



UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA



ESTRATEGIAS DE DISEÑO PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA AL *CRUSHING* EN TABLAS DE SURF

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Departamento de Ingeniería en Materiales

Facultad de Ingeniería – UNMdP

Mar del Plata, diciembre de 2024

Autor: Ramiro Varela Muñoz

Contacto: varelamunozramiro@gmail.com

DNI: 43.017.833

Matrícula: 15.390

Director: Ing. Gastón Francucci

Codirector: Ing. Leandro Ludueña



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/).



UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA



ESTRATEGIAS DE DISEÑO PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA AL *CRUSHING* EN TABLAS DE SURF

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Departamento de Ingeniería en Materiales

Facultad de Ingeniería – UNMdP

Mar del Plata, diciembre de 2024

Autor: Ramiro Varela Muñoz

Contacto: varelamunozramiro@gmail.com

DNI: 43.017.833

Matrícula: 15.390

Director: Ing. Gastón Francucci

Codirector: Ing. Leandro Ludueña

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis directores, Gastón Francucci y Leandro Ludueña. Sin su apoyo y orientación, este trabajo no hubiera sido posible. Gracias por brindarme el espacio para trabajar con ustedes y por estar siempre dispuestos a resolver cualquier consulta que surgiera durante el desarrollo de mi tesis. Su paciencia, conocimiento y constante disposición fueron fundamentales para el avance y culminación de este proyecto.

A Federico Rueda, le extiendo mi más sincero agradecimiento. Su ayuda fue crucial para resolver muchos problemas que surgieron en el transcurso de esta investigación. Su predisposición increíble y su capacidad para encontrar soluciones efectivas en momentos de dificultad fueron de gran alivio y contribuyeron significativamente a la calidad y el progreso de este trabajo.

También quiero agradecer a los técnicos de INTEMA, Andrés Torres Nicolini y Fabricio Pietrani. Su asistencia y compañía durante el uso de los equipos del instituto fueron esenciales. Su profesionalismo, amabilidad y disposición para ayudarme en cada paso del proceso experimental hicieron que las tareas más complejas fueran mucho más manejables y eficientes.

Además, le doy las gracias a Tobias Salinas Larrechart, cuya ayuda fue fundamental para poder utilizar el CNC, una herramienta esencial en este proyecto. Sin su asistencia y conocimientos, no habría sido posible completar una parte crucial del trabajo.

Quiero agradecer también a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo en un ambiente tan enriquecedor. Agradezco profundamente todo lo aprendido a lo largo de mi carrera, que me permitió enfrentar los desafíos de este proyecto con confianza y determinación. Además, valoro enormemente el clima de colaboración y el compromiso de los docentes y compañeros, quienes me motivaron a seguir adelante y me ofrecieron su apoyo en los momentos más difíciles.

Indice

1. Introducción.....	5
1.1. Problemática.....	5
1.2. Historia de la manufactura de las tablas de surf.....	6
1.2.1. Construcciones actuales e innovaciones.....	8
2. Objetivos e hipótesis.....	11
3. Marco teórico.....	12
3.1. Paneles sándwich.....	12
3.1.1. Pieles.....	13
3.1.1.1. Matriz.....	15
3.1.1.2. Refuerzo.....	17
3.1.2. Núcleos.....	19
3.1.3. Comportamiento mecánico.....	20
3.1.3.1. <i>Crushing</i>	21
3.2. Paneles corrugados.....	22
4. Metodología experimental.....	24
4.1. Materiales y equipos.....	24
4.2. Caracterización de la resina.....	25
4.2.1. Reología.....	25
4.2.2. Cinética.....	26
4.3. Métodos de fabricación.....	28
4.3.1. Estructuras laminadas.....	28
4.3.2. Estructuras corrugadas.....	29
4.4. Caracterización en tracción en pieles.....	32
4.5. Ensayos de los paneles.....	34
4.5.1. Flexión.....	34
4.5.2. Indentación cuasi-estática.....	35
4.5.3. Indentación por impacto.....	37
5. Resultados y discusiones.....	38
5.1. Caracterización de la resina.....	38
5.1.1. Reología.....	38
5.1.2. Cinética de curado por DSC.....	39
5.2. Propiedades en tracción de las pieles de material compuesto.....	42
5.3. Determinación del peso de los paneles fabricados.....	45
5.4. Ensayos de los paneles.....	46

5.4.1. Flexión.....	46
5.4.2. Indentación cuasi-estática.....	50
5.4.2.1. Ensayos a rotura.....	50
5.4.2.2. Ensayos cíclicos.....	55
5.4.3. Indentación por impacto.....	58
6. Evaluación económica.....	63
6.1. Consideraciones generales.....	63
6.2. Inversión en equipos especializados.....	63
6.3. Costos de producción.....	64
7. Conclusiones.....	68
8. Dificultades encontradas durante el desarrollo del trabajo.....	70
9. Trabajos a futuro.....	71
10. Bibliografía.....	72

Resumen

La industria del surf enfrenta el desafío constante de mejorar la durabilidad de las tablas de surf debido a la formación de abolladuras. Este fenómeno se manifiesta debido a que las tablas tradicionales, construidas con núcleos de espuma y pieles de material compuesto de matriz polimérica, tienen limitaciones en cuanto a su resistencia al *crushing*. El problema es tanto funcional, ya que la tabla pierde flotabilidad, como estético, afectando la apariencia de la tabla. Para abordar esta problemática, se propone el desarrollo de paneles sándwich con núcleos corrugados, con el objetivo de incrementar la resistencia al *crushing* sin aumentar significativamente el peso ni comprometer la flexibilidad de las tablas.

En el presente trabajo, se llevó a cabo el diseño y fabricación de paneles corrugados utilizando la misma materia prima empleada para la fabricación de tablas, para incrementar la resistencia a las abolladuras sin alterar los costos y procedimientos de fabricación significativamente. El proceso de fabricación incluyó la laminación manual de las capas de refuerzo y el uso de sistemas de control numérico (CNC) para el corte e inserción de las estructuras corrugadas. La metodología incluyó la caracterización de los materiales compuestos y la realización de ensayos mecánicos para evaluar el desempeño de los paneles fabricados.

Los ensayos realizados incluyeron pruebas de flexión en tres puntos y ensayos de indentación cuasi-estática e impacto, enfocados en evaluar la resistencia a la compresión y la absorción de energía de los paneles. Los ensayos de flexión revelaron que estos paneles tienen potencial para ser trasladados a una tabla de surf, ya que no se observaron diferencias significativas en la rigidez a la flexión con las estructuras utilizadas en tablas de surf y globalmente aceptadas por los usuarios. En los ensayos de indentación cuasi-estática cíclica, los paneles corrugados mostraron una mejora en la resistencia al *crushing* en comparación con las construcciones tradicionales, distribuyendo y absorbiendo eficazmente las fuerzas estáticas. Sin embargo, los ensayos de indentación por impacto revelaron que los núcleos corrugados mostraron un desempeño inferior al de las estructuras tradicionales.

La investigación ha demostrado que la utilización de núcleos corrugados en tablas de surf ofrece una solución técnica viable para mejorar la resistencia al *crushing* bajo cargas estáticas sin comprometer la flexibilidad y con un aumento mínimo en el peso. Esta innovación presenta ventajas significativas, especialmente en términos de costos de materia prima, lo que la convierte en una opción atractiva para la producción industrial. A pesar de las limitaciones observadas en los ensayos de impacto, los beneficios asociados con la mayor durabilidad y el mantenimiento de las propiedades de flexibilidad destacan el potencial de los núcleos corrugados como una mejora prometedora en el diseño de tablas de surf.

1. Introducción

1.1. Problemática

En la industria manufacturera de tablas de surf, la durabilidad de los productos sigue siendo una preocupación central. A pesar de que estas tablas están diseñadas para soportar las exigencias del deporte, presentan un problema significativo relacionado con el deterioro progresivo. Extender la vida útil de las tablas de surf, que habitualmente es de 2 a 3 años, es crucial tanto desde un punto de vista económico como ambiental. Estos productos, fabricados con materiales no reciclables, se descartan al finalizar su ciclo de vida, contribuyendo al problema de residuos no biodegradables [1,2].

Las tablas de surf se componen de un núcleo de espuma polimérica (poliuretano, PU, o poliestireno, PS), conocido en la industria como *foam*, cubierto con pieles delgadas de material compuesto basado en fibra de vidrio y resina termorrígida (poliéster o epoxi). Como en toda estructura tipo panel sándwich, el *foam* define la geometría y proporciona la resistencia a la compresión, mientras que las pieles otorgan la rigidez y resistencia a la flexión. El deterioro principal de las tablas se manifiesta en la aparición de abolladuras, o *crushing*, que se originan principalmente por el apoyo de codos y rodillas sobre las tablas y las pisadas repetidas del surfista. Para dimensionar la gravedad del problema se muestran, en la Figura 1.1, fotografías del estado de una tabla de surf de calidad *premium* fabricada por uno de los más reconocidos fabricantes locales, luego de cinco usos. Estas abolladuras no solo afectan la apariencia estética del producto, sino que también comprometen la funcionalidad de la tabla al reducir su volumen, densificar el núcleo de espuma y disminuir la flotabilidad. Además, pueden debilitar la estructura de la tabla, conduciendo a problemas más graves como la delaminación, microfisuración y pérdida de estanqueidad, lo que aumenta el riesgo de absorción de agua por el *foam* y afecta negativamente el rendimiento y el peso de la tabla [3]. Si bien este problema es general en la industria del surf, está particularmente acentuado en Argentina, en donde la calidad de los *foams* es significativamente inferior a la de los núcleos fabricados en países como Estados Unidos, Australia y Francia.



Figura 1.1. Aspecto de una tabla de surf nacional de calidad *premium* luego de cinco usos.

La solución al problema mencionado no es trivial, dado que el campo de aplicación del producto en cuestión exige mantener el peso de las tablas por debajo de cierto umbral. Una posible solución para mejorar la durabilidad de las tablas de surf podría ser la importación de núcleos de espuma de alta calidad provenientes de países con tecnologías avanzadas en su fabricación [4]. Sin embargo, esta opción no es económicamente viable en Argentina debido al gran volumen de estos núcleos, lo que aumenta considerablemente los costos de transporte.

Dado que la calidad del núcleo de espuma es crucial para la durabilidad de la tabla, y considerando las limitaciones tecnológicas en la fabricación de núcleos de espuma en Argentina, surge la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas que mejoren la resistencia al *crushing* en las tablas fabricadas localmente. Estas soluciones deben ser prácticas y económicas, buscando incrementar la resistencia a las abolladuras sin alterar significativamente la flexibilidad de las tablas ni elevar los costos de producción.

1.2. Historia de la manufactura de las tablas de surf

La historia de las tablas de surf comienza alrededor del año 300 d.c en el Reino Unido de Hawaii, donde las tablas eran un símbolo de estatus y una forma de moneda socioeconómica. Por un lado, la realeza hawaiana usaba principalmente tablas llamadas *olo*, que medían típicamente entre 14 y 16 pies de largo y se construían a partir del árbol *Wiliwili* debido a sus características ligeras. La falta de quillas en la parte inferior de la tabla significaba que, para dirigirla, el surfista tenía que sumergir las manos en el agua [5,6].

Por otro lado, el resto de la población utilizaba tablas hechas de la densa madera de Koa, que medían entre 8 y 12 pies de largo. Estas se llamaban Alaia y fueron, en muchos sentidos, el origen de las tablas de surf modernas. Con una forma recta, una cola cuadrada y un grosor promedio de una pulgada, las Alaia también carecían de quillas, lo que les daba poca resistencia al agua, aunque eran difíciles de girar. Sin embargo, los bordes duros de sus rieles les permitían desplazarse con la ola rompiente, similar al surf actual [5].

Con el anexo de Hawai a los Estados Unidos, surgió una renovación del diseño de las tablas de surf. Las mismas, construidas con maderas duras locales y especialmente con secuoya, se parecían cada vez más a los longboards modernos, aunque seguían siendo pesados (más de setenta libras) y eran difíciles de girar [7]. Sin embargo, todo comenzó a cambiar cuando, en 1926, Tom Blake fabricó una tabla de 13'4" con el núcleo ahuecado mediante perforaciones a lo largo de toda la tabla cubiertas por chapas delgadas de secuoya en la cubierta y la base. Luego, Blake instaló costillas de madera para soportar las chapas y añadió una quilla de 30,48 centímetros de largo y 10,16 centímetros de alto para mejorar la estabilidad direccional. Con un peso promedio de 18 kilogramos y la capacidad de girar, esto representó un gran avance en el diseño de tablas, permitiendo a los surfistas desplazarse por la cara de la ola en lugar de ir perpendiculares al agua blanca [5]. Luego, para la década de 1930, la secuoya comenzó a ser reemplazada por la madera de balsa de América del Sur, significativamente más ligera, con longboards de balsa pesando alrededor de 16 kilogramos. El problema de la impermeabilización de las tablas de madera comenzó a abordarse con la adición de resina saturada y fibra de vidrio aplicada a mano [7].

Durante la segunda guerra mundial, surgió la aparición del poliuretano como sustituto del caucho. Viéndolo como una alternativa prometedora a la balsa, Gordon Clark, comenzó a experimentar con moldes de espuma de poliuretano. Para 1958, Hobie Surfboards, uno de los mayores fabricantes de tablas de surf del mundo en ese momento, utilizaba exclusivamente núcleos de PU en sus tablas. Ese mismo año comenzaron a aparecer las almas de la tabla, o tiras delgadas de madera que recorren el centro de las tablas modernas, para fortalecerlas [5]. Luego, a medida que pasaban los años, el objetivo era construir tablas de surf más cortas, ya que las que se producían en la época tenían el tamaño de un longboard. Para los años 70 y principios de los 80, los sistemas de quillas removibles ganaron popularidad, se construyeron tablas de todas las formas y tamaños, y las tablas cortas se convirtieron en la tendencia predominante [8].

Para llegar al modelo de tablas que existen hoy en día, a finales de los años 80 y 90, se experimentaba con nuevos materiales. En lugar de la resina poliéster tradicional, se empezó a usar resina epoxi en una minoría de tablas, anticipando su futuro prometedor gracias a su mayor flexibilidad y durabilidad. Por otro lado, se comenzó a usar poliestireno expandido (EPS) como sustituto de las espumas existentes, aunque su utilización no ganó mucha popularidad [9].

Repasando la historia de la fabricación de tablas de surf, resulta evidente que el peso y la manejabilidad siempre han sido factores fundamentales en la mejora continua del producto. Por ello, este trabajo busca una solución al problema del *crushing* sin alterar significativamente estas características esenciales. Es por eso que se planteó la alternativa de utilizar paneles sándwich con un núcleo corrugado superficialmente.

1.2.1. Construcciones actuales e innovaciones

En el mercado, hay una gran variedad de tipos de construcción de tablas de surf, pero todas comparten una base común: un núcleo ligero de espuma polimérica recubierto con capas resistentes de material compuesto. Las diferencias en las construcciones disponibles radican en las diversas combinaciones de núcleos y capas, así como en los materiales utilizados y la disposición de estos elementos en la tabla.

El proceso de fabricación de tablas de surf sigue unos pasos sencillos. Primero, el núcleo se lleva a la forma deseada utilizando plantillas y herramientas de corte y desbaste, en una etapa conocida como "shapeado" (Figura 1.2). En los últimos años, esta etapa también se ha realizado con máquinas de corte por control numérico (CNC), lo que ofrece ventajas como mayor velocidad de producción, consistencia y precisión en el corte de los núcleos. Una vez alcanzada la forma adecuada, se cubre con telas de refuerzo, generalmente de fibra de vidrio, y se impregna manualmente capa por capa con una resina catalizada usando paletas plásticas, rodillos o pinceles. Esta técnica se llama "laminación manual" (Figura 1.3) y se realiza en varios pasos: primero, se coloca una tela de refuerzo en la cubierta, se impregna con resina y se deja curar entre 3 y 24 horas, dependiendo de la formulación de la resina. Luego, se lijan las imperfecciones del laminado (Figura 1.4) y se repite el proceso en el reverso de la tabla. Generalmente, las tablas se construyen con dos capas de refuerzo en cada lado, por lo que el ciclo se repite una vez más. Al finalizar el laminado, se lijan las imperfecciones y se recubre toda la tabla con una película de resina para mejorar la terminación superficial. Este último proceso, conocido como "engrose" o "*hot coat*", se lleva a cabo en dos etapas, una para cada lado de la tabla (Figura 1.5). Después de que esta película de resina finaliza el curado, la tabla se lija y se pule, completando así el proceso de fabricación.



Figura 1.2. Etapa de shapeado



Figura 1.3. Etapa de laminación



Figura 1.4. Etapa de lijado de imperfecciones



Figura 1.5. Etapa de engrose

La construcción tradicional de tablas de surf utiliza tejidos bidireccionales de fibra de vidrio, generalmente con un gramaje de 4 oz/yd² (0,135 kg/m²), impregnados con resina poliéster o epoxi, siendo este último caso una opción más costosa pero con mejores propiedades mecánicas. A su vez, el núcleo presenta un alma de madera que le proporciona rigidez a la estructura. Este enfoque ha sido el estándar durante décadas debido a su bajo costo, bajo peso, facilidad de fabricación y rendimiento aceptable para la mayoría de los surfistas recreativos. Sin embargo, para aquellos que buscan una mayor durabilidad, utilizan tejidos de fibra de vidrio de mayor gramaje, como 6 oz/yd² (0,203 kg/m²) en la cubierta. Este incremento en el gramaje proporciona una mayor resistencia a la rotura y la compresión, lo que ayuda a extender la vida útil de la tabla. No obstante, este beneficio viene acompañado de un aumento en el peso, lo que puede afectar la maniobrabilidad y el rendimiento general de la tabla.

Por otro lado, la fibra de carbono ha emergido como una alternativa a la fibra de vidrio en la construcción de tablas de surf, especialmente en modelos de alto rendimiento. La fibra de carbono es significativamente más rígida y resistente, lo que permite la fabricación de tablas más ligeras y duraderas. Sin embargo, su rigidez puede ser un inconveniente, ya que si bien una tabla excesivamente rígida puede mejorar la velocidad y la respuesta en condiciones ideales, también puede reducir la flexibilidad, afectando negativamente la maniobrabilidad y la adaptabilidad a diferentes tipos de olas [10]. Para contrarrestar este problema, algunos fabricantes han optado por combinar fibra de vidrio y carbono. Esta hibridación de materiales permite aprovechar la rigidez de la fibra de carbono en áreas clave, como la cubierta o los refuerzos, mientras se mantiene cierta flexibilidad en otras zonas mediante el uso de fibra de vidrio, buscando así equilibrar las ventajas de ambos materiales y ofrecer tanto resistencia como rendimiento. De todas maneras, el costo de la fibra de carbono es, aproximadamente, diez veces superior que el de la fibra de vidrio, limitando su uso a un segmento exclusivo de tablas *premium* [11].

Con el objetivo de encontrar una solución al problema del *crushing* en tablas construidas con pieles de fibra de vidrio, algunos fabricantes de tablas de surf como FireWire® comenzaron a experimentar con la incorporación de una lámina de madera de paulownia de 3

mm de espesor entre las capas de fibra de vidrio, modelo el cual denominaron como Timbertek. Esta configuración crea pieles que son en sí mismas paneles sándwich, aumentando sustancialmente su rigidez a la flexión, reduciendo su deflexión ante fuerzas localizadas y distribuyendo mejor las fuerzas de impacto, lo cual contribuye a reducir la probabilidad de *crushing*. La madera añade una resistencia adicional a los impactos, pero también presenta una desventaja significativa: el aumento considerable del peso y rigidez longitudinal de la tabla [12]. A pesar de que esta solución mejora la resistencia a las abolladuras, no es completamente óptima, ya que el incremento en peso y en la rigidez afectan significativamente el rendimiento de la tabla, haciéndola más difícil de maniobrar en condiciones dinámicas. Por lo tanto, se requiere una solución que ofrezca una mejor resistencia al *crushing* sin comprometer el peso ni la agilidad de la tabla.

Además de las configuraciones descritas anteriormente, existen innumerables variaciones en la fabricación de tablas de surf, cada una de ellas proporcionando características específicas. Algunas de estas configuraciones incluyen tablas con núcleos de poliestireno extrudados, que son más ligeros y resistentes que las espumas convencionales; el uso del sistema “CarbonWrap” que utiliza telas de fibra de carbono que proporcionan mayor rigidez en la punta y flexibilidad en la cola; el sistema “FutureFlex”, que incorpora un refuerzo parabólico longitudinal de carbono; núcleos de "Varial Foam", que eliminan la necesidad de un alma de madera; y el uso de pieles de fibra de lino, que favorecen la sustentabilidad de la estructura. En la Figura 1.6 se observan ejemplos de ciertos tipos de tablas existentes en el mercado.



Figura 1.6. Modelos de tablas existentes en el mercado

a) Fibra de vidrio [13]; b) Fibra de carbono [14]; c) Timbertek [15]; d) FutureFlex [16]

2. Objetivos e hipótesis

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una solución tecnológica para mejorar la resistencia al *crushing* de las tablas de surf, sin que ésta altere significativamente su peso, las propiedades en flexión de las mismas ni los costos y procedimientos de fabricación. Para ello, se propone diseñar y construir paneles corrugados superficialmente que mejoren la resistencia al *crushing* de estructuras sándwich con las características de las tablas de surf. La hipótesis se fundamenta en que las estructuras corrugadas, con secciones de material compuesto en la dirección normal a la superficie, actuarán como columnas, resistiendo los esfuerzos compresivos y evitando el pandeo gracias al soporte proporcionado por el núcleo de espuma circundante. Además, al tratarse de un corrugado superficial, se prevé que no habrá un aumento significativo de peso ni rigidez de la tabla, manteniendo así su *performance*. Este proyecto busca no solo mejorar el desempeño estructural de las tablas, sino también ofrecer una alternativa viable y competitiva para la industria del surf, teniendo en cuenta las limitaciones económicas y tecnológicas presentes en el contexto local. Además, se espera que las innovaciones propuestas contribuyan a extender la vida útil de las tablas y a reducir el impacto ambiental asociado con su producción y descarte.

Con el fin de alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Comprender los mecanismos de *crushing* en las tablas de surf tradicionales: Analizar cómo se generan las abolladuras y cómo los diferentes componentes de la tabla contribuyen a esta problemática.
2. Diseñar y optimizar paneles corrugados: Proponer diferentes configuraciones de paneles corrugados, explorando diversas geometrías y materiales para mejorar la resistencia al *crushing*.
3. Fabricar paneles corrugados utilizando una tecnología de fabricación escalable al proceso productivo de fabricantes locales.
4. Evaluar el desempeño de los paneles corrugados: Comparar el rendimiento de los paneles corrugados con las construcciones tradicionales en términos de resistencia al *crushing*, flexibilidad y peso.
5. Analizar la viabilidad económica y de producción: Estudiar los costos de fabricación y la factibilidad de implementar los paneles corrugados en un entorno de producción a escala industrial, considerando la accesibilidad de materiales y la eficiencia del proceso.

3. Marco teórico

3.1. Paneles sándwich

Comúnmente, los paneles sándwich consisten en dos láminas delgadas y rígidas, conocidas como pieles o *face sheets*, que encapsulan un núcleo liviano (Figura 3.1). Este núcleo, generalmente fabricado con materiales como espumas o estructuras tipo panal de abeja o *honeycomb*, es crucial para mantener la separación entre las láminas, asegurando así la rigidez necesaria y la integridad estructural del conjunto [17,18].

La versatilidad de los paneles sándwich se debe a su capacidad para adaptarse a una amplia gama de requisitos específicos en diversas industrias, gracias a la posibilidad de modificar tanto el material del núcleo como el de las capas externas. Esta flexibilidad en el diseño permite ajustar las estructuras sándwich a diferentes necesidades según la aplicación, desde enfrentar condiciones extremas en el sector aeroespacial hasta optimizar el rendimiento en aplicaciones que priorizan la reducción de peso, como la fabricación de tablas de surf (Figura 3.2) [18].

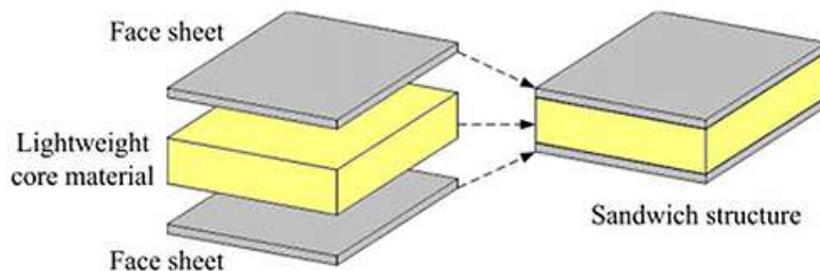


Figura 3.1. Estructura típica de un panel sándwich [19]

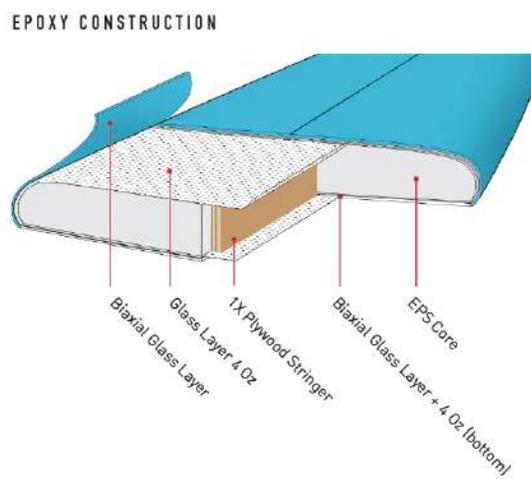


Figura 3.2. Estructura interna típica de una tabla de surf tradicional [20]

Entre las características comunes de las diversas configuraciones que existen de paneles sándwich se destacan sus excelentes propiedades mecánicas específicas, aislamiento térmico, amortiguación acústica, facilidad de mecanizado, resistencia a la corrosión y estabilidad, lo que les otorga ventajas sobre, por ejemplo, materiales metálicos tradicionales. Sin embargo, los compuestos plásticos reforzados con fibras, que a menudo se utilizan en estas estructuras como pieles, presentan algunas desventajas, como bajas propiedades mecánicas en la dirección transversal (a través del espesor) y una susceptibilidad a fallar bajo cargas de impacto [21]. Aunque estos aspectos mecánicos resultan ser fundamentales, serán analizados en detalle en una sección posterior.

3.1.1. Pielés

Como se mencionó anteriormente, los materiales compuestos son muy utilizados como pieles en los paneles sándwich. Un material compuesto es una combinación de dos o más fases distintas que, al unirse, ofrecen propiedades superiores a las de sus componentes individuales. En esencia, un material compuesto es un sistema multifásico en el que cada fase contribuye de manera significativa a las propiedades globales del material. Esto permite que los compuestos sean diseñados para cumplir con requisitos específicos, ajustando la selección y distribución de sus componentes, así como la estructura y la interfaz entre ellos [22].

Los materiales compuestos pueden ser personalizados para ofrecer una amplia variedad de propiedades, dependiendo de las necesidades de diversas industrias, como la aeroespacial, automotriz, electrónica, construcción, generación de energía, y biomédica, entre otras. Esta versatilidad ha hecho que los materiales compuestos se conviertan en una parte crucial de la ingeniería moderna [23].

En términos de su composición, los materiales compuestos están formados principalmente por una matriz y un refuerzo, los cuales se conectan a través de una interfaz. La interacción en esta interfaz es crítica para el rendimiento del material, y puede ser optimizada mediante la adición de agentes de acoplamiento, rellenos, y revestimientos que mejoran la adhesión entre la matriz y el refuerzo. Estos elementos adicionales tienen como objetivo maximizar las propiedades del material compuesto, garantizando que las características deseadas sean potenciadas en lugar de comprometidas. En la Figura 3.3 se ilustran los componentes de un material compuesto [23].

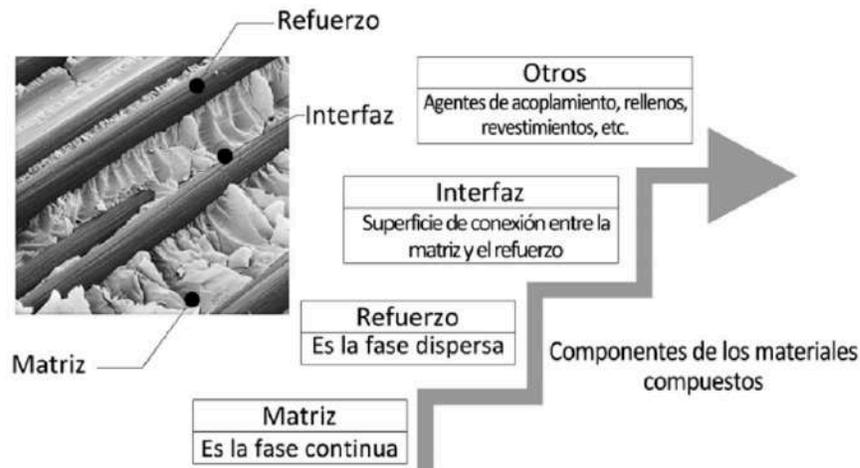


Figura 3.3. Componentes típicos de los materiales compuestos [23]

Los compuestos pueden clasificarse según la morfología del refuerzo, distinguiendo entre compuestos reforzados con fibras, compuestos laminares y particulados. Los compuestos reforzados con fibras (FRP) se dividen además en aquellos que contienen fibras discontinuas o continuas.

Los compuestos con matriz polimérica (PMCs), debido a sus características inherentes, se han convertido en los materiales compuestos de mayor crecimiento y más ampliamente utilizados [24,25].

Los compuestos con matriz polimérica reforzados con fibras continuas se destacan por su alta resistencia específica y elevado módulo específico, características esenciales para aplicaciones que requieren materiales ligeros y de alto rendimiento. Estos compuestos, particularmente aquellos reforzados con fibras de carbono, ofrecen un módulo de Young longitudinal significativamente superior, aunque sus propiedades mecánicas son altamente anisotrópicas. Esto significa que su resistencia y rigidez varían considerablemente en función de la dirección de las fibras [24]. En general, los PMCs con fibras continuas proporcionan una notable rigidez y resistencia a lo largo del eje de las fibras, pero estas propiedades disminuyen drásticamente en direcciones no alineadas con las fibras. Además, la capacidad de estos materiales para deformarse antes de fracturarse es limitada, lo que reduce su capacidad para redistribuir tensiones mediante deformación plástica local [26].

En el presente trabajo, se enfocará el estudio en los materiales compuestos de matriz polimérica, ya que son los más comúnmente utilizados en la construcción de tablas de surf. Debido a su relevancia en esta aplicación específica, se analizarán y profundizarán sus propiedades y comportamientos para entender mejor su papel en la mejora de la resistencia a las abolladuras en las tablas de surf.

3.1.1.1. Matriz

La matriz actúa como el aglutinante que mantiene las fibras en su lugar y es responsable de transferir las cargas internas dentro del material compuesto entre las múltiples fibras que conforman los elementos transmisores de carga del material [27]. Los compuestos de matriz polimérica (PMC) están formados por una matriz termoplástica o termorrígida, combinada con uno o más refuerzos, como fibras de carbono, vidrio, acero y fibras naturales. Los polímeros son adecuados para producir componentes de alta calidad debido a su facilidad de procesamiento y su bajo peso, una característica clave en muchas aplicaciones. Los PMCs ofrecen una amplia gama de propiedades, incluyendo alta resistencia, excelente comportamiento ante compresión y fatiga, además de procesos de producción y fabricación de herramientas rentables. También destacan por su sobresaliente resistencia química y a la corrosión, su bajo costo y buenas características mecánicas [28]. En la fabricación de tablas de surf se utilizan resinas termorrígidas (generalmente epoxi o poliéster) debido a que se debe impregnar manualmente el tejido de refuerzo sobre los núcleos de espuma, proceso que requiere que la matriz posea muy baja viscosidad a temperatura ambiente y por lo tanto descarta la posibilidad de utilizar termoplásticos.

Las resinas epoxi se suelen preparar a partir de compuestos (o polímeros) que contienen dos o más grupos epoxi (Figura 3.4), los cuales se han hecho reaccionar con aminas (alifáticas o aromáticas), anhídridos u otros grupos capaces de abrir el anillo epoxi y formar productos termoestables [29]. La transformación de las resinas epoxi de un estado termoplástico a sólidos termoestables, duros y resistentes, puede llevarse a cabo mediante diversos mecanismos. Las resinas epoxi pueden homopolimerizarse catalíticamente o formar un heteropolímero al co-reaccionar a través de sus grupos funcionales epóxidos con diferentes agentes de curado [30]. Es fundamental diferenciar entre los agentes de curado catalíticos, que actúan en el proceso de reticulación según el concepto químico tradicional de catálisis, y los agentes de reticulación multifuncionales, que se incorporan químicamente en la estructura tridimensional final del material.

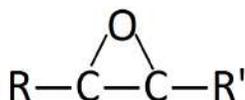


Figura 3.4. Grupo epóxido

Además, la variabilidad de agentes de curado permite la personalización de las resinas para diversas aplicaciones, mejorando su versatilidad. La presencia de segmentos alifáticos en la estructura curada reduce la rigidez y la temperatura de transición vítrea (T_g) en comparación con los anillos aromáticos. Los sistemas curados con aminas aromáticas o homopolimerizados son más rígidos y tienen una T_g más alta, mientras que los sistemas curados con aminas alifáticas presentan menor rigidez y T_g . En cuanto al procesamiento, los

segmentos alifáticos aportan baja viscosidad y favorecen el curado a temperatura ambiente. Por otro lado, los sistemas con aminas aromáticas requieren temperaturas más altas para su curado [27].

Como propiedades generales de estas resinas se puede destacar que ofrecen excelente resistencia a productos químicos, alta estabilidad térmica, y buena resistencia eléctrica, haciéndolas ideales para aplicaciones en electrónica, recubrimientos protectores, y materiales compuestos [31]. Además, las resinas epoxi exhiben una baja contracción durante el proceso de curado, así como un tiempo de curado más prolongado en comparación con otras resinas, como las poliéster. Estas propiedades hacen que las resinas epoxi sean particularmente adecuadas para su uso en la fabricación de tablas de surf, donde se requiere un equilibrio entre durabilidad, resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

Por otro lado, las resinas poliéster insaturadas son ampliamente utilizadas como matrices en plásticos reforzados con fibra debido a su bajo costo, facilidad de procesamiento y excelentes propiedades de humectación con los refuerzos. Estas resinas, que son soluciones de poliéster insaturado con un diluyente co-reactivo como el estireno, ofrecen una buena combinación de propiedades mecánicas y químicas, incluyendo alta rigidez, resistencia al calor y a los solventes, y una elevada temperatura de transición vítrea (T_g) [32,33]. El proceso de reticulación, iniciado con la ayuda de un catalizador y un acelerador, permite que el estireno forme cadenas de poliestireno que entrecruzan las cadenas de poliéster en los sitios de insaturación, creando una estructura molecular tridimensional altamente entrecruzada. Sin embargo, estas resinas también presentan desventajas, como su fragilidad y baja resistencia a la propagación de grietas. Además, las resinas poliéster insaturadas tienen tiempos de curado más cortos en comparación con las resinas epoxi y una mayor contracción durante el curado, típicamente entre el 5% y el 12%, lo que puede generar tensiones internas y afectar la precisión dimensional del producto final [34,35]. Asimismo, las resinas de poliéster, en el contexto de la fabricación de tablas de surf, son compatibles únicamente con núcleos de poliuretano debido a su capacidad de disolver el poliestireno expandido. Por otro lado, las resinas epoxi ofrecen una mayor versatilidad, permitiendo su uso con cualquier tipo de núcleo, ya sea poliuretano o poliestireno expandido.

Desde el punto de vista económico, las resinas de poliéster presentan una ventaja significativa en términos de costo en comparación con las resinas epoxi. Actualmente, el precio de las resinas de poliéster oscila entre diez mil y quince mil pesos por kilogramo, mientras que el precio de las resinas epoxi se encuentra en un rango considerablemente más alto, entre cincuenta mil y ochenta mil pesos por kilogramo [36,37].

En la Tabla 3.1 se observa una comparación entre ciertas propiedades genéricas de una resina epoxi y una poliéster insaturada.

Tabla 3.1. Propiedades de las resinas epoxi y poliéster insaturada [30,33,38-40]

Propiedad	Epoxi	Poliéster insaturada
Densidad (g/cm ³)	1,1 - 1,4	1,2 - 1,5
Contracción en el curado (%)	1 - 5	5 - 12
Módulo de Young (GPa)	2 - 4	0,7 - 1,3
Tensión de falla en tracción (MPa)	50 - 200	40 - 90
Elongación a la rotura (%)	3 - 6	0,5 - 5
Conductividad térmica (W/m.K)	0,2 - 0,4	0,3 - 0,7
Absorción de agua en 24 h a 25°C(%)	0,08 - 0,15	0,1 - 0,3

3.1.1.2. Refuerzo

En los materiales compuestos, los refuerzos desempeñan un papel crucial al proporcionar las propiedades mecánicas que los hacen superiores a los materiales monolíticos. Los refuerzos, que pueden ser fibras, escamas o partículas, se integran en una matriz que actúa como aglutinante. Las tablas de surf se confeccionan utilizando tejidos de refuerzo fibroso generalmente bidireccionales (mechas de fibras entrelazadas a 90 grados). Las fibras son las responsables de mejorar significativamente las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la tracción y la rigidez [41]. En la fabricación de tablas de surf, los tejidos basados en fibras de vidrio y carbono se utilizan extensamente como refuerzos, proporcionando una excelente relación entre resistencia y peso, lo cual es esencial para el desempeño y durabilidad de las tablas. En la Tabla 3.2 se pueden observar las principales características de estos dos tipos de refuerzos. Además, en la Figura 3.5 se presentan los distintos tipos de tejidos bidireccionales que pueden ser utilizados como capas de refuerzo de las tablas de surf.

Tabla 3.2. Propiedades generales de las fibras de vidrio y carbono [40,42-44]

Propiedad	Fibra de vidrio	Fibra de carbono
Materia prima	SiO ₂	Carbono
Densidad (g/cm ³)	2,4 - 2,6	1,7 - 2
Diámetro típico (μm)	10	7
Resistencia en tracción (MPa)	3100 - 5000	7000
Módulo de Young (GPa)	72 - 95	300
Elongación a rotura (%)	2 - 3	1,4 - 1,8
Coef. de Poisson	0,2	0,2
Coef. expansión térmica lineal (x10 ⁻⁶ /K)	5 - 30	< 0,1
Conductividad térmica (W/m.K)	0,2 - 0,3	5 - 185
Máxima temperatura de uso (°C)	200 - 600	800 - 2000

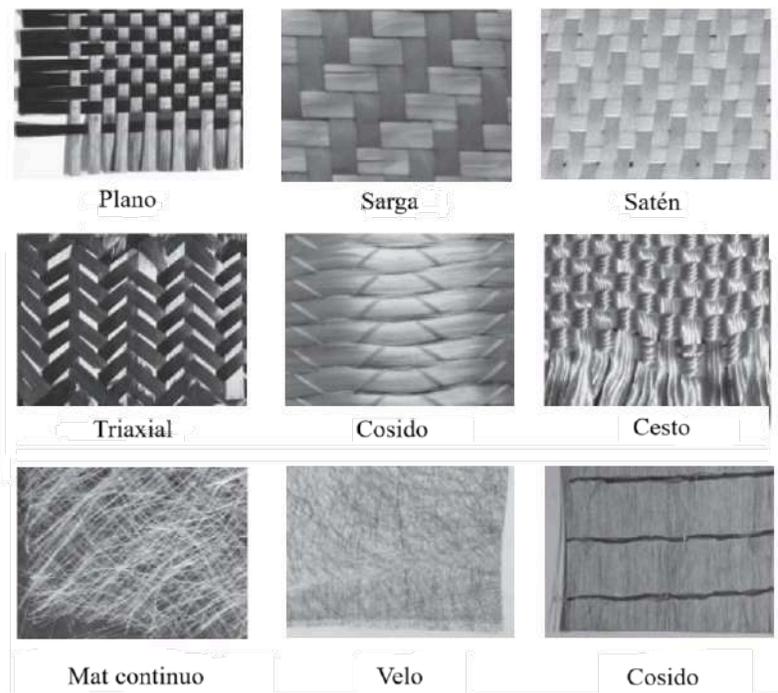


Figura 3.5. Tipos de tejidos bidimensionales [45]

3.1.2. Núcleos

Mientras que las capas externas deben soportar tanto los esfuerzos en el plano como los de flexión (cargas principales) en las estructuras sándwich, el núcleo es el principal encargado de soportar los esfuerzos de compresión e impacto aplicados sobre los paneles. Además, el núcleo debe asegurar una adecuada transferencia de carga entre las pieles a través de los adhesivos estructurales utilizados [46]. Los núcleos de espuma, materiales sólidos y estructuras tipo panal son opciones relativamente económicas que pueden estar formadas por madera balsa, madera contrachapada, y una amplia selección de espumas termoplásticas y termoestables con celdas abiertas o cerradas (Figura 3.6). Estos materiales presentan una gran diversidad en términos de densidad, módulos de corte, y comportamientos que varían desde rígidos hasta flexibles o gomosos [47].

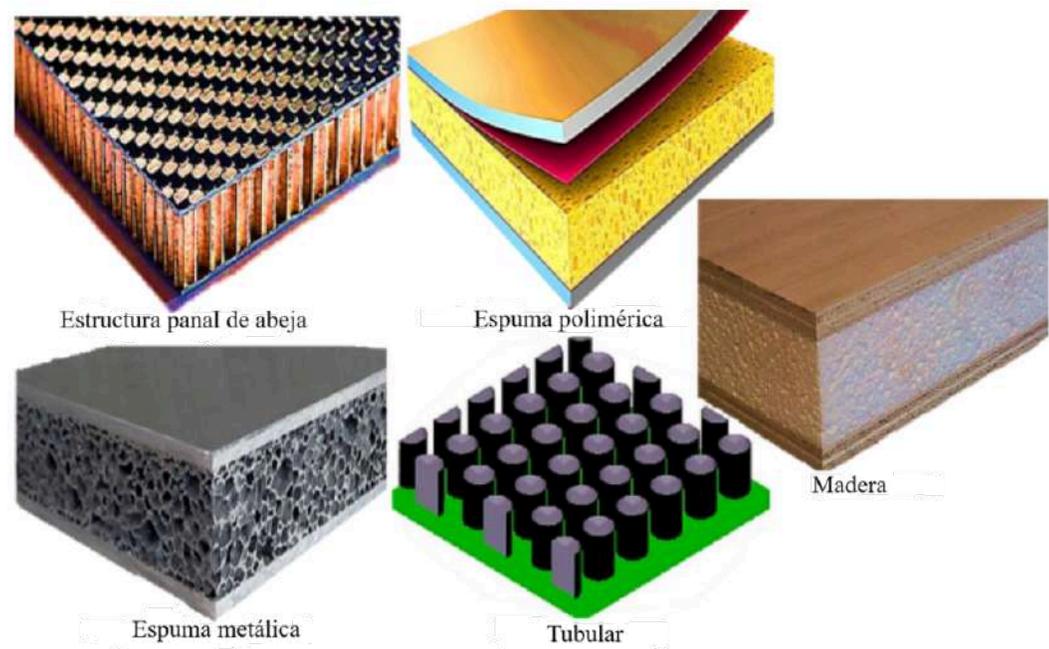


Figura 3.6. Materiales más comunes utilizados como núcleo de paneles sándwich [48]

La naturaleza del núcleo es crucial para determinar la resistencia a la compresión de la estructura sándwich. El material del mismo debe ser capaz de soportar las fuerzas aplicadas en la dirección normal a las capas externas. Por lo tanto, es fundamental que los materiales del núcleo sean fuertes y rígidos en esa dirección, propiedad que muchas veces es difícil de alcanzar en núcleos de muy bajo peso. Otra característica de gran importancia en algunas aplicaciones es la resistencia al daño por impacto o la tenacidad al impacto. En este caso, la alta rigidez del material del núcleo a menudo resulta ser una desventaja, ya que la misma suele estar asociada con una alta fragilidad. Como resultado, cuando los paneles sándwich conformados con núcleos altamente frágiles sufren un impacto, los materiales del componente central pueden romperse. Los materiales de núcleo que mejor resisten el daño

por impacto son aquellos con una resiliencia ligeramente mayor, propiedad que generalmente se asocia con materiales termoplásticos como el polipropileno, el policloruro de vinilo no reticulado (PVC) o el copolímero estireno-acrilonitrilo (SAN), así como con núcleos metálicos tipo panal [48].

En el caso de las tablas de surf, las espumas poliméricas se utilizan como material de núcleo debido a su facilidad de ser conformadas con la geometría requerida y a su capacidad para ofrecer un equilibrio óptimo entre peso, resistencia y flexibilidad, aspectos esenciales para el rendimiento en este tipo de aplicaciones. Estas estructuras sándwich con núcleos de espuma polimérica presentan propiedades beneficiosas, como la absorción de ondas de choque, impacto a baja velocidad, mitigación de explosiones y resistencia a colisiones, lo que las hace adecuadas para diversas aplicaciones [48]. Entre los polímeros utilizados para desarrollar núcleos en estructuras sándwich se encuentran el poliuretano y el poliestireno, así como el policloruro de vinilo y el estireno acrilonitrilo, siendo los primeros los más relevantes para la producción de tablas de surf. La elección final del material del núcleo implica un compromiso entre el costo, el peso y otras características del núcleo, como la resistencia al impacto, la fatiga y la absorción de humedad [49].

3.1.3. Comportamiento mecánico

En el diseño de estructuras ligeras y eficientes, las configuraciones de paneles sándwich se destacan por su capacidad para combinar alta resistencia y rigidez con bajo peso. Estas estructuras se basan en principios similares a los de una viga en "I", ya que las capas externas actúan como las alas y el núcleo como el alma de la viga. Las láminas externas, generalmente, están sometidas a tensiones de tracción y compresión, siendo las principales responsables de la resistencia estructural del sándwich. La función del núcleo es proporcionar soporte a las láminas, evitando su pandeo y asegurando que se mantengan firmemente posicionadas entre sí [50].

La combinación de estas partes crea estructuras con cualidades altamente requeridas por diversas industrias. No obstante, este tipo de configuración es propensa a la formación de diversos modos de falla, incluyendo fisuración de la matriz, ruptura de fibras, delaminación en las capas y desunión en las interfaces entre el núcleo y las láminas [51]. En este trabajo, se hará especial énfasis en el análisis de la falla por *crushing*, que constituye el principal motivo de estudio debido a su impacto significativo en la integridad y durabilidad de las tablas de surf.

3.1.3.1. *Crushing*

La falla por aplastamiento localizado es un modo de falla predominante en las construcciones sándwich cuando la carga aplicada se distribuye sobre un área pequeña. En estas circunstancias, se produce una deformación significativa de la capa superficial, que se transfiere hacia el núcleo de la estructura, encargado de absorber este tipo de solicitaciones. Esto genera altas concentraciones de tensiones locales y da lugar a un estado tensional elástico-plástico multiaxial en las proximidades de las cargas localizadas [52]. En otras palabras, el núcleo de espuma es propenso a dañarse cuando se somete a cargas localizadas. Los daños locales también pueden originarse como resultado de colisiones con diversos objetos extraños (piedras, aves, etc.), manipulación descuidada (herramientas, caídas) o la interacción con estructuras adyacentes (curvaturas, pilares, etc.). En el caso de tablas de surf, este tipo de daño ocurre normalmente por las reiteradas pisadas del deportista al practicar la actividad y por impactos involuntarios con rodillas, codos y manos. La falla generalmente resulta en el *crushing* del núcleo (es decir, el desarrollo de un campo de deformación plástica local en el material de espuma) y la formación de un hueco residual (Figura 3.7). La presencia de esa imperfección geométrica provoca una reducción significativa de la resistencia estructural y la capacidad de carga. Esto incluso podría ser la causa de una falla prematura de toda la estructura [53].

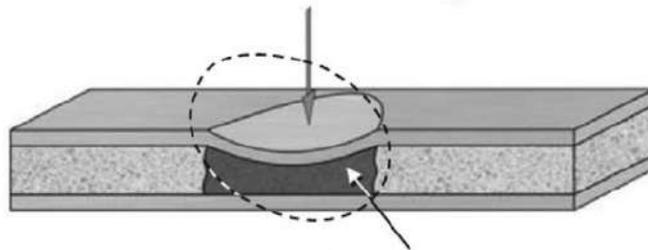


Figura 3.7. Falla por *crushing* en una estructura de panel sándwich [54]

El comportamiento de los paneles frente al impacto depende de muchos factores, la cantidad de capas de refuerzo, la densidad y espesor del núcleo y la geometría del indentador (objeto que impacta) son algunos de los más importantes.

La cantidad de láminas de refuerzo en las capas externas es un factor fundamental. S. Abrate realizó pruebas de compresión después del impacto que indicaron que los paneles contruidos con una mayor cantidad de pieles resultaron en niveles más altos de tensión de falla, aunque las áreas de delaminación fueron mayores [55]. Por lo tanto, una mayor cantidad de capas puede distribuir mejor la carga y reducir la deformación localizada.

Al evaluar las propiedades de los paneles sándwich, la densidad y el espesor del núcleo son factores críticos que influyen en la absorción de energía y la resistencia al impacto. En particular, para un mismo valor de indentación, la resistencia del panel aumenta con la

densidad del núcleo, lo que se explica por el hecho de que la rigidez de la estructura también incrementa al aumentar la densidad de la espuma. Esto mejora la distribución de las tensiones bajo carga y reduce la carga localizada. Además, el desplazamiento de indentación, es decir, la cantidad de deformación antes de que ocurra la falla, disminuye a medida que aumenta la densidad de la espuma. Este fenómeno se debe a que la mayor rigidez permite menos deformación y flexión de las láminas, lo que genera concentraciones de tensión localizadas y, en última instancia, puede provocar la falla de la cara [56,57]. Por otro lado, un mayor espesor del núcleo también contribuye a una mayor absorción de energía, lo que refuerza aún más la resistencia de los paneles sándwich ante impactos [56].

Por último, es importante destacar que la geometría del indentador también tiene una influencia notable sobre la resistencia de los paneles al *crushing*. Por ejemplo, S. Abrate demostró que frente a ensayos de indentación cuasiestática, los indentadores cónicos causan una perforación inicial de la cara sin un aplastamiento considerable del núcleo, seguido de una penetración total o parcial del panel a través de la cara. Los indentadores planos, por otro lado, producen la mayor resistencia a la penetración debido a que provocan una mayor flexión de la lámina superior. Los indentadores hemisféricos provocan una falla repentina de la cara tras cierta indentación. Las áreas dañadas más grandes se observan con los indentadores planos, mientras que las más pequeñas ocurren con los cónicos. Además, el diámetro de la punta del indentador influye en la falla final de la cara, con un mayor diámetro reduciendo la deformación local y permitiendo más penetración sin falla, aunque aumentando el área dañada proporcionalmente [57].

A pesar de que las variantes mencionadas pueden mejorar la resistencia al *crushing* en paneles sándwich, estas no son aplicables en las tablas de surf. El uso de espumas de mayor densidad, así como un mayor número de capas de refuerzo, no son soluciones viables debido al significativo aumento de peso que conllevarían. A la vez, el espesor del núcleo está definido por la geometría o *shape* de la tabla y no puede ser modificado. Este incremento en peso restringe el uso adecuado de las tablas de surf, afectando negativamente su desempeño y manejabilidad.

3.2. Paneles corrugados

Bajo la premisa de aumentar la resistencia al *crushing* sin modificar significativamente el peso y el costo de las tablas, surgió la idea de utilizar paneles corrugados. Esta geometría permite crear celdas o cavidades que contribuyen a mejorar la resistencia a la compresión y al impacto de las estructuras (Figura 3.7). La ventaja de un núcleo corrugado es que proporciona una excelente resistencia estructural añadiendo poco peso. El refuerzo estructural debido al corrugado se atribuye al aumento de la resistencia en la dirección transversal al panel debido a la presencia de los elementos corrugados, que a su vez, gracias al soporte lateral proporcionado por el núcleo de espuma no pandean fácilmente [58]. Esta

configuración permitiría mejorar la durabilidad y la integridad estructural de las tablas de surf, manteniendo sus características esenciales de ligereza y manejabilidad.

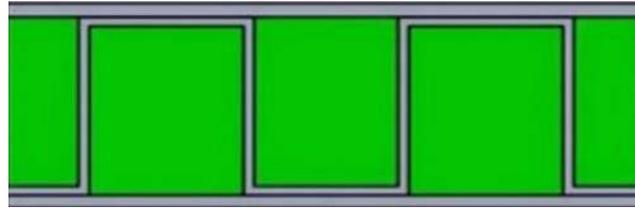


Figura 3.7. Geometría de un panel sándwich corrugado relleno de espuma [59]

La geometría del corrugado es un factor fundamental en la selección del diseño óptimo para diversas aplicaciones. Las formas más comúnmente utilizadas incluyen los corrugados rectangulares, triangulares y trapezoidales. En general, los núcleos corrugados ofrecen una mayor capacidad de absorción de energía, lo que se traduce en una mejor eficiencia en la gestión de impactos. Al comparar los diferentes corrugado entre sí se observa que el ángulo de corrugación tiene un impacto directo en la resistencia al *crushing* del núcleo, lo que resulta en una menor deflexión de los paneles. Entre las distintas geometrías, los paneles corrugados con celdas unitarias rectangulares destacan por su mejor desempeño ante impactos localizados, ya que son capaces de absorber una mayor cantidad de energía en comparación con sus contrapartes triangulares y trapezoidales [59,60]. Por estas razones, junto con su mayor facilidad de procesamiento, la geometría rectangular se ha establecido como la opción elegida en este trabajo para la fabricación de tablas de surf.

Dado que el objetivo del presente trabajo es mejorar la resistencia al *crushing*, especialmente en la superficie superior de la tabla, que es la zona más expuesta a impactos causados por los codos o rodillas del deportista, se propuso implementar el corrugado únicamente en esta área. Esta estrategia permite minimizar la cantidad de material compuesto añadido, para evitar incrementos en el peso y los costos de fabricación de la estructura. El otro motivo por el cual se implementó la estructura corrugada sólo en la zona superficial de la tabla y no en todo su espesor fue para evitar modificar la respuesta a la flexión de las tablas respecto de las construcciones tradicionales más aceptadas en el mercado.

4. Metodología experimental

4.1. Materiales y equipos

En esta sección se detallarán los materiales y equipos utilizados en la fabricación y caracterización de probetas que simulan la estructura de una tabla de surf. El objetivo es proporcionar una comprensión completa de los componentes y herramientas esenciales para este proceso experimental. Aunque no se fabricaron tablas de surf a plena escala, las probetas se diseñaron para replicar las características estructurales y funcionales de una tabla de surf, permitiendo realizar pruebas y evaluaciones precisas.

La selección adecuada de materiales y el uso correcto de los equipos son fundamentales para garantizar la calidad, durabilidad y rendimiento de estas probetas.

En la Tabla 4.1 se presentan los materiales utilizados como refuerzo de las capas externas de los paneles sándwich.

Tabla 4.1. Telas utilizadas como refuerzo

Material	Arquitectura	Densidad superficial (kg/m²)	Proveedor
Fibra de vidrio	Tejido bidireccional	0,135	Resinplast
Fibra de vidrio	Tejido bidireccional	0,203	Resinplast
Fibra de carbono	Tejido bidireccional	0,197	Náutica escalada
Fibra de carbono	Tejido unidireccional	0,33	Náutica escalada

A partir de este momento, los tejidos bidireccionales de fibra de vidrio de 0,135 kg/m² y 0,203 kg/m² serán denominados como tejidos de 4 onzas y 6 onzas, respectivamente, siguiendo la nomenclatura utilizada en la industria.

Las telas de refuerzo descritas en la Tabla 4.1 fueron impregnadas mediante la técnica de laminación manual, o *hand lay-up*, con una resina epoxi compuesta por los componentes Dipreg 86 A (resina base) y Dipreg 86 B (endurecedor), ambos de la marca Novarchem. Las características específicas de estos componentes pueden consultarse en la ficha técnica de la resina [61].

El material utilizado como núcleo de los paneles sándwich es una espuma de poliuretano con una densidad equivalente a la utilizada en *foams* para tablas de surf, 37,55 kg/m³. Estos paneles de espuma fueron cortados con dimensiones de 50 cm de largo, 25 cm de ancho y 2,5 cm de espesor. Sobre este material, se adhirieron las capas de material compuesto.

Además, es relevante mencionar que en una de las configuraciones propuestas se utilizó un enchapado de madera de guatambú, suministrado por la empresa San Francisco. Este enchapado tiene un espesor de 0,62 mm y una densidad de 588,2 kg/m³.

Por otro lado, los equipos utilizados para llevar a cabo los diversos ensayos se detallan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Equipos utilizados

Equipo	Función
Instron EMIC 23-50	Caracterización de propiedades mecánicas
Fractovis Gravity Drop	Ensayos de impacto
TA Instruments DSC Q2000	Ensayos DSC
CNC (Sistema de corte por control numérico)	Corte de los paneles corrugados
Estufa universal Memmert	Post curado de muestras
Reómetro rotacional Anton Paar MCR 301	Reología de la resina

4.2. Caracterización de la resina

Es fundamental comprender en profundidad el comportamiento reológico y cinético de la resina, ya que estos parámetros son determinantes para la optimización del proceso de fabricación y la calidad del producto final.

Antes de proceder con la caracterización de la resina, es esencial describir el proceso de preparación. En este estudio, se empleó una resina epoxi, formulada mediante la mezcla en una proporción de 80/20 de la resina base y endurecedor, respectivamente. La mezcla debe realizarse de manera controlada para evitar la incorporación de burbujas de aire, lo cual es crucial para mantener la integridad del material. Este procedimiento se ejecutó bajo estrictas condiciones de seguridad, utilizando guantes y máscara con filtro de aire, para asegurar la protección del operador y la calidad del proceso.

4.2.1. Reología

Se llevó a cabo un análisis reológico utilizando un reómetro rotacional de platos paralelos Anton Paar, equipado con un dispositivo de temperatura convectiva CTD600 MDR, a una temperatura constante de 25 °C. El objetivo fue evaluar la evolución de la viscosidad (μ) de la resina epoxi durante un ensayo de 2 horas. De esta manera, se puede establecer la ventana

de trabajo que ofrece este tipo de resina a esa temperatura y así poder minimizar la presencia de defectos. Conocer la ventana de trabajo de la resina ayuda a prevenir problemas como la gelificación prematura o la baja impregnación, que pueden resultar en defectos críticos y reducir la vida útil del producto final.

4.2.2. Cinética

El objetivo del estudio de la cinética de curado es obtener un modelo cinético el cual permita predecir el avance de reacción de la resina en función del tiempo y la temperatura. En las ecuaciones 1 a 3 se observan tres de los modelos cinéticos más conocidos [62]. Para obtener estos datos, se llevó a cabo un ensayo dinámico de calorimetría diferencial de barrido, con el equipo DSC Q2000, entre 10°C y 200°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Por otro lado, se realizaron ensayos isotérmicos a temperaturas de 85°C, 100°C y 116°C. Todas estas corridas se realizaron bajo una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 ml/min.

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

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot (1 - \alpha)^n \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

Donde:

α = grado de conversión de la resina;

$\frac{d\alpha}{dt}$ = velocidad de avance de la reacción;

m, n = parámetros que definen el orden de reacción;

k_i = valor que tiene una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura

$$k_i = k_{i0} \cdot \exp\left(\frac{-E_i}{R.T}\right) \quad (4)$$

Donde:

k_{i0} = factor pre-exponencial;

E_i = energía de activación, J/mol;

R = constante de los gases ideales, J/K.mol.

En la Figura 4.1 se presentan las curvas representativas de cada modelo. A partir de los datos obtenidos experimentalmente, es posible identificar el modelo que mejor se adapta a la resina utilizada, permitiendo así determinar los parámetros k, m y n para establecer la cinética de curado de la resina.

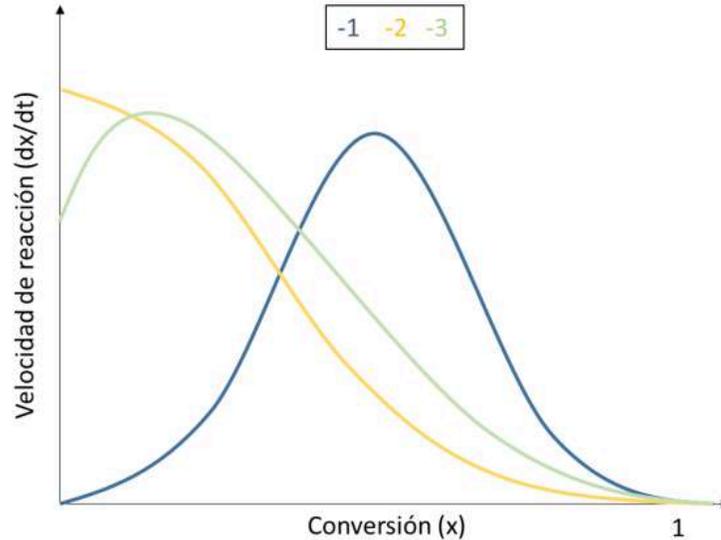


Figura 4.1. Curvas representativas de los modelos cinéticos [63]

Para poder obtener esas curvas experimentalmente, se utilizaron los datos obtenidos de los ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) tanto dinámicos como isotérmicos. En los ensayos dinámicos, se registra el flujo de calor asociado a las reacciones de curado (H_R). La curva (Figura 4.2.a) muestra un pico exotérmico, cuya integración permite calcular el calor de reacción asociado al entrecruzamiento.

Los ensayos isotérmicos, por otro lado, mantienen la muestra a diferentes temperaturas constantes, registrando el flujo de calor a lo largo del tiempo. Mediante la integración de esas curvas (Figura 4.2.b), se obtiene el calor de reacción a un tiempo determinado (H) a esa temperatura. Luego, se puede calcular el porcentaje de conversión α en ese tiempo a esa temperatura mediante la ecuación 5 [64].

$$\alpha = \frac{H}{H_R} \quad (5)$$

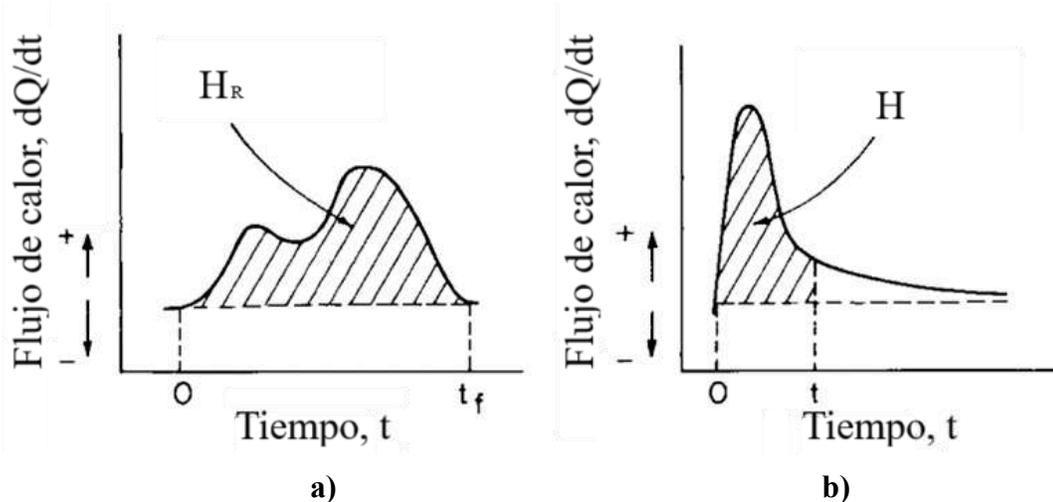


Figura 4.2. Curvas ilustrativas del calor generado vs tiempo de ensayos DSC:
a) dinámico y b) isotérmico [64]

4.3. Métodos de fabricación

4.3.1. Estructuras laminadas

La fabricación de las estructuras laminadas de los paneles sándwich se realizó mediante el proceso de laminación manual o *hand lay-up*. Este método de procesamiento consiste en el impregnado manual de resinas termoestables en refuerzos de fibras poliméricas sobre un molde abierto, utilizando herramientas manuales como los rodillos. El uso a gran escala del proceso de *hand lay-up* se atribuye a la simplicidad del método. No se requiere equipo costoso, y solo se necesitan herramientas simples y económicas. Prácticamente no hay restricciones en el tamaño del producto, permitiendo moldear todas las formas e incorporar insertos de cualquier configuración. Sin embargo, presenta algunas limitaciones: es un proceso en el que la calidad del producto depende en gran medida de la habilidad del operario y, al no disponer de un contramolde que comprima los refuerzos, la fracción fibra/resina es baja, en comparación con otros procesos de fabricación. Por este mismo motivo, el proceso no es adecuado si se requiere un buen acabado superficial en ambos lados del producto y, además, el control de espesor no es preciso y es difícil obtener una relación uniforme entre fibra y resina [65].

En todas las configuraciones, tanto en estas como en las corrugadas, se incorporó una capa de fibra de vidrio de 4 onzas en la superficie inferior, utilizando resina epoxi como matriz del material compuesto, simulando la construcción típica de la parte inferior (*bottom*) de las tablas de surf. Es importante destacar que cada panel tiene unas dimensiones de 50 cm de largo por 25 cm de ancho.

En las caras superiores de los paneles, se aplicaron diversas configuraciones de laminación, las cuales se detallan en la Tabla 4.3, replicando las construcciones más utilizadas en la industria de tablas de surf

Tabla 4.3. Configuraciones y nomenclatura de las estructuras laminadas

Configuración	Nomenclatura
Dos capas de fibra de vidrio de 4 onzas	STD
Tres capas de fibra de vidrio de 4 onzas	STD+
Dos capas de fibra de carbono bidireccional	CRB
Dos capas de fibra de vidrio de 6 onzas	STR
Una capa de fibra de vidrio de 4 onzas y una capa de fibra de carbono unidireccional (dirección transversal al panel)	HYB
Dos capas de fibra de vidrio de 4 onzas con una lámina de guatambú intercalada entre ellas	TIM

Tras el proceso de laminación, todas las estructuras fueron curadas a temperatura ambiente durante un mínimo de 24 horas. La configuración que incluía una lámina de madera fue curada en vacío, con el objetivo de maximizar la adherencia entre capas. Finalmente, todos los paneles fueron postcurados en estufa a 60 °C durante 24 horas. Esta temperatura fue seleccionada basándose en experiencias previas que demostraron que 60 °C es la máxima temperatura que las tablas pueden soportar sin sufrir daños por el calor, tales como la delaminación de las capas externas y el hundimiento del núcleo de poliuretano. Adicionalmente, la ficha técnica de la resina utilizada especifica que el postcurado a esta temperatura es necesario para alcanzar grados de conversión que optimicen las propiedades del material.

4.3.2. Estructuras corrugadas

Para las estructuras corrugadas, se realizaron cortes en la cara superior de los núcleos utilizando un sistema de corte por control numérico CNC, con el objetivo de obtener la geometría ranurada. Se evaluaron múltiples dimensiones para las ranuras del corrugado, considerando la factibilidad de su procesamiento. La Figura 4.3 muestra las dimensiones que definen la geometría corrugada, 'a', 'b' y 'c', las cuales pueden ser modificadas. En consecuencia, se seleccionó y fabricó la configuración que optimizaba la reducción de peso en la estructura final, una propiedad directamente proporcional a la longitud de la piel utilizada, como se presenta en la Tabla 4.4.

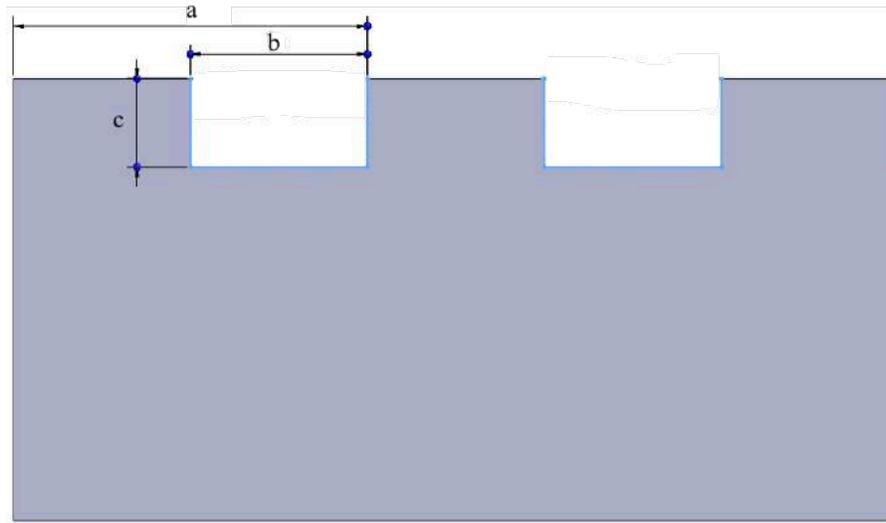


Figura 4.3. Dibujo representativo del panel corrugado

Tabla 4.4. Posibles configuraciones de los paneles corrugados

	a (mm)	b (mm)	c (mm)	$cm_{\text{compuesto}} / m_{\text{espuma}}$
Opción 1	20	10	5	149,5
Opción 2	20	10	10	199
Opción 3	10	5	5	199,5
Opción 4	10	5	10	299

La opción 1 fue seleccionada porque presenta la menor relación $cm_{\text{compuesto}} / m_{\text{espuma}}$ (centímetros de piel de compuesto por cada metro de núcleo de espuma) con un valor de 149,5. Esto significa que se utiliza menos material compuesto, lo que resulta en una estructura más ligera sin comprometer la integridad del panel corrugado. A su vez, se fabricaron dos tipos de paneles: uno con ranurado longitudinal (COR-L) y otro con ranurado transversal (COR-T), los cuales se presentan en la Figura 4.4. Esta modificación permitió analizar la eficiencia de cada configuración en las propiedades en flexión y en la facilidad de procesamiento para lograr la transferencia de la geometría a una tabla de surf.

Adicionalmente, se empleó el equipo CNC para cortar vigas de espuma de PU, que se utilizaron como relleno en los espacios vacíos generados por el ranurado. Posteriormente, se impregnó con resina epoxi una tela de fibra de vidrio de 4 onzas, la cual fue colocada cuidadosamente en la cara superior del panel, replicando la geometría del corrugado de la manera más eficiente posible, utilizando las vigas de espuma de PU para empujar e insertar el

tejido impregnado en resina dentro de las ranuras (Figura 4.5). Una vez colocadas todas las vigas en las ranuras, el panel fue introducido en una prensa de vacío de membranas elastoméricas (Figura 4.6), en donde se llevó a cabo el curado asistido por vacío durante 24 horas a temperatura ambiente.



Figura 4.4. Paneles con corrugado longitudinal y transversal.



Figura 4.5. Colocación de las vigas de PU



Figura 4.6. Curado asistido por vacío

Tras el proceso de curado, se procedió a repasar la superficie con una mezcla de aerosil™ (sílice pirogénica, un material ultrafino compuesto principalmente de dióxido de silicio utilizado para modificar la reología de la resina, generando tixotropía) y resina epoxi, con el objetivo de corregir irregularidades inherentes al proceso y lograr una superficie lisa. Cabe destacar que este procedimiento es común en la industria manufacturera de tablas de surf para realizar reparaciones y corregir imperfecciones durante el proceso de fabricación de tablas. Esta mezcla se dejó curar a temperatura ambiente durante 24 horas y se lijó para obtener una superficie plana y lisa. Posteriormente, se laminó una capa adicional de compuesto de fibra de vidrio de 4 onzas sobre la superficie corrugada. Las Figuras 4.7 y 4.8

muestran el estado de los paneles en dos etapas del proceso: antes del acabado con aerosil y después de la aplicación de la capa adicional de laminado, respectivamente.

Una vez finalizado el curado de esta capa adicional, que también tuvo una duración de 24 horas, los paneles fueron llevados a la estufa para someterse al mismo tratamiento de postcurado que se aplicó a las configuraciones anteriores.



Figura 4.7. Panel post curado asistido por vacío



Figura 4.8. Panel finalizado

4.4. Caracterización en tracción en pieles

Con el objetivo de caracterizar el material destinado a las pieles de los paneles laminados, se fabricaron placas mediante el método de laminación manual. Posteriormente, se cortaron probetas de estas placas con dimensiones de 25 mm de largo y 5 mm de ancho. Los espesores de las placas varían debido a los diferentes tejidos de refuerzo utilizados. En la Tabla 4.5 se especifican las placas procesadas y sus espesores correspondientes para cada tipo de material utilizado.

Se llevaron a cabo ensayos de tracción uniaxial siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D3039 [66] en dos probetas de cada configuración para caracterizar sus propiedades mecánicas, utilizando una máquina universal Instron EMIC 23-50 equipada con una celda de carga de 30 kN. La configuración del ensayo incluyó el uso de un extensómetro de $L_0=20$ mm para medir con precisión la deformación en las probetas de modo de calcular el módulo de Young de las mismas. Además, se estableció una velocidad de desplazamiento de 2 mm/min, a una temperatura ambiente de 21°C. La separación inicial entre mordazas fue de 170 mm. La Figura 4.9 ilustra un ejemplo representativo de la disposición del ensayo.

Estos ensayos permitieron obtener parámetros fundamentales como el módulo de Young, la tensión de rotura (σ_r), y la deformación a rotura (ϵ_r). El módulo de Young se determina a

partir de la pendiente de la curva obtenida con los datos del extensómetro durante la fase elástica del ensayo. Los otros dos parámetros, σ_r y ϵ_r corresponden a los valores máximos de tensión y elongación alcanzados por cada curva durante los ensayos de tracción. Además, mediante el uso de la Ecuación 6, se estimó la fracción volumétrica de fibra Φ_f de cada placa [67].

$$\Phi_f = \frac{n \cdot \rho_s}{t \cdot \rho_v} \quad (6)$$

Donde:

n = número de capas

ρ_s = densidad superficial del tejido de fibra, g/cm²;

t = espesor de la placa, cm;

ρ_v = densidad volumétrica del tejido de fibra, g/cm³.

Tabla 4.5. Placas procesadas para ensayos de tracción.

Material	n	Nombre	t (mm)	Φ_f
Fibra de vidrio de 4 onzas	2	F.V 2C 4oz	0,2850 ± 0,0053	0,3790 ± 0,0071
	4	F.V 4C 4oz	0,483 ± 0,023	0,434 ± 0,024
Fibra de carbono bidireccional	2	F.C 2C	0,524 ± 0,024	0,392 ± 0,019
	4	F.C 4C	0,896 ± 0,025	0,451 ± 0,013
Fibra de vidrio 6 onzas	2	F.V 2C 6oz	0,348 ± 0,016	0,449 ± 0,021

Evidentemente, la fracción volumétrica de fibras aumenta con el número de capas. Este comportamiento se debe a que en el proceso de fabricación mediante *hand lay-up*, al colocar una capa por encima de la otra y laminar manualmente, la resina sobrante de la capa inferior puede usarse para impregnar la capa superior. Esto sucede porque la resina aplicada en la capa inferior tiende a migrar hacia la capa superior por la presión aplicada por el laminador durante el proceso de impregnación, aprovechándose más eficientemente para la impregnación de las fibras en las capas subsecuentes. Como resultado, se reduce la cantidad de resina adicional necesaria para cada capa nueva, lo que incrementa la proporción de fibras respecto al volumen total del laminado. Además, el espesor no aumenta con el número de capas de manera proporcional debido a la interpenetración que ocurre entre ellos (mechas de una capa de tejido ocupan los huecos de la capa adyacente), provocando que la fracción volumétrica de fibras aumente al aumentar el número de capas.



Figura 4.9. Configuración del ensayo de tracción uniaxial

4.5. Ensayos de los paneles

4.5.1. Flexión

Los ensayos de flexión en tres puntos se realizaron sobre tres probetas de cada configuración de 25 cm de largo y 7 cm de ancho, obtenidas a partir de paneles previamente procesados. Las pruebas se llevaron a cabo en la máquina Instron, equipada con una celda de carga de 30 kN, bajo condiciones controladas: velocidad de ensayo de 1 mm/min, separación entre apoyos (SPAN) de 20 cm y una temperatura constante de 21°C. En la Figura 4.10 se puede observar un modelo de ejemplo de la configuración del ensayo. A partir de los datos de las curvas obtenidas, determinaron parámetros relevantes en el estudio como la carga de falla (P_f) y la deflexión máxima de la viga (Δ). Además, a excepción de los paneles corrugados y de la configuración TIM, fue posible calcular propiedades tales como: tensión de falla de la piel superior (σ_f), rigidez en flexión (D), tensión de corte de falla del núcleo (τ_f), módulo de corte del núcleo (G) y rigidez al corte (U). Estos cálculos se realizaron siguiendo las directrices establecidas en la norma ASTM C393-00 [68] y se presentan en las Ecuaciones 7 a 11, respectivamente.

$$\sigma_f = \frac{P_f * L}{2 * t_1 * (d+c) * b} \quad (7)$$

$$D = \frac{E_1 * t_1 * E_2 * t_2 * (d+c)^2 * b}{4 * (E_1 * t_1 + E_2 * t_2)} \quad (8)$$

$$\tau_f = \frac{P_f}{(d+c)*b} \quad (9)$$

$$U = \frac{P_f * L}{4 * (\Delta - \frac{P_f * L^3}{48 * D})} \quad (10)$$

$$G = \frac{4 * U * c}{(d+c)^2 * b} \quad (11)$$

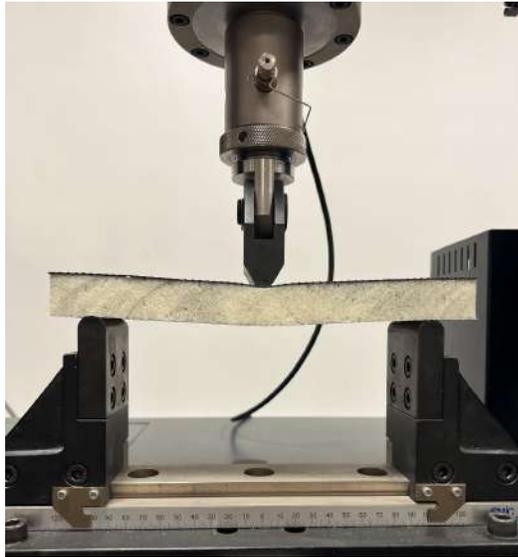


Figura 4.10. Ensayo de flexión en 3 puntos

Donde:

E_1, E_2 = módulos de Young de las capas superiores e inferiores, respectivamente, MPa;

t_1, t_2 = espesores de las capas superiores e inferiores, respectivamente, mm;

L = longitud del SPAN, mm;

d = espesor del panel, mm;

c = espesor del núcleo, mm;

b = ancho del panel, mm.

4.5.2. Indentación cuasi-estática

Los ensayos de indentación cuasi-estática se realizaron sobre tres probetas de cada configuración de 9 cm de largo por 9 cm de ancho, obtenidas de los paneles procesados previamente. La configuración experimental incluyó el uso del equipo Instron, equipado con una celda de carga de 30 kN, un indentedor hemisférico de acero de 13,2 mm de diámetro (Figura 4.11) y una velocidad de ensayo de 0,5 mm/min, manteniendo una temperatura

constante de 21°C. Durante el ensayo, se utilizó un respaldo rígido para las probetas, con el fin de disminuir deformaciones en la base. Estos ensayos fueron realizados siguiendo algunas recomendaciones de la norma ASTM D6264/D6264M [69]. En la Figura 4.12 se muestra un ejemplo de la configuración utilizada durante la prueba.

Se realizaron dos tipos de ensayos: en el ensayo de indentación a rotura las probetas se llevaron hasta la falla, lo que permitió evaluar la resistencia máxima (P_f) y la penetración hasta rotura (d_f) de cada estructura. Por otro lado, en el segundo tipo de ensayo el indentador fue llevado hasta una profundidad de 2,5 mm y luego regresó a su posición inicial en cada ciclo, registrando los datos tanto a la ida como a la vuelta para poder evaluar la recuperación elástica (δ) de cada configuración bajo este tipo de sollicitación.

En el caso de los paneles corrugados, se modificó la posición de penetración en cada probeta para estudiar el comportamiento en las tres zonas distintas que presentan estas construcciones. Como se observa en la Figura 4.13, estas tres zonas son: sobre los tabiques (A), sobre una capa de material compuesto (B) y sobre dos capas de material compuesto (C). Los resultados obtenidos de estos ensayos se promediaron para generar un valor representativo por construcción, permitiendo así comparar estos valores con los impactos típicos de codos o rodillas que sufren las tablas de surf.



Figura 4.11. Indentador de acero



Figura 4.12. Ensayo de indentación cuasi-estática

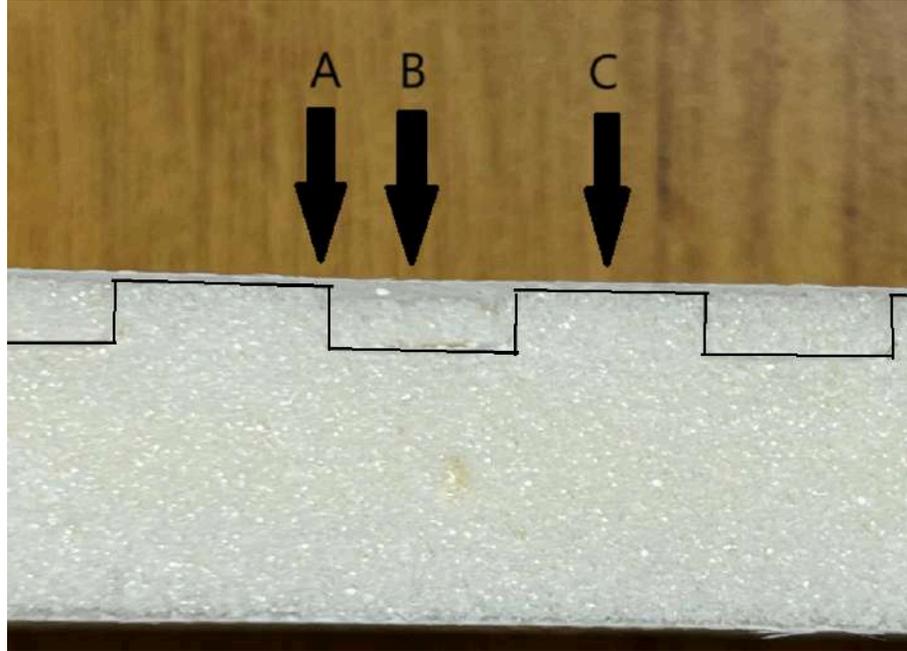


Figura 4.13. Posiciones de indentación en probetas corrugadas

4.5.3. Indentación por impacto

Los ensayos de indentación por impacto se realizaron en cuatro probetas de cada configuración de 9 cm de largo y 9 cm de ancho, obtenidas de los paneles procesados previamente, empleando el equipo Fractovis Gravity Drop y un indentador hemiesférico de 15 mm de diámetro. La configuración experimental incluyó una masa de 5,75 kg que, al liberarse desde una altura de 0,06 m, generó una velocidad de impacto de 1,09 m/s y una energía de impacto de 3,4 J. Los ensayos fueron realizados siguiendo ciertas recomendaciones de la norma ASTM D7136/D7136M [70]. Además, se utilizó un soporte con un agujero de 70 mm de diámetro para sostener los extremos de las probetas durante las pruebas. Esta configuración permitió analizar la respuesta del material y los mecanismos de falla bajo cargas de impacto, evaluando su resistencia y capacidad de absorción de energía. Con el objetivo de caracterizar de forma más detallada el comportamiento energético del material, se realizó una segmentación del área bajo la curva carga-desplazamiento. Al dividir el área en dos secciones, delimitadas por el punto de carga máxima, se obtiene una estimación precisa de la energía asociada a la iniciación de la falla y de la energía total absorbida por el material [71].

5. Resultados y discusiones

5.1. Caracterización de la resina

5.1.1. Reología

En la Figura 5.1 se presenta la evolución de la viscosidad de la resina epoxi a 25°C a lo largo del tiempo. Inicialmente, se observa una disminución en la viscosidad debido al aumento de temperatura realizado por el equipo hasta estabilizarse en 25°C. Posteriormente, a medida que transcurre el tiempo, la viscosidad aumenta progresivamente como resultado de la reacción de entrecruzamiento de la resina, alcanzando un valor final de 1,9 Pa.s al concluir el ensayo.

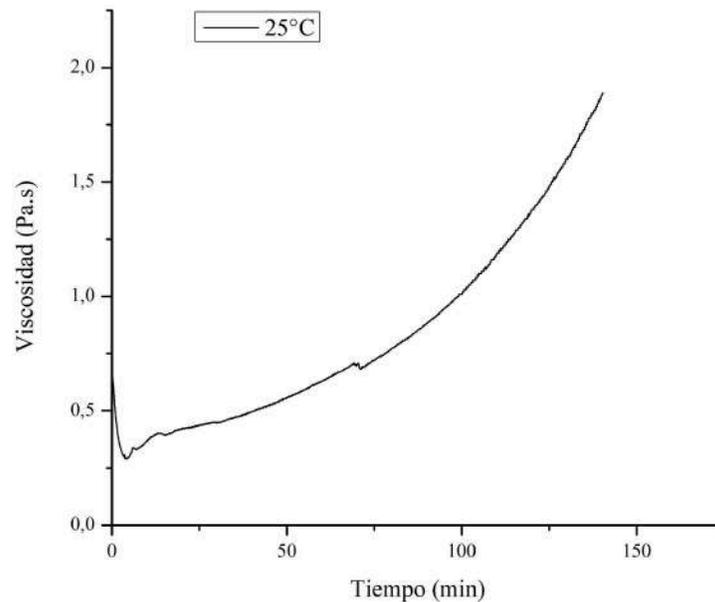


Figura 5.1. Evolución de la viscosidad con el tiempo a 25°C

Por otro lado, la laminación manual, método empleado para fabricar y adherir las pieles a los paneles sándwich, requiere una viscosidad de la resina de entre 0,2 Pa.s y 1,5 Pa.s [72]. Este rango asegura una buena impregnación de las fibras de refuerzo sin generar burbujas y permite una distribución uniforme de la resina.

Considerando estos valores, resulta evidente que la resina utilizada proporciona un tiempo adecuado para su manipulación durante la construcción de los paneles, especialmente en aquellos con estructuras corrugadas que demandan un mayor tiempo de laminación para asegurar una correcta adherencia y consolidación. Esta característica es esencial para garantizar la calidad y durabilidad de las tablas de surf fabricadas mediante este proceso.

5.1.2. Cinética de curado por DSC

En la Figura 5.2 se presentan los termogramas correspondientes a los ensayos de DSC dinámico y isotérmico a 85°C. Por simplicidad, solo se muestra la curva del ensayo isotérmico mencionado, aunque todas las curvas obtenidas fueron utilizadas para los cálculos cinéticos. En la Tabla 5.1 se detalla el calor de reacción involucrado en cada uno de los ensayos y el grado de conversión máximo alcanzable por la resina a cada temperatura.

La Figura 5.3 muestra la curva de grado de conversión de la resina en función del tiempo para las distintas temperaturas evaluadas. Mediante la derivación de esta curva, se puede obtener el gráfico de velocidad de avance de reacción en función del tiempo (Figura 5.4), esencial para determinar el modelo cinético que mejor se adapta al comportamiento de la resina.

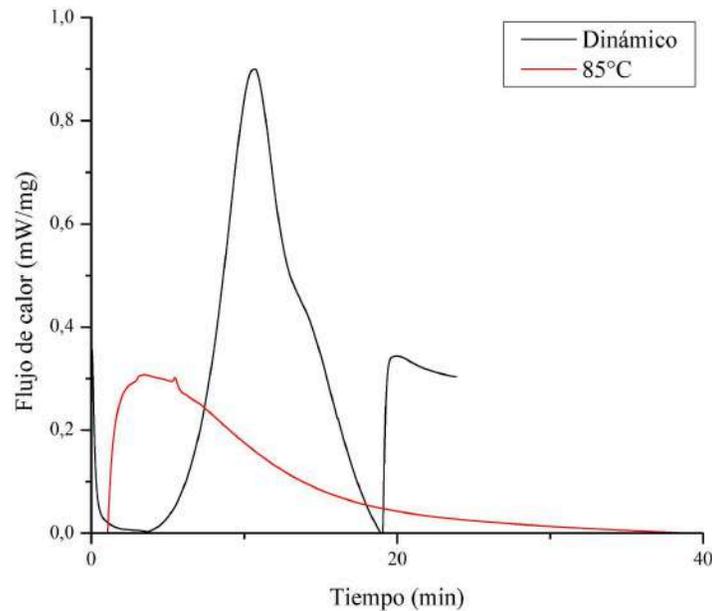


Figura 5.2. Termogramas correspondiente a DSC dinámico e isotérmico a 85°C

Tabla 5.1. Calores de reacción y conversiones máximas a 85°C, 100°C y 116°C

	H (mW.min/mg)	α_{\max}
Dinámico	5,05	—
85°C	3,49	0,69
100°C	3,8	0,75
116°C	4,8	0,95

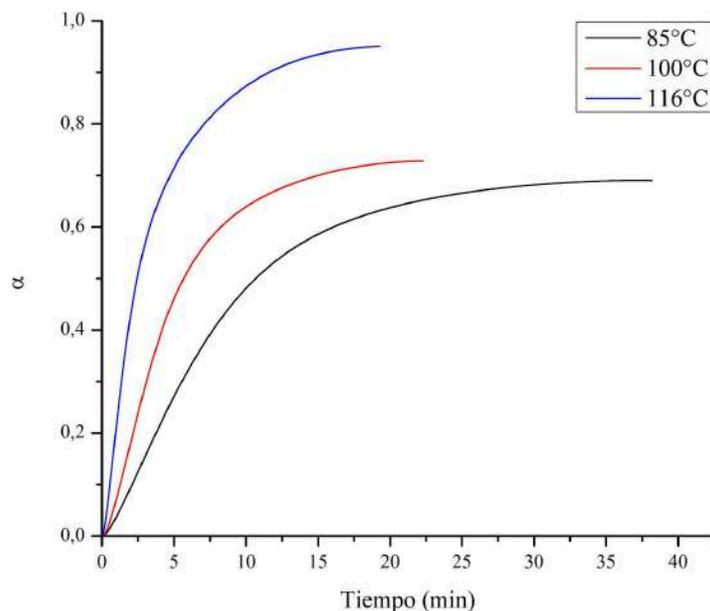


Figura 5.3. Grado de conversión en función del tiempo

Los resultados demuestran que, al aumentar la temperatura, incrementa tanto el grado de conversión máxima de la resina como su velocidad de curado. A medida que la resina experimenta un mayor grado de entrecruzamiento, la movilidad de las cadenas poliméricas disminuye y la interacción entre los grupos reactivos se vuelve más dificultosa. Cada temperatura de curado alcanza una conversión máxima, que será inferior a la unidad si dicha temperatura es inferior a la $T_{g_{\infty}}$ de la resina. En estos casos, se dice que el sistema ha vitrificado, ya que la reacción se detiene antes de completarse debido a la disminución en la movilidad de las cadenas. Sin embargo, este fenómeno es reversible; si se incrementa la temperatura por encima del punto de vitrificación, las macromoléculas recuperan su movilidad, lo que permite la continuidad de la reacción. Además, la velocidad de reacción aumenta debido a la mayor fuerza impulsora para la reacción a temperaturas más elevadas [73].

Por otro lado, de las curvas obtenidas en la Figura 5.4 se puede inferir que el modelo cinético que mejor se ajusta a esta resina es el modelo 1, donde:

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

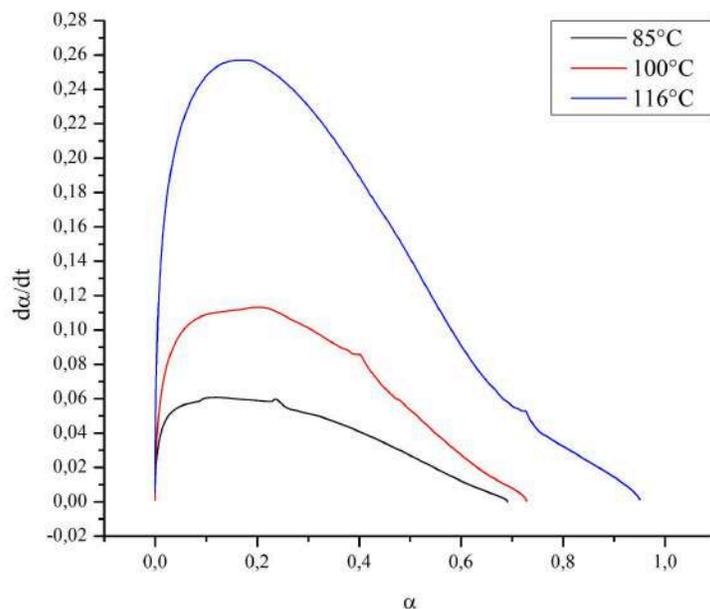


Figura 5.4. Velocidad de conversión en función del grado de conversión

Mediante el ajuste de las curvas de la Figura 5.4, y considerando que los valores de m y n no varían con la temperatura y la suma de ellos es igual a dos, se pudieron obtener los datos de la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Parámetros obtenidos de la aproximación del modelo 1

Temperaturas (°C)	k	m	n
85	0,094	0,29	1,71
100	0,191		
116	0,566		

Como fue mencionado anteriormente, el parámetro k tiene una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura (Ecuación 4). Aplicando \ln a ambos lados de la expresión, obtenemos la Ecuación 12.

$$\ln(k_i) = \ln(k_{i0}) - \frac{E_i}{R.T} \quad (12)$$

Posteriormente, se realiza un gráfico de $\ln(k_i)$ en función de $1/T$. Ajustando los datos experimentales mediante una función lineal, es posible determinar los valores de k_{i0} y E_i . La Figura 5.5 presenta tanto los datos graficados como el ajuste lineal correspondiente.

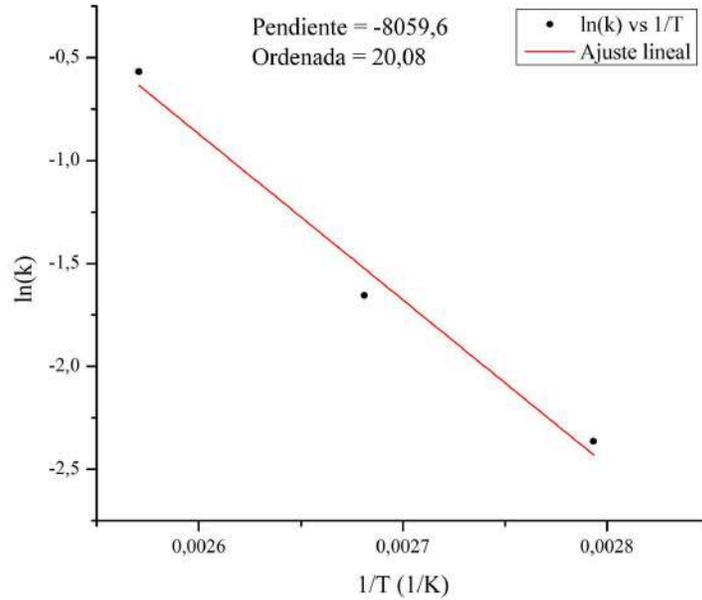


Figura 5.5. Curva $\ln(k)$ vs $1/T$ y su ajuste lineal

De los valores de pendiente y ordenada al origen observados en la Figura 5.5 y la Ecuación 12 se obtiene:

$$k_{i0} = 5,3 \cdot 10^8$$

$$E_i = 67 \text{ KJ/mol}$$

Determinados los parámetros m y n del modelo cinético de 1 y las constantes de la ecuación de Arrhenius, se puede predecir el grado de avance de la reacción en cualquier momento y a cualquier temperatura. Al integrar la ecuación diferencial correspondiente con los límites adecuados, se obtiene una expresión que relaciona el grado de avance de la reacción con el tiempo y la temperatura. Esto permite calcular con precisión el progreso de la reacción bajo diversas condiciones, lo cual es fundamental para el diseño y control de procesos en aplicaciones industriales y de laboratorio. De esta manera, la ecuación que modela el comportamiento cinético de la resina resulta:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 5,3 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(\frac{-67 \text{ KJ/mol}}{R.T}\right) \cdot \alpha^{0,29} \cdot (1 - \alpha)^{1,71}$$

5.2. Propiedades en tracción de las pieles de material compuesto

En la Figura 5.7 se presentan las curvas resultantes de los ensayos de tracción realizados sobre las probetas de fibra de vidrio y fibra de carbono. Asimismo, la Figura 5.8 muestra las

curvas obtenidas a partir de los datos registrados por el extensómetro, utilizados para el cálculo del módulo de Young. Para cada configuración de material, se seleccionó una curva representativa que ilustra el comportamiento típico observado durante los ensayos. Esta selección tiene como objetivo facilitar la comprensión de los resultados sin comprometer la validez y reproducibilidad de los datos obtenidos. Por otro lado, en la Tabla 5.3 se observan los valores resultantes de σ_r , ϵ_r y E de cada una de las configuraciones de las placas.

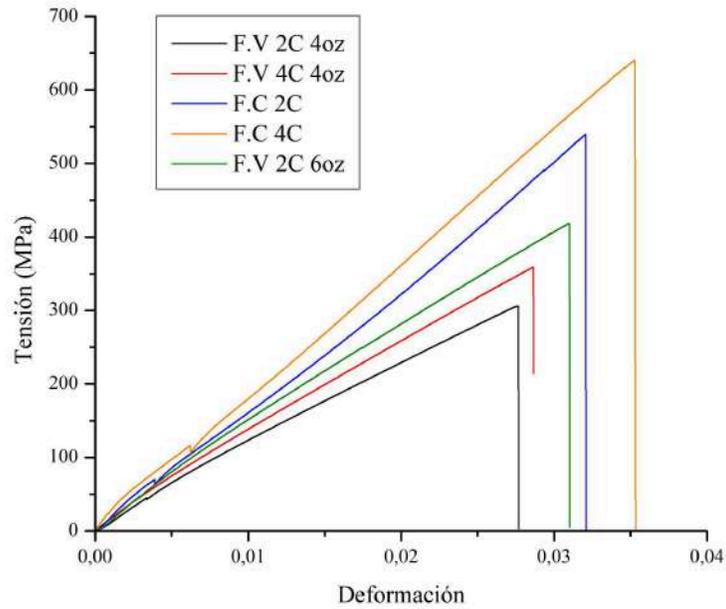


Figura 5.7. Curvas de tracción uniaxial

Tabla 5.3. Parámetros obtenidos de los ensayos de tracción uniaxial

Configuración	E (GPa)	σ_r (MPa)	ϵ_r (%)
F.V 2C 4oz	18,7 ± 1,7	305 ± 15	2,76 ± 0,21
F.V 4C 4oz	21,64 ± 0,43	347 ± 12	2,99 ± 0,12
F.C 2C	37,5 ± 2,4	562 ± 22	2,98 ± 0,24
F.C 4C	51,3 ± 1,7	660 ± 21	4,21 ± 0,68
F.V 2C 6oz	20,9 ± 2,2	418 ± 17	3,09 ± 0,35

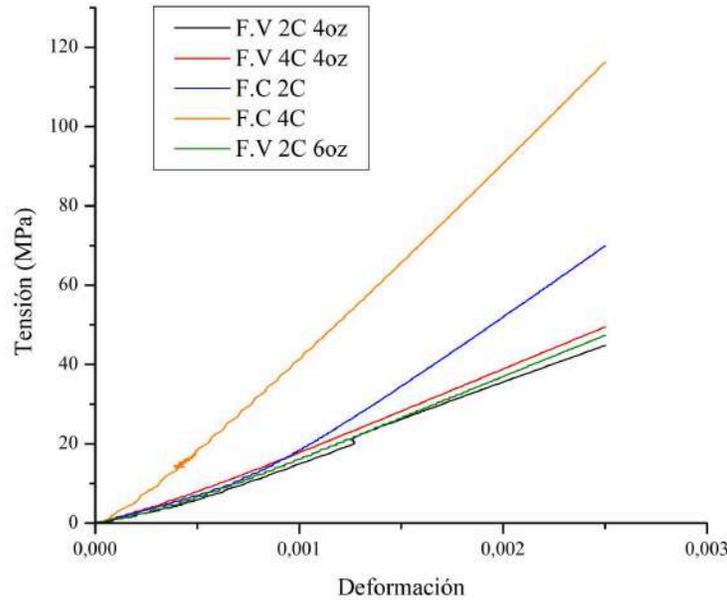


Figura 5.8. Curvas para el cálculo del módulo de Young

En la Tabla 5.3, se observa que tanto el tipo de tejido utilizado como el número de capas ejercen una influencia significativa sobre las propiedades mecánicas de los compuestos laminados. Como se mencionó anteriormente, al aumentar el número de capas laminadas, se incrementa la fracción volumétrica de fibra. Consecuentemente, hay una mayor proporción del material que presenta mejores propiedades en tracción, lo cual se refleja en los resultados de la Tabla 5.3. Este comportamiento se explica considerando que las propiedades de los laminados dependen en gran medida de las características individuales de sus componentes y de la fracción volumétrica de refuerzo. Por lo tanto, es común observar una tendencia al incremento de las propiedades mecánicas con el aumento del número de capas, debido a la mayor cantidad de fibra en la matriz y su consecuente mejora en la resistencia y rigidez del material compuesto [74].

La diferencia notable entre los tipos de tejidos, particularmente en el módulo de Young (E) y la tensión de rotura (σ_r), se debe a las propiedades inherentes de los materiales de refuerzo. Las placas conformadas con fibra de carbono exhiben valores muy superiores en estas propiedades comparadas con las de fibra de vidrio. Esto se debe a que las fibras de carbono presentan un módulo de elasticidad y una resistencia a la tracción significativamente mayores (ver Tabla 3.2), lo que se traduce en laminados con mejores prestaciones mecánicas [40].

Por otro lado, los laminados de fibra de vidrio de 6 onzas presentan propiedades superiores en comparación con los de 4 onzas debido a su mayor contenido de fibras por unidad de superficie, lo que incrementa significativamente la capacidad de carga y la resistencia del material compuesto. La mayor densidad de fibras en los tejidos de mayor

gramaje permite una distribución más uniforme de las cargas aplicadas, mejorando tanto la rigidez como la resistencia del compuesto. Además, la compactación del tejido de 6 onzas reduce el espacio vacío entre las fibras, disminuyendo la cantidad de resina necesaria para impregnar el tejido, como se observa en su valor de Φ_f , y fortaleciendo las propiedades mecánicas del compuesto al limitar las áreas débiles sin refuerzo de fibra [75].

5.3. Determinación del peso de los paneles fabricados

La Tabla 5.4 muestra los pesos de las probetas utilizadas en los ensayos de flexión fabricadas en distintas configuraciones, junto con el incremento porcentual en peso comparado con la configuración estándar. Esta comparación es crucial para entender las implicaciones de cada diseño en términos de peso, lo cual es un factor significativo en la fabricación de tablas de surf.

Tabla 5.4. Pesos de los paneles fabricados

Configuración	Peso (g)	Var (%)
STD	38,78	—
STD+	44,73	15,34
STR	40,47	4,34
CRB	39,13	0,90
HYB	43,00	10,87
TIM	52,10	34,34
COR-L	42,3	9,00
COR-T	42,17	8,74

El incremento en peso de cada configuración en comparación con la construcción STD se calculó para evaluar la eficiencia de cada diseño. En el caso de la configuración CRB, el aumento del peso se atribuye a la mayor fracción volumétrica de fibra y densidad superficial del tejido de refuerzo, a pesar de que la fibra de carbono tiene una menor densidad volumétrica que la de vidrio. La configuración STD+ presenta un mayor peso debido simplemente a la adición de una capa más. Por su parte, la configuración STR muestra un aumento en peso debido al mayor gramaje del material utilizado y la mayor fracción volumétrica de fibra de la piel.

La construcción TIM, aunque es una de las mejores soluciones implementadas por la industria para la mejorar la resistencia a la indentación sin usar carbono, incrementa significativamente el peso debido a la lámina de madera incorporada. Los paneles

corrugados, COR-L y COR-T, representan una alternativa competitiva a esta estructura. Es importante recordar que ambos paneles corrugados, con ranurado longitudinal (COR-L) y con ranurado transversal (COR-T), poseen una capa adicional de compuesto de fibra de vidrio de 4oz en sus caras planas. A pesar de presentar un incremento en el peso, este no es tan pronunciado como el observado en la configuración TIM, haciendo de ellos, a priori, una opción viable para mejorar la resistencia a la indentación manteniendo un incremento moderado en el peso total del panel.

5.4. Ensayos de los paneles

5.4.1. Flexión

En la Figura 5.9, se muestran las curvas resultantes de los ensayos de flexión en tres puntos para todas las estructuras laminadas. La Figura 5.10, por su parte, presenta las curvas de los ensayos de la estructura estándar (STD) y de las estructuras corrugadas. Se ha optado por incluir solo una curva representativa por configuración para simplificar la comparación con la estructura más comúnmente utilizada.

Los valores de P_f y Δ alcanzados por cada configuración se resumen en la Tabla 5.5, ofreciendo una comparación clara y concisa del rendimiento de cada estructura. Además, cuando fue posible, se han incluido en la Tabla 5.6 los valores de σ_f , D , τ_f , G y U . Estos datos adicionales permiten una evaluación más detallada de las propiedades mecánicas y la eficiencia de cada configuración. Además, la rigidez de los paneles sándwich se encuentra directamente correlacionada con la pendiente inicial de las curvas carga-deflexión presentadas en las Figuras 5.9 y 5.10. Un mayor valor de esta pendiente indica una mayor rigidez de la estructura, manifestándose en una menor deflexión ante un mismo incremento de la carga aplicada.

Es importante destacar que el caso ideal sería una construcción que permita mejorar la resistencia al *crushing*, lo que implicaría un incremento en la vida útil de las tablas, sin alterar significativamente la rigidez respecto a la construcción STD. Mientras que una tabla excesivamente rígida puede afectar negativamente la maniobrabilidad y la capacidad de absorción de impactos, resultando en una experiencia de surf menos dinámica y comfortable, una tabla muy flexible podría ser menos responsiva ante las maniobras del surfista, dificultando el control y la ejecución precisa de movimientos.

Además, las probetas no presentaron delaminación entre las pieles y el núcleo, un fenómeno muy común en este tipo de estructuras, ya que si este hubiera sido el caso, la caída de la carga habría sido menos abrupta y más gradual, reflejando un proceso de separación de capas más suave. Esta diferencia en el comportamiento a la falla destaca la importancia de la

integridad de la piel y la cohesión del núcleo de espuma en la resistencia estructural de los paneles sándwich [76,77].

El análisis de las curvas de la Figura 5.9, junto con los resultados presentados en la Tabla 5.5, nos permite comparar el comportamiento mecánico de distintas configuraciones de paneles sándwich. Los resultados indican que la configuración TIM presenta una resistencia a la flexión notablemente superior, con una carga de rotura cercana a los 600 N. Esta mejora se atribuye a que en este caso la piel del panel actúa como una estructura sándwich en sí misma, al comprender una lámina de madera encapsulada entre dos pieles de fibra de vidrio, aumentando notablemente la rigidez y resistencia del panel global. No obstante, ese aumento significativo en la rigidez estructural puede ser desfavorable en aplicaciones que requieran una cierta flexibilidad, como las tablas de surf. Por otro lado, la configuración CRB ofrece un balance óptimo entre resistencia y rigidez. La inclusión de una piel de carbono permite alcanzar una carga de rotura de aproximadamente 350 N, demostrando una resistencia considerable. Sin embargo, a diferencia de la configuración TIM, la CRB no induce un aumento excesivo en la rigidez del panel (la pendiente de la zona lineal no difiere significativamente), lo que la convierte en una opción más versátil para aplicaciones que requieren tanto resistencia como cierta flexibilidad. Por otro lado, las configuraciones HYB y STD, muestran capacidades de carga menores, reflejando la influencia de la orientación y cantidad de fibra en la rigidez y resistencia del tejido que compone la piel. La configuración STR, aunque utilizando tejidos de mayor gramaje que la construcción estándar, muestra un comportamiento más similar a las configuraciones STD y HYB, destacando que la cantidad de capas es un factor más determinante en la capacidad de carga que el gramaje individual de las mismas. Debido a esto, la configuración STD+ se posicionó como una alternativa intermedia entre las configuraciones estándar y las reforzadas con carbono. Al incorporar una capa adicional de fibra de vidrio, se logró un incremento en la resistencia a la flexión. Aunque no alcanzó los niveles de resistencia de la configuración con carbono, la STD+ ofrece una buena relación entre resistencia y peso, siendo una opción viable para aplicaciones que no requieren el máximo rendimiento pero sí una mayor durabilidad.

Considerando las curvas de la Figura 5.10 y los datos de la Tabla 5.5, se puede observar que las configuraciones propuestas para los paneles corrugados muestran una rigidez en flexión similar a la de la estructura estándar, lo cual era un objetivo deseado. Sin embargo, destaca que la configuración COR-L soporta cargas y deflexiones aún mayores antes de la falla. Este desempeño puede deberse a la presencia de los tabiques que absorben la carga y retrasan la falla de la capa adyacente [60]. Si bien el objetivo principal de este trabajo es mejorar la resistencia al *crushing* de las tablas, este hallazgo es muy positivo ya que la estructura propuesta (COR-L) contribuiría favorablemente a evitar la falla catastrófica de las tablas que se da en circunstancias extraordinarias, como cuando una ola rompe directamente sobre ella, presionándola y solicitándola en flexión, provocando su rotura.

Es importante señalar que los resultados obtenidos para COR-L son similares a los de los paneles CRB, los cuales también exhiben alta resistencia debido a la utilización de fibras de carbono bidireccionales. La orientación de los corrugados en COR-L contribuye a una distribución más eficiente de las tensiones y a una mayor resistencia estructural, lo que explica su desempeño superior en comparación con COR-T y la estructura estándar.

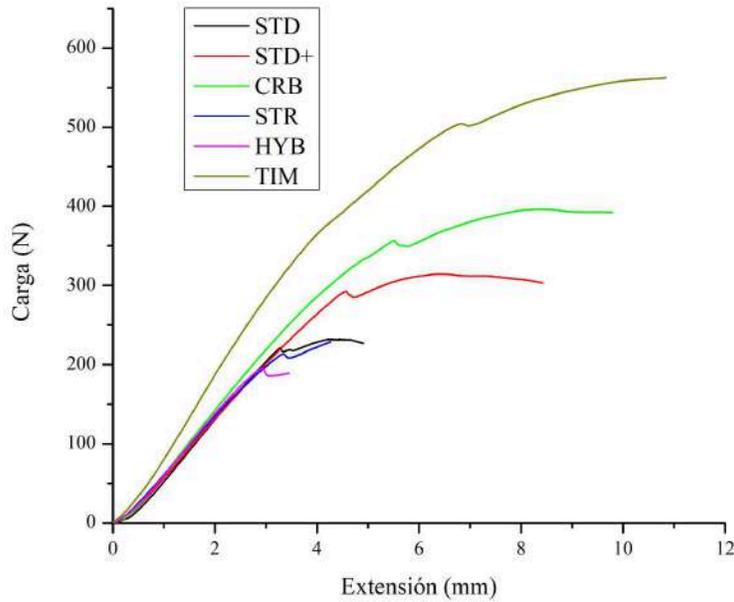


Figura 5.9. Curvas de flexión en tres puntos de las estructuras laminadas

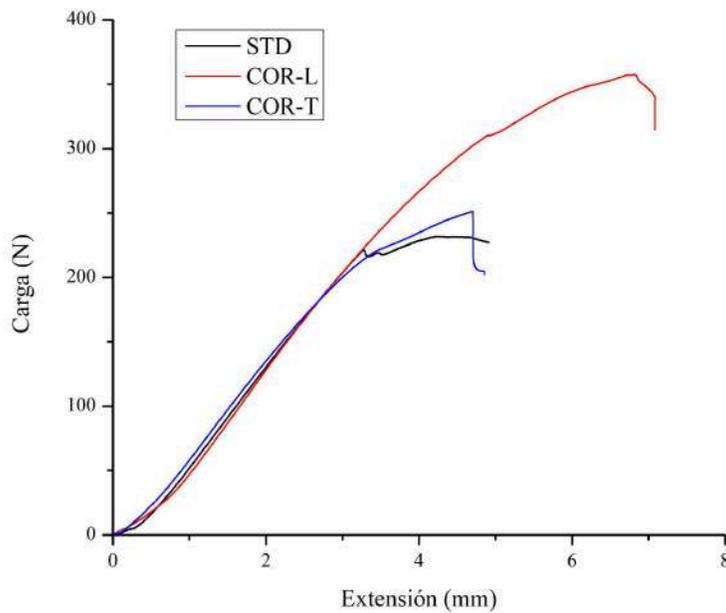


Figura 5.10. Comparación de curvas de flexión entre la estructura estándar (STD) y las estructuras corrugadas

Tabla 5.5. Valores de P_f y Δ de cada configuración y su variación con respecto a STD

Configuración	P_f (N)	Var P_f (%)	Δ (mm)	Var Δ (%)
STD	208 ± 12	—	3,05 ± 0,59	—
STD+	278 ± 32	34,13	4,43 ± 0,41	45,25
CRB	346 ± 27	66,47	5,13 ± 0,69	68,20
STR	212 ± 19	2,10	3,51 ± 0,48	15,08
HYB	175,9 ± 9,9	-15,29	3,00 ± 0,35	-1,64
TIM	591 ± 28	184,87	9,6 ± 1,4	216,07
COR-L	351 ± 40	69,24	6,85 ± 0,77	124,59
COR-T	235 ± 23	13,13	3,89 ± 0,74	27,54

Tabla 5.6. Resultados obtenidos de los ensayos de flexión

Configuración	σ_f (MPa)	τ_f (kPa)	G (Mpa)	U (N)	D (MN*mm ²)	Var D (%)
STD	22,3 ± 1,3	63,4 ± 3,6	2,48 ± 0,55	4103 ± 92	78,51 ± 0,89	—
STD+	21,8 ± 2,5	85,3 ± 9,9	2,16 ± 0,069	3560 ± 110	88,17 ± 1,45	12,30
CRB	20,1 ± 1,9	100 ± 10	2,25 ± 0,10	3770 ± 250	109,6 ± 4,1	39,65
STR	16,7 ± 1,4	62,1 ± 5,2	1,97 ± 0,11	3400 ± 210	94,4 ± 3,7	20,26
HYB	7,9 ± 1,7	50,4 ± 3,0	1,85 ± 0,20	3250 ± 380	70,59 ± 0,82	-10,09

Los datos de la Tabla 5.6, inicialmente, indican una aparente similitud en las tensiones de falla entre las configuraciones CRB y STD. No obstante, se observó que la falla en la configuración CRB se inicia en la piel inferior de fibra de vidrio, lo que sugiere que los valores obtenidos podrían estar subestimando la capacidad de la piel de carbono. En estas condiciones de flexión, la resistencia de los paneles se encuentra predominantemente gobernada por la capa inferior de fibra de vidrio, la cual está sometida a esfuerzos de tracción. Esta capa, debido a sus propiedades mecánicas específicas, determina en gran medida la capacidad del panel de soportar las cargas aplicadas. Es por eso que las tensiones de falla de las estructuras resultaron similares. Por otro lado, la arquitectura del tejido es el parámetro más importante al analizar la tensión de falla, lo que también explica la ausencia

de grandes diferencias entre las construcciones, excepto en el caso del tejido unidireccional (transversal a la longitud de la viga), que presentó un valor de tensión de falla muy bajo. En este caso, la piel superior fue tan deficiente en soportar carga que redujo significativamente la tensión a la cual ocurrió la falla del componente [78]. Los valores de rigidez observados en la Tabla 5.6 resultan de la combinación entre las propiedades intrínsecas de las pieles y las propiedades geométricas de los componentes del panel. Según estos resultados, la rigidez de las construcciones se ve significativamente afectada por el tipo de pieles utilizadas, destacándose particularmente las de fibra de carbono debido al elevado módulo de Young de esta fibra.

Sin embargo, al analizar las curvas de la Figura 5.6, se observa que la pendiente de las mismas, aunque no representa directamente la rigidez, simboliza este parámetro. Es notable que esta pendiente no presenta variaciones significativas entre las diferentes construcciones, con excepción de la construcción TIM. Este comportamiento puede explicarse porque todas las configuraciones comparten el mismo tipo de fibra en la capa inferior. En la configuración de flexión propuesta, esta capa está sujeta a esfuerzos de tracción, los cuales son determinantes en el comportamiento del panel bajo estas solicitaciones. A pesar de ello, se puede apreciar una ligera influencia del tipo de material de la piel superior, siendo evidente en la pendiente ligeramente mayor observada en las construcciones con fibra de carbono. Por otro lado, la construcción TIM muestra una pendiente significativamente mayor, lo cual es atribuible a la presencia de la capa de madera. Esta capa simula una estructura sándwich en la parte superior, lo que incrementa de manera significativa la respuesta del panel ante la carga en flexión [78]. Por otro lado, se puede observar que los valores de U y G no se vieron tan afectados por el tipo de configuración. Este comportamiento se debe a que la resistencia al corte de los paneles está significativamente influenciada por el núcleo de espuma, el cual es el mismo en todos los casos [79].

5.4.2. Indentación cuasi-estática

5.4.2.1. Ensayos a rotura

En la Figura 5.11 se presenta una curva de indentación a rotura para cada estructura laminada. Además, en la Tabla 5.7 se presentan los resultados promediados de las indentaciones a rotura de los paneles laminados.

Antes de analizar los resultados presentados en la Tabla 5.7, es fundamental resaltar que, bajo cargas de indentación cuasiestática, las pieles superiores de los paneles entran en flexión debido al tipo de construcción [57]. Por otro lado, la piel inferior no tuvo ninguna influencia sobre los resultados de este ensayo ya que el mismo fue realizado con soporte completo en la base. Adicionalmente, la falla de los paneles sándwich sometidos a cargas de indentación

cuasi-estática es un fenómeno extremadamente complejo, con muchos modos de falla ocurriendo simultáneamente. Aunque existen muchos criterios de falla diferentes, ninguno de ellos puede describir con precisión todos los mecanismos de falla [80]. Es importante aclarar que los ensayos se finalizaron cuando se fisuró la capa superficial de las pieles (Figura 5.12).

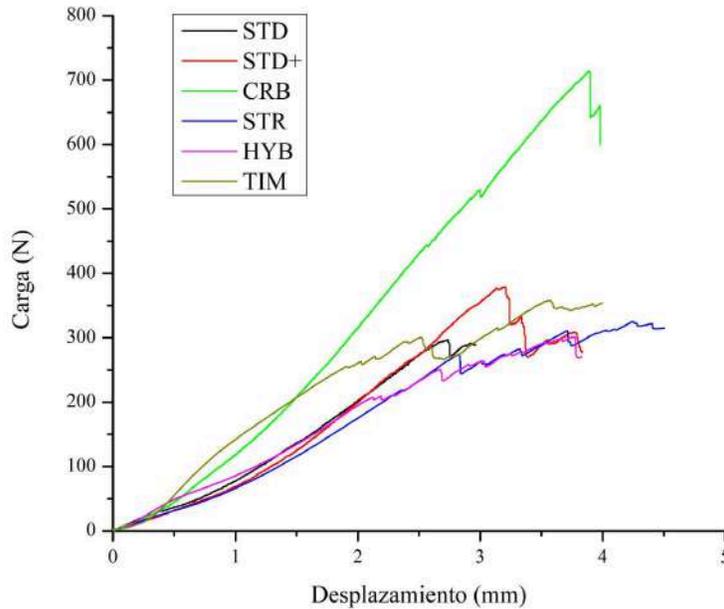


Figura 5.11. Curvas de indentación a rotura de estructuras laminadas

Tabla 5.7. Resultados ensayos de indentación a rotura en estructuras laminadas

Configuración	P_f (N)	Var P_f (%)	d_f (mm)	Var d_f (%)
STD	311 ± 30	—	$2,827 \pm 0,085$	—
STD+	$379,1 \pm 9,3$	21,83	$3,34 \pm 0,16$	18,16
CRB	690 ± 35	121,82	$4,15 \pm 0,28$	46,82
STR	309 ± 16	-0,65	$4,06 \pm 0,29$	43,79
HYB	323 ± 39	4,12	$4,00 \pm 0,37$	41,63
TIM	400 ± 46	28,67	$3,73 \pm 0,19$	31,91

Como se observa en la Figura 5.11, todas las curvas presentan pequeñas caídas de carga antes de alcanzar la falla completa. Este comportamiento se atribuye a la fractura de algunas fibras dentro de la capa de refuerzo, las cuales no provocan la falla total de las pieles [81].

La construcción TIM, inicialmente, mostró una alta rigidez, lo cual es atribuible a la presencia de una capa de madera. Sin embargo, esta rigidez inicial disminuyó debido a un

posible deslizamiento entre la capa de madera y la capa superior de fibra de vidrio. Este desplazamiento indica una falta de cohesión entre las capas, que compromete la integridad estructural de la construcción [57]. Asimismo, la alta rigidez de la madera favoreció una penetración prematura en la capa superficial de fibra de vidrio. A diferencia de los ensayos de flexión, esta construcción no mostró resultados tan convincentes debido a la geometría del indentador, lo que resultó en una falla catastrófica de la capa de fibra de vidrio ubicada sobre la lámina de madera.

La construcción STD+ mostró una mejora significativa en comparación con STD y STR. Esto se debe al aumento en el número de capas, lo que aporta una mayor resistencia a la penetración. La adición de capas incrementa la rigidez global del laminado, distribuyendo mejor las cargas y retardando la aparición de la falla [81].

La construcción CRB exhibe los mejores resultados, soportando una carga de falla de 690 N y una penetración de 4,15 mm. Esta destacada performance se atribuye a la rigidez y alta resistencia de la piel de carbono, que dificulta la penetración. Es importante notar que, si bien en los ensayos de flexión el panel CRB también mostró una alta resistencia, la influencia de la piel en la rigidez del panel fue menor debido a la configuración del ensayo. Sin embargo, en la prueba de indentación, la mayor rigidez del carbono se traduce directamente en una mejor performance, al ofrecer una mayor resistencia a la penetración. [82].

En cuanto a la construcción HYB, los valores de carga de falla fueron superiores a los de la construcción STD. La penetración también fue mayor debido a la flexión de la piel superior. La fibra de carbono unidireccional, si bien no aporta significativamente en términos de resistencia a la flexión en la dirección longitudinal del panel, mejora la resistencia a la penetración debido a la alta rigidez y resistencia de las fibras de carbono, ya que este ensayo es indiferente a la orientación de las fibras.



Figura 5.12. Falla de la piel de una probeta STR

Por otro lado, en la Figura 5.13 se presentan las curvas del ensayo de indentación a rotura aplicados a las estructuras corrugadas, evaluadas en diversas posiciones y comparadas con la construcción estándar. Además, la Tabla 5.8 muestra la variación de estos resultados según la posición de indentación en los paneles corrugados. Es importante destacar que, para este tipo de ensayos, la dirección del corrugado no afecta significativamente los resultados. Esto se debe a que las probetas tienen una sección cuadrada y el ensayo se realiza en un punto específico del área debido a la geometría hemiesférica del indentador. Por lo tanto, el comportamiento observado es representativo del punto de indentación y no está condicionado por la orientación del corrugado en sí, lo que permite una comparación directa entre las diferentes posiciones de indentación. Las pequeñas variaciones observadas entre las diferentes construcciones corrugadas pueden atribuirse a posibles discrepancias en el proceso de fabricación.

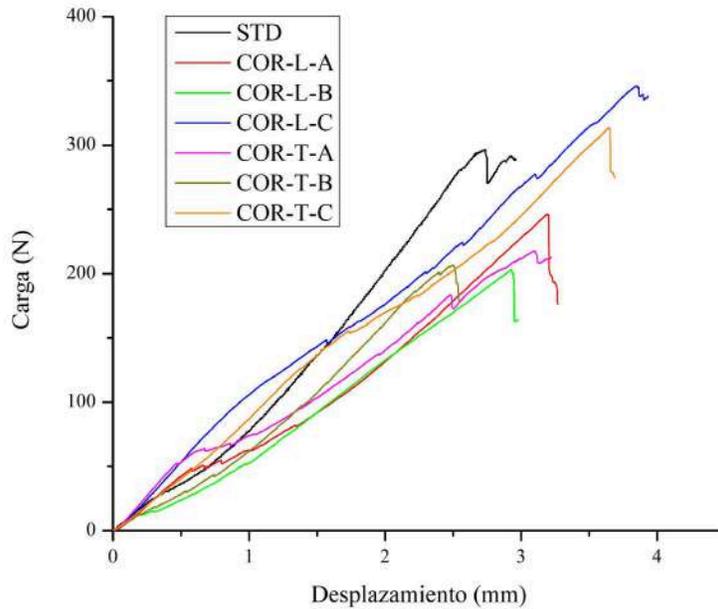


Figura 5.13. Curvas de indentación para estructuras corrugadas y STD

Tabla 5.8. Resultados ensayos de indentación a rotura en estructuras corrugadas y STD

Configuración	Posición	P_f (N)	Var P_f (%)	d_f (mm)	Var d_f (%)
STD	—	311 ± 30	—	$2,827 \pm 0,085$	—
COR-L	A	267 ± 21	-14,14	$3,24 \pm 0,11$	14,58
	B	$203,7 \pm 1,3$	-34,51	$3,03 \pm 0,11$	7,33
	C	334 ± 81	7,38	$3,81 \pm 0,32$	38,55
	Promedio	268 ± 28	-13,65	$3,36 \pm 0,54$	22,18
COR-T	A	$227,3 \pm 9,7$	-26,96	$2,89 \pm 0,21$	2,38
	B	217 ± 14	-30,03	$2,557 \pm 0,041$	-9,52
	C	326 ± 15	5,53	$3,85 \pm 0,20$	36,20
	Promedio	$257,7 \pm 7,7$	-16,73	$3,10 \pm 0,45$	12,36

Los resultados de la Tabla 5.8 muestran que las diferentes configuraciones de paneles corrugados y la construcción estándar presentan variaciones en su comportamiento bajo ensayos de indentación a rotura. A su vez, las posiciones de indentación A, B y C exhiben comportamientos distintos entre sí debido a la distribución y la estructura de los refuerzos en cada caso.

Los ensayos en la posición A mostraron una alta rigidez inicial, ligeramente superior a la construcción STD. Sin embargo, esta rigidez disminuyó debido a un probable pandeo de los tabiques. La caída de carga prematura en esta posición ocurrió debido a que el indentador penetra justo por encima de los tabiques. Esta observación sugiere que, aunque los tabiques proporcionan una resistencia inicial significativa, su capacidad de mantener la carga se ve comprometida por su tendencia al pandeo bajo la presión concentrada del indentador, más allá de estar sostenidos por el núcleo de espuma [59].

En contraste, la posición B es la que mostró menor resistencia, ya que el indentador penetra en una sola capa de material compuesto. A pesar de que los tabiques adyacentes ayudan a soportar la carga, esta zona falla prematuramente debido a que no sólo es relevante la geometría del corrugado, sino también el material que compone la piel de refuerzo [83]. Este comportamiento se refleja en los menores valores de P_f observados en la Tabla 5.6. La falta de soporte adicional en esta área expone las limitaciones de una única capa de material compuesto cuando se enfrenta a cargas de indentación concentradas.

La posición C presentó los mayores valores de carga e indentación a rotura, debido a la combinación de la doble capa de refuerzo que resiste la penetración (actuando de manera

similar a la construcción STD) y los tabiques que actúan como columnas soportando los esfuerzos compresivos. Esta configuración aprovecha tanto la resistencia del material compuesto en doble capa como el soporte estructural proporcionado por los tabiques, resultando en un desempeño superior bajo cargas de indentación [84]. Estos resultados destacan la importancia de la distribución del material y la estructura interna en la resistencia global del panel corrugado.

Al comparar los resultados promedio de las construcciones corrugadas con los paneles estándar, las cargas de falla de los primeros resultan menores. Esta diferencia puede explicarse por la presencia de zonas con una sola capa de refuerzo en las configuraciones COR, que reduce la resistencia global en comparación con la construcción STD, que es más uniforme y homogénea.

Además, se observó que los valores de d_f son mayores en las configuraciones corrugadas en comparación con la construcción estándar. Este aumento en los desplazamientos sugiere una mayor capacidad de deformación antes de la rotura, probablemente debido a la geometría corrugada que permite una distribución más eficiente de las cargas. Los tabiques presentes en estas probetas soportan gran parte de los esfuerzos compresivos inducidos por el indentador, lo que contribuye a esta mayor deformación [59]. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las zonas reforzadas con una sola capa de fibra de vidrio fallan a cargas menores debido a la baja resistencia del material compuesto.

Es crucial destacar que el indentador fue fabricado conforme a las dimensiones especificadas anteriormente, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM para ensayos de indentación de paneles sándwich [69]. Sin embargo, a la luz de los resultados obtenidos, sería recomendable aumentar el diámetro del indentador para representar de manera más precisa las solicitaciones reales a las que se somete una tabla de surf, como las presiones ejercidas por codos o rodillas. Esta discrepancia indica un problema de escala entre las condiciones del ensayo y las situaciones reales de uso. A pesar de esta diferencia, los ensayos realizados permiten inferir que, al utilizar indentadores de mayor tamaño, donde el área de contacto abarca varios tabiques simultáneamente, se maximizaría el efecto positivo de las zonas reforzadas (zonas C) y no se observaría el detrimento presente en otras áreas.

La similitud en los resultados promedio entre las configuraciones COR-L y COR-T, a pesar de la dirección del corrugado, respalda la observación de que la orientación del corrugado no debería afectar significativamente los resultados del ensayo, dado que las probetas son de sección cuadrada y el ensayo se realiza sobre un punto específico del área y no sobre una longitud continua. Esto implica que la resistencia y el desplazamiento a rotura dependen más de la distribución del material y la geometría interna que de la orientación del corrugado.

5.4.2.2. Ensayos cíclicos

En la Figura 5.14 se presentan las curvas cíclicas de indentación cuasi-estática de las estructuras laminadas, mientras que en la Tabla 5.8 se observan los valores de indentación remanente (δ) de cada una de ellas.

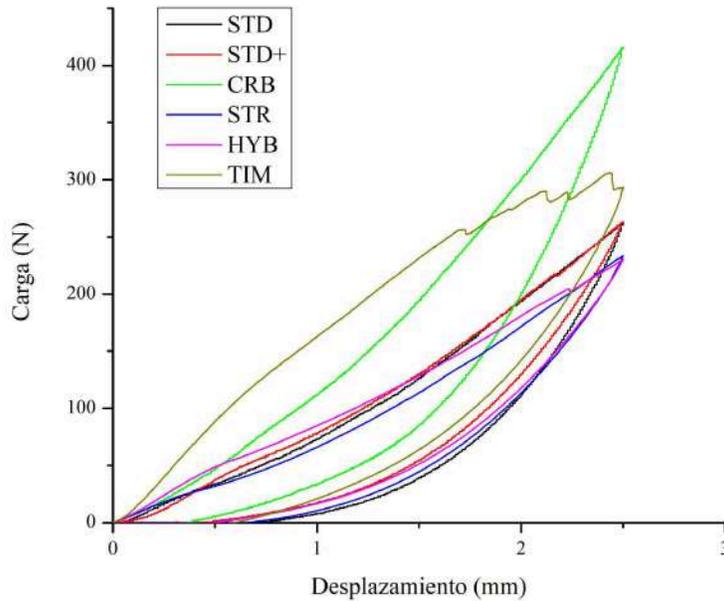


Figura 5.14. Ensayos cíclicos de indentación cuasi-estática de las estructuras laminadas

Tabla 5.8. Valores de indentación remanente en las estructuras laminadas

Configuración	δ (mm)	Var δ (%)
STD	$0,763 \pm 0,045$	—
STD+	$0,516 \pm 0,075$	-31,58
CRB	$0,413 \pm 0,045$	-44,74
STR	$0,62 \pm 0,11$	-18,42
HYB	$0,551 \pm 0,074$	-28,95
TIM	$0,479 \pm 0,091$	-36,84

Los resultados de la Tabla 5.8 evidencian una tendencia consistente con los ensayos de indentación a rotura, en la que las configuraciones que incorporan pieles de materiales más resistentes o un mayor número de capas presentan valores de indentación remanente más bajos. En particular, la construcción TIM, que incluye una capa de madera, reduce significativamente la deformación de la espuma, resultando en un valor de indentación remanente bajo. Esta reducción se debe a que la capa de madera limita el aplastamiento del

núcleo de espuma durante el ensayo, proporcionando mayor rigidez y favoreciendo una distribución más uniforme de la carga aplicada. Comportamientos similares se observan en las configuraciones CRB y HYB, donde la presencia de fibra de carbono refuerza la estructura, reduciendo el aplastamiento localizado del núcleo. De manera análoga, la construcción STD+, que se caracteriza por un mayor número de capas, muestra una disminución en el valor de indentación remanente, lo cual puede atribuirse a la mayor capacidad de las capas adicionales para distribuir las cargas de forma más eficiente, reduciendo la severidad del daño estructural, como también se constató en los ensayos de rotura.

En la Figura 5.15 se presentan las curvas correspondientes a los ensayos de indentación cíclica realizados en las estructuras corrugadas, evaluadas en diferentes posiciones y comparadas con la construcción estándar. Asimismo, la Tabla 5.9 muestra cómo varían estos resultados en función de la ubicación del indentador sobre los paneles.

En comparación con la estructura estándar, los resultados de las configuraciones corrugadas en la Tabla 5.9 muestran una tendencia favorable en cuanto a la indentación remanente. Además, a diferencia de los ensayos a rotura, la posición A muestra un peor desempeño en términos de indentación remanente que la posición B. Esto puede explicarse por la interacción del indentador con las columnas de material compuesto. Aunque estas columnas aumentan la resistencia de la estructura, la carga del indentador ubicado justo por encima de los tabiques puede provocar un pandeo local de los mismos, lo que provoca una mayor deformación y, por ende, un mayor valor de indentación remanente. En las posiciones B y C, donde la carga no actúa directamente sobre las columnas, el aplastamiento localizado es menor, lo que permite una mejor preservación de la integridad estructural. En general, las configuraciones corrugadas mostraron un desempeño superior al de la estructura estándar en términos de *crushing* del núcleo, gracias a la presencia de las columnas que proporcionan resistencia adicional en los paneles sándwich.

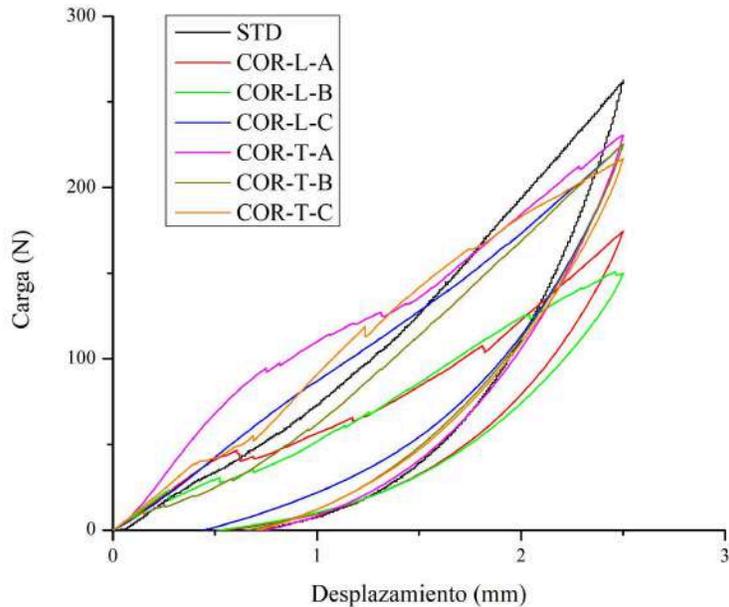


Figura 5.15. Ensayos de indentación cíclica estructuras corrugadas y STD

Tabla 5.9. Valores de indentación remanente en las diferentes posiciones del corrugado

Configuración	Posición	δ (mm)	Var (%)
STD	—	$0,763 \pm 0,045$	—
COR-L	A	$0,543 \pm 0,015$	-28,95
	B	$0,489 \pm 0,037$	-35,53
	C	$0,465 \pm 0,018$	-39,47
	Promedio	$0,50 \pm 0,070$	-34,21
COR-T	A	$0,7363 \pm 0,0021$	-2,63
	B	$0,645 \pm 0,011$	-14,47
	C	$0,637 \pm 0,019$	-15,79
	Promedio	$0,67 \pm 0,032$	-11,84

La notable diferencia observada entre las estructuras COR-L y COR-T en los resultados de indentación remanente, que no se esperaría en función de la naturaleza del ensayo, puede atribuirse a una variabilidad en el proceso de fabricación. Específicamente, la discrepancia puede originarse en la diferencia en la cantidad de ranuras que deben ser rellenadas con vigas

de espuma de PU en cada una de las estructuras. Aunque el volumen total de material utilizado es el mismo, la configuración COR-T requiere el doble de columnas de espuma en comparación con la longitudinal. Este mayor número de columnas implica una mayor complejidad en el proceso de colocación de las vigas, aumentando la probabilidad de errores o inconsistencias en la distribución del material. Como consecuencia, las posibles variaciones en la calidad del relleno podrían haber influido en los resultados de indentación remanente, generando indentaciones más pronunciadas y una mayor dispersión en las mediciones de las estructuras transversales en comparación con las longitudinales.

5.4.3. Indentación por impacto

La Figura 5.15 ilustra el comportamiento dinámico de los paneles laminados bajo cargas de impacto. A su vez, la Figura 5.16 presenta las mismas curvas realizadas para la estructura estándar y los paneles corrugados. El análisis energético de las curvas de fuerza-desplazamiento, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.9, permitió determinar la fracción de energía total absorbida durante la fase de iniciación del daño.

Es relevante destacar que, en todos los casos estudiados, la capa inferior de los paneles permaneció intacta. Por otro lado, los modos de falla observados se corresponden con los reportados en la literatura [85], tales como fractura del material compuesto, delaminación y *crushing* del núcleo. En general, la ocurrencia de un modo de falla desencadena la aparición de otros, lo que sugiere una cascada de eventos que conducen a la falla catastrófica del panel [86].

Los resultados obtenidos evidencian una superioridad en el desempeño de los paneles laminados constituidos íntegramente por capas de fibra de vidrio. Esta ventaja se atribuye a la mayor capacidad de absorción de energía de la fibra de vidrio en comparación con otros materiales como la fibra de carbono y la madera [87]. Esta propiedad se relaciona directamente con la ductilidad intrínseca de la fibra de vidrio, que le permite deformarse plásticamente antes de la fractura.

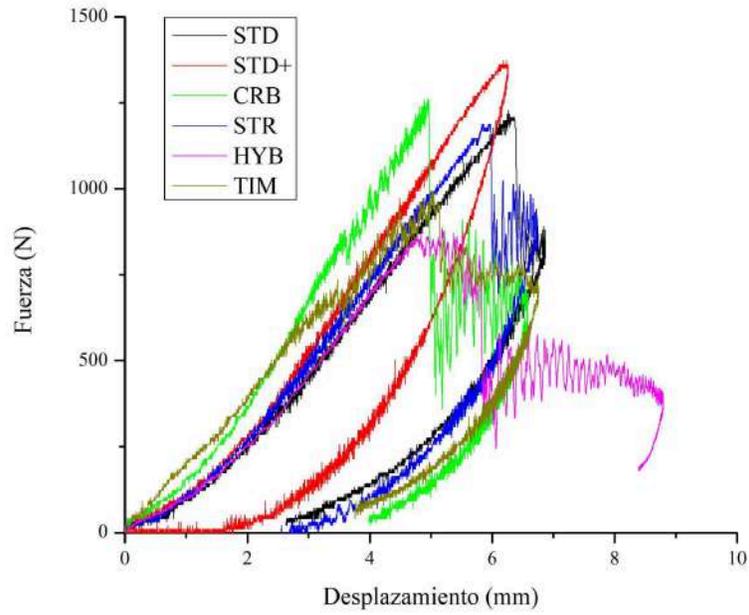


Figura 5.15. Curvas fuerza-desplazamiento de impacto de estructuras laminadas

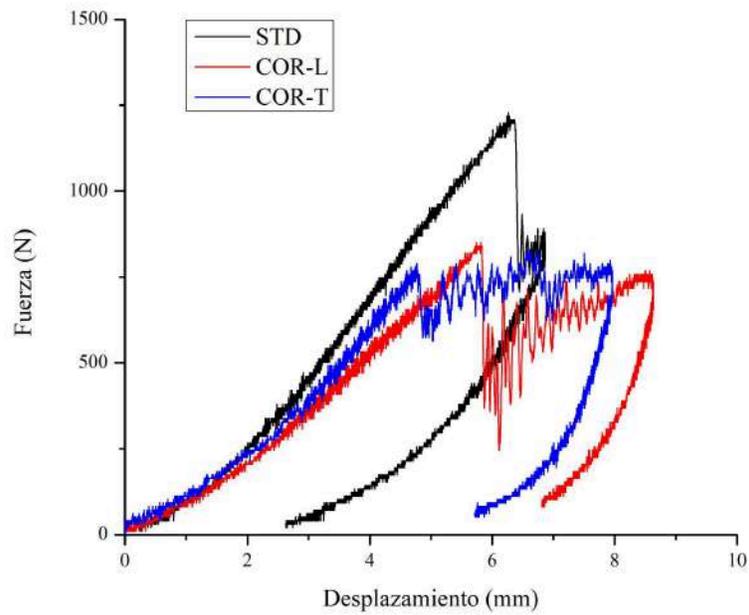


Figura 5.16. Curvas fuerza-desplazamiento de impacto de estructuras corrugadas y STD

Tabla 5.9. Energías absorbidas para la iniciación de daño

Configuración	Energía de iniciación de daño (%)
STD	95,36
STD+	100,00
CRB	70,78
STR	84,11
HYB	44,44
TIM	72,24
COR-L	59,36
COR-T	59,84

Al analizar las configuraciones STD, STD+ y STR, se observa que el incremento en la cantidad de capas de piel de refuerzo resulta en un aumento significativo en la resistencia al impacto en comparación con el incremento del gramaje de la fibra (STR) [88]. Esta observación se corrobora al examinar las imágenes de la superficie de impacto presentadas en la Figura 5.17, donde las configuraciones STD y STR presentan grietas e indentaciones del núcleo más pronunciadas que la configuración STD+.

Adicionalmente, la estructura STD evidencia una mayor absorción de energía antes de la falla que la STR. La menor densidad de fibras en la configuración STD le otorga una mayor ductilidad, lo que significa que puede deformarse plásticamente en mayor medida antes de alcanzar su límite elástico y fracturarse. Esta mayor capacidad de deformación plástica permite que la configuración STD disipe una mayor cantidad de energía en forma de trabajo de deformación, lo que se traduce en una mayor absorción de energía y una mayor indentación remanente.

La rigidez y menor ductilidad de los materiales en CRB y TIM generan una distribución no homogénea de las tensiones al momento del impacto. A diferencia de la fibra de vidrio de STD, que puede deformarse y disipar energía de manera más gradual, estos materiales concentran los esfuerzos en puntos críticos, favoreciendo la falla por fractura del material compuesto de la capa superior [87]. Como resultado, parte de la energía del impacto se invierte en crear deformaciones localizadas más profundas, como las indentaciones observadas en la Figura 5.17, antes de que se produzca la falla completa [85].

Los resultados obtenidos para la configuración HYB evidencian una marcada disminución en la capacidad de absorción de energía en comparación con las demás

configuraciones. Esta reducción se atribuye principalmente a la presencia de una única capa de tejido de carbono con una densidad superficial significativamente mayor. Dicha densidad incrementa considerablemente la rigidez de la piel, limitando su capacidad de deformación plástica y favoreciendo la concentración de tensiones. Como consecuencia, se observa una falla prematura por fractura de los mechones de fibra de carbono, tal como se aprecia en la Figura 5.17. Este mecanismo de falla prematuro es coherente con los valores de energía absorbida antes de la falla reportados en la Tabla 5.9.

Las configuraciones COR-L y COR-T revelan una menor capacidad de absorción de energía antes de la falla ante impactos en comparación con la configuración STD. Esta disminución en el desempeño se atribuye principalmente a la presencia de zonas reforzadas con una sola capa de fibra de vidrio, las cuales actúan como puntos débiles en la estructura. La menor rigidez y resistencia de esta capa única de piel de refuerzo explica la penetración prematura del indentador a través de esta zona, seguida por el colapso del núcleo de espuma, conduciendo a una severidad de daño significativamente mayor. Además, la presencia de delaminaciones entre las pieles y el núcleo, exacerbada por los tabiques, contribuye a la fragilización de la estructura. En particular, la Figura 5.17.g sugiere que los tabiques podrían actuar como concentradores de tensión, induciendo la propagación de grietas a lo largo de su dirección. Estos factores combinados explican la menor resistencia al impacto observada en las configuraciones corrugadas.

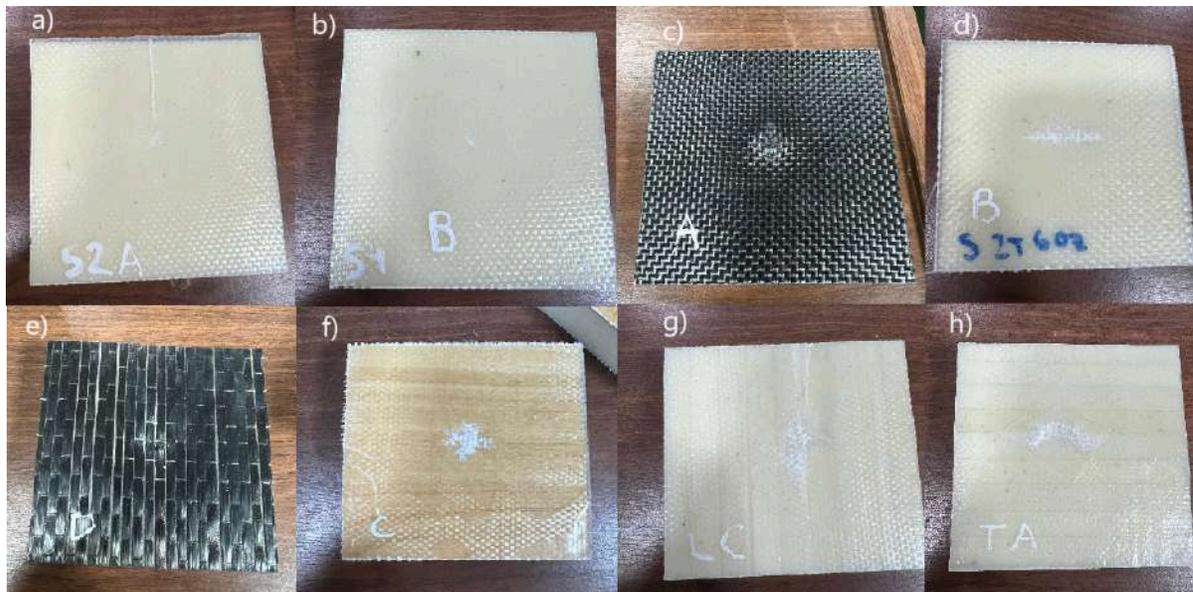


Figura 5.17. Cara superior de las probetas sándwich luego de ser impactadas.
a) STD; b) STD+; c) CRB; d) STR; e) HYB; f)TIM; g) COR-L; d) COR-T

6. Evaluación económica

6.1. Consideraciones generales

Para la evaluación económica de la implementación de tablas de surf con núcleos corrugados, se considera que la empresa ya existe y está establecida en el mercado productivo. Debido a esto, no se considerarán en el análisis ciertos costos como los de mano de obra, supervisión, mantenimiento, servicios, y otros costos operativos similares, ya que estos están integrados en las operaciones diarias de la empresa.

Esta evaluación económica se centra en calcular el aumento porcentual en el precio de fabricación de las tablas corrugadas debido a dos factores principales. Primero, la inversión inicial en una bomba de vacío y una prensa de membrana al vacío, necesarias para obtener correctamente tablas que incorporen la tecnología desarrollada en este trabajo. Segundo, el costo adicional derivado del mayor uso de material compuesto en estas estructuras corrugadas.

Además, en este análisis se considera una de las premisas iniciales del trabajo: mejorar la resistencia al *crushing* de las construcciones estándar de tablas de surf sin aumentar en gran medida el precio. Este objetivo es fundamental, ya que existen tablas de surf de fibra de carbono que ofrecen una mejor performance, pero a un precio mucho más elevado impidiendo que dicha tecnología sea adoptada masivamente en el sector. La intención es desarrollar una solución que proporcione una mejora significativa en la durabilidad y resistencia sin los costos prohibitivos asociados con las tablas de fibra de carbono.

Se supondrá también que la implementación de la tecnología no representa un incremento significativo en el tiempo de mano de obra por tabla, lo cual puede ser alcanzado con una buena gestión de actividades de manufactura.

6.2. Inversión en equipos especializados

Como fue mencionado anteriormente, para implementar la tecnología que permite obtener una piel corrugada en las tablas de surf, es indispensable la adquisición de una prensa de membrana al vacío. Este equipo especializado es crucial, ya que permite generar la presión necesaria para que las vigas de espuma de poliuretano se inserten de manera eficiente en el ranurado de los paneles durante el proceso de curado. La prensa de membrana asegura una distribución uniforme del material y mejora la adherencia entre las capas de refuerzo y el núcleo. Además, mantiene una presión constante y controlada durante todo el proceso de curado, garantizando que la inserción de las vigas de PU sea adecuada. La utilización de la prensa de membrana es fundamental para optimizar la calidad del producto final y asegurar que los paneles corrugados posean las propiedades estructurales requeridas. Adicionalmente, es necesario contar con un CNC o una fresadora manual para ranurar los núcleos de espuma

y maquinar las vigas. Sin embargo, todos los fabricantes disponen de fresadoras manuales e, incluso, la mayoría ya cuenta con máquinas CNC que utilizan para maquinar los núcleos. En la Tabla 6.1 se observa el valor estimado y la vida útil de cada uno de ellos.

Tabla 6.1. Costo de los componentes de la prensa de membrana [89,90]

Equipo	Valor estimado (USD)
Bomba de vacío	300
Prensa de membrana al vacío	1000

Es importante destacar que una inversión de 1300 dólares no representa un gasto significativo para ningún fabricante de tablas de surf. Como ejemplo, las máquinas de corte CNC tienen un costo que oscila entre 10000 y 50000 dólares, y la mayoría de los fabricantes locales ya dispone de una de estas máquinas.

6.3. Costos de producción

Para evaluar el costo de fabricación de una tabla de surf con una estructura tradicional y compararlo con el costo de una tabla con núcleo corrugado, se realizó un análisis detallado de los materiales necesarios. Se considera que se fabrica un modelo de tabla de dimensiones descritas en la Figura 6.1. Además, se tuvo en cuenta el caso más conservador que resulta de realizar el corrugado sobre toda la cara superior de la tabla. Luego sería relevante analizar si es necesario fabricarlas de esta manera o puede reducirse el área a modificar.

Mediante el uso del software Solidworks se determinó que el área superficial a laminar es de 1,6 m², distribuidos aproximadamente en 0,8 m² para la cara superior y 0,8 m² para la cara inferior.

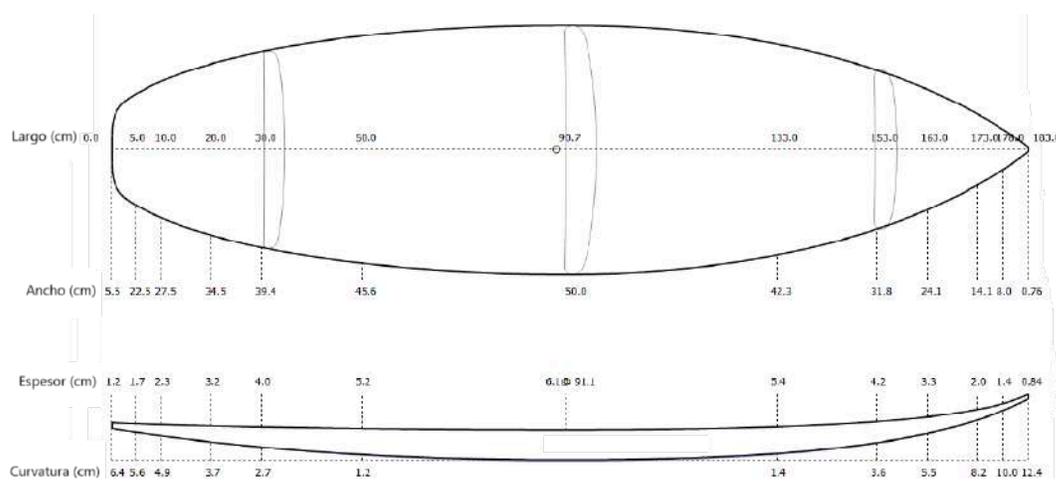


Figura 6.1. Dimensiones de la tabla modelo de la evaluación económica

Cálculo del material compuesto para fabricar una tabla tradicional

1. **Costo de fibra de vidrio:** Para determinar el costo de la fibra de vidrio, se calculó inicialmente la cantidad requerida para la fabricación de la tabla. Este cálculo consideró que la estructura presenta dos capas de material compuesto en la cara superior y una capa en la cara inferior, lo que corresponde a un área total de $2,4 \text{ m}^2$. Dado que el precio de la fibra de vidrio es de 1 USD/m^2 [91], el costo total de la fibra de vidrio es el siguiente:

$$C_{f.v} = 1 \frac{\text{USD}}{\text{m}^2} \cdot 2,4 \text{ m}^2 = 2,4 \text{ USD}$$

2. **Costo de resina:** Primero, mediante el uso de la Ecuación 6, se calcula la fracción volumétrica de resina del compuesto:

$$\Phi_r = 1 - \Phi_f = 1 - \frac{n_s \cdot \rho_s}{t \cdot \rho_v} = 0,64$$

Luego, se considera un espesor uniforme de material compuesto de $0,02 \text{ cm}$ en cada capa. Para calcular el volumen total de resina necesario para fabricar una tabla de surf con las dimensiones especificadas, se utiliza el área total de material compuesto calculada previamente, que es de 24000 cm^2 . El volumen de resina se determina mediante la siguiente fórmula:

$$V_{resina} = 0,64 \cdot 0,02 \text{ cm} \cdot 24000 \text{ cm}^2 = 307,2 \text{ cm}^3$$

Finalmente, conociendo el costo unitario de la resina epoxi [37], se calcula el costo total de la resina necesaria:

$$C_{resina} = 307,2 \text{ cm}^3 \cdot 0,055 \frac{\text{USD}}{\text{cm}^3} = 16,9 \text{ USD}$$

3. **Costo Foam:** El costo del núcleo de poliuretano correspondiente a la tabla especificada es de 83 USD [91].
4. **Costo total:** Finalmente, el costo total de materia prima para la fabricación de una tabla de surf las dimensiones especificadas resulta de:

$$C_{total} = C_{resina} + C_{f.v} + C_{foam} = 102,3 \text{ USD}$$

Cálculo del material compuesto para fabricar una tabla con núcleo corrugado

1. **Cálculo de material compuesto adicional:** Para calcular el incremento de material compuesto necesario para la fabricación de una tabla con núcleo corrugado, se determinó el área adicional utilizada en el panel COR-L mediante el siguiente procedimiento:

$$A_{ad} = 2 \cdot n \cdot L \cdot c = 600 \text{ cm}^2$$

Donde:

n = cantidad de vigas de poliuretano;

L = longitud del panel, cm ;

c = profundidad del corrugado, cm.

Considerando que los paneles STD cuentan con tres capas de material compuesto (dos en la cara superior y una en la inferior) de un área de 1250 cm² cada una, el incremento porcentual en la cantidad de material compuesto necesario para fabricar los paneles corrugados resulta de:

$$\frac{600 \text{ cm}^3}{3750 \text{ cm}^3} \cdot 100 = 16\%$$

Por lo tanto, a la cantidad de piel de refuerzo requerida para fabricar una tabla de surf de estructura tradicional, habría que agregar un 16% más de material compuesto con el objetivo de obtener la tabla con el núcleo corrugado.

- 2. Incremento en costos:** Dado que el espesor del material compuesto es el mismo en ambas configuraciones, el cálculo del costo se simplifica a un aumento del 16% en el costo de la materia prima para fabricar los laminados que refuerzan la tabla. Este incremento es directamente proporcional al aumento en el área del material compuesto necesario debido a la estructura corrugada.

$$C_{tot}^{cor} = (C_{resina} + C_{f.v.}) \cdot 1,16 + C_{foam} = 105,4 \text{ USD}$$

Finalmente, se pudo determinar que el incremento porcentual de fabricar una tabla con estructura corrugada respecto a una tabla estándar es de:

$$Incremento = \frac{105,4 \text{ USD} - 102,3 \text{ USD}}{102,3 \text{ USD}} \cdot 100 = 3,03\%$$

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo, se confeccionó la Tabla 6.2, donde se presentan los costos totales de materia prima involucrados en la fabricación de tablas de surf, con las estructuras estudiadas en el trabajo.

Tabla 6.2. Costo en materia prima de las diversas configuraciones

Configuración	Costo (USD)	Variación respecto a STD (%)
STD	102,3	—
STD+	108,7	6,26
STR	101,8	-0,49
CRB	171,9	68,04
HYB	125,5	22,68
TIM	108,7	6,26
COR-L	105,4	3,03
COR-T	105,4	3,03

7. Conclusiones

El presente trabajo ha abordado la problemática del *crushing* en las tablas de surf mediante la implementación de núcleos corrugados en las estructuras sándwich, con el objetivo de mejorar la durabilidad sin comprometer la flexibilidad, el peso y el costo de las tablas. Los resultados obtenidos de los diversos ensayos realizados permiten extraer conclusiones sobre la viabilidad y efectividad de esta solución.

En cuanto al peso, se comprobó que la incorporación de núcleos corrugados resulta en un aumento poco significativo (~9%) comparado con otras soluciones existentes, como la construcción TIM. Este hallazgo es crucial, ya que uno de los principales objetivos era incrementar la resistencia al *crushing* sin añadir un peso excesivo que pudiera afectar negativamente la maniobrabilidad y el rendimiento de las tablas.

Los ensayos de flexión demostraron que los paneles con núcleos corrugados mantienen una rigidez comparable a la estructura tradicional de tablas de surf (STD), cumpliendo con la premisa de no comprometer la flexibilidad. A diferencia de la estructura que incorpora una lámina de madera (TIM), que exhibe una rigidez excesiva que puede limitar la maniobrabilidad y el confort del surfista, los núcleos corrugados ofrecen una respuesta más suave y controlada, permitiendo al usuario adaptarse a diversas condiciones de oleaje y realizar maniobras con mayor precisión. Este comportamiento es esencial para asegurar que las tablas con núcleo corrugado no solo sean más resistentes, sino también adecuadas para el desempeño en diversas condiciones.

En los ensayos de indentación cuasi-estática cíclica, los paneles corrugados mostraron una notable mejora en la resistencia al *crushing* en comparación con las construcciones tradicionales. Por otro lado, la estructura CRB también mostró una buena resistencia al *crushing* bajo cargas estáticas, pero a un costo de materiales significativamente mayor. La capacidad de los paneles corrugados para distribuir y absorber las fuerzas estáticas demuestra su potencial para aumentar la durabilidad de las tablas.

Sin embargo, los ensayos de indentación a rotura y de impacto revelaron que los núcleos corrugados no resultaron tan efectivos como se esperaba. Esto puede deberse a un problema de escala, ya que el indentador penetraba en zonas con una sola tela de refuerzo, reduciendo significativamente el promedio de resistencia. Esta situación no se replicaría en una sollicitación real, donde las cargas estarían distribuidas de manera más uniforme. Además, sugiere la posibilidad de continuar la investigación desarrollando estructuras mixtas que, además del corrugado, incorporen una capa adicional de refuerzo, como la configuración STD+. Esta combinación podría ofrecer excelentes resultados, aunque a expensas de incrementar el costo y el peso de las tablas.

Desde una perspectiva económica, se demostró que el aumento en la inversión y en el costo de la materia prima para fabricar los paneles corrugados es muy bajo. En comparación, la estructura CRB, aunque efectiva, implica un costo mucho mayor debido al precio elevado de las telas de carbono. La construcción TIM también resulta más cara debido al uso de madera de guatambú. Este aspecto, combinado con la mejora en la resistencia bajo cargas estáticas y el mantenimiento de la flexibilidad y el peso, sugiere que la implementación de núcleos corrugados es una solución económicamente viable y beneficiosa para los fabricantes locales, superando las opciones CRB y TIM en términos de relación costo-beneficio.

Se ha demostrado que el uso de núcleos corrugados en las tablas de surf podría ofrecer una solución técnica efectiva para mejorar la resistencia al *crushing* bajo cargas estáticas sin comprometer la flexibilidad y con un aumento de peso mínimo. Aunque su rendimiento bajo impactos localizados es limitado, la reducción en costos de materia prima y el potencial para prolongar la vida útil de las tablas hacen de esta solución una opción prometedora para la industria.

8. Dificultades encontradas durante el desarrollo del trabajo

Como parte del plan de trabajo, se intentó fabricar los corrugados utilizando tela de 6 onzas. Sin embargo, este intento resultó inviable debido a la mayor rigidez de la tela, lo que hizo imposible insertar las vigas adecuadamente, como se observa en la Figura 8.1. Aunque la tela de mayor gramaje podría ofrecer beneficios en términos de resistencia, su uso no es práctico para este tipo de estructuras debido a las dificultades en la manipulación y ensamblaje.



Figura 8.1. Prueba de fabricación de panel corrugado con tela de 6 oz

9. Trabajos a futuro

A partir de los resultados y conclusiones obtenidos, se plantea como trabajo futuro escalar la implementación de estructuras corrugadas a tablas de surf completas, asegurando que esta tecnología mejore la resistencia al *crushing* sin comprometer significativamente el peso ni la flexibilidad de las tablas.

Para lograrlo, se debe considerar una distribución estratégica del corrugado en las zonas críticas de la tabla, como los puntos de apoyo principales de pies, codos y rodillas, evitando su aplicación en áreas donde no es necesario para no añadir peso innecesario. Además, es esencial evaluar estas estructuras en condiciones reales de uso para validar su efectividad e identificar áreas de mejora, considerando factores como el impacto de olas, la exposición al agua salada y los cambios de temperatura.

Asimismo, se debería investigar nuevas combinaciones de materiales compuestos, como híbridos de fibra de carbono y fibra de vidrio, para optimizar aún más las propiedades de las tablas. En particular, se podrían explorar configuraciones que utilicen fibra de vidrio de 4 onzas en los tabiques y de 6 onzas en las caras de las estructuras corrugadas.

Esta línea de investigación no solo contribuirá a extender la vida útil de las tablas y mejorar su desempeño estructural, sino que también ofrecerá una alternativa viable y competitiva para la industria del surf, teniendo en cuenta las limitaciones económicas y tecnológicas presentes en el contexto local.

10. Bibliografía

- [1] J. M. D. Correia, G. F. Serra, R. J. Alves De Sousa, A. B. Pereira, y F. A. O. Fernandes, “Expanded (Black) Cork for the Development of an Eco-Friendly Surfboard: Environmental Impact and Mechanical Properties”, *Sustainability*, vol. 14, núm. 2, p. 668, ene. 2022, doi: 10.3390/su14020668.
- [2] C. R. Gibson y A. T. Warren, “Surfboard making and environmental sustainability: New materials and regulations, subcultural norms and economic constraints”.
- [3] J. M. Johnstone, “Flexural testing of sustainable and alternative materials for surfboard construction, in comparison to current industry standard materials”, 2010.
- [4] R. Kwan, R. Fox, F. T. Chan, y P. Tsang, *Enhancing Learning Through Technology: Research on Emerging Technologies and Pedagogies*. WORLD SCIENTIFIC, 2008. doi: 10.1142/6801.
- [5] R. Hill, “The History of Surfboard Design”, Surf Simply. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://surfsimply.com/magazine/the-history-of-surfboard-design>
- [6] “TRADITIONAL WAYS OF KNOWING: Surfing in Hawai‘i | www.manoa.hawaii.edu/sealearning”. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://manoa.hawaii.edu/sealearning/grade-4/physical-science/surfing-waves/traditional-ways-knowing-surfing-waves>
- [7] “The Evolution of Surfboard Design | MapQuest Travel”. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mapquest.com/travel/outdoor-activities/water-sports/surfboard-design-evolution.htm>
- [8] gooddesign_admin, “Surfboard Design Through History | Good Design Australia”, Good Design. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://good-design.org/surfboard-design-through-history/>
- [9] P. Conrad, “Handmade: An Artistic Exploration of Sustainable Surfboard Manufacturing”.
- [10] D. C. Heil y T. Ban, “Evaluating the Effect of Surfboard Stringers on Performance”.
- [11] “Materials, equipment and training for advanced composites with next-day shipping and expert technical advice. - Easy Composites”. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.easycomposites.co.uk/>
- [12] K. Thompson, “Innovations in surfboard manufacturing technologies from COBRA International”, *Reinf. Plast.*, vol. 65, núm. 2, pp. 87–93, abr. 2021, doi: 10.1016/j.repl.2021.02.011.
- [13] “Storms Model | Pro Range | Sharp Eye Surfboards – SharpEye Surfboards Australia”.

- Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sharpeyesurfboards.com.au/products/storms>
- [14] S. S. Store, “Lost Sub Driver 2.0 Double Dart EPS Round 6’1 Surfboard - FCS II”, Surf Station Store. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.surfstationstore.com/products/lost-sub-driver-2-0-double-dart-eps-surfboard-fcs-ii>
- [15] “The Gem”, Firewire Surfboards - United States. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.firewiresurfboards.com/products/prestige-the-gem>
- [16] “Hayden Shapes | Tablas de Surf Innovadoras y Grips de Alto Rendimiento”, Coresurfing Shop. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://coresurfingshop.com/collections/hayden-shapes>
- [17] Q. Ma, M. Rejab, J. Siregar, y Z. Guan, “A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels”, *J. Compos. Mater.*, vol. 55, núm. 18, pp. 2513–2555, ago. 2021, doi: 10.1177/0021998321990734.
- [18] A. G. Mamalis, K. N. Spentzas, D. E. Manolakos, N. Pantelidis, y M. Ioannidis, “Structural and impact behaviour of an innovative low-cost sandwich panel”, *Int. J. Crashworthiness*, vol. 13, núm. 3, pp. 231–236, may 2008, doi: 10.1080/13588260701788559.
- [19] K. Mharsi, P. Casari, A. Sellami, J. Fajoui, y M. Kchaou, “Mechanical Characterization of a Composite Sandwich Core Under Shear Stress Based on a Torsion Test”, en *Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics*, M. Kharrat, M. Baccar, y F. Dammak, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 299–305. doi: 10.1007/978-3-030-52071-7_41.
- [20] “Surfboards Surf FX”, Surf FX. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.surffx.com.au/collections/surfboards>
- [21] K. Imielińska, L. Guillaumat, R. Wojtyra, y M. Castaings, “Effects of manufacturing and face/core bonding on impact damage in glass/polyester–PVC foam core sandwich panels”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, núm. 6, pp. 1034–1041, sep. 2008, doi: 10.1016/j.compositesb.2007.11.007.
- [22] O. Khayal, “MANUFACTURING AND PROCESSING OF COMPOSITE MATERIALS”, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.30822.57928.
- [23] J. L. Dávila *et al.*, *Nuevos Materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*, Primera edición.
- [24] R.-M. Wang, S.-R. Zheng, y Y.-P. Zheng, *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing Limited, 2011. doi: 10.1533/9780857092229.
- [25] A. V. Vakhrushev y A. K. Haghi, Eds., *Composite materials engineering: modeling and technology*, 1st edition. Oakville, ON ; Palm Bay, Florida: Apple Academic Press, Inc, 2020.

- [26] K. K. Chawla, *Composite Materials: Science and Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-28983-6.
- [27] S. T. Peters, Ed., *Handbook of Composites*. Boston, MA: Springer US, 1998. doi: 10.1007/978-1-4615-6389-1.
- [28] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, y R. Rimašauskienė, “Matrix materials used in composites: A comprehensive study”, *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1559–1562, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.086.
- [29] S. R. Sandler y W. Karo, *Polymer syntheses*, 2nd ed. en *Organic chemistry*, no. v. 29. Boston: Academic Press, 1992.
- [30] S. H. Goodman, *Handbook of Thermoset Plastics*, 2nd edition. Westwood, NJ, USA: Noyes Publications, 1998.
- [31] B. Ellis, Ed., *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. doi: 10.1007/978-94-011-2932-9.
- [32] E. M. S. Sanchez, C. A. C. Zavaglia, y M. I. Felisberti, “Unsaturated polyester resins: influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties”, *Polymer*, vol. 41, núm. 2, pp. 765–769, ene. 2000, doi: 10.1016/S0032-3861(99)00184-6.
- [33] “Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications | IntechOpen”. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/39416>
- [34] Y. Gao, P. Romero, H. Zhang, M. Huang, y F. Lai, “Unsaturated polyester resin concrete: A review”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116709, dic. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116709.
- [35] A. B. Cherian, L. A. Varghese, y E. T. Thachil, “Epoxy-modified, unsaturated polyester hybrid networks”, *Eur. Polym. J.*, vol. 43, núm. 4, pp. 1460–1469, abr. 2007, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2006.12.041.
- [36] “Resinas poliéster cristal y resinas poliéster náuticas Servifibras.” Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tiendaservifibras.com/resinas-cauchos/resinas-poliester/#>
- [37] “Novarchem”. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.novarchem.com.ar/>
- [38] M. Mittal y R. Chaudhary, “Effect of Fiber Length and Content on Mechanical and Water Absorption Behavior of Coir Fiber- Epoxy Composite”.
- [39] R. A. Mohammed, M. S. Attallah, y A. Q. Hadi, “Erosive Wear Behavior of Jute Fiber / Polyester resin with Biowaste Materials”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 881, núm. 1, p. 012100, jul. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/881/1/012100.
- [40] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, 3. ed.

Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2008.

- [41] M. Jawaid, M. Thariq, y M. Thariq, “Sustainable Composites for Aerospace Applications”.
- [42] P. S, S. Km, N. K, y S. S, “Fiber Reinforced Composites - A Review”, *J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 06, núm. 03, 2017, doi: 10.4172/2169-0022.1000341.
- [43] C. G. Papakonstantinou, P. Balaguru, y R. E. Lyon, “Comparative study of high temperature composites”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 32, núm. 8, pp. 637–649, dic. 2001, doi: 10.1016/S1359-8368(01)00042-7.
- [44] L. Osorio, E. Trujillo, A. W. Van Vuure, y I. Verpoest, “Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites”, *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 30, núm. 5, pp. 396–408, mar. 2011, doi: 10.1177/0731684410397683.
- [45] E. J. Barbero, *Introduction to composite materials design*, Third edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.
- [46] S. Rana y R. Figueiro, *Advanced composites in aerospace engineering*. en Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, no. 70.
- [47] A. B. Strong, *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*, 2nd ed. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [48] A. Kausar, I. Ahmad, S. A. Rakha, M. H. Eisa, y A. Diallo, “State-Of-The-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing—to—High Performance Applications”, *J. Compos. Sci.*, vol. 7, núm. 3, p. 102, mar. 2023, doi: 10.3390/jcs7030102.
- [49] A. G. Mamalis, K. N. Spentzas, D. E. Manolakos, N. Pantelelis, y M. Ioannidis, “Structural and impact behaviour of an innovative low-cost sandwich panel”, *Int. J. Crashworthiness*, vol. 13, núm. 3, pp. 231–236, may 2008, doi: 10.1080/13588260701788559.
- [50] W. Ma y R. Elkin, *Sandwich Structural Composites: Theory and Practice*, 1a ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. doi: 10.1201/9781003035374.
- [51] E. E. Gdoutos y I. M. Daniel, “FAILURE MECHANISMS OF COMPOSITE SANDWICH STRUCTURES”.
- [52] E. E. Gdoutos, I. M. Daniel, y K. A. Wang, “Indentation failure in composite sandwich structures”.
- [53] V. I. Rizov, “Elastic–plastic response of structural foams subjected to localized static loads”, *Mater. Des.*, vol. 27, núm. 10, pp. 947–954, ene. 2006, doi: 10.1016/j.matdes.2005.02.013.
- [54] H. Taghipoor y M. Sefidi, “Analysis of deformation and failure mechanism of sandwich beams with lattice core under three-point bending load”, el 5 de abril de 2024, *In Review*.

doi: 10.21203/rs.3.rs-4162912/v1.

- [55] S. Abrate, “Localized Impact on Sandwich Structures With Laminated Facings”, *Appl. Mech. Rev.*, vol. 50, núm. 2, pp. 69–82, feb. 1997, doi: 10.1115/1.3101689.
- [56] S. B. Loganathan y H. K. Shivanand, “Effect of Core Thickness and Core Density on Low Velocity Impact Behavior of Sandwich Panels with PU Foam Core”, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 03, núm. 03, pp. 164–170, 2015, doi: 10.4236/jmmce.2015.33019.
- [57] E. A. Flores-Johnson y Q. M. Li, “Experimental study of the indentation of sandwich panels with carbon fibre-reinforced polymer face sheets and polymeric foam core”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, núm. 5, pp. 1212–1219, jul. 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.02.013.
- [58] A. Farrokhhabadi, S. Ahmad Taghizadeh, H. Madadi, H. Norouzi, y A. Ataei, “Experimental and numerical analysis of novel multi-layer sandwich panels under three point bending load”, *Compos. Struct.*, vol. 250, p. 112631, oct. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112631.
- [59] S. A. Taghizadeh *et al.*, “Characterization of compressive behavior of PVC foam infilled composite sandwich panels with different corrugated core shapes”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 135, pp. 160–172, feb. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2018.11.019.
- [60] H. M. Bahabadi, A. Farrokhhabadi, y G. H. Rahimi, “Investigation of debonding growth between composite skins and corrugated foam-composite core in sandwich panels under bending loading”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 230, p. 106987, may 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.106987.
- [61] “Ficha técnica Dipreg 86”. [En línea]. Disponible en: <https://www.novarchem.com.ar/storage/app/uploads/public/5dd/568/192/5dd56819266b8168754278.pdf>
- [62] G. Bogoeva-Gaceva y A. Buzarovska, “Rapid method for evaluation of cure kinetics of thermosetting polymers”, *Maced. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 32, núm. 1, p. 337, nov. 2013, doi: 10.20450/mjccce.2013.303.
- [63] G. Francucci, “Cinética de Curado”. Cátedra de materiales compuestos, Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [64] Woo Il Lee, A. C. Loos, y G. S. Springer, “Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin”, *J. Compos. Mater.*, vol. 16, núm. 6, pp. 510–520, nov. 1982, doi: 10.1177/002199838201600605.
- [65] M. Balasubramanian, *Composite Materials and Processing*, 0 ed. CRC Press, 2013. doi: 10.1201/b15551.
- [66] ASTM, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. D3039, 2008.
- [67] “MATS347 Composites Design and Manufacture”. Consultado: el 24 de noviembre de

2024. [En línea]. Disponible en: <https://ecm-academics.plymouth.ac.uk/jsummerscales/MATS347/MATS347A1%20basics.htm>

- [68] ASTM, “Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions”. C-393, 2000.
- [69] ASTM, “Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force”. D6264/D6264M, 2017.
- [70] ASTM, “Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event”. D7136/D7136M, 2015.
- [71] G. Pinter, Z. Major, M. Haager, y R. W. Lang, “RANKING OF PE PIPE GRADES BY THEIR FAILURE BEHAVIOR UNDER IMPACT LOADS”.
- [72] M. Jawaid, M. Thariq, y M. Thariq, “Sustainable Composites for Aerospace Applications”.
- [73] H. Cai *et al.*, “Curing kinetics study of epoxy resin/flexible amine toughness systems by dynamic and isothermal DSC”, *Thermochim. Acta*, vol. 473, núm. 1–2, pp. 101–105, jul. 2008, doi: 10.1016/j.tca.2008.04.012.
- [74] H. Rahmani, S. H. M. Najafi, S. Saffarzadeh-Matin, y A. Ashori, “Mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites: Effects of number of plies, fiber contents, and angle-ply layers”, *Polym. Eng. Sci.*, vol. 54, núm. 11, pp. 2676–2682, nov. 2014, doi: 10.1002/pen.23820.
- [75] A. C. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, y M. M. Islam, “Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions”, *Compos. Struct.*, vol. 92, núm. 4, pp. 984–995, mar. 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.09.046.
- [76] Y. Cai *et al.*, “Study on the Mechanical Properties of a Carbon-Fiber/Glass-Fiber Hybrid Foam Sandwich Structure”, *Materials*, vol. 17, núm. 9, p. 2023, abr. 2024, doi: 10.3390/ma17092023.
- [77] I. Daniel, “Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, núm. 12–13, pp. 2455–2463, sep. 2000, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00039-7.
- [78] C. Uzay, N. Geren, M. H. Boztepe, y M. Bayramoglu, “Bending behavior of sandwich structures with different fiber facing types and extremely low-density foam cores”, *Mater. Test.*, vol. 61, núm. 3, pp. 220–230, mar. 2019, doi: 10.3139/120.111311.
- [79] F. F. P. Kollmann, E. W. Kuenzi, y A. J. Stamm, *Principles of Wood Science and Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1975.
- [80] T. Anderson y E. Madenci, “Graphite/epoxy foam sandwich panels under quasi-static

- indentation”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 67, núm. 4, pp. 329–344, nov. 2000, doi: 10.1016/S0013-7944(00)00066-7.
- [81] Z. Chen *et al.*, “Experimental and modeling investigations of the behaviors of syntactic foam sandwich panels with lattice webs under crushing loads”, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 60, núm. 1, pp. 450–465, jul. 2021, doi: 10.1515/rams-2021-0040.
- [82] H. Zniker, I. Feddal, M. K. El Kouifat, A. El Magri, y M. El Hasnaoui, “Numerical and experimental investigation of quasi-static indentation response of PVC foam sandwich and GFRP laminated composites”, *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, abr. 2024, doi: 10.1556/1848.2024.00790.
- [83] J. Zhang, P. Supernak, S. Mueller-Alander, y C. H. Wang, “Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure”, *Mater. Des. 1980-2015*, vol. 52, pp. 767–773, dic. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.018.
- [84] B. Han, L. Yan, B. Yu, Q. Zhang, C. Chen, y T. Lu, “Collapse mechanisms of metallic sandwich structures with aluminum foam-filled corrugated cores”, *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 9, núm. 4, pp. 397–425, oct. 2014, doi: 10.2140/jomms.2014.9.397.
- [85] S. Zhu y G. B. Chai, “Damage and failure mode maps of composite sandwich panel subjected to quasi-static indentation and low velocity impact”, *Compos. Struct.*, vol. 101, pp. 204–214, jul. 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.02.010.
- [86] I. M. Daniel y E. E. Gdoutos, “Failure Modes of Composite Sandwich Beams”, en *Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures*, I. M. Daniel, E. E. Gdoutos, y Y. D. S. Rajapakse, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2009, pp. 197–227. doi: 10.1007/978-90-481-3141-9_9.
- [87] B. S. Thatte, G. S. Chandekar, A. D. Kelkar, y P. Chaphalkar, “Studies on Behavior of Carbon and Fiberglass Epoxy Composite Laminates under Low Velocity Impact Loading using LS-DYNA®”.
- [88] C. Atas y U. Potoğlu, “The effect of face-sheet thickness on low-velocity impact response of sandwich composites with foam cores”, *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 18, núm. 2, pp. 215–228, mar. 2016, doi: 10.1177/1099636215613775.
- [89] “Bomba De Vacío Dosivac Dvr2 60 Lts/min Ghg - \$ 340.450”. Consultado: el 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-1900062034-bomba-de-vacio-dosivac-dvr2-60-lts-min-ghg-_JM
- [90] JIANGSU KEQIANG NEW MATERIAL CO, “Proforma Invoice”.
- [91] “Grupo Poliplast | Poliuretanos, poliureas y plásticos reforzados”. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://grupopoliplast.com.ar/>

