

COMPARACIÓN ENTRE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE COMPUESTOS “INFUSIÓN POR VACÍO” Y “LAMINACIÓN MANUAL”

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Departamento de Ingeniería en Materiales

Facultad de Ingeniería – UNMdP

Mar del Plata, 20 de febrero de 2025

Autor: Joaquin Bautista Castillo

Contacto: joaquinbaucastillo@gmail.com

DNI: 41449821

Matricula: 14255

Director: Dr. Ing. Gastón Martín Francucci

Codirector: Dr. Ing. Leandro Nicolás 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/).

COMPARACIÓN ENTRE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE COMPUESTOS “INFUSIÓN POR VACÍO” Y “LAMINACIÓN MANUAL”

Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales

Departamento de Ingeniería en Materiales

Facultad de Ingeniería – UNMdP

Mar del Plata, 20 de febrero de 2025

Autor: Joaquin Bautista Castillo

Contacto: joaquinbaucastillo@gmail.com

DNI: 41449821

Matricula: 14255

Director: Dr. Ing. Gastón Martín Francucci

Codirector: Dr. Ing. Leandro Nicolás Ludueña

Índice

Resumen.....	5
1.Introducción.....	6
1.1. Materiales compuestos de matriz termorrígida	6
1.1.1 Refuerzos - Fibras.....	7
Propiedades relevantes de los refuerzos	9
<i>Arquitectura de los tejidos de refuerzo</i>	9
<i>Permeabilidad</i>	10
<i>Compresibilidad-compactación</i>	11
1.1.2. Matrices poliméricas.....	12
Propiedades relevantes de la matriz	14
<i>Cinética de curado</i>	14
<i>Viscosidad y tiempo de gel</i>	15
<i>Solubilidad de gases en la resina</i>	15
1.2 Procesamiento de materiales compuestos: hand lay up vs. Infusion	16
1.2.1 “Hand Lay Up” o Moldeo Manual (HLU)	16
1.2.2 Infusión por vacío (VI)	17
1.3 Planteo de la problemática.....	20
2. Objetivos	22
Objetivos generales	22
Objetivos Específicos.....	23
3. Experimental.....	23
3.1 Materiales	23
3.1.1 Tejidos de refuerzo	23
3.1.2 Resina termorrígida	24
3.2 Procesamiento	25
3.2.1 Metodología experimental	25
3.2.2 Preparación de las telas	26
3.2.3 Preparación de la resina	26
3.2.4 Hand Lay Up	27
3.2.5 Infusión por vacío.....	27
Cálculo de factibilidad de llenado en cambio de estrategia de infusión	30
3.2.6 Postcurado.....	31
3.3 Métodos de caracterización de la matriz.....	31
3.3.1 Tiempo de gel.....	31

3.3.2	Determinación de ciclo de postcurado	31
3.4	Métodos de caracterización de los compuestos.....	32
3.4.1	Propiedades mecánicas	32
3.4.2	Densidad y contenido de fibra.....	33
	<i>Densidad por desplazamiento</i>	33
	<i>Contenido de fibra por ignición</i>	34
3.4.5	Microscopía óptica	36
4.	Resultados y discusión	37
4.1	Caracterización de la resina	37
4.1.1	Tiempo de gel.....	37
4.1.2	Determinación de ciclo de postcurado	37
4.2	Propiedades mecánicas del compuesto	39
4.2.1	Efecto de desgasificación.....	39
4.2.2	Efecto de la estrategia de infusión	42
4.2.3	Efecto del número de telas de refuerzo.....	43
4.2.4	Efecto del material de refuerzo.....	47
5.	Diseño y fabricación de una pieza real.....	48
5.1	Diseño CAD de pieza y molde.....	49
5.2	Fabricación de molde	49
5.3	Fabricación de la pieza mediante infusión por vacío	50
5.4	Prueba de la pieza.....	54
6.	Análisis económico costo – beneficio de los procesos.....	54
6.1	Inversión	55
6.2	Costo de materiales y mano de obra.....	55
7.	Conclusiones.....	56
8.	Trabajo a futuro	57
	Referencias	59
	Anexo.....	63

Resumen

Este trabajo aborda una comparación entre las técnicas de procesamiento de materiales compuestos conocidas como moldeo manual o *hand lay up* (HLU) e infusión por vacío (VI). Estos métodos de procesamiento son muy utilizados en la industria, especialmente en las pequeñas y medianas empresas locales y tiene especial interés en la región atlántica de nuestro país. Son dos técnicas con campos de aplicación similares por lo que la elección de una por sobre la otra no es trivial. Teóricamente, el proceso de infusión por vacío debería permitir obtener piezas de mejor calidad que el proceso de laminación manual por dos factores principales: mayor contenido porcentual de refuerzo en el laminado (aplica presión externa aplicada sobre la preforma) y menor porosidad en el compuesto obtenido (el proceso de impregnación se lleva a cabo en una cavidad de moldeo sometida a vacío). Si bien existe gran cantidad de información en la literatura comparando ambas técnicas, los resultados reportados son muchas veces opuestos a los esperados o bien en la descripción del procedimiento experimental se omite información sobre procedimientos y variables de proceso que podrían tener influencia en los mismos.

La motivación de este trabajo surge de la necesidad de generar información confiable determinando en qué condiciones de proceso resulta beneficioso el uso de una técnica o la otra, desde el punto de la calidad del material obtenido.

De esta manera, el objetivo de este trabajo es proponer identificar las variables de procesamiento y las características de la materia prima que afectan significativamente al resultado obtenido por ambos procesos y cuantificar las diferencias en las propiedades de los materiales compuestos fabricados y en la calidad de las piezas obtenidas, de modo de poder contar con criterios útiles para la selección entre los métodos mencionados.

Para comparar ambos procesos y evaluar el efecto de las variables de procesamiento, se confeccionaron probetas de material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio y fibras naturales de yute a las que se le realizaron ensayos mecánicos (tracción uniaxial) y otros ensayos de caracterización (densidad y volumen de fibras por calcinación).

Se pudo demostrar los efectos positivos de la desgasificación en la resistencia mecánica para ambos procesos. También, la dependencia del número de telas de la preforma en la selección del método de procesamiento debido a los distintos mecanismos de compactación de los refuerzos, siendo beneficioso la utilización de VI conforme se aumenta el número de capas del refuerzo. Además, se demostró que es posible mejorar la fracción volumétrica de fibras y las propiedades mecánicas si se detiene el ingreso de resina antes que se llegue a impregnar completamente la preforma. Por otro lado, se concluyó que la morfología y arquitectura del tejido utilizado también es determinante en los resultados comparativos entre ambas técnicas. Tejidos con excelente compresibilidad no se benefician tanto al utilizar VI en vez de HLU como los tejidos con baja compresibilidad.

Por último, se pudo confeccionar satisfactoriamente una pieza real con los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de este trabajo.

1.Introducción

1.1. Materiales compuestos de matriz termorrígida

Los materiales compuestos de matriz termorrígida consisten en fibras de alta resistencia y módulo embebidas en una matriz polimérica con interfaces diferenciadas. Ambos componentes mantienen sus características físicas y químicas, pero producen una combinación de propiedades que no pueden ser alcanzadas por separado. En general, las fibras son las que soportan la mayoría de las cargas mientras que la matriz mantiene las fibras en su orientación correcta y actúa como medio de transferencia de carga entre ellas y las protege del medio circundante. Las propiedades mecánicas de estos materiales dependen fuertemente de la dirección de la medición y son, por lo tanto, materiales no isotrópicos [1] .

La forma más común de utilización de estos materiales y la de interés para este proyecto final es el laminado, que se compone de varias capas de telas finas de fibras apiladas embebidas en matriz.

Los compuestos estructurales de matriz polimérica termorrígida presentan elevadas propiedades mecánicas específicas (alta resistencia y rigidez con bajo peso), buena resistencia térmica y química, excelente durabilidad, alta estabilidad dimensional, ofrecen flexibilidad de diseño del material y permiten la fabricación de piezas de geometrías complejas [2].

Por estos motivos, suelen ser empleados en componentes de muchas industrias como aeroespacial, naval, automotriz y transporte en general, energía eólica, artículos deportivos de alto desempeño, entre otras [3] (Figura 1.1).

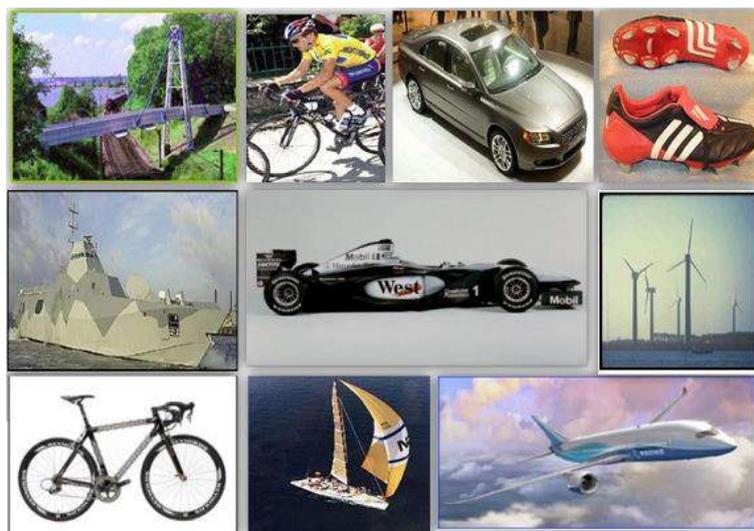


Figura 1.1. Algunas aplicaciones de materiales compuestos reforzados por fibras.

1.1.1 Refuerzos - Fibras

El refuerzo es la fase dispersa en la matriz en un material compuesto y puede utilizarse principalmente en dos morfologías diferentes, en forma de fibras o de partículas. Las fibras son estructuras que se caracterizan por tener una gran relación de esbeltez, siendo la morfología más utilizada cuando se busca maximizar el desempeño mecánico del material [4]. En este proyecto final sólo se analizarán los refuerzos de fibras.

Como se mencionó anteriormente, el refuerzo soporta la mayor parte de la carga. Por ejemplo, en el caso de tensión uniaxial sobre un compuesto unidireccional (todas las fibras alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado), el módulo del material compuesto (E_c) depende del módulo de la matriz (E_m) y la fibra (E_f) y la fracción volumétrica de fibra según la regla de las mezclas

$$E_c = E_m + v_f \cdot (E_f - E_m) \quad (1)$$

Como el módulo de la fibra es órdenes de magnitud mayor al de la matriz, la resistencia de un material depende en parte de la resistencia mecánica del refuerzo y de la fracción volumétrica del mismo en el material. En la Figura 1.2 se observa un gráfico de la fracción de carga soportada por el refuerzo (P_f/P_c) en función de la relación de módulos (E_f/E_m) para distintas fracciones volumétricas de fibras. Como esta relación es generalmente mayor a 10, puede verse que para v_f de 0,2 o superiores, el refuerzo soporta más del 70% de la carga [5]. Por ello, en el procesamiento de materiales compuestos se busca maximizar la fracción de fibras en el material resultante.

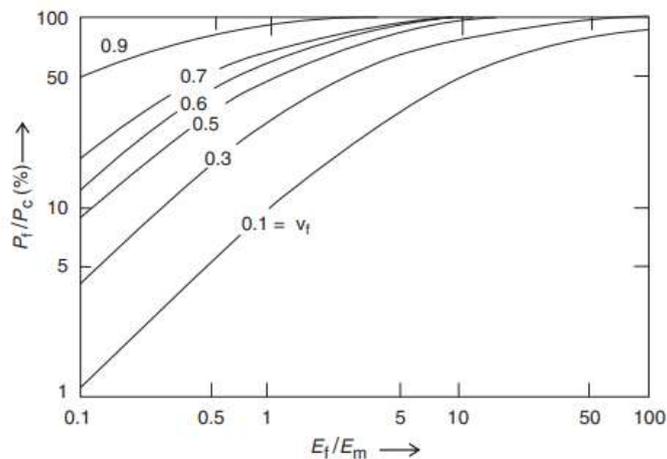


Figura 1.2. Fracción de carga soportada por fibras en función de la relación de módulos. [5]

Los refuerzos confeccionados a partir de fibras pueden presentar arquitecturas o configuraciones variadas, siendo las principales: fibras unidireccionales; continuas bidireccionales; continuas multidireccionales; fibras cortas unidireccionales y fibras cortas al azar. Aumentando la multidireccionalidad de las fibras se aumenta la homogeneidad direccional de las propiedades de la lámina. En el caso de utilizar refuerzos direccionales y necesitar isotropía en el material, se confeccionan multilaminados alternando la dirección principal del refuerzo, intentando siempre mantener simetría (misma secuencia de apilamiento por encima y debajo del plano medio) y balance (por

cada lámina a un cierto ángulo existe otra colocada en una orientación opuesta). De esta manera se asegura una distribución de tensiones homogénea evitando tensiones residuales y deformaciones post procesamiento [6].

Los refuerzos de fibra más utilizados en la industria son las fibras de vidrio, de carbono y naturales [4] (Figura 1.3)

Las **fibras de vidrio** son las más comunes de todas las fibras de refuerzo para los materiales de matriz polimérica (PMC). Las principales ventajas de las fibras de vidrio son su buena relación entre costo y propiedades mecánicas. Por este motivo este tipo de fibras es el más utilizado en la confección de embarcaciones, aspas de molinos eólicos, industria aeronáutica, deportes náuticos, entre otros. El principal componente de las fibras de vidrio es el SiO₂ junto a otros óxidos [7].

La forma comercial básica de una fibra continua de vidrio es una *strand* que es un conjunto de 204 filamentos paralelos. Estos *strands* pueden luego tejerse por métodos textiles y se obtiene una tela o *ply*.

Las **fibras de carbono** están compuestas por una mezcla de carbono amorfo y grafito. Poseen una relación de densidad-resistencia a la rotura y densidad-módulo de elasticidad muy altas comparada a las fibras de otro tipo. Además, tiene alta conducción térmica y eléctrica y bajo coeficiente de expansión térmica. La principal desventaja es el alto costo de estas fibras.

Las fibras de carbono están comercialmente disponibles en tres formas básicas: mecha larga y continua, cortada (de 6 a 50 mm de longitud) y molida (de 30 a 3000 micrones de longitud). De la misma manera que con las fibras de vidrio, mechas de fibra de carbono se tejen para obtener telas de refuerzo de variadas configuraciones [8].

Las **fibras naturales** provienen de plantas comúnmente utilizadas en la agricultura, como yute, sisal, lino, cáñamo, entre otras. Los componentes de las fibras naturales son microfibrillas de celulosa dispersas en una matriz amorfa de hemicelulosa y lignina.

Las fibras naturales presentan algunas ventajas en comparación con las fibras sintéticas mencionadas. En primer lugar, son amigables con el medio ambiente, ya que son biodegradables, su producción requiere un consumo energético considerablemente menor y durante el crecimiento de la planta éstas absorben CO₂ de la atmósfera. Además, poseen una densidad que varía entre 1.25 y 1.5 g/cm³, inferior a la de las fibras de vidrio tipo E (2.54 g/cm³) y a la de las fibras de carbono (1.8 a 2.1 g/cm³). Además, los compuestos elaborados con fibras naturales ofrecen una mayor amortiguación acústica y de vibraciones y su costo es significativamente menor.

Sin embargo, sus principales desventajas son las inferiores propiedades mecánicas en comparación a las otras fibras, bajo punto de degradación térmica y gran absorción de humedad. Además, debido a que en su interior las fibras son huecas, se requiere una gran cantidad de matriz polimérica para que exista una unión efectiva de las dos fases [9].

En la Tabla 1.1 se detallan algunas propiedades de los refuerzos antes mencionados.

Tabla 1.1. Propiedades de fibras de vidrio, carbono y yute [47].

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Módulo Elástico (Gpa)	Tensión a la rotura (Mpa)	Elongación a la rotura (%)	Temperatura de degradación (°C)
Vidrio	2,6	73	1800-2700	2,5	846
Carbono	1,8	260	3500-5000	1,4-1,8	815
Yute	1,45	10-32	450-550	1,1-1,5	200



Figura 1.3. De izq. a der. Tejidos bidireccionales de fibra de vidrio, carbono y yute.

Propiedades relevantes de los refuerzos

Arquitectura de los tejidos de refuerzo

La arquitectura de los tejidos de refuerzo se define como la disposición de las fibras en una lámina, que no sólo influye en las propiedades del material compuesto, sino también en su procesamiento. La misma se clasifica en base a la continuidad y orientación de la mecha de fibra, y al tipo de entrelazado de las mismas. Esta característica del refuerzo afecta la respuesta a la compresión transversal del apilamiento de tejidos (preforma) que es una propiedad importante que define el contenido volumétrico máximo de fibras alcanzable durante el procesamiento de compuestos. Además, afecta al flujo de resina a través del lecho fibroso durante la etapa de llenado del molde lo cual impacta en los tiempos de procesamiento y microestructura final del compuesto (contenido de huecos y mojado de las fibras) lo que a su vez también afecta a sus propiedades y desempeño del compuesto en servicio [6] [10].

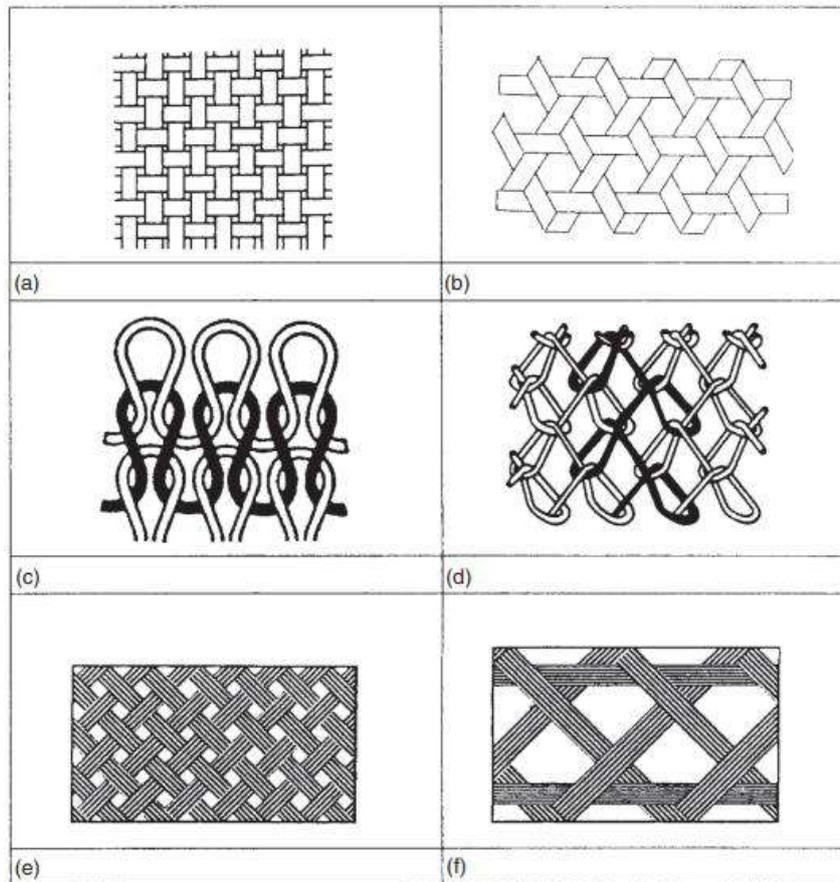


Figura 1.4. Arquitectura de tejidos de refuerzo. (a) bidireccional, (b) multidireccional, (c) tejido en trama, (d) tejido en urdimbre, (e) trenzado biaxial, (f) trenzado triaxial. [10]

La arquitectura de fibra utilizada en este trabajo es del tipo (a) mostrado en la Figura 1.4 (tejidos bidireccionales). En este caso, el refuerzo presenta las mejores propiedades mecánicas en las dos direcciones axiales de las fibras.

El apilamiento de tejidos de refuerzo previo a la impregnación de resina se denomina preforma. La misma está definida por el tipo de refuerzo (tipo de fibra y arquitectura del refuerzo), la orientación de cada lámina en el tejido y el número de capas utilizado [10].

Permeabilidad

El flujo de resina a través de la red de fibras se puede describir con la Ley de Darcy, que se derivó originalmente para el flujo de fluidos newtonianos a través de un medio poroso [11]. Esta ecuación relaciona la tasa de flujo volumétrico de resina Q por unidad de área con el gradiente de presión, la permeabilidad y la viscosidad del fluido. Para un flujo unidimensional en la dirección x

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot \Delta L} \quad (2)$$

donde Q es la velocidad de flujo, ΔL es la longitud de la preforma, μ es la viscosidad de la resina, ΔP el gradiente de presión aplicado, A el área del molde y K es la permeabilidad de la preforma.

Al mismo tiempo, la dependencia de la permeabilidad con la fracción volumétrica de fibras puede modelarse la ecuación de Kozeny-Carman modificada:

$$K = \frac{(1 - Vf)^{n+1}}{c \cdot Vf^n} \quad (3)$$

En donde C y n son parámetros empíricos y vf es la fracción volumétrica de fibras en la preforma.

Puede verse que la permeabilidad depende de la fracción volumétrica de fibras, que también define la porosidad de la preforma (1-vf). Estos dos factores están fuertemente influenciados por la arquitectura de los refuerzos, las discontinuidades que pudieran presentarse y el grado de compactación del refuerzo [12][13].

En el caso de las fibras naturales, la permeabilidad también se ve afectada por sus características morfológicas y su polaridad. Las fibras pueden absorber el fluido durante la impregnación con resina, hinchándose y reduciendo el espacio libre para el flujo de resina. Al mismo tiempo las cavidades internas de la fibra, así como su gran discontinuidad disminuyen la permeabilidad de los tejidos naturales en comparación a los sintéticos [14].

Compresibilidad-compactación

En todos los métodos de fabricación de compuestos ocurre la compresión de la preforma dentro de un molde, con el objetivo de consolidar el laminado (generar interpenetración entre las láminas) para incrementar la fracción volumétrica de fibras y remover aire atrapado en la preforma.

La compactación de la preforma aplasta las mechas de fibras, reduce los espacios entre las fibras y entre las mechas, empaqueta más densamente las láminas de refuerzo y genera deformación elástica en las fibras. Durante el proceso de compactación, la preforma se va deformando mediante uno o varios de los siguientes mecanismos: deformación transversal de las mechas de fibra, aplastamiento de las mechas, deformación en flexión de las mechas, condensación de huecos o espacios vacíos entre las fibras y anidamiento o *nesting* (desplazamientos geométricos entre mechas adyacentes). La respuesta a la compactación de los refuerzos tejidos está influenciada principalmente por la deformación de las mechas de fibra (deformación transversal y en flexión, y aplastamiento) y *nesting*, mientras que en los *mats* de fibras al azar los mecanismos predominantes son el aplastamiento de las fibras y la condensación de huecos [14], [15].

La respuesta de las preformas a la compactación puede ser dividida en tres partes, como se muestra en la Figura 1.5. La primera región lineal de la curva está relacionada con la reducción de los poros y espacios libres entre las mechas de fibras, y también con la flexión a bajas cargas de las mechas. En esta etapa, la resistencia a la compactación generada por la preforma es muy baja, por lo que la pendiente es prácticamente nula. En

la segunda etapa de la curva la fuerza de compresión aumenta rápidamente debido al rápido incremento en los puntos de contacto y la fricción entre las fibras, como consecuencia de la reducción en el espesor. Además, en esta etapa ocurren los procesos de *nesting* e intercalamiento entre capas adyacentes. En la tercera parte de la curva, se produce la reducción de los espacios libres entre las fibras y el deslizamiento de las fibras cesa, por lo que la respuesta lineal a la compactación de esta etapa se relaciona con el módulo elástico transversal de las fibras [16].

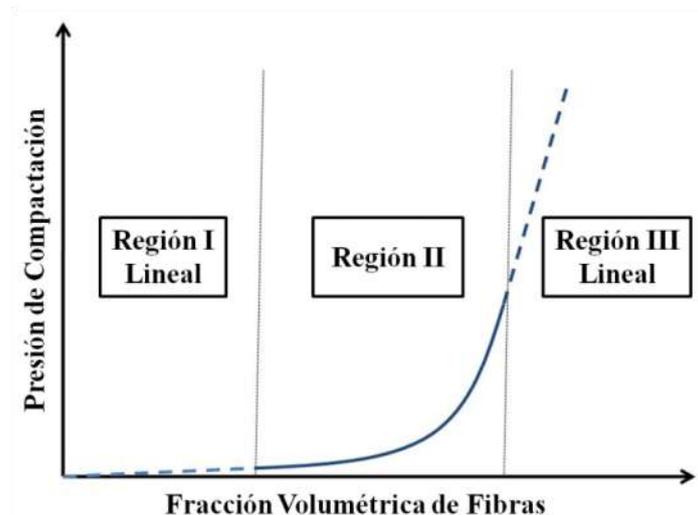


Figura 1.5. Comportamiento de la fracción volumétrica de fibras en una preforma con la presión de compactación [16].

Además, varios autores han encontrado que la cantidad de capas de refuerzo afecta a la compactación. A mayor número de capas, se ven más favorecidos los mecanismos de compactación (hay mayor probabilidad de ocurrencia de éstos) y por lo tanto el “espesor por lámina” disminuye y la fracción volumétrica de fibra aumenta [17].

El origen de la fibra también afecta la compactación del refuerzo. Algunos refuerzos naturales, como los tejidos de yute presentan mechas compuestas por fibras cortas retorcidas que, sumado a la rugosidad superficial propia de las fibras, reducen la compactabilidad [9].

1.1.2. Matrices poliméricas

Como se mencionó anteriormente, las funciones de la matriz en un material compuesto reforzado con fibras son: mantener las fibras en su lugar; transferir tensiones entre las fibras; proporcionar una barrera contra un entorno adverso, como los productos químicos y la humedad, y proteger la superficie de las fibras de la degradación mecánica (por ejemplo, por abrasión) [18].

Las matrices poliméricas están divididas en dos grandes grupos: termoplásticas y termorrígidas. Las de interés y uso para este proyecto final son las termorrígidas. La

elección de resinas termorrígidas como matriz en un material compuesto basado en tejidos de refuerzo de fibras largas, se debe principalmente a la baja viscosidad a temperatura ambiente previo al curado, que permite un buen mojado de los mismos. Además, este tipo de polímeros presentan una buena estabilidad térmica y química luego del curado y baja relajación ante carga constante [19].

Los polímeros termorrígidos se almacenan y utilizan en los procesos de fabricación en estado líquido y el estado sólido se alcanza mediante una reacción química en donde las cadenas poliméricas se unen en una red tridimensional de entrecruzamiento. Esta reacción de polimerización se denomina curado.

Una vez obtenido este entrecruzamiento, dado que la red está formada por enlaces covalentes el polímero no puede fundirse mediante calor, sino que, por encima de determinada temperatura, se degrada por la ruptura generalizada de dichos enlaces [20].

Entre las resinas más utilizadas se encuentran la resina epoxi y poliéster insaturada [19].

En el caso de la resina **epoxi** los materiales de partida para la matriz epoxi son resinas orgánicas líquidas de bajo peso molecular que contienen varios grupos epóxidos (comúnmente Diglicidil eter de bisfenol A), que son anillos de tres miembros de un átomo de oxígeno y dos átomos de carbono (Figura 1.6).

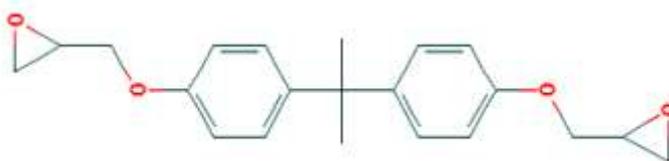


Figura 1.6. Estructura química de los monómeros de resina epoxi [21].

Las resinas epoxi son muy reactivas y pueden reaccionar con diferentes agentes de curado, normalmente aminas como la Dietilentriamina. La reacción de polimerización es de crecimiento por pasos.

Las principales ventajas de las resinas epoxi son: gran variedad de propiedades, debido a la gran variedad de materiales de partida, agentes de curado y modificadores disponibles, ausencia de volátiles, baja contracción, excelente resistencia química y a solventes y excelente adhesión a muchos sustratos [21].

Las principales desventajas son el alto costo y largos tiempos de curado.

El material de partida de la resina **poliéster** es una resina insaturada con una cantidad de dobles enlaces carbono-carbono ($C=C$) que luego por medio de reacción por radicales serán rotos para generar la reacción de curado. Los monómeros más comunes son el anhídrido maleico y el etilenglicol, con peróxido orgánico como catalizador y estireno como agente de entrecruzamiento [22].

La principal ventaja de la resina poliéster es su bajo costo, mientras que la principal desventaja es la alta contracción volumétrica post curado (5-12 %) en comparación a una epoxi (1-5%) [23]. Por motivos de costo, se seleccionó esta resina para la elaboración de este proyecto final.

Propiedades relevantes de la matriz

Cinética de curado

La cinética de curado de una resina termorrígida determina la evolución de la conversión (avance de reacción de entrecruzamiento) en el tiempo en función de la temperatura y, además, la evolución de la velocidad de la reacción en función de la conversión (relacionada con el tiempo) y de la temperatura. Conocer la cinética de curado permite optimizar el ciclo productivo, evitando defectos causados por un desmolde prematuro y pérdidas energéticas innecesarias. También permite establecer una ventana de procesamiento (rangos de valores de tiempo, temperatura y presión de proceso) que permite obtener piezas libres de defectos. Además, en las técnicas de procesamiento que involucran la preparación de una resina reactiva por medio del mezclado con métodos manuales de la resina con su catalizador/endurecedor, conocer la cinética de curado es importante para establecer la “vida en recipiente” o “*pot life*” de la resina [24].

La cinética de curado puede obtenerse por varios métodos, a partir del calor de reacción involucrado (análisis térmico), la creación o desaparición de grupos activos (análisis infrarrojo, FTIR) o los cambios en la viscosidad (análisis reológico). A los efectos de este proyecto final solo se comentará sobre el análisis térmico de la cinética de curado [25].

La reacción de curado de una resina es exotérmica. Por tanto, puede relacionarse el calor liberado con el avance y nivel de curado obtenido.

Los ensayos se realizan en un calorímetro diferencial de barrido (DSC) en el que una pequeña muestra, de unos pocos miligramos se analiza de forma isotérmica (es decir, a temperatura constante) o dinámica (es decir con un aumento uniforme de la temperatura). La instrumentación del DSC registra eventos en la muestra que generen o consuman en función del tiempo [26]. Los gráficos que se obtienen son como los siguientes (Figura 1.7)

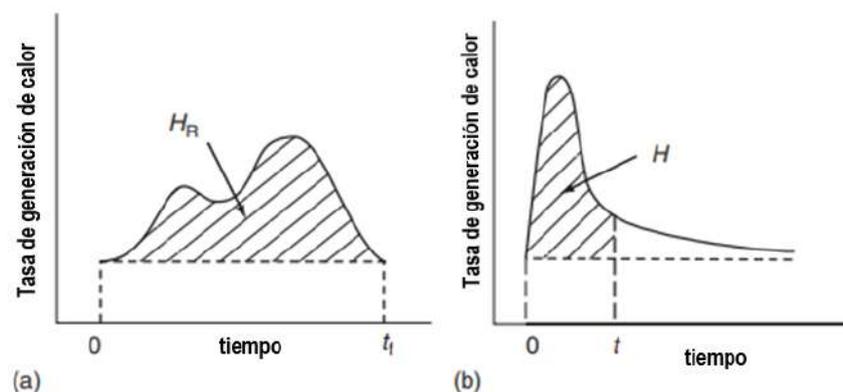


Figura 1.7. Gráficos típicos de ensayo de DSC. a) ensayo dinámico, b) ensayo isotérmico [26]

La generación total de calor para completar una reacción de curado (es decir, 100% de grado de curado) es igual al área bajo la curva tasa de generación de calor-tiempo obtenida en un experimento de calentamiento dinámico (Ec. 4)

$$H = \int_0^t \left(\frac{dQ}{dt} \right)_i dt, \quad (4)$$

Por tanto, realizando un análisis de DSC isotérmico a una determinada temperatura y comparando el área bajo la curva obtenido con el área de la corrida dinámica, puede estimarse el nivel de avance de la reacción obtenido durante el curado a dicha temperatura [26].

Esto es particularmente útil para corroborar si un determinado proceso de postcurado de un material compuesto obtiene un grado de avance cercano a 100%, como sería deseable para maximizar las propiedades del material [27].

Viscosidad y tiempo de gel

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir bajo tensiones de cizallamiento. El material de partida de una resina termorrígida es un fluido de baja viscosidad. Sin embargo, su viscosidad aumenta con el curado y tiende a infinito a medida que se transforma en una masa sólida.

La velocidad de aumento de la viscosidad es baja en la fase inicial del curado. Una vez alcanzado un umbral de curado, la viscosidad de la resina aumenta a un ritmo muy rápido. El tiempo en el que la viscosidad se hace infinita es el tiempo de gel. En este estado la resina se ha vuelto una macromolécula tridimensional no soluble [28]. El tiempo de gel es un parámetro importante de moldeo, ya que el flujo de resina en el molde se vuelve cada vez más difícil a medida que la viscosidad de la resina avanza y se ve totalmente impedido una vez alcanzado el punto de gel. Este tiempo provee entonces la ventana de trabajo, desde la formulación de la resina.

Una manera simple de determinar el tiempo de gel de una resina, es preparando una pequeña cantidad de la misma a una determinada temperatura que debe ser constante. Con algún utensilio (comúnmente una varilla de vidrio) sumergido en el fluido. El momento en que ya no puede moverse el utensilio, se toma como tiempo de gel. Cabe aclarar, que el tiempo de gel solo será válido para la cantidad de catalizador empleado y a la temperatura de la prueba [29].

Solubilidad de gases en la resina

La causa más común para la formación de poros o huecos en un material compuesto es la incapacidad de la resina para desplazar aire atrapado en el interior del fluido hacia la superficie. El aire presente en la resina puede provenir de varias fuentes: aire en la superficie de las fibras que es ingresado durante la impregnación, aire ingresado durante la preparación de la resina o gases disueltos en la resina que forman burbujas durante el curado por el aumento de la temperatura o por la baja presión en el caso de la infusión por vacío [30].

La presencia de porosidad influye significativamente en las propiedades mecánicas de los compuestos poliméricos, ya que los poros actúan como concentradores de tensión, lo que provoca una disminución de la resistencia estática y a la compresión. Se ha demostrado que un aumento en la porosidad reduce la vida a fatiga del laminado y la resistencia al esfuerzo cortante interlaminar, propiedades mecánicas críticas para el rendimiento de los compuestos poliméricos [30].

Una estrategia para la reducción de los poros consiste en desgasificar la resina catalizada previo a su utilización. El procedimiento tradicional consiste en colocar el recipiente abierto con la resina catalizada dentro de un contenedor hermético sometido a alto vacío durante un determinado periodo de tiempo. Sin embargo, recientemente algunos autores han propuesto el uso de un medio de nucleación heterogéneo para las burbujas a los efectos de mejorar la eficiencia de la desgasificación. El medio de nucleación propuesto es un trozo pequeño de esponja de cocina o material similar altamente poroso [31], [32].

1.2 Procesamiento de materiales compuestos: hand lay up vs. Infusion

1.2.1 “Hand Lay Up” o Moldeo Manual (HLU)

El moldeo manual es un proceso de bajo costo y complejidad y en el que se usa una mínima cantidad de herramientas, maquinaria y/o material descartable comparado a otros procesos de manufactura de materiales compuesto. En la industria, este método se usa normalmente para la fabricación de piezas grandes y en industrias en donde no se requiere un gran volumen ni alta velocidad de producción.

En el proceso de hand lay up (HLU), representado esquemáticamente en la Fig. 1.8, una capa de refuerzo seco se coloca manualmente sobre el molde. Luego, se aplica una resina líquida de baja viscosidad al refuerzo vertiéndola, o pulverizándola. Se utilizan espátulas, escobillas o rodillos para densificar el laminado, impregnando completamente el refuerzo con la resina y eliminando el exceso de resina y el aire atrapado. Este proceso se repite capa a capa hasta completar la cantidad de capas de refuerzo deseadas.

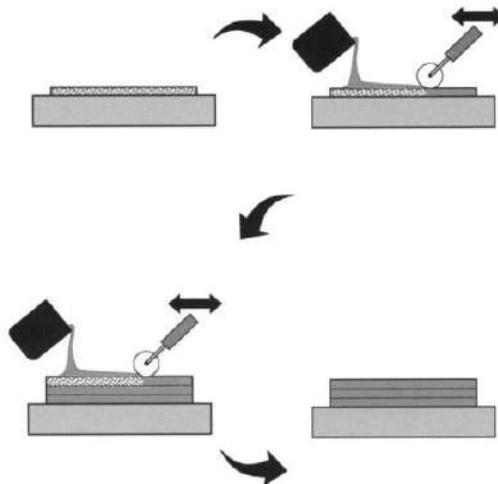


Figura 1.8. Esquema de procesamiento por HLU [33].

La compactación de los tejidos dependerá de la presión que realice el operario, así como de la herramienta de laminación utilizada por lo que la reproducibilidad y consistencia de las piezas obtenidas por este método es baja. Además, la presión ejercida por el operario es menor a la que se ejerce por otros métodos de manufactura más tecnificados, generando bajos contenidos de fibra y elevada variabilidad en la distribución de resina en distintas zonas en la misma pieza [33].

1.2.2 Infusión por vacío (VI)

El proceso de infusión por vacío es una de las técnicas de procesamiento de materiales compuestos denominadas LCM (*Liquid composite molding*).

La técnica de VI se utiliza para la elaboración de piezas de cualquier tamaño, pero es especialmente utilizada para obtener componentes de gran tamaño debido a que no utiliza un contramolde rígido. Además, se escoge esta técnica en aplicaciones donde la velocidad de producción requerida no es muy alta debido a la baja automatización y la gran cantidad de tiempo y mano de obra requerido para el armado del sistema [34]. Por lo tanto, el campo de aplicación de esta técnica coincide con el del moldeo manual, por lo que la elección de una técnica por sobre la otra no es trivial y debe ser correctamente fundamentada, siendo este uno de los objetivos centrales del presente proyecto final.

En este proceso se coloca la preforma sobre el molde rígido y se cubre con un film plástico (“bolsa de vacío”) el cual se sella al perímetro del molde utilizando una cinta especial (llamada *tacky tape*). El puerto de ingreso de resina (*inlet*) consiste en una manguera, la cual tendrá un extremo dentro del molde en el punto donde se quiere suministrar la resina, y el otro extremo fuera del molde, el cual se colocará dentro de un recipiente con resina catalizada. Pueden utilizarse líneas de distribución de resina (mangueras perforadas o espiraladas) para que el ingreso sea lineal y no puntual (la resina llena rápidamente las mangueras que actúan de puerto lineal de suministro de resina). Los venteos son análogos, pero se colocan donde la resina llegará último y se conectan a una bomba de vacío. Entre la bomba de vacío y los venteos se coloca un recipiente hermético conocido como “pulmón de vacío” y “trampa de resina” ya que cumple ambas funciones.

Una vez cerrado el sistema, se aplica vacío en la cavidad interna. Para ello se estrangula la línea de resina con una pinza de apriete especial, evitando que ingrese aire por ese extremo de la manguera. De esta manera se extraerá el aire de la cavidad de moldeo ayudando a minimizar la presencia de burbujas en el laminado final y además posibilitará que las telas de refuerzo copien la forma del molde (al ser comprimidas por la bolsa). Una vez alcanzado el nivel de vacío deseado, se coloca el extremo de la manguera conectada al puerto de resina dentro de un recipiente que contiene la resina catalizada y se abre la línea de resina quitando la pinza de apriete. La diferencia de presión que existe entre el interior del sistema (técnicamente cero) y el recipiente con resina (a presión atmosférica) impulsa la resina a fluir dentro del sistema impregnando los refuerzos (Figura 1.9). Una vez finalizada la impregnación, se procede a cerrar la válvula de resina y la pieza se deja curar dentro de la cavidad, sometida a alto vacío. Finalmente, se extrae la pieza del molde, para lo cual se debe remover primero la bolsa, las mangueras y la cinta de sellado. Todo este material es desechado ya que no es reutilizable [35], [36]

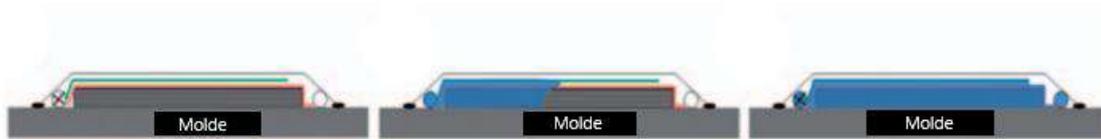


Figura 1.9. Representación esquemática de llenado de preforma en VI [36].

Normalmente, en VI se utilizan resinas de baja viscosidad (100-500 mPa s) para facilitar la infusión, ya que esto permite una permeación más fácil de la resina a través del refuerzo [34].

Seemann composites resin infusion molding process (SCRIMP)

SCRIMP es una mejora al proceso de infusión por vacío desarrollado por la compañía Seemann para solucionar el problema de la baja velocidad de llenado de moldes durante la infusión tradicional (dado que la fuerza impulsora para el avance de la resina está limitada por la presión atmosférica). Se utilizan dos materiales descartables adicionales: *peel ply* y *flow media* (malla de flujo). El primero es una malla plástica que se coloca sobre la preforma que actúa de separador entre la misma y la bolsa, proporcionando micro canales para flujo de resina. Por lo tanto, en este proceso, la resina fluye rápidamente por la cara superior de la preforma y la impregnación se da mayormente en la dirección del espesor. Para poder extraer la malla de flujo de la pieza una vez que la resina curó, se utiliza una tela conocida como *peel ply* entre la preforma y la malla de flujo (Figura 1.10). El *peel ply* no se adhiere a la pieza por lo que permite arrancar el *flow media* de ésta una vez extraída del molde [37].

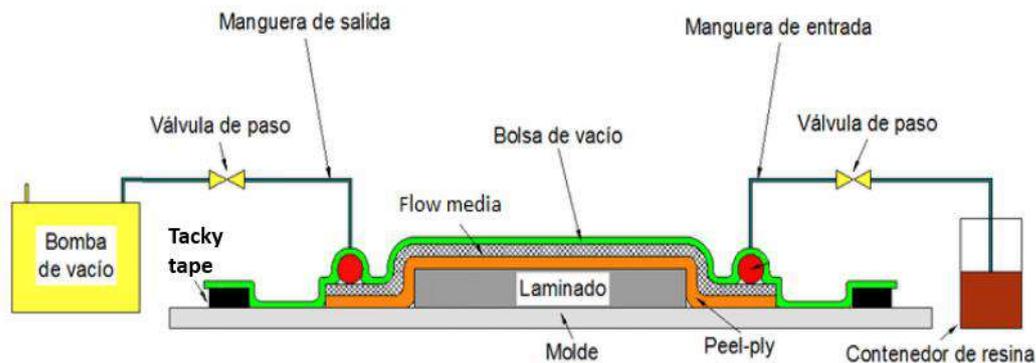


Figura 1.10. Componentes en procesamiento tipo SCRIMP [37]

El proceso de VI puede dividirse en tres etapas, en función de los gradientes de presión en cada una: pre impregnación, impregnación y post impregnación u homogenización [36]. En la primera una vez aplicado el vacío, la presión es uniforme en toda la preforma; aproximadamente 1 bar. En esta etapa se produce la compactación de los refuerzos. En la impregnación la presión de la resina en la preforma varía según la posición y el tiempo. Desde el venteo hasta el frente de flujo, la presión es igual a la presión de vacío aplicada. Dentro de la parte impregnada de la preforma, la presión de la resina varía desde el vacío en el frente de flujo hasta presión atmosférica en el punto de entrada. En la etapa de post

impregnación el exceso de resina es removido de la preforma y el gradiente de presión de la resina tiende a desaparecer [36].

Los procesos de infusión y de SCRIMP carecen de un contra molde rígido para establecer un valor de espesor de la pieza a fabricar. La preforma es comprimida por la presión atmosférica a través una bolsa flexible al aplicar vacío en la cavidad de moldeo. Por este motivo, el espesor de la preforma y de la pieza final dependen del número de capas de refuerzo utilizadas y de la respuesta de la preforma a la compactación. Al hacer vacío y evacuar el aire, la bolsa comprime los refuerzos, disminuyendo el espesor de la preforma [38] (Figura 1.11).

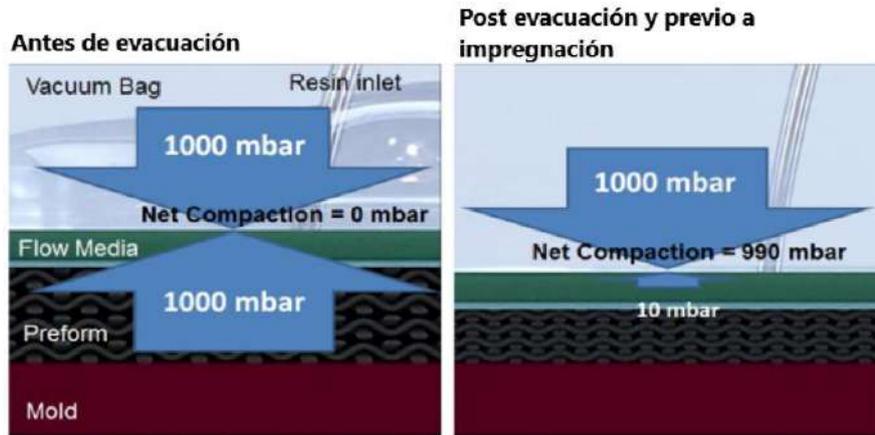


Figura 1.11. Esquema de compactación de la preforma en VI [38].

Al comenzar la infusión, la resina va impregnando el refuerzo y genera un efecto lubricante que reduce la fricción entre las fibras, lo que genera una disminución local del espesor de la preforma. Sin embargo, a medida que la resina sigue avanzando, la presión de resina aumenta (el gradiente de presión va desde 1 atm en el *inlet* hasta cero en el frente de flujo) y esta presión se opone a la de compactación generada por la atmosfera y, debido a que la bolsa es flexible, el espesor aumenta [36], [38]. El balance de presiones durante el proceso está dado por la Ecuación 5, donde P_a es la presión atmosférica, P_v es la presión de vacío (presión de aire remanente dentro de la bolsa), P_r la presión de resina y P_c la presión de compactación soportada por el refuerzo

$$P_a = P_v + P_r + P_c \quad (5)$$

La Figura 1.12 muestra esquemáticamente el perfil de espesores de una preforma durante el proceso de infusión.

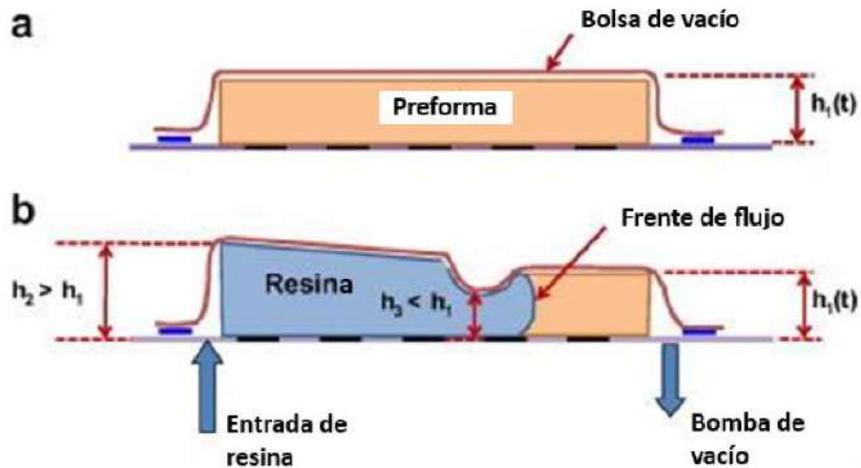


Figura 1.12. Variación del espesor de la preforma a medida que transcurre la infusión. a) Preforma comprimida en seco. b) Distribución de espesores durante la infusión [38].

Este fenómeno implica que, si la pieza curara en el instante exacto en el que la impregnación finalizó, quedaría un gradiente de espesores y, por lo tanto, de contenidos de fibra en la pieza final. Por lo tanto, se debe realizar una etapa de homogenización de espesores posterior al llenado y mientras la resina sigue en estado líquido. En ella, la resina fluye desde las zonas de mayor presión (cerca del *inlet*) hacia las de menor presión (zona de venteo). Cuando la presión de resina sea igual en toda el área de la pieza, el espesor será homogéneo [36], [38].

Existen diferentes estrategias de homogenización reportadas. El procedimiento industrial usual es cortar el ingreso de resina una vez llenada la preforma y dejar que el exceso de resina sea recolectado por la trampa de resina impulsado por el gradiente de presiones remanente en la cavidad de moldeo. Sin embargo, algunos autores han propuesto otras estrategias de homogenización siendo la más efectiva en lograr una mejor homogenización la que consiste en cerrar el puerto de entrada de resina antes del llenado completo de la preforma de modo que, durante la etapa de homogenización, la resina remanente en la preforma complete el mojado del refuerzo, mejorando la fracción de fibras y la eficiencia del proceso [36]. El momento en el que se corte el ingreso de resina determinará el espesor final y por lo tanto el contenido de fibras del compuesto. Cuanto más temprano se corte el suministro de resina, mayor será el contenido de fibras logrado, pero hacerlo muy prematuramente puede ocasionar un llenado incompleto de la preforma (*short shot*) [38].

1.3 Planteo de la problemática

Existen diferentes técnicas de fabricación disponibles para obtener piezas de material compuesto, y el uso de una u otra depende de factores como: geometría y tamaño de la pieza, inversión inicial, velocidad y volumen de producción, propiedades requeridas, etc. Como se ha expuesto, las técnicas de fabricación conocidas como “moldeo manual” e “infusión por vacío” son técnicas que permiten fabricar piezas de geometrías complejas de cualquier tamaño, con una inversión inicial pequeña y son adecuadas en aplicaciones

donde la velocidad de producción requerida no sea elevada, como por ejemplo embarcaciones, carrocerías, aspas de aerogeneradores, tablas de surf, entre otras.

Uno de los factores principales que motivan la adopción de una técnica sobre la otra para producir piezas de material compuesto es la calidad del material obtenido, reflejada en las propiedades mecánicas específicas del mismo. Normalmente, la bibliografía sostiene que las propiedades de los materiales obtenidos por infusión por vacío son superiores a las de los obtenidos por moldeo manual. Por el primero, se obtienen, en teoría, mejor fracción volumétrica de fibra por mejor compactación mecánica de la preforma, menor porosidad (por la ausencia de aire en la cavidad de moldeo) y por lo tanto mejores propiedades mecánicas y homogeneidad de las piezas.

Por lo general, las mejoras en las propiedades de los materiales obtenidos por infusión respecto a los obtenidos por moldeo manual se atribuyen a las siguientes hipótesis [39], [40], [41]:

- La infusión por vacío genera piezas con baja porosidad, debido a que la resina avanza impregnando una preforma que se encuentra dentro de un molde sometido a vacío.
- Infusión por vacío proporciona presión externa de compactación sobre la preforma, permitiendo aumentar la fracción volumétrica de fibras.
- Infusión por vacío genera piezas de espesor más constante debido a que el proceso no depende del factor humano como si lo hace HLU.

Sin embargo, dichas hipótesis son débiles si se tiene en cuenta cómo es realmente el procedimiento de fabricación y el número de variables y factores que pueden afectar el resultado del proceso, por ejemplo:

- En el proceso de infusión por vacío, la resina puede generar una fase gaseosa dentro del molde debido a la baja presión, dando lugar a burbujas y luego, porosidad en la pieza [31],[32].
- La fracción volumétrica de fibras final que se obtiene con el método de infusión por vacío depende de la estrategia de llenado y post llenado utilizada. Estos procedimientos pueden dar lugar a piezas con contenidos de fibras muy disímiles, desde contenidos similares a los logrados por moldeo manual hasta contenidos muy bajos y laminados secos y mal impregnados [36].
- La homogeneidad en el espesor de las piezas fabricadas por infusión depende de los mecanismos de flujo de resina posteriores al llenado de la pieza y de la cinética de curado de la resina, ya que, si la misma llegara a curar antes de que se homogenice el espesor, la pieza podría presentar un gradiente significativo de espesores [38].
- Las características de la preforma utilizada pueden hacer que las diferencias encontradas entre los dos métodos de fabricación sean o no significativas. Por ejemplo, tejidos con arquitecturas planas y de gran facilidad de compactación en estado natural de apilamiento pueden no generar diferencias significativas en piezas fabricadas por ambos métodos, pero tejidos con mechas gruesas y poco

compresibles, pueden beneficiarse de la presión externa aplicada en el proceso de infusión, para maximizar el contenido porcentual de fibras [6].

Es por estos motivos que en la bibliografía académica que compara las propiedades resultantes entre estos métodos de manufactura no reporta resultados claros [42], [43], [44], [45]. Además, en la mayoría de los estudios realizados o bien las variables de proceso no son debidamente controladas y reportadas, dificultando el análisis de los resultados y conclusiones proporcionadas. Por ejemplo, en algunos casos no se menciona si la resina fue desgasificada, las presiones utilizadas o el número de capas de refuerzo utilizadas [46]. Esto dificulta un análisis de las variables que afectan los procesos y las propiedades finales del material obtenido, pudiendo generar conclusiones erróneas o quizás acertadas, pero únicamente para una combinación específica de variables de proceso.

De esta manera, para el desarrollo del trabajo, se plantean las siguientes hipótesis que intentarán ser validadas:

- a) El proceso de infusión por vacío permite obtener compuestos con mejores propiedades que la técnica de moldeo manual.
- b) La desgasificación de la resina reduce la porosidad final en la pieza fabricada, mejorando las propiedades mecánicas del material obtenido.
- c) Adoptando diferentes estrategias de infusión se puede controlar la fracción volumétrica de fibras en el compuesto obtenido y optimizar sus propiedades mecánicas.
- d) Las diferencias encontradas entre los compuestos fabricados por moldeo manual e infusión por vacío son más significativas en preformas compuestas por un mayor número de capas de refuerzo.
- e) Las diferencias encontradas entre los compuestos fabricados por moldeo manual e infusión por vacío son más significativas en preformas con mayor margen de compresibilidad.

2. Objetivos

Objetivos generales

El objetivo general de este proyecto es comparar dos procesos de fabricación de materiales compuestos: “infusión por vacío” y “*hand lay up*” (“moldeo manual”). Se propone identificar las variables de procesamiento y las características de la materia prima que afectan significativamente al resultado obtenido por ambos procesos y cuantificar las diferencias en las propiedades de los materiales compuestos fabricados y en la calidad de

las piezas obtenidas. Por último, se propone aplicar los conocimientos adquiridos para la fabricación de una pieza prototipo.

Objetivos Específicos

- Adquirir conocimientos teóricos y dominio práctico de las técnicas de fabricación: “infusión por vacío” y “*hand lay up*”.
- Fabricar placas de compuestos por ambas técnicas a partir de las cuales extraer probetas para ensayos de caracterización.
- Realizar una caracterización completa de los compuestos obtenidos para valorar y cuantificar las diferencias entre ambas técnicas de procesamiento.
 - o Variabilidad dimensional (espesor).
 - o Propiedades mecánicas (ensayos de tracción).
 - o Densidad (densidad por desplazamiento).
 - o Fracción volumétrica de fibra/resina (ensayos de calcinación).
 - o Microestructura (microscopía óptica).
- Determinar si el tipo de preforma de refuerzo utilizada afecta la magnitud de las diferencias en propiedades obtenidas mediante ambas técnicas.
- Determinar si el proceso de desgasificación de la resina previo a la etapa de impregnación de los refuerzos impacta de la misma manera en las propiedades de los compuestos obtenidos por ambas técnicas.
- Optimizar las propiedades de los compuestos obtenidos por infusión por vacío, evaluando diferentes estrategias de llenado.
- Estudiar los defectos de procesamiento observados en ambas técnicas.
- Fabricar una pieza prototipo para poner en práctica los conocimientos adquiridos.

3. Experimental

Se confeccionaron placas de material compuesto de resina poliéster con refuerzo de fibras tejidas bidireccionales de fibra de vidrio y yute, mediante *hand lay up* e infusión por vacío, para posteriormente obtener de ellas probetas para realizar diversos ensayos

3.1 Materiales

3.1.1 Tejidos de refuerzo

Se utilizaron tejidos de arquitectura bidireccional, siendo los más utilizados en este tipo de técnicas de procesamiento. Para comparar el efecto del tipo de fibra sobre el resultado

de los procesos, se escogió un tejido de fibra de vidrio (densidad superficial 135 g/m²) y otro de fibra de yute (densidad superficial 300 g/m²).

Las propiedades de la fibra se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades de las fibras utilizadas [47].

Refuerzo	Densidad [g/cm ³]	Modulo Elástico [GPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Temperatura de uso máxima [°C]
Fibra de vidrio bidireccional	2,50	86	3200	700
Fibra de yute bidireccional	1,45	10-32	450-550	200

La selección de la fibra de vidrio se debió a su excelente relación entre costo y propiedades expuestos en la sección 1.1.1.

La selección de la fibra de yute como fibra de comparación se debió al creciente interés en la utilización de fibras naturales debido a sus beneficios ambientales. Al mismo tiempo, la distinta permeabilidad y compactibilidad de las fibras naturales frente a las sintéticas resultan útiles a la hora de comparar los factores que afectan a cada técnica de procesamiento analizada.

3.1.2 Resina termorrígida

Se utilizó resina poliéster insaturada. El proveedor fue Poliresinas San Luis, y el producto utilizado se identifica comercialmente como Polial Z-1000-190-60-1 y catalizador Perli-OX-50S. Las propiedades informadas por el fabricante se detallan en la tabla 3.2. Se adjunta la ficha técnica provista por el fabricante en el Anexo 1

Tabla 3.2. Propiedades informadas por el fabricante de la resina utilizada.

Resina	Densidad [g/cm ³]	Viscosidad Inicial [cPs]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Polial Z-1000-190-60-1	1,3	180-200	70,6	3380

3.2 Procesamiento

3.2.1 Metodología experimental

La metodología de trabajo consistió en la fabricación de placas planas por moldeo manual e infusión por vacío, a partir de las cuales se extrajeron probetas para ensayos de caracterización. La metodología experimental se basó en tomar una preforma como punto de referencia y modificar parámetros para establecer el efecto de cada variable en el resultado final. La preforma de referencia estuvo compuesta en cuatro telas de fibra de vidrio bidireccional, siendo ésta una preforma estándar muy utilizada en ambos procesos de fabricación.

Debido a la gran cantidad de variables, se realizaron experimentos de manera secuencial para determinar las mejores condiciones de procesamiento a aplicar en los ensayos siguientes.

- En primer lugar, se analizó el efecto de la desgasificación de la resina en los dos procesos de manufactura a comparar. En el caso del proceso VI, se realizó la estrategia de infusión “Estándar” que consistió en cortar la entrada de resina cuando el frente de flujo alcanzó el 100% de la longitud de la placa.
- En segundo lugar, se analizó el efecto de la estrategia de infusión. Se propuso entonces, analizar qué sucede si se corta la entrada de resina cuando el frente de flujo alcanzó el 75% o el 50% de la longitud de la placa y que por tanto el llenado de la preforma se complete con la resina remanente y de esta manera mejorar la relación matriz-refuerzo en el material conforme a lo expuesto en la sección 1.2.2.
- En tercer lugar, se comparó el material obtenido por moldeo manual e infusión aumentando la cantidad de telas de refuerzo. Como la compactación de los tejidos de refuerzo cambia en función de la cantidad de capas, se decidió estudiar este fenómeno triplicando la cantidad de capas.
- Por último, se fabricaron dos placas, una por cada método, con refuerzo de fibras naturales, en este caso Yute. La elección de las fibras naturales tiene que ver con su comportamiento frente a la compactación y permeabilidad distintos a los de la fibra de vidrio (Sección 1.1.1)

Para mejorar la eficiencia del análisis, ante cada parámetro evaluado, se realizó un análisis de las propiedades mecánicas obtenidas y para el siguiente paso el proceso se optimizó con los resultados previos.

En la Tabla 3.3 se detallan las variables analizadas y las placas propuestas a confeccionar en el proyecto.

Tabla 3.3. Variables analizadas y placas confeccionadas.

Parámetro a Evaluar	Preforma	Proceso	Desgasificado de resina	Estrategia de infusión	ID Placa
Desgasificación de la resina	4 telas vidrio	HLU	No	-	HLU S/D
	4 telas vidrio	HLU	Si	-	HLU desgasificado
	4 telas vidrio	VI	No	Estándar	VI S/D
	4 telas vidrio	VI	Si	Estándar	VI desgasificado
Estrategia de infusión	4 telas vidrio	VI	Mejor resultado	Cierre de entrada al 75%	VI 75%
	4 telas vidrio	VI	Mejor resultado	Cierre de entrada al 50%	VI 50%
Numero de capas de preforma	12 telas vidrio	HLU	Mejor resultado	-	HLU 12
	12 telas vidrio	VI	Mejor resultado	Estándar	VI 12
	12 telas vidrio	VI	Mejor resultado	Mejor resultado	VI 12 50%
Material de refuerzo	4 telas yute	HLU	Mejor resultado	-	HLU Yute
	4 telas yute	VI	Mejor resultado	Mejor resultado	VI Yute

3.2.2 Preparación de las telas

Se cortaron rectángulos de tejido de fibra de vidrio y yute de 32 cm x 27 cm, de modo de obtener 10 probetas para ensayos de tracción con dimensiones recomendadas por la norma ASTM D-3039 por cada placa y material sobrante para confección de *tabs* para ensayos mecánicos y para realización de otros ensayos.

3.2.3 Preparación de la resina

Se preparó resina poliéster de acuerdo a la formulación 2 g de catalizador por cada 100 g de resina. La justificación de la selección de la formulación se detalla en la sección 4.1.1.

Cuando fue necesario, de acuerdo al diseño de experimento se realizó la desgasificación de la resina. La misma se realizó colocando el recipiente con la resina catalizada en la trampa de resina conectada a la bomba de vacío, a una presión de -0.085 MPa durante 7,5

minutos. Al recipiente se le colocó un trozo cúbico de 3x3x3 cm de esponja de cocina comercial como medio de nucleación de burbujas, siguiendo el procedimiento recomendado por la literatura [31][32].

3.2.4 Hand Lay Up

Para la fabricación de las placas por medio de moldeo manual se siguió siempre el mismo procedimiento. Sobre una placa de madera plana recubierta por un film de teflón para facilitar el desmolde, se colocó una tela de refuerzo, se vertió la resina catalizada y luego con un rodillo para laminación de aluminio (Figura 3.1) se retiró el excedente de resina y se comprime la tela. Este procedimiento se repitió para cada una de las capas de refuerzo en cada placa.



Figura 3.1. Rodillo de laminación manual similar al utilizado.

Luego de 24 horas, cada una de las placas fue desmoldada y se le realizó un postcurado a 45 grados centígrados durante 24 horas.

3.2.5 Infusión por vacío

Para la infusión por vacío se utilizó una membrana de caucho de silicona reutilizable, como bolsa de vacío. La utilización de esta membrana presenta varias ventajas, principalmente la reducción de la cantidad de material de desecho y una mayor simpleza y seguridad de la mantención de la estanqueidad del sistema durante el tiempo que es requerido el vacío.

Sobre una mesa de laminación se colocó la membrana de silicona. Dentro de esta, se introdujo una placa de madera teflonada. Sobre ella, se colocaron las telas de fibra, cuidando de mantener la alineación entre ellas. Sobre las telas, el *peel ply*, *flow media* y la manguera de entrada de resina de acuerdo al proceso SCRIMP. En este caso, se añadió una manguera espiralada de ½” de diámetro a la “T” de entrada de resina para intentar generar un flujo lineal de avance de resina en la preforma.

Luego se cerró el molde de silicona, encastrando los sellos perimetrales y por último se colocaron la manguera de entrada de resina y la de vacío, en extremos opuestos de la membrana.

El arreglo obtenido se observa en las Figura 3.2.



Figura 3.2. Disposición de preforma, *peel ply* y *Flow media* previo al cerrado de membrana.

Una vez cerrada la membrana, se encendió la bomba de vacío y se corroboró la estanqueidad del sistema. La presión utilizada fue de $-0,085$ MPa, la máxima alcanzable por la bomba disponible.

Luego, se ingresó la resina catalizada al circuito de entrada de resina, cuidando que no se generen burbujas por succión de aire.

Por último, una vez alcanzado el nivel visual de llenado de la preforma deseado de acuerdo a la planificación experimental (Tabla 3.3), se estranguló la manguera de entrada de resina mediante una pinza especial (“pico de pato”) y se dejó el arreglo bajo vacío por 24 horas (Figura 3.3).

Finalmente, se desmoldó la placa (Figura 3.4) y se le realizó un postcurado en horno a 45 grados centígrados por 24 horas.



Figura 3.3. Sistema SCRIMP luego de impregnación.



Figura 3.4. Placa obtenida post desmolde.

Todas las placas fueron fabricadas en la Planta Piloto del INTEMA. Debido a la relativa toxicidad y liberación de volátiles de la resina, se utilizaron guantes de nitrilo, guardapolvo y semimáscara de protección respiratoria con los filtros correspondientes, en todas las operaciones.

Cálculo de factibilidad de llenado en cambio de estrategia de infusión

Previo a la preparación de los laminados comparando la estrategia de infusión, se calculó si la resina remanente en el sistema al momento de cerrar el ingreso, alcanzaría para llenar la preforma y no ocurriría un llenado incompleto. Esto para evitar malgastar material y tiempo.

De acuerdo a lo mencionado en la sección 1.2.2, se creó un modelo simple del exceso de resina al instante del cerrado del ingreso de resina, siguiendo el gradiente de presiones de la etapa de impregnación (Figura 3.5).

Por tanto, se buscó calcular si este acumulado alcanzaría para llenar la porción remanente de refuerzo seco.

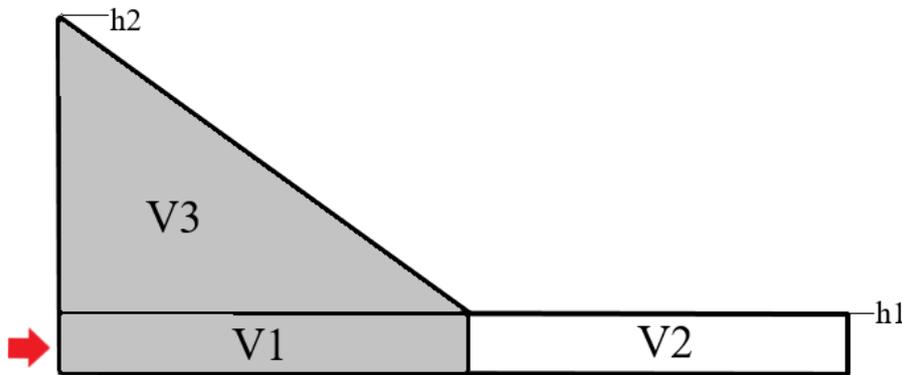


Figura 3.5. Esquema del modelo utilizado.

Se analizó el caso en el que el ingreso de resina se cierra al llenar el 50% de la preforma, por ser el más crítico respecto al riesgo de llenado incompleto.

En este caso, V1 es el volumen de preforma ya mojado al momento del cierre y V2, el volumen remanente seco y V3 es el excedente de resina en el sistema. Se busca entonces que V3 sea igual o mayor a V2.

Se midió con calibre el espesor de la preforma compactada seca (h_1) y la altura que alcanzó la membrana flexible al momento de entrada de la resina en el puerto de ingreso (h_2). Con estos valores, largo y ancho de la preforma (L ; a) y asumiendo una fracción volumétrica de resina de 0,6 (valor estándar en infusión por vacío), se calculó:

$$V_1 = V_2 = \frac{L}{2} \cdot a \cdot h \cdot 1,0,6 = 21060 \text{ mm}^3$$

$$V_3 = \frac{L}{2} \cdot \frac{h_2 - h_1}{2} \cdot a \cdot 0,6 = 24497 \text{ mm}^3$$

Entonces, según este modelo simple, se determinó que podría ser posible un llenado completo de la preforma con la resina remanente en el sistema posterior al cierre del ingreso. Cabe destacar, que como el flujo de resina en la preforma depende del gradiente de presión (Ecuación 3) y este va disminuyendo durante la etapa de post impregnación a medida que se homogeniza el espesor del refuerzo, puede suceder que no haya suficiente

fuerza impulsora para empujar la resina a través de la preforma y entonces este modelo no sea de utilidad.

3.2.6 Postcurado

El postcurado consiste en someter al material a una determinada temperatura por una determinada cantidad de tiempo, para incrementar el grado de conversión de la reacción logrado luego de la etapa de procesamiento. A cada una de las placas fabricadas, se le realizó un postcurado para homogeneizar el nivel de curado en ellas. Se colocaron las placas en una estufa a 45°C durante 24 horas. La selección de esta temperatura de post curado se debe a la utilidad que podría tener este proyecto en la industria manufacturera de tablas de surf y en las aspas de molinos eólicos de baja potencia. La industria de tablas de surf presenta gran interés en dar el salto tecnológico y reemplazar el proceso de laminación manual por la técnica de infusión por vacío. En el caso de las aspas de molinos eólicos de baja potencia, el grupo de trabajo está estudiando la fabricación del núcleo por manufactura aditiva de ácido poliláctico y posterior cobertura por pieles de compuesto estructural. En ambos casos, está demostrado que tanto los núcleos poliméricos de las tablas (poliuretano o poliestireno) como el de las aspas no pueden ser sometidos a más de 50 °C ya que los materiales se deterioran y pierden estabilidad dimensional al no realizar el tratamiento térmico en un molde cerrado.

Luego de la selección de esta temperatura de postcurado se realizó un análisis cinético para determinar la conversión del sistema químico a dicha temperatura (Sección 4.1.2).

3.3 Métodos de caracterización de la matriz

Para la caracterización de la resina se realizaron ensayos de tiempo de gel y calorimetrías diferenciales de barrido (DSC).

3.3.1 Tiempo de gel

Se prepararon muestras de 100 g de resina a los que se les agregó distintas cantidades de catalizador y luego se determinó mediante el método de varilla el tiempo de gel para cada formulación a una temperatura de 20 °C.

3.3.2 Determinación de ciclo de postcurado

El objetivo de este análisis fue determinar si con la temperatura de post curado seleccionada de 45°C por 24 horas se obtenía un curado completo de la resina.

Se realizaron dos corridas de DSC en un equipo para tal fin marca TA Instruments. La primera, dinámica, con una rampa de temperatura de 10°C/min desde temperatura ambiente a 230°C y luego una corrida isotérmica a 45°C durante 120 minutos. El objetivo

fue comparar las áreas de los picos exotérmicos en ambos casos para corroborar que el área de ambos picos fuese comparable.

3.4 Métodos de caracterización de los compuestos

3.4.1 Propiedades mecánicas

Tensión a la rotura y módulo de elasticidad

El rendimiento de un material en ingeniería se juzga por sus propiedades y comportamiento en condiciones de tracción, compresión, cizallamiento y otras cargas estáticas o dinámicas tanto en entornos de prueba normales como adversos. Esta información es esencial para seleccionar el material adecuado en una aplicación determinada, así como para diseñar una estructura con el material seleccionado. Entre los ensayos que permiten caracterizar a los materiales se encuentra el ensayo de tracción uniaxial. Este ensayo consiste en someter a una probeta normada a una tensión uniaxial utilizando una máquina de ensayos universales.

Los ensayos de tracción uniaxial se realizaron siguiendo la norma ASTM D-3039 en una máquina de ensayos universales marca Emic 23-50.

Se confeccionaron las probetas de la medida normada cortando las placas con una sierra de banco. Posteriormente, a cada probeta se le pegó mediante adhesivo cianoacrilato trozos del mismo material en los extremos, como “tabs” cuya función es evitar la rotura de la probeta en la mordaza por triaxialidad en ese punto. Respecto a estos tabs, se probaron varias configuraciones, inclusive mediante la impresión 3D de los mismos en PLA, hasta que se llegó a una configuración satisfactoria. Ésta consistió en pegar dos capas del mismo material de la probeta por lado y por extremo.

Para las mediciones de las dimensiones de las probetas se utilizó un calibre tipo Vernier para el ancho y micrómetro para el espesor.

Los valores de tensión a la rotura y módulo de elasticidad se obtuvieron de acuerdo a la norma antes mencionada (Ecuaciones 6 y 7). Para los valores de deformación en rango elástico, se utilizó un extensómetro de la marca Epsilon, para obtener buena precisión en los resultados debido a los bajos porcentajes de deformación que presentan los materiales compuestos analizados.

$$\sigma_{rot} = \frac{P_{max}}{A} \quad (6)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (7)$$

Donde P^{max} es la carga a la rotura y A el área transversal de la probeta. En la Figura 3.6 se muestra una curva tensión-deformación típica para un material compuesto de matriz termorrígida.

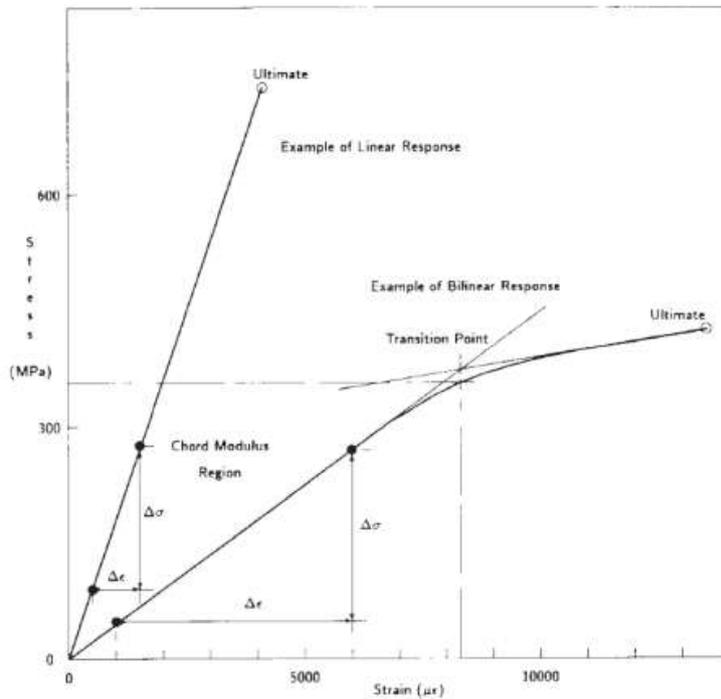


Figura 3.6. Curvas tensión deformación en tracción uniaxial típicas para materiales compuestos [48]

3.4.2 Densidad y contenido de fibra

Densidad por desplazamiento

En el cálculo de densidad por desplazamiento se calcula la densidad de un material a partir del volumen de líquido que desplaza en inmersión.

Para este procedimiento se utilizó una balanza analítica y un arreglo como el que se muestra en la Figura 3.7. El material analizado fue extraído de los sobrantes de placas luego de su corte. Para cada una de las placas, se analizaron 3 muestras.



Figura 3.7. Arreglo utilizado para los pesajes en seco y mojado

El procedimiento y los valores de densidad (Ecuación 8) se obtuvieron siguiendo la norma ASTM D-792-08

$$Densidad = a \cdot \frac{\rho}{a-w} \quad (8)$$

Donde a y w corresponden a peso seco y sumergido de la muestra respectivamente y ρ a la densidad del agua a la temperatura de ensayo.

Contenido de fibra por ignición

En el cálculo de contenido de fibra por ignición se somete a la muestra (Figura 3.8) a alta temperatura y durante este proceso la resina se degrada y se libera en forma gaseosa. A partir de la diferencia de peso previo y post calcinado se obtiene la cantidad relativa de matriz y refuerzo en el material.

El procedimiento y los valores de porcentaje relativo de fibra y matriz (Ecuaciones 9 y 10) se obtuvieron siguiendo la norma ASTM D-2584-08.

Fracción volumétrica de fibra

$$V_f = \frac{M_f}{M_i} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \quad (9)$$

Fracción volumétrica de matriz

$$V_m = \frac{M_i - M_f}{M_i} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (10)$$

Donde M_i y M_f corresponden a peso de las muestras previo y posterior a la calcinación; ρ_r ; ρ_c y ρ_m a las densidades del refuerzo, del material analizado y de la matriz respectivamente.

Para la calcinación se utilizó una mufla (Figura 3.9) y para los pesajes una balanza analítica.



Figura 3.8. Muestras de material en crisoles para calcinación.



Figura 3.9. Mufla utilizada para la calcinación bajo campana.

En el caso de los laminados con refuerzo de fibras naturales el método de ignición no es aplicable debido a que la temperatura de degradación térmica de las fibras naturales es inferior a la de la matriz. Para estimar la fracción de fibras en este caso se utilizó la ecuación 11.

$$V_f = \frac{n \cdot A_f}{\rho_f \cdot t} \quad (11)$$

Donde A_f es la densidad superficial del tejido de refuerzo (g/m^2), ρ_f la densidad de la fibra (g/m^3) y t el espesor del laminado (m) y n el número de capas de refuerzo utilizadas. Esta expresión considera que el refuerzo está distribuido uniformemente en el compuesto.

3.4.5 Microscopía óptica

Se realizó un análisis por microscopía óptica de la superficie transversal de muestras de cada material obtenido. Se buscó analizar la interfaz fibra-matriz, la separación entre capas de fibras y la presencia de huecos y poros.

Para ello, primero se diseñaron en CAD y se imprimieron por manufactura aditiva portamuestras (Figura 3.10) para poder mantener la perpendicularidad de las muestras, debido al pequeño espesor de las mismas.



Figura 3.10. Portamuestras impresos en PLA

Una vez colocadas las muestras en los portamuestras se preparó la superficie con papel de lija de granulometría 400 a 2000 y luego con solución de alúmina de 0,3 y 0,05 μm . Por último, se lavó la superficie con vibrador ultrasónico en agua durante 10 minutos y finalmente con papel y alcohol isopropílico.

Las muestras fueron observadas con un microscopio marca Leica en 5x, 10x, 20x y 40x y se tomaron fotografías digitales.

Los materiales analizados fueron HLU S/D y Desgasificado, VI S/D y desgasificado HLU 12 y VI 12 y Yute.

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de la resina

4.1.1 Tiempo de gel

Se determinó el efecto de la cantidad de catalizador en el tiempo de gel de la resina a una temperatura de trabajo de 20 °C. Los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 4.1 y se representan gráficamente en la Figura 4.1.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos para tiempo de gel para las formulaciones de resina-catalizador analizadas

Formulación	Masa resina (g)	Masa catalizador (g)	% Catalizador	t gel (min)	To (°C)	Tf (°C)	T Prom (°C)
1	100,06	1,5	1,5	130	19	18,5	18,75
2	100,02	1,75	1,75	85			
3	100	2	2	68			
4	100,02	2,25	2,25	56			
5	100	2,5	2,5	33	19,1	19,6	19,35

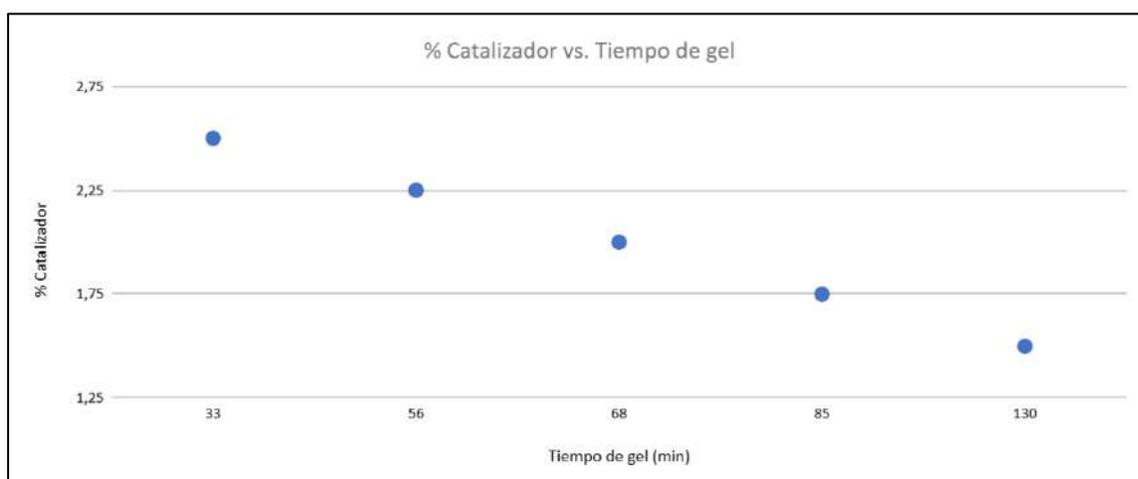


Figura 4.1. Tiempo de gel en función del porcentaje de catalizador obtenido a 20°C.

A partir de este análisis se decidió utilizar la formulación 3, ya que, en base a la experiencia previa del grupo de trabajo, el tiempo de gel de aproximadamente 1 hora permite una ventana de trabajo adecuada para fabricar las placas de las dimensiones requeridas por ambos procesamientos (laminación manual e infusión) satisfactoriamente.

4.1.2 Determinación de ciclo de postcurado

Las curvas de liberación de calor en función del tiempo obtenidas para la corrida dinámica desde 10 a 250 °C a 10°/min e isotérmica a 45 °C en un DSC se muestran en las Figuras 4.2 y 4.3

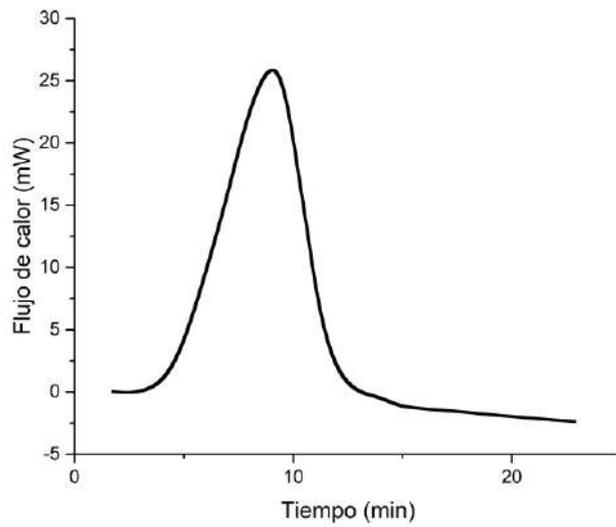


Figura 4.2. Flujo de calor en función del tiempo en corrida de DSC dinámico

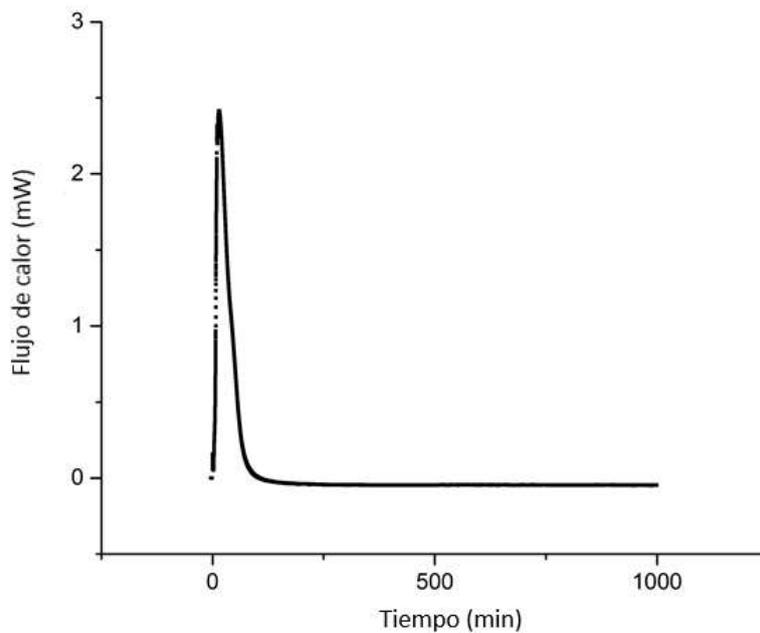


Figura 4.3. Flujo de calor en función del tiempo en corrida de DSC isotérmico a 45°C

Mediante software Origin ® se integraron las curvas de los picos de la corrida dinámica e isotérmica y se obtuvieron las áreas de los mismos. La primera dio un área de 62,74 min.mW y la segunda de 59,19 min.mW. Por tanto, con un tratamiento térmico de postcurado a 45°C se obtiene una conversión de 0,94 en la reacción de curado de la resina, que es aceptable para la calidad de la pieza.

4.2 Propiedades mecánicas del compuesto

4.2.1 Efecto de desgasificación

A modo de ejemplo, en la figura 4.4 se muestran 5 curvas de tensión en función de la deformación obtenidas para probetas de VI desgasificado. Las curvas obtenidas en todos los análisis fueron similares a éstas, con un comportamiento esperable para un material compuesto reforzado con fibra.

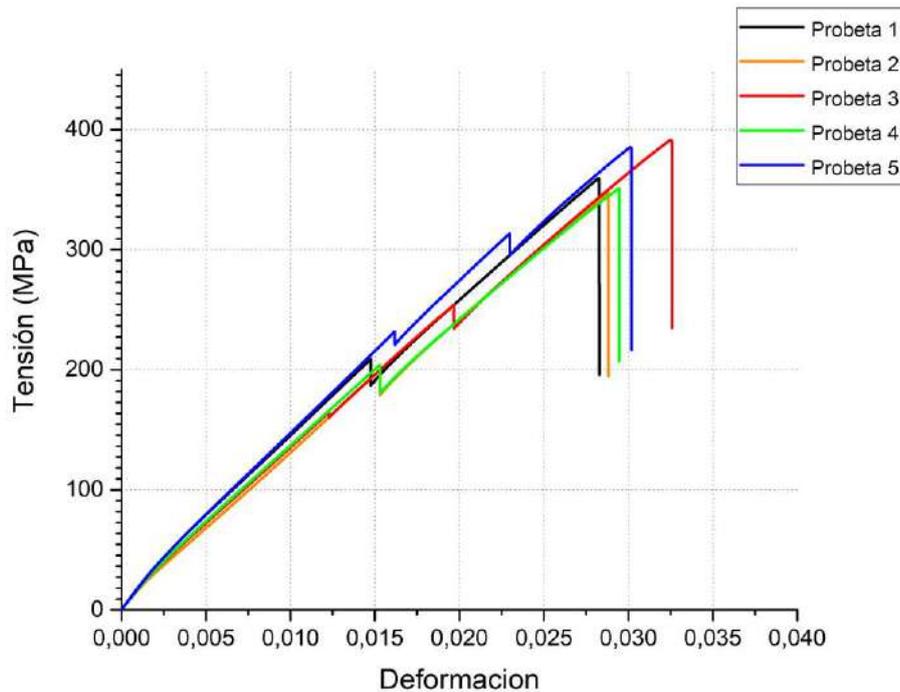


Figura 4.4. Curvas de tensión deformación en tracción uniaxial obtenidas para probetas confeccionadas por VI.

Las probetas de todos los laminados analizados manifestaron un modo de rotura que se condice con el Modo XGM de la norma ASTM 3039, como se observa en la Figura 4.5

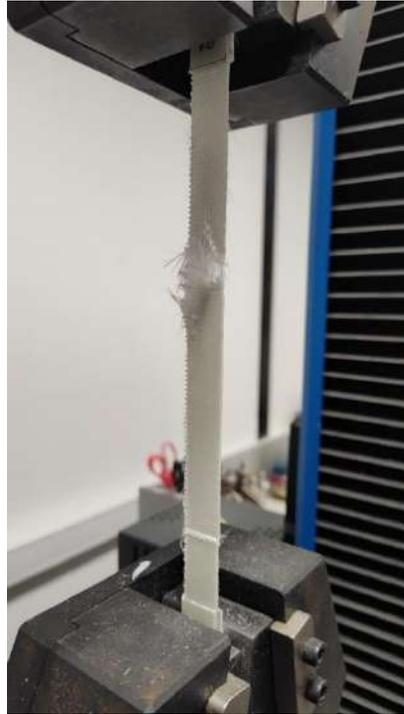


Figura 4.5. Rotura de probeta en ensayo de tracción uniaxial.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos para probetas de 4 materiales: HLU sin desgasificar y desgasificado y VI sin desgasificar y desgasificado.

Tabla 4.2. Resultados obtenidos para los materiales mencionados analizados en este apartado.

Propiedad	HLU sin desgasificar	HLU desgasificado	VI Sin desgasificar	VI desgasificado
Tensión a la rotura [MPa]	313 ± 14	347 ± 23	328 ± 20	367 ± 20
Modulo [GPa]	$19,5 \pm 0,6$	19 ± 1	19,2	19,1
Espesor promedio [mm]	$0,52 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,01$
Fracción volumétrica de fibras [%]	$42,1 \pm 2,5$	$41,7 \pm 1$	$44,6 \pm 0,2$	$45,5 \pm 0,2$

En la tabla 4.2 se observa un aumento en la tensión a la rotura promedio con la desgasificación de la resina. Esto es esperable ya que la presencia de poros son sitios de iniciación de fisuras y posterior falla del material [30]. En las micrografías de las muestras sin desgasificar por ambos procesos se encontraron algunos poros de aire (Figura 4.6), lo que podría ser la razón de la diferencia observada en las tensiones a la rotura, mientras que el material desgasificado no presentó porosidad visible.

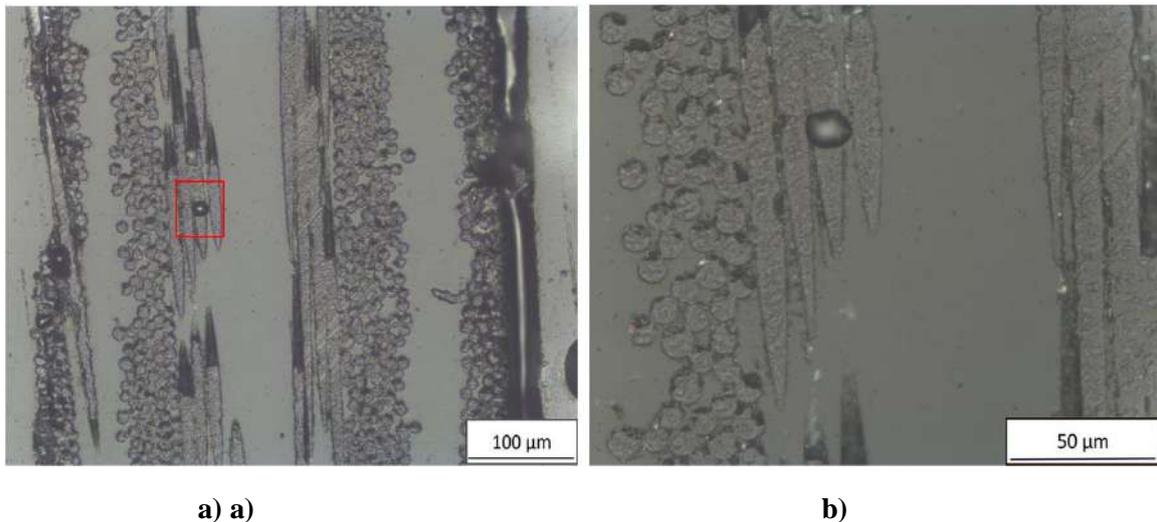


Figura 4.6. Micrografía de probeta de HLU sin degasificar a) 20X b) magnificación a 40X

El procedimiento de degasificación fue efectivo en mejorar las propiedades de los materiales obtenidos por ambos procesos, aunque la diferencia en el valor de la resistencia a la rotura entre los materiales fabricados con resina degasificada y sin degasificar es pequeña. De la misma manera, el material obtenido por el método de infusión por vacío mostró una resistencia levemente mayor a la del material fabricado por laminación manual, lo que podría también atribuirse a una reducción de la porosidad y aire atrapado al realizar la infusión por vacío, pero los rangos de desviación estándar se solapan y no es posible concluir de manera fehaciente, para las condiciones evaluadas, que el método de infusión es superior al de laminación manual.

Observando los espesores obtenidos por ambos procesos, estos son muy similares. Si bien comparando micrografías de material confeccionado por HLU y VI, se observa que en este último las capas de fibras están más cerca una de otra, no se traduce en una diferencia significativa en el espesor de la placa. Es decir, para las condiciones empleadas (4 telas de refuerzo y una estrategia de infusión que consiste en cortar la alimentación de resina una vez que finaliza la impregnación de la preforma), se obtuvieron niveles de compactación del refuerzo similares, lo que se traduce en similares contenidos volumétricos de fibra en todos los casos (Tabla 4.2) y explica que los módulos de Young sean prácticamente iguales y que las diferencias en tensión de rotura no sean significativas. Esto podría deberse a la poca cantidad de telas utilizadas en la preforma, en cuyo caso los mecanismos de apilamiento y *nesting* no son tan preponderantes [15].

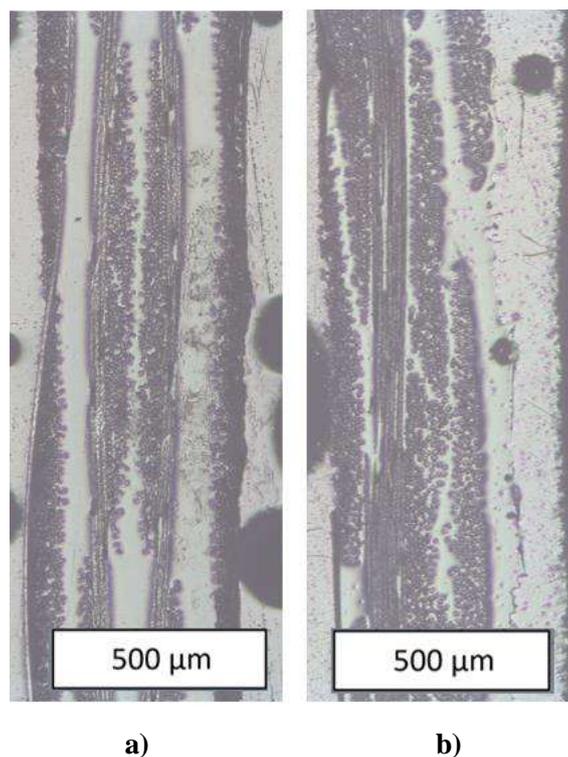


Figura 4.7. Comparación de micrografías 5x entre a) HLU y b) VI

Debido a la mejora observada en las propiedades mecánicas del compuesto procesado con resina desgasificada y a la observación de burbujas incluidas en las muestras de material sin desgasificar, se determinó que el mejor resultado de este apartado es la realización de una desgasificación de la resina. Por tanto, en las placas confeccionadas en las siguientes secciones se fabricaron siempre con resina desgasificada.

4.2.2 Efecto de la estrategia de infusión

En la tabla 4.3 se reportan los resultados obtenidos con las dos variaciones en la estrategia de infusión analizadas, los cuales se esquematizan en la Figura 4.8.

Tabla 4.3. Propiedades de los materiales para distintas estrategias de infusión.

Propiedad	VI 100%	VI 75%	VI 50%
Tensión a la rotura [MPa]	367 ± 20	362 ± 15	383 ± 30
Modulo [GPa]	19,1	20,2	20,1
Espesor promedio [mm]	$0,51 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$	$0,49 \pm 0,02$
Fracción volumétrica de fibra [%]	$44,6 \pm 0,2$	$46,8 \pm 0,2$	$49,2 \pm 0,4$

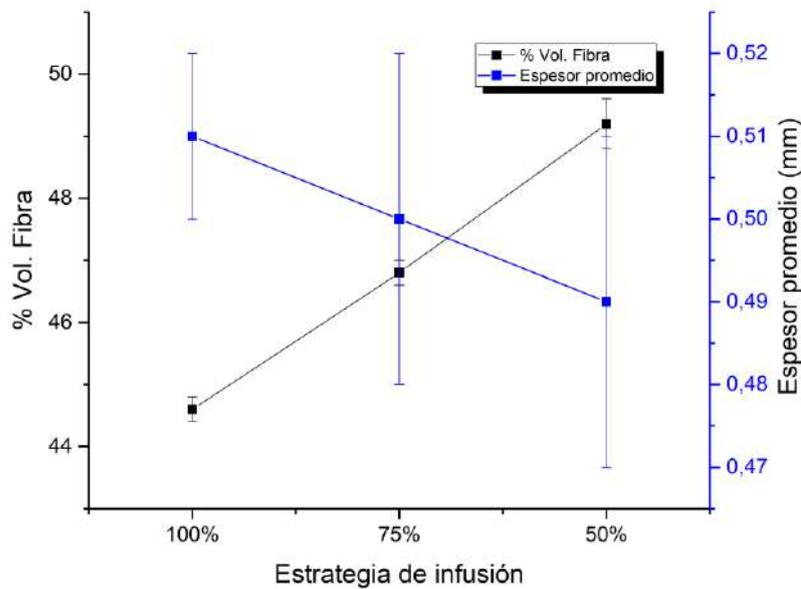


Figura 4.8. Fracción volumétrica de fibra y espesor promedio obtenidos para cada estrategia de infusión analizada.

Como se mencionó en la sección 3.2.1, se buscó mejorar la fracción volumétrica de fibras en el material variando el momento de cierre de entrada de resina.

Respecto a los valores de propiedades mecánicas, se observa un leve aumento de la resistencia y módulo de Young en las probetas en donde se utilizó la estrategia de cierre de entrada de resina al 50% de llenado de la preforma. Esto se puede correlacionar con el descenso de los espesores promedio y el consecuente incremento en el volumen de fibra obtenido por calcinación (Figura 4.8).

Sin embargo, los incrementos en las propiedades mecánicas son poco significativos. Esto podría deberse a que la preforma está compuesta por pocas telas y por lo tanto las diferencias que pudieran existir por la redistribución de resina son pequeñas.

Para obtener resultados más concluyentes, se decidió analizar el efecto de la estrategia de infusión en preformas compuestas por un mayor número de telas.

4.2.3 Efecto del número de telas de refuerzo

Como fue mencionado en la sección 3.2.1 en este caso se utilizaron 12 capas de refuerzo para la construcción de los laminados, en ambos métodos de procesamiento. Además, se confeccionó una placa por infusión utilizando la estrategia de infusión de cierre al 50% de llenado, ya que ésta fue la estrategia de homogenización que mostró influir en mayor medida las propiedades del material.

Los resultados de tensión a la rotura en tracción uniaxial, módulo de elasticidad, espesor promedio de las probetas y fracción volumétrica por calcinación se muestran en la tabla 4.4 y se representan gráficamente en las figuras 4.9 y 4.10.

Tabla 4.4. Resultados obtenidos para los materiales analizados en este apartado.

Propiedad	HLU 12	VI 12	VI 12 50%
Resistencia a la rotura [MPa]	321 ± 30	432 ± 40	497 ± 30
Modulo [GPa]	22,5	25,2	26,9
Espesor promedio [mm]	1,59 ± 0,03	1,29 ± 0,03	1,24 ± 0,01
Fracción volumétrica de fibra [%]	37,29 ± 0,5	49,4 ± 0,5	51,9 ± 0,5

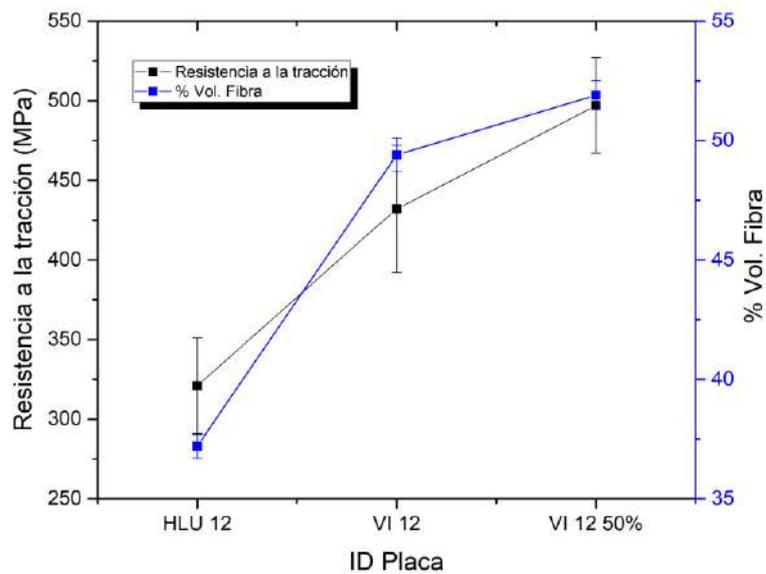


Figura 4.9. Fracción volumétrica de fibra y resistencia a la tracción obtenidos para cada laminado analizado en este apartado.

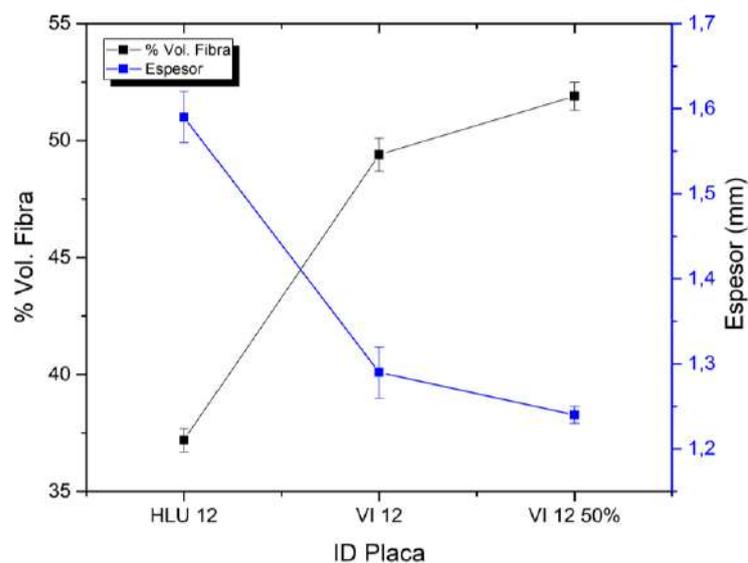


Figura 4.10. Fracción volumétrica de fibra y espesor promedio obtenidos para cada laminado analizado en este apartado.

A modo de comparación y para un mejor análisis, en la tabla 4.5 se muestran los mismos resultados, pero comparando con los obtenidos para los laminados de 4 capas de refuerzo confeccionados anteriormente.

Tabla 4.5. Comparación de resultados obtenidos para laminados de 4 y 12 telas de tejido de refuerzo

Nro. Telas	Tensión a la rotura [MPa]		Espesor promedio [mm]		Fracción volumétrica de fibra [%]	
	4	12	4	12	4	12
HLU	347 ± 23	321 ± 30	0,52 ± 0,01	1,59 ± 0,03	42,5 ± 2,5	37,3 ± 0,5
VI	367 ± 20	449 ± 45	0,53 ± 0,02	1,29 ± 0,03	44,5 ± 0,2	49,4 ± 0,5
VI 50%	383 ± 30	497 ± 30	0,49 ± 0,02	1,24 ± 0,01	49,2 ± 0,4	51,9 ± 0,5

Respecto a la tensión de rotura, en este caso se observa una fuerte dependencia del tipo de método de procesamiento empleado (Figura 4.9). Entre *hand lay up* e infusión hubo un aumento del 40% en la resistencia al utilizar 12 telas en la preforma.

Respecto a los espesores, también muestran una diferencia apreciable entre ambos métodos, a diferencia de lo observado con 4 capas de fibra. Así mismo, la fracción volumétrica de fibra aumenta entre un procesamiento y el otro.

En el caso de las preformas de cuatro telas, el espesor final obtenido es aproximadamente la suma de los espesores de cada tela, en ambas técnicas de procesamiento. En cambio, en las preformas de 12 telas, con HLU se obtuvo un espesor mayor que la suma de las capas y con VI uno menor. Esto indicaría que con mayor número de telas y con presión de vacío se intensifican los mecanismos de compactación de apilamiento y *nesting* [15], expuestos en la sección 1.2.2. Además, la remoción efectiva del exceso de resina en el proceso manual se dificulta al incrementar el número de telas de refuerzo ya que la presión ejercida por el rodillo no se transmite efectivamente hacia las capas inferiores del laminado.

Esta mejor compactación en VI con preformas de 12 telas promueve una mayor fracción volumétrica de fibras y un aumento de la resistencia y del módulo de elasticidad que explicaría los resultados obtenidos.

Al mismo tiempo, para *hand lay up* se obtuvo una resistencia media incluso menor que en el compuesto confeccionado utilizando menos capas de tejido. Como se mencionó anteriormente la presión aplicada manualmente con el rodillo no es suficiente para obtener una buena compactación entre capas de refuerzo a medida que se aumenta el número de las mismas, por consiguiente, no es posible remover efectivamente el aire atrapado ni el exceso de resina y, por el contrario, a lo que ocurre en el proceso de infusión por vacío, las propiedades del material disminuyen al aumentar el número de capas.

En la Figura 4.11 se observa una comparación entre las micrografías de una probeta fabricada por *hand lay up* y una por VI ambas con preformas de 12 telas. Se observa la

diferencia sustancial de compactación antes mencionada, generando zonas ricas en resina en el caso de HLU y un menor espacio entre capas de refuerzo en el caso de VI.

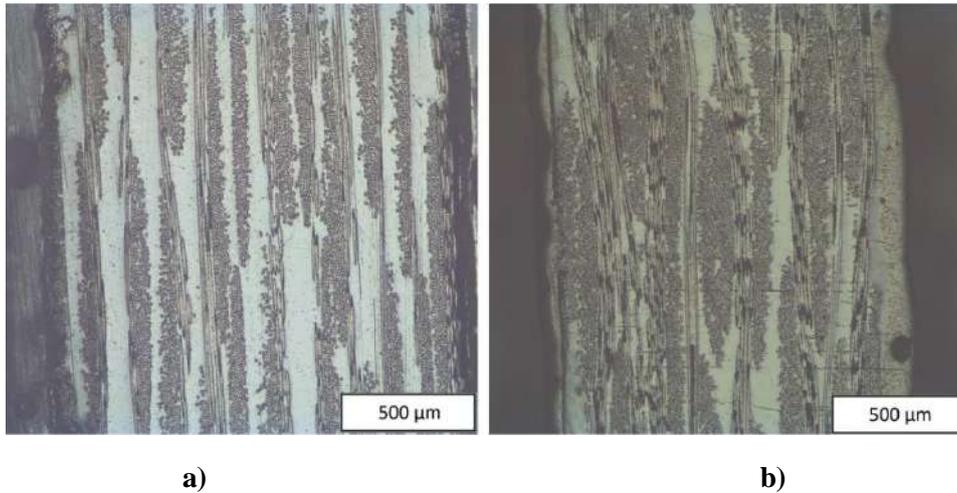


Figura 4.11. Comparación de micrografías 5x de a) HLU 12 y b) VI 12

En la Figura 4.12 se observa una comparación de las micrografías de probetas obtenidas por VI de 4 y 12 telas. Puede verse el menor espacio entre capas en el caso de 12 telas, debido a la mayor compactación antes mencionada. Cuando el número de capas en la preforma de un material compuesto aumenta, los mecanismos de compactación se vuelven más relevantes debido a que la oportunidad que sucedan fenómenos que conllevan una reducción del espacio libre entre las mechas de fibra, como el *nesting*, aumenta, lo que resulta en un “espesor por lámina” inferior que en preformas con menos número de telas de refuerzo.

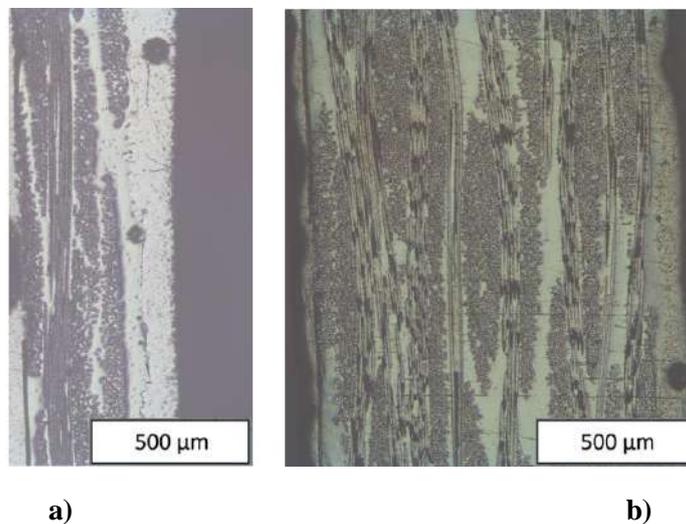


Figura 4.12. Comparación de micrografías 5x de a) VI con 4 telas de refuerzo y b) VI 12

Respecto al efecto de la variación en la estrategia de infusión, este fue también más notable al aumentar la cantidad de telas, lo cual también está asociado a una mejor compactación efectiva en preformas compuestas por más telas de refuerzo, como fue explicado anteriormente

Por lo tanto, los resultados indicarían que, al aumentar el número de capas de refuerzo, el proceso de infusión por vacío mejora notablemente las propiedades mecánicas del

material, respecto a *hand lay up*. En estos casos también se demostró que variar la estrategia de infusión mejoraría las propiedades mecánicas del material, al menos con este tipo de refuerzo utilizado.

4.2.4 Efecto del material de refuerzo

Para analizar el efecto del material de refuerzo en las diferencias obtenidas por ambos métodos de procesamiento se fabricaron dos placas, una por infusión por vacío y otra por laminación manual, con cuatro capas de refuerzo de fibras naturales. Se utilizó un tejido de yute bidireccional. Este tejido se caracteriza por presentar mechales de fibras cortas enroscadas y rugosas, y ha demostrado poseer malas cualidades en términos de compactación, es decir, requiere presiones de compactación muy elevadas para activar los mecanismos que reducen el espacio libre entre las mechales de fibra [5-6].

En la tabla 4.6 se muestran los resultados de los ensayos de tracción uniaxial.

Tabla 4.6. Resultados obtenidos para los laminados con refuerzo de yute.

Propiedad	Yute HLU	Yute VI 50%
Tensión a la rotura [MPa]	33 ± 1	40 ± 5
Modulo [GPa]	$5,6 \pm 0,4$	$4,2 \pm 0,2$
Espesor promedio [mm]	$4,6 \pm 0,1$	$3,15 \pm 0,04$
Fracción volumétrica de fibras [%]	18 ± 1	24 ± 1

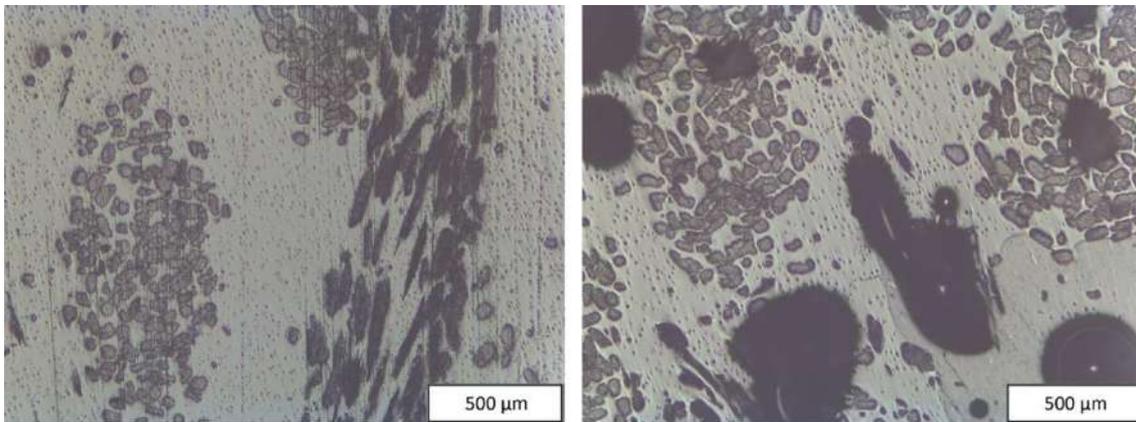
La resistencia a la rotura obtenida fue en promedio un orden de magnitud menor que la reportada para el refuerzo con fibra de vidrio. Además, los espesores obtenidos fueron mucho mayores que con el mismo número de fibra de vidrio.

La menor resistencia puede explicarse por la menor resistencia propia de las fibras naturales, que afecta la resistencia del compuesto (Tabla 1.1, ecuación 1), y además por la menor fracción volumétrica de fibras alcanzada con los tejidos de yute.

Respecto a los espesores, estos son mayores que en los de la fibra de vidrio, debido al mayor espesor de las telas de refuerzo y a la dificultad que presentan los tejidos de este tipo de fibras naturales para su compactación por su morfología superficial irregular y bajo alineamiento de las fibras. Esto afecta también la fracción volumétrica de fibras y la resistencia del material.

Al mismo tiempo, se observa una diferencia significativa de espesores entre HLU y VI en este caso (32% a diferencia del 6% en el caso de fibra de vidrio para 4 telas). Eso podría explicarse por la dificultad de compactación de los refuerzos naturales antes mencionada siendo muy difícil consolidar el laminado mediante el proceso de laminación manual y obteniendo beneficios significativos mediante el proceso de infusión por vacío. En la figura 4.13 se muestran microfotografías de muestras de material obtenido por HLU y

VI. Se observa la gran separación entre las mechas de fibras, lo que evidencia lo antes mencionado sobre la dificultad de compactación en refuerzos de fibras naturales.



a)

b)

Figura 4.13. Comparación de micrografías 5x con refuerzo de yute a) HLU y b) VI

5. Diseño y fabricación de una pieza real

Como paso final de este proyecto se decidió confeccionar una pieza real a los efectos de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la ejecución del mismo.

Se seleccionó como pieza un hidrofoil que es un perfil alar que se utiliza asociado a una tabla de surf para la práctica de diversos deportes como el wing foil, kite foil, o surf foil (Figura 5.1). Al deslizarse por el agua, el ala debe generar el empuje necesario para mantener a elevar la tabla de la superficie del agua y, al mismo tiempo, debe ayudar en su estabilidad. Esta pieza debe mantener su geometría durante su uso para no reducir la eficiencia hidrodinámica, por lo que se emplearon tejidos de fibra de carbono y resina epoxi para su fabricación.



Figura 5.1. Imágenes ilustrativas de hidrofoil.

La selección de esta pieza para fabricar tuvo varios motivos. Por un lado, es una pieza cuya geometría es compatible con los métodos de procesamiento vistos en este proyecto final. Al mismo tiempo, es una pieza realizable con los elementos y recursos con los que cuenta el grupo de trabajo. Por otro lado, es una pieza que tiene gran demanda en la zona de la costa atlántica de la República Argentina. Sin embargo, sólo existe una empresa nacional que fabrica este tipo de artefactos (WATERMAN CO.). Por tanto, la producción de esta pieza podría ser de interés para las pequeñas y medianas industrias de los deportes náuticos regionales.

5.1 Diseño CAD de pieza y molde

El primer paso fue el diseño CAD del hidrofoil. Para ello se utilizó un programa de código abierto (www.winghopper.com) que permite obtener un CAD en 3D del perfil alar deseado y exportar el archivo en diversos formatos, siendo el de nuestro interés el .STL. Este archivo fue importado en el software de diseño SolidWorks ® en el cual se trabajó para generar las dos cavidades del molde requeridas para confeccionar dicha pieza. En dicho programa se agregó también una sección cilíndrica a modo de encastre para conectar el ala fabricada al fuselaje (Figura 5.2).

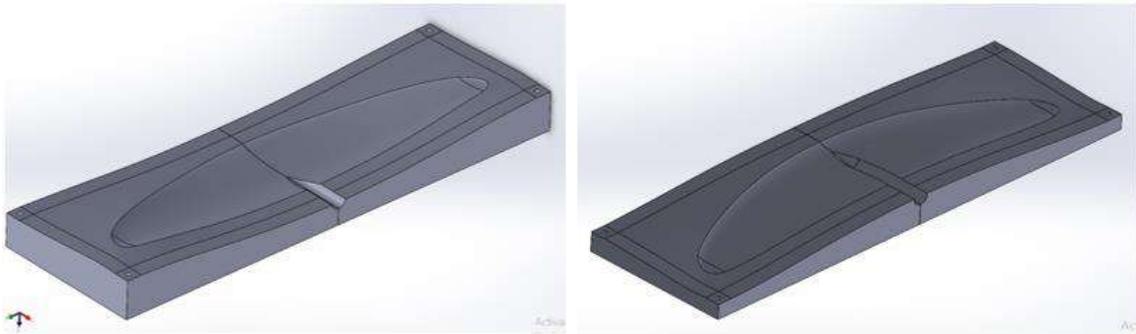


Figura 5.2. Diseño CAD del molde.

5.2 Fabricación de molde

El molde fue fabricado en madera en el CNC de la planta piloto de INTEMA a partir del modelo CAD antes confeccionado (Figura 5.3 a). El proceso de corte por control numérico generó una superficie escalonada en las piezas obtenidas, por lo que fue necesario suavizarla a mano mediante el uso de papeles de lija.

Luego, se le aplicó en su cara interna una capa de *gel coat* matricero (Figura 5.3 b) y se lo pulió a espejo, para proveer una terminación adecuada a la cara interna del molde que es la que determina la terminación superficial final de la pieza.

Por último, se le aplicaron varias capas de cera desmoldante para evitar la adhesión de la resina al molde y facilitar el posterior desmolde de la pieza.



a)

b)

Figura 5.3. a) Molde confeccionado en CNC, b) molde cubierto con capa de *gel coat*

5.3 Fabricación de la pieza mediante infusión por vacío

El material utilizado fue resina Epoxi Dipreg 86 ® y fibra de carbono bidireccional. La ficha técnica de la resina se encuentra en el Anexo 2.

Una vez cortada la fibra, se dispusieron 4 capas de refuerzo en cada una de las caras interna del molde. Posteriormente, se colocaron el *peel ply*, *flow media*, mangueras de entrada de resina y se cerró la membrana. La infusión se realizó por el método detallado en la sección 1.2.2 (Figura 5.4).

La estrategia de infusión seleccionada fue lineal desde un extremo hacia el otro de la pieza a lo largo de la misma, utilizando una “T” y manguera espiralada para generar un puerto lineal de entrada de resina. Además, se decidió cerrar la entrada de resina al momento de alcanzar el 100% de llenado. A pesar de que en la sección 4.2.2 y 4.2.3 se evidenció una mejora en las propiedades mecánicas con la estrategia de 50%, se decidió utilizar la estrategia tradicional debido a los riesgos de llenado incompleto que existían por la geometría compleja de la pieza, muy diferente a la geometría rectangular de las placas confeccionadas.



Figura 5.4. Pieza en la membrana de silicona post impregnación.

Durante el desmolde, hubo una adhesión no deseada de la pieza del molde y una de las caras sufrió una fractura de matriz. Por ello, se reforzó el área dañada con capas de fibra de carbono y resina epoxi laminadas manualmente (Figura 5.5) y, además, se laminaron “nervios” de sección rectangular para aumentar la rigidez estructural del foil (Figura 5.6).



Figura 5.5. Laminación manual de refuerzo en zona dañada.



Figura 5.6. Ambas caras de la pieza luego del refuerzo por laminado manual.

Posteriormente, se unieron ambas mitades y se rellenó el interior con materiales adhesivos de baja densidad, utilizando espuma de poliuretano en una primera etapa y resina epoxi cargada con microesferas de vidrio para completar el llenado en las zonas que así lo requirieron.

Finalmente, se lijó y pulieron manualmente los bordes y la superficie del foil y se le aplicaron varias manos de laca en aerosol. La pieza terminada se observa en las figuras 5.7 a y b.



a)



b)

Figura 5.7. Hidrofoil terminado. a) Cara superior, b) cara inferior

5.4 Prueba de la pieza

El foil, fue probado por practicantes del wingfoil en la costa de la ciudad de Mar del Plata y la pieza mostró cumplir con el objetivo de su diseño (Figura 5.8). Además, no sufrió daños, flexiones no deseadas ni entrada de agua por lo que puede concluirse que la fabricación de la pieza fue exitosa. Esto podría significar que existe la capacidad en la ciudad de confeccionar este tipo de piezas mediante infusión por vacío.

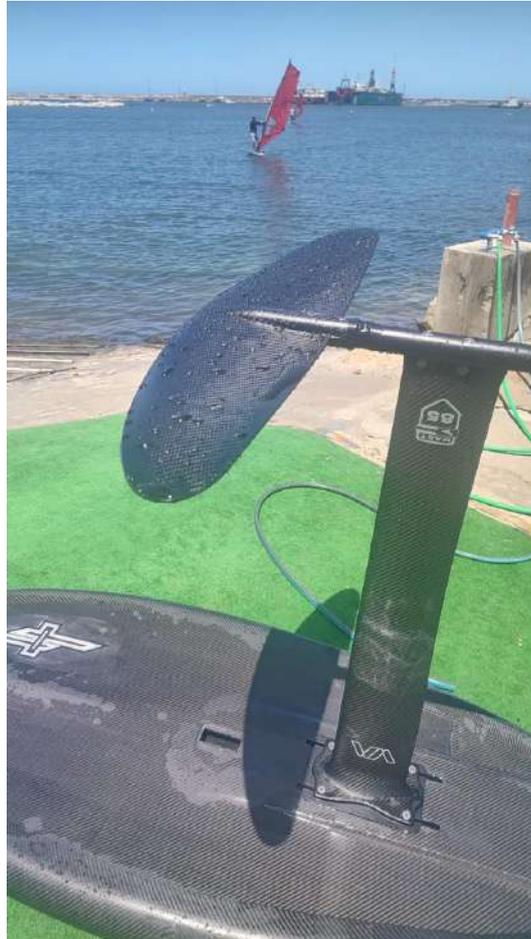


Figura 5.8. Hidrofoil confeccionado, accesorios correspondientes y tabla luego de prueba en mar.

6. Análisis económico costo – beneficio de los procesos

Actualmente, existe interés en industrias locales de manufactura de piezas de materiales compuestos por moldeo manual en dar un salto tecnológico hacia la utilización de infusión por vacío. Esto se debe a las, en teoría, mejores propiedades mecánicas de las piezas por infusión y la menor exposición a sustancias volátiles de los operarios.

El objetivo del presente capítulo es reportar un breve análisis comparativo de la inversión y costos de fabricación por ambos métodos estudiados de un compuesto de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio como los analizados previamente.

6.1 Inversión

En este análisis no se toman en cuenta inversión en planta, armado del espacio de trabajo, moldes, capital de trabajo u otros componentes de la inversión, puesto que para el desarrollo de ambas técnicas de manufactura analizadas estos componentes de la inversión son prácticamente idénticos y el objetivo de este capítulo es realizar una comparación. Por tanto, solo se analiza la inversión en equipamiento.

En la tabla 6.1 se presenta un listado de los valores de inversión en equipamiento para las dos técnicas de procesamiento.

Tabla 6.1. Inversión en equipos y herramientas para HLU y VI en dólares estadounidenses

Equipamiento - Herramientas	HLU (USD)	VI (USD)
Tijera para corte de fibras	10	10
Balanza granataria	100	100
Rodillo de laminación	32	-
Bomba de vacío	-	200
Semimáscara con filtro	100	100
Total	142	410

Respecto a la inversión en equipamiento, puede observarse que la diferencia radica en la adquisición de una bomba de vacío para el proceso de infusión. Es decir, no habría una diferencia significativa de inversión en equipamiento entre ambos procesos.

6.2 Costo de materiales y mano de obra

Por otro lado, en la tabla 6.2 se reportan los costos de fabricación de 1 m² de placa de material compuesto de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio de cuatro telas de refuerzo. Respecto a la hora-hombre requerida para cada manufactura, durante la realización de este proyecto se determinó que la infusión por vacío lleva aproximadamente el doble de tiempo que la laminación manual en lo que respecta a la preparación del sistema e infusión

Tabla 6.1. Costos de materiales y descartables para HLU y VI en dólares estadounidenses para 1 m² de laminado.

Material-Insumo	HLU (USD)	VI (USD)
<i>Peel ply</i>	-	5
Manguera para entrada de resina y venteo x 3m	-	1,8
<i>Flow media</i>	-	5
Manguera espiralada/m	-	0,4
Film de vacío/m ²	-	2,4
Cinta de sellado (<i>Tacky tape</i>) x 4m		2,6

Conexiones de tuberías		2,5
Fibra de vidrio	12	12
Resina poliéster catalizada	23,2	23,2
Operario	0,717	1,434
Total	36	57

Puede observarse que el proceso de infusión conlleva aproximadamente un 58% más de costos en materiales y descartables por m² de laminado. Por tanto, económicamente, la selección del método de procesamiento debe tener en cuenta el precio de venta del producto. Aquellos que posean un alto precio de venta debido al precio de mercado, altas prestaciones y/o valor agregado, como pueden ser elementos para deportes acuáticos, de aviación, alto rendimiento, etc. (cuyo precio de venta ronda 200-300 USD/m²) podría justificarse la utilización de VI desde el punto de vista económico, sobre todo teniendo en cuenta los beneficios a la salud de los operarios y la posibilidad de marketing de producto debido a la utilización de un procesamiento más tecnológicamente avanzado que HLU. Por el contrario, en piezas de bajo valor de venta, como pueden ser piletas, toboganes de plaza, etc. (cuyo precio de venta ronda los 60-70 USD/m²), la utilización de la técnica de HLU resulta conveniente para la factibilidad económica de la actividad.

7. Conclusiones

Este trabajo final tuvo como objetivo la comparación de los procesos de manufactura de materiales compuestos de matriz termorrígida reforzado con fibras moldeado manual e infusión por vacío, analizando las variables de procesamiento implicadas para poder optimizar los procesos y disponer de información para la selección de uno u otro en situaciones de fabricación reales a través de la fabricación de placas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio y yute.

Se analizó el efecto de las siguientes variables en las propiedades mecánicas del material obtenido: desgasificación de la resina, estrategia de infusión, número de capas de refuerzo y naturaleza del tejido de refuerzo. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante ensayos de tracción uniaxial complementadas con ensayos de densidad y contenido de fibra por ignición, siguiendo las normas correspondientes.

La desgasificación de la resina resultó beneficiosa en ambos procesos, HLU y VI, para las propiedades mecánicas, disminuyendo la presencia de porosidad en el compuesto, aunque las diferencias en resistencia a la tracción y módulo de Young de los materiales no fue significativa.

El número de telas que compone la preforma es determinante en el beneficio que se obtiene al utilizar VI en vez de HLU, debido a que afecta la compactación y las propiedades mecánicas del material. Con pocas telas, la compactación es limitada, lo que resulta en propiedades mecánicas y fracción de fibra similares entre distintos procesos. En cambio, al aumentar el número de telas, la compactación mejora significativamente, generando diferencias notables en las propiedades mecánicas. En particular, el proceso

VI muestra mejores resultados debido a su mayor uniformidad y eficiencia en la aplicación de presión de compactación

El cambio en la estrategia de infusión, deteniendo la entrada de resina antes del llenado completo de la preforma resultó beneficioso a la hora de aumentar la fracción de fibra obtenida, con un mayor efecto conforme se aumenta el número de telas en las preformas y pudo generarse un modelo matemático simple para evaluar la factibilidad o no del cambio de estrategia para lograr un llenado completo de la pieza. Sin embargo, este procedimiento puede ser riesgoso para geometrías complejas debido a la probabilidad de un llenado incompleto, lo que dificulta la aplicación del cambio de estrategia en piezas reales.

La morfología y arquitectura del tejido utilizado también mostró ser determinante en los resultados comparativos entre ambas técnicas. Tejidos con excelente compresibilidad (sintéticos) no se benefician tanto al utilizar VI en vez de HLU como los tejidos con baja compresibilidad (naturales).

Se diseñó una pieza real y pudo ser fabricada satisfactoriamente mediante el proceso de VI. Se obtuvieron conocimientos en el diseño de una pieza y su molde mediante herramientas de software y en la confección y preparación de un molde real, similar a los utilizados en la industria. Se pudo conformar la pieza y darle la terminación final satisfactoriamente, la cual cumplió con un correcto desempeño en entorno real.

Por tanto, podría concluirse que podría ser recomendable la utilización de moldeo manual en el caso de preformas de pocas telas, debido a su mayor practicidad práctica y menor material de descarte, mientras que para preformas con mayor cantidad de telas, se recomienda el proceso de infusión por vacío debido a la significativa mejora en las propiedades mecánicas del material obtenido. Se recomienda la desgasificación de la resina en cualquiera de los casos. Asimismo, si se utiliza refuerzo de fibras naturales, se recomienda utilizar infusión por vacío, independientemente de la cantidad de capas de refuerzo, debido a la mejor compactación de las fibras con este procesamiento en comparación con el de moldeo manual.

8. Trabajo a futuro

Como trabajo futuro, se podría desarrollar un modelo numérico para predecir la estrategia de infusión. Se ha comprobado que interrumpir el ingreso de resina antes del llenado de la preforma mejora la fracción volumétrica de fibras, aunque con el riesgo de un llenado incompleto. Si bien es posible modelarlo en geometrías simples, en piezas complejas resulta más desafiante. Por ello, la creación de un modelo computacional permitiría optimizar la estrategia de infusión, minimizando el riesgo de llenado incompleto y la pérdida de material.

Por otro lado, también podría analizarse el efecto del cambio de viscosidad en la resina y su efecto en la efectividad de la desgasificación, ya que, a mayor viscosidad, menor es la capacidad de movimiento de las burbujas y su posibilidad de ocluir.

Referencias

- [1] P.K. Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Design*, Third. CRC Press, 2007.
- [2] C. V Venkatesh and N. Kumar, “Experimental Investigation of Drilling Characteristics of Novel Glass Fiber Composite Reinforced With Aluminium Wire Mesh,” vol. 13, no. SO4, 2022, doi: 10.47750/pnr.2022.13.s04.057.
- [3] K. Palanikumar, T. Srinivasan, A. Sailesh, and K. Rajagopal, “Strength Validation and Morphological Studies of Glass Fiber Reinforced With Polypropylene Matrix (GFR/PP) Composites,” *Destech Transactions on Environment Energy and Earth Science*, no. seeie, 2016, doi: 10.12783/dteees/seeie2016/4659.
- [4] C. Greb, C. Lenz, M. Lengersdorf, and T. Gries, “18 - Fabrics for reinforcement of engineering composites,” in *Engineering of High-Performance Textiles*, M. Miao and J. H. Xin, Eds., Woodhead Publishing, 2018, pp. 489–512. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101273-4.00019-6>.
- [5] P.K Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Design*, Third. CRC Press, 2007.
- [6] E. Laranjeira, L. H. de Carvalho, S. M. de L. Silva, and J. R. M. d’Almeida, “Influence of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Polyester/Jute Composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 25, no. 12, pp. 1269–1278, 2006, doi: 10.1177/0731684406060577.
- [7] C. Zhou, Z. F. Chen, T. Xu, J. L. Qiu, and J. M. Zhou, “Glass Fibers as Engineering Materials,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 121–126, pp. 181–185, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.121-126.181.
- [8] J. Q. Zhang, “Research on Mechanical Properties of Different Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite Materials,” 2024, doi: 10.4028/p-87pc8a.
- [9] G. Francucci and E. Rodriguez, “Processing of plant fiber composites by liquid molding techniques: An overview,” *Polym Compos*, vol. 37, Sep. 2014, doi: 10.1002/pc.23229.
- [10] P.K Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Desig*, Third. 2007.
- [11] G. Francucci, A. Vázquez, and E. Rodriguez, “Key differences on the compaction response of natural and glass fiber preforms in liquid composite molding,” *Textile Research Journal*, vol. 82, pp. 1774–1785, Oct. 2012, doi: 10.1177/0040517511424533.
- [12] M. A. Valverde, J. P.-H. Belnoue, R. Kupfer, L. F. Kawashita, M. Gude, and S. R. Hallett, “Compaction behaviour of continuous fibre-reinforced thermoplastic composites under rapid processing conditions,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 149, p. 106549, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106549>.

- [13] P. Hu, Z. Shan, Y. Zang, Z. Sun, S. Wang, and H. Huang, "Compaction Behavior of 3D Woven Preforms With Hybrid Fibers and Under Different Process Parameters," *Polym Compos*, vol. 43, no. 11, pp. 8192–8201, 2022, doi: 10.1002/pc.26987.
- [14] G. Francucci, E. S. Rodríguez, and A. Vázquez, "Experimental study of the compaction response of jute fabrics in liquid composite molding processes," *J Compos Mater*, vol. 46, no. 2, pp. 155–167, Oct. 2011, doi: 10.1177/0021998311410484.
- [15] B. Chen, E. J. Lang, and T.-W. Chou, "Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding1Dedicated to Professor Ah S. Argon.1," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 317, no. 1, pp. 188–196, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01175-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01175-3).
- [16] A. D. Zegeye, M. A. Delele, A. A. Tsegaw, and T. S. Bogale, "Characterization of the Void Content and Laminate Quality of Fiber-reinforced Plastic Composites Manufactured Using the Resin Spray and Compaction Method," *Polym Compos*, vol. 45, no. 2, pp. 1300–1315, 2023, doi: 10.1002/pc.27855.
- [17] J. Yang, X. Jiayu, J. Zeng, D. Jiang, and C. Peng, "Compaction Behavior and Part Thickness Variation in Vacuum Infusion Molding Process," *Applied Composite Materials*, vol. 19, pp. 1–16, Jun. 2011, doi: 10.1007/s10443-011-9217-8.
- [18] P.K. Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Desig*, Third. CRC Press, 2007.
- [19] M.-X. Li, H. Mo, S.-K. Lee, Y. Ren, W. Zhang, and S. W. Choi, "Rapid Impregnating Resins for Fiber-Reinforced Composites Used in the Automobile Industry," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 20, p. 4192, 2023, doi: 10.3390/polym15204192.
- [20] P.K. Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Desig*, Third. CRC Press, 2007.
- [21] F. Jin, X. Li, and S. Park, "Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 29, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2015.03.026.
- [22] H. Nava, "Polyesters, Unsaturated," 2004, doi: 10.1002/0471440264.pst489.
- [23] M. M. Y. Zaghloul, Y. S. Mohamed, and H. Elgamal, "Fatigue and Tensile Behaviors of Fiber-Reinforced Thermosetting Composites Embedded With Nanoparticles," *J Compos Mater*, vol. 53, no. 6, pp. 709–718, 2018, doi: 10.1177/0021998318790093.
- [24] S. Du, Z. Guo, B. Zhang, and Z. Wu, "Cure Kinetics of Epoxy Resin Used for Advanced Composites," *Polym Int*, vol. 53, no. 9, pp. 1343–1347, 2004, doi: 10.1002/pi.1533.

- [25] P. Badrinarayanan, Y. Lu, R. C. Larock, and M. R. Kessler, "Cure Characterization of Soybean Oil—Styrene—Divinylbenzene Thermosetting Copolymers," *J Appl Polym Sci*, vol. 113, no. 2, pp. 1042–1049, 2009, doi: 10.1002/app.29776.
- [26] P.K Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Desig*, Third. CRC Press, 2007.
- [27] R. Chemeli and C. M. M. Ondieki, "Analysis of the Effect of Quantity of Catalyst and Laminate Thickness on Curing Time in Production of Glass Reinforced Polyester Composite," *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 5, no. 7, pp. 1–6, 2020, doi: 10.29121/ijetmr.v5.i7.2018.253.
- [28] J. M. Sanders *et al.*, "Computational Method for Simulating Thermoset Polymer Curing and Prediction of Thermophysical Properties," 2020, doi: 10.26434/chemrxiv.12453989.v1.
- [29] P.K. Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Desig*, Third. CRC Press, 2007.
- [30] M. Laborus, "Voids and bubbles during vacuum infusion," *Society of Manufacturing Engineers. Collected Papers and Technical Papers Presented at Southeastern Engineering and Tool Exposition*, pp. 1–9, 2001.
- [31] J. ; S. A. ; T. J. A. ; G. J. ; S. N. Juan, "Void Content Minimization in Vacuum Infusion (VI) via Effective Degassing," *Polymers (Basel)*, p. 13, 2021.
- [32] M. Afendi, W. M. Banks, and D. Kirkwood, "Bubble free resin for infusion process," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 36, no. 6, pp. 739–746, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.10.030>.
- [33] R. A. , T. P. K. , & D. A. Flinn, *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier, 2004.
- [34] P. M. Spasojevic, "Chapter 15 - Thermal and Rheological Properties of Unsaturated Polyester Resins-Based Composites," in *Unsaturated Polyester Resins*, S. Thomas, M. Hosur, and C. J. Chirayil, Eds., Elsevier, 2019, pp. 367–406. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816129-6.00015-6>.
- [35] Q. Govignon, S. Bickerton, J. Morris, and P. Kelly, "Full Field Monitoring of the Resin Flow and Laminate Properties During the Resin Infusion Process," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 39, no. 9, pp. 1412–1426, 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.05.005.
- [36] Q. Govignon, S. Bickerton, and P. Kelly, "Experimental Investigation Into the Post-Filling Stage of the Resin Infusion Process," *J Compos Mater*, vol. 47, no. 12, pp. 1479–1492, 2012, doi: 10.1177/0021998312448500.
- [37] J. H. Milgram, "An overview of the SCRIMP™ technology," *Massachusetts Institute of Technology*, 2001.

- [38] B. Yenilmez, M. Senan, and E. Murat Sozer, "Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process," *Compos Sci Technol*, vol. 69, no. 11, pp. 1710–1719, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.05.009>.
- [39] H. Rydarowski and M. Kozioł, "Repeatability of Glass Fiber Reinforced Polymer Laminate Panels Manufactured by Hand Lay-Up and Vacuum-Assisted Resin Infusion," *J Compos Mater*, vol. 49, no. 5, pp. 573–586, 2014, doi: [10.1177/0021998314521259](https://doi.org/10.1177/0021998314521259).
- [40] A. Jatmiko, I. P. Handayani, and A. Suhendi, "Speed Controlled Composite Fabrication Using DC Motor," *Journal of Measurements Electronics Communications and Systems*, 2021, doi: [10.25124/jmecs.v8i1.3829](https://doi.org/10.25124/jmecs.v8i1.3829).
- [41] K. Sałasińska *et al.*, "The Effect of Manufacture Process on Mechanical Properties and Burning Behavior of Epoxy-Based Hybrid Composites," *Materials*, vol. 15, no. 1, p. 301, 2022, doi: [10.3390/ma15010301](https://doi.org/10.3390/ma15010301).
- [42] Z. Grofti *et al.*, "Simultaneous characterization of preform expansion and permeability in vacuum assisted resin infusion," *Polym Compos*, vol. 43, no. 6, pp. 3560–3573, Jun. 2022, doi: [10.1002/pc.26637](https://doi.org/10.1002/pc.26637).
- [43] J. Tang, Z. H. Wu, S. L. Xing, Q. Zheng, and Z. Shen, "An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Glass Fiber Woven Roving Fabrics/Chopped Strand Mats Hybrid Composites Manufactured by Different Processes," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 664, pp. 8–13, Oct. 2014, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.664.8](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.664.8).
- [44] S. Erdem, M. O. Kaman, and M. Gür, "Effect of layer number on bending behavior of 3D spacer composite plates produced with different methods," *FIRAT UNIVERSITY JOURNAL OF EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL ENGINEERING*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: [10.5505/fujece.2022.10820](https://doi.org/10.5505/fujece.2022.10820).
- [45] A. Yaacob *et al.*, "Comparative mechanical properties study of resin infusion versus hand laminating for the construction of 12-ft fishing boat," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, pp. 1954–1960, Mar. 2017.
- [46] O. Ujianto, A. Nugroho, H. S. Setijotomo, and A. Bintoro, "Effect of Fabrication Techniques, Resin Types and Fiber Combinations on Mechanical Properties and Morphology of Glass Fiber Composites," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 8, no. 1, pp. 17–21, Feb. 2020, doi: [10.18178/ijmmm.2020.8.1.477](https://doi.org/10.18178/ijmmm.2020.8.1.477).
- [47] P.K. Mallick, *FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Design*, Third. CRC Press, 2007.
- [48] "Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," Sep. 15, 2008, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: [10.1520/D3039_D3039M-08](https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-08).

Anexo

1. Ficha técnica de resina poliéster utilizada.



BOLETIN TÉCNICO

POLIAL® Z-1000-190-60-1

Tipo de material:

Es una resina poliéster insaturada, ortoftálica, pre-acelerada, de mediana reactividad y flexibilidad, de elevado peso molecular; al combinarse con las excelentes propiedades mecánicas la hacen apropiada para la producción de estructuras solicitadas a esfuerzos mecánicos severos.

Usos y aplicaciones:

Especialmente formulada para la producción de piezas producidas por el método de infusión por vacío, como ser palas eólicas, carenados, cascos de embarcaciones, etc.

Propiedades Físico –Químicas:

	Normas	Unidades	Valores
a) Aspecto:	N/A	Visual	Líquido transparente levemente azulado
b) Viscosidad:	TM-002-1	cPs	180 - 200
c) Tiempo de Gel:	TM-003-1	min:seg	50:00 – 80:00
d) Tiempo al exotérmico:	TM-003-1	min:seg	80:00 – 120:00
e) Pico exotérmico:	TM-003-1	°C	150 - 200
f) Intervalo simple:	TM-003-1	min:seg	15:00 – 25:00
e) Acidez:	TM-004-1	mgKOH/g	10 - 20

Notas:

c) d), e) y f) Condiciones de trabajo:

Acelerador: Promovida

Catalizador PERLY-OX® 50S: 2.0 %.

Temperatura: 25 °C.

Guía de Procesamiento:

La resina **POLIAL® Z-1000-190-60-1** es miscible con estireno. Sin embargo, la adición de estireno puede deteriorar sus propiedades físicas. La **POLIAL® Z-1000-190-60-1** está pre-acelerada, por lo que no se debe agregar acelerante de cobalto o amina para el endurecimiento a temperatura ambiente. Para el curado de la resina **POLIAL® Z-1000-190-60-1** se pueden utilizar peróxidos de metil etil cetona con bajo contenido de peróxido de hidrógeno y agua (p.ej. **PERLY-OX® 50S**). El estado final del curado debe optimizarse para aplicaciones en la construcción de palas eólicas, post-curando a 80°C 3 horas. El post-curado a temperaturas elevadas es muy recomendable para piezas de plástico reforzadas expuestas a situaciones mecánicas severas.

Propiedades Mecánicas de la Resina sin Refuerzos:

		Normas	Unidades	Valores
A) Tracción	Resistencia:	ASTM D 638	Kg/cm ²	720 ± 60
	Módulo:	ASTM D 638	Kg/cm ²	34500 ± 3000
	Elongación:	ASTM D 638	%	3,6 ± 0,36
B) Flexión	Resistencia:	ASTM D 790	Kg/cm ²	1250 ± 100
	Módulo:	ASTM D 790	Kg/cm ²	31300 ± 3100
	Elongación:	ASTM D 790	%	6,4 ± 0,6
C) Temp. de flexión bajo carga:		ASTM D 648	°C	78 ± 5

Nota: Estos resultados fueron determinados en el Laboratorio de Poliresinas San Luis S.A

2. Ficha técnica de resina epoxi utilizada.

DIPREG® 86 A/B



Generalidades

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

Aplicaciones

- Laminados náuticos de grandes dimensiones, Cascos, cubiertas, timones, botes de remo canoas y veleros de alta competencia por laminado manual e infusión. Aeromodelismo y construcción de artículos deportivos. Wind-kite, bicicletas, hockey, tenis, etc.
- Automovilismo y motociclismo de competencia. Construcción de carrocerías, accesorios, spoilers, alerones, tableros, butacas, protecciones, carenados etc. Palas y accesorios en impulsores de generadores eólicos, ventiladores y extractores industriales, especialmente en medioambientes agresivos. Química, petróleo, marino.
- Construcción de caños PRFV por el proceso de moldeo por arrollamiento. Filament winding. Moldeo de piezas industriales reforzadas con fibra de vidrio, carbono, aramida.
- Aeronáutica deportiva y experimental. Fuselajes y piezas no portantes. Construcción de herramental de grandes dimensiones en PRFC y PRFV para matricería, liviano, de alta precisión y estabilidad dimensional. Moldes para laminados, modelos patrones. Calibres.
- Procesamiento manual asistido por vacío, inyección y transferencia RTM-Light - VARTM, infusión, etc.

Instrucciones de uso

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

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

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

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

Propiedades de la mezcla (@ 25°C):

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

Aplicación y proceso de curado:

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

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

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

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

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

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

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

Propiedades después del curado

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

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

**Depende del ciclo de postcurado

Presentación

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

Almacenamiento

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

Seguridad y medio ambiente

Las resinas epoxi y sus endurecedores en general son irritantes, sensibilizantes de piel y mucosa, por lo cual deberá trabajarse en un ambiente ventilado y usar guantes descartables. No debe utilizarse solventes de ningún tipo para higiene personal. Únicamente lavarse con agua tibia y secarse con toallas de papel descartable para evitar contaminación. Usar protección ocular. No son considerados productos inflamables de 1a clase. En caso de requerirlo contamos con la correspondiente Hoja de Seguridad MS05. Los residuos del compuesto epoxi endurecido junto con los guantes descartables, implementos y envases vacíos, deben ser considerados de acuerdo con la legislación local vigente, como residuos especiales / peligrosos para el medio ambiente.

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

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