

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

TRABAJO FIN DE MASTER

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA,
PROCESADO Y CARACTERIZACIÓN DE
MATERIALES**

**“Desarrollo, fabricación y caracterización de nuevas estructuras de
materiales compuestos tipo sándwich con núcleos derivados de
ácido poliláctico, PLA.”**

Autor:

D. René Miguel Guillén Pineda

Dirigido por:

Dr. Rafael Antonio Balart Gimeno

D. Luís Jesús Quiles Carrillo

Julio 2018

RESUMEN

“Desarrollo, fabricación y caracterización de nuevas estructuras de materiales compuestos tipo sándwich con núcleos derivados de ácido poliláctico, PLA.”

El presente trabajo muestra la elaboración de una estructura de material tipo sándwich con núcleos derivados de ácido poliláctico PLA, en el que la geometría óptima para los núcleos a utilizar en las estructuras es de tipo hexagonal, por lo que se hablará de núcleos en forma de panal de abeja. Para llevar a cabo el proceso de desarrollo, fabricación y caracterización se hace un estudio del arte en el cual se toman en cuenta los antecedentes, propuestas, patentes y demás ideas que contribuyen a la ejecución del proyecto. A la vez, se muestra todo un proceso constructivo de un molde de aluminio para la fabricación de los núcleos hexagonales, mediante un proceso de termo-compresión, el cual es una propuesta innovadora para la construcción de materiales con formas determinadas mediante el uso de fibras naturales y materiales termoplásticos. La propuesta de la construcción de núcleos en forma de panal de abeja con material PLA abre muchas líneas de investigación. El objetivo es elaborar materiales alternativos que permitan nuevos desarrollos, y sustituyan ó permitan la reducción de materiales tradicionales que actualmente están generando controversia en el tema de la contaminación. Una vez se cuente con el molde, se procederá a la construcción de las piezas a utilizar en las estructuras, en las que se emplean materiales biodegradables y de procedencia ECO como el PLA, fibras de lino con PLA, no tejidos de PLA y adhesivos elaborados a partir de elementos naturales. En su caracterización se procede a la evaluación de la estructura tipo sándwich, identificando las propiedades mecánicas que presentan los núcleos elaborados a diferentes espesores. También se efectúa un análisis de la propiedad 4D, la cual hace un estudio de memoria de forma de la geometría utilizada en los núcleos de PLA.

SUMMARY

"Development, manufacture and characterization of new structures of sandwich composite materials with nuclei derived from polylactic acid, PLA."

The present work shows the elaboration of a structure of sandwich material with nuclei derived from polylactic acid PLA, in which the optimal geometry for the nuclei to be used in the structures is of hexagonal type, for which reason we will speak of nuclei in the form of honeycomb. To carry out the process of development, manufacture and characterization, a study of art is made in which the background, proposals, patents and other ideas that contribute to the execution of the project are taken into account. At the same time, a whole constructive process of an aluminum mold for the manufacture of hexagonal cores is shown, through a process of thermo-compression, which is an innovative proposal for the construction of materials with shapes determined by the use of fibers natural and thermoplastic materials. The proposal for the construction of honeycombed nuclei with PLA material opens many lines of research. The objective is to develop alternative materials that allow new developments, and replace or allow the reduction of traditional materials that are currently generating controversy in the issue of pollution. Once the mold is available, we will proceed to the construction of the pieces to be used in the structures, in which biodegradable materials of ECO origin are used, such as PLA, flax fibers with PLA, non-woven PLA and elaborated adhesives from natural elements. In its characterization we proceed to the evaluation of the sandwich structure, identifying the mechanical properties of the cores produced at different thicknesses. An analysis of the 4D property is also carried out, which makes a shape memory study of the geometry used in the PLA cores.

RESUM

"Desenvolupament, fabricació i caracterització de noves estructures de materials compostos tipus sandvitx amb nuclis derivats d'àcid polilàctic, PLA."

En el present treball es pot visualitzar l'elaboració d'una estructura de material tipus sandvitx amb nuclis derivats d'àcid polilàctic PLA, en què la geometria òptima per als nuclis a utilitzar en les estructures és de tipus hexagonal, de manera que es parlés de nuclis en forma de bresca d'abella. Per dur a terme el procés de desenvolupament, fabricació i caracterització es fa un estudi de l'art en el qual es té en compte els antecedents, propostes, patents i altres idees que contribueixen a l'execució del projecte. Alhora, es mostra tot un procés constructiu d'un motlle d'alumini per a la fabricació dels nuclis hexagonals, mitjançant un procés de termo-compressió, el qual és una proposta innovadora per a la construcció de materials amb formes determinades mitjançant l'ús de fibres naturals i materials termoplàstics. La proposta de la construcció de nuclis en forma de bresca d'abella amb material PLA obre moltes línies d'investigació. L'objectiu és elaborar materials alternatius que permetin nous desenvolupaments, i substitueixin, o permetin la reducció, de materials tradicionals que actualment estan generant controvèrsia en el tema de la contaminació. Un cop es compta amb el motlle, es procedirà a la construcció de les peces a utilitzar en les estructures, en el qual es fan servir materials biodegradables i de procedència ECO, com el PLA, fibres de lli amb PLA, no teixits de PLA i adhesius elaborats a partir d'elements naturals. En la seva caracterització es procedeix a l'avaluació de l'estructura tipus sandvitx, identificant les propietats mecàniques que presenten els nuclis elaborats a diferents gruixos. També es fa una anàlisi de la propietat 4D, la qual fa un estudi de memòria de forma de la geometria utilitzada en els nuclis de PLA.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	3
SUMMARY.....	5
RESUM.....	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS	15
LISTADO DE TABLAS.....	21
I. INTRODUCCIÓN.....	23
I.1. ANTECEDENTES.....	25
I.2. BIOMATERIALES.....	25
I.2.1. Ácido poliláctico (PLA).	26
I.2.2. Aplicaciones actuales del PLA.	27
I.2.2.1. Industria alimenticia.	27
I.2.2.2. Industria médica.	27
I.3. TENDENCIAS DE APLICACIÓN.....	28
I.4. ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH.....	29
I.4.1. Núcleo de espuma.....	32
I.4.2. Núcleo corrugado.....	33
I.4.3. Núcleos panal de abeja.....	34
I.5 FORMA DE PANAL DE ABEJA.....	35
I.6 ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH DE MATERIALES COMPUESTOS CON NÚCLEOS EN FORMA DE PANAL DE ABEJA.....	37
I.6.1. Proceso de fabricación de panales de abeja.	37

I.7. CARACTERIZACIÓN DE SÁNDWICHES EN FORMA DE PANAL DE ABEJA.....	39
I.7.1. Modos de fallo de los paneles tipo sándwich.	42
I.8. MEMORIA DE FORMA.....	43
II. OBJETIVOS.....	45
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	46
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	46
III. DESARROLLO	47
III.1. MOLDE.....	49
III.1.1. Modelo 3D.....	51
III.1.2. Planos molde aluminio.	51
III.1.3. Corte.....	53
III.1.4. Fresado.....	53
III.2. FILM PLA.....	60
III.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	65
III.3.1.Fabricación núcleos de panal de abeja.....	65
III.3.2. Fabricación láminas de Sándwich.	72
III.3.3. Pruebas previas con diferentes adhesivos.	75
III.3.4. Fabricación de panales tipo sándwich.	77
III. 4. TÉCNICAS Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.	81
III.4.1. Ensayo a flexión.	83
III.4.2. Ensayo a Compresión.	85
III.4.3. Ensayo Memoria de forma.....	86
III.4.3.1. Ensayo de memoria de forma de tipo cualitativo.....	87
III.4.3.2. Ensayo de memoria de forma de tipo cuantitativo.....	87

III.4.3.3. Ensayo de memoria de forma de probetas de núcleo en forma de hexágono.89

IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....91

IV.1. RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXIÓN.....92

IV.2. RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN..... 97

IV.3. RESULTADOS DE MEMORIA DE FORMA.....99

I.V.3.1. Resultados de ensayos de memoria de forma cualitativa de films de PLA. 99

IV.3.2. Resultados de ensayos de memoria de forma cualitativa de probetas de núcleo en forma de hexágono. 100

IV.3.3. Resultados de ensayos de memoria de forma Cuantitativa. 104

IV.4. CONCLUSIONES.....106

IV.5. ÁREAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....108

V. APÉNDICES 109

V.1. REFERENCIAS111

V.2. PLANOS.....117

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales)
E	Módulo elástico
EP	Resina epoxi
FDA	Food and Drug Administration (Administración de Medicamentos y Alimentos)
GRAS	Generally Recognized As Safe (Generalmente reconocido como seguro)
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer (Polímero reforzado con fibra de carbono)
GFRP	Glass fiber reinforced polymer (Polímero reforzado con fibra de vidrio)
HC	Honeycomb
HSS-E	Cobalt High Speed Steel (Acero de alta velocidad con contenido de cobalto)
PLA	Ácido poliláctico
PS	Poliestireno
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
T _g	Temperatura de transición vítrea

LISTADO DE FIGURAS

Figura I. 1. Estructura química de ácido poliláctico (PLA). [3]	26
Figura I. 2. Tipos de Núcleos tipo sándwich. A) Espuma, B) Nido de abeja, C) Web y D) Corrugado. [11]	30
Figura I. 3. Haciendo estructuras de alta eficiencia. La forma le da a las secciones una mayor rigidez a la flexión y resistencia por unidad de masa que la sección sólida de la que están hechas. [14]	31
Figura I. 4. Configuración de estructuras tipo sándwich con núcleo de espuma. [19] ...	32
Figura I. 5. A) Geometría unitaria de la celda del panel sándwich de núcleo corrugado. B) Foto de una corrugado de aluminio. C) Corrugado un polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP). D) corrugado de un polímero reforzado con fibra de carbón (CFRP). [21]	33
Figura I. 6. Panel corrugado. [23]	33
Figura I. 7. Celdas hexagonales de panal de abeja. [26]	35
Figura I. 8. Componentes para la fabricación de paneles con núcleo de panal de abeja. [27]	35
Figura I. 9. Esquema de la descripción detallada de una estructura tipo sándwich metálica con núcleo de panal de abeja. [29]	36
Figura I. 10. Proceso de extrusión de panales de abeja tubulares. [33]	37
Figura I. 11. Empresa ECONCORE, productora de núcleos de panal de abeja con forma hexagonal. [34]	38
Figura I. 12. Esquema de producción de núcleos hexagonales ECONCORE. [36][37] ...	39
Figura I. 13. Paneles tipo Sándwich con núcleo en forma de panal de abeja. ECONCORE. [36]	40
Figura I. 14. Ejemplo de resultados de ensayos a flexión de estructuras tipo sándwich de materiales compuestos. [41]	41
Figura I. 15. Ejemplo de ensayo de flexión en equipo universal para elementos sándwich a 3 puntos. [42]	41

Figura I. 16. Modos de fallo en estructuras tipo sándwich. [43]	42
Figura I. 17. Caracterización de memoria de forma mediante proceso de tracción en materiales plásticos. [46].....	43
Figura I. 18. Diagrama del efecto de memoria de forma de un polímero semicristalino. [47]	44
Figura III. 1. Herramienta de corte, fresa 16mm x 6.3 mm HSSE.	49
Figura III. 2. Herramienta de corte y dimensiones.....	50
Figura III. 3. Medidas de molde y cálculos para su fabricación.....	50
Figura III. 4. Cotas definidas por cálculos para construcción de molde.....	51
Figura III. 5. Modelo 3D molde de panal de abeja. AUTODESK INVENTOR 2018.	51
Figura III. 6. Molde estructural panal de abeja 1/3. AUTODESK INVENTOR 2018.	52
Figura III. 7. Molde estructural panal de abeja 2/3. AUTODESK INVENTOR 2018.	52
Figura III. 8. Molde estructural panal de abeja 3/3. AUTODESK INVENTOR 2018.	52
Figura III. 9. Proceso de corte de material de aluminio.	53
Figura III. 10. Fresadora WEISS WUM100. Departamento mecánica UPV Alcoy.	54
Figura III. 11. Montaje y modificación previa de pieza de aluminio en equipo fresadora con herramienta de corte de 5 mm.....	57
Figura III. 12 . Cortes realizados por la herramienta hexagonal en pieza de aluminio superior e inferior.	58
Figura III. 13. Molde de panal de abeja de 20 x 20 cm, parte superior e inferior cortada y fresada.	59
Figura III. 14. Eurotech extrusion machinery srl. Machine type mini cast 25.....	60
Figura III. 15. Film PLA. INGEO BIOPOLYMER. NATUREWORK.....	61
Figura III. 16. Parámetros de funcionamiento de maquina extrusora. EUROTECH EXTRUSION MACHINERY SRL. A) 50 μ m, B) 100 μ m, C) 250 μ m, D) 500 μ m.....	62
Figura III. 17. Films de PLA de 50 μ m, 100 μ m, 250 μ m, 500 μ m.	63

Figura III. 18. Inspección de espesor en film generado en maquina extrusora mediante el uso de micrómetro.....	64
Figura III. 19. Equipo de termo-compresión.....	65
Figura III. 20. Prueba de fabricación de núcleo de panal de abeja con film de 250 µm en termocompresora.....	66
Figura III. 21. Moldeo por temperatura y presión con films de PLA de 50 µm, 100 µm, 250 µm y 500 µm.....	67
Figura III. 22. Núcleo de PLA en forma de panal de abeja.....	68
Figura III. 23. Films de PLA de 20cm de longitud, 1 cm de ancho.....	69
Figura III. 24. A) Film de PLA de 1 cm después de conformado. B) Núcleo de PLA de 1 cm en forma de panal de abeja.....	70
Figura III. 25. Núcleo de PLA en forma de panal de abeja de 20 cm x 20 cm.....	70
Figura III. 26. Adhesivo LOCTITE 401 HENKEL.....	71
Figura III. 27. Núcleos de PLA de 20 cm x 20 cm A) 1 cm altura, B) 2 cm altura y C) 3 cm altura.....	71
Figura III. 28. BIOTEX 40% FLAX/ PLA 4x 4 HOPSACK FABRICS.....	72
Figura III. 29. Placas de acero recubiertas con film de teflón resistente al calor.....	72
Figura III. 30. A) 1 Pliego de lino + PLA de 20 x 20 cm. B) 4 Pliegos de lino + PLA.....	73
Figura III. 31. Indicadores de máquina de termo compresión a temperatura de 200 .C y presión de 9 toneladas.....	74
Figura III. 32. Lamias de Lino + PLA antes y después de ser sometidas a temperatura y presión.....	74
Figura III. 33. Sándwiches de prueba con diferentes tipos de materiales y adhesivos...	75
Figura III. 34. Resina ECOPOXY. [48]	76
Figura III. 35. Fabricación de sándwiches con panal de abeja. A) Láminas de lino y B) Capas de no tejido de PLA.....	77
Figura III. 36. Tara de recipientes para resina y endurecedor. Parte 1: resina (100g). Parte 2: endurecedor (50g).....	78

Figura III. 37. Unión de piezas de sándwich, láminas de lino, no tejido PLA, resina ECO epoxi y núcleos de panal de abeja de 1cm, 2 cm y 3 cm de altura.	79
Figura III. 38. Sándwiches sometidos a presión en termocompresora para curado de resina.	80
Figura III. 39. Sándwiches finalizados.....	80
Figura III. 40. Máquina universal de ensayo de tracción IBERTEST.	82
Figura III. 41. Ensayo de flexión a núcleos de panal de abeja. A) 1 cm, B) 2 cm y C) 3 cm.	83
Figura III. 42. Probeta sometida a flexión.....	84
Figura III. 43. Probetas de panal de abeja sometidas a flexión: A) Aplicación de fuerza en probeta y B) Probeta después de ensayo a flexión.	84
Figura III. 44. Probeta sometida a compresión.....	85
Figura III. 45. Ensayo de compresión a núcleos de panal de abeja. A) 1 cm, B) 2 cm y C) 3 cm. Probetas comprimidas luego de ser sometidas a compresión.	85
Figura III. 46. Probetas para memoria de forma. A) Probetas tipo film y B) Probetas de núcleo en forma de hexágono.	86
Figura III. 47. Placas de aluminio para ensayo cuantitativo de films de PLA a 120 grados.	87
Figura III. 48. Aplicación de temperatura (70 °C) en ensayo cuantitativo de films de PLA: A) Films de PLA antes de aplicar calor y B) Films de PLA después de aplicar calor.	88
Figura III. 49. Ensayo cuantitativo de films de PLA. Medición de ángulos. A) Film de PLA de 100 μm deformado a un ángulo de 148.8 °, B) Film de PLA de 250 μm deformado a un ángulo de 140.7 ° y C) Film de PLA de 500 μm deformado a un ángulo de 120.....	89
Figura III. 50. Láminas en forma de panal de abeja sometidas a temperatura.	90
Figura IV. 1. Gráfico comparativo de valores de fuerza máxima de flexión de films de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.....	95
Figura IV. 2. Gráfico comparativo de valores de resistencia máxima a flexión en núcleos de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.....	95

Figura IV. 3. Gráfico comparativo de valores de Modulo de flexión de films de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.....	96
Figura IV. 4. Gráfico comparativo de valores de fuerza a compresión de films de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.....	98
Figura IV. 5. Resultado de Ensayo cualitativo de memoria de forma en films de PLA.	99
Figura IV. 6. Gráfica de resultados de memoria de forma de films de PLA a temperatura ambiente y a 70 °C.	105
Figura IV. 7. Laminas y núcleos en forma de panal de abeja elaborados de lino + PLA por medio te termo conformación.	108

LISTADO DE TABLAS

Tabla I. 1. NatureWorks: gama de aplicaciones de envasado (principalmente para alimentos), película y fibra. [7].....	28
Tabla I. 2. Resumen de desarrollos de tecnologías importantes de panales de abeja. [25]	34
Tabla III. 1. Datos de distancia de separación de tramos a fresar.	55
Tabla III. 2. Parámetros de giro de fresadora.	56
Tabla III. 3. Parámetros de velocidad de avance en sentido longitudinal. Eje X.	56
Tabla III. 4. Parámetros iniciales de prueba para fabricación de núcleos de panal de abeja mediante temperatura y presión.	66
Tabla III. 5. Parámetros finales para fabricación de núcleos de panal de abeja mediante temperatura y presión.	66
Tabla III. 6. Observaciones de las propiedades de los núcleos en función de su espesor.	68
Tabla III. 7. Parámetros para fabricación de láminas de limo + PLA	73
Tabla IV. 1. Tabla de resultados de probeta de 1 cm de espesor sometida a flexión.	92
Tabla IV. 2. Tabla de resultados de probeta de 2 cm de espesor sometida a flexión.	92
Tabla IV. 3. Tabla de resultados de probeta de 3 cm de espesor sometida a flexión.	93
Tabla IV. 4. Probetas de estructuras tipo sándwiches con núcleos de 1 cm de altura sometidas a flexión. Resultados de resistencia máxima y módulo a partir su fuerza máxima.	93
Tabla IV. 5. Probetas de estructuras tipo sándwiches con núcleos de 2 cm de altura sometidos a flexión. Resultados de resistencia máxima y modulo a partir su fuerza máxima.	94
Tabla IV. 6. Probetas de estructuras tipo sándwiches con núcleos de 3 cm de altura sometidas a flexión. Resultados de resistencia máxima y modulo a partir su fuerza máxima.	94

Tabla IV. 7. Tabla de resultados de probeta de 1 cm de espesor sometida a compresión.	97
Tabla IV. 8. Tabla de resultados de probeta de 2 cm de espesor sometidos a compresión.	97
Tabla IV. 9. Comportamiento de probeta de 100 μm sometida a temperatura de 135 $^{\circ}\text{C}$	101
Tabla IV. 10. Comportamiento de probeta de 250 μm sometida a temperatura de 135 $^{\circ}\text{C}$	102
Tabla IV. 11. Comportamiento de probeta de 500 μm sometida a temperatura de 135 $^{\circ}\text{C}$	103
Tabla IV. 12. Propiedades físicas de PLA Ingeo 6201D. [52].....	104
Tabla IV. 13. Tabla de resultados de memoria de forma cuantitativa de films de PLA.	105

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. ANTECEDENTES.

En la actualidad los materiales tienen una gran importancia para el desarrollo y creación de la sociedad, en la que se demanda cada vez más materiales ligeros y con altas propiedades mecánicas para diferentes aplicaciones con un costo reducido. Sin embargo, hoy en día se demandan nuevos parámetros, no solo técnicos, sino también que los materiales sean amigables con el ambiente, debido a que la generación de materiales que no presentan propiedades de degradación a corto plazo, presentan una gran problemática medio ambiental. En los últimos años el desarrollo por materiales eco-amigables los determinados biomateriales, han ganado popularidad debido a que presentan propiedades técnicas importantes que están permitiendo su uso en diferentes aplicaciones, siendo esto una alternativa a los materiales convencionales como los aceros y los plásticos técnicos.

I.2. BIOMATERIALES.

Normalmente los plásticos se seleccionan para aplicaciones basándose en su estabilidad a la degradación, pero esto implica que la degradación será muy lenta, lo que aumentará el problema de los desechos sólidos. Los métodos para reducir la cantidad de desechos sólidos incluyen el reciclaje y la biodegradación. [1]

La biodegradabilidad es una propiedad suplementaria para aquellos productos que tienen como característica primordial ser duraderos y estables, teniendo en cuenta que luego de cierto tiempo y uso, supone una degradación en la cual el ambiente ó los factores externos hacen que los materiales se desintegren. Sin embargo este no es el caso de muchos materiales que se fabrican en la actualidad, ya que la biodegradabilidad es uno de los factores que muchas empresas no consideran como resultado final de sus productos. Actualmente lo que se plantea como reto es la producción de un material sólido, con buenas propiedades mecánicas, que no se degrade en su primer uso. [2]

I. Introducción

I.2.1. Ácido poliláctico (PLA).

En la actualidad se habla mucho sobre el futuro de los plásticos, se buscan soluciones al problema medio ambiental, de manera que se puedan tener nuevas aplicaciones a materiales alternativos. Dentro de estos se encuentran los biomateriales con características de biodegradabilidad, como lo es el PLA.

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Este se produce mediante la fermentación de glucosa, la cual se puede obtener de diferentes fuentes de azúcar. [2]

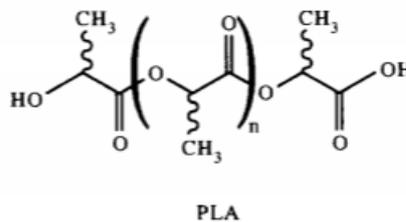


Figura I. 1. Estructura química de ácido poliláctico (PLA). [3]

El PLA es un material pionero dentro de los materiales biodegradables, ya que fue uno de los primeros bioplásticos producidos a gran escala, inicialmente por la empresa NATUREWORKS en el año 2002. Este PLA se produce a partir de maíz. En el año 2007 la empresa PURAC inicio la producción de PLA a partir de azúcar de caña, almidón de patata y almidón de tapioca, para su utilización en aplicaciones técnicas a gran escala. [4]

I. Introducción

I.2.2. Aplicaciones actuales del PLA.

I.2.2.1. Industria alimenticia.

Debido a que el PLA tiene una producción a gran escala, este biomaterial permite una apertura a nuevas aplicaciones como sustituto de los materiales convencionales. El PLA se ha utilizado en el área alimenticia por ser considerado por la Administración de alimentos y medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés), como un material generalmente reconocido como seguro (GRAS, por sus siglas en inglés), en el cual es seguro para el contacto con alimentos [5], por lo que se han fabricado muchos elementos de empaque con contenido alimenticio, los cuales han cumplido con sus propiedades mecánicas.

I.2.2.2. Industria médica.

Otras de las áreas de aplicación importante que ha tenido el PLA es en el área médica. Su fuente orgánica ha permitido la posibilidad de utilizar dispositivos en el cuerpo humano con mínima inflamación e infección. Para permitir la curación natural ha obligado a los investigadores a buscar alternativas biocompatibles y biodegradables. Son numerosas las aplicaciones biomédicas y clínicas en andamios, sistemas de administración de fármacos, dispositivos de fijación como tornillos y placas, quirúrgicos tipo suturas y mallas, etc. [6]

La empresa productora de PLA NATUREWORKS expone un listado de aplicaciones disponibles en la que este polímero es usado.

I. Introducción

Tabla I. 1. NatureWorks: gama de aplicaciones de envasado (principalmente para alimentos), película y fibra. [7]

Industria	Aplicación disponible
Termo formas rígidas	Bandejas y tapas transparentes y cortas para la vida útil. Envases lácteos opacos. Exhibidores de consumo y embalaje de productos electrónicos. Artículos desechables. Tazas para bebidas frías.
Orientado biaxialmente	Envoltorio para embalaje de bienes de consumo.
Botellas	Envases de leche y aceite.
Indumentaria	Deportiva y ropa interior. Moda.
Non Woven	Textiles agrícolas, productos de higiene (pañales e higiene femenina), toallitas, forros de zapatos, mezclas de fibras natural: cáñamo, sisal y lino.
Hogar, industrial e institución	Ropa de cama, cortinas, manteles, colchones, tejidos, telas para paredes, cubículos, y tapicería.
Alfombra	Hilados y fibras.
Fiberfill	Almohadas, edredones y colchones.
Espumas	Espumas protectoras estructurales.
Lactide	Materia prima para la producción de lactato de etilo, un solvente de alta pureza.

I.3. TENDENCIAS DE APLICACIÓN.

Las investigaciones actuales se centran en disminuir los costos de producción, en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los polímeros, de igual manera que en la reducción de los recursos empleados en nuevas aplicaciones. El PLA tiene un gran rango de usos debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, las cuales son poco usuales en polímeros, incluso más importantes que su biodegradabilidad.

Unas de las tendencias de aplicación del PLA, es la investigación de aplicaciones en el área de construcción y elementos de refuerzo, mediante el uso de nuevas estructuras tipo sándwich.

I.4. ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH.

Una estructura sándwich consiste en su forma más simple, en dos placas relativamente delgadas de laminado sólido, pegadas y separadas por un núcleo ligero mucho más grueso que las anteriores. El objetivo de este tipo de estructura es aportar ligereza al material, sin comprometer su rigidez. [8]

Las aplicaciones típicas incluyen cascos de barcos, góndolas de motores a reacción, paneles satelitales y revestimientos de edificios. En casi todas las aplicaciones, la carga es de naturaleza cíclica y por lo tanto, la resistencia a la fatiga de la viga ó panel sándwich es motivo de preocupación. [9] Hasta la fecha, los núcleos utilizados en la construcción de sándwich se han limitado en gran medida a madera de balsa, espumas poliméricas y panales de aluminio o poliamida. Sin embargo, los recientes avances en las técnicas de fabricación de metales con espuma han llevado a un producto suficientemente consistente para aplicaciones estructurales. [10]

Las estructuras tipo sándwich normalmente son dos caras del mismo material y dimensiones, las cuales primeramente resisten las cargas que se encuentran en los laterales. Internamente el núcleo del sándwich puede incluir casi nada, ó a su vez, puede variar en espesor, densidad y rigidez. Los núcleos del sándwich pueden ser de casi cualquier material y forma, pero generalmente se encuentran 4 tipos: espuma ó núcleo sólido, panel de abeja, núcleo web y núcleo corrugado. [11]

I. Introducción

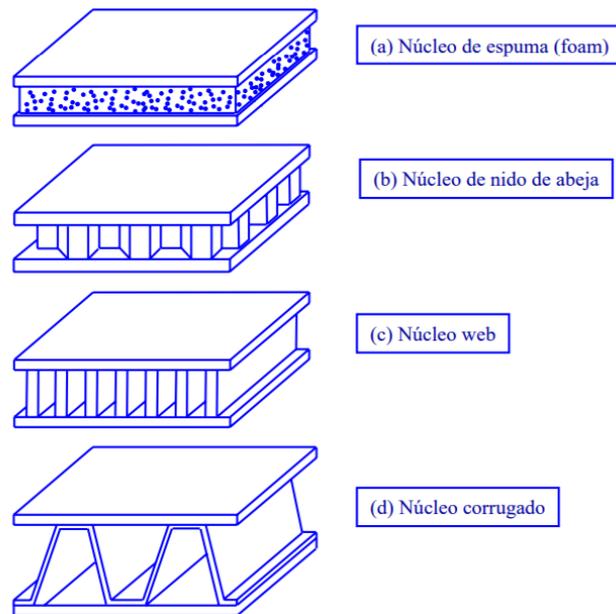


Figura I. 2. Tipos de Núcleos tipo sándwich. A) Espuma, B) Nido de abeja, C) Web y D) Corrugado. [11]

Las estructuras de tipo sándwich tienen una gran posibilidad de combinación de materiales, tanto de sus revestimientos como de sus núcleos, ya que estos juegan un papel crucial en el comportamiento dinámico de las estructuras tipo sándwich cuando son sometidos a diferentes cargas. En los últimos años se han utilizado materiales diferentes que han evolucionado por etapas, en donde sus propiedades varían gradualmente capa por capa dentro de su núcleo hasta darle forma a un elemento compuesto de sándwich. [12]

El presente trabajo se enfoca en un detallado análisis sobre estructuras tipo sándwich con un núcleo de PLA en forma de panal de abeja.

Las estructuras de sándwich utilizadas en aplicaciones aeroespaciales y navales tienden a limitarse a una pequeña gama de combinaciones de materiales. Por ejemplo, un núcleo de espuma metálica generalmente se combina con una lámina de metal; una cara compuesta generalmente se acopla con un núcleo de espuma polimérica ó un panal de papel impregnado de resina. [13]

I. Introducción

Ashby y Bréchet demuestran que se puede lograr un mejor rendimiento utilizando vigas sándwich híbridas que comprenden pares de materiales no tradicionales como lo son los materiales compuestos que se plantean estudiar, formados por núcleos de PLA en forma de panal de abeja. [14]

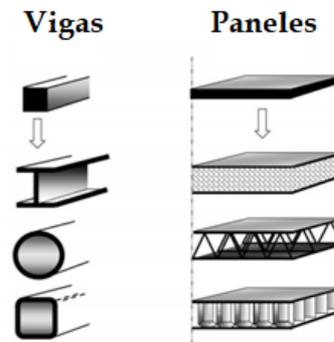


Figura I. 3. Haciendo estructuras de alta eficiencia. La forma le da a las secciones una mayor rigidez a la flexión y resistencia por unidad de masa que la sección sólida de la que están hechas. [14]

Los tipos de materiales no son lo único que se debe tomar en cuenta, sino también la forma en que estos están diseñados. Casi cualquier material puede ser espumoso; los polímeros por supuesto son los más comunes, pero los metales, las cerámicas, los glases e incluso composites pueden fabricarse como sólidos celulares. Algunos ejemplos de sólidos celulares son los paneles de abeja, las espumas con células abiertas y las espumas tridimensionales con células cerradas. [15]

Hoy en día se han propuesto una gran cantidad de materiales centrales y configuraciones de núcleos. Los paneles sándwich más comúnmente utilizados para estructuras de aviones casi invariablemente emplean caras de metal con panal de metal o núcleos corrugado. El panal está formado por tiras de aleación de aluminio delgada o una lámina de acero deformada y unida. [16]

I. Introducción

I.4.1. Núcleo de espuma.

Cuando la capacidad de carga gobierna el diseño, el hallazgo general es que, para los paneles planos sujetos a flexión, la construcción de sándwich con núcleo de espuma no es competitiva en términos de rendimiento. Los paneles de núcleo de nido de abeja son siempre más ligeros para el mismo rendimiento. Sin embargo aún existen oportunidades de implementación, basadas en el costo, la durabilidad y otros criterios de rendimiento, como la retención de fuerza después del impacto. Pero estos necesitan una evaluación más profunda. Por el contrario, se han determinado los beneficios de rendimiento explícitos para configuraciones de núcleo de espuma no planas. Esto sucede porque la isotropía de las espumas, combinada con la naturaleza biaxial de las capas inducidas, se presta a pesos más bajos que los paneles de panal de abeja o de refuerzo. [17]

Recientemente, se ha desarrollado una gama de espumas metálicas con una densidad relativa (definida por la relación entre la densidad de la espuma y la densidad de las paredes celulares). En su mayoría se basan en aleaciones de aluminio, aunque también se están desarrollando espumas de acero y espumas de aleación de níquel resistentes a la fluencia. Las espumas metálicas compiten favorablemente con las espumas de polímero como núcleos livianos de vigas, placas y conchas, debido a la mayor rigidez y a la capacidad de soportar altas temperaturas. Claramente es importante determinar la sensibilidad de la fuerza de colapso y el modo de falla de la geometría estructural, así como las propiedades de los materiales constituyentes. [18]

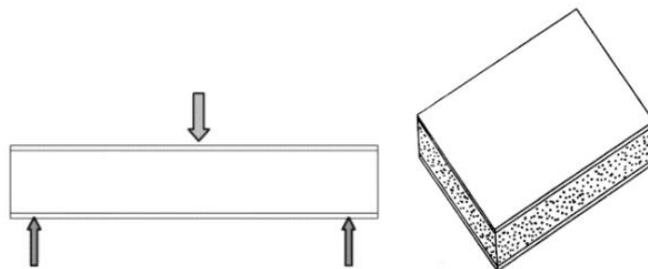


Figura I. 4. Configuración de estructuras tipo sándwich con núcleo de espuma. [19]

I. Introducción

I.4.2. Núcleo corrugado.

El núcleo corrugado es una chapa estriada unida alternativamente a las caras superior e inferior. [19] La construcción en sándwich se ve favorecida para todas las intensidades de carga excepto para las más pesadas, porque, a diferencia de la construcción del revestimiento, es relativamente libre de deformaciones por pandeo en cargas de trabajo. La geometría de núcleo corrugado se define mediante una disposición repetitiva de celdas unitarias, que están determinadas por un conjunto de parámetros geométricos. [20]

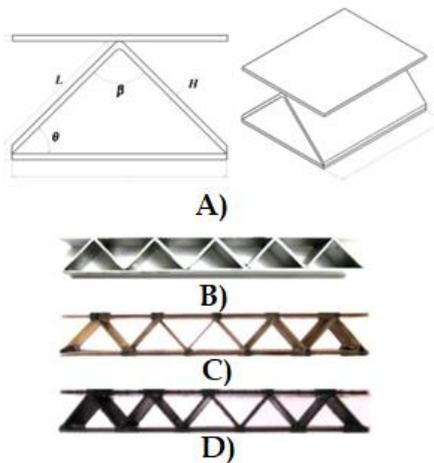


Figura I. 5. A) Geometría unitaria de la celda del panel sándwich de núcleo corrugado. B) Foto de una corrugado de aluminio. C) Corrugado un polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP). D) corrugado de un polímero reforzado con fibra de carbón (CFRP). [21]

Los paneles sándwich de núcleo corrugado poseen características orto-trópicas y es importante comprender las respuestas de la lámina facial, así como el comportamiento del núcleo en las direcciones transversal y longitudinal sometidas a cargas explosivas. [22]

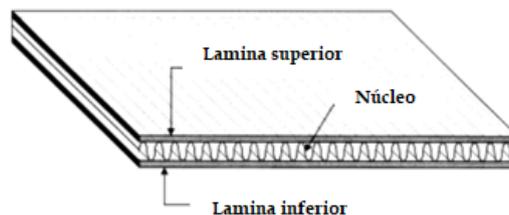


Figura I. 6. Panel corrugado. [23]

I. Introducción

I.4.3. Núcleos panal de abeja.

El panal de abeja (Honeycomb) consiste en una serie de celdas abiertas, formadas por láminas muy finas de material unidas entre sí. Por lo general, las células forman hexágonos tal como se observa en la Figura I. 7.

Una estructura de panal de abeja hace referencia a los panales que construyen las abejas, las cuales se encuentran en la naturaleza, origen por el cual se les atribuye su nombre. Puede estar hecho de cualquier material delgado y plano. En el pasado se han fabricado más de 500 tipos diferentes de panales en forma de abeja. El panal de papel fue el primero elaborado ya hace unos 200 años por los chinos. [24]

A continuación se presenta un resumen de los desarrollos más importantes en la historia de la tecnología de nido de abeja.

Tabla I. 2. Resumen de desarrollos de tecnologías importantes de panales de abeja. [25]

Año	Tecnología
1845	La primera estructura de sándwich fue elaborada con base a la idea de los panales que fabrican de forma natural las abejas, pero utilizando cartón como núcleo y como paneles madera.
1919	Primer panel sándwich de aviones de caoba, la cual era muy delgada, con un núcleo de madera de balsa usado en hidroaviones.
Segunda Guerra Mundial	Guarniciones del emparedado del avión militar en madera de balsa.
1945	Primer panel sándwich de aluminio hecho de revestimientos de aluminio unidos al panal de aluminio.

I. Introducción

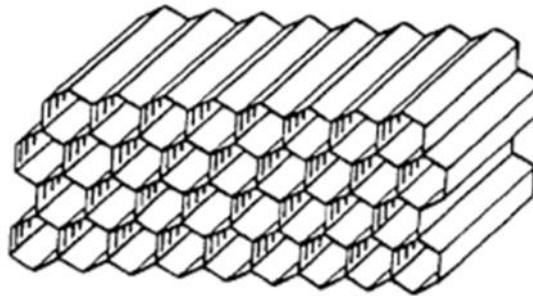


Figura I. 7. Celdas hexagonales de panal de abeja. [26]

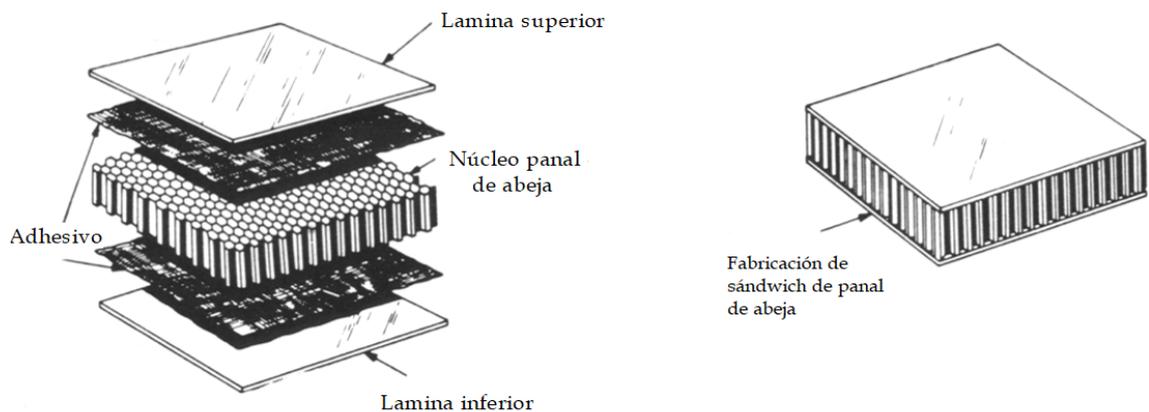


Figura I. 8. Componentes para la fabricación de paneles con núcleo de panal de abeja. [27]

I.5 FORMA DE PANAL DE ABEJA.

En las últimas décadas se ha hecho un gran uso de materiales metálicos ya que éstos proporcionan una gran estabilidad y resistencia mecánica, por lo que su fabricación se ha desarrollado y optimizado, realizándose numerosas técnicas y formas con diferentes materiales metálicos. [28]

Los panales de abeja, también conocidos por su nombre en inglés “Honeycomb” (HC), básicamente consisten en una o varias capas gruesas, unidas de

I. Introducción

manera intercalada a otras delgadas; así los panales se producen uniendo láminas de metal a un núcleo que presenta una forma de nido de abeja.

Estos materiales se caracterizan por ser muy ligeros y a su vez por sus propiedades mecánicas, como lo son su alta rigidez a la flexión y el poder soportar cargas a compresión y flexión.

Las ventajas de las estructuras tipo sándwich con núcleo de panal de abeja es el desarrollo de nuevos materiales y sus aplicaciones en la industria, que puedan cumplir con las necesidades de alto rendimiento y estructuras de bajo peso, siendo estos factores que aseguran que la construcción de sándwich con nido de abeja continúe teniendo una gran demanda de producción. Como se observa en la Figura I. 9, se observa una descripción detallada de una estructura tipo sándwich metálica con núcleo de panal de abeja.

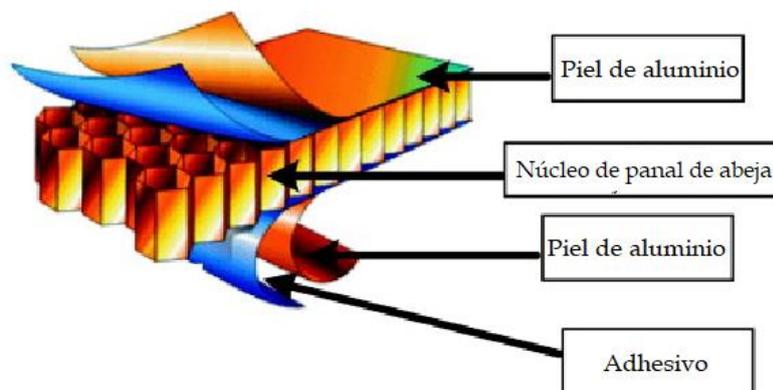


Figura I. 9. Esquema de la descripción detallada de una estructura tipo sándwich metálica con núcleo de panal de abeja. [29]

Los materiales compuestos HC se utilizan cada vez más para reemplazar los materiales tradicionales en aplicaciones con mucha carga. [30] Los núcleos de nido de abeja se describen como sólidos celulares, que utilizan los vacíos para disminuir la masa, manteniendo al mismo tiempo las cualidades de rigidez y absorción de energía.

Sin embargo esta mejora, a un costo relativamente pequeño, en términos de masa, es de gran interés en la industria aeroespacial, la automoción y muchas otras aplicaciones.

I. Introducción

I.6 ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH DE MATERIALES COMPUESTOS CON NÚCLEOS EN FORMA DE PANAL DE ABEJA.

Las estructuras de tipo sándwich, por su composición y amplio rango de materiales a su disposición, permiten una amplia gama de posibilidades de estudio, tanto en relación a las posibles combinaciones de materiales, como también, en el uso de diferente tipo de formas geométricas en sus núcleos, los cuales son factores de gran importancia en función de la aplicación final. De igual manera, se deben tener en cuenta las dimensiones. Todos estos factores se deberán tomar en cuenta para la determinación de los valores finales de resistencia mecánica. [31]

I.6.1. Proceso de fabricación de panales de abeja.

En la actualidad existen diferentes maneras de construcción de estructuras con núcleo de panal de abeja. Buscando nuevos materiales, una de las alternativas es la del uso de poliméricos para la construcción de éstos. Con el tiempo se han ido desarrollando diferentes tipos de núcleos, como también núcleos de tipo panal, debido a que éstos ofrecen aplicaciones de bajo costo. Los núcleos termoplásticos más comunes en el mercado han sido los de tipo tubular. [32]

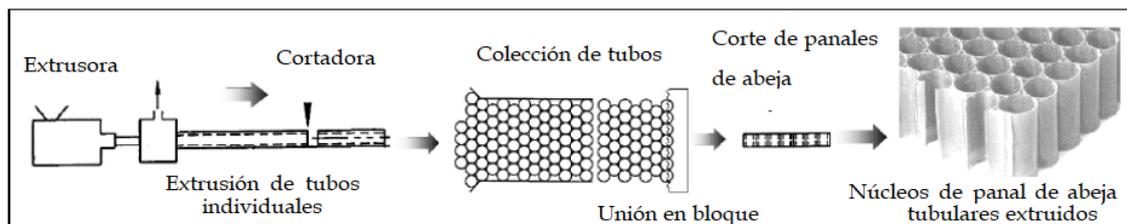


Figura I. 10. Proceso de extrusión de panales de abeja tubulares. [33]

I. Introducción

En la Figura I. 10 se detalla el proceso continuo de fabricación de núcleos de panales tubulares, los cuales fueron uno de los primeros tipos de panales en construirse. El proceso que se describe es aplicable a otro tipo de núcleos celulares y consiste en las siguientes etapas:

- Extrusora.
- Extrusión de tubos individuales.
- Cortadora.
- Colección de tubos.
- Unión en bloque.
- Núcleos de panel de abeja tubulares extruidos.

Una de las empresas que se encarga en la actualidad de la producción de paneles de tipo sándwich con núcleos de panel de abeja, es la empresa Econcore, la cual se encarga de la producción de panales de forma hexagonal.



Figura I. 11. Empresa ECONCORE, productora de núcleos de panel de abeja con forma hexagonal. [34]

Esta empresa en la actualidad utiliza un método patentado de producción de núcleos hexagonales por medio de extrusión. Dispone de una amplia gama de materiales, tamaños y tecnología que le permiten la fabricación de paneles tipo sándwich por medio de la extrusión continua. [35]

I. Introducción

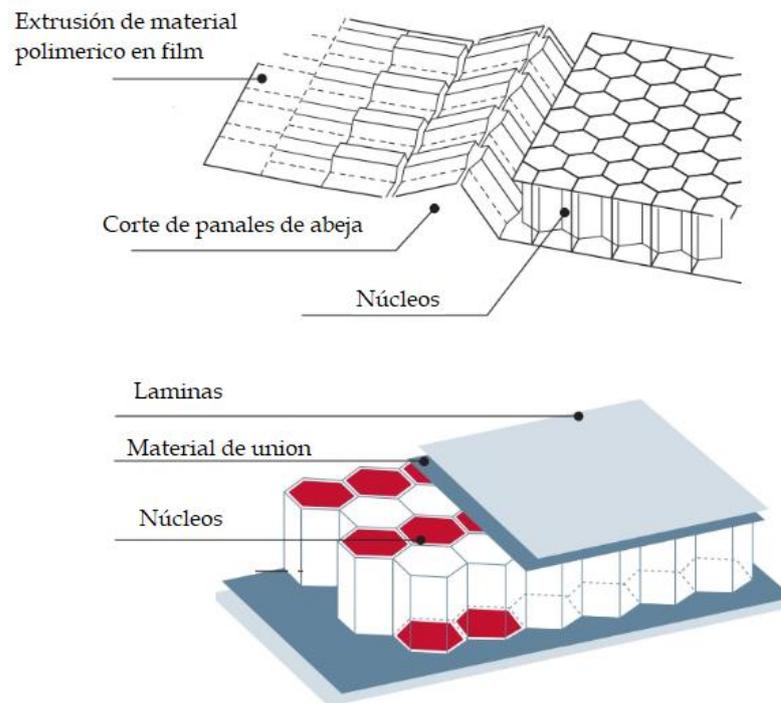


Figura I. 12. Esquema de producción de núcleos hexagonales ECONCORE. [36][37]

I.7. CARACTERIZACIÓN DE SÁNDWICHES EN FORMA DE PANAL DE ABEJA.

Debido a que una estructura tipo sándwich es la conformación de varios tipos de materiales y formas, se precisa hacer uso de normas específicas según sean las pruebas de caracterización que se deseen realizar en el material compuesto.

En la actualidad este tipo de análisis se encuentra en una constante investigación; en ella se hacen evaluaciones de materiales compuestos basándose en materiales metálicos, ya que los datos de sus características son de vital importancia. En el desarrollo de materiales compuestos se han venido utilizando fibras naturales, en conjunción con otros materiales, resinas, plásticos, etc. De manera que en los análisis

I. Introducción

que se hacen a estos materiales es importante conocer los datos de cada material individual y la secuencia en la que éstos se encuentran dispuestos. [38]

En este sentido, parte del estudio que se desea efectuar en este trabajo es el análisis del uso de materiales naturales reforzados con fibras y materiales biodegradables como el PLA.

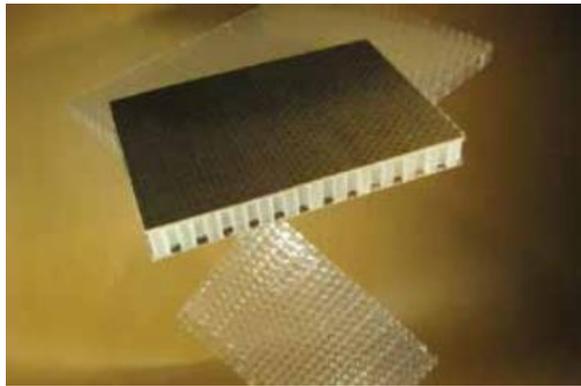


Figura I. 13. Paneles tipo Sándwich con núcleo en forma de panal de abeja. ECONCORE. [36]

Entre las normas que se están utilizando en la actualidad está la de los "ensayos que se realizan a flexión a tres puntos", ésta es la norma ASTM D790M. [39] Por otra parte la norma ASTM C365 regula las mediciones de la fuerza de compresión plana. [40]

En el caso de los ensayos de flexión, normalmente se hace un estudio comparativo entre los materiales, para los que se registran los valores de carga máxima, y módulos del núcleo y sus láminas. Como se muestra en la Figura I. 14 es habitual hacer gráficos de tipo barra, para expresar los resultados de flexión de los materiales compuestos.

I. Introducción

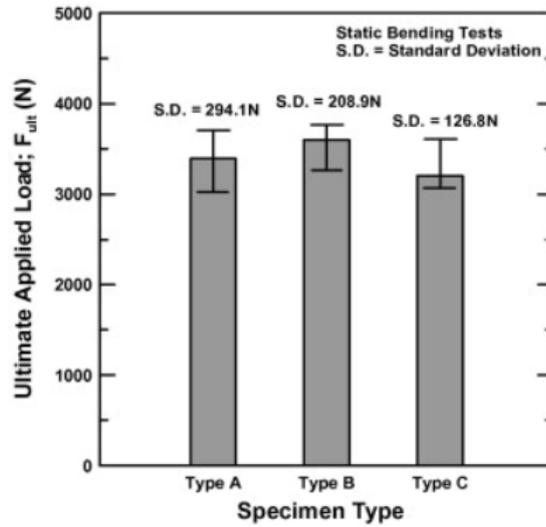


Figura I. 14. Ejemplo de resultados de ensayos a flexión de estructuras tipo sándwich de materiales compuestos. [41]

En la norma ASTM C393 se especifican los parámetros de los ensayos de flexión para estructuras tipo sándwich, en los que el material es sometido a un ensayo basado en 3 puntos, dos de apoyo y 1 de carga utilizando una maquina universal o equipos similares (Figura I. 15). [41]

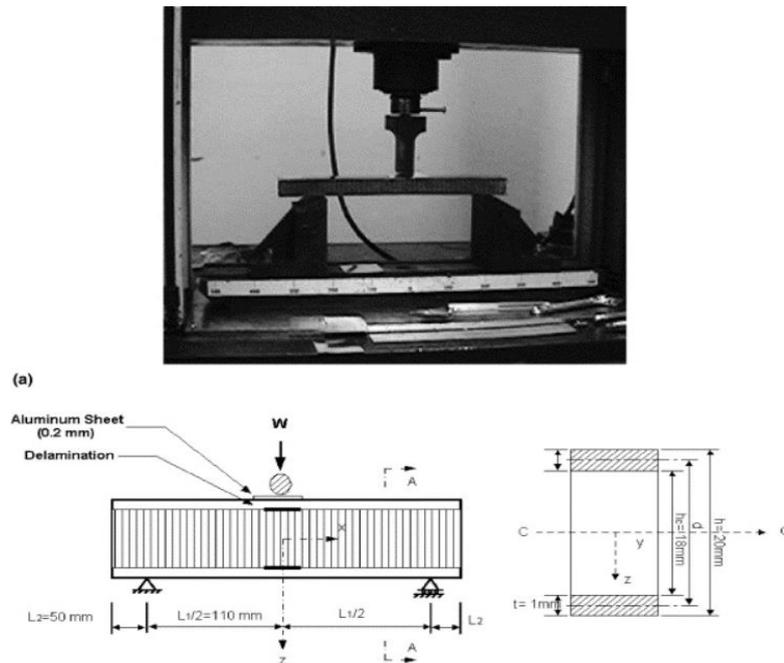


Figura I. 15. Ejemplo de ensayo de flexión en equipo universal para elementos sándwich a 3 puntos. [42]

I. Introducción

I.7.1. Modos de fallo de los paneles tipo sándwich.

Los paneles sándwich normalmente son elaborados de capas puras en su exterior y unidos a un núcleo muy liviano. Cuando se analizan por separado las piezas, la rigidez, fuerza y estructura aumentan, con poco incremento de peso. Por esta razón, los paneles sándwich son muy utilizados en aplicaciones de alto rendimiento, en las que el peso debe ser el mínimo posible, como por ejemplo estructuras aeronáuticas, embarcaciones marinas de alta velocidad. [43]

Los parámetros deseados a conocer son normalmente la rigidez y su resistencia. La rigidez de las estructuras de tipo sándwich con núcleos de panal no es tan difícil de conocer, sin embargo, la fuerza, no es un dato fácil de obtener.

Dentro de las maneras en las que un panel tipo sándwich puede fallar se encuentran las siguientes:

- Deformación en las caras.
- Arrugas en las caras.
- Agujeros en las estructuras intracelulares.
- Rotura del núcleo.
- Indentación local.

Hay que tener en cuenta que los modos de fallo de los paneles tipo sándwich están muy relacionados con los materiales del núcleo, así como también con la geometría total de los elementos a estudiar.



Figura I. 16. Modos de fallo en estructuras tipo sándwich. [43]

I. Introducción

I.8. MEMORIA DE FORMA.

Los estudios de memoria de forma están tomando mucha importancia en la actualidad, siendo que en numerosos documentos se identifica esta cualidad como estructura activa de 4D, es decir 4 dimensiones. Estos materiales pueden controlarse en el espacio y tiempo mediante esta nueva propiedad, lo que los hace muy atractivos. Sin embargo el enfoque de procesado convencional restringe el diseño de estos materiales inteligentes.

Las estructuras 4D permiten el cambio de su geometría definida. Este comportamiento puede ser activado por control remoto y térmico mediante el uso de tintas de PLA reticuladas por radiación ultravioleta, o también mediante la aplicación de elementos metálicos en los plásticos que permitan la conducción de corriente o polarización de cargas, generando así un mayor desarrollo de la impresión 4D, robótica blanda, electrónica flexible, medicina mínimamente invasiva, etc. [44]

La termo-respuesta de memoria de forma es una de las cualidades que presentan los materiales inteligentes de tipo polimérico, la cual consiste en recuperar su forma original en caso de que ésta haya sido deformada de alguna manera, empleando para ello el calor. [45]

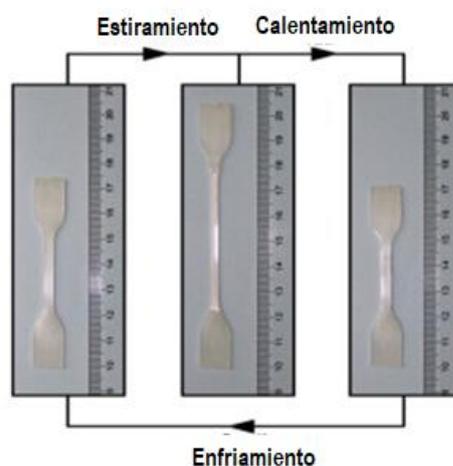


Figura I. 17. Caracterización de memoria de forma mediante proceso de tracción en materiales plásticos. [46]

I. Introducción

Uno de los procesos básicos de la caracterización de la propiedad de memoria de forma de los materiales es el que se describe a continuación (Figura I. 17). Mediante el estiramiento de un material, se origina una deformación plástica, siendo que el material tiene un cierto nivel de recuperación de forma, sin embargo no es suficiente para llegar a su estado original. El calentamiento permite a este tipo de materiales contraerse y recuperar su estado original (Figura I. 18).

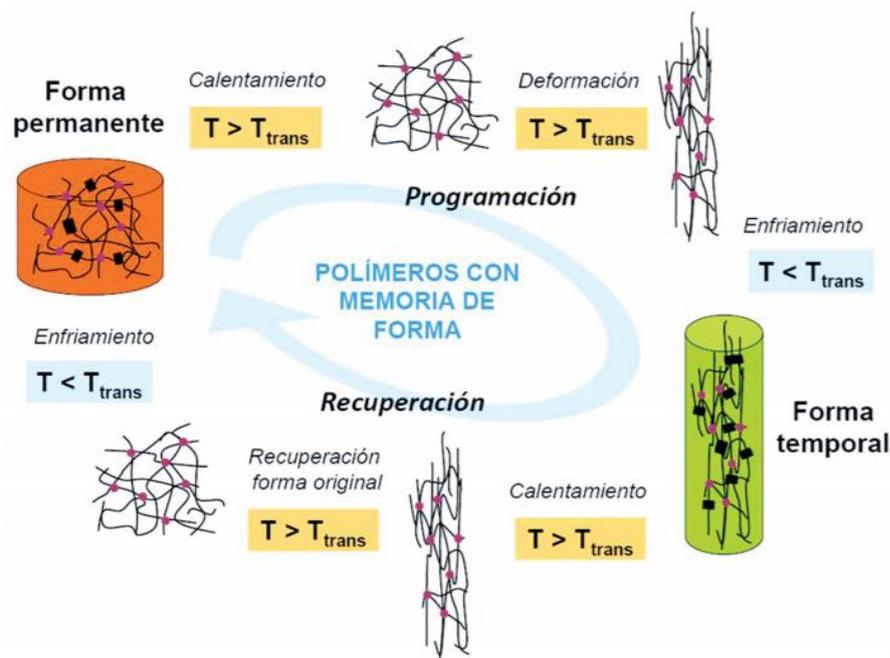


Figura I. 18. Diagrama del efecto de memoria de forma de un polímero semicristalino. [47]

II. OBJETIVOS

OBJETIVOS

II. Objetivos

II.1. OBJETIVO GENERAL.

El objetivo central del proyecto es el desarrollo de nuevas estructuras tipo sándwich, altamente ligeras y de alto rendimiento medioambiental mediante el empleo de ácido poliláctico (PLA).

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

Los objetivos parciales son:

- Revisión bibliográfica y estudio del estado del arte.
- Obtención de núcleos hexagonales y otras estructuras para núcleos de compuestos ecológicos.
- Fabricación de paneles de compuestos ecológicos con núcleos derivados del PLA.
- Caracterización de estructuras de paneles.
- Análisis de memoria de forma de films de PLA con forma hexagonal.

III. DESARROLLO

DESARROLLO

III. Desarrollo

III.1. MOLDE.

Para el desarrollo de los núcleos de geometría hexagonal, en forma de panal de abeja, se precisa de la elaboración de un molde, el cual por medio de aplicación de calor y presión permita modificar la forma de material termoplástico. Mediante el moldeado del material termoplástico, se modifica su geometría adoptando la del molde, por lo que éste debe tener las dimensiones adecuadas para generar hexágonos simétricos.

Para construir dicho molde se debe tener en cuenta la disponibilidad de materiales y herramientas en el mercado Español. La geometría de un hexágono varía en las dimensiones de sus caras, sin embargo, la dirección de su ángulo no varía ya que siempre es de 60 grados de una cara a otra, por lo cual, se hace preciso encontrar una herramienta de corte que permita la generación de esta geometría para ser utilizada en una fresadora.



Figura III. 1. Herramienta de corte, fresa 16mm x 6.3 mm HSSE.

En la Figura III. 1 se puede observar una herramienta de corte tipo fresa con las medidas de 16 mm x 6,3 mm de acero de alta velocidad con contenido de cobalto (HSS-E). Las medidas corresponden al diámetro externo y a la altura, lo cual permite hacer una estimación para el cálculo y desarrollo de los planos del molde, a su vez estipular los pasos a realizar para la fabricación del mismo.

III. Desarrollo

En la Figura III. 2, se indican las medidas de la herramienta, dado que se desconoce el diámetro inferior de la herramienta, medida necesaria para definir las distancias a las que la herramienta debe remover el material del molde para así poder generar la geometría de un panal de abeja.

Se hace énfasis en el uso de 3 decimales para el cálculo, planos y fabricación del molde, debido a que se requiere de la precisión necesaria para posteriormente fabricar núcleos de PLA con films que tendrán valores de espesor en un rango de 50 μm a 500 μm .

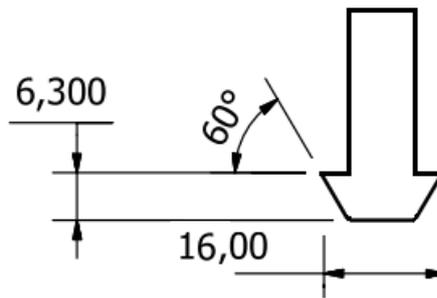


Figura III. 2. Herramienta de corte y dimensiones.

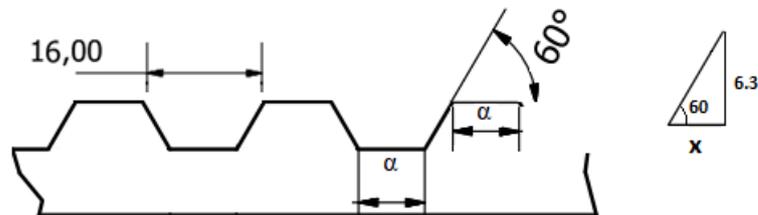


Figura III. 3. Medidas de molde y cálculos para su fabricación.

$$\text{Tan } 60^\circ = \frac{6.3}{x}$$

$$x = \frac{6.3}{\text{Tan } 60^\circ} = 3.637 \text{ mm}$$

$$\alpha = 16 - 2x = 8.725 \text{ mm}$$

III. Desarrollo

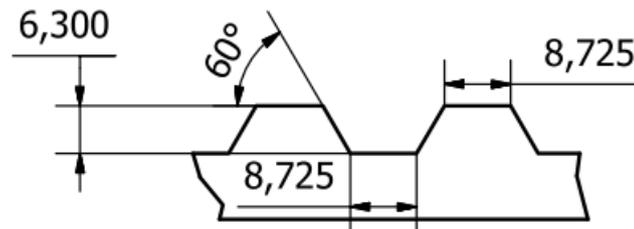


Figura III. 4. Cotas definidas por cálculos para construcción de molde.

III.1.1. Modelo 3D.

Mediante el programa Autodesk Inventor se realizó un modelo en 3D, gracias al cual se tiene la idea de cómo se visualizará el modelo real.

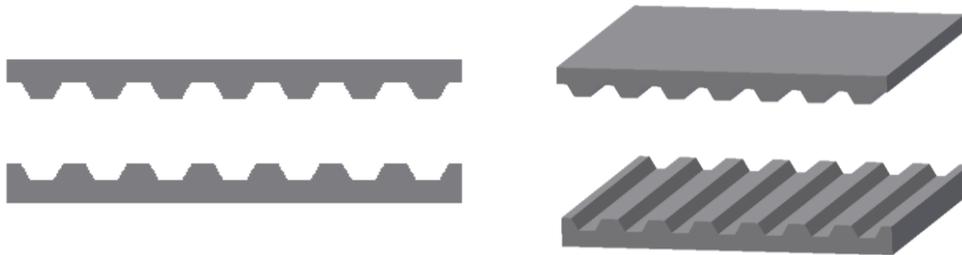


Figura III. 5. Modelo 3D molde de panal de abeja. AUTODESK INVENTOR 2018.

III.1.2. Planos molde aluminio.

Una vez creado el elemento en 3D, se procedió a la realización de los planos, los cuales determinarán los pasos a seguir para la realización del molde. A su vez se especifican, las dimensiones, herramientas y equipo a utilizar para los acabados específicos del material. (Ver apéndice V.2. PLANOS.)

III. Desarrollo

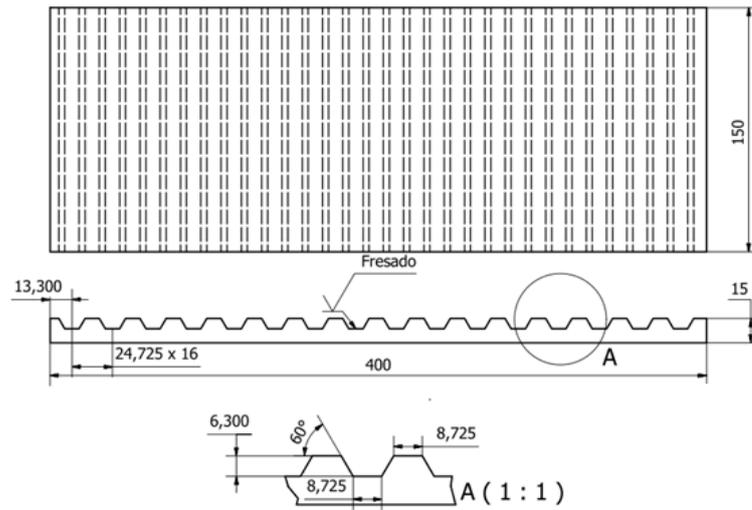


Figura III. 6. Molde estructural panel de abeja 1/3. AUTODESK INVENTOR 2018.

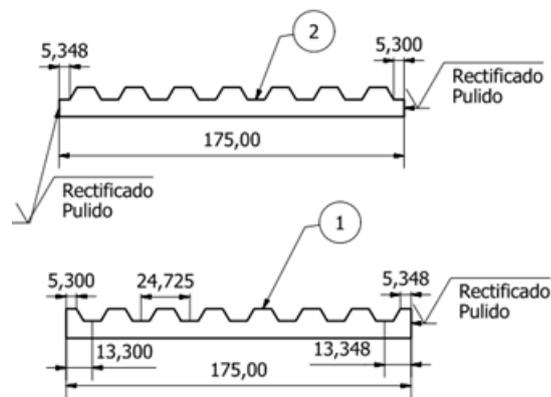


Figura III. 7. Molde estructural panel de abeja 2/3. AUTODESK INVENTOR 2018.

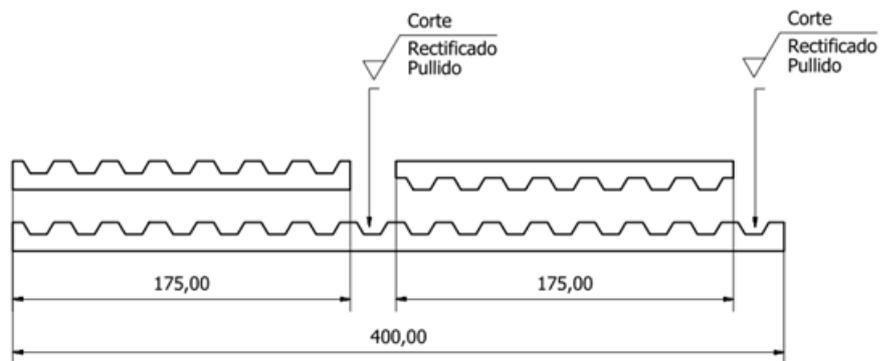


Figura III. 8. Molde estructural panel de abeja 3/3. AUTODESK INVENTOR 2018.

III. Desarrollo

III.1.3. Corte.

Para la elaboración del molde es preciso del uso de equipos de corte y equipo de mecanizado (fresadora).

Mediante el equipo de corte se pudieron obtener 2 trozos de aluminio, para así poder generar la parte superior e inferior del molde según las dimensiones definidas en los planos desarrollados. El material utilizado para el molde fue Aluminio 6082-T6 del proveedor BRONCESVAL. S.L.



Figura III. 9. Proceso de corte de material de aluminio.

III.1.4. Fresado.

Una vez el material ha sido cortado, se procede a su mecanizado en el equipo WEISS WUM 100, equipo de fresado universal, en el cual mediante su control numérico y controles automáticos permite realizar las modificaciones de manera más específica y con mayor precisión.

III. Desarrollo

Inicialmente se utiliza una fresa de 5 mm de diámetro a una profundidad de 3 milímetros. En la Tabla III. 1, se definen los datos de distancia entre los tramos a fresar, en el que se han definido el uso de 3 decimales para mayor precisión.

Tabla III. 1. Datos de distancia de separación de tramos a fresar.

PASO	DISTANCIA(mm)
1	13,300
2	38,025
3	62,750
4	87,475
5	112,200
6	136,925
7	161,650
8	186,375
9	211,100

Para la elaboración del molde, como se ha comentado anteriormente se deben definir los parámetros a trabajar, esto es la velocidad de corte y avance a la cual se removerá el material, siendo que después en el equipo, mediante unas palancas, se estipulan dichas velocidades de trabajo. Como se observa en la Tabla III. 2 la fresadora presenta los parámetros de trabajo, por lo que inicialmente se utilizaron los parámetros H III C, lo que equivale a una velocidad de giro de 1660 revoluciones por minuto.

III. Desarrollo

Tabla III. 2. Parámetros de giro de fresadora.

50 HZ/ Rev./min	O	A	B	C	
I	0	45	80	195	
L	II	0	115	210	495
	I	340	-	-	-
M	II	850	-	-	-
	H	III	0	380	675

En la Tabla III. 3, se muestran los parámetros de velocidad de avance longitudinal, haciendo referencia al eje X del control numérico, por lo que se utilizó la secuencia de palancas B L, que permite un avance de 55 milímetros por minuto.

Tabla III. 3. Parámetros de velocidad de avance en sentido longitudinal. Eje X.

50 HZ	mm/ min
	24 L
A	42 M
	74 H
	55 L
B	98 M
	170 H
	132 L
C	230 M
	402 H

III. Desarrollo

Como se observa en la Figura III. 11 el proceso de desbaste del material, se realizó en ambas piezas, la parte superior e inferior del molde. En cada una de ellas se trabajó de igual manera, primero mediante el uso de la fresa de 5 milímetros de diámetro que permitió la realización de los canales por donde después pasaría la fresa que genere la geometría deseada.



Figura III. 11. Montaje y modificación previa de pieza de aluminio en equipo fresadora con herramienta de corte de 5 mm.

Inicialmente la fresa de 5 mm realizó dos pasos, a 3 milímetros de profundidad, y otro luego lo hace a 6 mm. Mediante el uso de taladrina se evitó el calentamiento en la herramienta de corte y en el material de manera que no se comprometiera la superficie.

Una vez realizado el primer proceso de fresado a una profundidad de 6 milímetros en ambas piezas, la superior e inferior, se procede a hacer el cambio a una herramienta cónica, la cual permitirá desbastar el material de una manera más adecuada sin sobre esfuerzo mecánico ni térmico, ya que de lo contrario la herramienta de corte pierde su acabado superficial y el corte no es el adecuado. De nuevo se hace uso de taladrina de manera constante, con el fin de refrigerar la herramienta y el material, rebajando el posible calor.

El cambio de herramienta de corte supone especificar nuevamente un punto inicial de referencia (0, 0, 0), en el cual se repitan los mismos desplazamientos en los ejes para que el corte de la nueva fresa cónica sea lo más preciso posible.

III. Desarrollo

El procedimiento de fresado con la nueva herramienta de corte cónica es diferente, ya que el corte que realiza tiene un ángulo de 60 grados de inclinación, por lo cual el corte de material es mayor. Por ello para mantener un buen acabado sin comprometer la herramienta, se hace un cambio en el giro de corte del equipo.

Los parámetros anteriormente utilizados son H III C, lo cual es una velocidad de giro de 1660 revoluciones por minuto. Ahora se emplearan los parámetros H III B, que permitan un giro de 675 revoluciones por minuto.

EL procedimiento de corte y desbaste también cambia, ya que inicialmente se sometió a una profundidad de 3 milímetros inicialmente para ver su comportamiento, sin embargo ahora se procederá a hacer pasadas de corte de 1 milímetro hasta llegar a una profundidad de 6 milímetros (Figura III. 12).



Figura III. 12 . Cortes realizados por la herramienta hexagonal en pieza de aluminio superior e inferior.

Una vez terminado el procedimiento de fresado, se ha procedido a hacer un corte más en una de las piezas del molde, como se observa en la Figura III. 13, una de las piezas es más grande que la otra, por la que se corta el exceso de material para que ambas piezas del molde tengan el mismo tamaño (20 cm x 20 cm). Una vez listas ambas piezas, superior e inferior, se corroboró la geometría de las piezas mediante la sobre posición de una con la otra, de manera que los canales se juntaran y permitieran un adecuada tolerancia entre ellas.

III. Desarrollo



Figura III. 13. Molde de panal de abeja de 20 x 20 cm, parte superior e inferior cortada y fresada.

III. Desarrollo

III.2. FILM PLA.

Para la realización de los núcleos de panal de abeja con PLA es necesario tener el material en formato de film. Como se observa en la Figura 0 14, se utiliza PLA en granza para film INGENIO BIOPOLYMER de la marca NATUREWORK. Este se introduce en la maquina extrusora MINI CAST 25 de EUROTTECH EXTRUSION MACHINERY SRL.

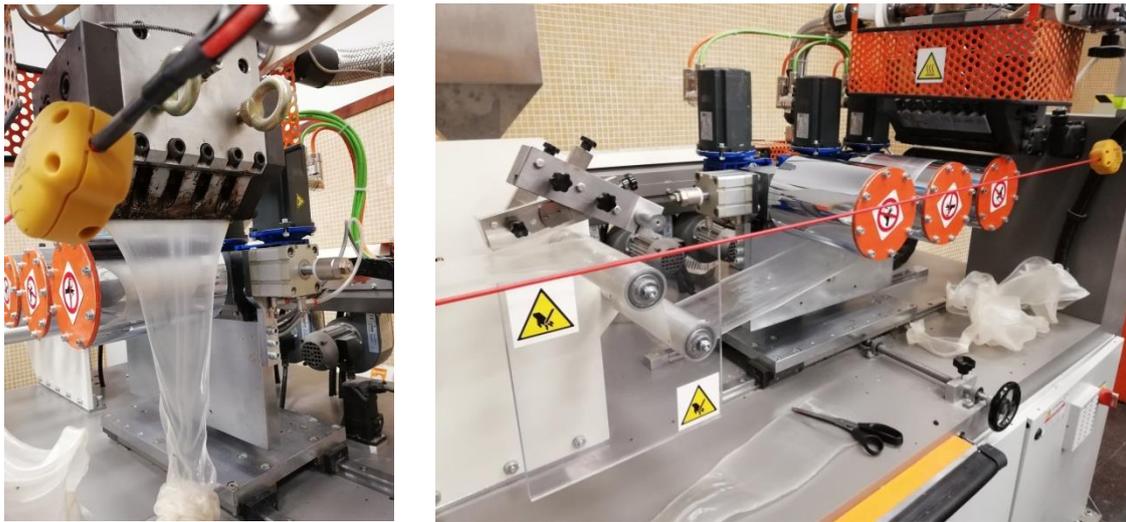


Figura III. 14. Eurotech extrusion machinery srl. Machine type mini cast 25.

III. Desarrollo

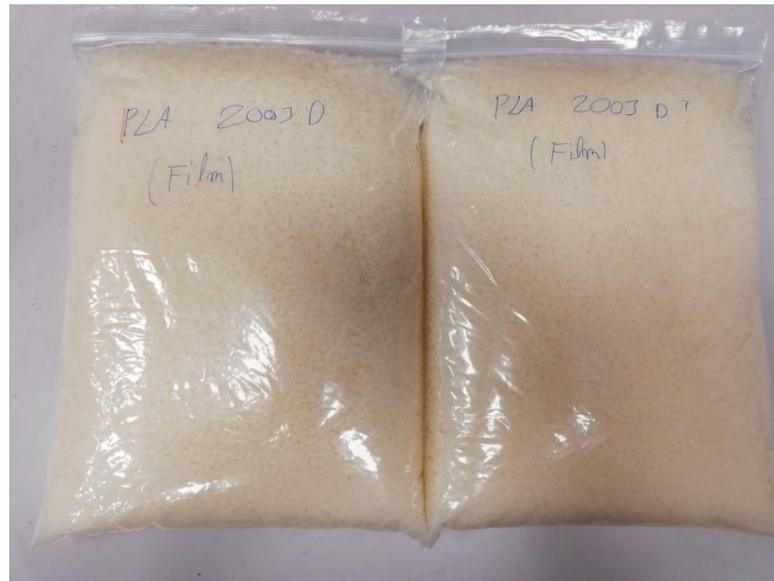


Figura III. 15. Film PLA. INGEO BIOPOLYMER. NATUREWORK

El material en granza se coloca en la maquina extrusora, que funde el PLA mediante la aplicación de calor. Con la ayuda de unos rodillos, el material adopta la forma a la vez que es estirado para poder manipularlo y generar film con diferentes dimensiones. La máquina extrusora mediante su control de parámetros permite la modificación de las velocidades de rodillos, la velocidad del husillo para generar más film y la temperatura de fundición del material. Los parámetros se adaptaron para generar un rango amplio de PLA tipo film de diferentes espesores, con el objetivo de realizar diferentes pruebas, e identificar el espesor más adecuado que permita moldear el film en el molde mediante presión y temperatura.

Inicialmente la extrusora debe someterse a un ciclo de limpieza con el material a trabajar, de manera que este no contenga ningún tipo de residuo y así garantizar que el material sea lo más puro posible para poder generar un buen film.

Los parámetros iniciales son definidos a partir del material a procesar, por lo que la extrusora debe trabajar a una temperatura en la que el material funde. El punto de fusión del PLA está en el rango de 150 °C a 160 °C, por ello las temperaturas a las que se programara la maquina están en el rango de los 200 °C para garantizar que el material pueda desplazarse de mejor manera, ya que con más temperatura el plástico funde y se vuelve menos viscoso.

III. Desarrollo

Las velocidades de los rodillos, la del rodillo colector y la del husillo, se deben ajustar en función del espesor que se quiera generar. En este sentido al aumentar la velocidad del husillo se permite el paso de más material a los cilindros, por lo que si se desea obtener espesores grandes la velocidad de los rodillos y del colector debe ser lenta. Para la fabricación de film de espesores más finos las velocidades de los rodillos deben ser rápidas y generar más tensión. En la Figura III. 16 se pueden apreciar los parámetros utilizados para los 4 tipos de film. Como se observa en la imagen, el parámetro que más muestra cambio es el del extrusor, ya que de éste depende el paso de más material para los rodillos.



Figura III. 16. Parámetros de funcionamiento de maquina extrusora. EUROTECH EXTRUSION MACHINERY SRL. A) 50 μm , B) 100 μm , C) 250 μm , D) 500 μm .

III. Desarrollo

Tabla III. 1. Espesores de film de PLA elaborados para determinación de mejor opción para núcleos de PLA.

Esesores de film de PLA (μm)	Velocidad Extrusor (rpm)	Velocidad calandra (m/min)	Velocidad Arrastre (%)
50 μm	43	0,9	13,3
100 μm	46	0,9	13,4
250 μm	51	0,2	13
500 μm	55	0,1	13

La Tabla III. 1 resume los parámetros utilizados para la fabricación de los diferentes films con espesores distintos. Para la obtención de dicho parámetros se realizaron varias pruebas para poder determinar las velocidades de giro de los elementos de la extrusora hasta obtener las dimensiones deseadas. Como se muestra en la Figura III. 17, en función de los parámetros establecidos en la extrusora, se generaron los diferentes films de PLA, el cual es la materia prima para la realización de los núcleos de panal de abeja.



Figura III. 17. Films de PLA de 50 μm , 100 μm , 250 μm , 500 μm .

III. Desarrollo

Para un mejor control en el desarrollo del film se realizó una inspección de todos los espesores mediante el uso de un micrómetro. Las mediciones se efectuaron en 8 puntos, determinándose que los espesores laterales variaban en un promedio de 10 micras, por lo que para el proceso de fabricación se tomaría como área efectiva la del centro en la cual el espesor se mantenía constante en todo el film. Por este motivo se cortaron piezas de 19 cm x 19 cm del centro de cada film para poder generar las primeras pruebas en el molde de aluminio.



Figura III. 18. Inspección de espesor en film generado en maquina extrusora mediante el uso de micrómetro.

III. Desarrollo

III.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN.

III.3.1. Fabricación núcleos de panal de abeja.

Para la generación de los núcleos de panal de abeja se empleó la máquina de termo-compresión de la casa proveedora ROBMA (Figura III. 19). Se realizaron primeras pruebas preliminares para poder identificar las propiedades del film de PLA, así como también identificar los mejores parámetros para moldeo, presión, temperatura y tiempo. Se procedió a probar con un valor de 120 .C, a una presión de 8 toneladas. Como paso inicial se introdujo el molde con un film de 250 μm dentro en la máquina de termo compresión a la temperatura indicada (Figura III. 20). Se procedió a juntar los platos calientes al molde de manera que comenzara el proceso de transferencia de calor. Se estimó un tiempo de 1 minuto para que el molde ganara temperatura y el film comenzara a reblandecer. Una vez pasado el primer minuto se procedió a la aplicación de una presión de 8 toneladas en el molde y se esperó 1 minuto más a presión y temperatura constante. Una vez transcurrido el tiempo se procedió a sacar el molde y dejarlo enfriar. El tiempo medido para el enfriamiento del molde fue de 10 minutos.



Figura III. 19. Equipo de termo-compresión.

III. Desarrollo



Figura III. 20. Prueba de fabricación de núcleo de panal de abeja con film de 250 μm en termocompresora.

Tabla III. 4. Parámetros iniciales de prueba para fabricación de núcleos de panal de abeja mediante temperatura y presión.

Temperatura de platos calientes ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de reblandecimiento sin presión (min.)	Presión (Ton.)	Tiempo de exposición de temperatura y presión (min.)	Tiempo de enfriamiento (min.)
110	1	8	1	10

Una vez realizada la primera prueba se procedió a la revisión de los resultados. Se pudo notar que se había logrado moldear la geometría del molde, sin embargo ésta no estaba del todo uniforme, por lo que se decidió llevar a cabo más pruebas aplicando más temperatura y aumentando el tiempo de exposición.

Tabla III. 5. Parámetros finales para fabricación de núcleos de panal de abeja mediante temperatura y presión.

Temperatura de platos calientes ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de reblandecimiento sin presión (min.)	Presión (Ton.)	Tiempo de exposición de temperatura y presión (min.)	Tiempo de enfriamiento (min.)
135	1	8	2	10

III. Desarrollo

Con estos nuevos parámetros se obtuvieron mejores resultados, ya que la geometría del molde quedaba plasmada completamente en el film. De acuerdo con esto se procedió a realizar pruebas con diferentes espesores de film, para comprobar si el comportamiento del material cambiaba en base a los distintos espesores, y a la vez corroborar si era necesario cambiar los parámetros de la máquina en función de los diferentes espesores.



Figura III. 21. Moldeo por temperatura y presión con films de PLA de 50 μm , 100 μm , 250 μm y 500 μm .

III. Desarrollo

Tras la elaboración de los distintos formatos con diferentes espesores, para la fabricación del núcleo se constataron las observaciones que se describen en la Tabla III. 6.

Tabla III. 6. Observaciones de las propiedades de los núcleos en función de su espesor.

Espesores de film de PLA (μm)	Geometría	Observaciones
50	Excelente	Muy flexible, pero no tiene la suficiente estabilidad.
100		Flexible, pero no tiene la suficiente estabilidad.
250		Flexible y tiene mucha estabilidad.
500		Muy rígido, fácil de romper, posee muy poca flexibilidad.

Del análisis de estas observaciones se concluyó que el espesor más adecuado era el de 250 μm y se procedió con este espesor a la fabricación de núcleos.



Figura III. 22. Núcleo de PLA en forma de panal de abeja.

Como se observa en la Figura III. 22, se fabricaron núcleos de 19 cm x 19 cm, los cuales se fueron apilando uno encima del otro.

III. Desarrollo

Para la unión de una sección con la otra se realizaron 2 pruebas:

Unión por calor. Mediante una pistola de calor se realizó la prueba de adherencia de una sección con la otra, sin embargo se identificó que al aplicar calor al material éste perdía la forma hexagonal, por lo que se descartó esta opción.

Unión por pegamento epoxi. Mediante el uso de un pegamento LOCTITE se llevó a cabo la prueba de adherencia del material y se identificó que éste lograba una muy buena adherencia, por lo que se procedió a realizar las uniones con dicho pegamento.

Como se observa en la Figura III. 22, los paneles al ser colocados de tal manera deberían de ser cortados para generar los núcleos. Mediante el proceso de corte se identificó que la manera en que se realizaba dicho corte no era la adecuada, ya que se ejercía mucha presión en los núcleos, por lo que se planteó un nuevo proceso de fabricación.

Se planteó la fabricación de 3 tipos de núcleos en los cuales cambiaría la altura del sándwich. Los tamaños de núcleo de sándwich se establecidos fueron: 1 cm de altura, 2 cm de altura y 3 cm de altura.

Para la fabricación de estos núcleos se realizaron cintas de PLA, todas de 20 cm de largo, cambiando únicamente el ancho según el tamaño del núcleo.

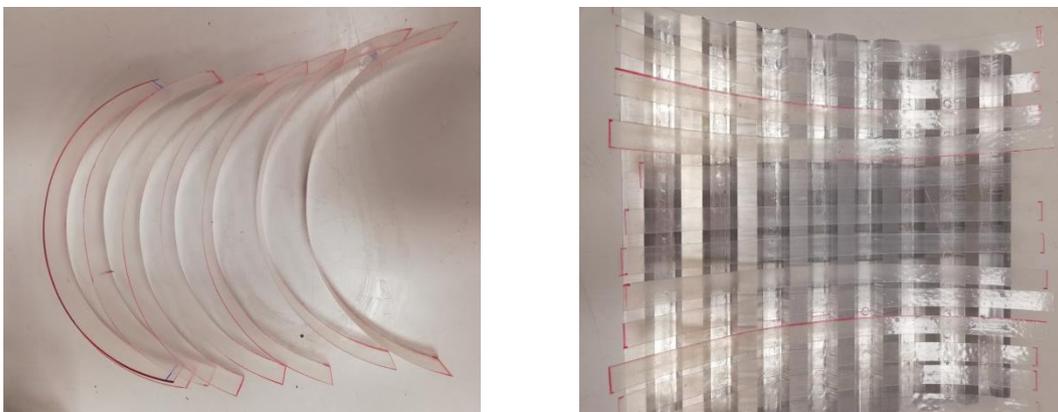


Figura III. 23. Films de PLA de 20cm de longitud, 1 cm de ancho.

III. Desarrollo

Como se observa en la Figura III. 23, los films cortados se colocaron en el molde para proceder a su elaboración y evaluar el nuevo procedimiento de fabricación.



Figura III. 24. A) Film de PLA de 1 cm después de conformado. B) Núcleo de PLA de 1 cm en forma de panal de abeja.



Figura III. 25. Núcleo de PLA en forma de panal de abeja de 20 cm x 20 cm.

Como se muestra en la Figura III. 25, luego de pegar todos los films uno sobre otro, se formó un núcleo hasta llegar a la medida de 20 x 20 cm, la misma medida que los paneles para completar el sándwich. De la misma manera se procedió a la fabricación de los demás núcleos (Figura III. 27).

III. Desarrollo



Figura III. 26. Adhesivo LOCTITE 401 HENKEL.

Para la unión de cada film moldeado para generar el panel de abeja se hizo uso de un adhesivo instantáneo universal, LOCTITE 401 de HENKEL, el cual presentó muy buenos resultados en la unión con los plásticos, lo que permitió la fabricación de los paneles de manera muy rápida (Figura III. 26).

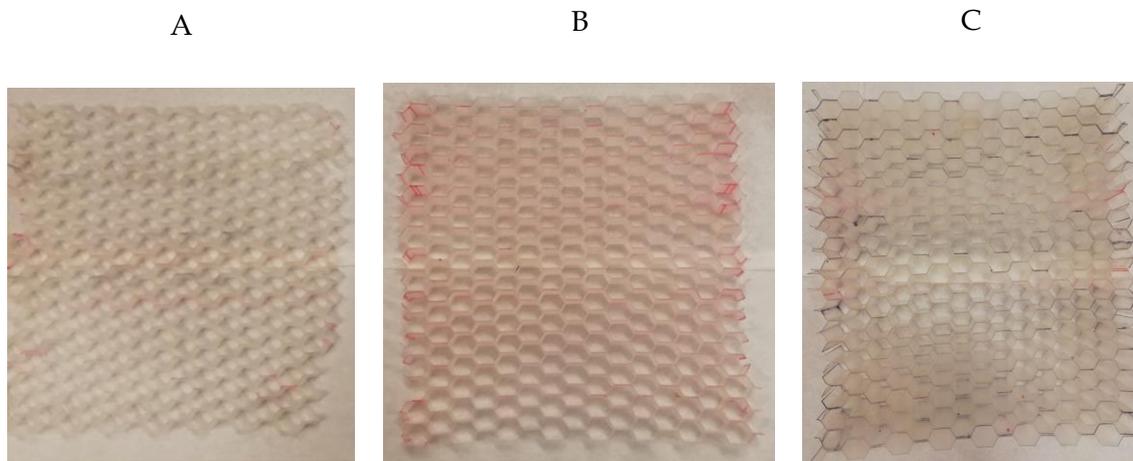


Figura III. 27. Núcleos de PLA de 20 cm x 20 cm A) 1 cm altura, B) 2 cm altura y C) 3 cm altura.

III. Desarrollo

III.3.2. Fabricación láminas de Sándwich.

Una vez realizados los núcleos, se procedió a la realización de las paredes del sándwich. Para la fabricación de estos paneles se optó por una fibra natura de lino, el cual por sus propiedades mecánicas, se puede usar como tejido, siendo que el material elegido consta además de fibras de PLA tejido. El proveedor de este material es BIOTEX y la denominación es 40% FLAX/ PLA 4x4 hopsack fabric. Al ser sometido a calor y presión, permite que el PLA funda y este pueda mezclarse con el lino generando un material compuesto de altas propiedades mecánicas, a su vez, al ser el lino de origen vegetal en conjunto con el PLA es un material degradable en la naturaleza, al igual que los núcleos de panal de abeja.



Figura III. 28. BIOTEX 40% FLAX/ PLA 4x 4 HOPSACK FABRICS.

Para la fabricación de las láminas se empleó nuevamente la máquina de termo-compresión. Inicialmente se cortaron muestras de 20 x 20 cm, de manera que se contara con la misma área que tienen los núcleos de PLA.

Mediante el uso de 2 placas de acero, recubiertas con un film de teflón para evitar la unión del material tejido con las placas, se realizó la termo-compresión vigilando que las placas mantuvieran una forma plana.



Figura III. 29. Placas de acero recubiertas con film de teflón resistente al calor.

III. Desarrollo

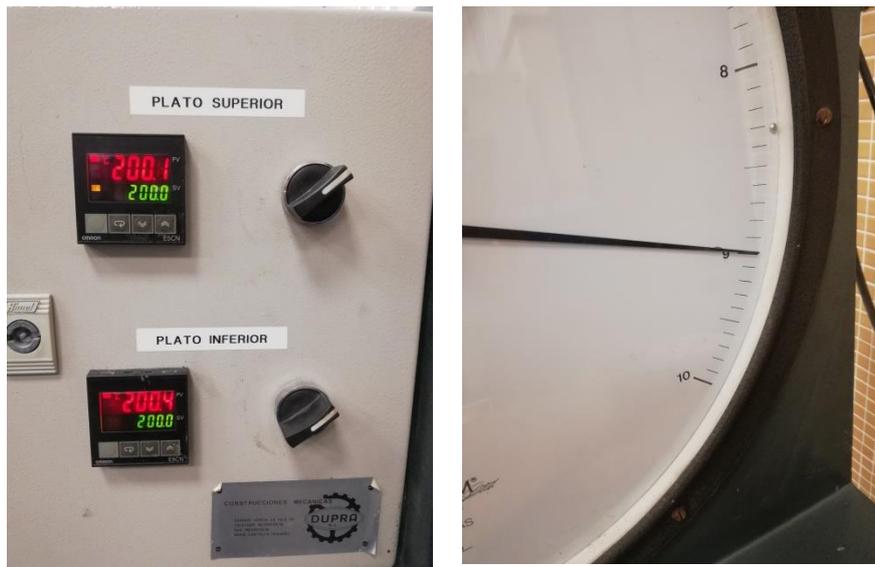


Figura III. 31. Indicadores de máquina de termo compresión a temperatura de 200 °C y presión de 9 toneladas.



Figura III. 32. Lamias de Lino + PLA antes y después de ser sometidas a temperatura y presión.

III. Desarrollo

Como se observa en la Figura III. 32 se realizaron las láminas con 4 pliegos del material, sin embargo se identificó que con 4 pliegos éstas eran demasiado rígidas, por lo que no se lograría caracterizar de buena manera todo el sándwich, ya que se buscaba identificar las propiedades de los núcleos. Por ello se optó por realizar las láminas únicamente con 2 pliegos, manteniendo los mismos parámetros para su elaboración.

III.3.3. Pruebas previas con diferentes adhesivos.

Para la unión entre las láminas del sándwich y los núcleos se realizaron varias pruebas empleando diferentes materiales, con el objetivo de analizar que adhesivo se comportaba mejor para la unión de todos los elementos.

La unión de los elementos incluye el uso de un material no tejido (non-woven) de manera que se garantice la unión entre el núcleo y las láminas.

Para la prueba de adhesivos se utilizaron los siguientes elementos:

- Poliuretano.
- Pegamento a base de agua.
- Pegamento Epoxi.
- Resina ECO Epoxi.



Figura III. 33. Sándwiches de prueba con diferentes tipos de materiales y adhesivos.

III. Desarrollo

Como se observa en la Figura III. 33, diferentes sándwiches con distintos núcleos, laminas y pegamentos fueron probados, sin embargo ninguno de ellos presentó una buena adherencia entre los materiales a excepción de la resina ECO epoxy, la cual mostró excelentes resultados y una buena adherencia.

La resina Eco Epoxi del proveedor ECOEPOXYSYSTEMS está conformada por la resina y un endurecedor. Estos necesitan ser mezclados para generar así la reacción química. La mezcla se hace manteniendo una relación de 2 partes de resina a 1 parte de endurecedor. La mezcla debe efectuarse de manera rápida, ya que la densidad cambia en función de la reacción química que se hace con la mezcla.



Figura III. 34. Resina ECOPOXY. [48]

III. Desarrollo

III.3.4. Fabricación de panales tipo sándwich.

Para la fabricación de los paneles tipo sándwich se precisan dos láminas de lino, dos capas de non-woven de PLA, resina de ECO epoxi y el núcleo. Inicialmente se deben cortar las capas del no tejido de PLA de las mismas dimensiones que las láminas de lino con PLA. El non-woven ó no tejido de PLA es de la casa productora RC fil non-tex. [49][50]

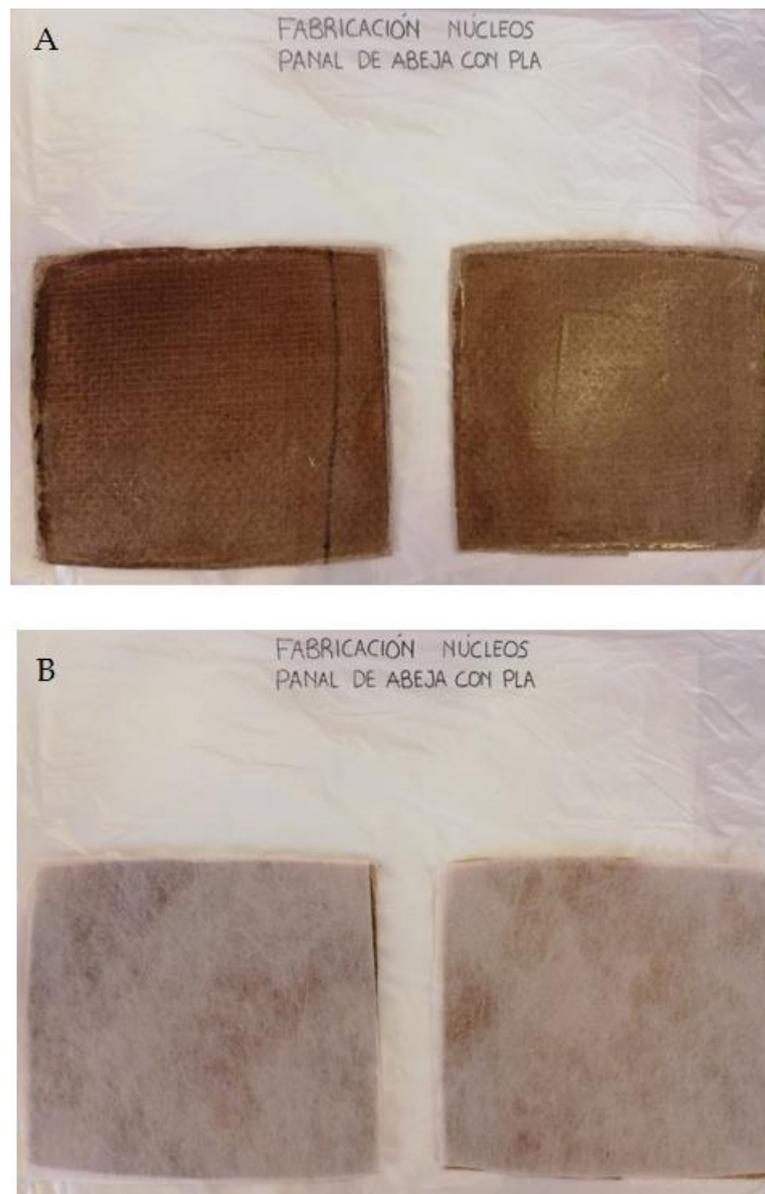


Figura III. 35. Fabricación de sándwiches con panal de abeja. A) Láminas de lino y B) Capas de no tejido de PLA.

III. Desarrollo

Para la aplicación de la resina, es necesario realizar previamente la mezcla de la resina y el endurecedor en una relación 2 a 1. Para lo cual se hizo uso de una báscula METLER TOLEDO. Se utilizaron unos recipientes de aluminio para realizar las mezclas. En la báscula se introdujeron los recipientes vacíos y se tararon. Como se observa en la Figura 0 35 se denominó a la cantidad de resina como parte 1, de la que se usó 100 g, por lo que del endurecedor, la parte 2, se precisó de 50 g.



Figura III. 36. Tara de recipientes para resina y endurecedor. Parte 1: resina (100g). Parte 2: endurecedor (50g).

III. Desarrollo

Tras la mezcla de la resina con el endurecedor el compuesto resultante debe ser rápidamente aplicado en las láminas del sándwich y distribuido en toda la superficie para aplicar el no tejido en cada capa. Posteriormente se coloca resina sobre el no tejido que ha sido previamente aplicado, se distribuye nuevamente en toda la superficie, una vez realizado esto, se procede a la unión del sándwich en el que las láminas con resina y no tejido se unen al núcleo.

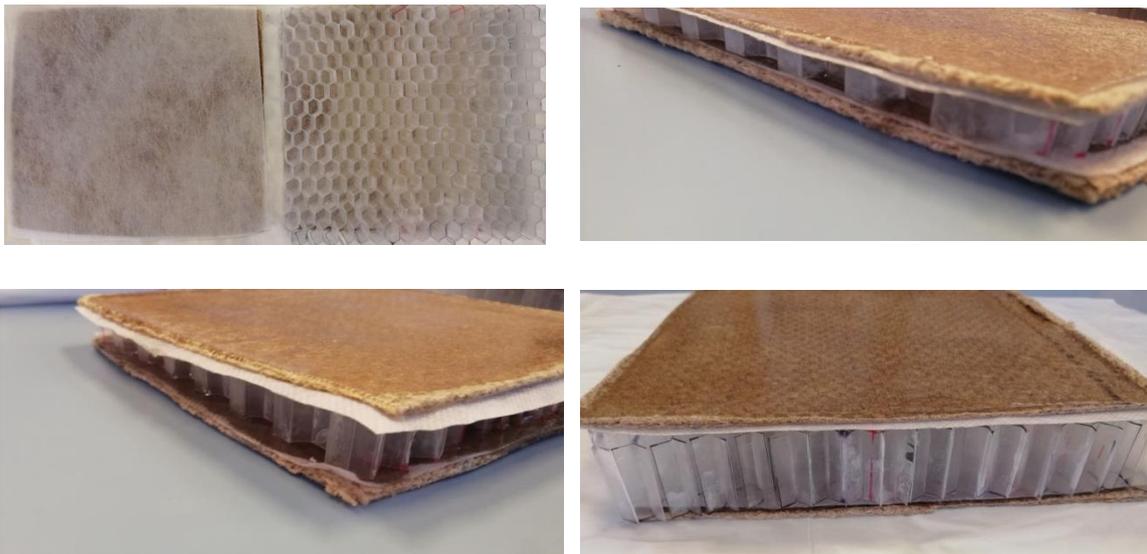


Figura III. 37. Unión de piezas de sándwich, láminas de lino, no tejido PLA, resina ECO epoxi y núcleos de panal de abeja de 1cm, 2 cm y 3 cm de altura.

Una vez unidas todas las piezas, se hace uso de la termocompresora, para poder generar una presión uniforme en toda la superficie de los sándwiches, de manera que se pueda garantizar una buena unión entre las piezas. Como se observa en la Figura III. 38, los sándwiches se sometieron a una presión muy baja únicamente para garantizar la unión y permitir el curado de la resina.

III. Desarrollo



Figura III. 38. Sándwiches sometidos a presión en termocompresora para curado de resina.

Una vez los sándwiches han sido expuestos a una presión uniforme y la resina ha curado, estos están listos para ser cortados, según las normas de flexión y compresión, para realizar las pruebas de caracterización.



Figura III. 39. Sándwiches finalizados.

III. Desarrollo

III. 4. TÉCNICAS Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.

Para determinar el comportamiento del material obtenido se procederá a hacer 3 tipos de ensayos:

- Ensayos a flexión.
- Ensayo a compresión.
- Ensayos de memoria de forma.

Mediante las técnicas de caracterización anteriormente mencionadas se busca obtener los datos de resistencia del material plano tipo sándwich. Se puede determinar la rigidez del material a flexión, como también la resistencia al corte del núcleo y el módulo de corte, a su vez la obtención de la resistencia a compresión.

De igual manera, también se realizarán los ensayos de memoria de forma en los que el material es sometido a ciertas condiciones en la que su forma es comprometida, modificándose más allá de su deformación elástica, es decir provocando una deformación plástica, tras ello se evaluará el porcentaje de retorno del material a su estado inicial.

Para los ensayos de flexión y compresión el equipo empleado es una máquina universal servo hidráulica de la casa IBERTEST. Esta máquina está destinada a efectuar ensayos de tracción sobre probetas metálicas y no metálicas, pero con los accesorios adecuados, también pueden efectuar ensayos a compresión, flexión, punzonado, cizalla, despegue, etc.

III. Desarrollo



Figura III. 40. Máquina universal de ensayo de tracción IBERTEST.

Para la realización de los ensayos, se dispone de un software que permite al usuario configurar los ensayos según las principales normas internacionales utilizadas en ingeniería de materiales. El programa ejecuta el ensayo conforme al método y parámetros introducidos en la configuración previa y proporciona una representación gráfica del mismo, pudiéndose obtener diagramas X-Y fuerza-carrera, fuerza-deformación, carrera-deformación, etc. También se obtienen resultados de cálculos previamente programados con la calculadora de fórmulas.

III. Desarrollo

III.4.1. Ensayo a flexión.

Los ensayos de flexión se realizaron sobre probetas de sándwiches de núcleo de panal de abeja cortadas a las medias de 150 mm de largo, 50 mm de ancho y los 3 tipos de espesores, 1 cm, 2 cm y 3 cm de altura.

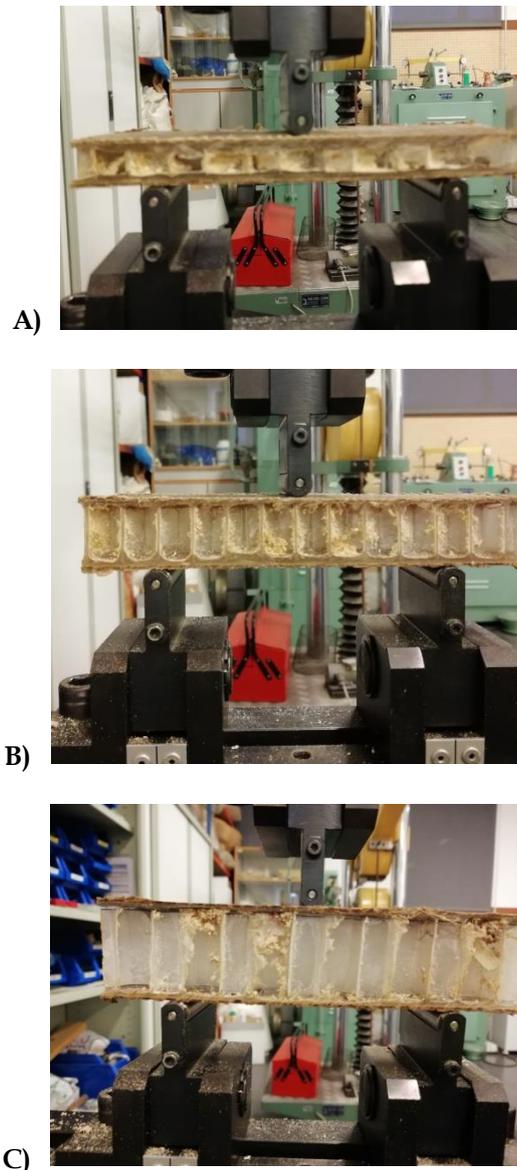


Figura III. 41. Ensayo de flexión a núcleos de panal de abeja. A) 1 cm, B) 2 cm y C) 3 cm.

III. Desarrollo



Figura III. 42. Probeta sometida a flexión.

Los ensayos de flexión fueron realizados a 3 puntos de apoyos siguiendo las directrices de la norma ASTM C393-00 (método estándar para propiedades de flexión para construcción de sándwiches). [51]

Se estipuló una distancia de 100 mm entre los apoyos, con una velocidad de desplazamiento de 10 mm/min. Se utilizó una célula de fuerza de 5 kN. En cada ensayo se hizo uso de 3 probetas para cada espesor de núcleo. En la Figura III. 43, se observa el comportamiento de los núcleos sometidos a flexión. Estos se deforman al ser aplicada la fuerza, hasta que sus paredes colapsan y se origina la rotura, dando por finalizado el ensayo.

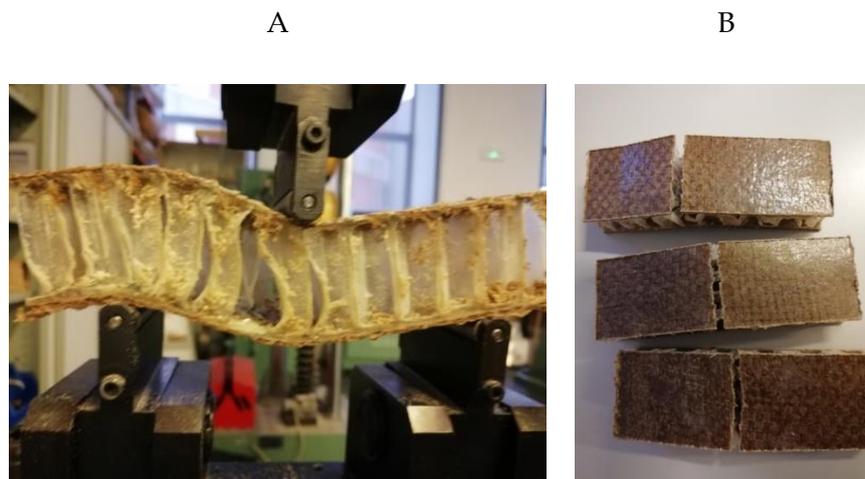


Figura III. 43. Probetas de panel de abeja sometidas a flexión: A) Aplicación de fuerza en probeta y B) Probeta después de ensayo a flexión.

III. Desarrollo

III.4.2. Ensayo a Compresión.

Los ensayos de compresión se realizaron sobre probetas de sándwiches de núcleo de panal de abeja, cortadas a las medias de 50 mm de largo, 50 mm de ancho y los 3 tipos de espesores, 1 cm, 2 cm y 3 cm de altura.



Figura III. 44. Probeta sometida a compresión.

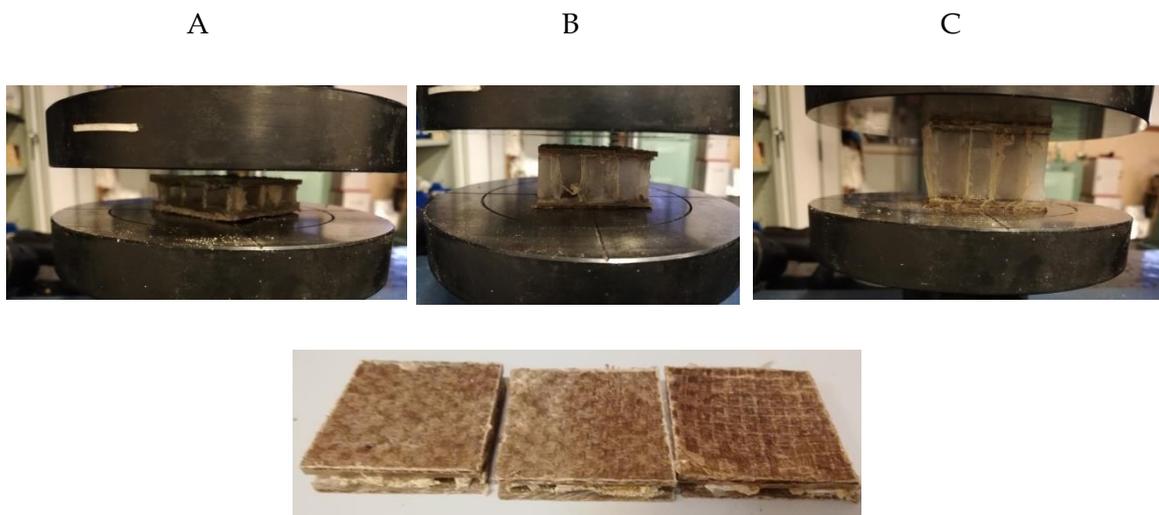


Figura III. 45. Ensayo de compresión a núcleos de panal de abeja. A) 1 cm, B) 2 cm y C) 3 cm. Probetas comprimidas luego de ser sometidas a compresión.

Las probetas se colocaron en la parte central de los platos de apoyo de la máquina, según se indica en la norma ASTM C365/C365M - 05 (método estándar para propiedades de núcleos de sándwiches sometidos a compresión en base plana). [40]

III. Desarrollo

El ensayo se efectuó a una velocidad de desplazamiento de 10 mm/min, a su vez, utilizando una célula de fuerza de 50 kN. En cada ensayo se probaron 3 probetas para cada espesor de núcleo. En la Figura III. 45, se observa el comportamiento de los núcleos sometidos a compresión. Estos se comprimen al ser aplicada la fuerza, hasta que sus paredes colapsan, dando por finalizado el ensayo.

III.4.3. Ensayo Memoria de forma.

Para la parte de ensayo de memoria de forma, se realizaron dos tipos de ensayos, uno de tipo cualitativo y otro de tipo cuantitativo, con el objetivo de poder examinar el comportamiento de los distintos tipos de films de PLA de 100 μm , 250 μm y 500 μm de espesor. Los films utilizados fueron realizados en formato de 10 cm de largo y 1 cm de ancho. De la misma manera se hizo uso de láminas corrugadas en forma de panal de abeja cortadas para examinar su comportamiento al ser sometidas a calor.

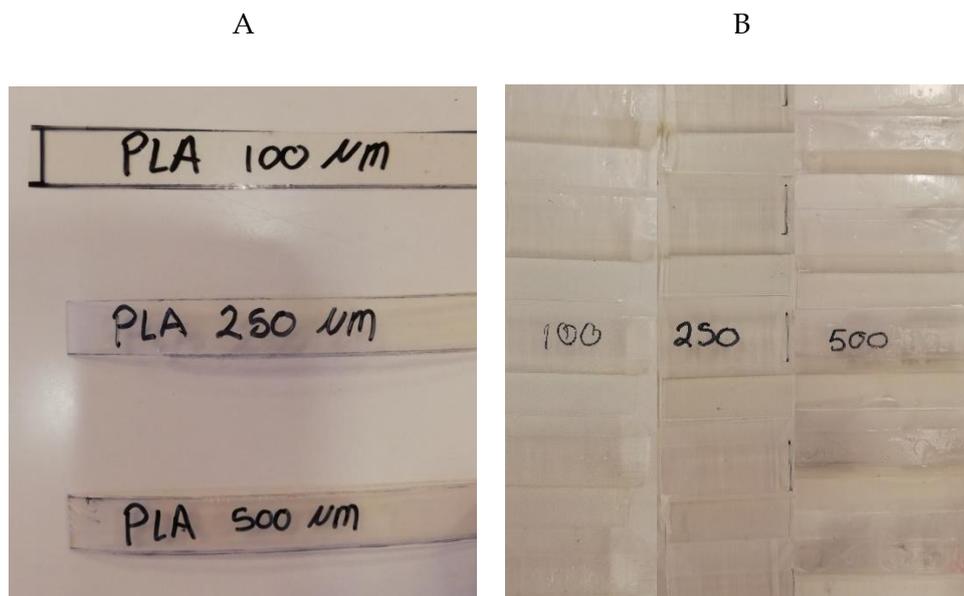


Figura III. 46. Probetas para memoria de forma. A) Probetas tipo film y B) Probetas de núcleo en forma de hexágono.

III. Desarrollo

III.4.3.1. Ensayo de memoria de forma de tipo cualitativo.

Para este ensayo se utilizaron las probetas de film de diferentes espesores. Éstas se introdujeron en un tubo de ensayo, dándoles forma de espiral por un tiempo de 30 minutos a temperatura ambiente, de manera que los films adopten la forma en espiral debido a la fuerza que ejercen al intentar regresar a su forma normal dentro del tubo de ensayo. Al finalizar el tiempo, se extraen los films. Posteriormente estos se sometieron a una temperatura de a 70 °C dentro de un horno, para que de manera visual identificar si regresaban a su forma inicial. A una temperatura de 70 grados Celsius se garantiza que las probetas son sometidas 10 °C más arriba de su temperatura de transición vítrea (Tg).

III.4.3.2. Ensayo de memoria de forma de tipo cuantitativo.

Como se observa en la Figura III. 46, se hace uso de las probetas tipo film para poder realizar el ensayo cuantitativo de memoria de forma. Para este ensayo se emplearon unas placas de aluminio, dobladas a 120 grados, en las que se colocaron los films para que estos adoptaran la forma.

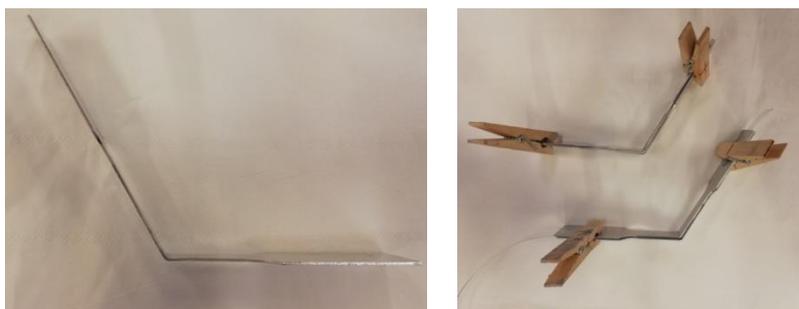


Figura III. 47. Placas de aluminio para ensayo cuantitativo de films de PLA a 120 grados.

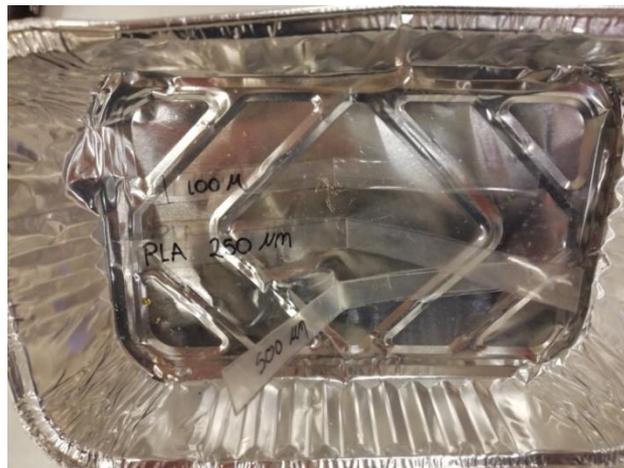
Los film se colocaron en las placas para adoptar su forma por un tiempo de 30 minutos, a temperatura ambiente. Al finalizar se midió el ángulo obtenido por cada film, de manera que se pueda cuantificar cuanto es el valor de retorno de los films a su estado original.

Posteriormente se procedió a introducir los films en un horno a una temperatura de 70 °C para identificar el porcentaje de retorno al aplicar calor en las muestras.

III. Desarrollo



A



B

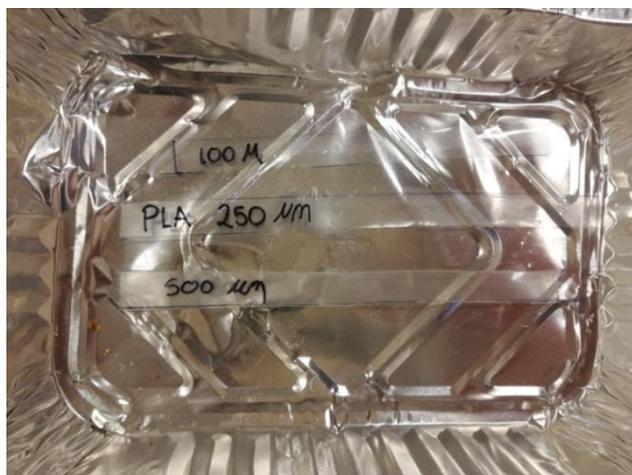


Figura III. 48. Aplicación de temperatura (70 °C) en ensayo cuantitativo de films de PLA: A) Films de PLA antes de aplicar calor y B) Films de PLA después de aplicar calor.

III. Desarrollo

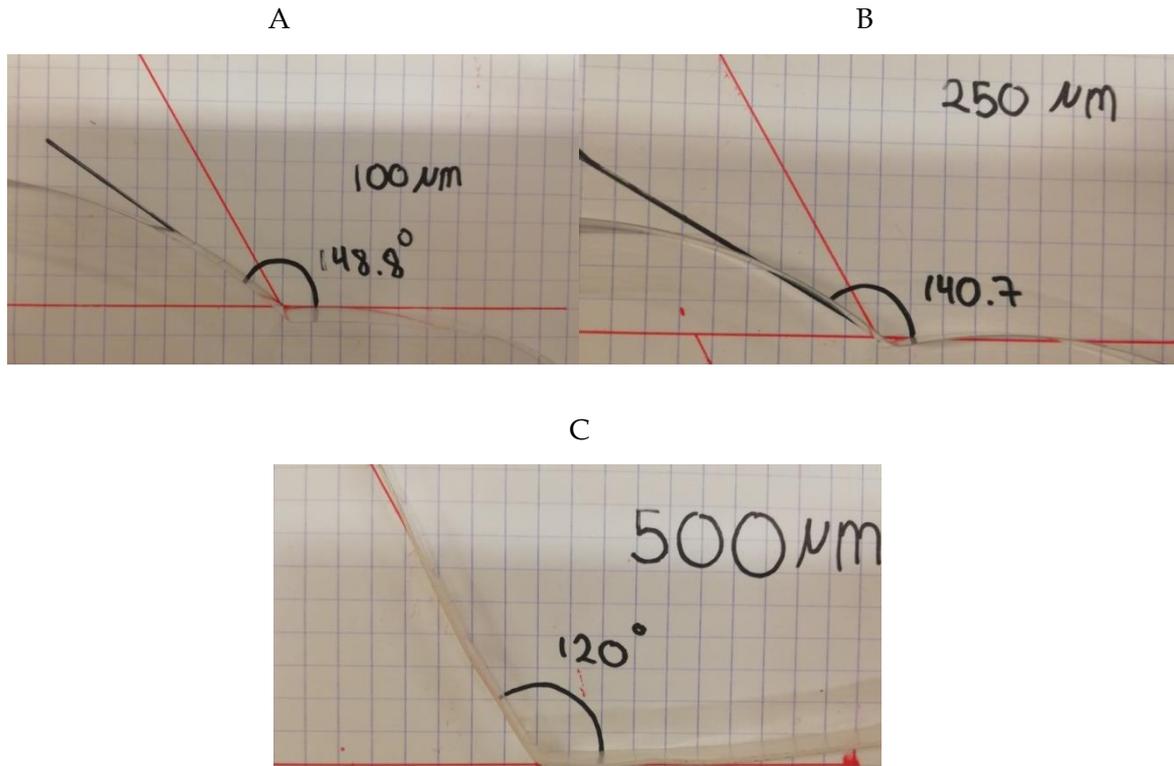


Figura III. 49. Ensayo cuantitativo de films de PLA. Medición de ángulos. A) Film de PLA de 100 μm deformado a un ángulo de 148.8°, B) Film de PLA de 250 μm deformado a un ángulo de 140.7° y C) Film de PLA de 500 μm deformado a un ángulo de 120°.

III.4.3.3. Ensayo de memoria de forma de probetas de núcleo en forma de hexágono.

Los núcleos elaborados en forma de panal de abeja, construidos por medio de termo-conformación, fueron sometidos a un análisis para determinar su comportamiento bajo la influencia de calor. Como se observa en la Figura III. 46 B, se cortaron láminas del núcleo de los diferentes tipos de espesores. Estas láminas fueron introducidas en el horno a una temperatura de 70 °C. Como se observa en la Figura III. 50, se empleó una lámina de aluminio plana para que a la hora de retirar las probetas estas no puedan deformarse o adoptar otra forma.

III. Desarrollo



Figura III. 50. Láminas en forma de panal de abeja sometidas a temperatura.

IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

IV. Resultados y conclusiones

En esta sección se hace una presentación de los resultados de los ensayos realizados:

- Resultados de ensayos a flexión.
- Resultados de ensayos a compresión.
- Resultados de ensayos de memoria de forma.

IV.1. RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXIÓN.

Tabla IV. 1. Tabla de resultados de probeta de 1 cm de espesor sometida a flexión.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)
Probeta 1 a flexión 1 cm	843,40
Probeta 2 a flexión 1 cm	741,30
Probeta 3 a flexión 1 cm	783,20
Promedio	789,30
Desviación estándar	51,32

Tabla IV. 2. Tabla de resultados de probeta de 2 cm de espesor sometida a flexión.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)
Probeta 1 a flexión 2 cm	1124,20
Probeta 2 a flexión 2 cm	1439,80
Probeta 3 a flexión 2 cm	1326,10
Promedio	1314,68
Desviación estándar	140,90

IV. Resultados y conclusiones

Tabla IV. 3. Tabla de resultados de probeta de 3 cm de espesor sometida a flexión.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)
Probeta 1 a flexión 3 cm	951,80
Probeta 2 a flexión 3 cm	873,20
Probeta 3 a flexión 3 cm	1051,80
Promedio	958,93
Desviación estándar	89,51

Los datos obtenidos en la maquina universal son los valores de la fuerza máxima obtenida de las probetas de sándwiches de PLA con núcleo en forma de panel de abeja.

Tabla IV. 4. Probetas de estructuras tipo sándwiches con núcleos de 1 cm de altura sometidas a flexión. Resultados de resistencia máxima y módulo a partir su fuerza máxima.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)	σ (MPa)	τ (MPa)
Probeta 1 a flexión 1 cm	843,40	34,21	68,43
Probeta 2 a flexión 1 cm	741,30	30,07	60,14
Probeta 3 a flexión 1 cm	783,20	31,77	63,54
Promedio	789,30	32,02	64,04
Desviación estándar	51,32	2,08	4,16

IV. Resultados y conclusiones

Tabla IV. 5. Probetas de estructuras tipo sándwiches con núcleos de 2 cm de altura sometidos a flexión. Resultados de resistencia máxima y modulo a partir su fuerza máxima.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)	σ (MPa)	τ (MPa)
Probeta 1 a flexión 2 cm	1124,20	33,33	66,65
Probeta 2 a flexión 2 cm	1439,80	42,68	85,37
Probeta 3 a flexión 2 cm	1326,10	39,31	78,62
Promedio	1314,68	38,97	77,95
Desviación estándar	140,90	4,18	8,35

Tabla IV. 6. Probetas de estructuras tipo sándwiches con núcleos de 3 cm de altura sometidas a flexión. Resultados de resistencia máxima y modulo a partir su fuerza máxima.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)	σ (MPa)	τ (MPa)
Probeta 1 a flexión 3 cm	951,80	22,55	45,09
Probeta 2 a flexión 3 cm	873,20	20,68	41,37
Probeta 3 a flexión 3 cm	1051,80	24,92	49,83
Promedio	958,93	22,72	45,43
Desviación estándar	89,51	2,12	4,24

IV. Resultados y conclusiones

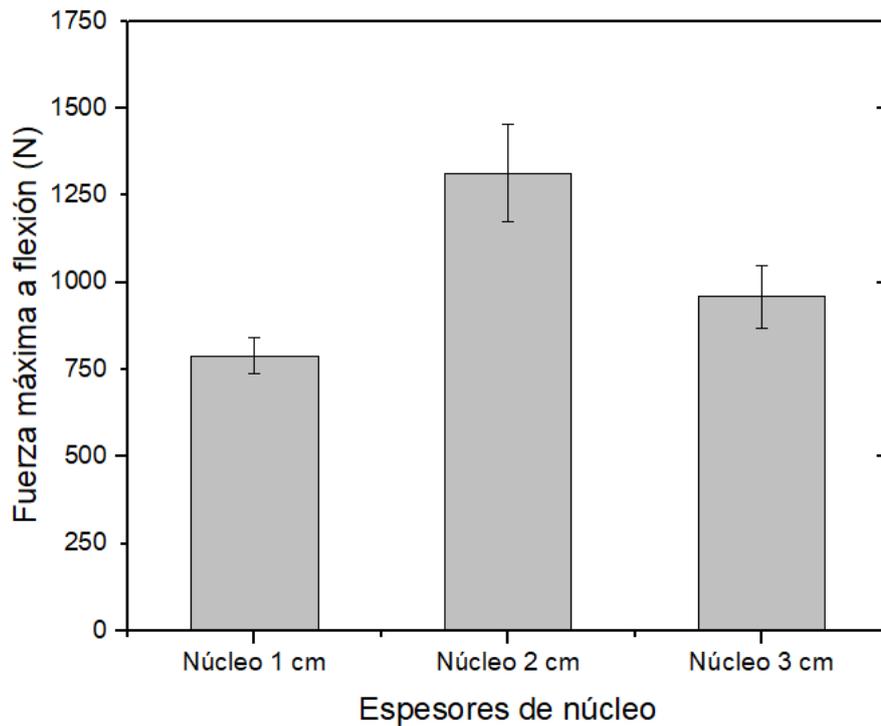


Figura IV. 1. Gráfico comparativo de valores de fuerza máxima de flexión de films de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.

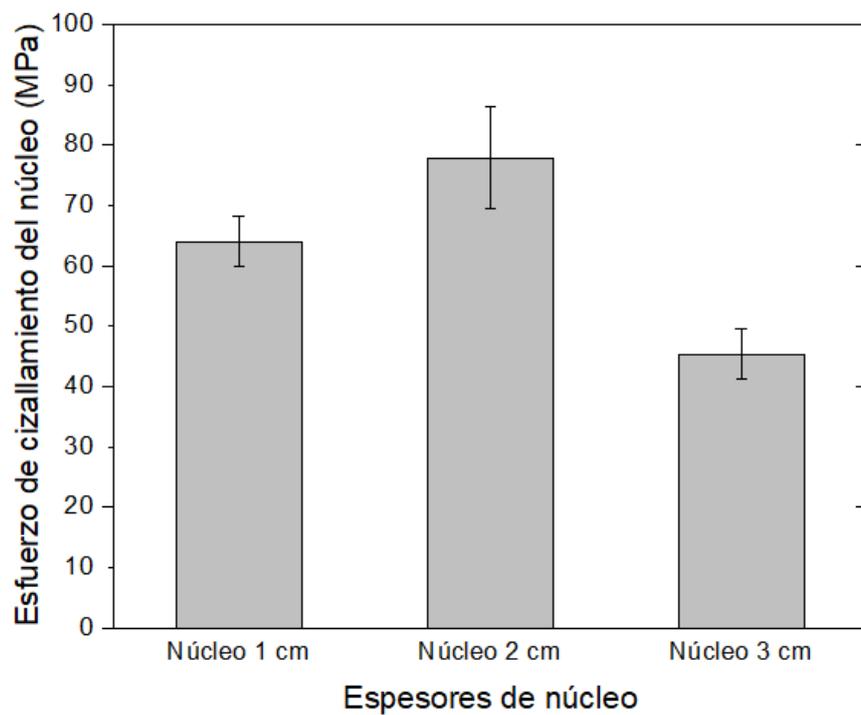


Figura IV. 2. Gráfico comparativo de valores de resistencia máxima a flexión en núcleos de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.

IV. Resultados y conclusiones

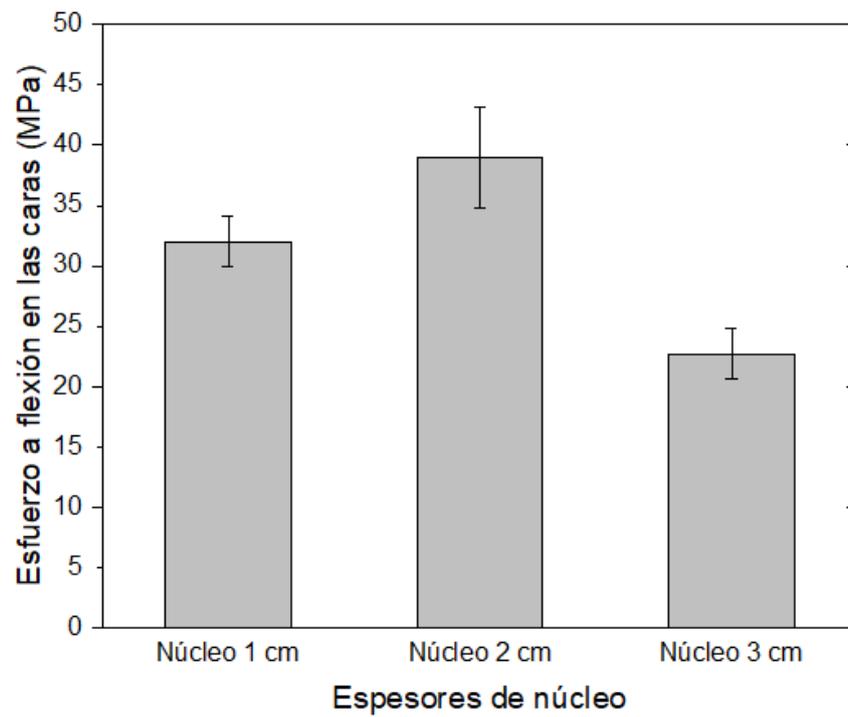


Figura IV. 3. Gráfico comparativo de valores de Modulo de flexión de films de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.

IV. Resultados y conclusiones

IV.2. RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN.

Tabla IV. 7. Tabla de resultados de probeta de 1 cm de espesor sometida a compresión.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)
Probeta 1 a compresión 1 cm	6261,00
Probeta 2 a compresión 1 cm	6369,00
Probeta 3 a compresión 1 cm	5025,00
Promedio	5885,00
Desviación estándar	746,74

Tabla IV. 8. Tabla de resultados de probeta de 2 cm de espesor sometidos a compresión.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)
Probeta 1 a compresión 2 cm	6762,00
Probeta 2 a compresión 2 cm	6458,00
Probeta 3 a compresión 2 cm	6283,80
Promedio	6501,27
Desviación estándar	242,02

IV. Resultados y conclusiones

Tabla 1. Tabla de resultados de probeta de 3 cm de espesor sometidos a compresión.

PROBETA	FUERZA MAX. (N)
Probeta 1 a compresión 3 cm	4329,00
Probeta 2 a compresión 3 cm	4185,00
Promedio	4257,00
Desviación estándar	101,82

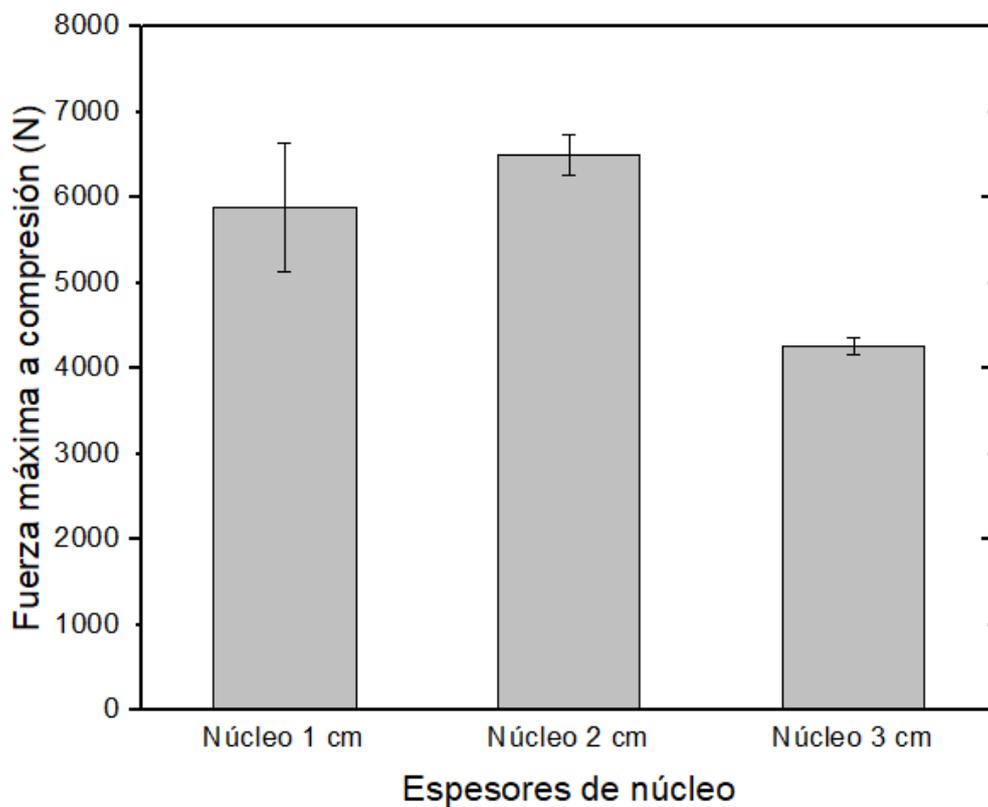


Figura IV. 4. Gráfico comparativo de valores de fuerza a compresión de films de PLA de 1 cm, 2 cm y 3 cm.

IV. Resultados y conclusiones

IV.3. RESULTADOS DE MEMORIA DE FORMA.

I.V.3.1. Resultados de ensayos de memoria de forma cualitativa de films de PLA.

Como se observa en la Figura IV. 5, se pueden apreciar los resultados cualitativos del ensayo de memoria de forma realizado sobre los films de PLA, en el que fueron introducidos en un tubo de ensayo por 30 min. Al aplicar calor a 70 °C, los films regresaron a su forma original de forma parcial, es decir que, el calor si influyó para que los films trataran de volver a su estado plano, sin embargo solo el film de 100 μm logro la totalidad de esta propiedad.

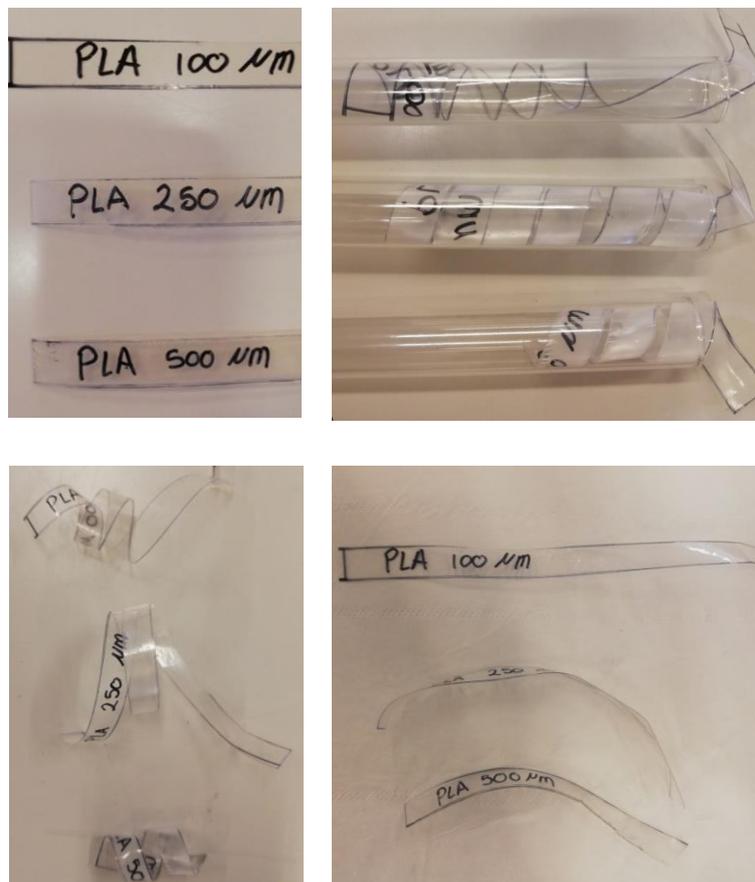


Figura IV. 5. Resultado de Ensayo cualitativo de memoria de forma en films de PLA.

IV. Resultados y conclusiones

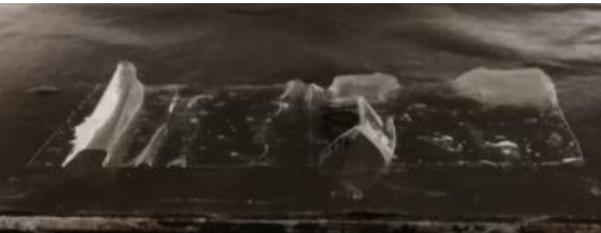
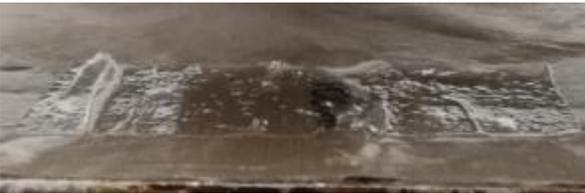
IV.3.2. Resultados de ensayos de memoria de forma cualitativa de probetas de núcleo en forma de hexágono.

En la Tabla IV. 9, la Tabla IV. 10 y la Tabla IV. 11, se observan las probetas en forma de hexágono sometidas a una temperatura de 135 °C por un tiempo de 2 min. En éstas se puede ver su comportamiento, desde que se inicia la prueba, hasta que la figura regresa a un formato tipo film. Se escogió esta temperatura ya que es a la cual se realizaron inicialmente los hexágonos en el molde de aluminio.

La secuencia en cada una de las probetas se captó en lapsos de 30 segundos, en los cuales se visualiza el cambio que éstos tienen hasta completar 120 segundos (2 minutos).

IV. Resultados y conclusiones

Tabla IV. 9. Comportamiento de probeta de 100 μm sometida a temperatura de 135 $^{\circ}\text{C}$.

Tiempo	Secuencia
0 segundos	
30 segundos	
60 segundos	
90 segundos	
120 segundos	

IV. Resultados y conclusiones

Tabla IV. 10. Comportamiento de probeta de 250 μm sometida a temperatura de 135 $^{\circ}\text{C}$.

Tiempo	Secuencia
0 segundos	
30 segundos	
60 segundos	
90 segundos	
120 segundos	

IV. Resultados y conclusiones

Tabla IV. 11. Comportamiento de probeta de 500 μm sometida a temperatura de 135 $^{\circ}\text{C}$.

Tiempo	Secuencia
0 segundos	 A row of seven white, rectangular test specimens with a central notch, arranged on a dark surface. The specimen in the center has the text "500 μm" handwritten on it.
30 segundos	 A row of seven white, rectangular test specimens with a central notch, arranged on a dark surface. The specimens appear slightly more translucent than at 0 seconds.
60 segundos	 A row of seven white, rectangular test specimens with a central notch, arranged on a dark surface. The specimens show increased translucency.
90 segundos	 A row of seven white, rectangular test specimens with a central notch, arranged on a dark surface. The specimens are significantly more translucent and show some surface changes.
120 segundos	 A row of seven white, rectangular test specimens with a central notch, arranged on a dark surface. The specimens are highly translucent and show significant surface degradation and discoloration.

IV. Resultados y conclusiones

IV.3.3. Resultados de ensayos de memoria de forma Cuantitativa.

En la Tabla IV. 12 se observan los datos de las propiedades físicas del material utilizado, PLA Ingeo 6201D. Se aprecia que la temperatura de transición vítrea (T_g) está alrededor de los 55 °C - 60 °C. Los ensayos realizados para el análisis de la memoria de forma se realizaron a temperatura ambiente y a una temperatura de 70 °C, de manera que si se sabe que su T_g es 10 grados menor, la exposición de calor debe ser la necesaria para generar un cambio considerable para analizar su propiedad de memoria de forma.

Tabla IV. 12. Propiedades físicas de PLA Ingeo 6201D. [52]

Propiedades del material		
Propiedades físicas	Ingeo 6201D	ASTM
Gravedad específica	1,24	D792
Viscosidad relativa	3,1	Método interno
Índice de fusión	15-30	D1238
Densidad de fusión	1,08	
Temperatura de transición vítrea	55-60	D3417
Temperatura cristalina de fusión	155-170	D3418

En la Tabla IV. 13 se exponen los datos de los ángulos de abertura obtenidos a temperatura ambiente, para cada uno de los films, a su vez que se expresa el porcentaje de retorno del material, teniendo en cuenta que el material inicialmente tenía un formato de film plano, es decir 180°. De igual manera se expresa el porcentaje de

IV. Resultados y conclusiones

retorno de forma con exposición de calor, en el cual el material de tipo film regresa a su forma original.

Tabla IV. 13. Tabla de resultados de memoria de forma cuantitativa de films de PLA.

Film PLA	Ángulo de abertura por deformación (grados)	Memoria de forma T. ambiente (%)	Memoria de forma 70 °C
100 μm	148.8 °	83%	100%
250 μm	140.7 °	78%	100%
500 μm	120 °	67%	100%

En la Figura IV. 6 se representan los datos comparativos de memoria de forma de los films de PLA con diferentes espesores y a las temperaturas previamente señaladas.

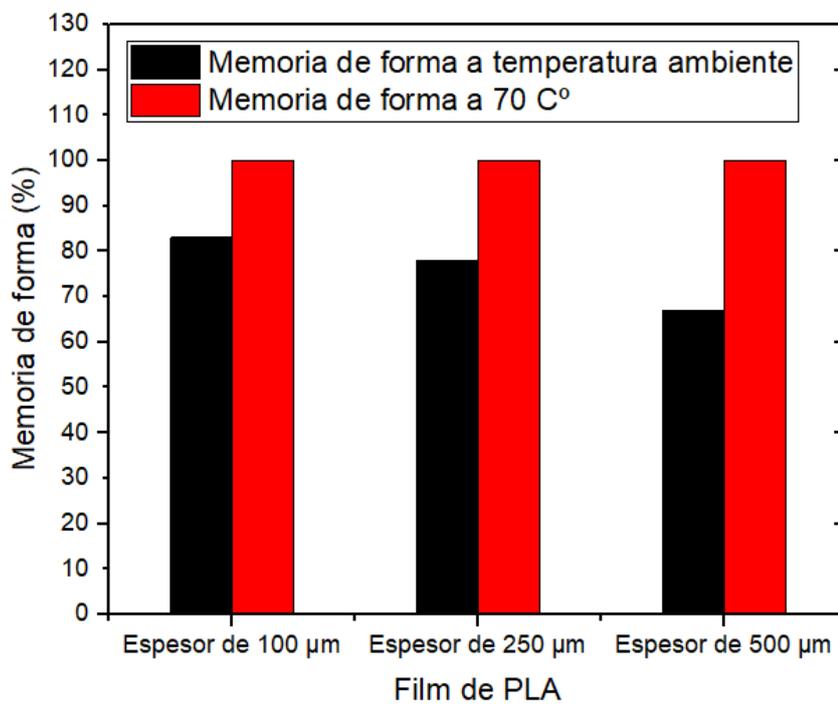


Figura IV. 6. Gráfica de resultados de memoria de forma de films de PLA a temperatura ambiente y a 70 °C.

IV.4. CONCLUSIONES

- La fabricación de un molde para la posterior elaboración de núcleos en forma de panal de abeja exige la realización de cálculos exactos en relación a las distancias del hexágono a efectuar, por lo que es de vital importancia el uso de maquinaria de precisión. No utilizar las herramientas adecuadas puede provocar que las dimensiones de los núcleos no serán homogéneas, lo cual puede influenciar en las propiedades mecánicas finales que las estructuras tipo sándwich puedan tener.
- El método de fabricación de núcleos en forma de panal de abeja por medio de la termo-compresión depende de los factores tiempo, presión y temperatura adecuados. Estos factores establecidos correctamente permiten generar la forma del molde que se desea plasmar en el material utilizado.
- Para la fabricación del molde se requiere de una gran precisión, por lo que se hace detallan 3 decimales en las medidas de sus planos. El costo de fabricación puede elevarse, si las piezas elaboradas tienen valores de espesor en micras.
- La variación del espesor del material termoplástico también requiere de los parámetros tiempo, presión y temperatura para poder realizar un buen moldeo, ya que a más espesor, alguno de los parámetros mencionados debe aumentar, ya sea la temperatura, o el tiempo de exposición.
- El proceso de fabricación de núcleos en forma de panal de abeja por medio del proceso de termo compresión requiere un mayor tiempo de fabricación, ya que el núcleo se realiza de manera individual pieza por pieza, sobre todo en comparación con el proceso de fabricación por extrusión que permite una producción continua y a gran escala. En cambio, el proceso por termo compresión es más efectivo para futuras investigaciones en el uso de fibras fungibles con elementos termoplásticos, en donde los factores de temperatura y presión son claves para el desarrollo de materiales compuestos que generen figuras moldeadas permitiendo excelentes propiedades mecánicas.
- El PLA como material termoplástico permite su uso para la fabricación de núcleos con forma de panal de abeja, sin embargo el proceso de fabricación por termo-compresión siempre requerirá la unión de sus láminas por medio de un adhesivo.

IV. Resultados y conclusiones

- La realización de las láminas de las caras de las estructuras tipo sándwich se realizó mediante la fusión de 2 pliegos de material compuesto de lino + PLA, sin embargo se recomienda el uso de 4 pliegos ó más, para la fabricación de las láminas lo cual permitiría la obtención de mejores resultados en las propiedades mecánicas.
- El material compuesto tipo sándwich está elaborado con PLA en su núcleo, las láminas en las caras están compuestas por lino, que es una fibra natural más PLA en un 40%, que al termo-comprimirse estos se fusionan generando laminas muy resistentes. Entre las láminas y el núcleo se hace uso de un material no tejido (non-woven) también de PLA, sin embargo, a pesar que todos estos materiales son biodegradables, se han utilizado resinas de tipo epoxi procedentes de materiales naturales para la unión de estos, lo cual provoca que el sándwich no sea 100 % biodegradable, pero aun así el porcentaje utilizado de adhesivo con respecto a todo el material es mínimo.
- En cualquier caso se debe buscar una alternativa que permita tener un material 100% biodegradable.
- Se puede concluir que la probeta que presenta mejores propiedades mecánicas, según los resultados de flexión y compresión, es la que tiene un espesor de núcleo de 2 cm.
- El PLA muestra propiedades de memoria de forma en el rango de temperaturas de la transición vítrea. Sin embargo para la construcción de los núcleos de panal de abeja se utilizó una temperatura mayor a la de la transición vítrea, generando así una reprogramación de memoria de forma a otra temperatura.
- A pesar de que el PLA en formato de hexágono presentó propiedades de memoria de forma a una temperatura de 135 °C, debe evaluarse nuevamente la construcción de los núcleos a una temperatura menor, de manera que permita más posibilidades de uso en esta área de investigación.

IV.5. ÁREAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

La fabricación de núcleos de PLA en forma de sándwich por medio de la termoconformación, es un área que abre puertas a futuras investigaciones para el uso de nuevos materiales, como es la combinación de fibras, ya sean naturales ó técnicas con elementos termoplásticos. Esta metodología permite generar materiales livianos y con grandes propiedades, y a la vez reduciendo costos (Figura IV. 7).



Figura IV. 7. Laminas y núcleos en forma de panal de abeja elaborados de lino + PLA por medio de termo conformación.

V. APÉNDICES

APÉNDICES

V. Apéndices

V.1. REFERENCIAS

- [1] H. Lobo and J. V Bonilla, *Handbook of Plastics Analysis*. CRC Press, 2003.
- [2] B. Jean-Christophe and C. Philippe, "Poly(lactic acids): a potential solution to plastic waste dilemma" *Macromol. Symp.*, vol. 153, no. 1, pp. 287–303, Dec. 2000.
- [3] R. E. Conn *et al.*, "Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 33, no. 4, pp. 273–283, 1995.
- [4] L. Shen, E. Worrell, and M. Patel, "Present and future development in plastics from biomass," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 4, no. 1, pp. 25–40, 2010.
- [5] M. Viljanmaa, A. Södergård, and P. Törmälä, "Lactic acid based polymers as hot melt adhesives for packaging applications," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 22, no. 3, pp. 219–226, 2002.
- [6] S. M. Davachi and B. Kaffashi, "Polylactic Acid in Medicine," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 54, no. 9, pp. 944–967, 2015.
- [7] E. T. H. Vink, K. R. Rábago, D. A. Glassner, and P. R. Gruber, "Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 80, no. 3, pp. 403–419, 2003.
- [8] A. S. Herrmann, P. C. Zahlen, and I. Zuardy, "Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation," in *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, 2005, pp. 13–26.
- [9] A.-M. Harte, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, "The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core," *Int. J. Fatigue*, vol. 23, no. 6, pp. 499–507, 2001.
- [10] J. R. Vinson, "Sandwich Structures," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 54, no. 3, pp. 201–

V. Apéndices

214, May 2001.

- [11] J. R. Vinson, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. CRC Press, 2018.
- [12] E. Wang, N. Gardner, and A. Shukla, "The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 46, no. 18, pp. 3492–3502, 2009.
- [13] C. A. Steeves and N. A. Fleck, "Material selection in sandwich beam construction," *Scr. Mater.*, vol. 50, no. 10, pp. 1335–1339, 2004.
- [14] M. F. Ashby and Y. J. M. Bréchet, "Designing hybrid materials," *Acta Mater.*, vol. 51, no. 19, pp. 5801–5821, 2003.
- [15] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press, 1999.
- [16] V. N. Burlayenko and T. Sadowski, "Analysis of structural performance of sandwich plates with foam-filled aluminum hexagonal honeycomb core," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 3, pp. 658–662, 2009.
- [17] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck, M. F. Ashby, and H. N. G. Wadley, "The topological design of multifunctional cellular metals," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 309–327, 2001.
- [18] C. Chen, A.-M. Harte, and N. A. Fleck, "The plastic collapse of sandwich beams with a metallic foam core," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, no. 6, pp. 1483–1506, 2001.
- [19] N. Kulkarni, H. Mahfuz, S. Jeelani, and L. A. Carlsson, "Fatigue crack growth and life prediction of foam core sandwich composites under flexural loading," *Compos. Struct.*, vol. 59, no. 4, pp. 499–505, 2003.
- [20] M. R. M. Rejab and W. J. Cantwell, "The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels," *Compos. Part B Eng.*, vol. 47, pp. 267–277, 2013.

V. Apéndices

- [21] S. Kazemahvazi and D. Zenkert, "Corrugated all-composite sandwich structures. Part 1: Modeling," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 913–919, 2009.
- [22] L. J. Holloway, "PRESIDENT'S PAGE," *Naval Engineers Journal*, vol. 103, no. 3, p. 8.
- [23] E. M. Knox, M. J. Cowling, and I. E. Winkle, "Adhesively bonded steel corrugated core sandwich construction for marine applications," *Mar. Struct.*, vol. 11, no. 4, pp. 185–204, 1998.
- [24] S. D.J. and W. H.N.G., "Cellular Metal Truss Core Sandwich Structures," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 4, no. 10, pp. 759–764, Oct. 2002.
- [25] T. N. Bitzer, *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Springer Netherlands, 2012.
- [26] C. C. Foo, G. B. Chai, and L. K. Seah, "Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure," *Compos. Struct.*, vol. 80, no. 4, pp. 588–594, 2007.
- [27] M. He and W. Hu, "A study on composite honeycomb sandwich panel structure," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 3, pp. 709–713, 2008.
- [28] H. N. G. Wadley, N. A. Fleck, and A. G. Evans, "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 16, pp. 2331–2343, 2003.
- [29] A. Abbadi, Y. Koutsawa, A. Carmasol, S. Belouettar, and Z. Azari, "Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 17, no. 10, pp. 1533–1547, 2009.
- [30] D. Zenkert, *An introduction to sandwich construction*. Engineering materials advisory services, 1995.
- [31] J. R. VINSON, "Optimum design of composite honeycomb sandwich panels

V. Apéndices

- subjected to uniaxial compression,” *AIAA J.*, vol. 24, no. 10, pp. 1690–1696, Oct. 1986.
- [32] L. Monnier, “United States Patent: US9586378B2. Cell-like structure manufacturing method, cell-like structure and corresponding equipment,” vol. 2, no. 12, 2017.
- [33] J. Pflug, B. Vangrimde, and I. Verpoest, “Continuously produced honeycomb cores,” vol. 48, 2003.
- [34] Econcore, “ECONCORE IS THE WORLD LEADER IN TECHNOLOGIES FOR ECONOMIC HONEYCOMB SANDWICH MATERIAL PRODUCTION.” [Online]. Available: <http://www.econcore.com/en/products-applications/pp-honeycomb-cores>.
- [35] Econcore, “Composite honeycomb sandwich panels thermoplastic solution for demanding applications.”
- [36] R. Econcore and P. Acid, “High performance composite panels from renewable, bio-based polymers.”
- [37] J. Pflug, B. Vangrimde, H. Corporation, and I. Verpoest, “Continuously produced honeycomb cores,” no. January, 2003.
- [38] S. Colomina, T. Boronat, O. Fenollar, L. S??nchez-Nacher, and R. Balart, “High renewable content sandwich structures based on flax-basalt hybrids and biobased epoxy polymers,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1593, pp. 467–470, 2014.
- [39] ASTM, “D790-03-Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials,” *ASTM Stand.*, pp. 1–11, 2015.
- [40] Y.-M. Jen, C.-W. Ko, and H.-B. Lin, “Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich

V. Apéndices

- beams,” *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 3, pp. 455–462, 2009.
- [41] A. J. Gutierrez and J. P. H. Webber, “Flexural wrinkling of honeycomb sandwich beams with laminated faces,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 16, no. 7, pp. 645–651, 1980.
- [42] A. Petras and M. P. F. Sutcliffe, “Failure mode maps for honeycomb sandwich panels,” *Compos. Struct.*, vol. 44, no. 4, pp. 237–252, 1999.
- [43] H. Wei, Q. Zhang, Y. Yao, L. Liu, Y. Liu, and J. Leng, “Direct-Write Fabrication of 4D Active Shape-Changing Structures Based on a Shape Memory Polymer and Its Nanocomposite,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 1, pp. 876–883, Jan. 2017.
- [44] R. Sengupta *et al.*, “A Short Review on Rubber / Clay Nanocomposites With Emphasis on Mechanical Properties,” *Engineering*, vol. 47, pp. 21–25, 2007.
- [45] W. Zhang, L. Chen, and Y. Zhang, “Surprising shape-memory effect of polylactide resulted from toughening by polyamide elastomer,” *Polymer (Guildf)*, vol. 50, no. 5, pp. 1311–1315, 2009.
- [46] M. A. Malmierca, I. Mora-Barrantes, P. Posadas, A. González-Jiménez, and A. Marcos-Fernández, “Polímeros con memoria de forma: un nuevo horizonte para los elastómeros,” *Rev. plásticos Mod. Cienc. y Tecnol. polímeros*, no. 671, pp. 104–111, 2012.
- [47] Ecopoxy, “EcoPoxy Resin and Clear Hardener.” [Online]. Available: <http://www.ecopoxy.com/ecopoxy-resin-and-clear-hardener/>.
- [48] S. L. U. RC FIL NON-TEX, “50gsm PLA Nonwoven technical datasheet,” p. 50.
- [49] RCFIL, “NON-WOVEN FABRICS.” [Online]. Available: <https://www.rcfil.com/>.
- [50] C. Techniques, A. U. Tensile, and C. A. Force, “Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions,” *Practice*, vol. 04, no. Reapproved 2009,

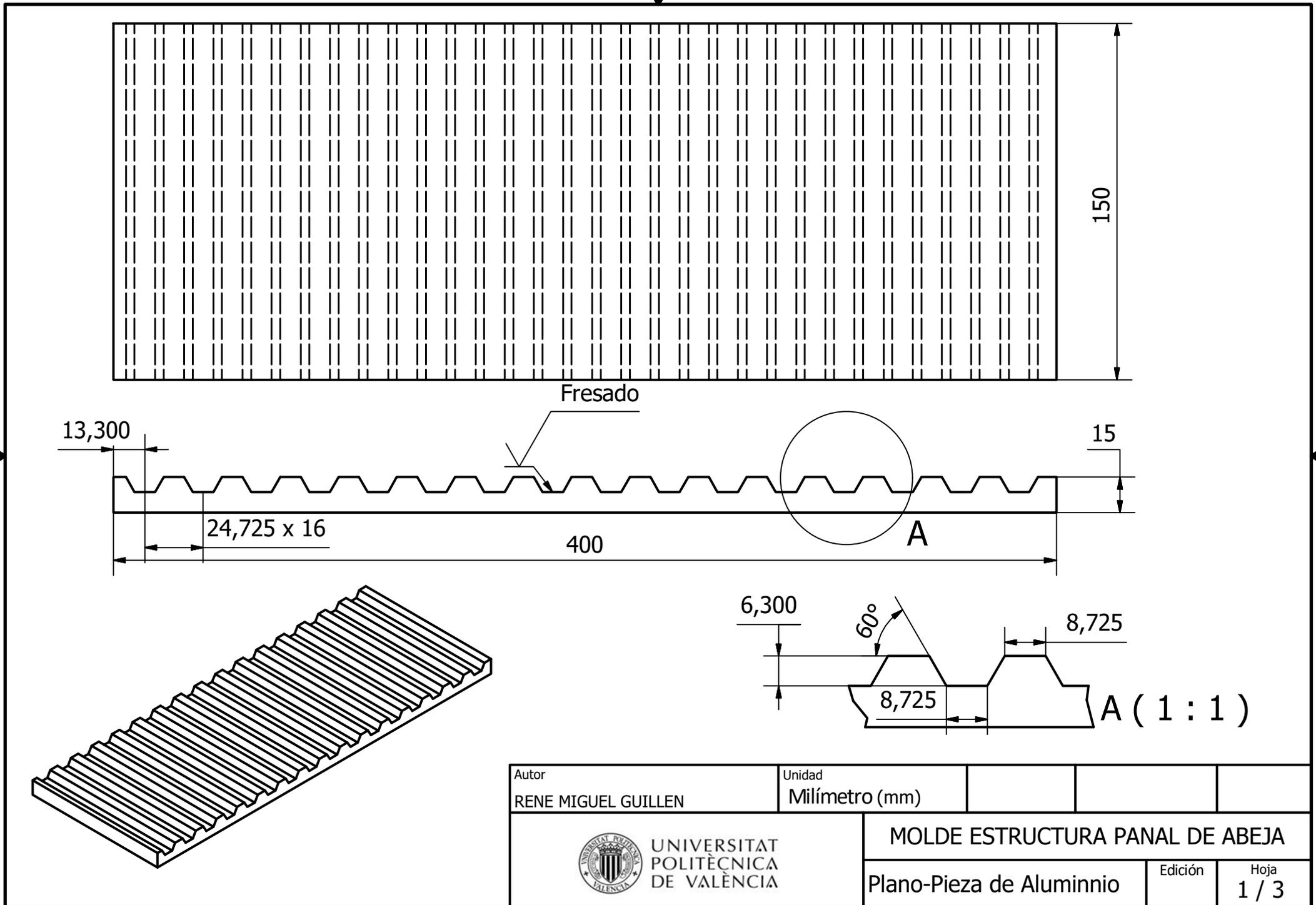
V. Apéndices

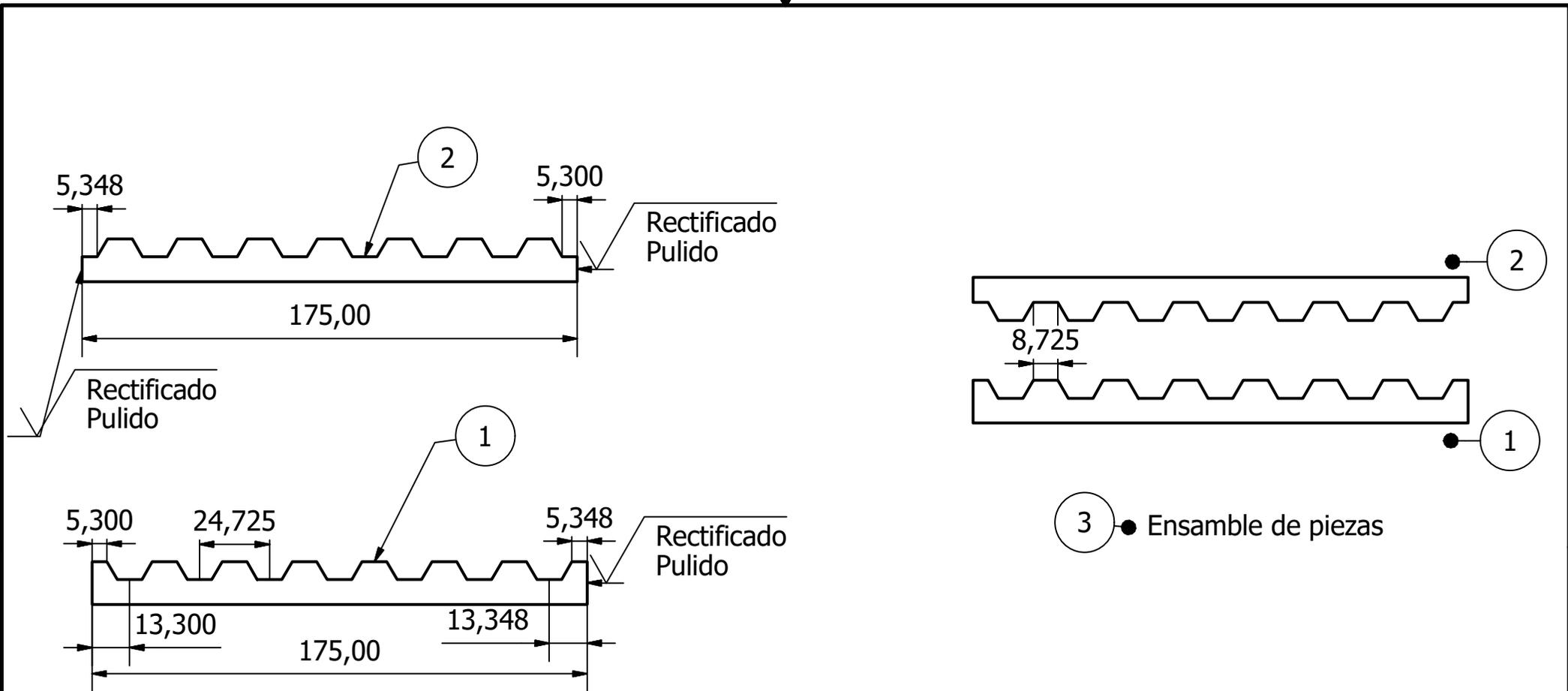
pp. 1–4, 2011.

- [51] C. Materials, “Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores 1,” pp. 1–7, 2018.
- [52] F. M. Spinning, “Ingeo™ Biopolymer 6201D Technical Data Sheet,” pp. 1–4.

V. Apéndices

V.2. PLANOS.

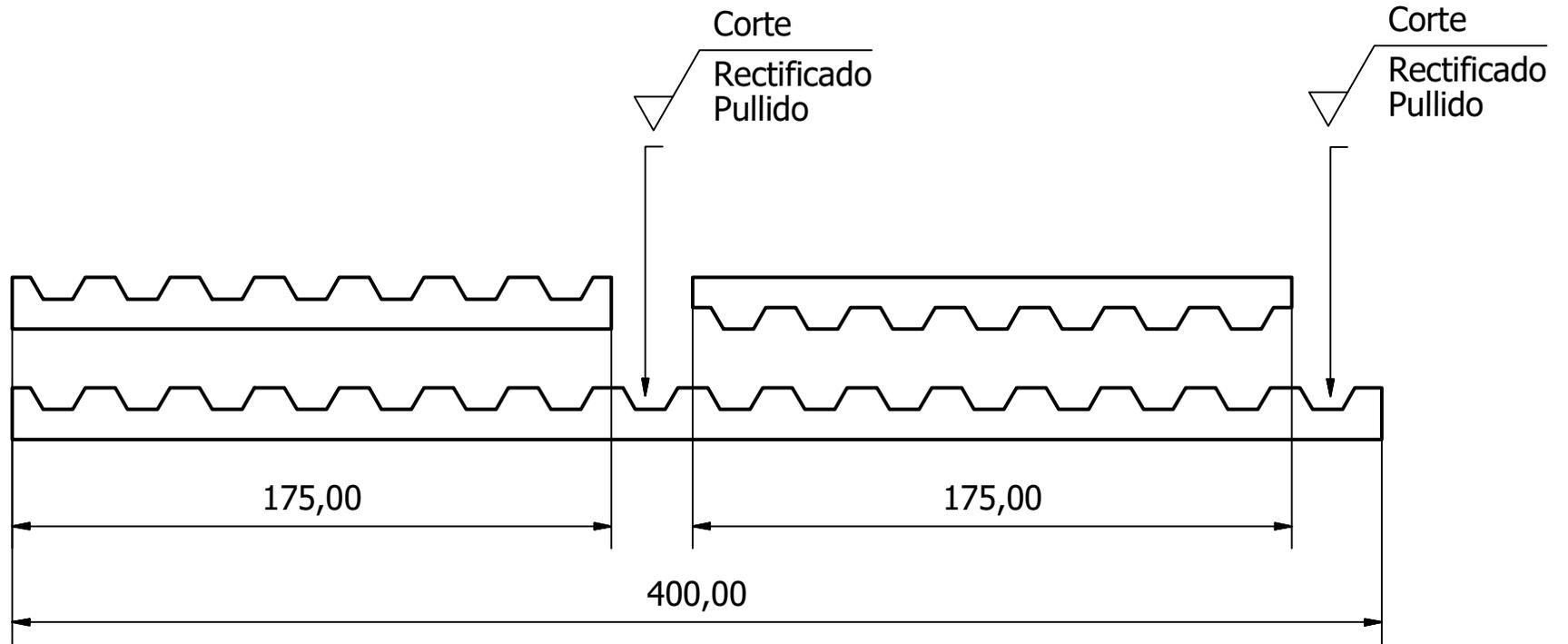




3 ● Ensamble de piezas

Lista de Partes	
ITEM	Nombre Pieza
1	Molde Parte Inferior
2	Molde Parte Superior
3	Ensamble Molde

Autor RENE MIGUEL GUILLEN		Unidad Milímetro (mm)			
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		MOLDE ESTRUCTURA PANAL DE ABEJA			
		Plano-Pieza de Aluminnio	Edición	Hoja 2 / 3	



Autor RENE MIGUEL GUILLEN	Unidad Milímetro (mm)			
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	MOLDE ESTRUCTURA PANAL DE ABEJA			
	Plano-Pieza de Aluminnio	Edición	Hoja 3 / 3	