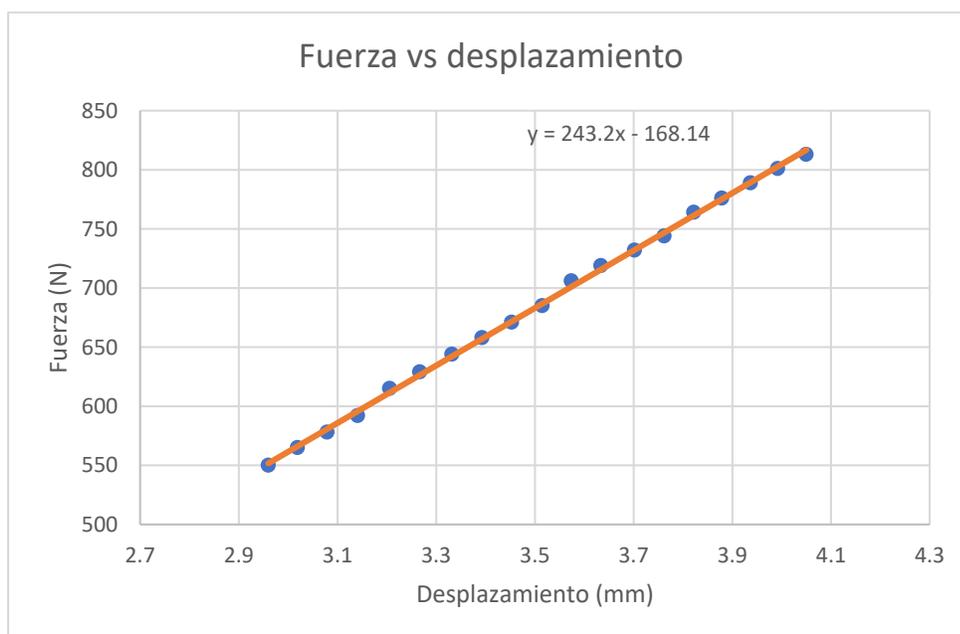
Diagrama desplazamiento vs fuerza probeta con núcleo sólido.



Tomando como referencia el anterior diagrama, calcularemos la pendiente de la región lineal:

Figura 79

Diagrama desplazamiento vs fuerza región lineal de la probeta con núcleo sólido.



Por lo tanto, se determina que la pendiente de esta recta es 243.20

Con relación a la ecuación número 4, se iguala $\frac{dP}{d\delta}$ con la pendiente m , siempre y cuando se permanezca dentro del límite elástico del material.

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{48EI}{L^3} = 243.20 \frac{N}{mm} \quad (6)$$

En esta ocasión solo nos queda despejar el módulo de elasticidad de la ecuación número 7.

$$E = \frac{243.20 * L^3}{48I} \quad (7)$$

La Inercia de la viga se calcular mediante la ecuación número 3, en base a la figura 23, en donde se tiene que la longitud de la viga es de 140 mm, la base es de 14 mm y la altura es de 18 mm, por lo tanto esto corresponde a los siguientes datos para el cálculo de la inercia: $b=14$ mm y $h=18$ mm.

$$I = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} * 14mm * (18mm)^3 = 6804 mm^4 \quad (8)$$

A continuación nos queda reemplazar los datos en la ecuación número 8 para obtener el módulo de elasticidad efectivo del material, teniendo en cuenta que la longitud entre apoyos es $L=126$ mm.

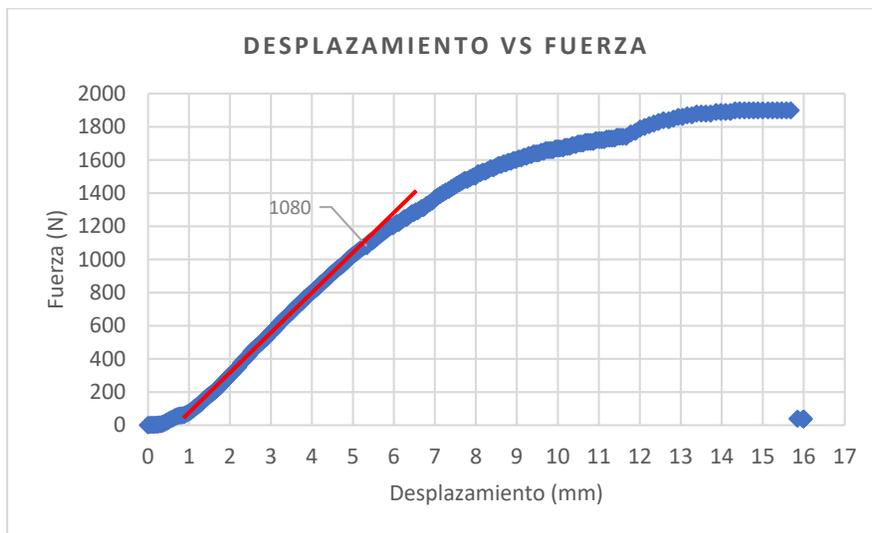
$$E = \frac{243.20 * L^3}{48I} = \frac{243.20 \frac{N}{mm} * (126mm)^3}{48 * 6804mm^4} = 1489.6 \frac{N}{mm^2} = 1489.6 Mpa \quad (9)$$

El resultado obtenido es coherente, basándonos en el rango del módulo de elasticidad que se ubica en la ficha técnica, la cual se observa en la figura 24, este módulo de flexión se encuentra en el rango de 1.25Gpa a 2.20Gpa.

A partir del diagrama desplazamiento vs fuerza de la probeta con núcleo sólido, identificamos de manera gráfica la última fuerza en la región elástica de la curva.

Figura 80

Fuerza última en la región lineal en el diagrama desplazamiento vs fuerza.



Para encontrar el límite de proporcionalidad, se debe de considerar la ecuación del momento

flector que es igual a:

$$M = \frac{F * L}{4} \quad (10)$$

En donde:

F Fuerza aplicada

L Longitud entre apoyos

Y la distancia desde el eje neutro hasta donde se determina el esfuerzo es igual a:

$$C = \frac{h}{2} \quad (11)$$

En donde

h Altura de la viga.

Reemplazando las ecuaciones 3, 11 y 12 en la ecuación 6 nos da como resultado la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} = \frac{\frac{FL}{4} * \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (12)$$

En base a la figura 54, con una longitud entre apoyos $L=126\text{mm}$, una base $b=14\text{mm}$, una altura $h=18\text{mm}$ y con la fuerza última en la región lineal de $F=1080\text{N}$ se tiene que el límite de proporcionalidad es igual a:

$$\sigma_p = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3 * 1080\text{N} * 126\text{mm}}{2 * 14\text{mm} * (18\text{mm})^2} = 45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 45\text{Mpa} \quad (13)$$

Análisis computacional

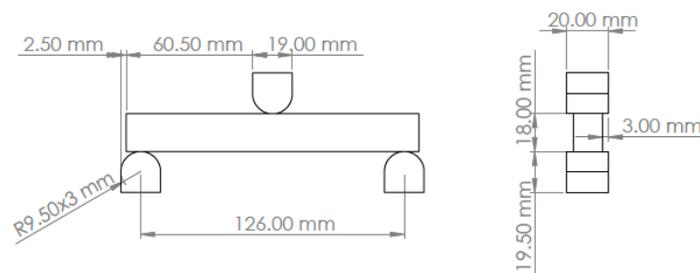
Diseño generativo de probetas en software CAD

Usaremos los núcleos determinados en la figura 34, 36 y 38, para la creación de las probetas digitales para su posterior análisis computacional. A continuación se indica el procedimiento de creación de vigas de núcleo de material celular a base de un diseño digital en software CAD.

Tomando como referencia el archivo “núcleo sólido” en formato “x_t” o “igs”, con ayuda de cualquier software CAD se procede a modificar este archivo y crear las bases y punzones con relación al plano descrito a continuación.

Figura 81

Plano de componentes para ensayo a flexión de tres puntos.

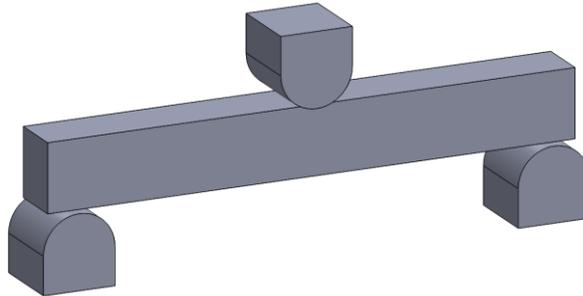


Nota. Para las vigas tipo sándwich, se deberá editar y/o añadir de forma correspondiente las láminas de $0.5 \times 14 \times 140\text{mm}$ (pieles) en la parte externa (superior e inferior) del núcleo celular en el software CAD.

El modelo tridimensional nos quedará como la siguiente figura, la cual la guardaremos en formato “x_t”.

Figura 82

Ensamble del diseño CAD para el ensayo a flexión de tres puntos.

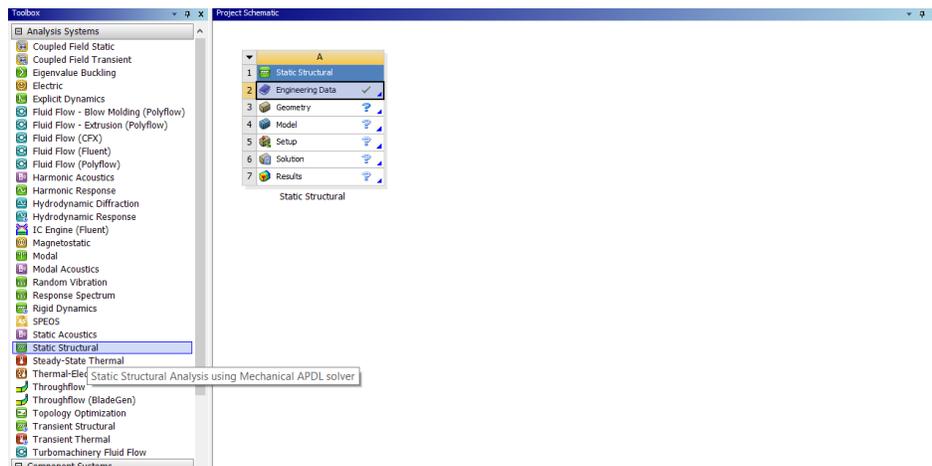


Nota. Esquema del ensamble realizado en software CAD, en base al plano de componentes para el ensayo a flexión en tres puntos de la figura 81.

En Ansys Workbench, realizaremos un análisis estructural estático.

Figura 83

Menú de opciones de “Static Structural” en Ansys Workbench

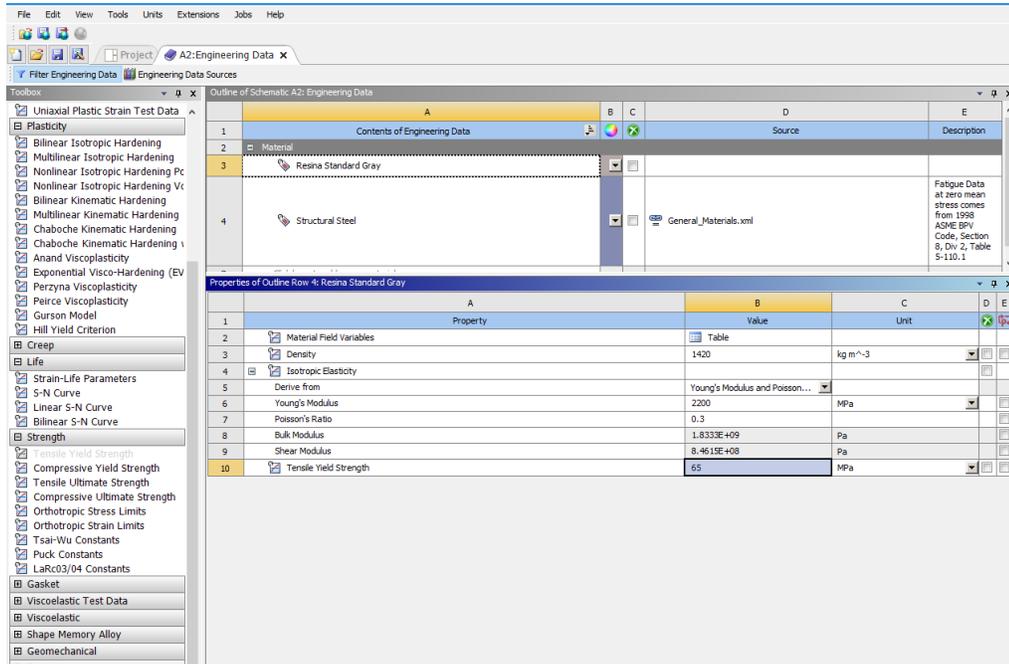


A continuación se debe pulsar en la opción “Engineering Data”, la cual abre una pestaña en la que podemos seleccionar los materiales a usar y/o agregar un nuevo material que no se encuentra en la librería, en este caso debemos de ingresar el material basado en la ficha técnica de la resina Estándar

Gray y/o high temp (figura 24 y 25). En “Linear Elastic” escoger la opción “Isotropic Elasticity” y agregar las propiedades mecánicas.

Figura 84

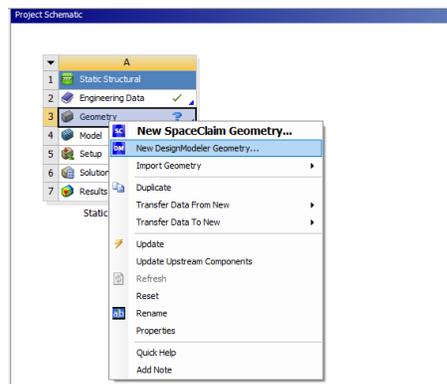
Ingreso de datos de las propiedades de los materiales a usar en Ansys Workbench



Cerrar la pestaña de datos de ingeniería y dar clic en “Geometry/New DesignModeler Geometry”.

Figura 85

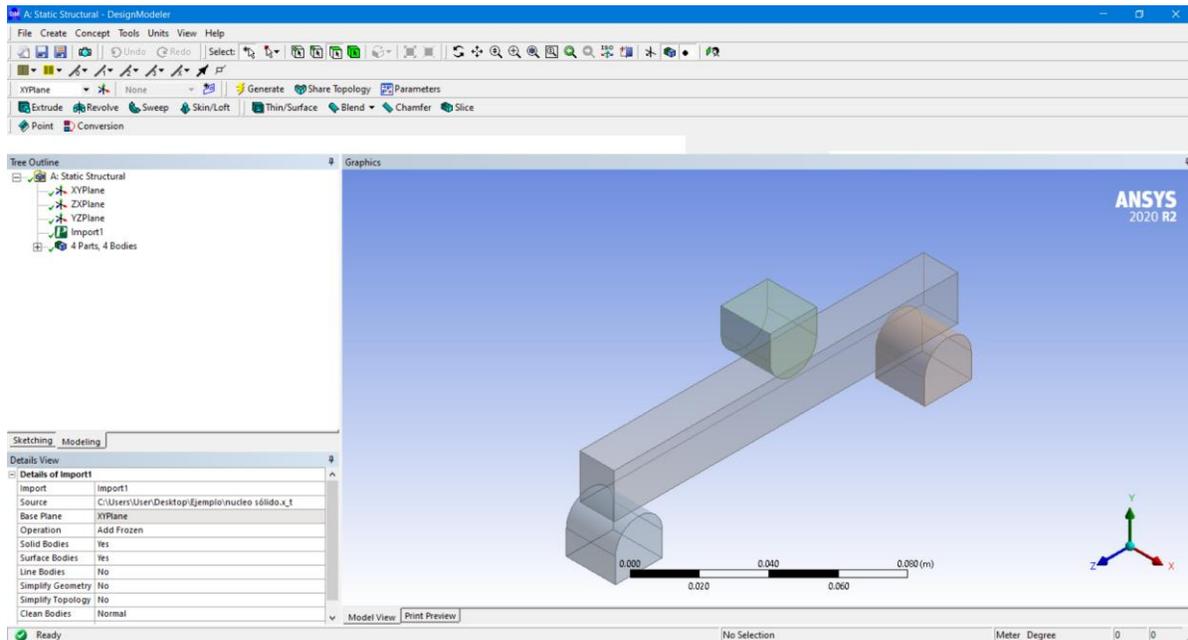
Menú de opciones de “Static Structural” en Ansys Workbench “Geometry”



Abrir el archivo “núcleo sólido.x_t” bajo la siguiente dirección “File/Import External Geometry file”, seleccionar el archivo indicado y dar clic en “Generate”.

Figura 86

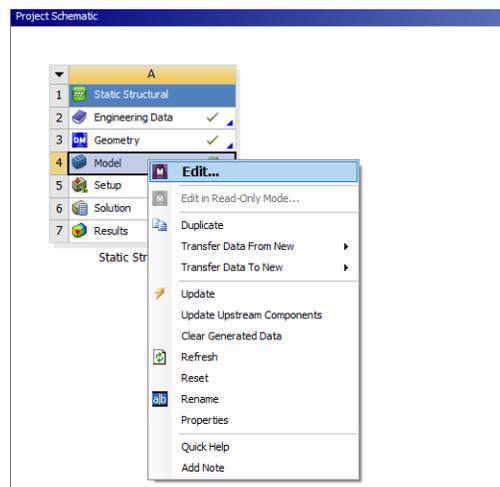
Opciones y diseño generado en la pantalla “New DesignModeler Geometry”



Cerrar la pestaña y en el menú inicial abrir la Opción “Model/Edit..”

Figura 87

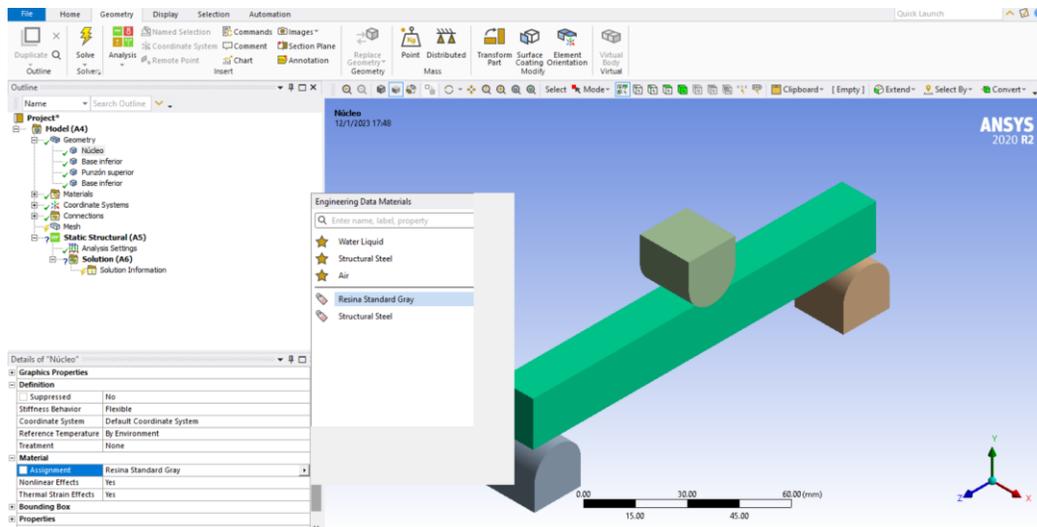
Menú de opciones de “Static Structural” en Ansys Workbench “Model”



A continuación en el árbol de menús en “Geometry”, se procede a asignar los materiales a cada elemento de nuestro ensamble, por lo tanto el núcleo corresponde al material de tipo “Resina Standard Gray”, en las bases y el punzón se mantendrá el acero estructural.

Figura 88

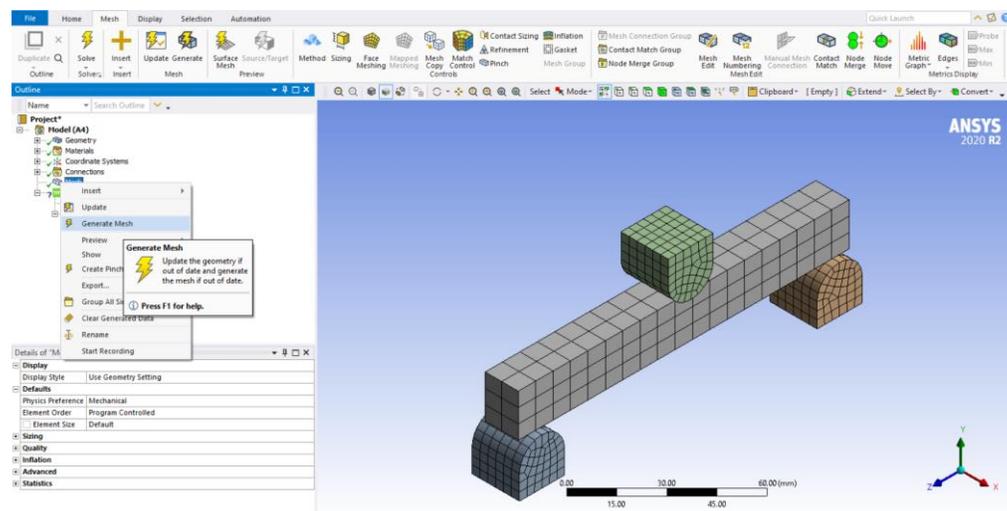
Asignación de materiales para los componentes mecánicos.



En la opción de malla “mesh” del árbol de menús, dar clic en la opción “Generate Mesh”, esto nos proporciona un mallado automático, con tamaños de elementos óptimos para nuestro diseño.

Figura 89

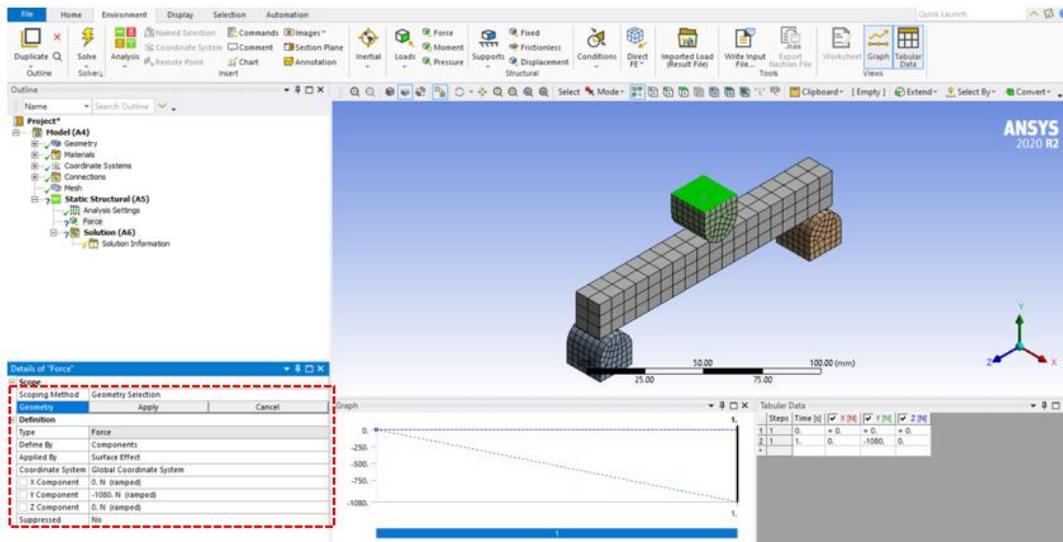
Mallado en Ansys Workbench



En el árbol de menús seleccionar “Static structural (A5)” y asignar las condiciones de soportes y fuerzas en las bases y punzón respectivamente. Para el punzón superior colocar una fuerza de 1080 N (Fuerza máxima en la región lineal) en la dirección correspondiente.

Figura 90

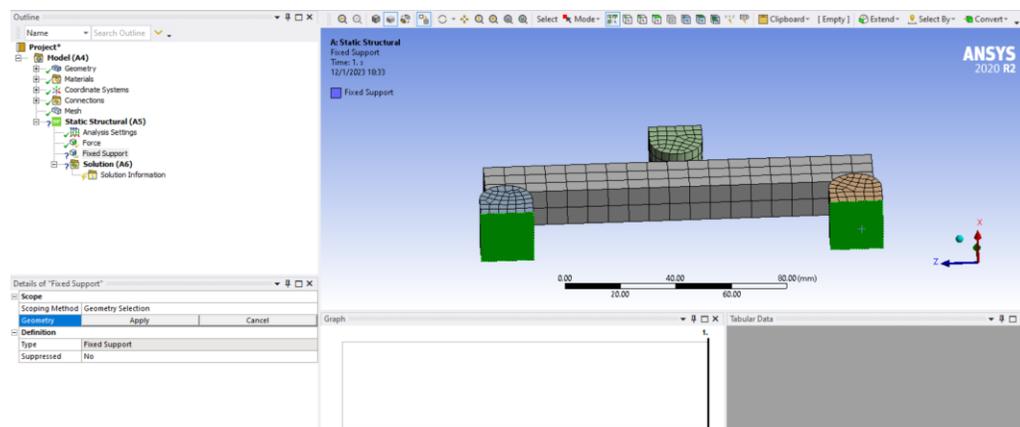
Aplicación de fuerzas en modelo mecánico



Y para las bases en donde se asienta la viga, colocar soportes fijos en la opción “Fixed Support”, y aplicar estos cambios.

Figura 91

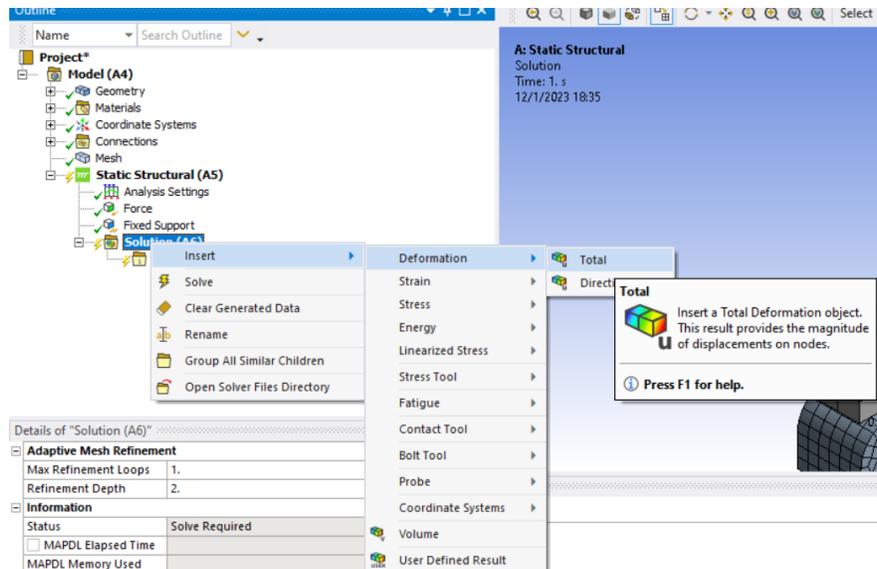
Aplicación de soportes fijos en modelo mecánico



En el árbol de menús, en la opción “Solution (A6)”, agregamos los resultados que necesitamos. Para nuestro caso necesitamos conocer los valores de la deformación total (Deformation/Total) y el esfuerzo de Von Mises (Stress/Equivalent Von Mises)

Figura 92

Resultados a determinar mediante análisis numérico del modelo mecánico



Finalmente, una vez que se tiene todas las condiciones necesarias y descritas anteriormente, se procede a realizar la simulación numérica, dando clic en “Solve”.

Figura 93

Resultados de la deformación de viga en simulación de ensayo a flexión

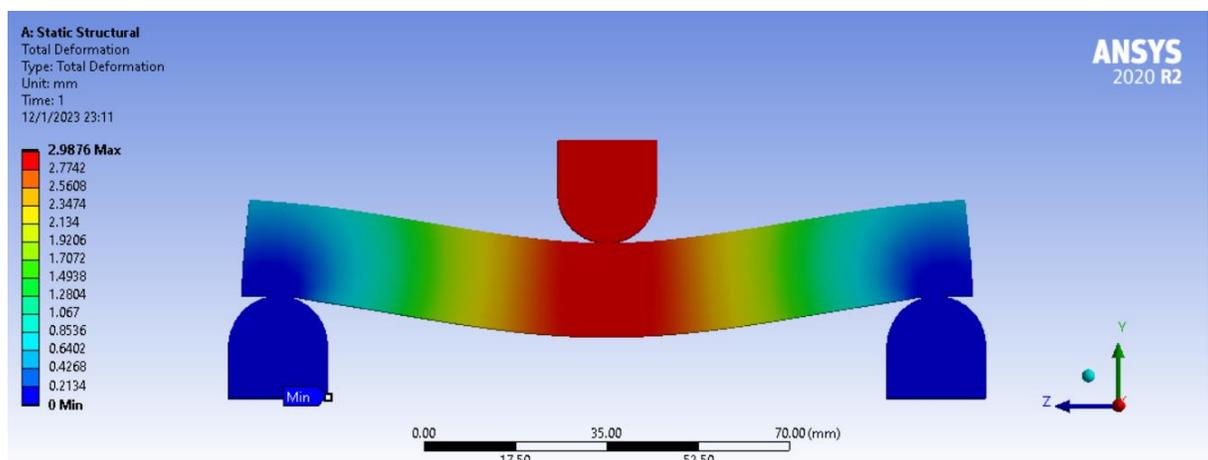


Figura 94

Resultados de la esfuerzo de Von Mises en simulación de ensayo a flexión

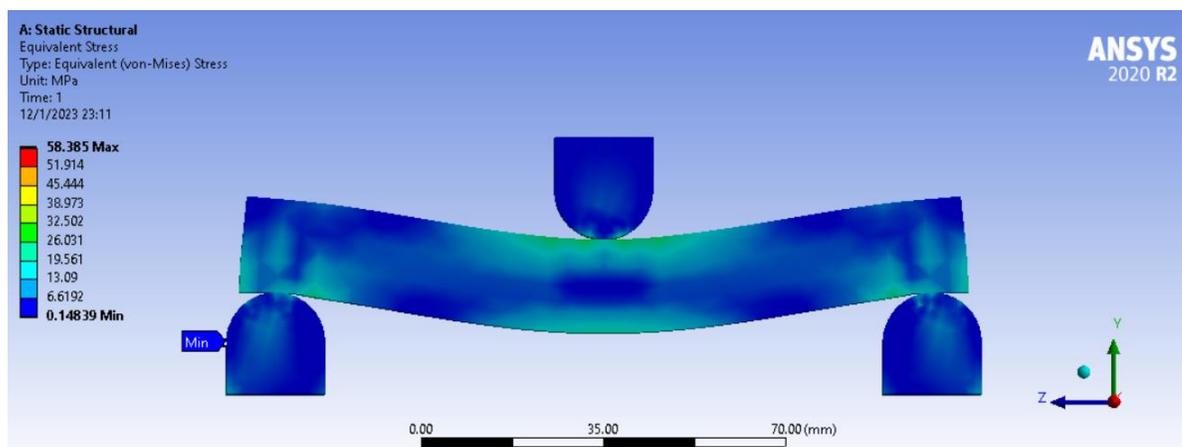


Tabla 4

Resumen de resultados de la simulación numérica del ensayo a flexión en viga de núcleo sólido.

Carga aplicada	Desplazamiento máximo	Esfuerzo máximo
1080 N	2.9876 mm	58.385 MPa

Estudio de independencia de malla.

En el análisis de elementos finitos, la convergencia significa llegar a la verdadera solución de las ecuaciones diferenciales parciales a medida que la geometría, o el dominio espacial, se mallan más finamente. El proceso de convergencia de malla implica disminuir el tamaño del elemento y analizar el impacto de este proceso en la precisión de la solución.

Por lo general, cuanto menor sea el tamaño de la malla, más precisa será la solución, ya que el comportamiento del diseño o producto se muestrea mejor en todo su dominio físico. Cuando mayor sea la precisión, más grandes pueden llegar a ser las simulaciones en términos de datos para almacenar y manejar, lo que se traduce en tiempos de ejecución más prolongados.

A partir de la malla creada por default, las siguientes iteraciones se realizarán disminuyendo el tamaño de los elementos y así poder determinar una solución más precisa.

A continuación, se determinará un estudio de mallado, teniendo en cuenta que el tipo de elementos en la malla son hexaedros. Se irá modificando el tamaño de elementos, así el número de estos aumentará y podremos observar una convergencia en los resultados.

Tabla 5

Tamaño de elementos y esfuerzo de Von Mises

Tamaño de elementos	Número de elementos	Esfuerzo de Von Mises (Mpa)
7.82 (default)	752	58.358
7	834	57.631
6	930	57.143
5	1050	57.019
4	1414	56.992
3	2124	56.895

Calidad de la malla

A continuación, se indica la calidad de malla para los resultados obtenidos en el estudio, en donde el promedio de la calidad de los elementos en la malla, cuando el tamaño de los elementos es de 3 mm, este es de 0.98095.

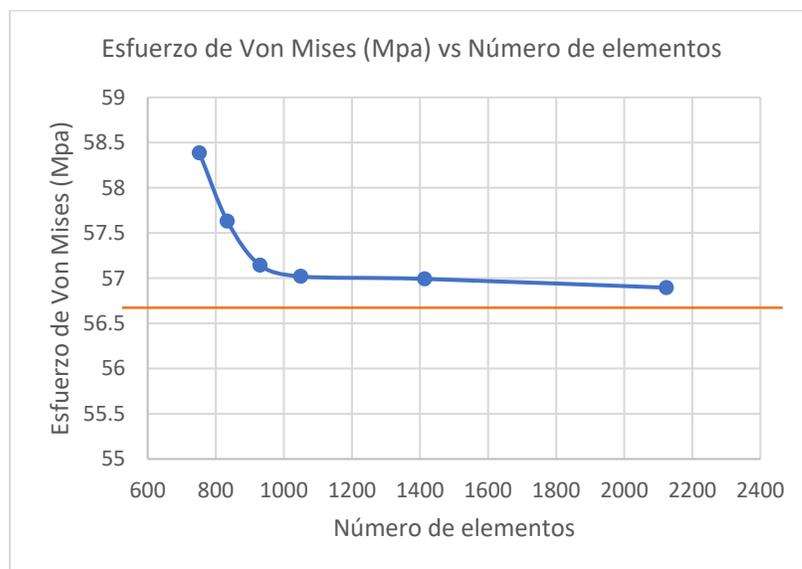
Figura 95

Calidad de malla

Tamaño Elementos	7.82 mm	3 mm
Element Quality	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Quality</p> <p>Check Mesh Quality No</p> <p><input type="checkbox"/> Target Quality Default (0.050000)</p> <p>Smoothing Medium</p> <p>Mesh Metric Element Quality</p> <p><input type="checkbox"/> Min 0.72927</p> <p><input type="checkbox"/> Max 0.99844</p> <p><input type="checkbox"/> Average 0.94816</p> <p><input type="checkbox"/> Standard Deviation 5.2496e-002</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Quality</p> <p>Check Mesh Quality No</p> <p><input type="checkbox"/> Target Quality Default (0.050000)</p> <p>Smoothing Medium</p> <p>Mesh Metric Element Quality</p> <p><input type="checkbox"/> Min 0.72927</p> <p><input type="checkbox"/> Max 0.99844</p> <p><input type="checkbox"/> Average 0.98095</p> <p><input type="checkbox"/> Standard Deviation 3.8927e-002</p> </div>
Skewness	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Quality</p> <p>Check Mesh Quality No</p> <p><input type="checkbox"/> Target Quality Default (0.050000)</p> <p>Smoothing Medium</p> <p>Mesh Metric Skewness</p> <p><input type="checkbox"/> Min 1.3058e-010</p> <p><input type="checkbox"/> Max 0.49193</p> <p><input type="checkbox"/> Average 0.15543</p> <p><input type="checkbox"/> Standard Deviation 0.11914</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Quality</p> <p>Check Mesh Quality No</p> <p><input type="checkbox"/> Target Quality Default (0.050000)</p> <p>Smoothing Medium</p> <p>Mesh Metric Skewness</p> <p><input type="checkbox"/> Min 1.3057e-010</p> <p><input type="checkbox"/> Max 0.49193</p> <p><input type="checkbox"/> Average 5.6349e-002</p> <p><input type="checkbox"/> Standard Deviation 0.10357</p> </div>

Figura 96

Estudio de independencia de malla.



En la figura anterior, se puede observar que mientras mayor es el número de elementos hexaédricos en la malla, estos van convergiendo, obteniendo así los siguientes resultados.

Tabla 6

Convergencia de malla

Carga aplicada	Desplazamiento máximo	Esfuerzo máximo
1080 N	2.9512 mm	56.895 MPa

Determinación analítica del desplazamiento máximo para viga de núcleo sólido

El desplazamiento máximo para la viga de núcleo sólido se puede determinar mediante la ecuación número 2, teniendo en cuenta los siguientes datos:

$$P = 1080 \text{ N}$$

$$L = 126 \text{ mm}$$

$$E = 2200 \text{ Mpa}$$

$$I = 6804 \text{ mm}^4$$

$$\delta = \frac{P L^3}{48 E I} = \frac{1080 \text{ N} * (126\text{mm})^3}{48 * 2200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 6804 \text{ mm}^4} = 3.0068 \text{ mm} \quad (14)$$

Se observa que el valor del desplazamiento máximo del resultado de la simulación numérica y el resultado de deflexión máxima de forma analítica son muy cercanos con un error relativo de:

$$e_r = \frac{|Desplazamiento analítico - Desplazamiento simulación|}{Desplazamiento analítico} * 100\% \quad (15)$$

$$e_r = \frac{|3.0068 - 2.9512|}{3.0068} * 100\% = 1.85\%$$

Comparativa de resultados.

En base a la figura 80, mediante el ensayo a flexión y con relación al resultado obtenido en la determinación del desplazamiento máximo de manera analítica se tiene los siguientes resultados:

Tabla 7

Comparación de resultados del desplazamiento analítico y del experimental.

Carga aplicada	Desplazamiento máximo experimental (E=1489 MPa efectivo)	Desplazamiento máximo analítico (E=2200 Mpa)
1080 N	5.288 mm	3.0068 mm

Debido a que existe gran diferencia entre el desplazamiento obtenido de manera experimental y el obtenido de manera analítica, esto nos ayuda a concluir que para la reducción de errores en la comparación de resultados en el desplazamiento de cada probeta de la experimentación, en la simulación se deberá usar las propiedades mecánicas efectivas del núcleo que fueron determinadas mediante la figura 79 y se resume en la tabla 8.

Tabla 8

Propiedades efectivas del núcleo.

Módulo de elasticidad efectiva	Límite de proporcionalidad
1489.6 Mpa	45 Mpa

Resultados de la simulación numérica

Siguiendo el procedimiento del diseño generativo para ensayo a flexión de vigas en software CAD mediante las propiedades mecánicas efectivas del núcleo como indica la tabla 8, se ha determinado los siguientes resultados:

Figura 97

Resumen de resultados de análisis numérico en base al diseño experimental.

Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material Alas	Porosidad (%)	Fuerza aplicada (N)	Desplaz. simulación (mm)	Esfuerzo Von-Mises (Mpa)
Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A	1080	5.38	60.57
Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	110.3	4.75	54.04
			60%	150.9	4.50	52.00
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	358.3	4.86	48.70
			60%	418.5	4.73	48.92
		Aluminio	70%	442.79	3.10	101.52
			60%	520.4	2.94	92.62
Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%	284	6.08	38.32
			60%	333.9	4.88	36.73
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	300.9	4.01	44.10
			60%	341.6	3.48	46.81
		Aluminio	70%	358.7	2.12	68.13
			60%	350.9	1.51	58.52
Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%	73.693	4.30	32.78
			60%	126.7	4.05	35.19
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	153.2	3.40	31.87
			60%	255.3	3.95	50.76
		Aluminio	70%	169.8	2.17	57.09
			60%	269.2	1.58	62.54

Capítulo V Análisis de resultados

En este capítulo se comparará los resultados obtenidos mediante los ensayos a flexión realizados de manera experimental y por simulación, y se hará un análisis del comportamiento de cada topología celular, por lo cual a continuación resumiremos los datos obtenidos en esta investigación:

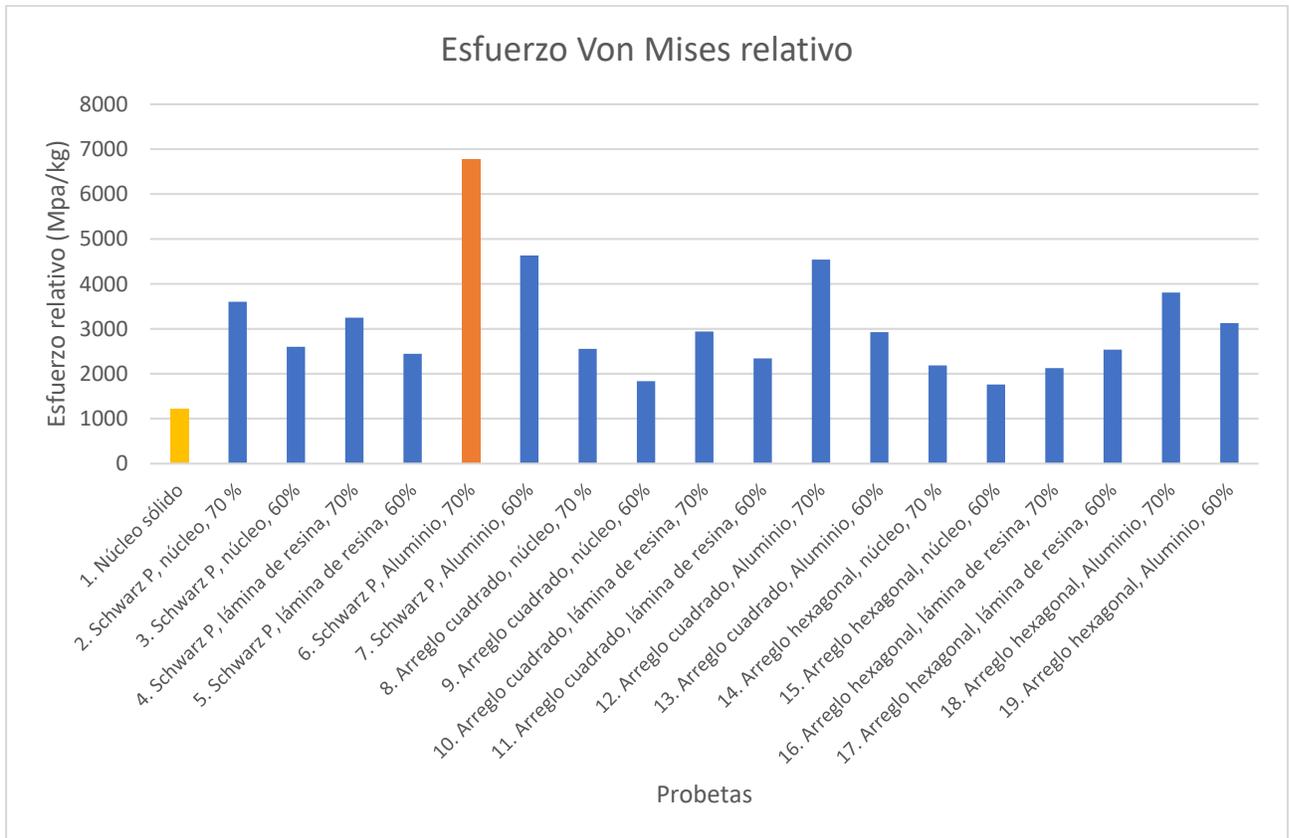
Figura 98

Resumen de resultados de ensayos a flexión: experimental y por simulación.

Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas o pieles	Porosidad	Masa	Fuerza aplicada	Desplazamiento Solución numérica	Esfuerzo Von-Mises	Esfuerzo Von-Mises relativo
			(%)	(kg)	(N)	(mm)	(Mpa)	(Mpa/kg)
Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A	0.05	1080	5.38	60.57	1211.40
Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	0.015	110.3	4.75	54.04	3602.67
			60%	0.02	150.9	4.5	52	2600.00
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	0.015	358.3	4.86	48.7	3246.67
			60%	0.02	418.5	4.73	48.92	2446.00
		Aluminio	70%	0.015	442.79	3.1	101.52	6768.00
			60%	0.02	520.4	2.94	92.62	4631.00
Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%	0.015	284	6.08	38.32	2554.67
			60%	0.02	333.9	4.88	36.73	1836.50
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	0.015	300.9	4.01	44.1	2940.00
			60%	0.02	341.6	3.48	46.81	2340.50
		Aluminio	70%	0.015	358.7	2.12	68.13	4542.00
			60%	0.02	350.9	1.51	58.52	2926.00
Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%	0.015	73.693	4.3	32.78	2185.33
			60%	0.02	126.7	4.05	35.19	1759.50
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	0.015	153.2	3.4	31.87	2124.67
			60%	0.02	255.3	3.95	50.76	2538.00
		Aluminio	70%	0.015	169.8	2.17	57.09	3806.00
			60%	0.02	269.2	1.58	62.54	3127.00

Figura 99

Gráfica de esfuerzo relativo para cada probeta



La probeta que mayor esfuerzo relativo posee es la de tipología Schwarz P, con láminas externas de aluminio y con porosidad de su núcleo al 70% (probeta 6). Mientras que la que menor esfuerzo relativo de Von Mises presentó, es la probeta de núcleo sólido.

Análisis de errores

En base al resumen de resultados, se puede determinar el error en su desplazamiento máximo mediante la solución numérica y la experimental, en donde se tiene los siguientes resultados para cada probeta:

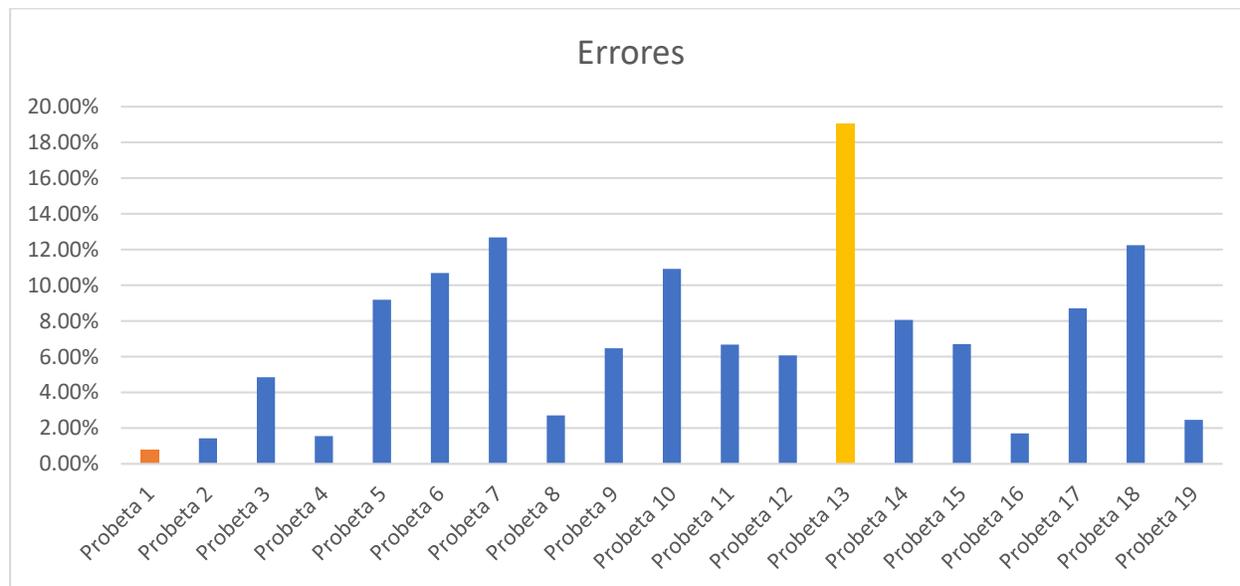
Figura 100

Determinación de error relativo de resultados experimentales y por simulación.

N°	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad (%)	Fuerza aplicada (N)	Desplazamiento experimental (mm)	Desplazamiento o Solución numérica (mm)	Error relativo (%)
1	Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A	1080	5.34	5.38	0.77%
2	Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	110.3	4.82	4.75	1.42%
3	Schwarz P	Núcleo	N/A	60%	150.9	4.28	4.50	4.85%
4	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	358.3	4.78	4.86	1.55%
5	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	60%	418.5	4.30	4.73	9.19%
6	Schwarz P	Viga sándwich	Aluminio	70%	442.79	2.77	3.10	10.68%
7	Schwarz P	Viga sándwich	Aluminio	60%	520.4	3.32	2.94	12.68%
8	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%	284	5.91	6.08	2.71%
9	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	60%	333.9	4.57	4.88	6.46%
10	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	300.9	3.57	4.01	10.91%
11	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	60%	341.6	3.25	3.48	6.67%
12	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Aluminio	70%	358.7	2.25	2.12	6.07%
13	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Aluminio	60%	350.9	1.80	1.51	19.03%
14	Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%	73.693	4.65	4.30	8.06%
15	Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	60%	126.7	4.32	4.05	6.70%
16	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	153.2	3.46	3.40	1.70%
17	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Lámina de resina	60%	255.3	3.61	3.95	8.70%
18	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Aluminio	70%	169.8	1.90	2.17	12.24%
19	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Aluminio	60%	269.2	1.54	1.58	2.46%

Figura 101

Gráfica de Errores para cada estructura celular



Mediante la figura 101, se observa que el menor error relativo entre el desplazamiento experimental y el desplazamiento obtenido en la simulación numérica es la probeta número 1 que corresponde al “núcleo sólido” con un $e_r = 0.77\%$. Mientras que el máximo error conseguido pertenece a la probeta número 13, que pertenece a la estructura de tipo “arreglo cuadrado” al 60% de porosidad en donde sus capas externas o pieles son de aluminio con un $e_r = 19.03\%$.

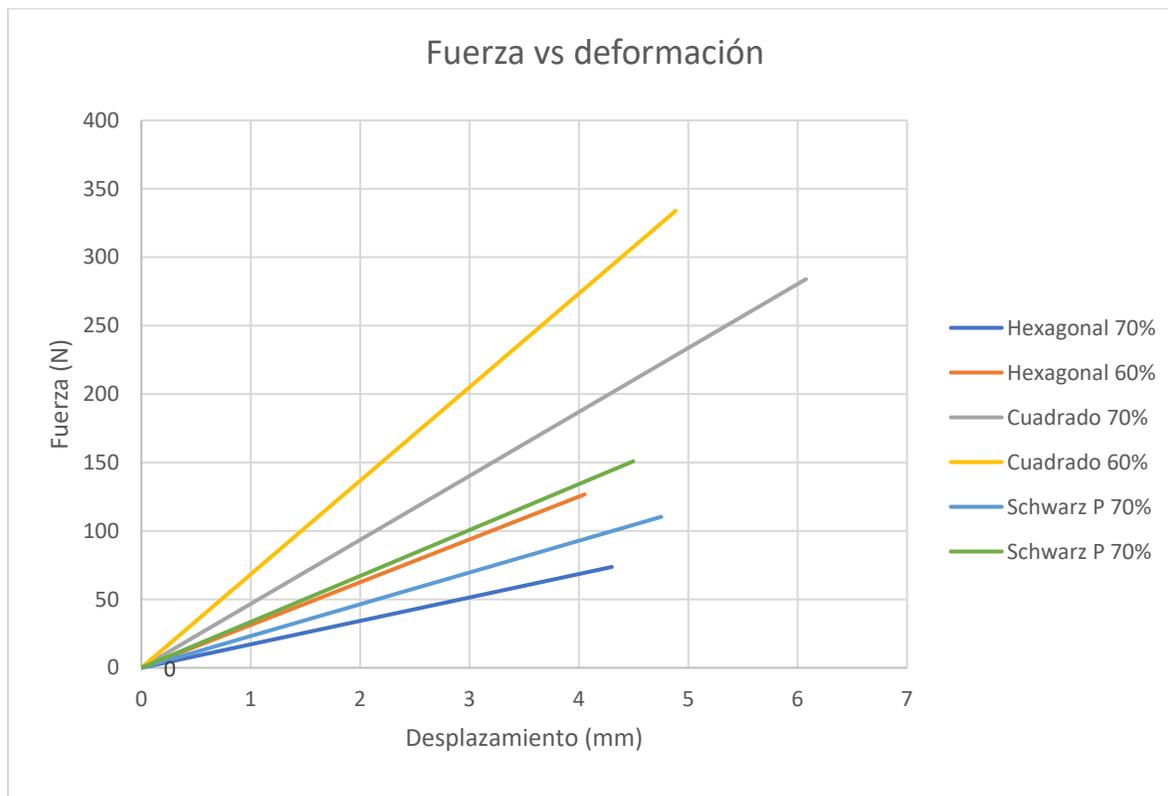
Para los otros resultados, los errores relativos de sus desplazamientos (experimental y simulación) la mayor parte de estos son inferiores al 10%, los cuales se encuentran en un rango de aceptación.

Correlación de gráficas

La figura siguiente, presenta las curvas de simulación de carga vs desplazamiento de las diferentes estructuras “arreglo cuadrado”, “arreglo hexagonal” y “Schwarz P” con porosidades del 60% y 70% respectivamente. Se observa un efecto notable en la topología del núcleo celular en las curvas de carga vs desplazamiento al momento de realizar ensayo a flexión en tres puntos.

Figura 102

Comparación de Núcleos celulares.



Como se aprecia en la gráfica anterior, esta nos indica que la probeta que alcanza una mayor fuerza en su rango elástico, es la de tipo "arreglo cuadrado" con una porosidad del 60%, seguida de la probeta del mismo tipo pero con porosidad del 70%, las cuales están muy por encima de las otras probetas con núcleos de tipo "arreglo hexagonal" y "Schwarz p" con sus respectivas porosidades.

Mediante los resultados obtenidos en cada probeta, a continuación se hará una correlación de las gráficas de cada estructura en base a la porosidad para observar el comportamiento que se presenta según las variaciones en cada factor.

Figura 103

Correlación de gráficas para la estructura Schwarz P

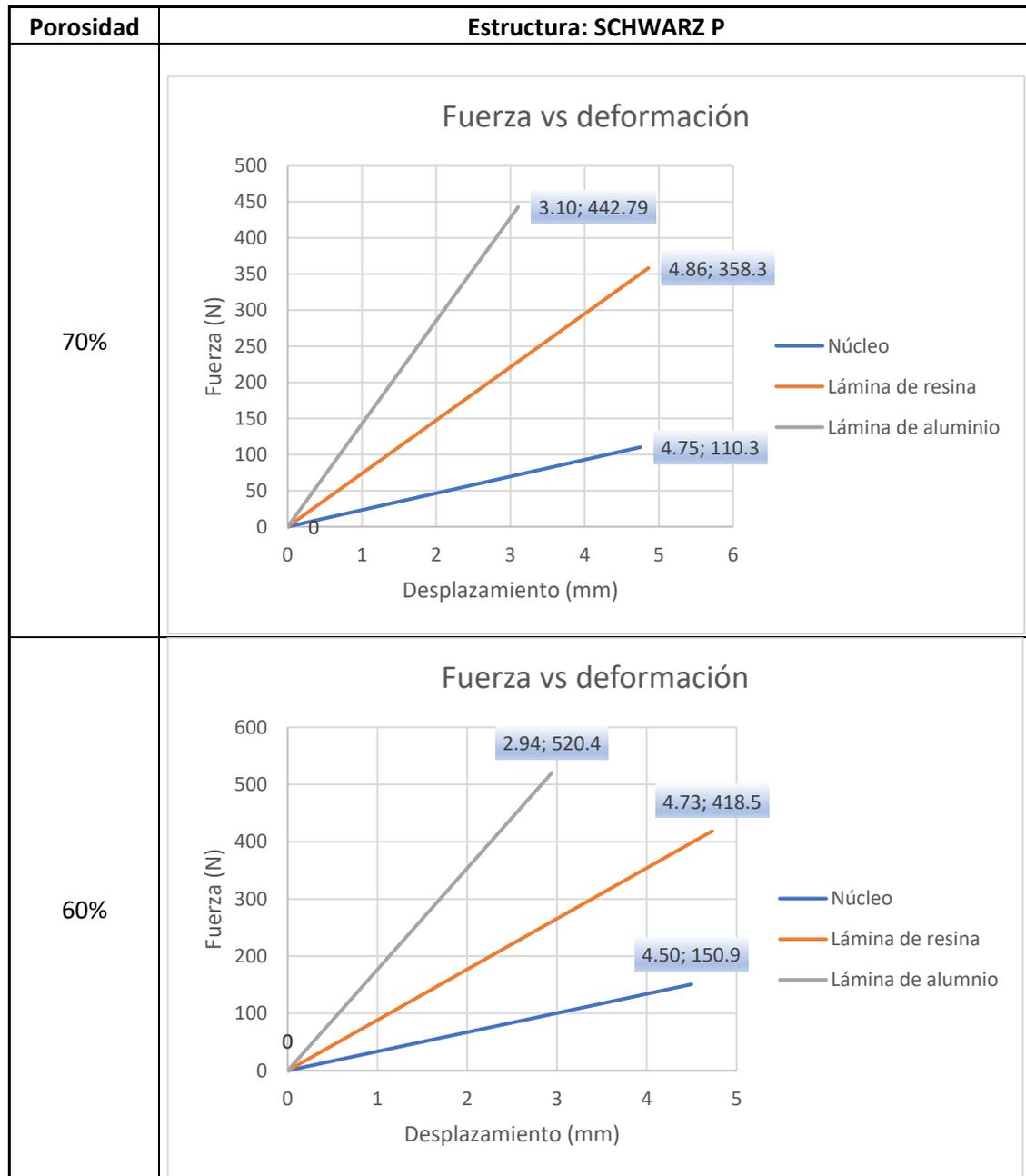


Figura 104

Correlación de gráficas para la estructura arreglo cuadrado

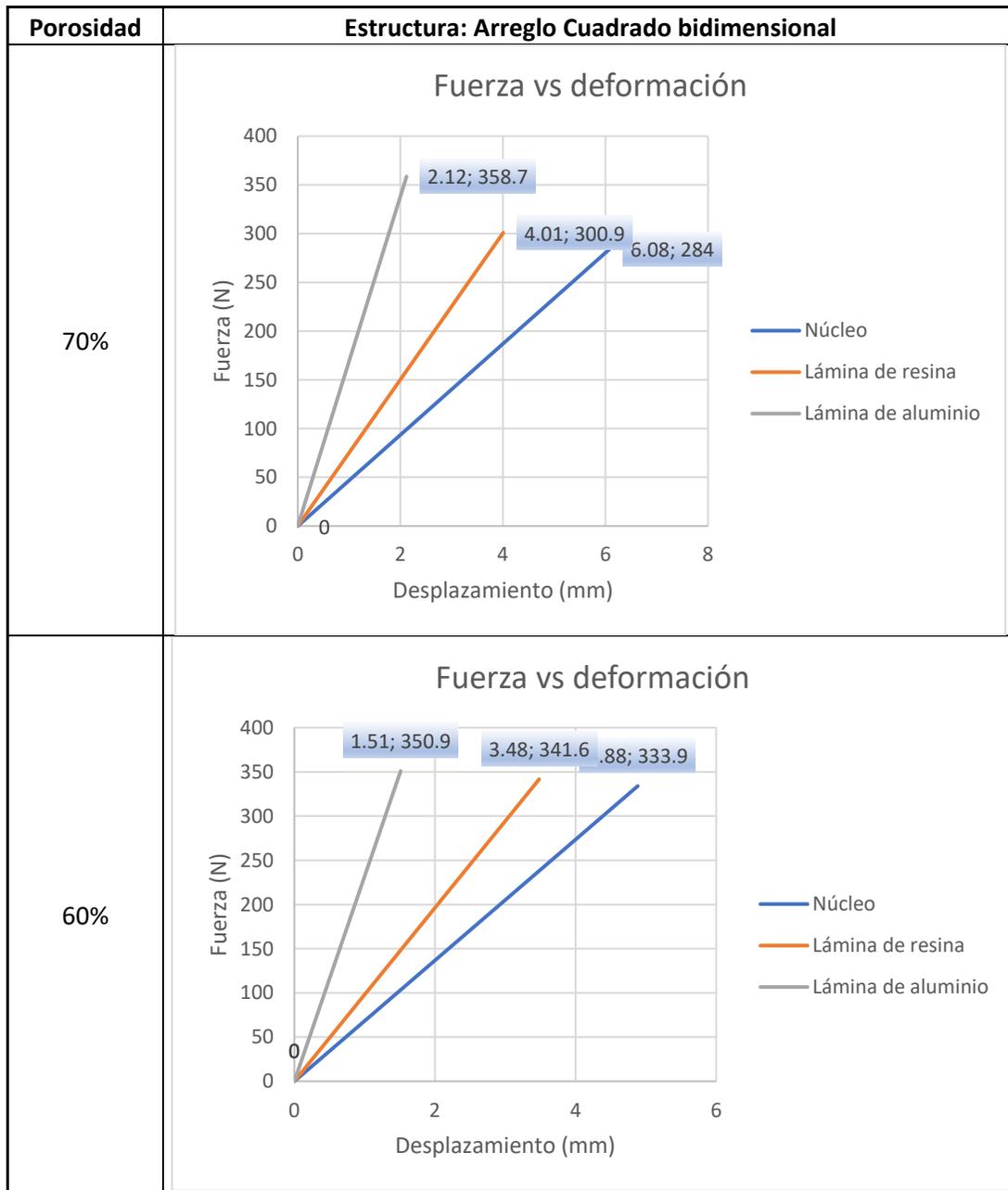
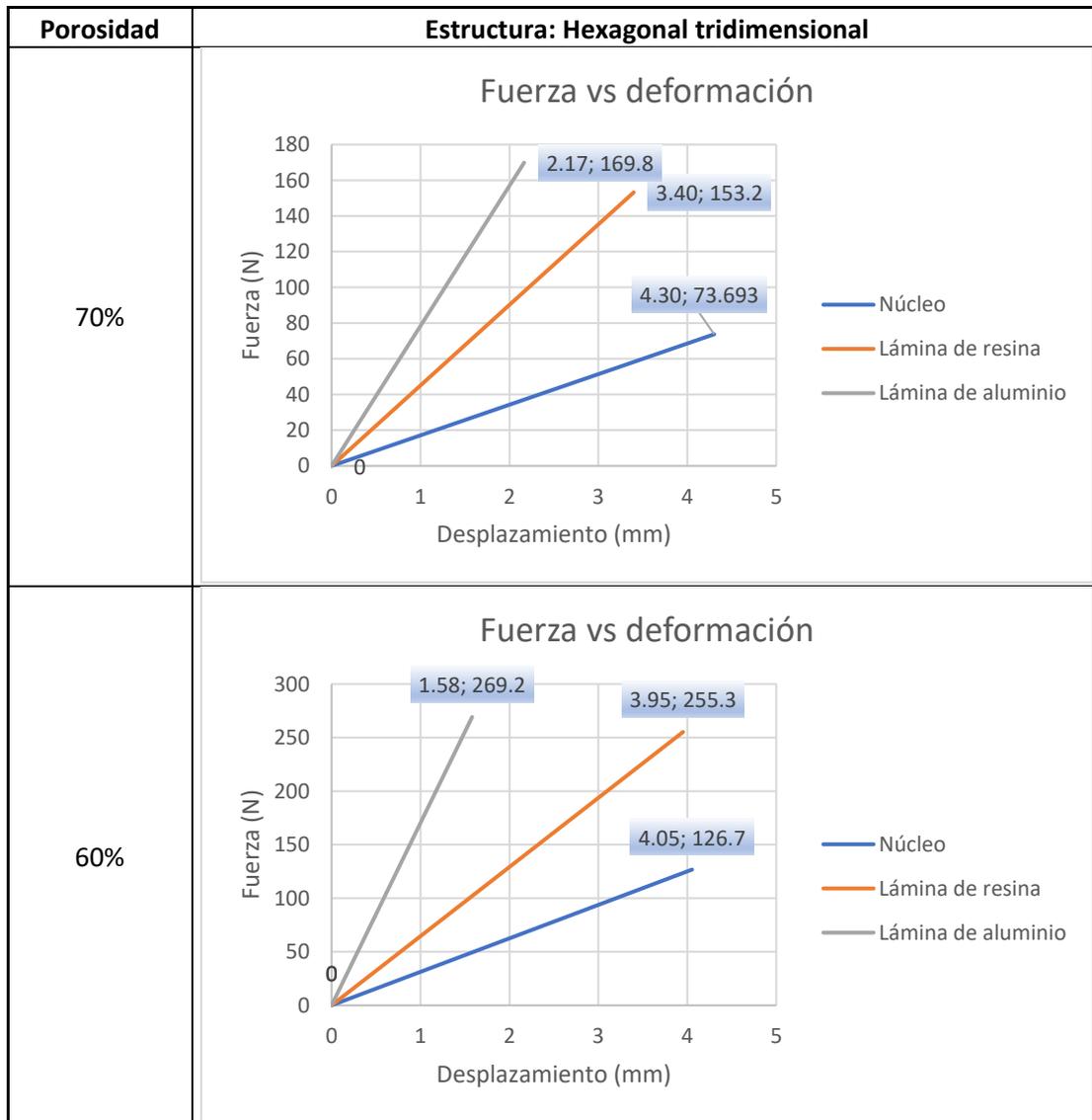


Figura 105

Correlación de gráficas para la estructura hexagonal tridimensional



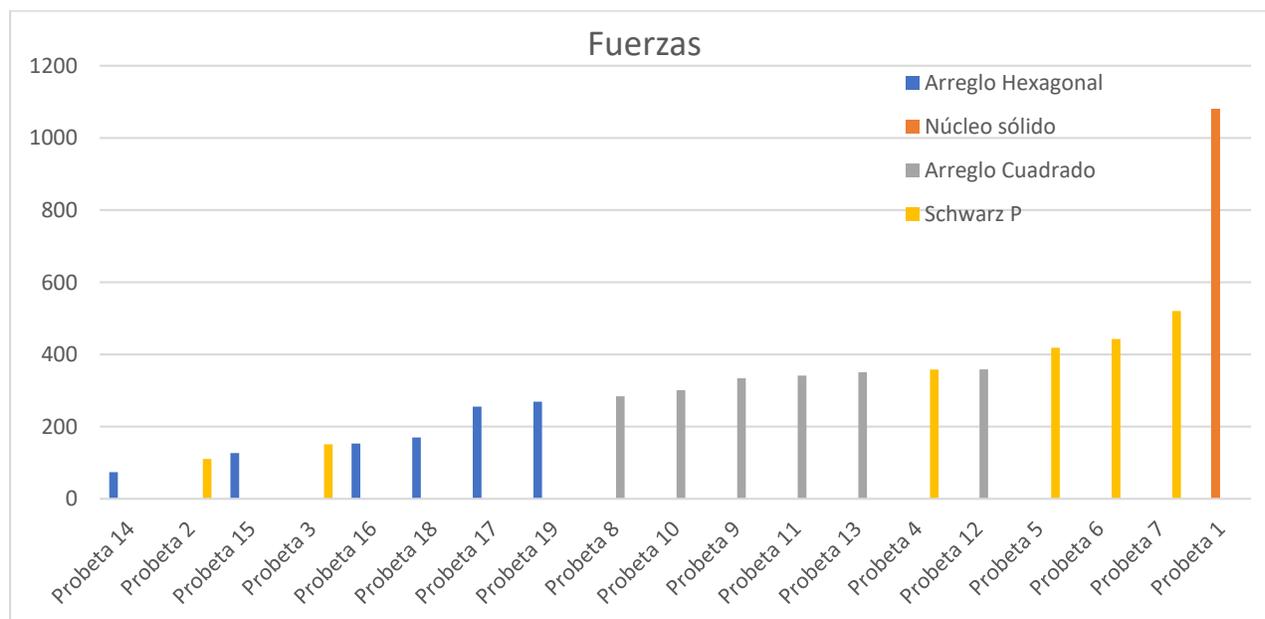
Mediante las gráficas representadas anteriormente para cada estructura tomando como referencia el núcleo celular, estos nos indican que cuando se añaden capas externas y forman vigas de tipo sándwich de núcleo de material celular, este núcleo va a aumentar su rigidez, debido a que soporta mayor fuerza y tiene una menor deformación. Este comportamiento está relacionado con el material de las capas externas, mientras mayor es su módulo de elasticidad, más rígido se vuelve la viga sándwich.

Como se aprecia en las gráficas productos de los ensayos de flexión, la mayor fuerza se alcanza cuando se colocan capas externas a los núcleos para formar vigas de tipo sándwich.

A continuación se presenta el resumen gráfico de su fuerza alcanzada en la región lineal para cada probeta de la experimentación.

Figura 106

Comparación de Fuerzas máximas alcanzadas en la experimentación



A través de la figura 106 se observa que la probeta que menor fuerza alcanzó en el rango lineal corresponde al número 14 de topología “arreglo hexagonal al 70% de porosidad” y la que mayor fuerza alcanzó es la probeta número 7 con topología “Schwarz P al 60% de porosidad con capas externas de aluminio”. Tener en cuenta que la probeta número 1, sirve solamente como comparativa para este estudio. El núcleo sólido es la que mayor fuerza alcanza a resistir antes de llegar a deformarse.

Los núcleos de las probetas que aumentan su rigidez significativamente corresponden a la de topología Schwarz P cuando su porosidad disminuye y se colocan capas externas para conformar vigas tipo sándwich. De igual manera sucede en las probetas de topología “arreglo hexagonal”, pero en menor magnitud de su fuerza.

En cambio para los núcleos de las probetas de tipología “arreglo cuadrado”, al momento de colocar capas externas para formar vigas sándwich, estas no presentan un aumento significativo en su rigidez, por lo cual en estas condiciones, su aumento de rigidez solamente depende de la porosidad de su núcleo.

Conclusiones

En este trabajo se realizó una comparación del comportamiento mecánico de diversas estructuras de núcleos celulares (TPMS) y enrejados periódicos, a base de probetas prefabricadas mediante impresión 3D y por simulación numérica de las estructuras “arreglo cuadrado bidimensional”, “Schwarz P” y “arreglo Hexagonal tridimensional”, y se hizo un estudio comparativo entre los efectos de la tipología de los núcleos, porosidad del núcleo y el material de las capas externas en las propiedades de flexión de cada estructura. Los principales hallazgos de este trabajo se resumen a continuación:

Se determinó que las estructuras de tipo “arreglo cuadrado” son más dúctiles que las estructuras de topología de núcleo “Schwarz P” y “arreglo hexagonal”, estas últimas presentan un comportamiento frágil.

El núcleo celular de tipo “arreglo cuadrado” con un porcentaje de porosidad del 60% mostró una resistencia mayor que otras tipologías del núcleo, mientras que la viga tipo sándwich de tipo “Schwarz P” con capas externas de aluminio con un porcentaje de porosidad del 60% aumentó significativamente su resistencia, siendo la viga tipo sándwich que mejor comportamiento mecánico ha presentado de todo el diseño experimental.

El efecto que producen las alas o capas externas en los núcleos de material celular aumenta significativamente la rigidez a los núcleos de material celular.

El núcleo de menor resistencia mecánica fue el de tipo “arreglo hexagonal” con una porosidad del 70%. Mientras que la viga tipo sándwich que menor resistencia a flexión tuvo también fue la viga de núcleo “arreglo hexagonal” con capas externas de resina “High Temp”.

Se establece que mientras mayor sea el porcentaje de porosidad, las vigas de núcleo celular y de vigas tipo sándwich tendrán menor rigidez a la flexión. Así mismo mientras el porcentaje de porosidad disminuya, la rigidez a la flexión va a aumentar.

Para las vigas tipo sándwich, su comportamiento también depende de la porosidad del núcleo (como se describió en el ítem anterior), así como también del material de las capas externas o alas, es así que mientras mayor sea el módulo de Young del material de las capas, la viga tiene un comportamiento más rígido a la flexión.

Comparando los resultados experimentales y de simulación, la probeta que obtuvo el mayor error relativo fue la viga sándwich de tipo “arreglo cuadrado” con una porosidad del 60% con capas externas de aluminio con un er: 19.03%, y la probeta que presentó un menor error relativo fue la del núcleo sólido con un er: 0.77%.

El esfuerzo de Von Mises en las probetas se encuentra en el intervalo de 30 MPa a 60 MPa, con excepción de la viga sándwich de tipo “Schwarz P” con capas externas de aluminio, que tiene un esfuerzo de Von Mises de 101.52 MPa y de 92.62 MPa con porosidades del 70% y 60% respectivamente.

El resultado calculado del módulo de Young se encuentra en el intervalo descrito en la ficha técnica del fabricante de la resina, por lo tanto fue factible usarlo para implementarlo al momento de realizar las simulaciones en cada probeta y así reducir el error para cada una de estas.

La probeta que mayor esfuerzo relativo posee es la de tipología Schwarz P, con láminas externas de aluminio y con porosidad de su núcleo al 70%, con un esfuerzo de Von Mises de 6768 Mpa/kg. Mientras que la que menor esfuerzo relativo de Von Mises presentó, es la probeta de núcleo sólido, con un esfuerzo relativo de 1211.4 Mpa/kg.

Recomendaciones

Se recomienda caracterizar la resina antes de realizar las simulaciones para reducir los errores al momento de comparar sus desplazamientos en los ensayos de flexión.

Al momento de realizar el diseño generativo mediante Space Claim, antes de hacer sólidos a los núcleos TPMS, se recomienda pulsar la opción “ajustar encoger” en el menú de facetas en núcleos en donde su diseño sea complejo.

Se recomienda ensayar y analizar más núcleos TPMS para ampliar el conocimiento acerca del comportamiento a flexión que puedan tener los otros núcleos, y de la misma manera verificar el efecto que tiene la porosidad en cada uno de estos núcleos.

Para conseguir la mayor resistencia de la resina, se sugiere que la limpieza se realice con alcohol isopropílico y en el postcurado el parámetro de temperatura y tiempo sea controlado según indique el proveedor.

Se recomienda evaluar otras vigas tipo sándwich con mayores topologías variando los parámetros de espesor de lámina externa, porosidad y material de la lámina externa, para verificar que se puede alcanzar la resistencia del núcleo sólido de resina estándar, ya que en este experimento, la viga sándwich que mayor resistencia alcanzó es la “Schwarz P” con 60% de porosidad y con láminas de aluminio, la cual soportó solo la mitad de la fuerza que el núcleo sólido puede alcanzar antes de ingresar a la región plástica. Pero se debe tener en cuenta que la viga sándwich “Schwarz P al 60%” tiene una masa 50% menor a la del núcleo sólido.

Bibliografía

- Acevedo, M., Uribe, C., Peña, L., Duque, G., Gonzáles, G., & Redondo, R. (2019). *ResearchGate: Curva de esfuerzo y deformación*. https://www.researchgate.net/figure/Curva-de-esfuerzo-deformacion-idealizada-para-materiales-ductiles_fig1_331310495
- Ansys. (2022). *Ansys help*. <https://ansyshelp.ansys.com>
- Ansys. (2022). *Ansys Space Claim 3D modeling Software*. <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>
- Beer, F., Russell, J., & DeWolf, J. (2010). *Mecánica de materiales*. Mc Graw Hill.
- Cervera, M., & Blanco, E. (2001). *Mecánica de estructuras*. Cataluña, España: Edición UPC.
<http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mec%C3%A1nica%20de%20Estructuras.pdf>
- Cheng, Z., Tianyu, L., Qian, F., Wen, C., Swetha, C., Bin, Y., Yat, L. (2017). 3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage. *ScienceDirect*.
<https://pdf.sciencedirectassets.com/>
- Chenxi, P., Kate, F., Ma, Q., H., N.-X., & Phuong, T. (2021). 3D printed sandwich beams with bioinspired cores: Mechanical performance and modelling. *Elsevier*, 11.
https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/journalArticle/3D-printed-sandwich-beams-with-bioinspired/9921970502101341?institution=61RMIT_INST
- Design of experiments. (2022). *Statcal Discovery*. Statics Snowledge Portal.
https://www.jmp.com/en_ph/statistics-knowledge-portal/what-is-design-of-experiments.html
de 2022
- Formlabs. (2022). *Formlabs, Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*.
<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- Formlabs. (2022). *Impresoras 3D de alto rendimiento*. <https://formlabs.com/>

Formlabs. (2022). *Material Data Sheet high temp.*

https://formlabsmedia.formlabs.com/datasheets/High_Temp_Technical.pdf

Formlabs. (2022). *Material data Sheet standard.*

<https://formlabsmedia.formlabs.com/datasheets/Standard-DataSheet.pdf>

Hofer, K. (2022). *Britannica, material testing.* <https://www.britannica.com/technology/materials-testing>

Hubs. (2022). *A protolabs company.* What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?:

<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>

Khalid, A. (2021). *What is Additive Manufacturing? Definition, Types and processes.* [https://www.twi-](https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing)

[global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing](https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing)

Malavia , J. (2012). Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio. (*Tesis de maestría*). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia - España.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18052/Tesis.pdf>

Mallavia Llanos, J. (2013). Concept modelling of a honeycomb sandwich. (*Tesi Di Laurea*). UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA, Italia.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3844/359581.pdf;jsessionid=A09F8AF5E5E5F8FEA2EFE0B8EBB61E2F?sequence=1>

Myszka, D. H. (2012). *Máquinas y Mecanismos*. México: Pearson Educación .

<https://pavisva.files.wordpress.com/2016/01/mc3a1quinas-y-mecanismos-4-ed-david-h-myszka.pdf>

Preform. (2022). *Software de Formlabs: La configuración, gestión y supervisión de la impresión 3D, simplificadas.* <https://formlabs.com/latam/software/>

Ricoh. (2021). *Fused Deposition Modelling.* <https://rapidfab.ricoh-europe.com/es/tecnologias/fdm/>

Serrano, D. E. (2020). *Caracterización y análisis del fenómeno de absorción de energía en materiales celulares de PLS con estructuras estocásticas de celda abierta y con estructuras TPMS.* (*Tesis de*

pregrado, Universidad de los Andes) Colombia.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/51619>

Shixiang, Y., Sun, J., & Jiaming, B. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Elsevier*, 9.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519304599>

Stolarski, T., Nakasone, Y., & Yoshimoto, S. (2018). *Engineering Analysis with ANSYS software*. United Kingdom. https://www-sciencedirect-com.translate.goog/book/9780081021644/engineering-analysis-with-ansys-software?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es-419&_x_tr_pto=sc

Strietzel, R. (2010). *Fusión selectiva por láser para el procesamiento de polvo de aleación dental*. 293-295. <https://www.elsevier.es/es-revista-quintessence-tecnica-33-pdf-X1130533910508257>

Tiwari, N. (Abril de 2017). *ResearchGare: Analysis of Honeycomb sandwiched panels*.

https://www.researchgate.net/figure/Honeycomb-Sandwich-Panel-Honeycomb-structures-are-natural-or-man-made-structures-that_fig1_332343698

Valenzuela, V., García, C., & Chapa, G. (2020). *Progreso de la impresión 3D de dispositivos médicos*. 3-15.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322020000100151

Vivaacp. (2021). *Aluminium Honeycomb Panel*. Aluminium composite sheet.

<https://vivaacp.com/aluminium-honeycomb-panel-presenting-innovation/>

Wikimedia Commons. (2022). *Simp Supp Beam Point Load*.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SimpSuppBeamPointLoad.svg>

Xometry, E. (2022). *Impresiones 3D por estereolitografía*. <https://xometry.eu/es/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>