



Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

“FABRICACIÓN DE QUILLAS DE TABLA DE SURF
MEDIANTE REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE
POLIURETANO: DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE
PANELES SANDWICH”

Autor: Juan Cruz Teruggi (teruggijuancruz@gmail.com)

DNI: 39.850288 – Legajo: 11381

Director: Leandro Ludueña (ludueña@fi.mdp.edu.ar)

Codirector: Gastón Francucci (gfrancucci@fi.mdp.edu.ar)

Codirector: Ariel Stocchi (arstocchi@fi.mdp.edu.ar)

Mar del Plata – diciembre 2024

Lugar de desarrollo de actividades experimentales

Grupo de Materiales Compuestos Termoplásticos (CoMP)

Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET)

Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA)

CONICET-UNMdP

Tel: +54 223 626-0600 Int 2120

Av. Colón 10850. B7606BWV Mar del Plata. Argentina



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

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

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



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



Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

“FABRICACIÓN DE QUILLAS DE TABLA DE SURF MEDIANTE REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE POLIURETANO: DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE PANELES SANDWICH”

Autor: Juan Cruz Teruggi (teruggijuancruz@gmail.com)

DNI: 39.850288 – Legajo: 11381

Director: Leandro Ludueña (ludueña@fi.mdp.edu.ar)

Codirector: Gastón Francucci (gfrancucci@fi.mdp.edu.ar)

Codirector: Ariel Stocchi (arstocchi@fi.mdp.edu.ar)

Mar del Plata – diciembre 2024

Lugar de desarrollo de actividades experimentales

Grupo de Materiales Compuestos Termoplásticos (CoMP)

Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET)

Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA)

CONICET-UNMdP

Tel: +54 223 626-0600 Int 2120

Av. Colón 10850. B7606BWV Mar del Plata. Argentina

Tabla de contenido

RESUMEN	7
1. INTRODUCCION.....	8
1.1 PROBLEMA A RESOLVER: TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE ESPUMA DE POLIURETANO (EPU) EN LA INDUSTRIA DEL SURF.....	8
1.2 PRODUCTO A DESARROLLAR: QUILLAS.....	11
1.3 PANELES SANDWICH.....	15
1.3.1 COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS PANELES.....	19
1.3.2 MECANISMOS DE FALLA DE PANELES EN FLEXIÓN	19
1.3.3 MAPAS DE FALLA	28
1.4 TÉCNICAS DE FABRICIÓN DE PANELES SANDWICH	29
1.4.1 IMPRESIÓN 3D	30
1.4.2 INFUSION POR VACIO	31
2. OBJETIVOS	32
2.1 OBJETIVOS GENERALES	32
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	33
3. PROCEDIMIENTO.....	34
3.1 MATERIALES.....	34
3.2 PROCESAMIENTO	34
3.2.1 FABRICACION DE PANELES SANDWICH	34
3.2.2 FABRICACION DE QUILLA.....	41
3.3 CARACTERIZACION	44
3.3.1 CINETICA DE CURADO DE RESINA	44
3.3.2 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE FALLA.....	48
3.3.3 ENSAYO MECANICO DE PANELES “SANDWICH” POR FLEXIÓN EN 3 PUNTOS	52
3.3.4 CARACTERIZACIÓN MECANICA DE MATERIALES DE QUILLAS COMERCIALES CONVENCIONALES.....	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	58
4.1 CINETICA DE CURADO DE RESINA	58
4.2 ENSAYO DE TRACCION EN PIELES.....	67
4.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN EN NÚCLEO.....	72
4.4 MAPAS DE FALLA.....	77
4.4.1 NUCLEO TIPO HONEYCOMB RELLENO CON RESINA EPOXI Y POLVO DE PU	77
4.4.2 NUCLEO DE ESPUMA DE PU	79

4.5	ENSAYO MECANICO DE PANELES "SANDWICH" POR FLEXION EN 3 PUNTOS.....	81
4.5.1	CALCULO DE RIGIDEZ A LA FLEXIÓN.....	84
4.6	ENSAYO DE FLEXION EN TERMOPLASTICOS.....	87
4.7	SELECCIÓN DE LA SECUENCIA DE LAMINACIÓN ÓPTIMA PARA LA FABRICACIÓN DE QUILLAS.....	89
4.8	FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE QUILLA.....	90
4.9	FACTIBILIDAD ECONOMICA PARA LA PRODUCCION DEL PRODUCTO.....	92
4.9.1	INVERSION INICIAL ³⁷	94
4.9.2	COSTOS DEL PROCESO ³⁷	94
4.9.3	ANALISIS DE RENTABILIDAD ³⁷	98
5.	CONCLUSIONES.....	100
6.	TRABAJOS FUTUROS.....	103
7.	DIFICULTADES ENCONTRADAS.....	104
8.	REFERENCIAS.....	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Desechos generados por UvaSurfboards®.....	11
Figura 2.	Configuración estándar de un panel sándwich.....	16
Figura 3.	Panel sándwich con núcleo tipo Honeycomb.....	16
Figura 4.	Distintos tipos de arreglo de fibras dentro de una matriz. a) Fibras continuas unidireccionales b) Fibras continuas bidireccionales c) Fibras continuas multidireccionales d) Fibras discontinuas unidireccionales e) Arreglo "al azar" de fibras.....	13
Figura 5.	Diagrama de panel Sandwich en ensayo de flexión en 3 puntos.....	19
Figura 6.	Esquema de falla por corte en el núcleo o "Core Shear".....	23
Figura 7.	Esquema de falla por indentación o "Core Crushing".....	25
Figura 8.	Resumen de criterios de falla y ecuaciones de cada uno.....	28
Figura 9.	Mapa de falla tipo para un panel sándwich.....	29
Figura 10.	Esquema de relleno tipo "Cubic Subdivision" para impresión 3D.....	31
Figura 11.	Sistema de infusión por vacío para laminado de pieza.....	32
Figura 12.	Dimensiones de las celdas componentes de la estructura HoneyComb.....	35
Figura 13.	Diseño CAD de la estructura tipo HoneyComb.....	36
Figura 14.	Estructura tipo HoneyComb en proceso de impresión.....	37
Figura 15.	Elementos de partida para el relleno de las estructuras tipo HoneyComb.....	37
Figura 16.	Núcleos compuestos por estructuras tipo "honeycomb" impresas 3D rellenas con resina y polvo de poliuretano durante el proceso de curado.....	38

Figura 17. Vistas de la configuración de la infusión por vacío de los paneles sándwich: (a) vista superior; (b) vista en corte A1.....	39
Figura 18. Disposición de placas en el proceso de laminación	40
Figura 19. Sistema previo a la infusión.....	40
Figura 20. Placas luego de la laminación por infusión por vacío	41
Figura 21. Figura CAD de la quilla y sus dimensiones.	42
Figura 22. Distintas impresiones de núcleos de quillas: (a) quilla central 15.0 gr.; (b) quilla lateral 13.0 gr.	43
Figura 23. Núcleos de quillas: estructuras tipo “honeycomb” con geometría de quilla rellenos de resina epoxi y polvo de PU: (a) quilla lateral; (b) quilla central.	43
Figura 24. Fabricación de quillas: a) núcleo de quilla previo a la infusión; b) quilla laminada (producto final).	44
Figura 25. Esquemas cualitativos correspondientes a cada modelo30.	46
Figura 26. Gráfico cualitativo de corrida dinámica (velocidad de calentamiento constante) de DSC.30	47
Figura 27. Gráfico cualitativo de corrida isotérmica (temperatura constante) de DSC.30.....	47
Figura 28. Probetas de panel sandwich para ensayos de flexión y compresión.....	53
Figura 29. Esquema de ensayo de flexión en tres puntos.	54
Figura 30. Esquema de ensayo de flexión en 3 puntos para materiales termoplásticos.....	55
Figura 31. Gráfico perteneciente al barrido Dinámico en función del tiempo.	58
Figura 32. Gráfico perteneciente al barrido Dinámico en función de la temperatura.	59
Figura 33. Diagrama del barrido isotérmico a 116°C.	60
Figura 34. Conversiones en función del tiempo para las temperaturas ensayadas.	60
Figura 35. Velocidades de reacción en función del grado de avance.	62
Figura 36. Ajuste del sistema isotérmico a 116°C al modelo cinético 1.	63
Figura 37. Ajuste tipo Arrhenius para el parámetro K.	64
Figura 38. Curva α vs t para la resina estudiada a 25°C.	66
Figura 39. Gráficos Tensión Deformación en Telas de Carbono.	67
Figura 40. Gráficos Tensión Deformación en Telas de Vidrio.	68
Figura 41. Comparación de curvas entre 1 tela de carbono y 1 tela de vidrio.	68
Figura 42. Comparación de valores de fuerza de rotura.....	69
Figura 43. Probeta de 1 tela de fibra de vidrio antes de ser ensayada.....	71
Figura 44. Probeta de 1 tela de fibra de vidrio luego de ser ensayada.....	71
Figura 45. Rotura “doble” en probeta de 4 telas de carbono.....	72
Figura 46. Gráfico Tensión/Deformación para las 4 probetas de compresión.	73
Figura 47. Ajuste lineal de curva Carga vs Extensión para cálculo del módulo.	74
Figura 48. Gráfico Tensión/Deformación para las probetas de espuma de PU.....	75
Figura 49. Mapa de falla de panel Sandwich (núcleo de estructura tipo “honeycomb” impresa 3D rellena con resina epoxi y polvo de PU) laminado con fibra de vidrio.	78
Figura 50. Mapa de falla de panel Sandwich (núcleo de estructura tipo “honeycomb” impresa 3D rellena con resina epoxi y polvo de PU) laminado con fibra de carbono.	78
Figura 51. Mapa de falla de panel Sandwich (núcleo de espuma de PU) laminado con fibra de carbono.	80
Figura 52. Comparativa de Curvas Carga [KgF] vs Extensión [mm] para todos los paneles.	81

Figura 53. Curva correspondiente a la probeta 4 del panel con pieles hechas con 2 telas de carbono 2TC P4.	82
Figura 54. Rotura de probeta 2 con 2 telas de fibra de vidrio en ensayo de flexión en 3 puntos	84
Figura 55. Rotura de probeta 1 con 1 tela de fibra de vidrio en ensayo de flexión en 3 puntos.	84
Figura 56. Detalle de rotura de probeta 1 con 4 telas de fibra de vidrio en ensayo de flexión en 3 puntos	84
Figura 57. Gráfico de zona lineal (Carga vs Desplazamiento) del ensayo de flexión en 3 puntos en paneles sándwich.	86
Figura 58. Gráfico Tensión-Deformación para los distintos termoplásticos ensayados.	87
Figura 59. (a) Quilla comercial de material compuesto reforzado con fibra. (b) Quilla desarrollada en este trabajo.	91
Figura 60. Superficie plana de la quilla.	92
Figura 61. Producto final.	92
Figura 62. Esquema de un velero con sus quillas.	104
Figura A 1. Corrida isotérmica en DSC a 30°C	117
Figura A 2. Corrida isotérmica en DSC a 85°C.	118
Figura A 3. Corrida isotérmica en DSC a 100°C.	118
Figura A 4. Corrida isotérmica en DSC a 110°C	118
Figura A 5. Corrida isotérmica en DSC a 116°C (pico Exotérmico)	119
Figura A 6. Ajuste modelo cinético N°1 a T=100°C.	119
Figura A 7. Ajuste modelo cinético N°1 a T=85°C.	120
Figura A 8. Curvas Tensión vs Deformación en flexión de HDPE.	120
Figura A 9. Curvas Tensión vs Deformación en flexión de PLA.	121
Figura A 10. Curvas Tensión vs Deformación en flexión de PA12.	121
Figura A 11. Curvas Tensión vs Deformación en flexión del PP.	122
Figura A 12. Núcleo de PLA Impreso.	124
Figura A 13. Disposición de las placas previa a la infusión por vacío.	124
Figura A 14. Probetas de compresión del núcleo propuesto.	125
Figura A 15. Probeta previa al ensayo vs probeta ensayada.	125
Figura A 16. Esqueleto Honeycomb en proceso de relleno con resina epoxi y polvo de PU reciclado.	126
Figura A 17. Probeta de panel sándwich ensayado en flexión en 3 puntos.	127

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores típicos de propiedades de espumas rígidas de poliuretano utilizadas en la fabricación de núcleos de tablas de surf. ¹	8
Tabla 2. Valores de entrada y salida de PU en la etapa de maquinado para distintos productores. ³	10
Tabla 3.Descripción de las variables geométricas utilizadas en la construcción de los mapas de falla. ¹⁹	20
Tabla 4. Parámetros de impresión 3D	36
Tabla 5. Parámetros de ensayo de flexión en 3 puntos.	55
Tabla 6. Resumen de datos del pico exotérmico.	59
Tabla 7.Valores de conversión máxima para las temperaturas ensayadas.	61
Tabla 8.Parámetros de ajuste del modelo cinético 1.....	63
Tabla 9. Resumen de parámetros para cálculo de cinética a 25°C	65
Tabla 10. Resumen de resultados del ensayo de tracción en pieles.....	69
Tabla 11. Resultados del ensayo de compresión del núcleo tipo Honeycomb relleno con resina epoxi y polvo de PU.....	74
Tabla 12.Resultados del ensayo de compresión de la espuma de PU.	76
Tabla 13.Resumen de resultados del ensayo de compresión.....	76
Tabla 14. Resumen resultados de carga máxima en ensayo de flexión en 3 puntos.....	83
Tabla 15. Resultados de pendientes y rigidez a la flexión de las distintas composiciones.....	86
Tabla 16. Resumen de resultados de tensión máxima y modulo en flexión de los termoplásticos ensayados.....	88
Tabla 17.Precios utilizados como inversión inicial.	94
Tabla 18. Resumen de cálculo de Costo de Mano de Obra	95
Tabla 19.Materiales a utilizar en la fabricación de las quillas.....	97
Tabla 20.Resumen de costo de materiales.	97
Tabla 21.Resumen de costos e inversión	98
Tabla 22. Flujos de caja por año.....	98
Tabla A 1. Dimensiones de probetas para ensayo de flexión en 3 puntos de materiales termoplásticos.....	110
Tabla A 2. Resumen dimensiones placas pre-laminado (núcleo).....	111
Tabla A 3.Dimensiones de todas las probetas ensayadas a compresión.....	111
Tabla A 4. Resultados del ensayo de flexión en termoplásticos.	112
Tabla A 5.Dimensiones de los laminados ensayados a tracción.	113
Tabla A 6.Resumen de valores calculados en el ensayo de tracción.	114
Tabla A 7.Resumen de ensayo de flexión en 3 puntos.	115

RESUMEN

La Industria del surf, así como tantas otras, es responsable de la eliminación de desechos de producción. El proceso de laminado de núcleos de tablas genera un gran volumen de polvo de espuma de poliuretano (EPU) que terminan incinerados o en vertederos.

El presente trabajo propone utilizar el desperdicio generado en la etapa de maquinado de núcleos de las tablas, el cual consiste en polvo de espuma de poliuretano, para la fabricación de un nuevo producto del rubro fomentando la economía circular y la correcta gestión de residuos industriales.

Se desarrolló un proceso productivo en el cual se obtienen quillas basadas en una construcción tipo panel sándwich, el cual involucra la impresión 3D por deposición de filamento caliente de un núcleo de ácido poliláctico (PLA) con la geometría de la quilla y estructura tipo panal de abeja (honeycomb) y la técnica de moldeo líquido de compuestos conocida como infusión por vacío para colocar pieles resistentes que proporcionen las propiedades mecánicas. El residuo de EPU se incorporó en los intersticios del honeycomb para proporcionar una superficie de apoyo a las telas de refuerzo utilizadas en el proceso de infusión.

Para determinar la secuencia de laminación óptima de las quillas y evaluar el desempeño del producto desarrollado, se fabricaron paneles sándwich de geometría estandarizada para realizar una caracterización mecánica de acuerdo con normas ASTM.

Finalmente se fabricó un prototipo funcional de las quillas desarrolladas y se realizó un estudio de factibilidad técnica y económica de producción para evaluar la inserción de este producto al mercado.

1. INTRODUCCION

1.1 PROBLEMA A RESOLVER: TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE ESPUMA DE POLIURETANO (EPU) EN LA INDUSTRIA DEL SURF

La espuma de poliuretano (EPU) se forma de la reacción de un polioliol y un isocianato, esta reacción libera CO₂ que actúa de agente espumante. La mezcla reactiva se puede proyectar sobre una superficie dejando libre el crecimiento de la espuma o puede colarse en una cavidad, restringiendo el desplazamiento de la espuma en distintas direcciones. De esta manera podemos diferenciar dos grupos de espumas, las de celda abierta y las de celda cerrada. El primer grupo presenta las celdas sin encapsular por lo que contienen más aire y las convierte en espumas más livianas. Las espumas de poliuretano de celda cerrada, denominadas espumas estructurales, poseen pieles más densas que el interior debido al aumento de presión sobre las paredes de la cavidad que contiene la mezcla reactiva¹. Las tablas de surf utilizan como núcleo estas espumas gracias a su baja absorción de humedad, el bajo peso y su alta durabilidad. La Tabla 1 muestra algunos valores típicos de propiedades de estas espumas.¹

Tabla 1. Valores típicos de propiedades de espumas rígidas de poliuretano utilizadas en la fabricación de núcleos de tablas de surf.¹

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR
Conductividad Térmica	W/mK	0,018-0,023
Densidad	Kg/m ³	>30
Tenor de celdas cerradas	% Vol	>90
Resistencia a la compresión	Mpa	0,1
Temperatura máxima de uso prolongado	°C	110-130
Temperatura máxima de uso corto	°C	250

En la producción de tablas de surf se parte de un bloque sólido de espuma rígida en forma de tabla de surf proveniente del espumado en moldes con dicha forma. La preforma sobredimensionada de espuma se lija o “shapea” hasta lograr la forma final

que será parte del núcleo de la tabla. El proceso de lijado genera grandes cantidades de polvo creando una severa problemática de gestión de residuos en la industria.²

Hasta principios de siglo las tablas de surf eran moldeadas manualmente a partir de los bloques de espuma ya mencionados. Pero, como sucedió en otras tantas industrias, el avance tecnológico hizo posible que parte de la producción sea fabricada de forma automatizada por maquinaria que día a día aumentan su eficiencia. La industria del surf no fue ajena a estos cambios y los núcleos de las tablas comenzaron a fabricarse a partir de máquinas de corte con control numérico computarizado (CNC). Si bien estos métodos disminuyeron el polvo de poliuretano generado durante el proceso, se siguen produciendo grandes cantidades de desechos.²

La segunda parte del proceso de producción es la finalización del núcleo, para esto se usan lijas y el trabajo suele ser manual. Se busca una buena terminación superficial de la espuma para continuar con la laminación. Esta parte del proceso también genera polvo, pero en menor medida que el inicial.²

Una vez obtenido el núcleo, se inicia el proceso de laminado, que consiste en impregnar los tejidos de refuerzo con resina catalizada para formar las capas de material compuesto que envuelven al núcleo. Posteriormente, se realiza la etapa de “engrose”, donde se aplica una fina capa de resina sobre el núcleo laminado, la cual se pule para obtener la terminación superficial deseada.²

A partir de estudios realizados en Brasil en 2018³ se ve que los principales destinos de los residuos generados por esta industria son:

- Vertederos industriales (donde se trata los residuos adecuadamente previos a su eliminación).
- Lugares de incineración de productos donde se quema el PU arrojando productos tóxicos sin regulación al ambiente. La quema de estos residuos libera al ambiente gases tóxicos que son perjudiciales para la salud humana y para el medio ambiente.
- Recolección pública de residuos donde el PU termina en vertederos, pero sin tratamiento previo.

La Tabla 2 muestra los resultados del estudio previamente mencionado resumiendo la cantidad de residuos que generan por año los distintos productores en la etapa de maquinado de núcleos a partir de los bloques de espuma rígida.

Tabla 2. Valores de entrada y salida de PU en la etapa de maquinado para distintos productores.³

PRODUCTOR	ENTRADA DE PU [Kg]	SALIDA DE PU [Kg]	RESIDUOS [Kg]	TABLAS /AÑO	RESIDUOS POR AÑO [Kg]
1	2,293	1,325	0,968	250	242
2	1,845	1,136	0,709	300	213
3	2,293	1,227	1,066	150	160
4	2,293	1,307	0,986	350	345
5	2,01	1,292	0,718	300	215

El polvo de PU generado como residuo en la industria del surf podría usarse como material de partida para la obtención de nuevos productos y consecuentemente generar que las cantidades de desechos de un productor disminuyan. Actualmente, se han desarrollado técnicas de reciclado de PU de tipo mecánicas, termo-mecánicas, químicas y de recuperación de energía, donde exceptuando la primera de ellas, todas las otras posibilidades de tratamiento del PU incluyen maquinaria y tecnología que no sería factible que adquiriera un productor pequeño/mediano. ⁴

El polvo puede ser donado/vendido a productores que deseen fabricar piezas de otro estilo y utilizar el desecho como relleno, pero la inclusión de una pieza de la misma industria da al fabricante la posibilidad de crecimiento y además favorece la economía circular. UVA Surfboards[®], el fabricante de tablas entrevistado en este trabajo comenta que proveen de polvo a la empresa Voodoo[®]. Esta última utiliza el polvo de poliuretano como relleno en la resina usada para pegar las láminas de madera para tablas de Skate. Este concepto moderno provee la optimización de los recursos, la reducción en el consumo de materias primas y el aprovechamiento de los residuos, dándoles una nueva vida fabricando nuevos productos⁵. La Figura 1 muestra los desechos generados por esta empresa de fabricación de tablas de surf.



Figura 1. Desechos generados por UvaSurfboards®.

El ritmo de producción y consumo que lleva la industria en la actualidad pone en riesgo desde hace años la disponibilidad de recursos naturales y la calidad del medio ambiente. El concepto de economía circular propone la implementación de potenciales desechos como materia prima, promoviendo así la prosperidad económica, la protección del medio ambiente y la prevención de la contaminación, facilitando el desarrollo sostenible.⁶

Por lo tanto, el presente trabajo propone la fabricación de una quilla para tablas de surf con una estructura tipo panel Sandwich que utiliza el polvo de poliuretano reciclado como uno de los materiales de relleno.

1.2 PRODUCTO A DESARROLLAR: QUILLAS

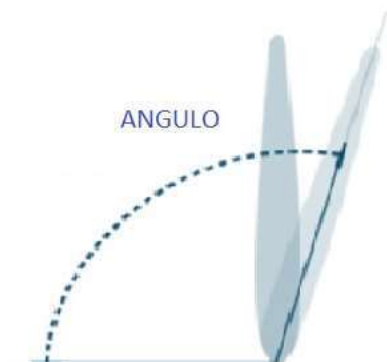
El producto a fabricar en el presente trabajo es una quilla de tabla de surf. La elección de este producto nace a partir de priorizar la sustentabilidad bajo el marco de la economía circular. Por otra parte, utilizar polvo de poliuretano reciclado reduce la cantidad de desechos que de otro modo podrían terminar en vertederos o incineradoras, lo que ayuda a reducir la contaminación y la presión sobre los sistemas de eliminación de residuos⁷. Al reducir la dependencia de los materiales nuevos y la energía asociada con su producción, se puede disminuir el impacto ambiental global de la fabricación de quillas de tablas de surf.

La marca de FCS[®] tiene una iniciativa de fabricación de quillas con fibra de vidrio y resina Bio-Resin EcoBlend™ donde se logra un producto que reduce la huella de carbono, pero no utiliza desechos directamente como materia prima.⁸

Esta pieza tiene como funciones principales proporcionar estabilidad direccional a la tabla, generar agarre de manera de no derrapar sobre la ola y dar maniobrabilidad para poder direccionar la tabla en cualquier sentido. Entre las principales configuraciones de quillas posibles se encuentran la “Single Fin”, “Twin Fin”, “Trifin” o ‘Thrusters’, “Quad Fin” y “five fin”. Cada una variando la cantidad, tamaño, forma y disposición de las quillas en la tabla. Cada configuración cambia la respuesta de la tabla con respecto a estabilidad, dificultad de giro, maniobrabilidad, velocidad y aceleración.⁹

A continuación, se detallan las distintas variantes en el diseño y su efecto en la funcionalidad de la pieza.

“Cant”



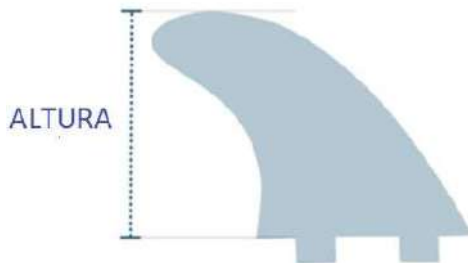
Es una medida que muestra qué ángulo forma la quilla con la parte interior de la tabla. Si este ángulo es cero (perpendicular a la tabla) la tabla será más rápida en dirección lineal, pero perderá maniobrabilidad.⁹

“Sweep”



Es una medida de qué tan atrás se curva la aleta con relación a su base. Aquellas con un desplazamiento muy grande generan estabilidad mientras que las de desplazamiento corto (gran ángulo) permiten radios de giro más cerrados y tablas con mayor movilidad.⁹

Altura-profundidad



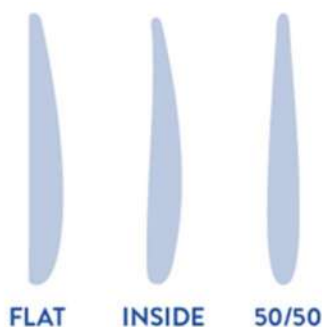
Esta medida cambia el agarre en los giros y estabilidad de la tabla. Las quillas más altas son más fáciles de controlar. Las más cortas agarran menos agua y dan como resultado tablas más suaves y movedizas.⁹

Flexibilidad



Los surfistas que giran a mayor velocidad prefieren quillas de mayor rigidez como las que tienen fibra de vidrio o de carbono como refuerzo. Una alta rigidez proporciona velocidades fuera de la dirección del giro.⁹

Forma de la lámina



Una cara interior plana crea control y velocidad mientras que una cara interior curva minimiza el arrastre generando velocidad y fluidez. Las aletas 50/50 se encuentran en el medio de la tabla para generar estabilidad.⁹

Largo de la base



Este parámetro puede afectar la facilidad con la que la tabla gira. Al ser más larga esta medida aumenta la velocidad, pero disminuye la capacidad de giro.⁹

En la actualidad existen quillas de polímero termoplástico inyectado y de material compuesto de matriz polimérica termorígida reforzado con fibra. Se observan diferencias significativas en términos de propiedades mecánicas, fabricación y desempeño. Las quillas de termoplástico inyectado son más económicas y flexibles, lo cual las hace adecuadas para tablas de surf para principiantes, aunque su resistencia y rigidez son limitadas en comparación con las de material compuesto.¹⁰ Por otro lado, las quillas de material compuesto reforzado con fibra ofrecen una mayor rigidez y resistencia, lo cual mejora el control y el rendimiento en el agua, aunque su costo de producción es más alto. Estas quillas son más ligeras y duraderas, pero menos flexibles, lo que puede hacerlas más susceptibles a daños en caso de impactos fuertes. La elección entre ambos tipos de quillas depende de los requerimientos de rendimiento y del presupuesto disponible, así como del nivel de habilidad del surfista.¹¹

Existen varios métodos de fabricación de estas piezas que dependen principalmente del material utilizado, del volumen de producción y la calidad final buscada. Como se mencionó anteriormente uno de los principales tipos de materiales utilizados en la fabricación de quillas son los polímeros termoplásticos y la técnica más utilizada para estos materiales es el moldeo por inyección. Esta técnica permite obtener piezas con un alto nivel de acabado superficial y con un alto volumen de producción. Por otra parte, las quillas de materiales compuestos de matriz termorígida reforzados con fibras se fabrican con métodos que no se caracterizan por un alto nivel de producción.¹² Entre los más utilizados se encuentran el moldeo manual y técnicas de alta complejidad como RTM ("Resin Transfer Molding"). Por último, se encuentran aquellas que poseen un núcleo y luego son laminadas. Este es el caso de las quillas

desarrolladas en el presente trabajo, donde se escogió un núcleo de polímero compostable (PLA) fabricado mediante impresión 3D permitiendo así generar la forma deseada dejando intersticios para rellenar luego con polvo de poliuretano reciclado mezclado con resina epoxi. Este será el núcleo de la pieza que luego será laminada mediante infusión por vacío.¹³

1.3 PANELES SANDWICH

Si bien el uso de paneles sándwich se dio a conocer con la industria aeronáutica en la segunda guerra mundial, su implementación data de mediados del siglo XIX. Estos materiales constan de dos finas laminas con alta densidad y rigidez separadas por un núcleo de baja densidad (Figura 2). La creación de este tipo de vigas fue la forma más efectiva de disminuir significativamente el peso de estructuras sin perder las propiedades mecánicas.¹⁴

El núcleo cumple varias funciones y debe tener ciertas propiedades específicas para que el material final posea el desempeño requerido. Debe ser lo suficientemente rígido en dirección perpendicular a las caras para asegurarse que permanezcan siempre a la misma distancia. De no cumplir con la última exigencia, el material dejaría de comportarse como un panel sándwich. Además, el núcleo debe tener la rigidez suficiente para evitar que las caras se pandeen localmente y el panel falle por “Wrinkling” bajo compresión.¹⁵

Las pieles deben tener suficiente resistencia estructural ya que son encargadas de proporcionar las propiedades mecánicas al panel y, además, protegen al núcleo ante impactos y condiciones externas.¹⁶

El diseño y análisis de los paneles “Sandwich” comprende mayor complejidad que los materiales convencionales de propiedades isótropas. El uso de dos o más materiales de distinta naturaleza aumenta las variables que deben ser contempladas para comprender el comportamiento mecánico de dichos paneles.¹⁶

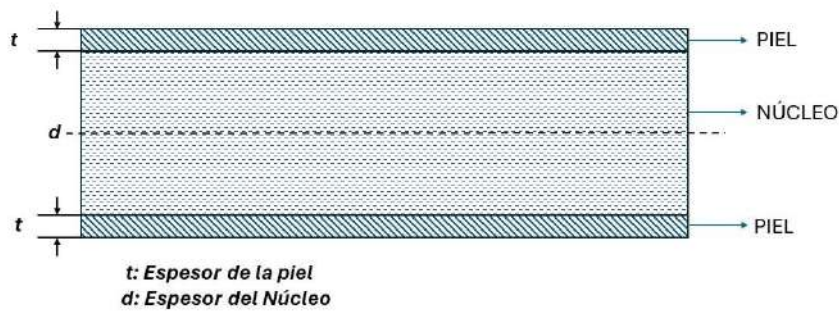


Figura 2. Configuración estándar de un panel sándwich¹⁶

Dentro de los materiales usados para el núcleo se encuentran las estructuras tipo “Honeycomb” que constan de celdas abiertas formadas por láminas delgadas unidas unas con otras (Figura 3). Entre las principales ventajas de este tipo de materiales se encuentran: la capacidad de soportar cargas a tracción y compresión, su excelente rigidez y resistencia específica, su baja densidad y consecuentemente un gran ahorro de peso. Otros materiales muy utilizados como núcleos son las espumas poliméricas gracias a su baja densidad lo que reduce el peso del panel y su buena resistencia mecánica. Algunas otras, además, ofrecen buenas propiedades de aislamiento térmico y/o acústico lo que las convierte en materiales que ayudan a mejorar la eficiencia energética en sus aplicaciones.¹⁶

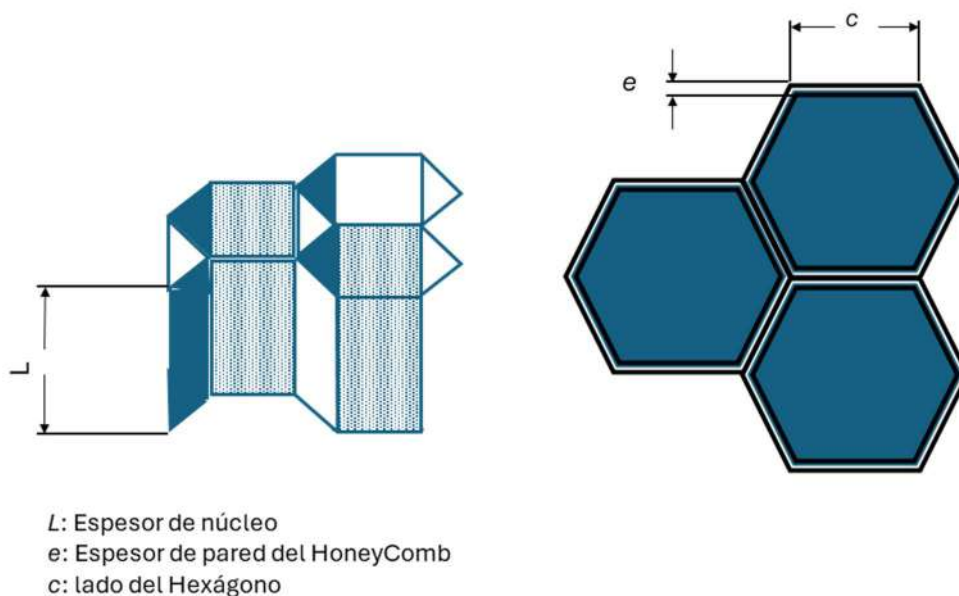


Figura 3. Panel sándwich con núcleo tipo Honeycomb.¹⁶

Las pieles del panel en este caso serán de materiales compuestos de matriz termorígida (resina epoxi) reforzados con fibras sintéticas (vidrio y carbono). Cuando se

diseñan estructuras ultralivianas los materiales compuestos de matriz polimérica son la mejor opción para construir las pieles de los paneles sándwich. Estos materiales surgieron a mediados del siglo XX cuando la industria militar y aeroespacial comenzaron a reemplazar piezas metálicas por materiales compuestos, lo que les permitía disminuir el peso de los productos manteniendo la resistencia mecánica de diseño.¹³

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos, estos materiales comenzaron a formar parte de muchas industrias, introduciendo al mercado productos de alto desempeño.¹³

Si bien existen una alta gama de materiales compuestos, los de matriz polimérica reforzados con fibras pertenecen a los más utilizados actualmente. Estos materiales fueron reemplazando a otros como los polímeros o los metales en distintas aplicaciones gracias a que poseen como principal ventaja un alto cociente resistencia/densidad y módulo/densidad. Esto los convierte en materiales estructurales de alto desempeño.¹⁷ Consisten en fibras de alta resistencia y módulo distribuidas en una matriz que las contiene. Tanto la fibra como la matriz mantienen sus propiedades físicas y químicas pero el conjunto llega a propiedades que no podrían alcanzar los componentes por separado. Por un lado, las fibras son las encargadas de soportar las cargas mientras que la matriz las mantiene en su lugar, actuando como medio de transferencia de carga entre las fibras.¹³

Estos materiales son muy versátiles a la hora del diseño, se pueden encontrar distintas propiedades dependiendo del tipo de matriz y de fibras, la morfología y tamaño de estas y finalmente su disposición dentro del material. La Figura 4 muestra un resumen de las distintas disposiciones de las fibras dentro de una matriz contenedora. Los laminados compuestos por ejemplo presentan un alto rango de propiedades dependiendo de la orientación de las fibras y secuencia de apilamiento, siendo esto último el número, gramaje y tipo de tela que se utiliza. Estas características diferencian a estos materiales de los metales, polímeros y cerámicos ya que es más difícil encontrar isotropía de propiedades.¹³

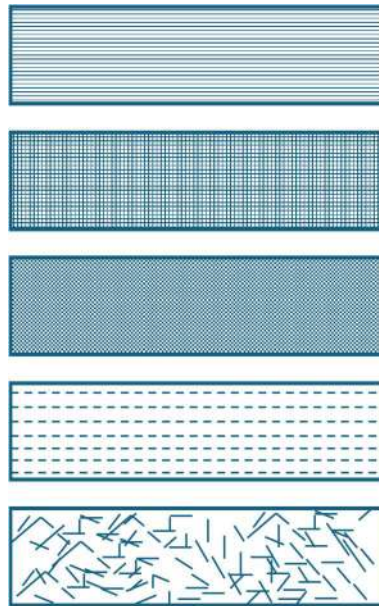


Figura 4. Distintos tipos de arreglo de fibras dentro de una matriz. a) Fibras continuas unidireccionales b) Fibras continuas bidireccionales c) Fibras continuas multidireccionales d) Fibras discontinuas unidireccionales e) Arreglo "al azar" de fibras¹³

La función principal de las fibras en el material compuesto es la de soportar la carga aplicada y darle las propiedades mecánicas al material compuesto. Si bien los materiales utilizados como refuerzo poseen distintos valores de módulo de Young, todos muestran baja deformación a la rotura y fragilidad. La combinación de algunas características de las fibras (tipo, largo y orientación) generan cambios en las propiedades del material compuesto.¹⁷

La matriz de un material compuesto tiene un rol secundario en la resistencia mecánica del material, pero cumple un papel fundamental en la estabilidad dimensional de la pieza. Entre las funciones principales se encuentran: retención de las fibras en su lugar, facilitar la transferencia de carga entre fibras y protegerlas del medio ambiente y del daño mecánico que puedan sufrir.¹⁷

Los tipos de matrices más utilizadas son las poliméricas. Mientras que las termorrígidas son las más elegidas para el procesamiento con fibras continuas por su baja viscosidad, las termoplásticas son muy utilizadas en el procesamiento con fibras cortas y se utilizan los mismos métodos que para producir plásticos convencionales (inyección, extrusión, etc.). También existen matrices cerámicas y metálicas, pero su procesamiento es de mayor complejidad y sus aplicaciones son limitadas por los altos costos de producción.¹³

1.3.1 COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS PANELES

Es importante caracterizar el comportamiento mecánico de los paneles sándwich porque es la forma a nivel ingenieril de analizar el comportamiento estructural del producto a desarrollar, comparar el material en cuestión con otros y analizar si cumple con los requerimientos mecánicos de la aplicación.

El principio básico por el cual estas estructuras presentan una mejora a nivel mecánico es que tienen una alta rigidez a la flexión. Esto sucede principalmente gracias a que el núcleo separa físicamente los revestimientos que son quienes soportan la carga. Este comportamiento puede ser analizado como una viga de perfil doble T donde el núcleo es el alma de la viga. Ante un esfuerzo de flexión las pieles trabajan a tracción (piel inferior) y compresión (piel superior), mientras que el núcleo no sufre deformación por flexión y la tensión de corte (τ) se mantiene constante a lo largo del espesor del núcleo.¹⁸

1.3.2 MECANISMOS DE FALLA DE PANELES EN FLEXIÓN

A continuación, se describirá el análisis elástico de paneles sándwich sometidos a flexión en 3 puntos. Dicho análisis permite evaluar las tensiones sobre el núcleo y las pieles determinando cargas de falla para cada mecanismo. La descripción de todas las variables geométricas que conforman el presente análisis matemático se muestran en la Figura 5 y se describen en la Tabla 3. Estas variables serán utilizadas en toda la descripción del análisis tensional.

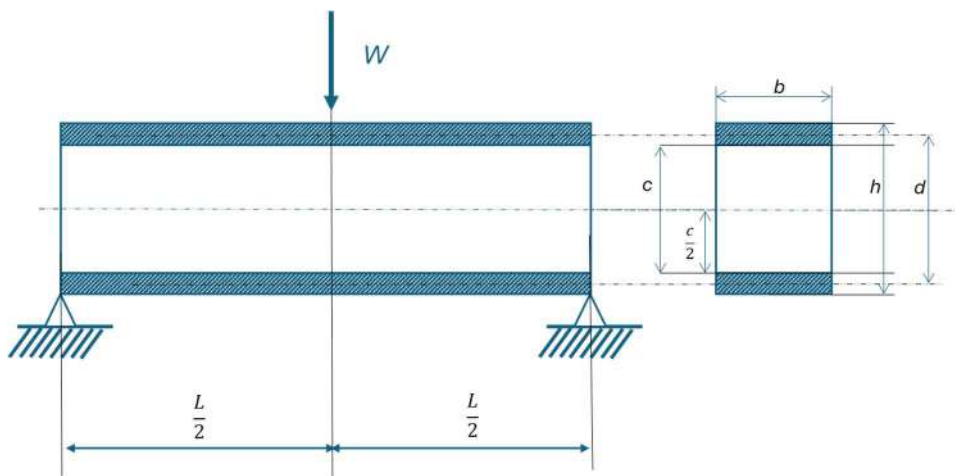


Figura 5. Diagrama de panel Sandwich en ensayo de flexión en 3 puntos¹⁹.

Tabla 3. Descripción de las variables geométricas utilizadas en la construcción de los mapas de falla.¹⁹

Símbolo	Definición	Unidad
<i>b</i>	Ancho de la viga	[m]
<i>h</i>	Espesor del panel Sandwich	[m]
<i>c</i>	Espesor del núcleo	[m]
<i>d</i>	Distancia entre las líneas neutras de las pieles	[m]
<i>L</i>	Longitud de Spam	[m]
<i>t</i>	Espesor de las pieles	[m]
δ	Longitud de contacto entre la aplicación de la carga y el panel	[m]

Para el estudio de las cargas se asume que las pieles permanecen firmemente adheridas al núcleo, que la viga se dobla de manera cilíndrica y que las secciones transversales permanecen planas y perpendiculares al eje longitudinal de la misma. A partir de esto, Allen propone que para la flexión en 3 puntos, el momento máximo está en la mitad de la viga y que los esfuerzos en el plano sobre las pieles viene dada por la expresión¹⁹:

Ecuación 1

$$\sigma_f = \frac{WL}{4dt}$$

Donde:

W: Carga aplicada

σ_f : Esfuerzos en el plano sobre las pieles del panel.

L: Longitud de Span.

d: Distancia entre las líneas neutras de las pieles.

t: Espesor de las pieles.

Sin embargo, la Ecuación 1 no contempla el efecto de la deflexión por corte en el núcleo, lo cual a medida que se analizan núcleos de menor densidad toma mayor incidencia. Por lo tanto, Allen propone una segunda expresión (Ecuación 2) que describe con mayor precisión las tensiones máximas sobre las pieles en un ensayo de flexión en tres puntos¹⁹.

Ecuación 2

$$\sigma_f = \frac{WbL}{4} \left(\frac{c + 2t}{2I} + \frac{WL}{4} \frac{t}{2I_f} \frac{1}{\theta} \right)$$

Donde:

I: momento de inercia del panel sándwich con respecto a su eje neutro. Este valor tiene en cuenta toda la sección transversal del panel (núcleo y caras), y describe cómo se distribuye el área alrededor del eje neutro, lo que es importante para calcular la resistencia a la flexión¹⁹. (Ecuación 4)

I_f: momento de inercia de las láminas exteriores con respecto a sus propios ejes neutros. Este valor se refiere únicamente a las caras del panel, considerando cómo el área de cada una de ellas se distribuye alrededor de su propio eje neutro¹⁹. (Ecuación 5)

θ: parámetro que introduce Allen que depende de la relación entre la rigidez de las pieles y del núcleo y se define en la Ecuación 3.

c: Espesor del núcleo.

b: Ancho de la viga.

Ecuación 3

$$\theta = \frac{L}{c} \left[\frac{G_{cxz}}{2E_f} \frac{c}{t} \left(1 + \frac{3d^2}{t^2} \right) \right]^{1/2}$$

Donde:

G_{cxz}: módulo de corte fuera del plano del núcleo. Esto se refiere a la rigidez del núcleo del panel sándwich cuando está sometido a esfuerzos de corte en dirección perpendicular a su plano.

Ecuación 4

$$I = \frac{bt^3}{6} + \frac{btd^2}{2}$$

Ecuación 5

$$I_f = \frac{bt^3}{6}$$

Luego, reemplazando y despejando W se llega a la Ecuación 6, que relaciona la tensión sobre las pieles con la carga aplicada. Para simplificación se utiliza el parámetro ξ que se define en la Ecuación 7¹⁹.

Ecuación 6

$$W = 4 \sigma_f \xi \frac{t}{L}$$

Donde:

ξ : Parámetro que depende de θ y se presenta en la Ecuación 7.

Ecuación 7

$$\xi = \theta \frac{\frac{t^5}{9} + \frac{t^3 d^2}{3}}{\frac{ht^3(\theta - 1)}{3} + \frac{t^4}{3} + t^2 d^2}$$

Donde:

h : Espesor del panel sandwich.

Cuando el módulo de corte del núcleo G_{cxz} o la longitud del Span (L) tiendan a infinito la Ecuación 6 tiende a la Ecuación 1 y puede despreciarse el efecto de la deflexión por el corte en el núcleo.

Por último, las propiedades mecánicas de un material con estructura Honeycomb pueden ser expresadas como una función de las propiedades del material sólido que lo compone y la de la densidad relativa del mismo (ρ_c/ρ_s). Zhang and Ashby desarrollaron dichas relaciones, que permiten describir de manera aproximada cómo la resistencia y rigidez de los núcleos tipo honeycomb dependen de esta densidad relativa¹⁹. Dichas relaciones serán utilizadas para introducir la ecuación de carga de falla de cada mecanismo en función de la densidad relativa.

Los siguientes son los mecanismos de falla más frecuentes en paneles sándwich:

- Falla por el Núcleo:

- Resistencia al corte del núcleo “Core Shear”.
- Aplastamiento del núcleo “Core Crushing”.
- Falla por las pieles:
 - Resistencia de las pieles “Skin yield”.
 - Pandeo de las pieles “Skin Wrinkling”.

Cada mecanismo tiene su propia expresión de carga en función de los parámetros geométricos y propiedades de los materiales constituyentes. Es así como se procede a definir:

- W_{cs} : Carga de falla por resistencia al corte del núcleo “Core Shear”¹⁹
- W_{cc} : Carga de falla por aplastamiento del núcleo “Core Crushing”¹⁹
- W_{ss} : Carga de falla por resistencia de las pieles “Skin Strength”¹⁹
- W_{sw} : Carga de falla por pandeo de las pieles “Skin Wrinkling”¹⁹

Finalmente, mediante las relaciones establecidas con las propiedades del núcleo, se definen las ecuaciones de carga de falla en función de la densidad relativa ρ_c / ρ_s .

1.3.2.1 Resistencia al corte del núcleo “Core Shear”¹⁹

Asumiendo un contacto perfecto entre el núcleo y las pieles, el componente más débil de la estructura será el que falle por corte. En la mayoría de los paneles sándwich las pieles son más finas y rígidas que el núcleo por lo tanto las fallas por corte serán fallas propias del núcleo.

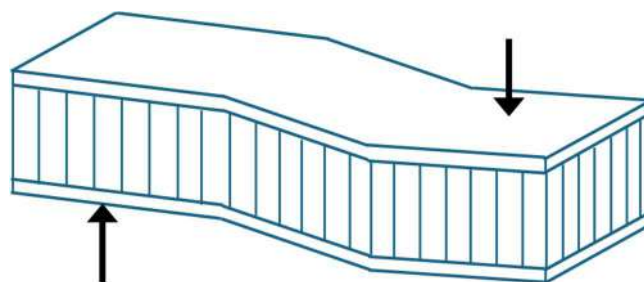


Figura 6. Esquema de falla por corte en el núcleo o “Core Shear”¹⁸.

Despreciando el aporte de las pieles al corte, la tensión de corte en el núcleo se define como:

Ecuación 8

$$\tau_{cxz} = \tau_{cs} = \frac{W}{2d}$$

Donde:

- τ_{cxz} : *Máximo esfuerzo por corte generado en el núcleo.*
- τ_{cs} : *Esfuerzo de corte en la dirección perpendicular al plano de las pieles (z).*

La expresión para la Carga de falla por Corte en el núcleo, W_{cs} (“Core Shear”) es:

Ecuación 9

$$W_{cs} = 2E_s d \left(\frac{\rho_c}{\rho_s} \right)^3$$

Donde:

W_{cs} : *carga de falla para el mecanismo Core Shear.*

E_s : *módulo de elasticidad del núcleo.*

ρ_c : *Densidad del núcleo*

ρ_s : *Densidad del material que conforma el núcleo.*

d : *distancia entre las líneas neutras de las pieles.*

1.3.2.2 *Aplastamiento del núcleo “Core Crushing”*¹⁸

La indentación/aplastamiento del núcleo o “Core Crushing” es otro mecanismo de falla que involucra al núcleo como componente limitante. Se trata de la compresión localizada en la zona de aplicación de la carga en la flexión en 3 puntos tal como muestra la Figura 7.

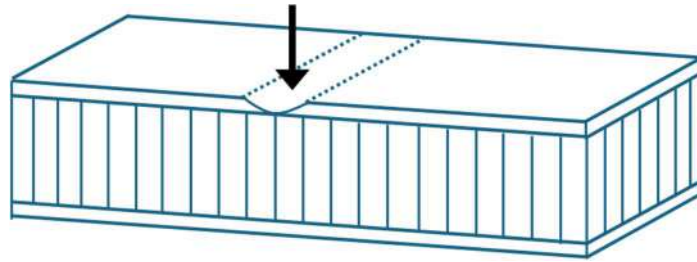


Figura 7. Esquema de falla por indentación o "Core Crushing"¹⁸.

Asumiendo que la carga W se distribuye uniformemente desde el elemento que la transmite a través de las pieles y hasta llegar al núcleo, la relación entre la carga y la tensión de compresión σ_z está dada por:

Ecuación 10

$$\sigma_z = \frac{W}{\delta}$$

Donde:

W : carga aplicada.

σ_z : Tensión de compresión que genera la carga W .

δ : Longitud de contacto con el rodillo de aplicación de la carga.

La falla se dará cuando σ_z alcance el valor de la resistencia a la compresión del núcleo (σ_{cc}). La resistencia a la compresión para un honeycomb fue desarrollada por Wierzbicki y se muestra en la Ecuación 11.

Ecuación 11

$$\sigma_{cc} = 3.25\sigma_{sc} \left(\frac{\rho_c}{\rho_s} \right)^{5/3}$$

Donde:

σ_{cc} : Resistencia a la compresión del núcleo con estructura tipo HoneyComb.

σ_{sc} : Resistencia a la compresión del núcleo.

ρ_c : Densidad del núcleo

ρ_s : Densidad del material que conforma el núcleo.

Reemplazando σ_{cc} por la relación descrita en la Ecuación 10 obtenemos la expresión de carga de falla para el mecanismo de aplastamiento del núcleo "Core Crushing":

Ecuación 12

$$W_{cc} = 3.25 \sigma_{sc} \left(\frac{\rho_c}{\rho_s} \right)^{\frac{5}{3}} \delta$$

Donde:

W_{cc} : carga de falla para el mecanismo Core Crushing.

σ_{sc} : Resistencia a la compresión del núcleo.

ρ_c : Densidad del núcleo

ρ_s : Densidad del material que conforma el núcleo.

δ : Longitud de contacto entre la aplicación de la carga y el panel.

1.3.2.3 Resistencia de las pieles "Skin Strength" ¹⁹

La falla por las pieles ocurre cuando la tensión axial generada por la flexión alcanza la tensión de fluencia (o la resistencia) de las mismas. Se utilizará este concepto por más que los materiales compuestos (en este caso las pieles de los paneles) no presenten fluencia estrictamente. Utilizando la Ecuación 6, sin despreciar el efecto de la deflexión por corte en el núcleo la expresión de carga es:

Ecuación 13

$$W_{ss} = 4 \sigma_{fy} \xi \frac{t}{L}$$

Donde:

W_{ss} : Carga de falla por resistencia de las pieles.

σ_{fy} : Resistencia a la tracción del material de las pieles.

t/L : Relación entre el espesor de piel y la longitud del span.

ξ : Parámetro que depende de θ y se presenta en la Ecuación 7.

Como puede verse en la Ecuación 13, en este caso la carga no depende de la densidad relativa del núcleo. Esto es así ya que en este caso la falla no tiene ninguna dependencia con las propiedades de núcleo y se dará cuando la flexión alcance el valor de resistencia de la piel.

1.3.2.4 Arrugamiento de las pieles “Skin Wrinkling” ¹⁸

Este mecanismo de falla hace referencia al pandeo de la piel y se registra cuando la longitud de onda supera el tamaño de la celda del honeycomb. Siguiendo la expresión de Allen, el “arrugamiento” de la piel ocurre cuando el esfuerzo de compresión llega a un valor crítico.

Ecuación 14

$$\sigma_{sw} = \frac{3}{(12(3-\nu_{cxz})^2(1+\nu_{cxz})^2)^{-1/3}} E_f^{1/3} E_s^{2/3}$$

Donde:

σ_{sw} : Esfuerzo crítico de arrugamiento de las pieles.

ν_{cxz} : Coeficiente de Poisson fuera del plano (perpendicular a las pieles).

E_f : Módulo de elasticidad del material de las pieles.

E_s : Modulo de elasticidad fuera del plano del núcleo (perpendicular a las pieles).

Reemplazando en la Ecuación 6, la carga de falla por “Skin Wrinkling”, W_{sw} , resulta en:

Ecuación 15

$$W_{sw} = 4 E_f^{1/3} E_s^{2/3} \left(\frac{t}{L}\right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right)^{2/3} \xi$$

Donde:

W_{sw} : Carga crítica de arrugamiento de las pieles “Skin Wrinkling”.

ρ_c : Densidad del núcleo.

ρ_s : Densidad del material que conforma el núcleo.

t/L : Relación entre el espesor de las pieles y la longitud de Span.

En este caso, si bien la falla está considerada dentro del grupo de “fallas por la piel” la carga tiene dependencia de las propiedades del núcleo como se muestra en la Ecuación 14 y es por esto que la Ecuación 15 sí tiene dependencia de la densidad relativa del núcleo¹⁸.

1.3.2.5 Resumen de mecanismos de falla de paneles sandwich

La Figura 8 muestra un resumen de los criterios de falla y las cargas que representa cada uno.

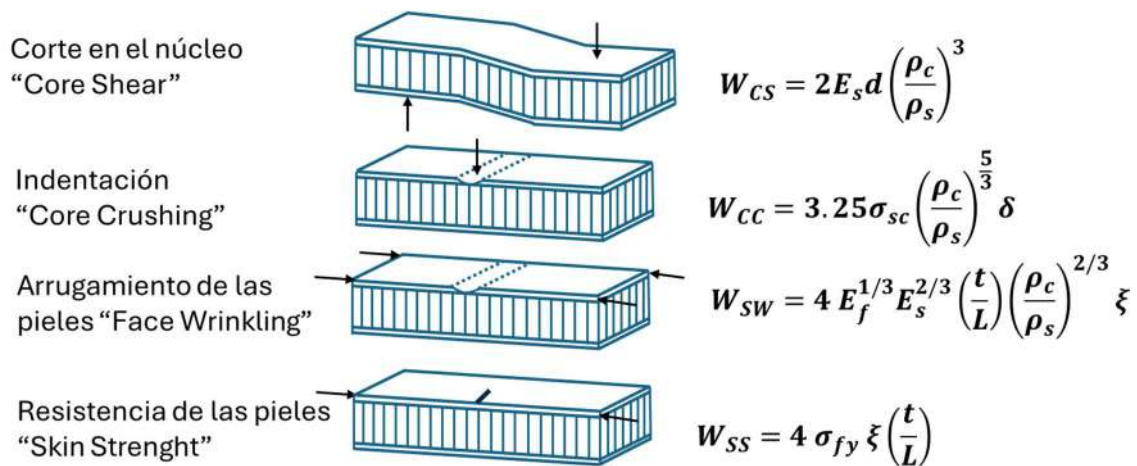


Figura 8. Resumen de criterios de falla y ecuaciones de cada uno.¹⁸

1.3.3 MAPAS DE FALLA

A partir de los mecanismos de falla detallados anteriormente, es posible confeccionar mapas de falla para los paneles sándwich. Estos mapas son herramientas útiles en el diseño, ya que permiten, al elegir una variable, como los materiales que componen el panel, estimar bajo qué parámetros geométricos o relaciones entre ellos ocurrirá la falla según un mecanismo específico. También es útil realizar el análisis inverso: definir una geometría y determinar qué densidad relativa (densidad del núcleo/densidad del material constitutivo (ρ_c/ρ_s)) es necesaria para que el panel falle bajo un mecanismo particular. Los mapas se construyen igualando las ecuaciones de cargas descritas en la sección anterior y despejando las variables que se graficarán. De este

modo queda definida una función que indicará la frontera entre los dos mecanismos de falla. La Figura 9 presenta, a modo de ejemplo, dos mapas de falla para distintos paneles sándwich compuestos por un núcleo tipo Honeycomb de Nomex y pieles laminadas de fibra de vidrio y resina. La diferencia entre ambos gráficos radica en la orientación de las celdas dentro del núcleo¹⁹. La principal ventaja de estos mapas es la predicción del mecanismo de falla de un panel en flexión sin la necesidad de construirlo y generar gastos de tiempo y recursos.¹⁸

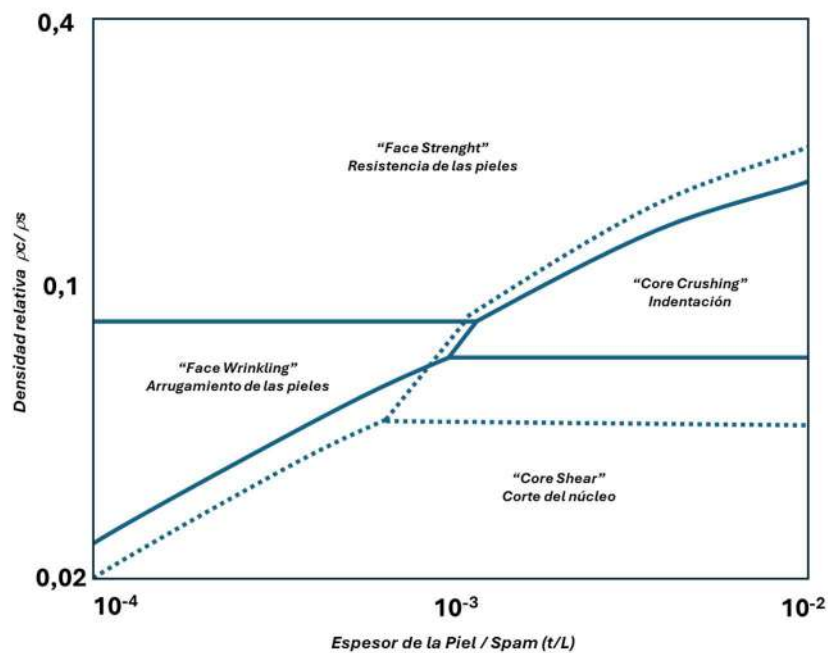


Figura 9. Mapa de falla tipo para un panel sándwich.¹⁹

1.4 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE PANELES SANDWICH

La fabricación de paneles sándwich involucra un método de fabricación de núcleos y otro de las pieles. Las geometrías, materiales y métodos de fabricación de estos componentes pueden ser muy diversas por lo que en esta sección solo se hará referencias a la descripción de las técnicas utilizadas en este trabajo. El método propuesto combina una técnica de manufactura aditiva (impresión 3D) para generar la geometría de la pieza en formato "honeycomb" seguido del relleno de la estructura con el residuo de PU. Estos componentes formarán los que llamaremos "núcleo del panel sandwich". Este núcleo funciona luego como soporte para la colocación de pieles de

material compuesto por la técnica de moldeo líquido de compuestos conocida como Infusión por vacío.

1.4.1 IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D es también parte del proceso productivo de la pieza ya que de esta manera se obtienen los núcleos tipo Honeycomb. En la actualidad, la impresión tiene la ventaja de ser un proceso productivo con gran versatilidad pudiendo adaptarse a cualquier modelo requerido por el productor. El gran avance en esta área hace que sea posible fabricar piezas funcionales de alta precisión.²⁰

Si bien la velocidad de producción es inferior a la de otras técnicas como extrusión o moldeo por inyección, esta técnica es cada día más utilizada en la producción tanto de piezas finales como de subproductos dentro de la cadena. Esta facilidad de producción hace posible que aumenten las personas que lleven a cabo productos innovadores para la industria y dio a luz a empresas o Startups dedicadas exclusivamente al diseño y/o producción de piezas mediante la técnica de impresión 3D²⁰.

Cuando se procede a elaborar una pieza por este método se asignan distintos parámetros de impresión como el espesor de pared y un tipo de relleno específico para la pieza ("infill"). Este relleno tiene consecuencias en el peso, estructura, flotación, resistencia y demás propiedades de la pieza a fabricar. Los parámetros más relevantes son la densidad y el tipo de "infill". En este proyecto se utilizó el tipo "Infill Cubic Subdivisión", donde se producen cubos organizados uno encima de otro con un ángulo de 45° alrededor de los ejes X e Y. La Figura 10 muestra un esquema de este tipo de relleno.²¹

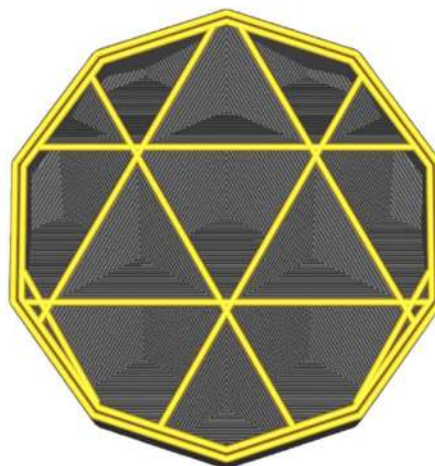


Figura 10. Esquema de relleno tipo "Cubic Subdivision" para impresión 3D.²¹

1.4.2 INFUSION POR VACIO

El paso siguiente una vez conformado el núcleo es su laminación para la obtención de un material tipo panel Sandwich. Este proceso involucra el agregado de pieles simétricas a cada lado del núcleo para lograr la configuración Piel-Núcleo-Piel buscada. El método usado para realizar este proceso fue una variante de los procesos "Liquid Composite Molding" (LCM) denominada infusión por vacío. Esta técnica de fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica termorígida posee solo una de las caras del molde rígida y el contra molde flexible.²²

Entre las principales ventajas que ofrece esta técnica se encuentran: la capacidad de producir piezas de gran tamaño, su reducida emisión de volátiles y la elevada fracción de fibra que se puede alcanzar. A su vez, las desventajas de este método se relacionan con la baja velocidad de producción y elevada cantidad de materiales descartables necesarios, que incrementan los residuos y costos de producción.²²

El proceso comienza colocando la preforma sobre el molde rígido y se cubre con un film plástico ("bolsa de vacío") el cual se sella al molde utilizando una cinta especial ("tacky tape"). El puerto de ingreso de resina consiste en una manguera, la cual tiene un extremo dentro del molde en el punto donde se quiere suministrar la resina, y el otro extremo fuera del molde, el cual se coloca dentro de un recipiente con resina catalizada. Una vez cerrado el sistema, se aplica vacío en la cavidad interna. Para ello se "clampea" la línea de resina con una pinza de apriete especial, evitando que ingrese aire por ese extremo de la manguera. De esta manera se extrae el aire de la cavidad de moldeo ayudando a minimizar la presencia de burbujas en el laminado final y además posibilita que las telas de refuerzo copien la forma del molde. Una vez alcanzado el nivel de vacío deseado, se coloca el extremo de la manguera conectada al puerto de resina dentro de un recipiente que contiene la resina catalizada y se abre la línea de resina quitando la pinza de apriete. La diferencia de presión generada entre en interior ($P=0$) y el recipiente ($P=P_{atm}=1 \text{ atm}$) es la fuerza impulsora para que la resina fluya a través de las fibras y complete el llenado de la pieza. La Figura 11 muestra un sistema listo para laminar una pieza con todos los elementos necesarios²³.

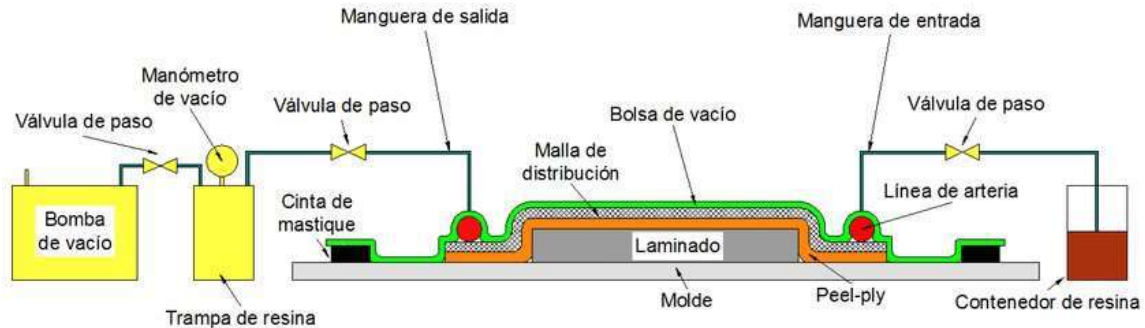


Figura 11. Sistema de infusión por vacío para laminado de pieza.²³

Partiendo de esta base llegó una reversión del proceso de infusión denominado “Seemann Composites Resin Infusion Molding Process” (SCRIMP). Este incluye en el proceso materiales descartables que facilitan el flujo de resina. El Film perforado o “Flow media” es una lámina con agujeros igualmente espaciados y se coloca estratégicamente para controlar el flujo de resina en las direcciones deseadas. El tejido denominado “Peel Ply” es la primera barrera entre el laminado y el resto de los materiales descartables. Este material no se adhiere al producto y permite que se obtenga una buena terminación superficial²⁴.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES

El presente trabajo tiene como objetivo principal la fabricación, caracterización y análisis de la factibilidad técnica y económica para la comercialización de quillas de tablas de surf utilizando residuos de la producción de tablas como materia prima. Este enfoque busca impulsar la economía circular en la industria del surf, reutilizando desechos de poliuretano generados durante el maquinado de núcleos de tablas. Así, se

fomenta una gestión más sostenible de los residuos, contribuyendo a reducir el impacto ambiental de la industria y minimizando la dependencia de materiales vírgenes.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Entre los objetivos específicos del trabajo se encuentran:

- ⇒ La caracterización de la cinética de curado de la resina epoxi a utilizar en la fabricación de las quillas y de las probetas de ensayo (paneles sándwich).
- ⇒ Optimización de la formulación de resina virgen y polvo de PU reciclado para maximizar el uso de material reciclado en el proceso productivo sin comprometer la factibilidad de fabricación de la pieza.
- ⇒ Fabricación de estructuras tipo panel sándwich para utilizar como probetas en ensayos mecánicos. En esta etapa se incluye:
 - Diseño de núcleo tipo “HoneyComb” en sistemas de dibujo CAD.
 - Impresión 3D de dicho núcleo en PLA (polímero biodegradable).
 - Relleno del núcleo con la mezcla optimizada de resina y polvo de PU.
 - Laminación de pieles de material compuesto sobre los núcleos mediante infusión por vacío.
- ⇒ Caracterización mecánica de los paneles y de los materiales constituyentes del mismo.
- ⇒ Evaluación mecánica de otros materiales termoplásticos utilizados en la fabricación de quillas inyectadas.
- ⇒ Selección de una estructura óptima para la fabricación de quillas de tablas de surf en base a los ensayos realizados inicialmente.
- ⇒ Construcción de mapas de falla que permitan predecir los mecanismos de falla de los paneles sándwich y analizar cómo cambian estos mecanismos al modificar los componentes y dimensiones del panel.
- ⇒ Fabricación de prototipos con un núcleo de diseño específico impreso en 3D con la forma de la quilla y los mismos procesos que los paneles sándwich.
- ⇒ Análisis de factibilidad técnica y económica para ofrecer a pequeños productores una alternativa para ampliar su gama de productos dentro de la industria del surf.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 MATERIALES

Las estructuras 3D tipo “Honeycomb”, tanto de las probetas normalizadas para caracterización mecánica como de las quillas, se prepararon por impresión 3D de filamento PLA (ácido poliláctico) marca Grillon®. Este material es sintetizado a partir de recursos renovables como el maíz, la remolacha, el trigo y demás productos ricos en almidón. Tiene propiedades similares a los polímeros derivados del petróleo por lo que lo convierte en un material más eficiente debido a su origen y condición compostable.²⁵ Dentro de los materiales utilizados para la impresión 3D es uno de los más destacados por su baja toxicidad, bajo costo y destacada adhesión entre capas al imprimirse²⁶.

El relleno de las estructuras tipo “Honeycomb” se preparó con residuo de espuma de Poliuretano (PU) en forma de polvo proveniente de la etapa de desbaste del proceso productivo de tablas de surf, provisto por la empresa (UVA Surfboards®), mezclado con resina epoxi DIPREG86® del proveedor Novarchem S.A (Villa Martelli, Provincia de Buenos Aires). Para fabricar las pieles de material compuesto por infusión de resina por vacío, se utilizó la misma resina epoxi que en el material de relleno y se evaluó el desempeño de dos tejidos de refuerzo: un tejido bidireccional de fibras de vidrio de gramaje 4 oz/yd² y un tejido bidireccional de fibras de carbono de gramaje 6 oz/yd². Como materiales descartables para la infusión se utilizaron mangueras, malla de flujo (“Mesh Flow Media”) y tela desmoldante (“Peel Ply”). La ficha técnica de la resina utilizada se muestra en el Anexo 4.

Se utilizaron placas de espuma de poliuretano de densidad 40kg/m³ de proveedor “Nueva era aislantes, Mar del Plata”, para los ensayos mecánicos en compresión.

3.2 PROCESAMIENTO

3.2.1 FABRICACION DE PANELES SANDWICH

3.2.1.1 DISEÑO Y CONFORMADO DE NUCLEO

El núcleo de los paneles sándwich estuvo compuesto por una estructura tipo “honeycomb” impresa 3D con relleno de polvo de PU reciclado mezclado con resina epoxi dentro de los intersticios formados por sus hexágonos. La Figura 12 muestra las dimensiones de las celdas de las estructuras tipo HoneyComb. Estas dimensiones fueron seleccionadas para maximizar la cantidad de relleno de resina epoxi y polvo de poliuretano reciclado en los intersticios del panel, pero cuidando la estabilidad dimensional de la pieza. A su vez, se verificó que dichas dimensiones de celda cumplan con las exigidas por las normas ASTM C-393 para la fabricación de probetas de flexión de paneles Sandwich²⁷ y ASTM C-365 para los ensayos de compresión en el núcleo²⁸.

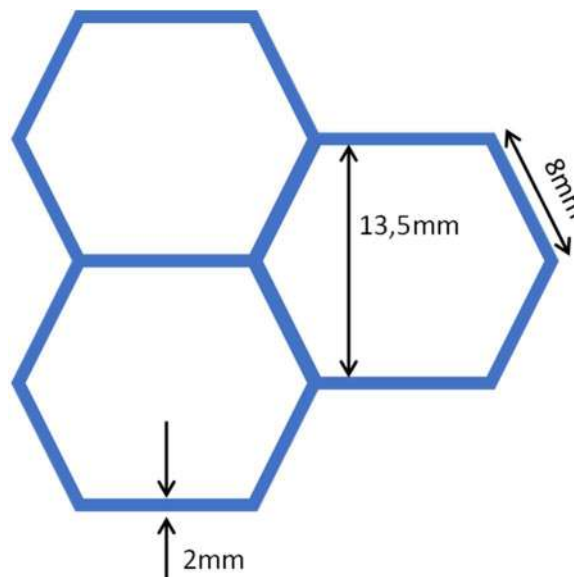


Figura 12. Dimensiones de las celdas componentes de la estructura HoneyComb.

La estructura tipo “honeycomb” fue preparada mediante la técnica de impresión 3D por deposición de filamento fundido (PLA). La Figura 14 muestra una de las estructuras en proceso de impresión a partir de un dibujo CAD (Figura 13). Se llevó a cabo la impresión de estructuras tipo “honeycomb” con un volumen de 20 cm x 20 cm x 1.2 cm con la geometría de hexágonos antes mencionada. Los parámetros de impresión se muestran en la Tabla 4. Parámetros de impresión 3D

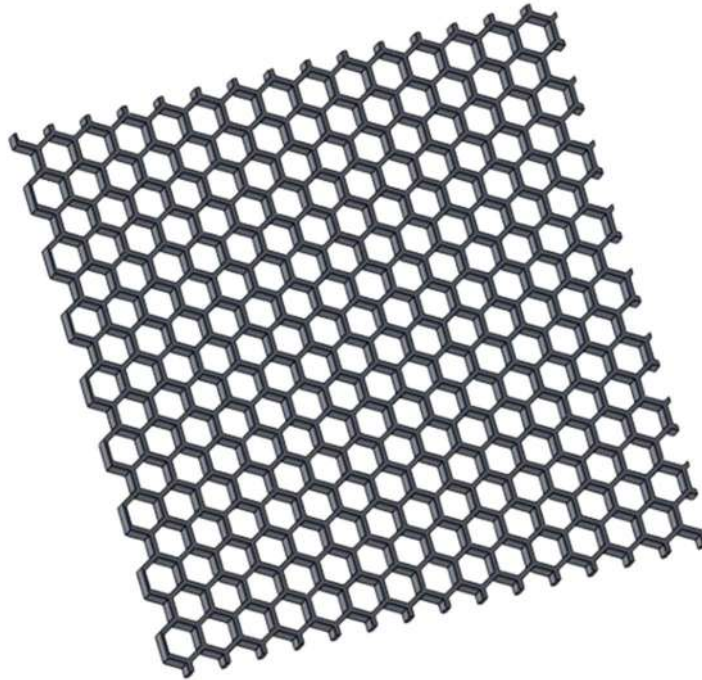


Figura 13. Diseño CAD de la estructura tipo HoneyComb

Tabla 4. Parámetros de impresión 3D

Parámetros de impresión 3D	
Impresora	Creality Ender 6
Espesor de pared	1,2 mm
Tipo de Relleno	Cubic Subdivision
% de Relleno	20%
Material	PLA Grilon®
Temperatura [°C]	210
Diámetro de boquilla [mm]	0,4



Figura 14. Estructura tipo HoneyComb en proceso de impresión

El relleno de los intersticios formados por los hexágonos de las estructuras tipo honeycomb se realizó con una mezcla de resina epoxi y su endurecedor y polvo de PU reciclado. El objetivo principal en la estequiometría de la mezcla fue maximizar el porcentaje de relleno (espuma de PU reciclado) que a su vez permita la correcta inserción de este en la estructura sin desperdicios significativos.

El factor limitante en el proceso de mezcla fue el aumento de la viscosidad a medida que se agregaba el polvo de PU ya que esto imposibilitaba el relleno de los intersticios de la estructura tipo "Honeycomb" de manera manual. Tras probar distintas formulaciones el mayor porcentaje en volumen de polvo admisible para poder lograr un relleno adecuado fue de 50% como se muestra en la Figura 15].



Figura 15 .Elementos de partida para el relleno de las estructuras tipo HoneyComb.

Una vez conformada la mezcla se rellenaron los intersticios de las estructuras tipo “Honeycomb” con la ayuda de espátulas plásticas. Este proceso se realizó sobre láminas de PET para facilitar el despegue de las placas una vez curada la resina (Figura 16). Los núcleos rellenos permanecieron curando a 25°C durante 24 hs (de acuerdo con recomendaciones de la ficha técnica de la resina) antes de ser desmoldados y almacenados.

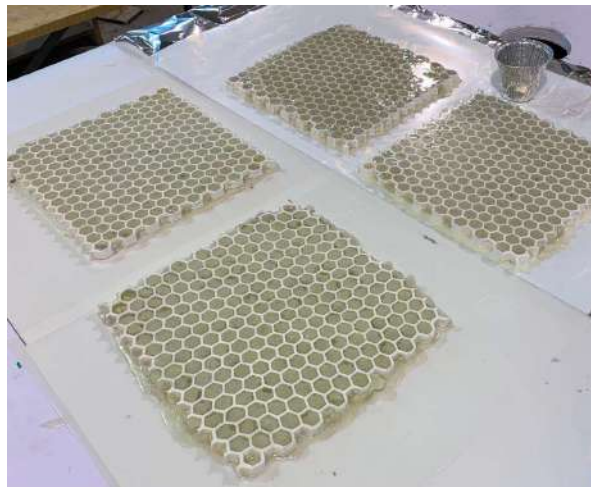


Figura 16. Núcleos compuestos por estructuras tipo “honeycomb” impresas 3D rellenas con resina y polvo de poliuretano durante el proceso de curado.

El espesor y densidad de los núcleos fabricados fue de 1.23 ± 0.06 cm y 1.08 ± 0.05 gr/cm³, respectivamente. Las dimensiones y densidades de cada núcleo se detallan en la Tabla A 2 del Anexo 1.

3.2.1.2 LAMINADO DE NÚCLEOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PANELES SANDWICH

Se realizó la laminación de piezas utilizando una variante de la infusión tradicional desarrollada por el grupo de Compuestos Estructurales Termorígidos (CET) del instituto de investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA). Esta variante reemplaza la bolsa de vacío por una membrana de silicona reutilizable en cada procesamiento. De esta manera, se elimina del proceso uno de los componentes descartables.

Durante el proceso de infusión la resina desarrolla paralelamente el proceso de curado, lo cual afecta directamente la manera en la que fluye sobre las fibras. Por este motivo, es necesario conocer la cinética de curado de la resina y ver si a la temperatura de trabajo es posible efectuar la infusión sin que ocurra un curado prematuro. Este defecto, conocido como “short-shot”, dejaría las piezas con el laminado cubierto parcialmente con resina y se obtendría un producto inutilizable. Contrariamente, si la resina tarda demasiado tiempo en alcanzar una conversión a la que pueda desmoldarse la pieza, los tiempos productivos aumentarían.²⁹ De este modo se utilizó esta técnica para agregar el laminado de fibra de vidrio y de carbono a cada lado del núcleo y conformar así el panel Sandwich.

En primer lugar, se diseñó una estrategia de infusión (Figura 17) de modo que la resina fluya uniformemente y pueda cubrir el total de las placas evitando la generación de puntos secos y minimizando la cantidad de desperdicios de resina y materiales descartables. En las FigurasFigura 18Figura 19 se muestra el montaje del diseño de la Figura 17.

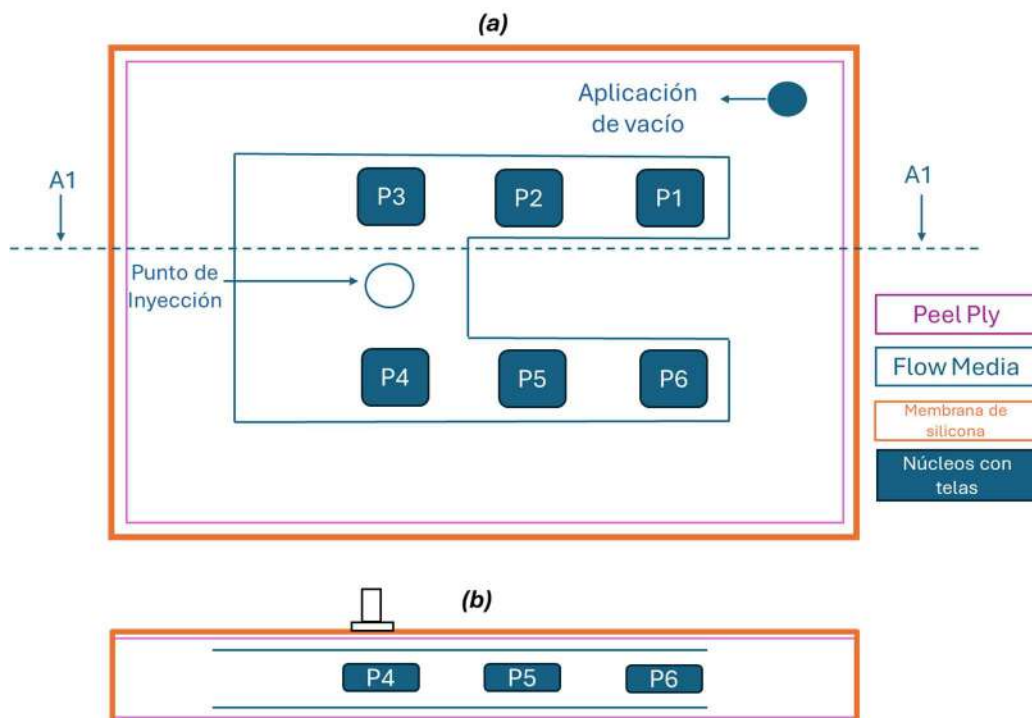


Figura 17. Vistas de la configuración de la infusión por vacío de los paneles sándwich: (a) vista superior; (b) vista en corte A1.



Figura 18. Disposición de placas en el proceso de laminación



Figura 19. Sistema previo a la infusión

Los paneles P1, P2 y P3 de la Figura 17 corresponden a los núcleos laminados con pieles de fibra de carbono de 6oz. Cada cara del panel estuvo compuesta por pieles con 1, 2 y 4 telas, respectivamente. Los paneles P4, P5 y P6 siguen la misma secuencia, pero utilizando fibra de vidrio de 4oz.

Una vez realizado el montaje de las muestras e insumos de infusión, se procedió al sellado de las membranas de silicona, aplicación de vacío hasta un nivel de 0.08MPa,

apertura de la línea de ingreso de resina hasta el llenado completo de los paneles P1 y P6 (ver Figura 17) y por último cierre de la línea de ingreso de resina manteniendo el vacío aplicado por 24hs a 20°C, lo cual garantiza el curado de la resina a niveles superiores a la conversión de gel. Al final de este proceso, se desmoldaron los paneles como se muestra en la Figura 20. Como se puede ver en esta imagen se experimentaron defectos de puntos secos donde la resina no llegó impregnar las fibras. Esto se puede atribuir al fenómeno denominado “race tracking” que son canales preferenciales para el flujo de resina que se forman en los bordes de las placas. Esto se origina debido a que los materiales de infusión (membranas de silicona, “Flow media” y “peel ply”) no envuelven los bordes de las placas, por lo que al juntarse las capas superiores con las inferiores de estos materiales no se copia perfectamente la pieza en dicha zona dejando un canal de pequeñas dimensiones con menor resistencia al flujo de resina. No fue necesario repetir la infusión ya que el área impregnada era suficiente para la obtención de las probetas para ensayar. No obstante, fue una consideración para tener en cuenta para futuras infusiones.



Figura 20. Placas luego de la laminación por infusión por vacío

3.2.2 FABRICACION DE QUILLA

3.2.2.1 DISEÑO DE LA QUILLA

El diseño de la quilla se seleccionó a partir de archivos disponibles en sitios web de acceso público diseñados para la impresión 3D. En esta etapa, no se priorizó el tipo de tabla de surf ni el nivel de experiencia del surfista, ya que el objetivo principal era validar el método de fabricación, asegurando que cumpliera con los requisitos mecánicos mínimos para su aplicación. Se realizaron ajustes en los modelos CAD de las quillas, modificando tanto sus dimensiones como la forma en la zona de sujeción. A su vez, se dibujaron quillas de distintos espesores para obtener mayor diversidad en los productos finales y las dimensiones de las celdas se modificaron para igualar a las de las placas (Figura 12). De esta manera, igualando la geometría de las celdas se buscó asegurar la uniformidad de los procesos de producción. La Figura 21 muestra el diseño CAD de una de las estructuras de la quilla elegida para la impresión con las dimensiones. El espesor de la base de sujeción fue de $3,80 \pm 0,01$ mm.

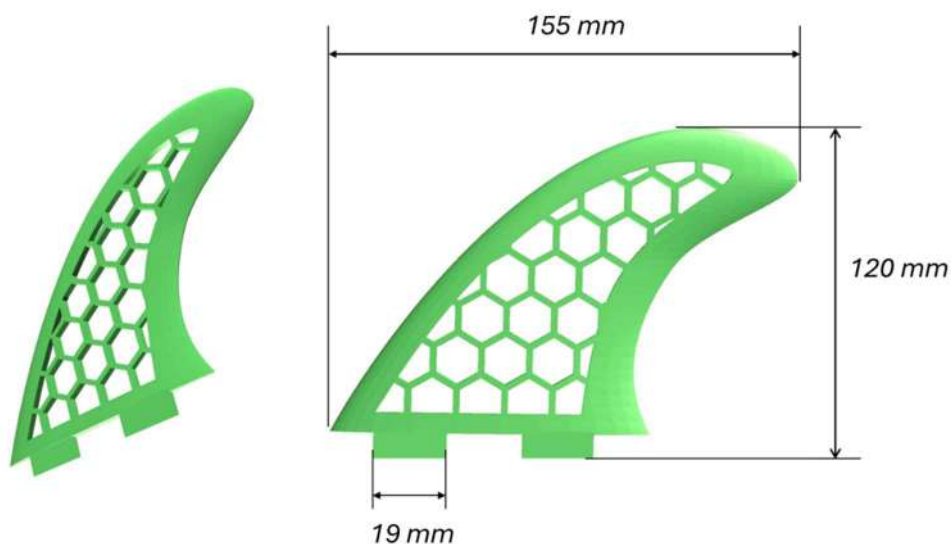


Figura 21. Figura CAD de la quilla y sus dimensiones.

3.2.2.2 FABRICACION DEL NUCLEO

En esta etapa se denomina núcleo a la quilla impresa 3D con estructura tipo honeycomb y los intersticios de sus hexágonos rellenos de mezcla de resina epoxi con polvo de PU reciclado.

Una vez finalizados los dibujos CAD se imprimieron las quillas con estructura tipo “honeycomb” en PLA mostradas en la Figura 22. Los parámetros de impresión utilizados

fueron los informados en la Tabla 4. La diferencia en los pesos de estas piezas se debe a que la quilla negra de la izquierda es una quilla central simétrica en el espesor y la celeste de la derecha es una quilla lateral plana en la cara interior.

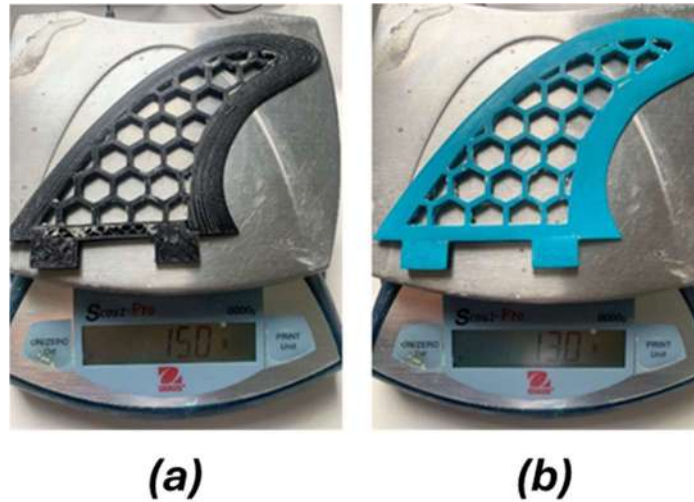


Figura 22. Distintas impresiones de núcleos de quillas: (a) quilla central 15.0 gr.; (b) quilla lateral 13.0 gr.

El segundo paso para la fabricación del núcleo fue rellenar los “honeycombs” con la misma mezcla utilizada anteriormente en la sección 3.2.1.1. Se preparó resina con polvo de PU reciclado en proporción 50/50 en volumen. La Figura 23 (a y b), muestra los núcleos de quilla fabricados.



Figura 23. Núcleos de quillas: estructuras tipo “honeycomb” con geometría de quilla rellenos de resina epoxi y polvo de PU: (a) quilla lateral; (b) quilla central.

3.2.2.3 LAMINADO DEL NUCLEO CONFORMADO

Para el laminado de la quilla se utilizó el mismo método de infusión de resina por vacío descrito en la sección 3.2.1.2. Como secuencia de laminación se usó una tela bidireccional de fibra de vidrio de 4oz a cada lado de la quilla. Esta selección se decidió luego del análisis de resultados de la caracterización mecánica de los paneles sándwich, donde se concluyó que esta estructura soporta las solicitaciones mecánicas de diseño para la aplicación minimizando el costo y el peso de la pieza final.

La Figura 24 muestra el sistema listo antes de comenzar la infusión por vacío para la laminación del núcleo de la quilla y una imagen de quilla laminada.

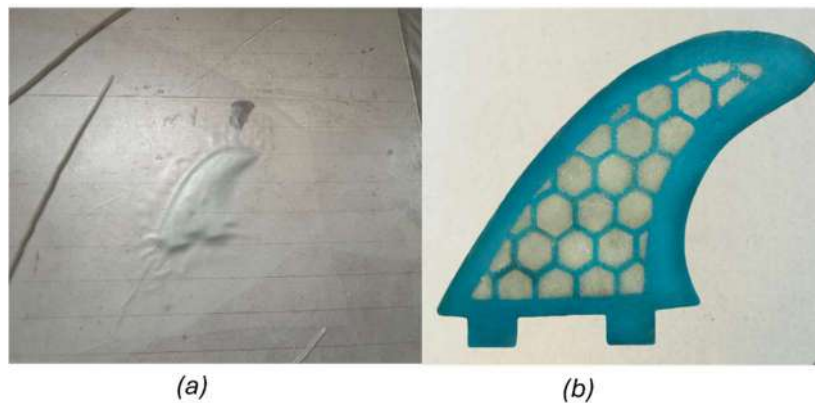


Figura 24. Fabricación de quillas: a) núcleo de quilla previo a la infusión; b) quilla laminada (producto final).

3.3 CARACTERIZACION

3.3.1 CINETICA DE CURADO DE RESINA

Conocer la cinética de curado de la resina optimiza los procesos productivos y permite obtener una ventana de procesamiento (tiempo y temperatura) donde se minimiza la presencia de defectos y se ahorra energía. El proceso de infusión por vacío utilizado en este trabajo parte de tener un recipiente con resina reactiva por lo tanto es necesario conocer mediante la cinética de curado la “vida en recipiente” o “pot life”. De esta manera se prevé el tiempo limitante que puede durar la infusión.

Para el estudio de la cinética de curado de la resina epoxi utilizada tanto como relleno como para las pieles se realizaron ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC). El calorímetro utilizado fue el TA Instruments DSC Q2000.

El objetivo del estudio de la cinética de curado es obtener un modelo cinético que permita predecir el avance de reacción de curado de la resina en función del tiempo y de la temperatura. Algunos de los modelos más utilizados son los siguientes³⁰:

- $\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot \alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n$ Ecuación 16

- $\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot (1 - \alpha)^n$ Ecuación 17

- $\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n$ Ecuación 18

Donde:

- $\frac{d\alpha}{dt}$ es la velocidad de reacción
- α es el grado de conversión de la resina.
- m y n son parámetros que definen el orden de reacción y se suponen independientes de la temperatura.
- k_i tiene una dependencia exponencial tipo Arrhenius con la temperatura:

Ecuación 19

$$k_i = k_{i0} \cdot \exp\left(\frac{-E_i}{R.T}\right)$$

- k_{i0} es el factor pre-exponencial.
- E_i es la energía de activación.
- R es la constante de los gases ideales.
- T es la temperatura.

Generalmente, para las resinas utilizadas en la fabricación de materiales compuestos, la evolución de la reacción de curado puede ajustarse a uno de los 3 modelos. La Figura 25 muestra las curvas representativas de cada modelo. A partir de las encontradas experimentalmente puede deducirse qué modelo es mejor utilizar y luego mediante cálculo numérico ajustar la curva y obtener los parámetros: m , n y k para caracterizar completamente la cinética de curado de la resina.³⁰

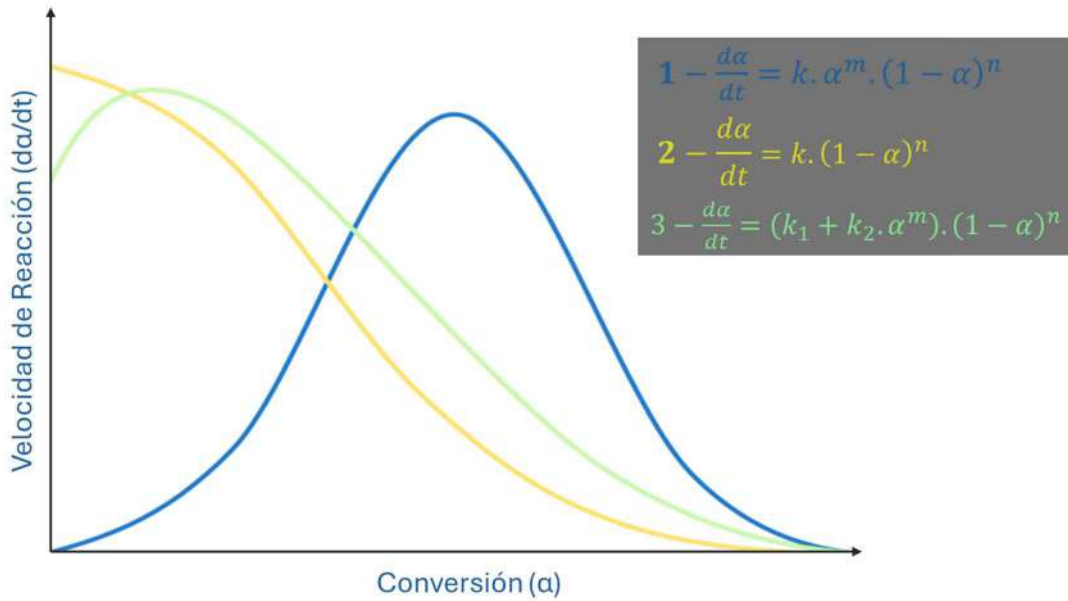


Figura 25 .Esquemas cualitativos correspondientes a cada modelo³⁰.

La Figura 26 y Figura 27 muestra resultados cualitativos de una corrida de DSC dinámica y otra isotérmica, respectivamente. El área debajo de la curva en la corrida dinámica refleja el calor total de reacción. Por lo tanto, se pueden calcular los valores de conversión en función del tiempo dividiendo los valores de calor en función del tiempo en una corrida isotérmica por el calor total de reacción.

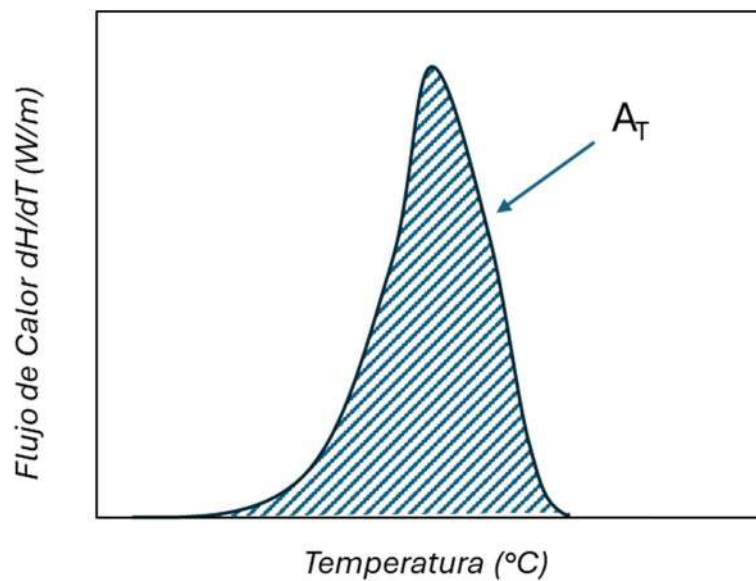


Figura 26. Gráfico cualitativo de corrida dinámica (velocidad de calentamiento constante) de DSC.³⁰

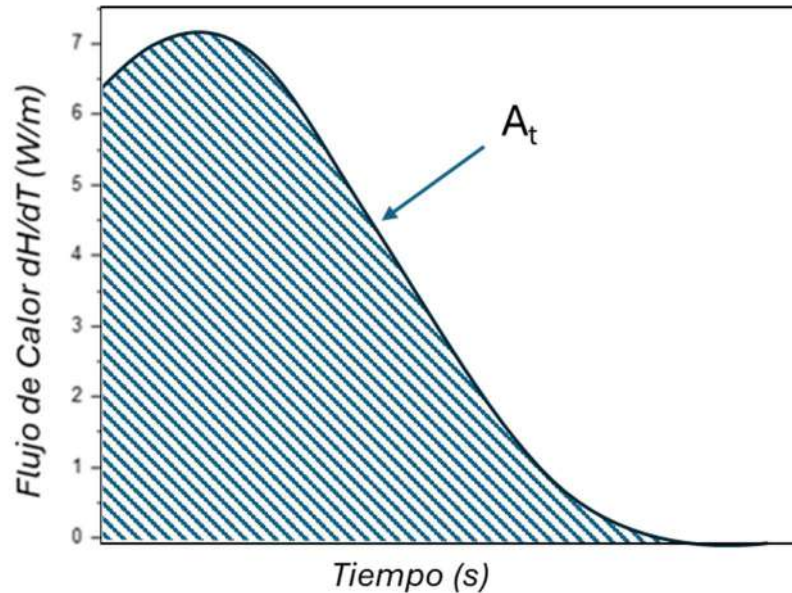


Figura 27. Gráfico cualitativo de corrida isotérmica (temperatura constante) de DSC.³⁰

Donde:

A_T = Calor total de reacción

A_t = Calor de reacción a una temperatura

$$\alpha(t) = A_t/A_T$$

Una vez obtenida la cinética de curado haciendo los análisis a distintas temperaturas podemos predecir el comportamiento del polímero a cualquier temperatura de manera analítica. Esto facilita la selección de las condiciones de procesamiento sin necesidad de recurrir a la prueba y error.

Como punto de partida se realizó un ensayo dinámico (calentamiento de la muestra desde 20°C a 250°C a 10°C/min) para calcular el calor total de reacción de curado de la resina y, además, la temperatura en la cual aparece el pico de calor de reacción.

Luego, se realizaron barridos isotérmicos a 25, 85, 100, 110 y 116°C. El tiempo de ensayo isotérmico fue el necesario para que se desarrollen totalmente los picos de

reacción. A partir de las curvas obtenidas se logró calcular el calor de reacción en función del tiempo a cada temperatura.

En los ensayos experimentales la mezcla de resina y endurecedor se realizó en un lapso de 3 minutos y se incorporó la mezcla rápidamente al equipo. Luego se utilizó la máxima velocidad de calentamiento del equipo para llevar el conjunto a la velocidad de ensayo y se utilizó un tiempo de estabilización de temperatura de 1 min antes de arrancar el registro de datos. Las razones de este procedimiento es que la resina no inicie su reacción de curado en el ensayo isotérmico antes del comienzo del registro de datos y que, al momento de comenzar con la adquisición de información, se garantice una temperatura de ensayo uniforme en la muestra.

3.3.2 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE FALLA

La caracterización mecánica de los paneles “Sandwich” conlleva mayor complejidad que los materiales isótropos y las normas de estos materiales indican que no es posible ensayar probetas y encontrar propiedades intrínsecas comparables con otros materiales.²⁷ Por esta razón, se decidió ensayar mecánicamente los componentes por separado para la confección de mapas de falla que predigan como serán los modos de falla predominantes según la composición del panel y las características de la sollicitación mecánica aplicada. Estos mapas resultan útiles para comparar como serán las fallas en el ensayo de flexión en 3 puntos en un panel sin la necesidad de realizar ensayos experimentales.

Tal como se detalló en la sección 1.3.2 de “mecanismos de falla en flexión para paneles sándwich”, existe una carga a la que ocurren los distintos mecanismos dependiendo de la geometría de la probeta y de los materiales utilizados tanto para el núcleo como para las pieles. El material fallará por el mecanismo que presente una menor carga de falla para una geometría específica. Para un panel sándwich, la carga de falla depende de las propiedades a la tracción de las pieles, las propiedades a la compresión y densidad relativa (ρ_c/ρ_s) del núcleo y las dimensiones. Es posible construir mapas de falla a partir de la igualación de las ecuaciones de carga para cada mecanismo¹⁹.

Para poder confeccionar los mapas fue necesario realizar ensayos de tracción en las pieles y de compresión en el núcleo¹⁸.

3.3.2.1 ENSAYOS DE TRACCIÓN EN PIELES

Se realizaron ensayos de tracción uniaxial de las pieles de material compuesto según la norma ASTM D 3039-00 “Standard Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”³¹. Esta permite determinar las propiedades a la tracción de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de módulo elevado.³¹

Se confeccionaron placas mediante infusión por vacío de fibra de vidrio y de carbono con resina epoxi donde cada tipo de laminado se fabricó con 1, 2 y 4 telas de 4oz, coincidente con los tipos y secuencia de apilamiento de pieles en los paneles. Luego se cortaron las probetas según las dimensiones sugeridas por la norma para este tipo de materiales y se ensayaron en una máquina de ensayos mecánicos universales EMIC 23-50.

Las muestras fueron denominadas según Material, número de telas y número de probetas. Por ejemplo, la probeta 1 conformada por 2 telas fibra de vidrio se la denominó PV21. Las dimensiones y los resultados de cada probeta se encuentran en la Tabla A 5 y Tabla A 6 respectivamente del Anexo 1.

3.3.2.2 ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN NÚCLEO

Se realizaron ensayos de compresión en los materiales que conforman el núcleo (estructura “honeycomb” impresa 3D rellena con mezcla de resina epoxi y polvo de PU) del panel bajo la norma ASTM C 365 – 03 “Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores”²⁸ con una celda de carga de 10kN y una velocidad de la travesa de 2,5 mm/min. Este ensayo permite la determinación de la resistencia y el módulo en compresión de núcleos. Para esta prueba se utilizaron probetas cortadas a partir de los núcleos conformados en el apartado 3.2.1. Las probetas utilizadas fueron cuadradas de $26,19 \pm 0,99$ mm de lado y $11,97 \pm 0,03$ de espesor.

También se realizaron ensayos de compresión sobre probetas de espuma de PU para obtener valores de módulo y resistencia a la compresión. Estos ensayos se realizaron bajo la norma ASTM 1621: “Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics”³² utilizando la máquina de ensayos EMIC 23-50

con una celda de carga de 10kN y una velocidad de la travesa de 2,5 mm/min. Las probetas utilizadas fueron cuadradas de $110,93 \pm 0,83$ mm de lado y $25,40 \pm 0,25$ de espesor. Las dimensiones detalladas se adjuntan en la Tabla A 3 del Anexo 1.

3.3.2.3 CONSTRUCCION DEL MAPA DE FALLA

Para la construcción de los mapas de falla, se procedió a igualar las ecuaciones de carga previamente descritas para cada uno de los mecanismos de falla (resumen en Figura 8). A partir de esta igualación y del despeje de la relación entre la densidad relativa (ρ_c/ρ_s) y el parámetro geométrico (t/L), se obtuvieron las curvas fronteras que definen los límites entre los distintos modos de falla. Estas curvas permiten predecir en qué condiciones geométricas y de material ocurrirá la falla en función de los mecanismos evaluados.

Skin Strenght / Skin Wrinkling

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right) = \left[\frac{\sigma_f}{E_f^{1/3} E_s^{2/3}} \right]^{\frac{3}{2}} \text{ Ecuación 20}$$

Skin Strenght / Core Shear

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right) = \left[\frac{2\sigma_f \left(\frac{t}{L}\right)^{\xi}}{E_s d} \right]^{\frac{1}{3}} \text{ Ecuación 21}$$

Skin Strenght / Core Crushing

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right) = \left[\frac{1.23 \sigma_f \left(\frac{t}{L}\right)^{\xi}}{\sigma_{sc} \delta} \right]^{\frac{3}{5}} \text{ Ecuación 22}$$

Core Shear / Core Crushing

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right) = \left[\frac{1.625 \sigma_{sc} \delta}{E_s d}\right]^{\frac{3}{4}} \text{Ecuación 23}$$

Skin Wrinkling / Core Shear

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right) = \left[\frac{2E_f^{1/3} E_s^{2/3} \left(\frac{t}{L}\right)^\xi}{E_s d}\right]^{\frac{3}{7}} \text{Ecuación 24}$$

Skin Wrinkling / Core Crushing

$$\left(\frac{\rho_c}{\rho_s}\right) = \frac{1.23 E_f^{1/3} E_s^{2/3} \left(\frac{t}{L}\right)^\xi}{\sigma_{sc} \delta} \text{Ecuación 25}$$

Donde:

σ_{sc} : Resistencia a la compresión del material que compone el núcleo.

ρ_c : Densidad del núcleo

ρ_s : Densidad del material que conforma el núcleo.

σ_f : Esfuerzos en el plano sobre las pieles del panel.

t : espesor de la piel.

L : Longitud de span del ensayo de flexión en 3 puntos.

ξ : Parámetro que depende de θ y se presenta en la Ecuación 7.

θ : es un parámetro que introduce Allen que depende de la relación entre la rigidez de las pieles y del núcleo y se define en la Ecuación 3.

E_f : Módulo de elasticidad del material de las pieles.

Es: Módulo de elasticidad fuera del plano del núcleo (perpendicular a las pieles).

δ : Longitud de contacto entre la aplicación de la carga y el panel.

d: distancia entre las líneas neutras de las pieles.

3.3.3 ENSAYO MECANICO DE PANELES "SANDWICH" POR FLEXIÓN EN 3 PUNTOS

Se realizaron ensayos mecánicos a los paneles sándwich según la norma ASTM C 393-00 "Standar Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions"²⁷. Esta norma permite obtener distintas características a la flexión del núcleo, de las pieles y del conjunto en un panel sándwich. En primer lugar, se buscó observar cómo la rigidez a la flexión del panel variaba en función de los cambios en el tipo y cantidad de pieles utilizadas. Este análisis permitió evaluar la influencia de las pieles en el comportamiento del panel. En segundo lugar, el ensayo tenía como propósito verificar que los mecanismos de falla observados correspondieran a las predicciones realizadas de manera analítica mediante los mapas de falla.

Las placas ya laminadas eran cuadradas de 220 mm de longitud por lado. A partir de los requerimientos de la norma se realizaron los cortes de las placas generando probetas (Figura 28).



Figura 28. Probetas de panel sandwich para ensayos de flexión y compresión

La norma exige que se respeten ciertas relaciones entre las dimensiones de las probetas rectangulares²⁷:

- El espesor de las probetas debe ser igual a la profundidad de la construcción Sandwich.
- El ancho:
 - No debe ser menor que dos veces el espesor
 - No debe ser menor que 3 veces la dimensión de una celda del núcleo
 - No debe ser mayor que la mitad de la longitud del span (170mm).
- El largo de la probeta debe ser igual a la longitud del span más 50 mm.

Para los ensayos de flexión en 3 puntos las probetas tuvieron un ancho de 38,03 ± 1,05 mm, espesor de 13,19 ± 0,49 mm y largo de 220 ± 1 mm. Las dimensiones de cada probeta se detallan en la Tabla A 7 del Anexo 1. El corte se realizó con una sierra de tipo circular con un disco de corte apropiado para la dureza del material.

La nomenclatura para identificar cada probeta se construyó de la siguiente manera. Las letras TV o TC, hacen referencia a tela de fibra de vidrio o carbono, respectivamente. El número a la izquierda del nombre; 1, 2 o 4; hace referencia al panel sándwich con núcleo de estructura tipo "honeycomb" impresa 3D rellena con resina y polvo de PU, con pieles de material compuesto de 1, 2 o 4 capas de tela de vidrio o carbono. El código P1, P2, P3 o P4 a la derecha del nombre hace referencia al número de probeta ensayado.

Los ensayos de flexión se realizaron con una máquina de ensayos mecánicos universales EMIC 23-50 con configuración de flexión en 3 puntos y se aplicó carga a velocidad de travesa constante de 5 mm/min. Se ensayaron todas las probetas listadas hasta su rotura y se registraron valores de carga y extensión, esta última determinada por el desplazamiento de la travesa.

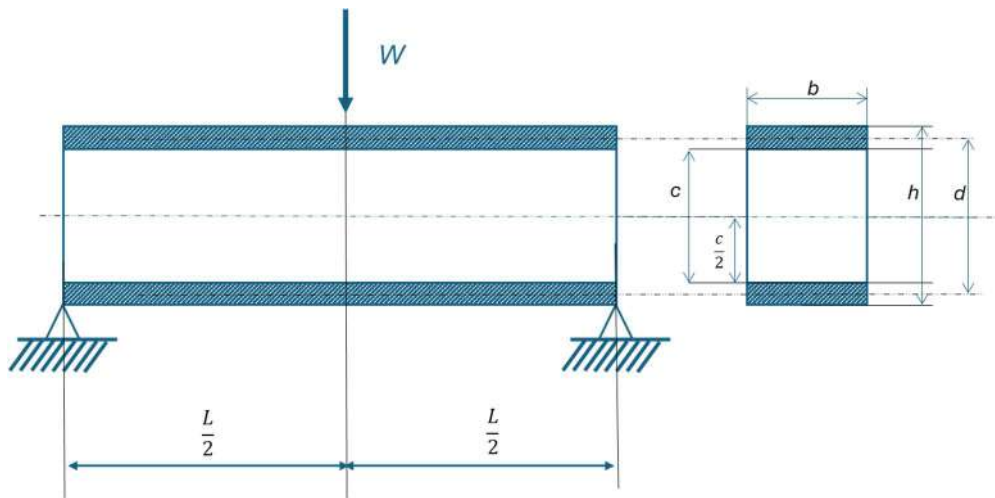


Figura 29. Esquema de ensayo de flexión en tres puntos.

3.3.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES DE QUILLAS COMERCIALES CONVENCIONALES

Con el objetivo de comparar las propiedades mecánicas de diferentes termoplásticos utilizados en la fabricación de quillas para tablas de surf, se realizaron ensayos de flexión en una serie de materiales. Uno de los materiales ensayados fue el ácido poliláctico (PLA), el cual se empleó como núcleo en el diseño del panel sándwich que compone la quilla desarrollada en este trabajo. El propósito de estos ensayos fue evaluar si el PLA, al ser sometido a cargas de flexión, mostraba propiedades superiores a los termoplásticos comúnmente utilizados en la industria, como el polipropileno (PP) y el polietileno de alta densidad (HDPE). Esto permitiría garantizar que la quilla fabricada con un núcleo de PLA cumple con las exigencias mecánicas mínimas necesarias para soportar las condiciones de servicio.

3.3.4.1 ENSAYO DE FLEXIÓN EN TERMOPLÁSTICOS

Se realizó un ensayo de flexión en tres puntos, conforme a la norma ASTM D790 "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials"³³. El objetivo de este ensayo fue determinar la resistencia y el módulo de elasticidad de varios materiales termoplásticos utilizados actualmente en la fabricación de quillas. Los materiales seleccionados para el ensayo fueron: Polipropileno (PP), Ácido Poliláctico (PLA), Poliamida 12 (PA12) y Polietileno de

Alta Densidad (HDPE). Las probetas de cada material se prepararon con las dimensiones especificadas por la norma, y posteriormente fueron medidas y ensayadas utilizando una máquina de ensayos mecánicos universales EMIC 23-50, configurada para ensayos de flexión en tres puntos (Figura 29). Las probetas de PLA fueron obtenidas por impresión 3D en la impresora Creality ENDER 6 utilizando los parámetros de impresión informados en la Tabla 4. Las probetas de PA12, PP y HDPE fueron obtenidas por moldeo por inyección. La carga de flexión se aplicó a una velocidad constante de travesa de 1,50 mm/min. Las condiciones específicas del ensayo se presentan en la Tabla 5, mientras que las dimensiones de cada probeta se detallan en la Tabla A 1 del Anexo 1.

Tabla 5. Parámetros de ensayo de flexión en 3 puntos.

Parámetros de ensayo en flexión en 3 puntos	
Temperatura Ambiente [°C]	18
Longitud de Spam L_s [mm]	52
Velocidad de la travesa [mm/min]	1,50
Humedad [HR]	64%

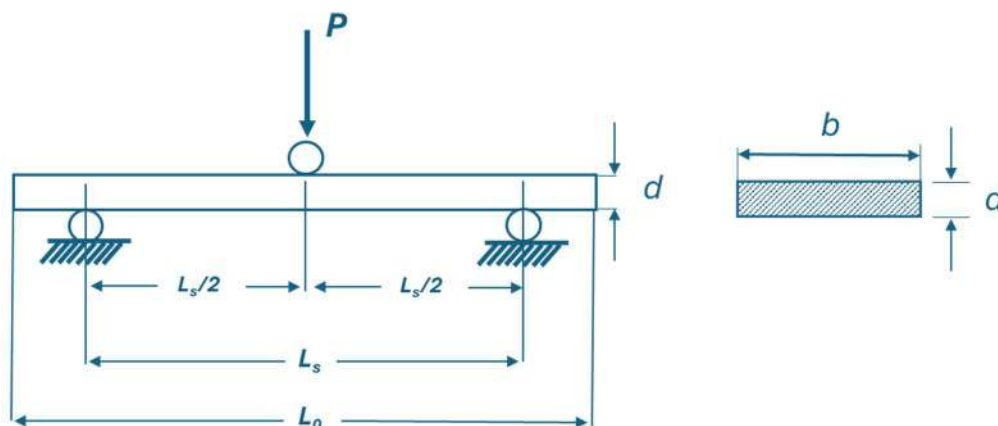


Figura 30. Esquema de ensayo de flexión en 3 puntos para materiales termoplásticos.

Para el cálculo de las propiedades en flexión de estos materiales se siguieron las ecuaciones detalladas en la sección de cálculo de la norma ASTM D790. Una vez obtenidos los resultados de fuerza y desplazamiento de la travesa, el esfuerzo de

flexión (σ_f) y la deformación (ε_f) se calcularon utilizando la Ecuación 26 y Ecuación 27 respectivamente.

$$\sigma_f = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

Ecuación 26

$$\varepsilon_f = \frac{6 D d}{L^2}$$

Ecuación 27

Donde:

σ_f : Esfuerzo de flexión a una carga (P).

ε_f : Deformación a una deflexión (D).

P : Carga aplicada.

D : deflexión en el centro de la probeta.

L : Longitud de span.

b : ancho de la probeta

d : Espesor de la probeta

Finalmente, se calcularon los módulos de los materiales ensayados a partir del uso de la Ecuación 28.

$$E = \frac{L^3 m}{4 b d^3}$$

Ecuación 28

Donde:

E : Módulo de elasticidad.

m : Pendiente de la curva carga (P) vs deflexión (D).

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 CINÉTICA DE CURADO DE RESINA

El primer ensayo realizado (barrido con aumento de temperatura a velocidad constante) arrojó la curva mostrada en la Figura 31 y Figura 32, con un pico de liberación de energía cuyos datos se adjuntan en la Tabla 6.

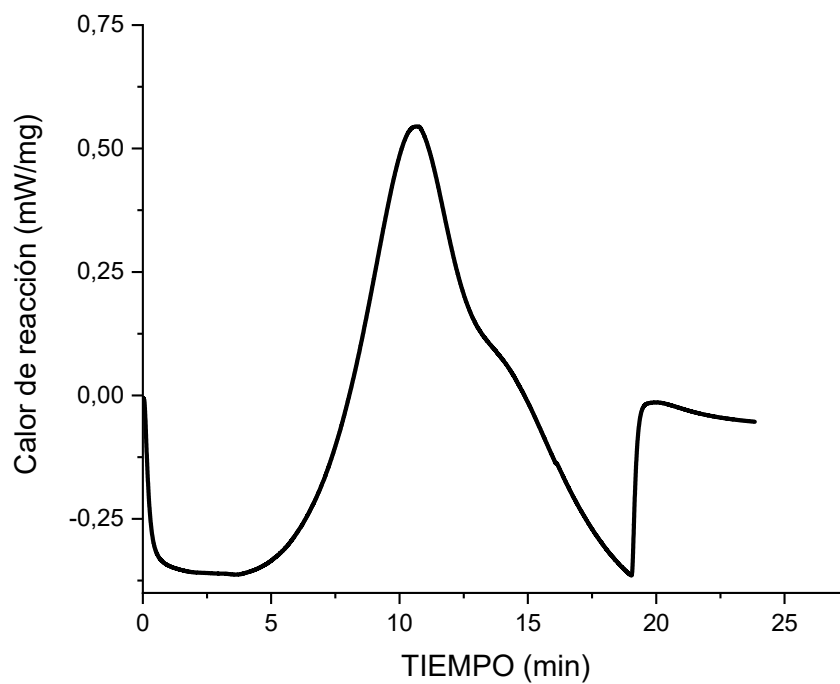


Figura 31. Gráfico perteneciente al barrido Dinámico en función del tiempo.

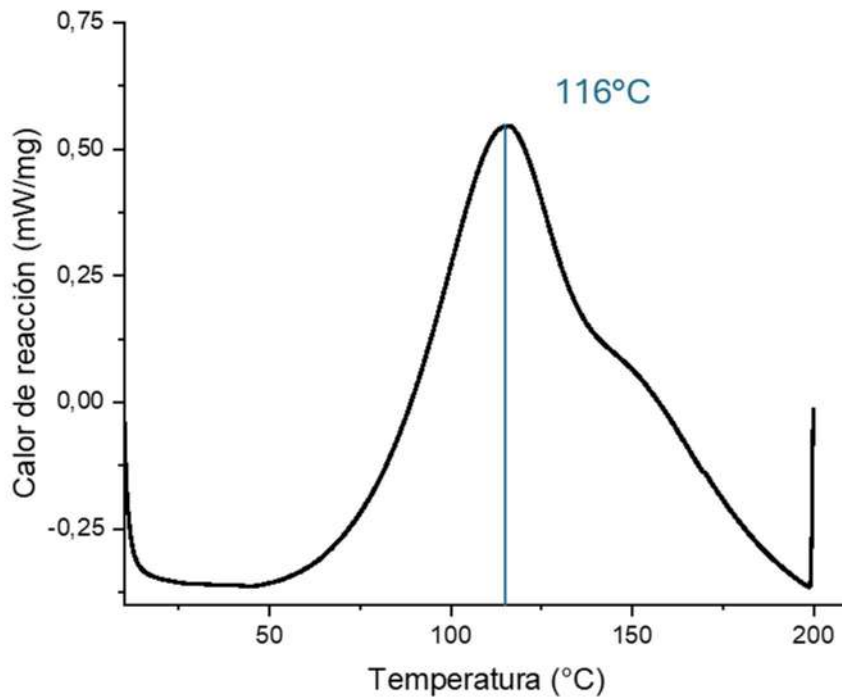


Figura 32. Gráfico perteneciente al barrido Dinámico en función de la temperatura.

Tabla 6. Resumen de datos del pico exotérmico.

Calor de reacción (mW/mg)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0,54	10,7	116

La energía liberada durante el barrido, o el calor total de reacción, se calculó integrando la curva obtenida en el ensayo dinámico “calor de reacción vs. tiempo”. Asimismo, se obtuvieron las curvas de los barridos isotérmicos a distintas temperaturas y se obtuvieron los calores de reacción por unidad de masa de las muestras. De esta manera fue posible calcular el grado de conversión de la resina en función del tiempo.

La Figura 33 muestra el diagrama isotérmico a 116°C mientras que la Figura 34 muestra la conversión en función del tiempo para todas las temperaturas ensayadas.

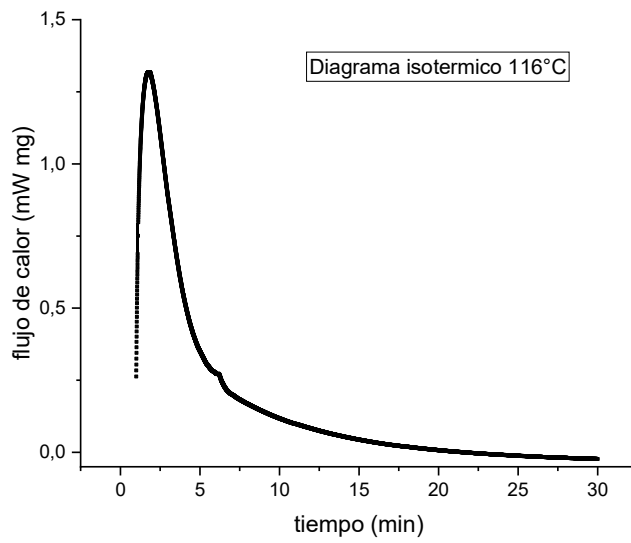


Figura 33. Diagrama del barrido isotérmico a 116°C.

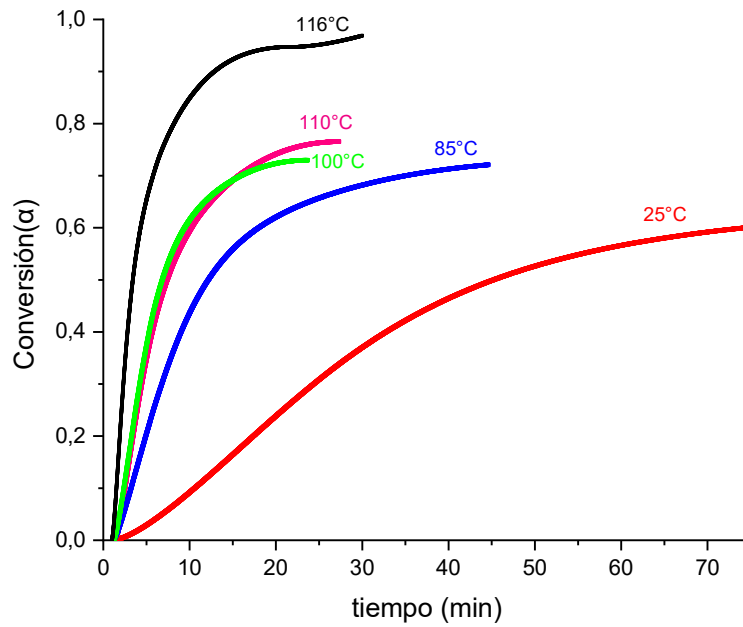


Figura 34. Conversiones en función del tiempo para las temperaturas ensayadas.

En la Tabla 7 se muestran los valores máximos de conversión para distintas temperaturas.

Tabla 7. Valores de conversión máxima para las temperaturas ensayadas.

Temperatura [°C]	Conversión máxima (α_{max})
25	63%
85	72%
100	73%
110	86%
116	97%

Los resultados muestran que, conforme aumenta la temperatura, también lo hacen las conversiones máximas. A su vez, a medida que aumenta la temperatura también lo hace la velocidad con la que ocurre el avance de la reacción. En el gráfico de la Figura 35 se ven las derivadas en función del grado de conversión ($d\alpha/dt$ vs α). Se observa que cerca del inicio del proceso de curado ocurre la máxima velocidad de avance de la reacción, indistintamente de la temperatura a la cual se ensaya la muestra, disminuyendo progresivamente hasta hacerse constante y llegar a valores cercanos a la unidad. Esto ocurre ya que, a medida que la reacción avanza, el número de entrecruzamientos crece, consecuentemente también lo hace el peso molecular y la movilidad de las cadenas en el sistema disminuye hasta que la reacción queda "congelada"³⁴. El último valor se atribuye a la conversión máxima a la que llega la resina a cada temperatura, conocida como conversión de vitrificación. Este es un proceso reversible ya que, aumentando la temperatura se puede recobrar movilidad molecular y lograr que la reacción continúe. Estos resultados eran los esperados ya que al aumentar la temperatura aumenta el movimiento molecular y se generan mayor número de entrecruzamientos³⁴.

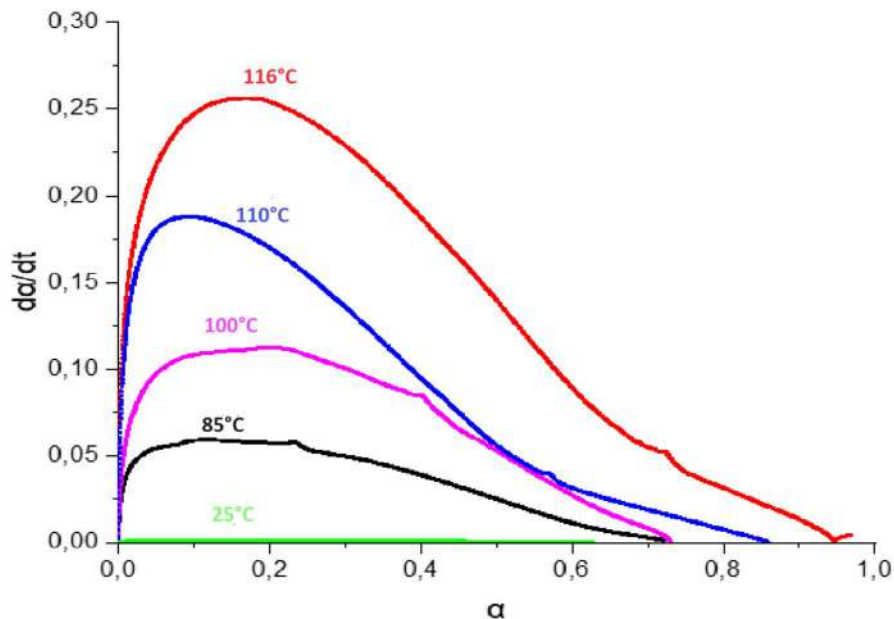


Figura 35. Velocidades de reacción en función del grado de avance.

Los resultados obtenidos sirven como punto de partida para poder ajustar a un modelo cinético preestablecido que permitirá estimar el comportamiento de la resina a otras temperaturas. Estos modelos se ajustan a las curvas $D\alpha/dt$ vs α (Figura 35). De los tres modelos propuestos en el apartado 3.3.1, el modelo 2 queda descartado ya que nuestros gráficos comienzan con $D\alpha/dt$ ($\alpha=0$) = 0. Si bien las curvas podrían ser comparables al comportamiento del modelo 3 por las velocidades cercanas a 0 al inicio de las conversiones, se decidió por simplicidad hacer uso del modelo 1.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot \alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n \quad (\text{Modelo 1 } \frac{d\alpha}{dt} = k \cdot \alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n \text{ Ecuación 16})$$

Donde:

- α es el grado de conversión de la resina.
- m y n son parámetros que definen el orden de reacción y se suponen independientes de la temperatura.
- k_i tiene una dependencia exponencial tipo Arrhenius con la temperatura (Ecuación 19).
- da/dt es la velocidad de reacción.

La Figura 36 muestra el ajuste del modelo 1 a la curva Da/dt vs α para el sistema curado isotérmicamente a 116°C. El primer ajuste arrojó valores de k , n y m , estos últimos dos parámetros se dejaron fijos para los ajustes a otras temperaturas ya que se partió de la base que no varían con la temperatura y que su suma es igual a 2. Los gráficos correspondientes a los ajustes del modelo cinético seleccionado a las distintas temperaturas se encuentran en el Anexo 2.

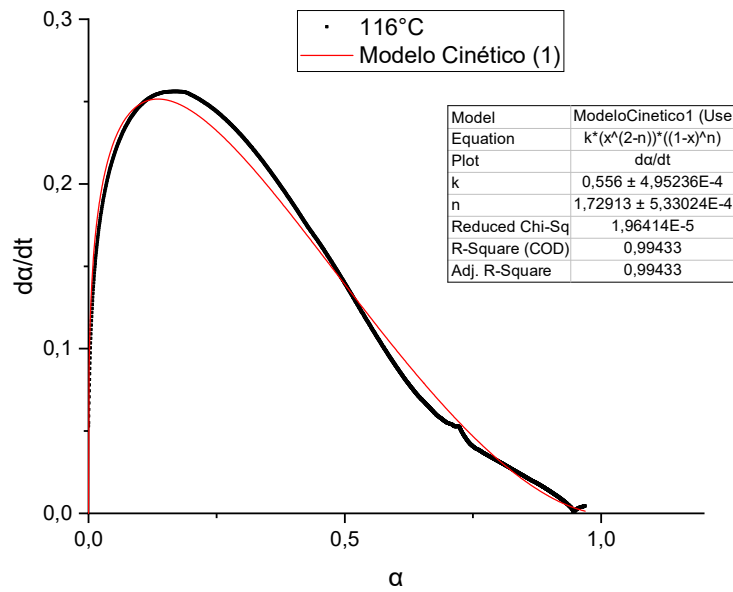


Figura 36. Ajuste del sistema isotérmico a 116°C al modelo cinético 1.

Tabla 8. Parámetros de ajuste del modelo cinético 1.

T [°C]	K	n	m
25	0,0016	1,7291	0,2709
85	0,091		
100	0,190		
110	0,288		
116	0,556		

El parámetro k como ya se ha mencionado tiene una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura, por lo tanto, es posible encontrar un K_0 y una E_0 (energía de activación del sistema)

$$k_i = k_{i0} \cdot \exp\left(\frac{-E_i}{R.T}\right) \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

- E_i es la energía de activación.
- R es la constante de los gases ideales.
- T es la temperatura.

Aplicando \ln en ambas partes de la Ecuación 19 queda:

$$\ln(k_i) = \ln(k_{i0}) - \frac{E_i}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación 29}$$

Luego, graficando $\ln(K_i)$ vs $1/T_i$ y ajustando los valores a una función lineal es posible encontrar K_0 y E_0 . La recta se encuentra graficada en la Figura 37.

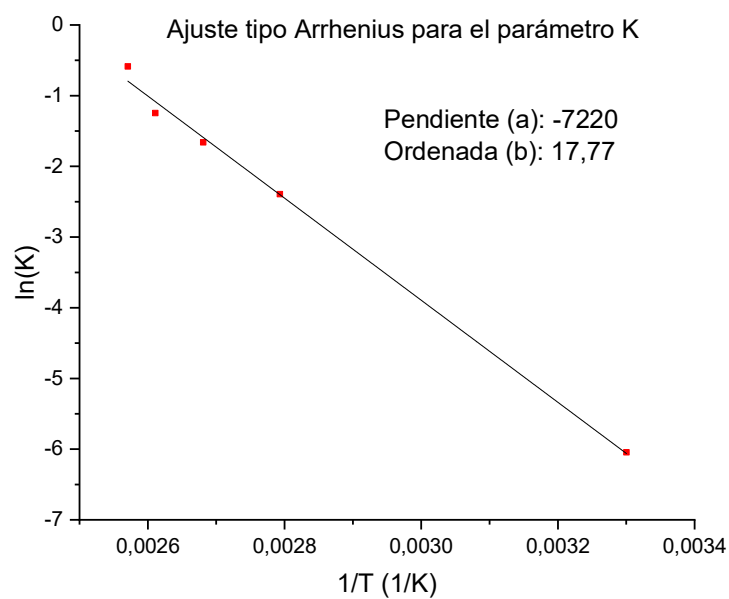


Figura 37. Ajuste tipo Arrhenius para el parámetro K.

$$a = -\frac{E_0}{R} \quad b = \ln(K_0)$$

E_0 [KJ/mol]	K_0	n	m
60	5,21E7	1,7291	0,2709

Una vez obtenidos los parámetros cinéticos es necesario obtener la conversión máxima a la que se llegará a una temperatura específica. De este modo es posible integrar $ladadt=k \cdot \alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n$ Ecuación 16 y obtener la dependencia de la conversión con el tiempo a la temperatura deseada.

Luego, a partir de los parámetros n y m que no varían con la temperatura y del cálculo de K a 25°C fue posible asociar el modelo cinético a la temperatura de trabajo y ver como varía la conversión en función del tiempo.

Se utilizó como conversión máxima a 25°C la presentada en la Tabla 7 . A partir de este valor fue posible realizar la integración desde 0 hasta dicho α_{Max} .

Tabla 9. Resumen de parámetros para cálculo de cinética a 25°C

Temperatura	K (25°C)	n	m	α_{Max}
25°C	0,0023	1,7291	0,2709	0,63

A partir de los parámetros mostrados en la Tabla 9 fue posible graficar el modelo cinético 1, integrar dicho gráfico y llegar finalmente a la conversión en función del tiempo para la resina utilizada a 25°C. A continuación, se muestra dicho gráfico (Curva negra de la Figura 38) y la comparación con el gráfico Conversión vs tiempo obtenido del DSC.

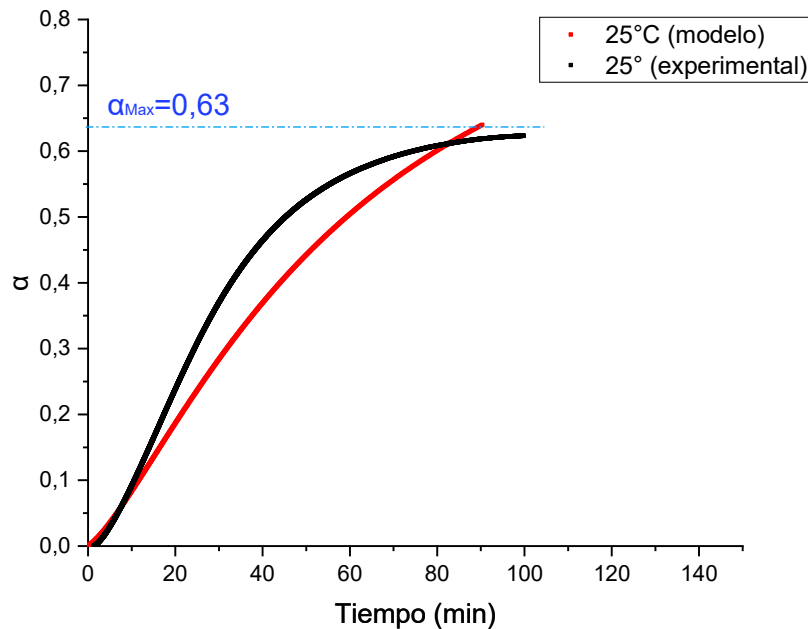


Figura 38. Curva α vs t para la resina estudiada a 25°C.

El principal objetivo de la caracterización de la resina es ver la factibilidad de confeccionar piezas por distintos métodos que involucren a la resina durante el proceso de curado. Por experiencia previa de infusiones, se estima un tiempo total de impregnación de telas por infusión por vacío de 3 quillas en simultaneo menor a 20 minutos con la resina estudiada a 25°C. Este dato no es trasladable a otra resina por posibles cambios no solo en la reactividad sino también en su viscosidad. Utilizando la Figura 38, se observa que a este tiempo se tiene una conversión de aproximadamente 0,15 (a 25°C). Comparando este valor con datos bibliograficos observamos que en esas conversiones la resina aun no llega a su punto de gel (0,50-0,80)³⁵ y será posible infusionar. Por otra parte, se utilizó la misma resina tanto para laminar como para rellenar los núcleos. En este aspecto es importante saber los tiempos de curado de la resina para establecer velocidades de producción y poder hacer un analisis técnico/económico mas representativo. Esto es asi porque las piezas pueden desmoldarse unicamente si la resina ha alcanzado un grado de curado minimo que garantice la estabilidad dimensional de la pieza.³⁰ En este caso en 110 minutos se llega a la conversión maxima a temperatura ambiente.

4.2 ENSAYO DE TRACCION EN PIELES

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de tracción en pieles. La Tabla A 5 del Anexo 1 muestra las dimensiones de las probetas ensayadas.

Los gráficos correspondientes a cada probeta se encuentran en el Anexo 2. En este caso se presentan las curvas correspondientes a todas las probetas ensayadas con 1 tela de fibra de carbono (Figura 39) y una tela de fibra de vidrio (Figura 40).

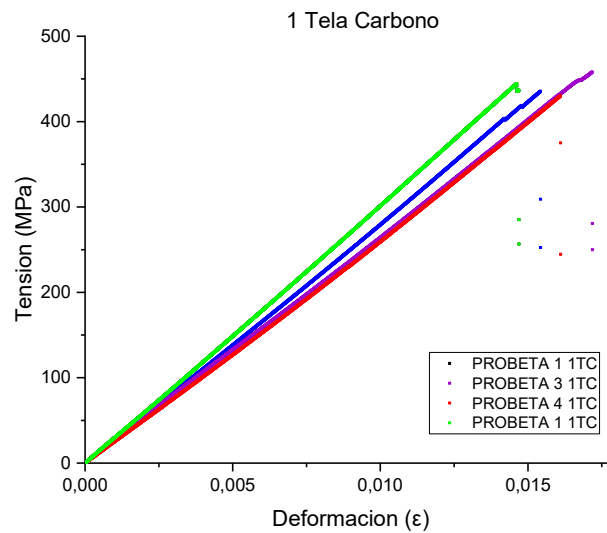


Figura 39. Graficos Tensión Deformación en Telas de Carbono.

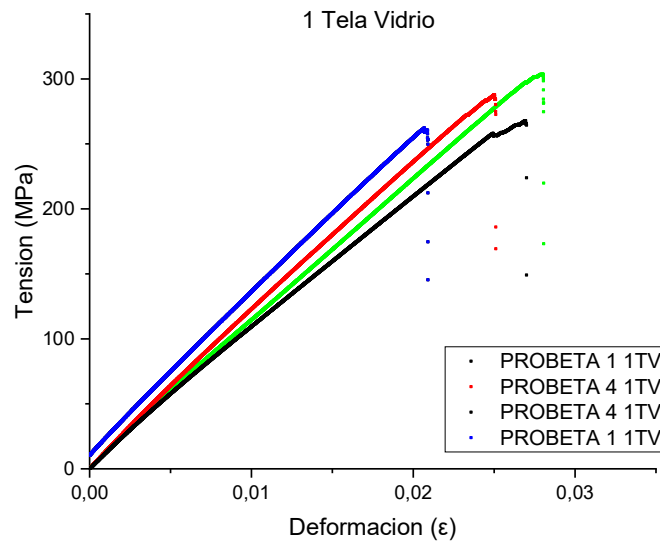


Figura 40. Gráficos Tensión Deformación en Telas de Vidrio.

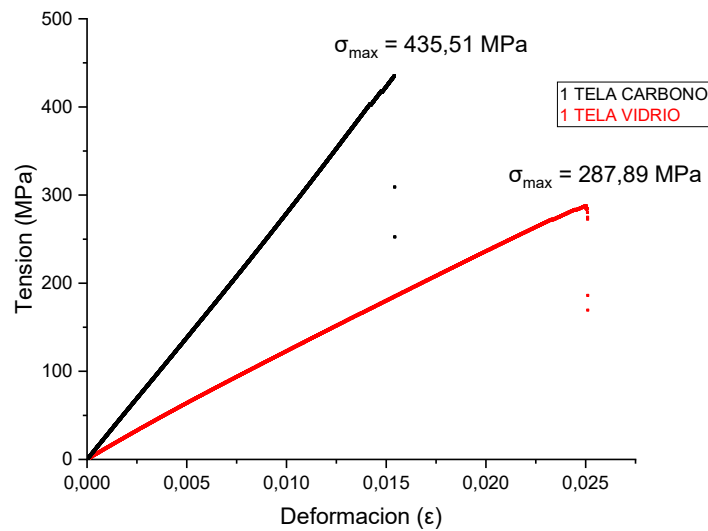


Figura 41. Comparación de curvas entre 1 tela de carbono y 1 tela de vidrio.

En la Tabla 10 se detallan los resultados de propiedades que caracterizan a cada material y además se adjunta la fuerza máxima a la que falló cada probeta. Se descartaron los resultados de las probetas con 4 telas de carbono ya que la rotura de estas resultó inválida. Debido a las altas tensiones generadas, la rotura de todos estos

laminados ocurrió en la zona de las mordazas y de manera simultánea en ambos extremos. Esta condición se muestra en la Figura 45.

Tabla 10. Resumen de resultados del ensayo de tracción en pieles.

MATERIAL	E [GPa]	σ_{max} [MPa]	F _{max} [KN]
1 TELA DE VIDRIO	11,55 ±0,52	280±27	0,73±0,09
2 TELAS DE VIDRIO	15,70±0,42	288±22	1,28±0,08
4 TELAS DE VIDRIO	15,20±2,05	257±22	3,38±0,50
1 TELA DE CARBONO	27,23±1,87	441±12	1,90±0,03
2 TELAS DE CARBONO	22,44±2,62	374±41	3,61 ± 0,38



Figura 42. Comparación de valores de fuerza de rotura.

Estos resultados no muestran directamente el comportamiento de los paneles sándwich, pero son de suma importancia a la hora de construir mapas de falla para esos materiales y estimar cargas mínimas de falla de los distintos mecanismos. Para el análisis de estos resultados supondremos que al agregar telas de fibra solo estamos agregando masa a las probetas (resina y fibra) pero se ensaya un mismo material.

Al analizar los resultados de los ensayos de tracción en los materiales compuestos con matriz termorrígida, se observó que, como era de esperarse, todos los ensayos presentaron un comportamiento frágil, sin mostrar zonas de deformación

plástica. Además, el incremento en la cantidad de capas de tela en el material resultó en un aumento proporcional de la fuerza a la que se produjo la falla, lo cual es coherente al considerar el aumento en el área transversal efectiva.

El cambio más significativo en los valores se observa al ensayar probetas con refuerzos de vidrio y carbono. Como era de esperar, las pieles reforzadas con carbono presentan un mayor módulo y resistencia que las de vidrio, debido principalmente a las diferencias en las propiedades de estos dos materiales que actúan como refuerzos. Esta variación en la resistencia provoca que los paneles laminados con distintos tipos de materiales fallen a diferentes cargas. Esto se reflejará en la construcción de los mapas de falla para cada panel.

Todos los ensayos reportados como válidos presentaron roturas en la zona calibrada (cerca del centro de la probeta). La Figura 44 es un ejemplo de cómo fallaron los laminados de vidrio. Las probetas con 4 telas de carbono presentaron una rotura distinta al resto rompiendo tanto por el extremo superior como por el inferior al mismo tiempo. Esta falla anormal se muestra en la Figura 45 y sugiere que no hubo una distribución de esfuerzos homogénea a lo largo de la probeta. Se supone que, debido a las elevadas cargas alcanzadas, los esfuerzos de corte y de compresión en la región de las mordazas cónicas causaron un estado tensional de mayor severidad que el desarrollado lejos de las mismas (tracción pura) provocando la falla prematura de la probeta en la zona de las mordazas e invalidando los resultados de resistencia del material. Por lo tanto, estos laminados no fueron tenidos en cuenta para el cálculo de resistencia, pero sí para el del módulo.



Figura 43. Probeta de 1 tela de fibra de vidrio antes de ser ensayada.



Figura 44. Probeta de 1 tela de fibra de vidrio luego de ser ensayada.



Figura 45. Rotura "doble" en probeta de 4 telas de carbono.

4.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN EN NÚCLEO

A continuación, se resumen los resultados del ensayo de compresión del núcleo (estructura tipo "honeycomb" impresa 3D rellena con mezcla de resina y polvo de EPU). La Tabla A 3 del Anexo 1 muestra las dimensiones de las probetas ensayadas. La Figura 46 muestra las curvas Tensión vs Deformación para las 4 probetas.

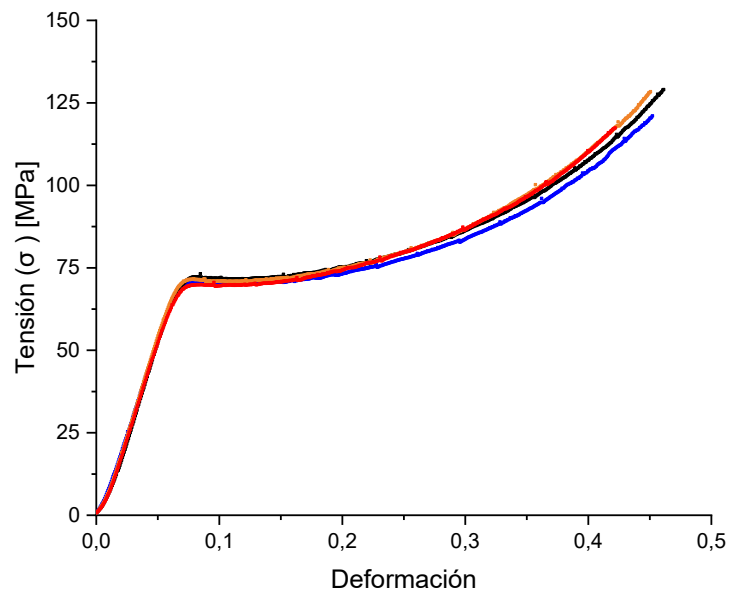


Figura 46. Gráfico Tensión/Deformación para las 4 probetas de compresión.

Según la norma utilizada para el ensayo de compresión en los núcleos (ASTM C365-03), el módulo se calcula utilizando la Ecuación 30. La Figura 47 muestra a modo de ejemplo el ajuste para el cálculo del módulo de la Probeta 4²⁸ y los resultados se detallan en la Tabla 11.

$$E = \frac{S \cdot t}{A}$$

Ecuación 30

Donde:

E = Módulo de compresión del núcleo [MPa]

S = Pendiente de la zona inicial lineal de la curva Carga vs Desplazamiento [N/mm]

t = Espesor del núcleo [mm]

A = Área de la probeta [mm²]

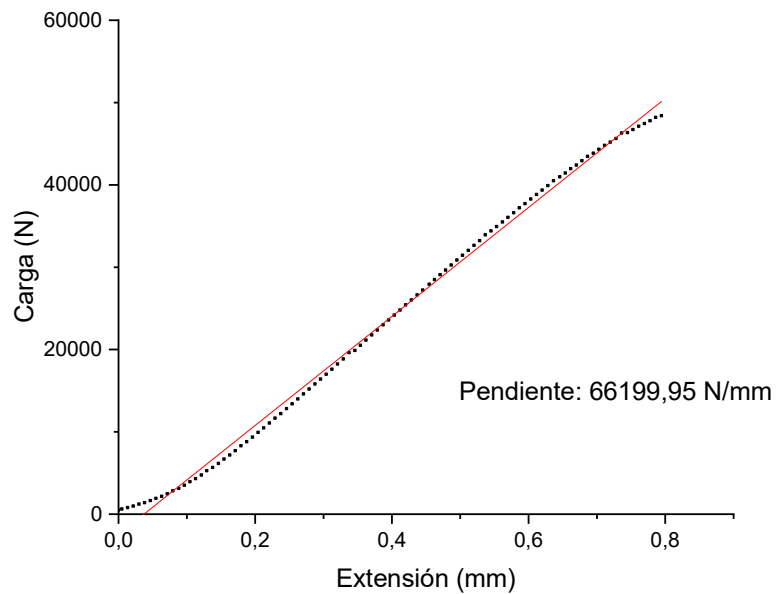


Figura 47. Ajuste lineal de curva Carga vs Extensión para cálculo del módulo.

Tabla 11. Resultados del ensayo de compresión del núcleo tipo Honeycomb relleno con resina epoxi y polvo de PU.

PROBETA	Carga máxima [KN]	S [KN/mm]	Área [mm ²]	σ [Mpa]	E [Mpa]
PROBETA 1	84,85	63,17	700,9	121	1081
PROBETA 2	84,83	60,72	657,5	129	1102
PROBETA 3	84,59	61,72	658,8	128	1124
PROBETA 4	85,22	66,20	726,0	117	1090

Promediando los resultados de todas las probetas se obtienen los resultados que se utilizarán luego para la estimación de los mecanismos de falla que involucran al núcleo del panel Sándwich.

Por otra parte, se realizaron los ensayos sobre los núcleos de EPU.

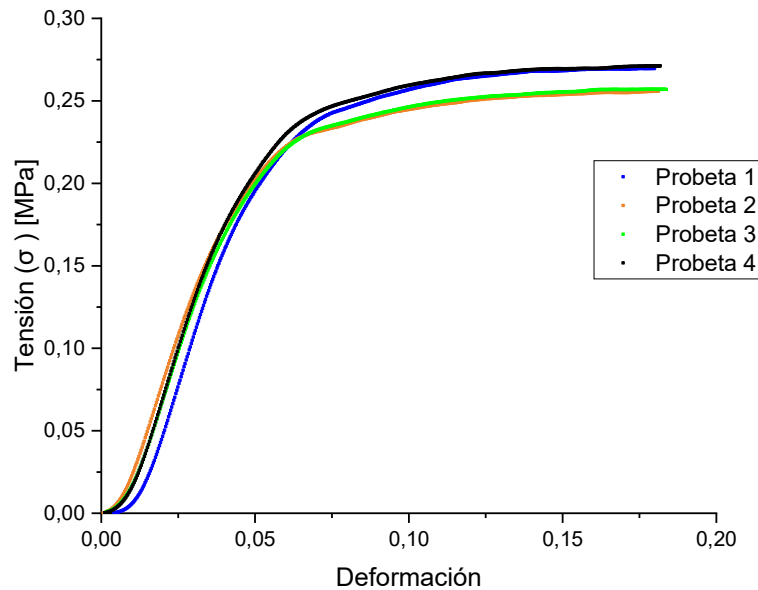


Figura 48. Gráfico Tensión/Deformación para las probetas de espuma de PU.

Comparando las Figuras Figura 46 y Figura 48 se puede observar una diferencia en los comportamientos de ambos materiales una vez superada la fluencia. En el caso de la espuma de PU se observa una extensa meseta (aumento de extensión sin aumentar la carga) debida principalmente a que se alcanzaron valores de carga que hacen colapsar las celdas de la espuma. Si se dejase actuar a los platos de compresión por mayor tiempo posiblemente se vea una etapa de aumento de carga ya que la “espuma” de PU colapsada pasaría a comportarse como un sólido rígido. Por otra parte, el material propuesto como núcleo en el presente trabajo posee un comportamiento de sólido rígido y al alcanzar la carga de falla la zona de “meseta” es notoriamente menor a la de la espuma de PU.

Los resultados de la resistencia y módulo de las probetas de PU se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados del ensayo de compresión de la espuma de PU.

PROBETA	Carga máxima [KN]	S [N/mm]	Área [mm ²]	σ [Mpa]	E [Mpa]
PROBETA 1	3,32	1,97	12321	0,270	0,399
PROBETA 2	3,15	2,14	12321	0,256	0,434
PROBETA 3	3,17	2,08	12321	0,257	0,421
PROBETA 4	3,34	2,15	12321	0,271	0,435

A continuación, en la Tabla 13 se resumen los resultados promediados para los dos tipos de materiales ensayados.

Tabla 13. Resumen de resultados del ensayo de compresión.

Material	E [MPa]	σ [MPa]
Honeycomb relleno con resina epoxi y polvo de PU	1099 ±19	124 ±6
Espuma de PU	0,42 ±0,02	0,26 ±0,01

Como era de esperar, el núcleo propuesto en este trabajo como una mezcla de Honeycomb de PLA impreso y resina epoxi con polvo de EPU presenta una resistencia y módulo superior a la espuma de PU. Ambos materiales serán útiles como núcleos de un panel sándwich, pero proporcionando propiedades muy distintas al producto final. El honeycomb con resina epoxi y polvo dará una alta resistencia a la compresión sin aceptar deformaciones mientras que con la espuma de PU será posible fabricar un panel de menor peso. Los resultados serán de utilidad para la confección de los mapas de falla que se presentan en la siguiente sección.

4.4 MAPAS DE FALLA

Utilizando tanto los datos de resistencia y módulo a la compresión de los distintos materiales propuestos como núcleos (Sección 4.3) y los resultados de resistencia y módulo a tracción de los distintos tipos de pieles (Sección 4.2), fue posible elaborar distintos mapas de falla. Se elaboraron tres mapas de falla, el primero utilizando como núcleo del panel la estructura tipo “honeycomb” impresa 3D relleno con resina y polvo de PU (uno para el laminado de fibra de carbono y uno para el laminado de fibra de vidrio) y el tercero usando como núcleo espuma de poliuretano y fibra de carbono como material para el laminado. De esta manera es posible predecir la falla de las probetas sin haberlas construido ahorrando tiempo y material. Es necesario aclarar que los mapas no predicen las fuerzas a la que fallará el panel sino el modo en el que lo hará. Una vez obtenidas las curvas mediante la igualación de ecuaciones de carga fue necesario hacer un análisis sobre las zonas delimitadas por dichas funciones.

4.4.1 NUCLEO TIPO HONEYCOMB RELLENO CON RESINA EPOXI Y POLVO DE PU

Como se puede ver en el mapa de los laminados con pieles de material compuesto reforzado con fibra de Vidrio (Figura 49), hay 3 zonas de falla. Dos correspondientes a la falla por las pieles y una correspondiente a falla por el núcleo. No es posible ver ninguna zona de falla por indentación o “Core Crushing”. Cuando se construye el mapa con pieles de compuesto reforzado con fibra de carbono (Figura 50) vemos que aparece una zona nueva de indentación del núcleo. El uso de pieles más resistentes hace que para un mismo núcleo el área de falla en esta zona aumente y consecuentemente el área de falla por las pieles disminuya.

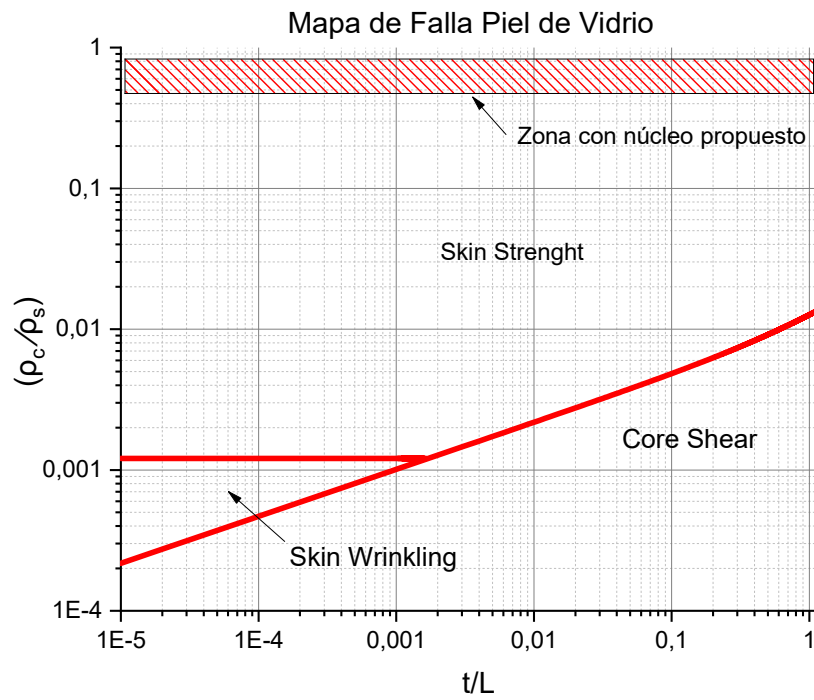


Figura 49. Mapa de falla de panel Sandwich (núcleo de estructura tipo "honeycomb" impresa 3D rellena con resina epoxi y polvo de PU) laminado con fibra de vidrio.

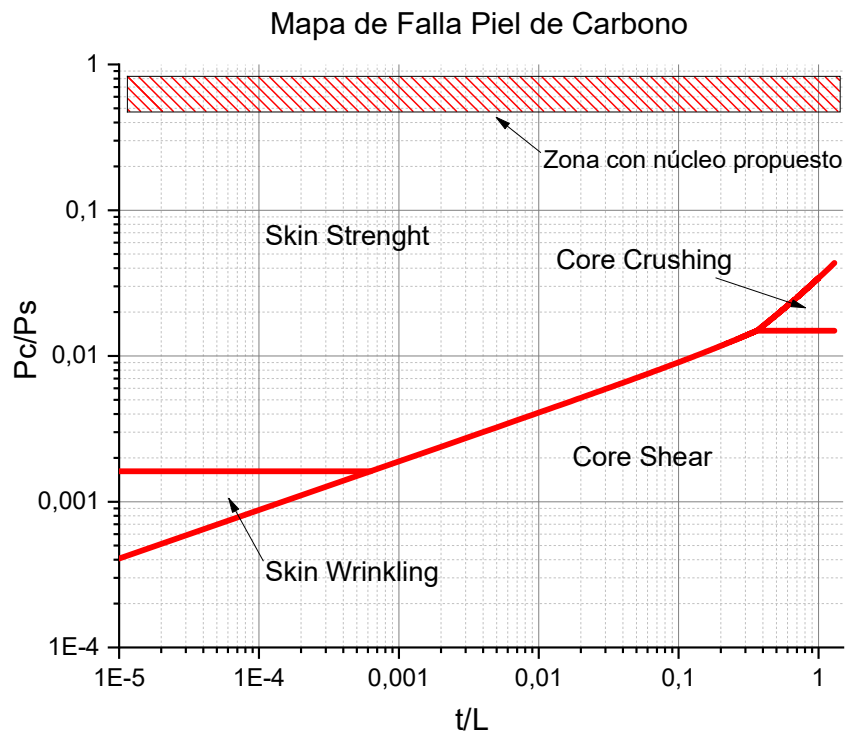


Figura 50. Mapa de falla de panel Sandwich (núcleo de estructura tipo "honeycomb" impresa 3D rellena con resina epoxi y polvo de PU) laminado con fibra de carbono.

Analizando las distintas zonas del mapa vemos que, cuando la densidad del núcleo es similar a la del material constituyente del mismo, la falla se da por resistencia de las pieles o “Skin Strenght” en todo el rango de geometrías posibles, incluso cuando $t \approx L$. En el presente trabajo el núcleo no es hueco, sino que contiene resina y polvo de poliuretano por lo que la relación ρ_c/ρ_s estará en el rango 0,8-1 (zona rayada en el gráfico). Esto sugiere que indistintamente del espesor de la piel que se utilice, la primera falla debería darse en las pieles.

En paneles donde el núcleo sea hueco, con menor resistencia que la mostrada en este proyecto y la relación ρ_c/ρ_s se aleje de 1 será posible encontrar materiales que dependiendo de la geometría o cantidad de pieles denoten distintos tipos de falla. Con el núcleo propuesto ver esta diferencia no será posible ya que se comporta como un sólido de alta rigidez y entonces las fallas en flexión serán por resistencia de las pieles “Skin Strenght”.

4.4.2 NUCLEO DE ESPUMA DE PU

En esta sección se adjunta el mapa de falla correspondiente a un panel con núcleo de espuma de poliuretano laminado con pieles de carbono. De esta manera logramos ver cuál será la diferencia de comportamiento entre los distintos paneles al variar los materiales que lo componen.

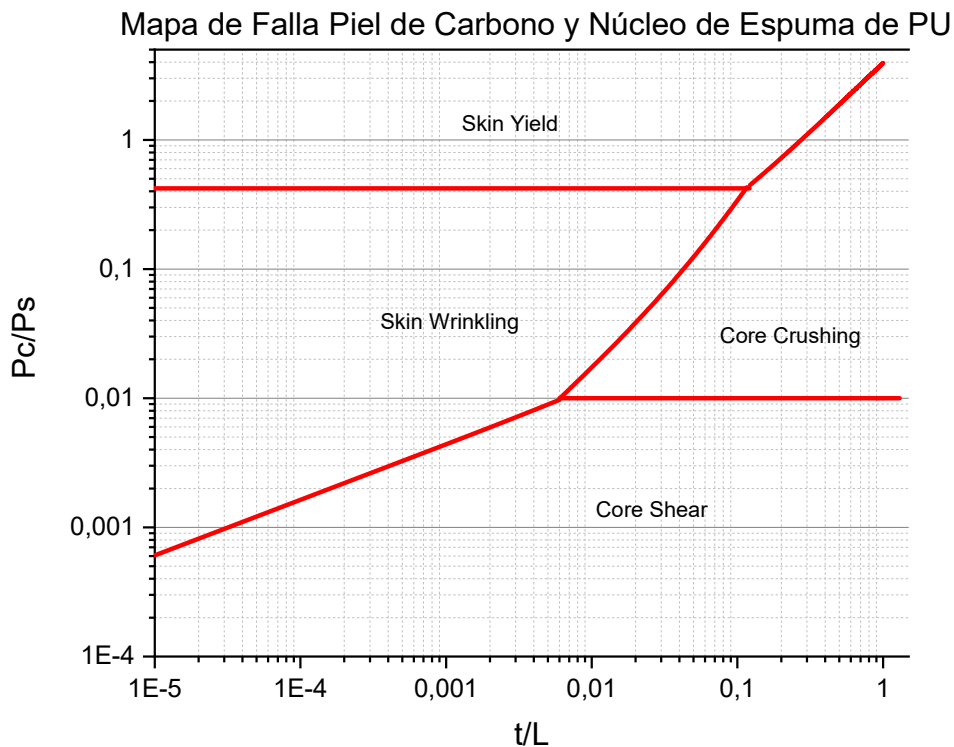


Figura 51. Mapa de falla de panel Sandwich (núcleo de espuma de PU) laminado con fibra de carbono.

Los ensayos de compresión en el núcleo mostraron un módulo significativamente más alto para la estructura tipo “honeycomb” rellena con resina curada y polvo de PU y esto se ve en los mapas (Figura 49, Figura 50 y Figura 51). En cambio, el panel con núcleo de espuma rígida de PU presenta más zonas de falla en el núcleo, debido a su menor resistencia y módulo en comparación con el otro núcleo analizado. Sin embargo, su densidad es considerablemente más baja, lo que hace que el panel final sea más liviano. Estos factores son cruciales en el futuro diseño de paneles para aplicaciones específicas.

Esta comparación entre mapas hace que se puedan considerar distintas alternativas a la hora de diseñar un panel tipo sándwich y no recurrir a la prueba y error desperdiciando tiempo y recursos. En este caso se recurrió a la utilización de datos de espuma de poliuretano, pero bien podría hacerse con otro material. El eje de ordenadas (ρ_c/ρ_s) permite además utilizar los mapas variando la geometría del núcleo y ubicar qué mecanismos de falla le corresponderían a un panel en todo lo rango de t/L . A su

vez, estos mapas de falla son útiles para el diseño de otras aplicaciones diferentes a las de este trabajo.

En el caso de la estructura propuesta para la aplicación de este proyecto como quillas de tablas de surf, se espera que, en caso de ocurrir la falla, la misma sea en las pieles independientemente del tipo de fibra y del espesor de laminado dentro de los estudiados en este trabajo.

4.5 ENSAYO MECANICO DE PANELES "SANDWICH" POR FLEXION EN 3 PUNTOS

La Figura 52 muestra todas las curvas Carga [KgF] vs Extensión [mm]. Para el análisis se tomará como ejemplo la curva correspondiente al panel cuyas pieles se componen de material compuesto con 2 telas de carbono.

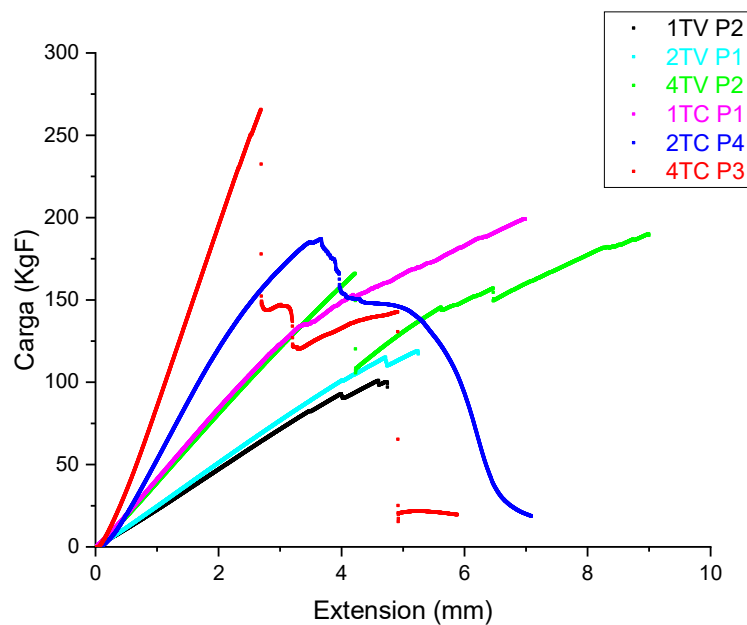


Figura 52. Comparativa de Curvas Carga [KgF] vs Extensión [mm] para todos los paneles.

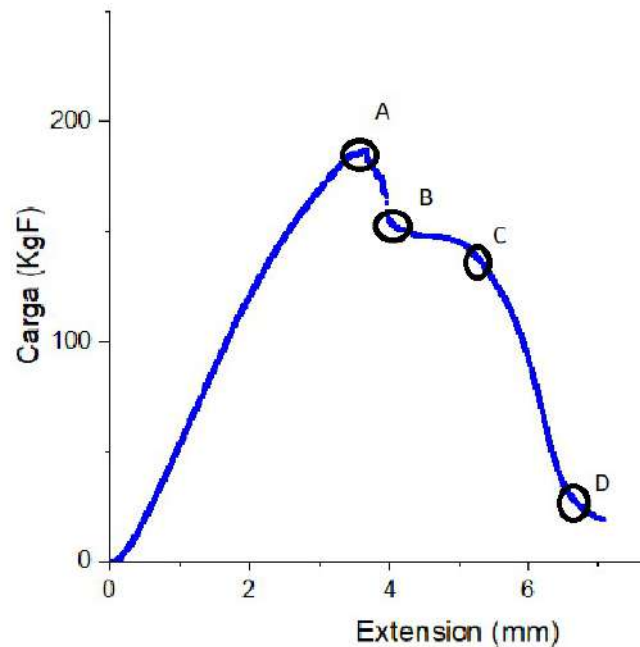


Figura 53. Curva correspondiente a la probeta 4 del panel con pieles hechas con 2 telas de carbono 2TC P4.

Inicialmente, la probeta muestra una zona lineal de carga vs. Desplazamiento hasta llegar a un máximo. El punto A de la Figura 53 muestra el inicio de la fisura en la piel inferior. Rápidamente se ve como disminuye la carga aplicada hasta B donde la fisura continúa propagándose. Desde B hasta C se puede observar como la curva pierde linealidad dado que la fisura ha cambiado las condiciones de carga hasta llegar a un segundo máximo (C) donde se produce la rotura completa de la probeta (D).

Las distintas probetas no siguen estrictamente la curva mostrada anteriormente, sino que presentan variantes. Algunas muestras luego de llegar al primer máximo (aparición de la fisura) continuaron tomando carga de manera lineal hasta llegar a un segundo máximo previo a la rotura completa de la probeta. Al seguir tomando carga termina ocurriendo la falla completa del panel.

Las probetas fallaron en las pieles, tal como se había anticipado a partir de los mapas de falla generados en la sección 4.4.1. Estos mapas, elaborados para predecir los modos de falla bajo el ensayo de flexión en tres puntos, indicaban que la principal en mecanismo de falla predominante para estas probetas se encontraría en las pieles

de los paneles sándwich. Los resultados experimentales confirmaron esta predicción, ya que las probetas fallaron precisamente en esta zona, validando el análisis teórico realizado.

A continuación, se resumen los promedios de cargas máximas alcanzadas por cada tipo de panel (Tabla 14). El ancho y espesor de las probetas del panel sandwich estuvieron en el rango $38,03 \pm 1,03$ y $13,20 \pm 0,49$ respectivamente. La longitud de span durante el ensayo fue de 170 mm y se mantuvo constante para todas las pruebas. El detalle de las dimensiones de cada probeta y su respectiva carga máxima se encuentran en la Tabla A 7 del Anexo 1.

Tabla 14. Resumen resultados de carga máxima en ensayo de flexión en 3 puntos.

COMPOSICIÓN	PROBETAS	CARGA MÁXIMA (N)
1 TELA VIDRIO	1TV P1	987,5 ± 57,1
	1TV P2	
	1TV P3	
2 TELAS VIDRIO	2TV P1	1165,2 ± 38,7
	2TV P2	
	2TV P3	
4 TELAS VIDRIO	4TV P1	1819,1 ± 138,7
	4TV P2	
	4TV P3	
1 TELA CARBONO	1TC P1	1952,8 ± 0
2 TELAS CARBONO	2TC P1	2161,5 ± 484,2
	2TC P2	
	2TC P3	
4 TELAS CARBONO	4TC P1	2615,6 ± 179,2
	4TC P2	
	4TC P3	



Figura 54. Rotura de probeta 2 con 2 telas de fibra de vidrio en ensayo de flexión en 3 puntos



Figura 55. Rotura de probeta 1 con 1 tela de fibra de vidrio en ensayo de flexión en 3 puntos.



Figura 56. Detalle de rotura de probeta 1 con 4 telas de fibra de vidrio en ensayo de flexión en 3 puntos

En el Anexo 3 se muestran las imágenes de las roturas de todas las probetas. El total de estas fallaron inicialmente por las pieles, luego se producía la falla del núcleo para finalmente culminar con la fractura total de probeta en dos partes.

4.5.1 CALCULO DE RIGIDEZ A LA FLEXIÓN

La deflexión total del panel tiene una componente por flexión pura y una por corte en el núcleo. Al haber usado una longitud de span relativamente grande y un núcleo rígido, el termino por corte puede despreciarse³⁶.

$$\text{Deflexión Total} = \delta \text{ por flexión pura} + \delta \text{ por corte}$$

$$\delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4U}$$

Ecuación 31

Donde:

δ =Deflexion total [mm]

D =Rigidez a la flexión [N*mm²]

L = Longitud de span [mm]

P = Carga aplicada [N]

Despreciando el termino de deflexión por corte (segundo término) la Ecuación 31, resulta:

$$\text{Deflexión Total} = \delta \text{ por flexión pura} + \delta \text{ por corte}$$

$$\delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4U}$$

$$\delta \approx \frac{PL^3}{48D}$$

Ecuación 32

Graficando la carga vs desplazamiento en la zona elástica resulta posible calcular la pendiente de la curva como $\Delta P/\Delta \delta$ (K). Reemplazando dicha pendiente en la Ecuación 32, queda la Ecuación 33.

$$D = \frac{L^3 K}{48}$$

Ecuación 33

De esta manera a partir de la pendiente de la curva carga vs desplazamiento es posible calcular la rigidez a la flexión (D) de los paneles sándwich. A mayor cantidad de fibra mayor pendiente carga vs desplazamiento y mayor rigidez. La Figura 57. Gráfico de zona lineal (Carga vs Desplazamiento) del ensayo de flexión en 3 puntos en paneles sándwich. muestra la zona inicial de cada curva y partir de la cual se calculan las pendientes (K) usadas para el cálculo de rigidez a la flexión (D).

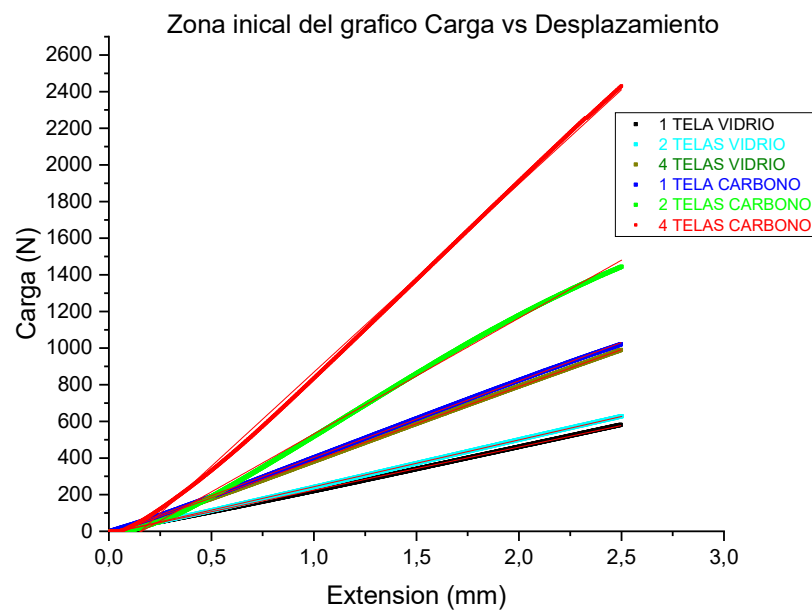


Figura 57. Gráfico de zona lineal (Carga vs Desplazamiento) del ensayo de flexión en 3 puntos en paneles sándwich.

Tabla 15. Resultados de pendientes y rigidez a la flexión de las distintas composiciones.

MUESTRA	Pendientes K [N/mm]	D [MN*mm ²]
1 TELA VIDRIO	235,2	2,41
2 TELAS VIDRIO	255,8	2,62
4 TELAS VIDRIO	404,9	4,14
1 TELA CARBONO	418,4	4,28
2 TELAS CARBONO	632,9	6,48
4 TELAS CARBONO	1030,9	10,54

La alta rigidez a la flexión es una de las principales características de los paneles sándwich. Esta propiedad depende de la geometría del panel y, para un panel con los

mismos materiales constituyentes, aumenta al aumentar tanto el espesor del núcleo como el de las pieles.

Siguiendo la lógica anterior, la rigidez a la flexión también aumentará al cambiar el tipo de piel de vidrio a carbono. Los resultados de la Tabla 15 muestran que un laminado de 4 telas de vidrio resulta en un panel con una rigidez similar al obtenido con pieles compuestas de una tela de carbono. Nuevamente se comprueba que el uso de carbono como laminado mejora la performance de los paneles disminuyendo el peso de estos.

Para el caso de la quilla fabricada en este trabajo, estos resultados son útiles para confirmar que al aumentar el número de capas de telas en las pieles o al cambiar el material de estas se logra un producto final de mayor rigidez.

4.6 ENSAYO DE FLEXION EN TERMOPLASTICOS

Antes de presentar los valores específicos, se incluye un gráfico con las curvas tensión vs deformación de cada material ensayado (Figura 58), el cual permite visualizar de forma comparativa el comportamiento mecánico de los polímeros bajo carga de flexión.

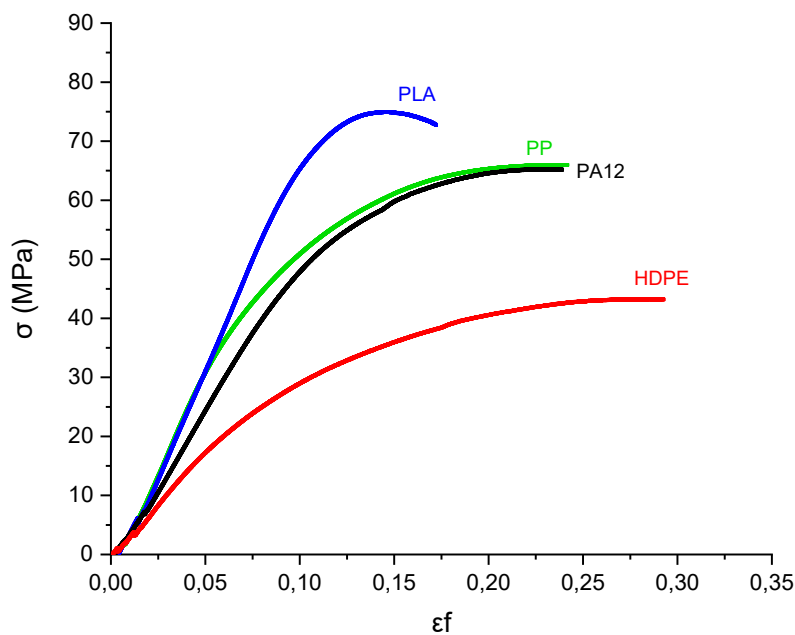


Figura 58. Gráfico Tensión-Deformación para los distintos termoplásticos ensayados.

La Figura 58 muestra el comportamiento de cada material en el ensayo de flexión. Se observa que el PLA es el material con mayor pendiente inicial y mayor tensión máxima. Por otra parte, el HDPE fue el material que presentó menor módulo y resistencia a la flexión, pero mostró mayor ductilidad y elongación previa a la rotura.

Los resultados de los ensayos de flexión mostraron diferencias entre los distintos polímeros evaluados. En cuanto a la tensión máxima en flexión, el PLA mostró el valor más alto, alcanzando 78,5 MPa, seguido por el PP y el PA12 con 67,9 MPa y 65,6 MPa respectivamente, mientras que el HDPE presentó el valor más bajo con 42,2 MPa. Respecto al módulo de flexión, se observó que el PLA también destacó con un valor de 2,82 GPa, siendo superior al PP (1,55 GPa), PA12 (1,35 GPa), y HDPE (1,14 GPa). La Tabla 16 muestra un resumen de los resultados obtenidos, mientras que el detalle de cada probeta ensayada se muestra en la Tabla A 4 del Anexo 1. Estos resultados evidencian que tanto el PLA como el PP presentan propiedades mecánicas superiores en comparación con el HDPE.

Tabla 16. Resumen de resultados de tensión máxima y modulo en flexión de los termoplásticos ensayados

MATERIAL	σ_f [Mpa]	E_f [Gpa]
PP	67,88 ± 1,43	1,550 ± 0,052
PLA	78,45 ± 2,66	2,820 ± 0,052
HDPE	42,23 ± 2,23	1,137 ± 0,211
PA12	65,55 ± 0,20	1,353 ± 0,075

En consecuencia, se concluyó que el PLA es un candidato adecuado para el núcleo de un material tipo panel sándwich de una quilla de tabla de surf, ya que no solo supera al HDPE en resistencia a la flexión, sino que también ofrece un módulo mayor, lo cual sugiere una mayor rigidez estructural. Esto respalda la viabilidad de fabricar una quilla con la estructura de panel sándwich propuesta, capaz de soportar las cargas en servicio sin comprometer la funcionalidad del producto. La combinación del PLA con resina epoxi en la estructura del panel sándwich podría resultar en un aumento de la

rigidez y resistencia, lo cual sería beneficioso para mejorar las prestaciones del producto final.

4.7 SELECCIÓN DE LA SECUENCIA DE LAMINACIÓN ÓPTIMA PARA LA FABRICACIÓN DE QUILLAS

Para la selección de la secuencia de laminación de la quilla se consideraron varios factores. Entre ellos se encuentran: la evaluación del material termoplástico seleccionado para el núcleo, el análisis de la zona donde se desarrollan las mayores tensiones de la pieza, los costos asociados a la incorporación de diferentes pieles (tanto en cantidad como en tipo) y la búsqueda de un balance entre eficiencia económica y desempeño mecánico. Además, se compararon estos factores con las características de las quillas actualmente disponibles en el mercado, con el objetivo de posicionar el producto desarrollado en relación con las alternativas comerciales.

El núcleo de la quilla, como se mencionó anteriormente, está compuesto por una estructura HoneyComb de PLA impresa en 3D, rellena con resina epoxi y polvo de poliuretano reciclado. La zona de anclaje de la quilla a la tabla está constituida únicamente por PLA, diferenciándose del diseño del resto de la pieza. Esto se debe a consideraciones de factibilidad de impresión. Sin embargo, como se mostró en el apartado 4.6 las propiedades a la flexión del PLA impreso son superiores a los otros termoplásticos ensayados, los cuales son empleados en la fabricación de quillas inyectadas por lo que, desde el punto de vista mecánico, la utilización del producto sin laminación podría ser factible.

En la sección 1.2, se describió que actualmente existen tanto quillas de termoplástico inyectado como quillas de materiales compuestos de matriz termorígida reforzados con fibras. Dado que se busca desarrollar un producto con mejores propiedades que las quillas inyectadas, se decidió laminar el núcleo de la quilla. Esta laminación tiene como objetivo aumentar la resistencia y rigidez de la pieza en comparación con las quillas de termoplástico inyectado disponibles en el mercado y

además agregar una barrera física al producto que estará en contacto con agua para minimizar la posibilidad del ingreso de humedad a la pieza.

Considerando que la laminación del núcleo propuesto podría generar un producto con propiedades mecánicas superiores a las de las quillas inyectadas y comparable con las de materiales compuestos reforzados con fibras, se decidió realizar el laminado utilizando una sola capa de fibra de vidrio en cada lado de la quilla. Esta estrategia permite aumentar la resistencia y rigidez de la pieza, agregar una barrera física al producto y paralelamente minimizar los costos de producción y peso de la pieza.

4.8 . FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE QUILLA

El proceso de fabricación de la quilla fue el descrito en la sección 3.2.2. Tras la etapa de laminación de la quilla se inicia un proceso de maquinado final para eliminar posibles excedentes de resina y lograr un buen acabado superficial en el producto final. La quilla tuvo las dimensiones adecuadas y pudo ser colocada en la tabla sin dificultades. El laminado de resina epoxi con fibra de vidrio deja ver el núcleo tal como fue construido lo que genera un producto con mayor impacto visual, logrando un aspecto necesario para la futura venta.

El producto final tuvo un peso de 37,02g mientras que una quilla comercial de resina y fibra de dimensiones similares tuvo un peso de 60,75g como se ve en la Figura 59.

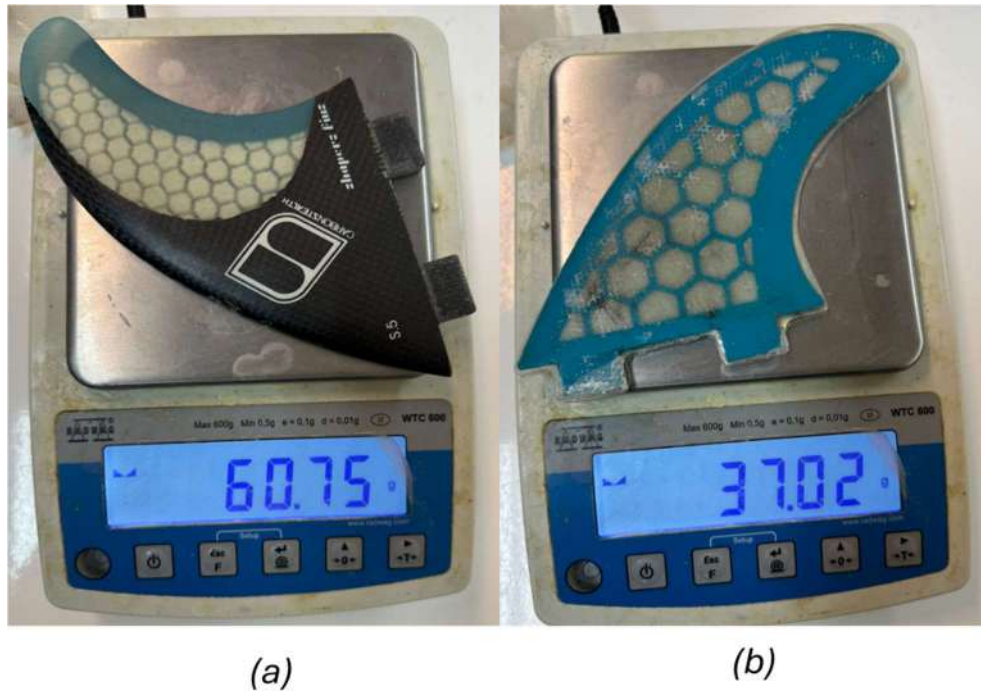


Figura 59. (a) Quilla comercial de material compuesto reforzado con fibra. (b) Quilla desarrollada en este trabajo.

Una vez retirada la pieza del proceso de laminación por infusión al vacío, se observó que la superficie plana de la quilla presentaba marcas visibles y no contaba con el acabado liso esperado, como se aprecia en la Figura 60. Este defecto podría deberse a un mal apoyo entre la tela de fibra y la pieza luego de aplicar vacío, lo que resultó en una distribución irregular del material. Aunque es posible corregir estas imperfecciones mediante un proceso de maquinado manual posterior a la laminación, sería recomendable probar modificaciones en el procedimiento de infusión para prevenir la aparición de este tipo de fallas en futuras producciones.



Figura 60. Superficie plana de la quilla.



Figura 61. Producto final.

4.9 FACTIBILIDAD ECONOMICA PARA LA PRODUCCION DEL PRODUCTO

En esta sección se analiza la factibilidad técnica-económica de la producción de la pieza en cuestión. En este caso se realizó un análisis económico para evaluar la rentabilidad de la venta del producto.

La idea principal es ofrecerles a los productores de tablas de surf la posibilidad de adquirir equipamiento, mano de obra y materiales para poder producir estas piezas, diversificando la producción y brindando un mecanismo de economía circular y reúso de desechos productivos. El análisis será realizado bajo las siguientes suposiciones:

1. Se producirán 16 juegos de 3 quillas mensuales las cuales serán vendidas en su totalidad.
2. El productor de tablas posee una pequeña área en el taller la cual será destinada a la producción de quillas.
3. El proceso de producción será igual al detallado en el trabajo: impresión del esqueleto Honeycomb de núcleo, relleno con la mezcla propuesta de resina epoxi y polvo de PU obtenido del desecho de la misma empresa y finalmente el proceso de infusión por vacío donde se laminarán varias quillas en simultáneo.
4. Se trabaja de lunes a viernes 8hs diarias y los sábados 4hs. El esquema de producción propuesto es de la siguiente manera:
 - a. Se producirán 3 núcleos por día con la impresora 3D donde el operador esté encargado solo de programar los inicios y fin de la maquina (3hs diarias)
 - b. Dos días al mes (16 hs) serán destinados al relleno de los núcleos.
 - c. Dos días al mes (16 hs) serán destinados al laminado (24 piezas en cada laminado)
 - d. Dos días al mes (16 hs) serán destinados al maquinado y empaque de las piezas

Bajo este esquema, el operario está **96 Horas** mensuales asignado a la producción de quillas

5. El precio de venta se estableció analizando los productos ofrecidos actualmente en el mercado. Para esto se tuvo en cuenta que el producto ofrecería mejores propiedades que una quilla de polietileno inyectada pero su calidad no alcanzaría las importadas de fibra de carbono.
6. Si bien la impresora tiene la versatilidad de producir otro tipo de objetos, será utilizada 100% en la impresión de esqueletos de núcleo para las quillas.

7. El día del análisis el dólar oficial cotizaba \$365 y el no oficial \$950.

4.9.1 INVERSION INICIAL³⁷

La inversión inicial viene dada por el desembolso que debe hacer el productor para poder comenzar la producción de quillas. En este caso estos costos son: la impresora 3D y su instalación, una bomba de vacío, sierras de corte, membranas reutilizables para la infusión y se contempla un 5% de contingencias. En la Tabla 17 se muestra el detalle de los precios para los elementos contemplados como inversión inicial del proyecto. ³⁷

Tabla 17. Precios utilizados como inversión inicial.

INVERSION INICIAL		
Item	Método de cálculo	Costo (\$)
Impresora 3D	Precio unidad	420.000,00
Bomba de vacío	Precio unidad	400.000,00
Instalación Impresora	37,5% precio de la maquina	157.500,00
Membranas	Precio unidad	30.000,00
Cierras corte	Precio unidad	90.000,00
Lijadora	Precio unidad	85.000,00
Contingencias	10% de la inversión	118.250,00
TOTAL		\$ 1.300.750,00

4.9.2 COSTOS DEL PROCESO³⁷

Los costos del proceso se pueden dividir entre los costos de material y los costos de fabricación. Estos últimos incluyen el costo de maquinaria, mano de obra y servicios.

4.9.2.1 COSTOS DE FABRICACION

4.9.2.1.1 COSTO DE MAQUINARIA (FIJOS)

El costo de maquinaria de calculará como:

$$CM = \frac{CR \times \text{Precio de maquinaria}}{\text{Tiempo real de trabajo}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde CR es el costo de recupero del capital invertido que es un factor que en este caso se supone de la siguiente manera ³⁷:

- Retorno de Capital (25%)
- Depreciación (10%)
- Mantenimiento y repuestos (5%)
- Seguros (2%)
- Servicios (23%)
- **Total : 65% (CR=0,65)**

El tiempo real de trabajo se supone como el 85% del tiempo total de trabajo.

Tiempo total de trabajo: 2112 horas/año.

Tiempo real de trabajo: 1795,2 horas/año.

Tiempo de uso de la maquinaria: 176 horas/mes

Luego,

$$CM = \frac{0,65 \times (420.000 + 400.000)}{1795,2} = \underline{296,90 \text{ \$/hora}}$$

$$CM_{Mensual} = 296,90 \frac{\$}{hora} * 176 \frac{hora}{mes} = 52.254,90 \frac{\$}{mes}$$

$$CM_{Anual} = 627.058,82 \frac{\$}{año}$$

4.9.2.1.2 COSTO DE MANO DE OBRA (CMO)

El CMO se calcula como el precio de la hora hombre por la cantidad de horas que tiene asignadas mensualmente a la producción del producto.

Tabla 18. Resumen de cálculo de Costo de Mano de Obra

COSTO DE MANO DE OBRA		
Item	Método de cálculo	Monto
Salario mínimo dic 2023	\$	156.000,00
Costo hora hombre	Salario Mínimo / 176 hs [\$/hora]	886,36
Costo cargas sociales	0,4* Costo hora hombre [\$/hora]	354,55
CMO	[\$/hora]	1.240,91
CMO por mes	CMO * 96 Horas/mes [\$/mes]	119.127,27

$$CMO_{Mensual} = CMO * Horas mensuales = 1.240,91 \frac{\$}{hora} * 96 \frac{hora}{mes} = 119.127,27 \frac{\$}{mes}$$

$$CMO_{Anual} = 1.429.527,27 \frac{\$}{año}$$

4.9.2.1.3 COSTO DE POTENCIA Y SERVICIOS

En este caso se calculará el gasto energético que produce la impresora 3D trabajando 176 horas mensuales y la bomba de vacío 16 horas mensuales. Se utilizó como Precio Del KWh para Consumidor N1 según cuadro tarifario vigente: 30,9118 \$/KWh.

Costo Energético = Consumo mensual en KWh x Precio del KWh Ecuación 35

$$\text{Consumo maquinaria} \left(\frac{KWh}{mes} \right) = \frac{\text{Potencia Maxima (W)}}{1000 \frac{W}{KW}} \times \text{Horas mensuales}$$

$$\text{Consumo Impresora 3D} = \frac{1000 W}{1000 \frac{W}{KW}} \times 176 \frac{hs}{mes} = 176 \frac{KWh}{mes}$$

$$\text{Consumo Bomba de vacío} = \frac{500W}{1000 \frac{W}{KW}} \times 16 \frac{hs}{mes} = 8 \frac{KWh}{mes}$$

$$\text{Costo Energético Mensual} = \left(176 \frac{KWh}{mes} + 8 \frac{KWh}{mes} \right) \times 30,9118 \$ = 5.687,77 \frac{\$}{mes}$$

$$\text{Costo Energético anual} = 5.687,77 \frac{\$}{mes} \times 12 = 68.253,25 \frac{\$}{año}$$

El costo por servicios se calcula como 2,5 veces el costo energético.

$$\text{Costo por servicios mensual} = 2,5 \times 5.687,77 \frac{\$}{mes} = 14.219,428 \frac{\$}{mes}$$

$$\text{Costo por servicios anual} = 14.219,428 \frac{\$}{mes} \times 12 = 170.663,14 \frac{\$}{año}$$

Luego el costo de potencia y servicios es la suma del costo energético y el costo por servicios

$$\text{Costo de potencia y servicios anual} = 68.253,25 \frac{\$}{año} + 170.663,14 \frac{\$}{año}$$

$$\text{Costo de potencia y servicios anual} = 238.916,39 \frac{\$}{\text{año}}$$

4.9.2.2 COSTO DE MATERIALES

El siguiente apartado define el costo de los materiales. Estos junto con los costos de fabricación conforman el costo de producción. Se buscaron de distintas fuentes posibles materiales para utilizar como materia prima en la fabricación del producto. Dichos datos se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19. Materiales a utilizar en la fabricación de las quillas.

MATERIAL	UNIDAD	PRECIO POR BULTO	FUENTE
Filamento 3D Pla lidmax de 1.75mm	Kg	\$ 8.000,00	Resinplast
Fibra de vidrio	m ²	\$ 5.400,00	
Polvo de PU	Kg	-	-
Peel Ply	m ²	\$ 18.000,00	
Flow media	m ²	\$ 30.980,00	
Resina	4 Kg	\$ 67.373,00	NOVARCHEM SA
Mangueras	50 m	\$ 12.363,00	MercadoLibre

Tabla 20. Resumen de costo de materiales.

PROCESO	MATERIAL	UNIDAD	MONTO
IMPRESIÓN	Filamento PLA	\$/Quilla	120,00
RELLENO	Resina	\$/Quilla	358,52
LAMINADO	Resina	\$/Quilla	71,76
	Fibra de Vidrio	\$/Quilla	243,00
	Materiales descartables (PeelPly, Flow Media y mangueras)	\$/Quilla	1.544,14
ENVASADO	Envases	\$/Quilla	67,90
COSTO MATERIALES		\$/Quilla	2.405,63
COSTO MATERIALES		\$/mes	115.470,16
COSTO MATERIALES		\$/año	1.385.641,92

RESUMEN DE CALCULO DE COSTOS

Tabla 21. Resumen de costos e inversión

CONCEPTO	MONTO
INVERSIÓN INICIAL	\$ 1.300.750,00
COSTOS DE PRODUCCIÓN	\$3.681.144,37
• COSTOS DE FABRICACIÓN	\$2.295.502,49
○ -Costo Maquinaria	\$627.058,82
○ -Costo Mano de Obra	\$1.429.527,27
○ -Costo potencia y servicios	\$238.916,39
• COSTOS DE MATERIALES	\$1.385.641,92

4.9.3 ANALISIS DE RENTABILIDAD ³⁷

Finalmente se realizó el análisis de rentabilidad para el proyecto. Para esto fue necesario definir un precio de venta acorde. Los precios en el mercado van desde los \$13.000 para quillas termoplásticas inyectadas a \$60.000 de materiales compuestos de matriz termorígida y refuerzo de fibra de carbono. El criterio de selección de precio entonces fue un intermedio (\$23.500). De esta manera se incorpora al mercado un producto intermedio entre desempeño mecánico y costo.

Con estos datos más los calculados en el inciso anterior es posible diagramar un cuadro de flujo de fondos y hacer cálculos de rentabilidad del proyecto. En este caso se calculará el Valor Presente y la TIR que tienen en cuenta el valor temporal del dinero y el tiempo de repago que no considera el valor temporal del dinero, pero define el mínimo período de tiempo necesario para la recuperación de la inversión fija depreciable.³⁷

Tabla 22. Flujos de caja por año.

Precio de venta	\$ 23.500,00	ANALISIS DE RENTABILIDAD				
Impuesto Ganancias	0,35					
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso por ventas		\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00
TOTAL		\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00	\$ 4.512.000,00
Costo de material		-\$ 1.385.642,46	-\$ 1.385.642,46	-\$ 1.385.642,46	-\$ 1.385.642,46	-\$ 1.385.642,46
Costo de fabricación		-\$ 2.295.502,49	-\$ 2.295.502,49	-\$ 2.295.502,49	-\$ 2.295.502,49	-\$ 2.295.502,49
TOTAL COSTOS		-\$ 3.681.144,95	-\$ 3.681.144,95	-\$ 3.681.144,95	-\$ 3.681.144,95	-\$ 3.681.144,95
Utilidad Antes de impuestos (BNAI)		\$ 830.855,05	\$ 830.855,05	\$ 830.855,05	\$ 830.855,05	\$ 830.855,05
Impuesto		-\$ 290.799,27	-\$ 290.799,27	-\$ 290.799,27	-\$ 290.799,27	-\$ 290.799,27
Utilidad después de impuestos (BN)		\$ 540.055,78	\$ 540.055,78	\$ 540.055,78	\$ 540.055,78	\$ 540.055,78
Depreciación (10% Maquinas)		\$ 82.000,00	\$ 82.000,00	\$ 82.000,00	\$ 82.000,00	\$ 82.000,00
Inversión inicial	-\$ 1.300.750,00					
Capital de Trabajo (10% IF)	-\$ 139.400,00					
Flujo de fondos	-\$ 1.440.150,00	\$ 622.055,78	\$ 622.055,78	\$ 622.055,78	\$ 622.055,78	\$ 622.055,78

Valor Presente

El método del valor presente compara los valores presentes de todos los flujos de caja con la inversión original. Se calcula como la diferencia entre el valor presente de los flujos anuales de fondos y la inversión inicial total. Para su estimación se debe preestablecer una tasa de rentabilidad, en este caso se tomará como aceptable una tasa del 20%.³⁷

$$VP_{(TR=20\%)} = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+0,2)^j} - I_T \quad \text{Ecuación 36}$$

Luego para este caso el valor presente resulta mayor a 0 por lo tanto se considera rentable.

TIR (Tasa Interna de Retorno)

Este método da como resultado una tasa de interés que debería aplicarse anualmente al flujo de caja de tal manera que la inversión original sea reducida a 0.

$$\sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+r)^j} - I_T = 0 \quad \text{Ecuación 37}$$

Luego para este caso la TIR es 0,33 (tasa de 33%) mayor a la mínima preestablecida de 20% por lo tanto por este método el proyecto también resulta rentable.

Tiempo de Repago

Se define como el mínimo tiempo necesario para recuperar la inversión Fija depreciable y es aplicable solo si todos los flujos de caja son iguales. L representa el valor residual de las maquinas (valor de reventa), en este caso tomaremos el caso límite de que sea igual a 0.³⁷

$$\text{Tiempo de Repago } (Nr) = \frac{I_F - L}{FC} \quad \text{Ecuación 38}$$

Luego el tiempo de repago es $N_r=2,31$. El criterio utilizado para analizar la rentabilidad por este método es que la inversión se recupere antes de la mitad de la vida del proyecto (5 años), por lo tanto, mediante este método el proyecto también resulta rentable.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo buscó el aprovechamiento del polvo de desecho de espuma de poliuretano (PU), generado por la industria de tablas de surf, como material de relleno para la fabricación de quillas. Al incorporar este residuo en un producto nuevo perteneciente a la misma industria, se promueve un enfoque de economía circular. De esta manera los desechos de la industria no solo se gestionan de manera más eficiente, sino que se transforman en materia prima. Este enfoque no solo reduce el impacto ambiental asociado a la eliminación de residuos de polvo de PU, sino que también contribuye a la creación de productos sostenibles.

La secuencia constructiva tanto de la quilla como de los paneles permitió integrar de manera eficiente los distintos materiales utilizados en una estructura tipo panel sándwich. El núcleo, compuesto por una estructura 'honeycomb' impresa en 3D en PLA y relleno con una mezcla de resina epoxi virgen y polvo de poliuretano reciclado, se fabricó sin mayores inconvenientes tanto para los paneles como para las quillas, logrando productos de calidad suficiente para avanzar a la etapa de laminado. Este proceso se desarrolló bajo una técnica adaptada de infusión por vacío, donde se promueve el uso de materiales reutilizables que reemplazan los descartables que usa la técnica convencional. Se realizaron las laminaciones con telas de fibras de vidrio y de carbono y se obtuvieron tanto paneles como quillas de buena estabilidad dimensional a pesar de algunos desafíos técnicos como la formación de "race tracking". La implementación de esta secuencia constructiva ha demostrado ser una opción viable

para la fabricación de piezas, permitiendo la obtención de productos con el nivel de calidad requerido en cada etapa del proceso.

La caracterización de los materiales y procesos fue un aspecto fundamental en este trabajo. Se llevó a cabo un análisis detallado de la cinética de curado de la resina utilizada, tanto para el relleno de la estructura “honeycomb” como para la laminación de los paneles. Estos resultados no solo son aplicables a este proyecto, sino que también ofrecen información para diversas aplicaciones donde se utilice la misma resina, ya que se ajustaron los datos a un modelo cinético que permite evaluar su comportamiento a distintas temperaturas. Se concluyó que a temperatura ambiente es factible realizar la infusión de varios juegos de quillas antes a que la resina alcance su punto de gel y no pueda fluir por los canales en donde se desarrolla la infusión.

La etapa de caracterización también incluyó la construcción de mapas de falla en flexión en tres puntos para paneles sandwich. Si bien estos resultados no impactan directamente en la decisión de cómo estará conformada la quilla, este enfoque optimiza el proceso de diseño al facilitar la fabricación de probetas específicas según el mecanismo de falla deseado y también ahorra tiempo y recursos en el desarrollo de nuevas configuraciones. Utilizando datos de ensayos de tracción en las pieles y compresión en el núcleo, realizados también en este trabajo, se generaron mapas que relacionan la densidad relativa entre el núcleo y el material que lo conforma y la relación entre el espesor del panel y el span del ensayo. Los resultados mostraron que, dado que la densidad relativa se aproxima a 1 y el núcleo actúa como un sólido rígido, los paneles propuestos se mantienen en una zona alta del mapa, donde se prevé que la falla ocurra principalmente en las pieles. Al introducir un núcleo de espuma de poliuretano, se observó un cambio significativo en el mapa, sugiriendo que este tipo de núcleo podría llevar a mostrar distintos modos de falla. Esto resalta la capacidad de los mapas no solo para predecir el mecanismo de falla, sino también para guiar el diseño y la caracterización de nuevos paneles. Los ensayos de flexión en 3 puntos sobre los paneles sirvieron para calcular la rigidez a la flexión de las probetas y analizar su aumento al agregar pieles o cambiar el tipo de laminado. A su vez, dichos ensayos se utilizaron para validar la información proporcionada por los mapas de falla ya que todas las probetas ensayadas fallaron por las pieles, tal como predecían los mapas.

Si bien la confección final de la quilla fue guiada por los resultados de las distintas etapas de caracterización mencionadas anteriormente, aún quedaba por determinar si

el producto cumpliría con las exigencias mecánicas mínimas requeridas en servicio y definir la secuencia de laminación óptima para asegurar su rendimiento estructural. Para esto se realizaron ensayos de flexión tanto del material utilizado como base de la quilla (que forma parte del anclaje de esta a la tabla de surf) como de otros materiales usados actualmente en la producción de quillas inyectadas. Finalmente, los resultados mostraron que, dentro de los termoplásticos ensayados, el PLA ofrece las mejores propiedades a la flexión, asegurando que las exigencias mecánicas mínimas en servicio sean cubiertas. En base a estos resultados, se optó por una secuencia de laminación que minimizara los costos, laminando la quilla con una tela de fibra de vidrio a cada lado del núcleo para su conformado final.

Además de los resultados técnicos obtenidos, el análisis económico confirmó que la implementación de este proceso no solo es factible, sino que ofrece una oportunidad rentable para pequeñas y medianas empresas. Este enfoque integral combina la optimización de los materiales con una estrategia de producción económica y ambientalmente sostenible. Los resultados de este análisis demostraron que es rentable para estos productores adquirir la maquinaria necesaria, elaborar y comercializar las quillas. La inversión se estaría recuperando en aproximadamente 2,31 años siguiendo el esquema de venta propuesto. De este modo, la empresa no solo podría ampliar su gama de productos y aumentar sus ingresos, sino también ofrecer al mercado una opción sostenible que fomente la economía circular.

Este proyecto demostró la viabilidad técnica y económica de utilizar residuos industriales como materia prima para la fabricación de un producto comercializable dentro de la misma industria. Si bien el foco principal fue la producción de la quilla, el trabajo también proporcionó una caracterización detallada del proceso y de los materiales que conforman el panel sandwich, destacando su versatilidad para ser utilizado en la fabricación de otros tipos de piezas. De este modo, el proyecto sienta una base para futuros desarrollos que busquen aprovechar la estructura y propiedades de este material en aplicaciones diversas, promoviendo así una producción más eficiente y amigable con el medio ambiente.

6. TRABAJOS FUTUROS

Como continuación del presente trabajo, se propone optimizar el prototipo de quilla, tomando como base los resultados obtenidos. Una posible mejora sería reducir el peso de los paneles mediante el uso de un núcleo alternativo. Por ejemplo, se podría experimentar con PU virgen, utilizando los mapas de falla generados en este estudio como referencia. Otra opción sería mantener el enfoque de reciclaje y reutilización de residuos de la industria del surf, compactando el polvo de PU dentro del núcleo tipo honeycomb. Esta última alternativa requeriría tecnología adicional para la compactación del polvo, y sería necesario evaluar la viabilidad técnica y económica de este proceso.

La técnica de infusión por vacío utilizada en este trabajo es especialmente adecuada para la fabricación de piezas de mayor tamaño. Esto abre la posibilidad de desarrollar quillas más grandes, como las que se emplean en veleros (Figura 62), donde un núcleo de menor densidad podría ser esencial para mantener el peso en niveles adecuados.

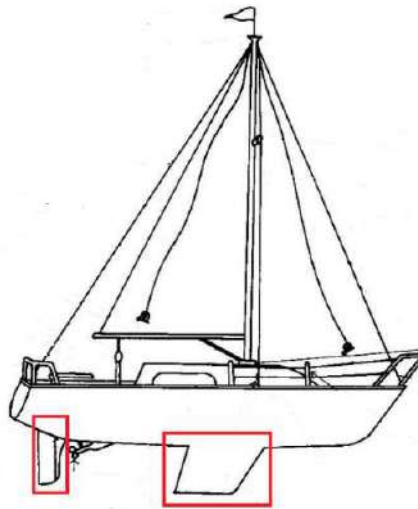


Figura 62. Esquema de un velero con sus quillas.

7. DIFICULTADES ENCONTRADAS

IDEA INICIAL DEL TRABAJO

La idea original del proyecto de tesis de grado era la obtención y caracterización de un material compuesto reforzado con fibras cortas cuya matriz sería resina virgen y como relleno y refuerzo se utilizarían tablas de surf desechadas. Estas poseen el núcleo de PU y el exterior laminado de fibra de vidrio y resina. La molienda de las tablas tendría Polvo de poliuretano que actuaría como relleno y bajaría la densidad del material y las telas de fibra de vidrio trituradas actuarían como refuerzo en el material en cuestión.

El conformado del material se hizo por mezclado mecánico de los componentes y colado del producto en diversos moldes. De esta manera se esperaba obtener un producto de bajo peso que utilizaba residuos como refuerzo/relleno y además confeccionando diferentes tipos de moldes se podrían obtener piezas con distintas geometrías.

Durante el conformado de las placas comenzó a desatarse el principal problema de este trabajo, la resina con los productos del reciclado conformaba una

mezcla con una viscosidad muy elevada, la integración de los componentes a través del mezclado mecánico generaba aire atrapado que luego era difícil de eliminar y el resultado eran placas del material compuesto con burbujas. El ensayo de esas placas carecería de validez alguna porque cualquier tipo de carga hacia las probetas generaría una rotura temprana de las mismas.

Ante este problema se implementaron distintas alternativas con el fin de minimizar el aire atrapado en la mezcla de componentes. En primer lugar, se optó por someter la mezcla ya integrada a una cámara de vacío, de esta manera se acelera la eliminación de gases hacia la atmosfera, pero los resultados fueron iguales. La alta viscosidad de la mezcla, sumado a que la resina ya estaba en procesos de curado imposibilitaba la desgasificación del material.

Como segunda alternativa, se realizaron "Sheet Molding Compound" (SMC) del material en cuestión. Se formaban láminas de resina con catalizador espolvoreadas con el polvo de poliuretano y las fibras cortas y seguidamente se congelaban estos productos a modo de frenar la reacción de curado. El conformado final de las placas se daría a partir del apilamiento de las distintas laminas congeladas con temperatura en la prensa hidráulica. Si bien no observaron burbujas significantes se notaba una mezcla muy pobre de los componentes dando como resultado placas de resina virgen con el polvo y las fibras agrupadas en sectores.

Por estas razones, se decidió cambiar el rumbo de la tesis sin modificar la idea base que era el conformado de un material compuesto utilizando como elementos de partida materiales vírgenes y reciclados. Así surge la idea de utilizar resina virgen con polvo de Poliuretano reciclado como relleno de una estructura tipo honeycomb que a su vez posee un laminado para conformar una estructura tipo sándwich.

8. REFERENCIAS

1. Averill RC. *Polymeric Foams: Mechanisms and Materials*. First Edit. CRC Press, 2012.
2. Your Surf Wave. How are surfboards made? A complete guide to surfboard manufacturing., <https://www.yoursurfwave.com/>.
3. Barcelos R, Magnago R, Leripio A. Analysis of the technological impact on industry and its effects on waste production and disposal: a case study of the surfboard manufacturing industry. *Ciência e Nat* 2018; 40: 10.
4. Dorigato A. Recycling of thermosetting composites for wind blade application. *Adv Ind Eng Polym Res* 2021; 4: 116–132.
5. Zhou S, Smulders S. Closing the loop in a circular economy: Saving resources or suffocating innovations? *Eur Econ Rev* 2021; 139: 103857.
6. Prieto-Sandoval V, Jaca C, Ormazabal M. Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation. *Mem Investig en Ing* 2017; 15: 15.

7. Feng YC, Zhao FQ, Xu H. Recycling and Utilization of Waste Glass Fiber Reinforced Plastics. *MATEC Web Conf* 2016; 67: 4–8.
8. Quillas FCS 2 Baratas y Sostenibles. *FCS Neo Glass Eco Review*, <https://blog.coresurfindshop.com/quillas-fcs-2-baratas-y-sostenibles-fcs-neo-glass-eco-review/>.
9. The Definitive Surfboard Fin Guide, <https://www.boardcave.com/the-surfers-corner/the-surfboard-fin-guide> (2019).
10. Johnson T. Thermoplastic vs. Thermoset Resins, <https://www.thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405> (2021).
11. Lukauskis Carvajal N. *Kryptonite Fins*. 2014.
12. Strong AB. *Plastics: Materials and Processing*. Pearson Prentice Hall, <https://books.google.com.ar/books?id=NdJRAAAAMAAJ> (2006).
13. Mallick PK. *FIBER- REINFORCED COMPOSITES*. 2007.
14. Vitale JPR. Diseño y comportamiento mecánico de núcleos ultralivianos basados en CFRP para uso en estructuras sándwich.
15. Oña García Matres M. *Diseño y optimización de anclajes en paneles sándwich para estructuras monocasco*. E.T.S.I. Industriales (UPM)., 2019.
16. Howard G. Allen. *Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division*. Elsevier Ltd, 2013.
17. Ronald F. Gibson. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4th Editio. 2016. Epub ahead of print 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19626>.
18. Vitale JP, Francucci G, Stocchi A. Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels. *ECCM 2016 - Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials*.
19. Petras A, Sutcliffe MPF. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. *Compos Struct* 1999; 44: 237–252.
20. Molina J. *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi - rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes*, <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064> (2016).
21. Roberto Balda. TIPOS DE INFILL: CUÁL ES EL MEJOR RELLENO PARA TUS IMPRESIONES?, <https://www.radlab.com.ec/blog/tipos-de-infill-cual-es-el-mejor-relleno-para-tus/#:~:text=El patrón cúbico ofrece resistencia,anterior que utiliza menos material.> (2021).
22. Gómez JTG. Manufactura Y Caracterización Mecánica De Estructuras Tipo Sándwich Fabricadas Por Infusión Al Vacío Para Componentes Aeronáuticos.
23. UNMDP-CONICET. “ Bolsa de Vacío para Fabricar Piezas de Material Compuesto por Infusión ”. 1–47.

24. Release U, Mastbergen DB. *Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures*. 2007.
25. Andrés G, Salinas A, Giangreco E, et al. Caracterización mecánica de materiales con matrices biodegradables impresas en 3D. *Investig y Estud - UNA* 2022; 2: 3–15.
26. Serna C. L, Rodríguez de S. A, Albán A. F. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ing y Compet* 2011; 5: 16.
27. ASTM International. C 393 - 00 - Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. 2008; 545-545–3.
28. ASTM International. ASTM Standard C365/C365M, 2003, 'Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores'. *Current* 2003; i: 2–4.
29. Martín Muñoz Á. Infusión con vacío e infusión con autoclave para la fabricación de elementos en material compuesto. Análisis y ensayos comparativos. 2021; 129.
30. Compuestos CP de M. CINÉTICA DE CURADO (APUNTE TEÓRICO-PRÁCTICO).
31. ASTM. D3039 - Standar Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2000.
32. ASTM International. *ASTM D1621: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*. 2016.
33. ASTM INTERNATIONAL. D790 'Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials'. *Annu B ASTM Stand* 2002; 1–12.
34. ODIAN G. *PRINCIPLES OF POLYMERIZATION*. Fourth Edi. 2004.
35. Gotro J. Thermoset Characterization Part 5: Calculation of Gel Point, <https://polymerinnovationblog.com/thermoset-characterization-part-5-calculation-gel-point/> (2014).
36. Miao XY, Lu R, Chen X. Fracture behaviour of foam core sandwich structures with manufacturing defects using phase-field modelling. *Compos Struct* 2021; 274: 114294.
37. Servicios CIE para empresas industriales y de. *Costos de Producción*.

Anexo 1

TABLAS

Tabla A 1. Dimensiones de probetas para ensayo de flexión en 3 puntos de materiales termoplásticos.

Material	Probeta	d [mm]	L ₀ [mm]	b [mm]
PP	P1	6,1	130	12,70
	P2	6,1	130	12,70
	P3	6,1	130	12,70
	P4	6,1	130	12,70
PLA	P1	3,36	127	12,70
	P2	3,34	127	12,70
	P3	3,38	127	12,70
	P4	3,38	127	12,70
PA12	P1	4,11	80	10,00
	P2	4,10	80	10,00
	P3	4,10	80	10,00
	P4	4,11	80	10,00
HDPE	P1	4,63	130	12,57
	P2	3,74	130	12,51
	P3	3,82	130	12,43

Tabla A 2. Resumen dimensiones placas pre-laminado (núcleo).

Muestra	Peso (g)	Espesor (cm)	Espesor promedio (cm)	Área (cm ²)	Densidad(g/cm ³)			
1	527,9	1,19	1,23±0,04	400	1,076			
		1,22						
		1,27						
2	541,1	1,36	1,33±0,04		400	1,020		
		1,34						
		1,28						
3	526,7	1,13	1,15±0,03			400	1,145	
		1,18						
		1,14						
4	533,7	1,20	1,18±0,02				400	1,128
		1,18						
		1,17						
5	515,1	1,21	1,21±0,02	400				1,061
		1,20						
		1,23						
6	541,4	1,27	1,27±0,02		400			1,066
		1,29						
		1,25						

Tabla A 3. Dimensiones de todas las probetas ensayadas a compresión.

PROBETA	MATERIAL	Lado 1 [mm]	Lado 2 [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]
PROBETA 1	HONEYCOMN RELLENO DE RESINA EPOXI Y POLVO DE PU	25,35	27,65	12,00	700,93
PROBETA 2		25,22	26,07	11,94	657,48
PROBETA 3		25,24	26,10	12,01	658,76
PROBETA 4		27,68	26,23	11,95	726,05
PROBETA 1	ESPUMA DE PU	111,22	110,91	25,12	12.335,41
PROBETA 2		109,52	111,26	25,40	12.185,19
PROBETA 3		111,16	112,05	25,72	12.455,48
PROBETA 4		110,81	111,51	25,35	12.356,42

Tabla A 4. Resultados del ensayo de flexión en termoplásticos.

Material	Probeta	σ_f [Mpa]	m [N/mm]	E_f [Gpa]
PP	P1	69,26	130,15± 0,08	1587
	P2	66,00	122,77± 0,07	1497
	P3	67,60	124,42 ± 0,05	1517
	P4	68,65	131,38± 0,08	1602
PLA	P1	78,31	39,17± 0,01	2858
	P2	81,35	38,65± 0,01	2871
	P3	74,94	38,86± 0,01	2785
	P4	79,21	38,59± 0,01	2766
PA12	P1	65,27	26,59± 0,01	1346
	P2	65,71	26,62± 0,01	1348
	P3	65,53	26,82± 0,01	1358
	P4	65,71	26,90± 0,01	1362
HDPE	P1	39,67	31,68± 0,02	892
	P2	43,76	23,43± 0,01	1258
	P3	43,37	24,81± 0,02	1259

Tabla A 5. Dimensiones de los laminados ensayados a tracción.

MATERIAL	PROBETA	Ancho[mm]	Espesor[mm]	L ₀ [mm]	Área [mm ²]
VIDRIO	PV11	16,13	0,172	247	2,77
	PV13	17,01	0,171		2,63
	PV14	14,14	0,170		2,91
	PV15	15,64	0,176		2,40
	PV21	15,69	0,281	250	4,41
	PV22	16,39	0,277		4,53
	PV23	16,04	0,283		4,53
	PV24	14,64	0,299		4,34
	PV25	16,02	0,273	267	4,37
	PV41	17,61	0,640		11,28
	PV42	17,24	0,588		10,13
	PV43	17,25	0,611		10,54
	PV44	17,58	0,608		10,70
	PV45	15,96	0,628		10,02
	CARBONO	PC11	15,20	0,276	196
PC12		15,35	0,281	4,32	
PC13		14,92	0,283	4,22	
PC14		15,99	0,281	4,49	
PC21		18,12	0,522	198	9,46
PC22		18,06	0,550		9,93
PC23		18,04	0,538		9,71
PC24		17,95	0,518		9,29
PC25		18,10	0,535		9,69
PC41		17,22	1,039	195	17,89
PC42		17,81	1,032		18,37
PC43		16,96	1,017		17,24

Tabla A 6. Resumen de valores calculados en el ensayo de tracción.

MATERIAL	PROBETA	σ_{max} [MPa]	Carga Max [KgF]	E [GPa]
VIDRIO	PV11	262,18	75,08	12,13
	PV12	ENSAYO NO VÁLIDO		
	PV13	303,65	90,03	10,88
	PV14	287,89	70,42	11,48
	PV15	267,91	75,46	11,72
	PV21	313,99	141,27	16,40
	PV22	274,29	126,78	15,30
	PV23	262,18	121,07	15,61
	PV24	306,10	136,59	15,50
	PV25	287,65	128,11	15,72
	PV41	264,81	378,45	16,25
	PV42	ENSAYO NO VÁLIDO		
	PV43	225,0	327,4	16,9
	PV44	272,6	392,4	12,2
	PV45	269,2	280,1	15,4
CARBONO	PC11	444,3	190,0	29,7
	PC12	435,5	191,7	27,5
	PC13	457,9	195,7	26,4
	PC14	430,0	197,0	25,3
	PC21	ENSAYO NO VÁLIDO		
	PC22	335,77	339,80	22,17
	PC23	417,08	412,64	25,18
	PC24	370,85	351,29	19,96
	PC25	ENSAYO NO VÁLIDO		
	PC41	407,62	743,56	21,48
	PC42	209,79	874,58	12,29
	PC43	359,64	848,40	13,04

Tabla A 7. Resumen de ensayo de flexión en 3 puntos.

	PROBETA	ESPEJOR SANDWICH (mm)	ANCHO (mm)	ESPEJOR NUCLEO (mm)	CARGA MAX (N)
1 TELA VIDRIO	1	12,85	37,99	12,7	920,20
	2	12,96	38,4	12,7	980,65
	3	12,83	38,12	12,7	1061,56
2 TELAS VIDRIO	1	12,72	38,49	12,13	1155,12
	2	12,56	37,51	12,13	1216,82
	3	12,67	38,78	12,13	1123,60
4 TELAS VIDRIO	1	13,04	38,55	11,83	1962,11
	2	12,99	38,78	11,83	1863,88
	3	13,00	34,36	11,83	1631,35
1 TELA CARBONO	1	12,67	37,18	12,27	1952,85
2 TELAS CARBONO	1	14,05	37,60	13,27	2846,05
	2	13,79	38,46	13,27	1758,70
	3	13,96	38,50	13,27	1802,81
	4	13,85	38,54	13,27	1835,73
4 TELAS CARBONO	1	13,69	38,23	11,5	2249,06
	2	13,42	38,39	11,5	2990,31
	3	13,31	38,68	11,5	2607,49

Anexo 2

GRÁFICOS

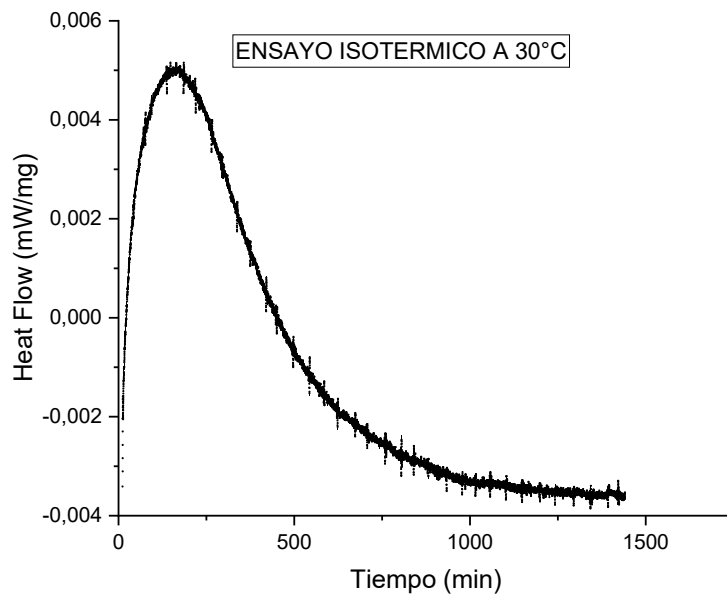


Figura A 1. Corrida isotérmica en DSC a 30°C

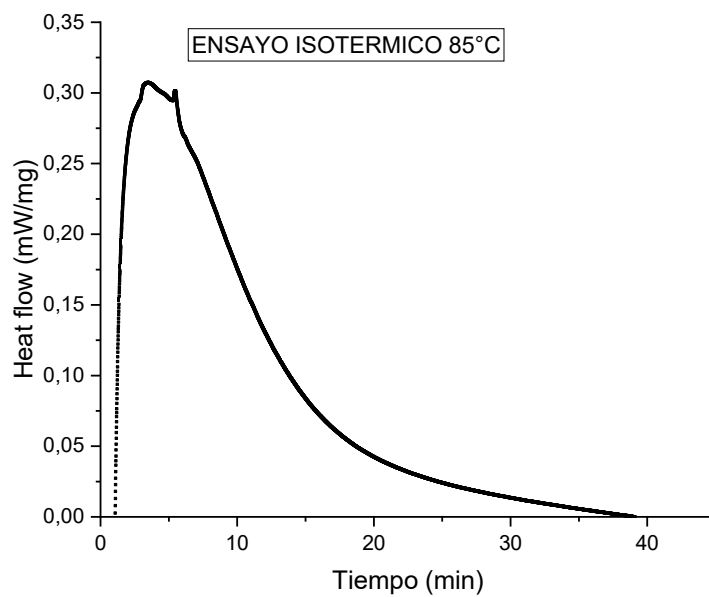


Figura A 2. Corrida isotérmica en DSC a 85°C.

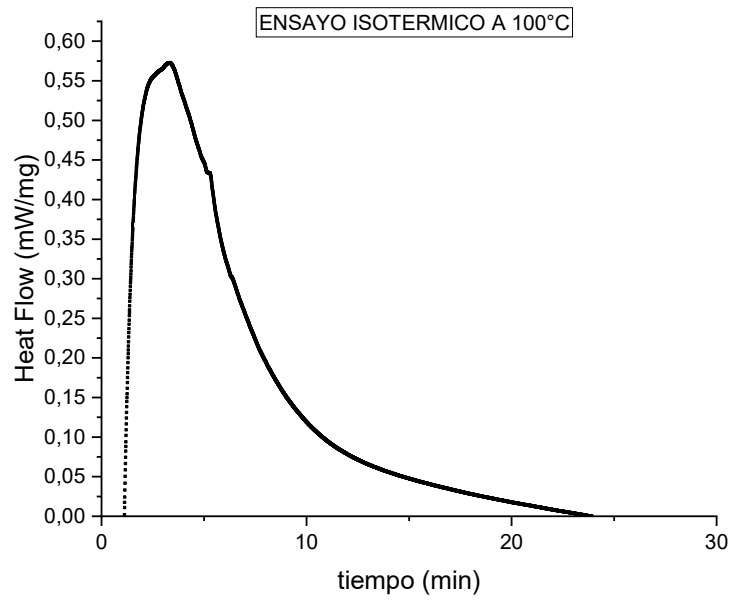


Figura A 3. Corrida isotérmica en DSC a 100°C.

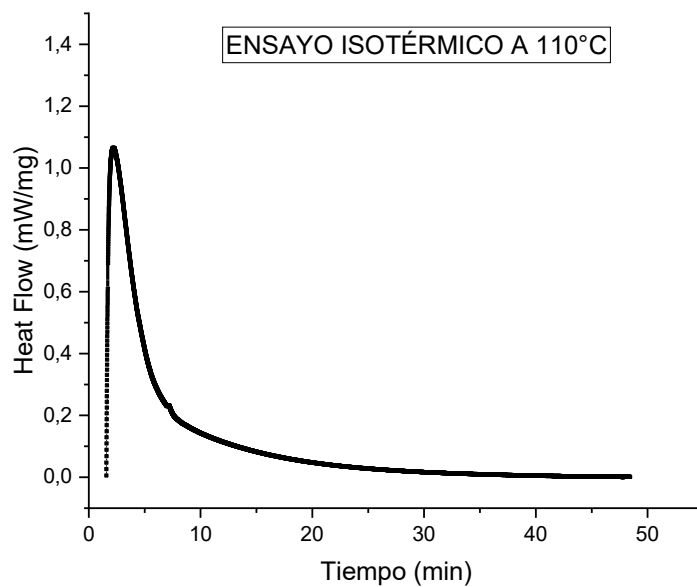


Figura A 4. Corrida isotérmica en DSC a 110°C

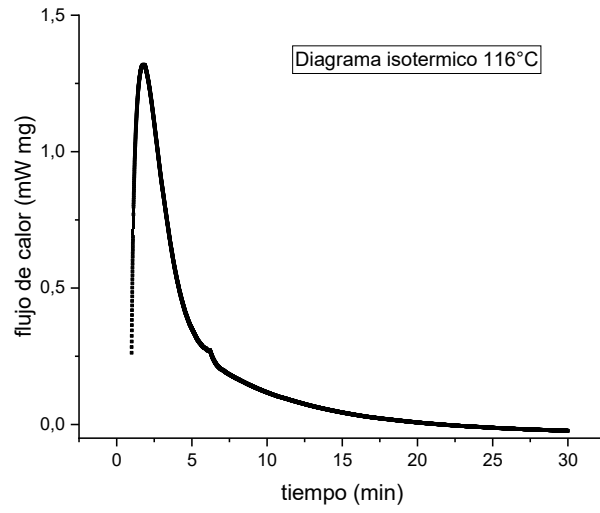


Figura A 5. Corrida isotérmica en DSC a 116°C (pico Exotérmico)

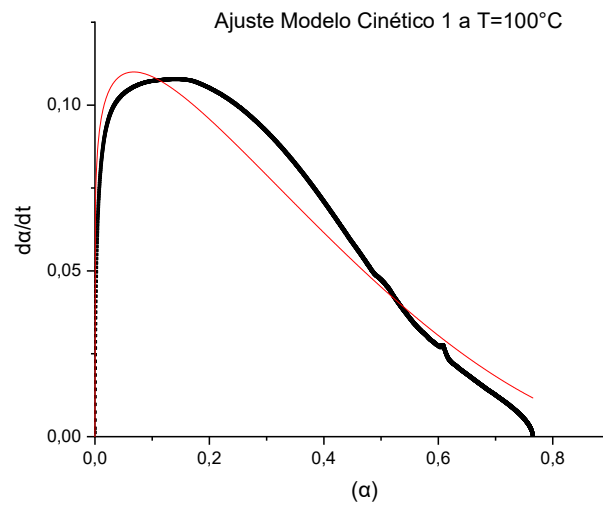


Figura A 6. Ajuste modelo cinético N°1 a T=100°C

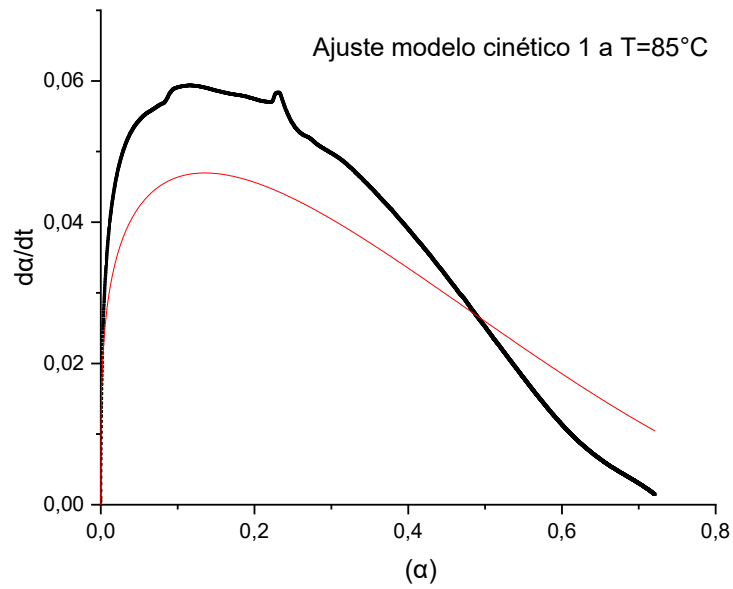


Figura A 7. Ajuste modelo cinético N°1 a T=85°C.

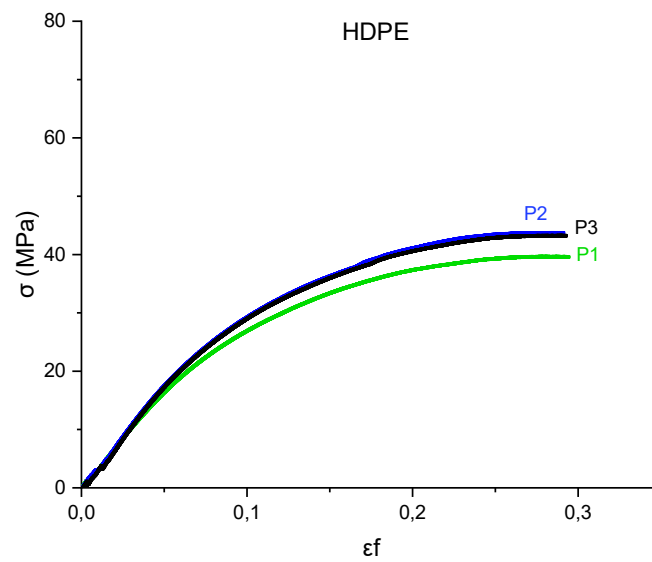


Figura A 8. Curvas Tensión vs Deformación en flexión de HDPE.

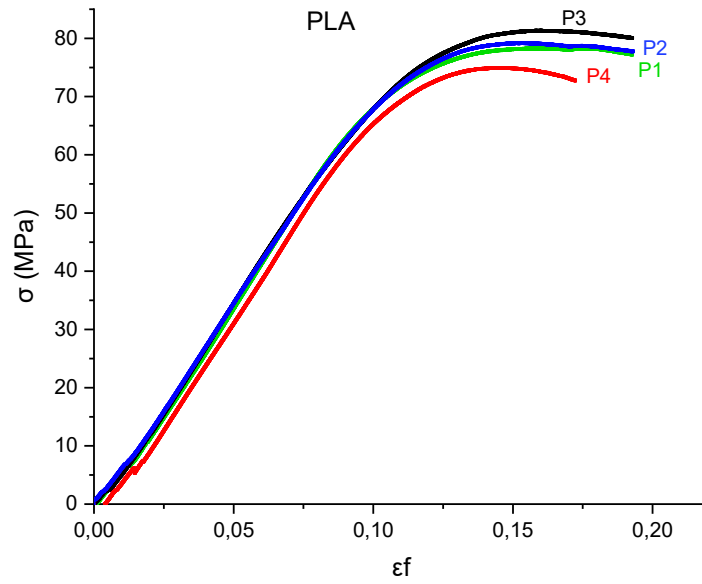


Figura A 9. Curvas Tensión vs Deformación en flexión de PLA.

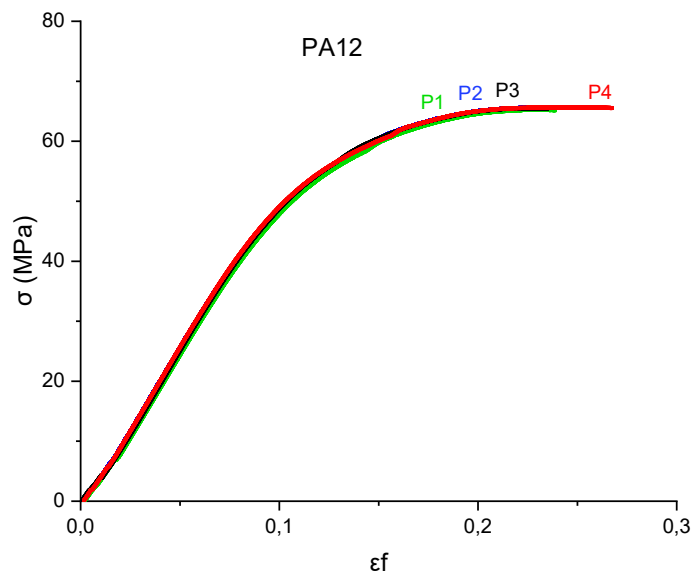


Figura A 10. Curvas Tensión vs Deformación en flexión de PA12.

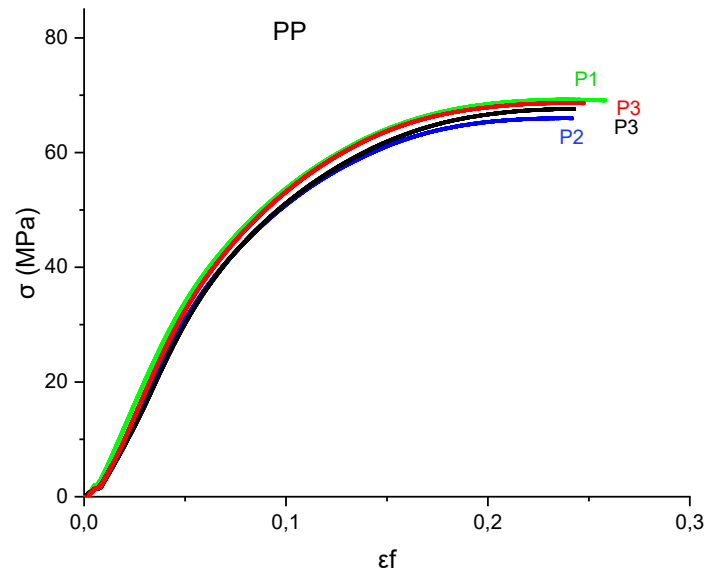


Figura A 11. Curvas Tensión vs Deformación en flexión del PP.

Anexo 3

IMÁGENES

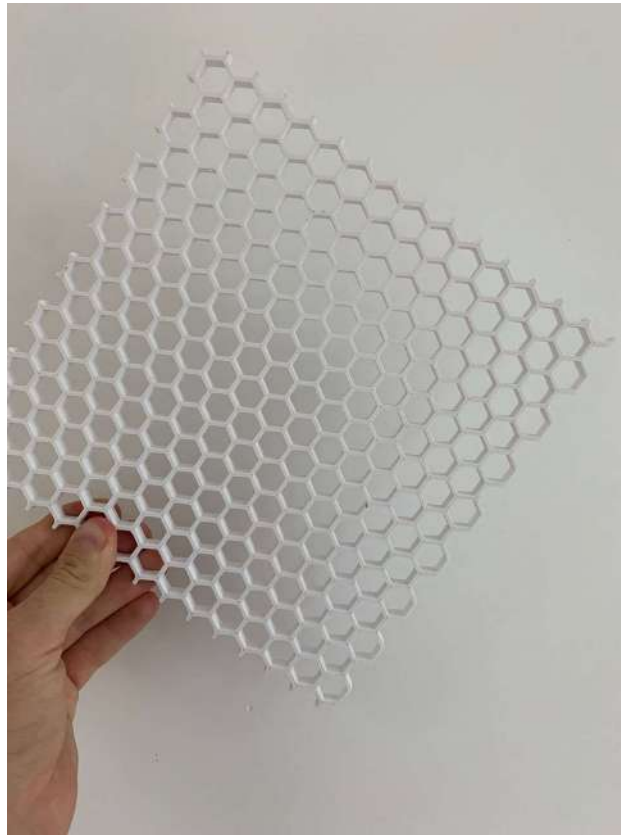


Figura A 12. Núcleo de PLA Impreso.

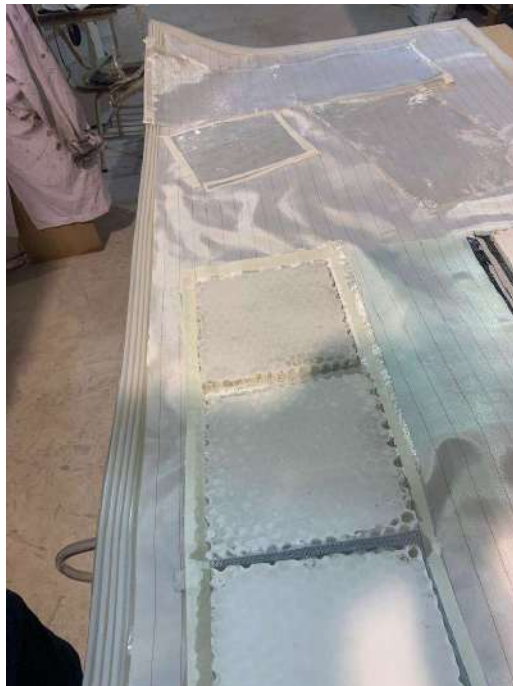


Figura A 13. Disposición de las placas previa a la infusión por vacío.

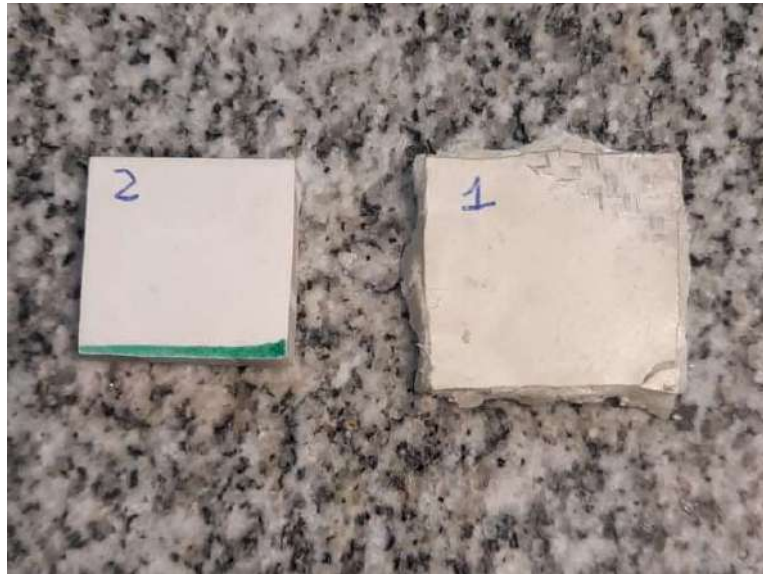


Figura A 14. Probetas de compresión del núcleo propuesto.



Figura A 15. Probeta previa al ensayo vs probeta ensayada.



Figura A 16. Esqueleto Honeycomb en proceso de relleno con resina epoxi y polvo de PU reciclado.

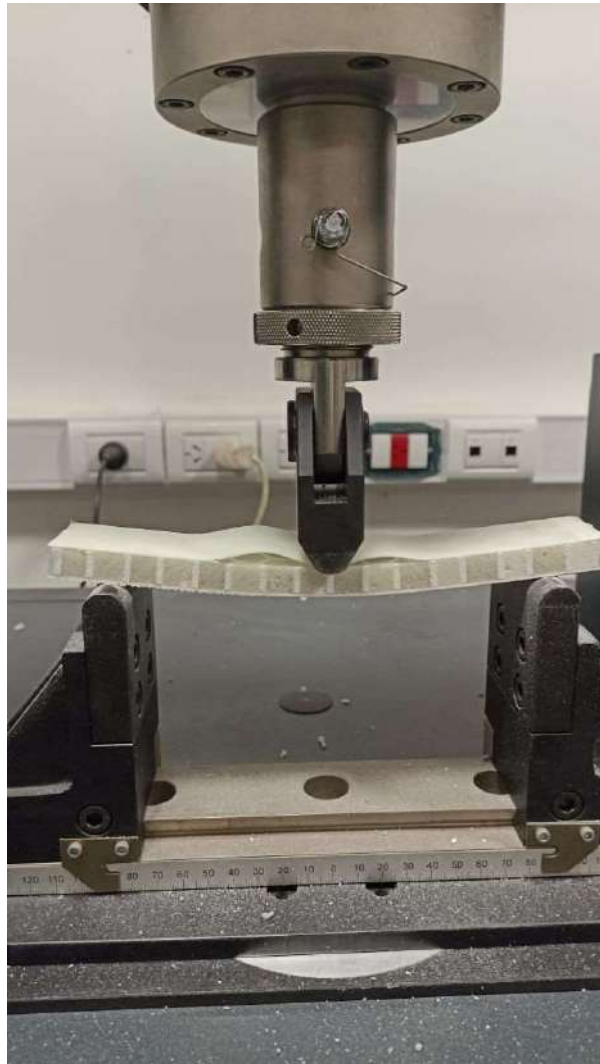


Figura A 17. Probeta de panel sándwich ensayado en flexión en 3 puntos.

Anexo 4

FICHAS TÉCNICAS

DIPREG® 86 A/B



Generalidades

Sistema epoxi líquido de muy baja viscosidad, para laminados estructurales de alta calidad, sin solventes (VOC's). Muy baja reacción exotérmica y contracción de curado. Muy largo tiempo de uso. Curado preferentemente a temperatura 50°C. Excelente capacidad de mojado sobre diversos sustratos y refuerzos de vidrio, carbono y aramidas. Con un postcurado adicional mejora sensiblemente su comportamiento estructural y solidez térmica.

Aplicaciones

Laminados náuticos de grandes dimensiones, Cascos, cubiertas, timones, botes de remo canoas y veleros de alta competencia por laminado manual e infusión. Aeromodelismo y construcción de artículos deportivos. Wind-kite, bicicletas, hockey, tenis, etc.

Automovilismo y motociclismo de competencia. Construcción de carrocerías, accesorios, spoilers, alerones, tableros, butacas, protecciones, carenados etc. Palas y accesorios en impulsores de generadores eólicos, ventiladores y extractores industriales, especialmente en medioambientes agresivos. Química, petróleo, marino.

Construcción de caños PRFV por el proceso de moldeo por arrollamiento. Filament winding. Moldeo de piezas industriales reforzadas con fibra de vidrio, carbono, aramida.

Aeronáutica deportiva y experimental. Fuselajes y piezas no portantes. Construcción de herramental de grandes dimensiones en PRFC y PRFV para matricería, liviano, de alta precisión y estabilidad dimensional. Moldes para laminados, modelos patrones. Calibres.

Procesamiento manual asistido por vacío, inyección y transferencia RTM-Light - VARTM, infusión, etc.

Instrucciones de uso

Los envases A (Resina) y B (Endurecedor) deben estar acondicionados a una temperatura de trabajo de 20 a 25°C a fin de poder asegurar un fácil mezclado y rápida aplicación. Los mismos deben ser abiertos poco antes de ser usados.

Componente	Partes en peso (gr)	Partes en volumen (cm3)
DIPREG® 86 A	100	N.R.
DIPREG® 86 B	25	N.R.

Deberán mezclarse ambos componentes hasta lograr una masa homogénea de color uniforme, sin turbidez ni estrías, utilizando una espátula plana y un recipiente limpio y descartable. El tiempo mínimo de mezcla manual, dependiendo del volumen, es de 2- 3 minutos.

Cuando la pieza es intrincada y la aplicación demanda mucho tiempo se recomienda preparar pequeñas cantidades e ir reponiendo material a medida que avanza el proceso de laminación para aprovechar eficientemente el compuesto mezclado.

Propiedades de la mezcla (@ 25°C):

Propiedades	UM	Valor
Densidad	g/cc	1.10
Viscosidad de mezcla	mPas	250—350
Aspecto / color	Visual	Líquido transparente
Vida útil 100 g	Min	180—200
Tiempo mínimo de desmolde	Hs	24

Aplicación y proceso de curado:

En situaciones críticas de baja temperatura y alta humedad ambiente es conveniente precalentar la superficie del sustrato con pistola de aire caliente a 30 - 35°C y aplicar inmediatamente. (Evita la condensación de humedad sobre la superficie fría). Para la aplicación se pueden emplear pinceles, espátulas o rodillos, etc.

DIPREG® 86 A/B



El curado del compuesto es relativamente insensible a la humedad ambiente (máx. 65%) sin afectar las propiedades finales del mismo. Debe evitarse la condensación de humedad sobre la superficie recién impregnada durante el período de curado, manteniendo a las piezas laminadas a temperatura ambiente como mínimo unos 3 °C por encima del punto de rocío.

Dependiendo de los requerimientos de las propiedades finales del laminado, el sistema puede ser curado a temperatura ambiente (> 23°C) o con aporte de calor adicional de acuerdo con la siguiente tabla:

Gelificado—Endurecido	Postcurado
24 horas @25° C	+7 días @25° C *
24 horas @25° C	+15 horas @50° C
24 horas @25° C	+10 horas @60° C

*El curado final del compuesto a una temperatura ambiente media de 25° C se completa a los siete días de aplicación, desarrollando totalmente sus propiedades finales.

NOTA: Para la limpieza posterior de herramientas y accesorios recomendamos nuestro Limpiador DPM. Una vez endurecido el compuesto en las herramientas resulta muy difícil de eliminar, debiéndose emplear medios mecánicos recomendamos nuestro Limpiador DPM.

Propiedades después del curado

Según el proceso de curado el compuesto presenta las siguientes características:

Propiedades	UM	7 días @24°C	15 días @50°C
Resistencia a la tensión	MPa	55—60	70—75
Modulo de tensión	MPa	3100—3200	3250—3400
Resistencia a la flexión	MPa	80—85	120—125
Modulo de flexión	MPa	3100—3200	2950—3100
Elongación a la rotura	%	2.5—3.0	5.5—6.0
Temperatura de deflexión** (HDT)	°C	50—55	70—75

**Depende del ciclo de postcurado

Presentación

Presentación	Envase	DIPREG® 86 A	DIPREG® 86 B
Conjunto x 1,000 Kg	Botella / Botella	0,800 Kg	0,200 Kg
Conjunto x 4,000 Kg	Bidón / Botella	3,200 Kg	0,800 Kg
Conjunto x 10,000 Kg	Bidón / Bidón	8,000 Kg	2,000 Kg
Conjunto x 25,000 Kg	Bidón / Bidón	20,000 Kg	5,000 Kg

Almacenamiento

La resina y el endurecedor tienen una estabilidad al almacenamiento de un año como mínimo, si se guardan en sus envases originales bien cerrados, en lugar seco y fresco (18—25°C). Homogeneizar antes de usar.

Seguridad y medio ambiente

Las resinas epoxi y sus endurecedores en general son irritantes, sensibilizantes de piel y mucosa, por lo cual deberá trabajarse en un ambiente ventilado y usar guantes descartables. No debe utilizarse solventes de ningún tipo para higiene personal. Únicamente lavarse con agua tibia y secarse con toallas de papel descartable para evitar contaminación. Usar protección ocular. No son considerados productos inflamables de 1a clase. En caso de requerirlo contamos con la correspondiente Hoja de Seguridad MSDS. Los residuos del compuesto epoxi endurecido junto con los guantes descartables, implementos y envases vacíos, deben ser considerados de acuerdo con la legislación local vigente, como residuos especiales / peligrosos para el medio ambiente.

Este producto debe ser almacenado, manipulado y usado de acuerdo con los procedimientos de una buena higiene industrial y en conformidad con cualquier regulación legal. La información aquí contenida está basada en el estado actual de nuestros conocimientos e intenta describir nuestros productos desde el punto de vista de los requerimientos para su correcto procesamiento resguardando todos los aspectos de seguridad. La información brindada en esta Hoja Técnica, está dada de buena fe y está basada en el presente estado de nuestros conocimientos. Dado que las condiciones de aplicación están fuera de nuestro control, toda conclusión y recomendación está hecha sin compromiso por nuestra parte, no pudiendo asumir responsabilidad alguna sobre vicios y defectos en los trabajos efectuados con DIPREG® 86.

Producido por NOVARCHEM S.A. Gral. Lavalle 5168, Villa Martelli [1603], Prov. Buenos Aires, Argentina
Tel: +54 (11) 4709-7585 — +54 11 6372-2222 (celular) info@novarchem.com.ar www.novarchem.com.ar