



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Naval

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE PIEZAS
LAMINADAS OBTENIDAS POR INFUSIÓN**

Tesis para optar al título de
Ingeniero Naval
Mención: Arquitectura Naval

Profesor Patrocinante:
Sr. Richard Luco Salman
Ingeniero Naval
Licenciado en Ingeniería Naval
Doctor en Ingeniería Naval

DANILO IVAN RIOS SALAS
VALDIVIA - CHILE
2010

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de **Ingeniero Naval**, mención **Arquitectura Naval**.

EXAMEN DE TITULO:

Nota de Presentación (Ponderada) (1) :
Nota de Examen (Ponderada) (2) :
Nota Final de Titulación (1 + 2) :

COMISION EXAMINADORA:

----- DECANO	----- FIRMA
----- EXAMINADOR	----- FIRMA
----- EXAMINADOR	----- FIRMA
----- EXAMINADOR	----- FIRMA
----- SECRETARIO ACADEMICO	----- FIRMA

Valdivia,.....

Nota de Presentación = $NC / NA * 0,6 + \text{Nota de Tesis} * 0,2$
Nota Final = $\text{Nota de Presentación} + \text{Nota Examen} * 0,2$
NC = Sumatoria Notas de Currículo, sin Tesis
NA = Número de asignaturas cursadas y aprobadas, incluida Práctica Profesional

Índice

I.	Introducción	1
II.	Materiales compuestos	2
	II.1 Componentes de un material compuesto	2
	II.2 Los polímeros	3
	II.3 La fase de refuerzo	3
	II.4 La interfase	4
	II.5 Resinas	4
	II.6 Las resinas de poliéster	4
	II.7 Los Monómeros	5
	II.8 Inhibidores	5
	II.9 Catalizadores	6
	II.10 Acelerantes	6
	II.11 Las resinas de viniléster	6
	II.12 Las resinas epóxicas	6
	II.13 Las resinas fenólicas	7
	II.14 El Gelcoat	7
	II.15 Los Topcoats	7
	II.16 Cargas y Aditivos	8
	II.17 Construcción sándwich	8
III.	Método de infusión	10
	III.1 Fundamentos teóricos	10
	III.2 Ventajas del proceso de infusión	11
	III.3 Infusión con una línea principal	11
	III.4 Utilización de software	13
	III.5 Tipos de fibra, resina y núcleo	13
	III.6 Infusión en secuencia	14
	III.7 Montaje	15
	III.8 Skin Coat	16
IV.	Experimentación	17
V.	Análisis de resultados	45
VI.	Conclusiones	47
VII.	Bibliografía	48

Resumen:

El presente trabajo tiene como objetivo principal familiarizarse empíricamente con un moderno proceso de laminación, conocer las dificultades técnicas para su desarrollo e identificar las ventajas y desventajas en comparación con la utilización de otros métodos de laminación.

Se obtendrán diversas piezas laminadas con diferentes métodos y esquemas de laminación para comparar finalmente los resultados.

Abstract:

This research work's main objective is take an empirical approach with a modern lamination process, recognize the technical difficulties in their development and identify the advantages and disadvantages compared to using other methods of lamination.

It will get several laminated pieces with different lamination methods and schemes to finally compare the results.

I Introducción

Durante muchos años el desarrollo de piezas fabricadas con plástico reforzado con fibra de vidrio ha quedado estancado en procesos que fueron desarrollados hace más de cincuenta años. Si bien estas piezas han tenido un aceptable desempeño, la tecnología de procesos ha avanzado de tal forma que el resultado de materiales fabricados hoy en día poco se asemeja a sus predecesores. ¿Cuál es la razón por la que ha permanecido en vigencia durante décadas un proceso que no avanza en armonía con las necesidades técnicas y sociales de la actualidad? Podríamos decir que el nivel de capacitación es bajo para el método de laminación manual, o que se tiene una alta productividad con la utilización del método de proyección simultánea y así enumerar muchas razones que justifique el uso de procesos desde un punto de vista netamente económico. Sin embargo, el mundo cambia así como también las necesidades.

Hoy, con el desarrollo de los avances tecnológicos se requieren materiales que cumplan con estándares estructurales más elevados, materiales livianos y fuertes en la exigente industria aeroespacial y en la emergente tecnología de energías limpias como en el caso de la construcción de aspas para turbinas eólicas.

El panorama actual que se observa es el de una sociedad que avanza tecnológicamente en detrimento de nuestro entorno. Los procesos poco amigables con la naturaleza han provocado un grave daño que finalmente repercute en la calidad de vida del ser humano y de toda especie viviente. El hombre no puede obviar este hecho y sin duda alguna estamos obligados a buscar y utilizar conductas que armonicen con los procesos naturales.

La tecnología en la fabricación de materiales compuestos ha hecho un avance en este sentido, como la búsqueda de resinas provenientes de fuentes renovables como alternativa a las derivadas del petróleo. Sin embargo hay mucho camino por recorrer, nos encontramos con desechos provenientes de materiales descartables sin opción de ser reutilizados y lo que es peor, no pudiéndose degradar durante muchos años.

En las próximas páginas se hará una pequeña introducción a los materiales compuestos y finalmente se abordará el proceso de infusión como un método que nos muestra que es posible avanzar tecnológicamente atendiendo a las necesidades ambientales.

II Materiales Compuestos

Un material compuesto es un sistema de materiales formados por dos o más fases físicas distintas, cuya combinación produce propiedades diferentes a las de sus constituyentes.

La importancia que adquieren los materiales compuestos en el campo comercial y sobre todo en la Ingeniería es que sus propiedades no solamente son diferentes a sus constituyentes sino que además, con frecuencia son superiores.

Como se indicó en la definición, un material compuesto consta de dos o más fases, en donde el término fase indica un material homogéneo, por tanto todos los granos tienen la misma estructura cristalina. Tal es el caso de los metales y los polímeros.

Una de las formas en que podríamos clasificar los materiales compuestos sería como **tradicionales y compuestos sintéticos**.

Los compuestos tradicionales son aquellos que existen en la naturaleza o han sido producidas en la Antigüedad. Los compuestos sintéticos son sistemas de materiales modernos donde los componentes se producen por separado para luego combinarse y lograr la estructura, propiedades y forma deseada.

II.1 Componentes de un material compuesto

De la forma más simple, un material compuesto consiste en dos fases: una primaria y la otra secundaria. La fase primaria forma la matriz en la cual se incorpora la segunda fase que actúa como un agente de refuerzo y que tiene forma de fibras, partículas u otras. Las fases son generalmente insolubles entre sí, pero debe existir una fuerte adhesión entre sus interfaces.

La fase primaria o matriz puede ser cualquiera de los tres tipos de materiales básicos: polímeros, metales o cerámicos. La fase secundaria también puede ser uno de los tres tipos de materiales. La combinación de una matriz de polímero con la fase secundaria de cerámicos son las que nos interesan además de la combinación de la fase primaria y secundaria de polímeros como el caso particular de una matriz epóxica reforzada con Kevlar.

Las resinas termofijas son los polímeros más ampliamente usados en los compuestos de matriz polimérica.

El material de la matriz tiene varias funciones en el compuesto, suministra la forma del producto hecho de material compuesto, mantiene en su lugar a la fase incorporada cuando se aplica una carga, la matriz comparte la carga con la fase secundaria, en algunos casos se deforma para que el esfuerzo sea soportado por el refuerzo.

II.2 Los polímeros

Un polímero es un compuesto formado por moléculas de cadena larga y en la que cada molécula está hecha de unidades que se repiten y se conectan entre sí. En una sola molécula de polímero puede haber miles e incluso millones de unidades que la forman. La mayoría de los polímeros se consideran sustancias químicas orgánicas ya que se basan en el carbono, no obstante, existe un grupo de polímeros inorgánicos que son de mayor interés en Ingeniería y están hechos mediante procesos químicos.

Los polímeros se dividen en hules y plásticos, y estos últimos se dividen en termoplásticos y termofijos (también conocidos como termoestables).

Termoplásticos: son materiales sólidos a temperatura ambiente, pero cuando son sometidos a altas temperaturas se convierten en líquidos viscosos y de esta forma es posible conformarlos. Pueden soportar repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento sin que sufran una degradación significativa.

Termofijos: con calentamiento inicial se ablandan para ser moldeados, pero sometidos a elevadas temperaturas se produce una reacción química que endurece el material y lo convierte en un sólido infusible. Si los polímeros termofijos se recalientan, se degradan por pirólisis.

Los polímeros termofijos se caracterizan por tener una estructura tridimensional de alto encadenamiento transversal, este encadenamiento se logra en tres formas:

- **Sistemas activados por temperatura.** Los cambios se producen por fuentes de calor durante el proceso de conformado. El material se somete a calentamiento para ablandarlo y así dar forma. Una mayor exposición al calor provoca el encadenamiento transversal del polímero.
- **Sistemas activados catalíticamente.** El encadenamiento transversal se produce cuando es agregado una pequeña cantidad de catalizador en fase líquida al polímero y en consecuencia, cambia a la forma sólida.
- **Sistemas activados por mezcla.** La mayoría de las resinas epóxicas son ejemplos de estos sistemas en donde el mezclado de dos sustancias químicas genera una reacción que forma un polímero sólido con cadenas transversales.

II.3 La fase de refuerzo

Se recalca que la fase secundaria tiene como objetivo reforzar a la fase primaria. Las fases incorporadas más comunes se presentan como fibras o partículas.

Las fibras son filamentos de material de refuerzo. En los compuestos reforzados con fibra se considera con frecuencia a ésta como el constituyente principal ya que soporta la mayor parte

de la carga. Éstas son de interés debido a que la forma del filamento posee una mayor resistencia que la forma masiva.

II.4 La interfase

Siempre hay una interfase entre las fases constituyentes de un material compuesto. En la unión de las fases se debe formar un enlace para que el compuesto funcione de forma efectiva. En algunos casos la unión es directa pero en otros se debe añadir un tercer ingrediente para producir la unión de las dos fases. Este tercer ingrediente se conoce con el nombre de interfase y puede considerarse como un adhesivo. Un ejemplo de interfase la encontramos en el recubrimiento de las fibras de vidrio para lograr la adherencia con la resina termofija en los plásticos reforzados con fibra de vidrio.

II.5 Resinas

En la construcción naval podemos encontrar distintos tipos de resinas utilizadas como matriz para los refuerzos, así podemos enumerar las siguientes:

- **Resinas de poliéster.**
- **Resinas de viniléser.**
- **Resinas epóxicas.**
- **Resinas fenólicas.**

II.6 Las Resinas de poliéster

Las resinas de poliéster son en la actualidad las más utilizadas en el campo de la Construcción Naval. Son producidas por medio de reacciones de policondensación entre dos monómeros, diol + ácido di carboxílico. Dependiendo de la naturaleza de sus monómeros las podemos dividir en Ortoftálicas e Isoftálicas.

Cuando finaliza la reacción de condensación entre los monómeros, la resina de poliéster se disuelve en un medio reactivo, generalmente estireno con lo que resulta la fluidización del conjunto y de esta forma facilitando la impregnación del refuerzo.

Para que se lleve a cabo la polimerización de la resina, se debe añadir un sistema catalítico que comprende un iniciador y un acelerador. El curado de las resinas de poliéster se produce por polimerización a través de grupos insaturados en la cadena del poliéster y en el monómero. La resina de poliéster empieza a curar al momento que se le añade el catalizador y comienza una reacción exotérmica en donde la temperatura puede llegar a 150°C en un corto periodo dependiendo de la geometría del laminado.

Ya después que se ha alcanzado el pico exotérmico, la resina lentamente comienza a enfriarse mientras que la reacción química disminuye.

Podemos identificar tres etapas en el proceso de curado de la resina de poliéster:

- Gelificación, donde la resina pasa de un estado líquido a un gel blando.
- Endurecimiento, donde el gel se transforma en un material duro que puede ser extraído del molde sin sufrir un cambio en su geometría.
- Curado final, en este punto la resina adquiere sus propiedades químicas y mecánicas. Esta etapa puede finalizar al cabo de muchas horas a temperatura elevada, mientras que a temperatura ambiente puede durar varias semanas.

Las resinas de poliéster son cuerpos inestables, como consecuencia, se melifican con gran facilidad, por esta razón deben conservarse en recipientes herméticos para evitar la acción del oxígeno y la evaporación de los productos. Además deben conservarse en sitios oscuros y temperaturas bajas.

La temperatura de trabajo ideal de las resinas de poliéster es entre 15 y 20°C. Por debajo de los 10°C no endurecen o lo hacen muy lentamente.

Uno de los principales inconvenientes que tienen las resinas de poliéster es que tienden a contraerse durante el endurecimiento, en algunos casos hasta un 7%, sin embargo se encuentra entre las más económicas de las resinas.

II.7 Los monómeros

Los monómeros dentro de las resinas de poliéster actúan de dos formas, una como disolvente para que presente un aspecto líquido y sea manipulable, la otra es para entrecruzar las cadenas de poliéster y obtener una estructura cruzada. El monómero de estireno es el más utilizado ya que contiene una baja viscosidad, es de fácil obtención y es económica.

II.8 Inhibidores

Las funciones básicas de estos productos son:

- Regularizan la fabricación de la resina evitando que la reacción de polimerización no entorpezca la reacción de policondensación.
- Conserva las propiedades de la resina cuando está almacenada.
- Cuando la resina es catalizada, el inhibidor retarda la polimerización para permitir el moldeo.
- Limita la elevación de la temperatura debido a la reacción exotérmica y como consecuencia prolonga el tiempo de reacción.

Existen distintos tipos de inhibidores: estabilizantes, retardadores y especiales para monómeros.

II.9 Catalizadores

La adición de un catalizador a la resina de poliéster es el último paso que debe hacerse en el proceso de obtención de un material compuesto. El catalizador produce radicales libres que provocan la iniciación de la reacción de polimerización para el endurecimiento de la resina. Los catalizadores basados en peróxidos orgánicos son altamente inflamables, incluso sin la presencia de aire en algunos casos.

II.10 Acelerantes

Refuerzan la acción de los catalizadores y permite polimerizar a temperaturas menos elevadas. Jamás deben mezclarse con los catalizadores debido a que existe riesgo de explosión.

Los acelerantes, en muchas ocasiones son adicionados a las resina por los mismos proveedores, de esta forma se elimina el riesgo de mezclar por accidente ésta con el catalizador, además las mezclas realizadas por los proveedores son mas exactas que las que pueden hacerse en el lugar de trabajo.

II.11 Las resinas de viniléster

Estas resinas poseen propiedades muy similares a las epóxicas con un curado más rápido y son muy resistentes a la corrosión debido a los pocos grupos de ésteres susceptibles de ser atacados.

Son producidas a través de una reacción entre una resina epóxica y un ácido metacrílico o acrílico para luego ser disuelto en estireno y resultando de esta forma un producto menos viscoso que se asemeja a la resina de poliéster.

Al igual que la resina de poliéster, utilizan un catalizador y un acelerante y tienen un costo mas elevado que las resinas de poliéster (1,5 a 2 veces).

Una de las ventajas que tienen respecto de las resinas de poliéster es la menor contracción que sufren durante el endurecimiento.

II.12 Las resinas epóxicas

Comenzaron a fabricarse en 1938 y es el material de matriz más utilizado en los materiales compuestos avanzados.

Se basan en los llamados epóxidos (generalmente bisfenol A), que endurecen por poliadición al reaccionar con endurecedores polifuncionales como aminas, fenoles y poliácidos. En otras palabras, estos endurecedores actúan en la reacción para que se produzca el curado, a diferencia de los catalizadores en las resinas de poliéster y viniléster.

Poseen las mejores características mecánicas y tienen la mayor resistencia térmica, además de una excelente estabilidad dimensional que elimina la contracción durante el proceso de curado.

Entre los inconvenientes principales se encuentra la fácil absorción de humedad y su elevado costo.

II.13 Las resinas fenólicas

Son las más antiguas y se fabrican a través de una reacción de condensación entre el fenol y el formaldehído, como producto residual se obtiene agua.

Posee buena resistencia al fuego, alta estabilidad térmica, buena resistencia química y baja absorción de humedad.

II.14 El Gelcoat

Es la capa de resina que tiene contacto con el exterior formando una barrera que impide el desgaste prematuro de la pieza terminada.

Entre las funciones principales del Gelcoat podemos citar las siguientes:

- Proteger las fibras de las influencias externas.
- Ocultar las fibras para proporcionar una superficie más atractiva.
- Proveer la superficie de ciertas características como color, resistencia, etc.

Entre los defectos en las capas de Gelcoat podemos encontrar la presencia de grietas debido a que esta capa se encuentra casi sin soporte. Se suele reforzar la capa de Gelcoat con un velo para evitar este defecto.

Los gelcoat se encuentran en el mercado de dos formas; diluidos en acetona o estireno para ser aplicados con pistola, y con elevada tixotropía para su aplicación con brochas.

II.15 Los Topcoats

La resina topcoat contienen cera y es utilizada en la superficie rugosa del laminado con los siguientes objetivos:

- Facilitar el curado de la última capa, evitando el contacto con el aire que pudiera perjudicar el curado.

- Proteger el laminado y proporcionar una superficie con mejor acabado.
- Equilibrar el laminado para compensar la presencia del Gelcoat.

II.16 Cargas y aditivos

Existen varios productos que se incorporan a las resinas para proporcionar características especiales, como aumentar la rigidez, reducir la contracción de las piezas, controlar la viscosidad, mejorar los acabados superficiales.

Entre los productos mas utilizados tenemos:

- Cargas inorgánicas: aligeran la pieza, disminuyen la contracción de la matriz, abaratan costos.
- Cargas ignifugantes.
- Colorantes y pigmentos.
- Agentes anti-UV.
- Lubricantes internos que modifican las fuerzas intermoleculares disminuyendo la viscosidad.
- Agentes desmoldeantes.

La cargas tienen una variedad de usos, pueden aumentar la tixotropía de las resinas para la preparación de masillas, rellenar cavidades, etc.

Entre las más utilizadas tenemos:

- Agente tixotrópico: un sílice coloidal que proporciona viscosidad y evita que el material se escurra en superficies verticales e inclinadas.
- Microesferas sintéticas huecas: se utilizan como aditivo de pinturas o resinas para obtener un compuesto de baja densidad, sistemas de encolado de bajo peso y masillas de baja densidad.
- Microfibras: se adicionan a las resinas para elaborar masillas de pegado estructurales. Están constituidas por pulpa de madera pulverizada.
- Esferas huecas de vidrio: reducen la densidad de la resina, aumentando la viscosidad y volumen.

II.17 Construcción Sándwich

La construcción tipo sándwich fue desarrollada a partir de la teoría de vigas en forma de I. Una viga puede ser más rígida y más leve si eliminamos cierta cantidad de material innecesario dejando no más que dos alas horizontales separados por un alma vertical que los une rígidamente. La construcción sándwich en un laminado ofrece las mismas características que las vigas

metálicas en forma de I, con la diferencia que se fabrica de un material de baja densidad en el núcleo y laminado por ambas caras con distintas fibras.

Los laminados con fibra poseen muchas ventajas con respecto a otros tipos de materiales, desgraciadamente la resistencia a la flexión no es uno de los puntos fuertes de los plásticos reforzados ya que tienen un bajo módulo de elasticidad.

Se podrían laminar estructuras monolíticas con cierta cantidad de refuerzos en forma de U invertidas que se extienden de forma transversal y longitudinal a través de los paneles, sin embargo, resultaría en un tiempo de producción bajo, alto costo y peso si se compara con una construcción en sándwich en donde se agrega un espesor extra con un pequeño aumento de peso, de precio y una mayor facilidad constructiva.

III Método de infusión

El proceso de laminación por infusión es utilizado para la fabricación de piezas de gran calidad. Las capas de fibra y el núcleo son colocadas dentro de un molde en la posición requerida y luego la resina se transfiere al laminado mediante la aplicación de una diferencia de presión.

En este proceso es necesario el uso de materiales descartables. Se requiere de una bolsa para aislar el laminado del exterior y hacer posible la diferencia de presión. Además se requiere de una tela que impide que la bolsa y mangueras de distribución se peguen al laminado.

Es necesario conocer la permeabilidad de los materiales utilizados, telas y núcleo ya que existen algunos materiales que tienen una baja tasa de permeabilidad. Por esta razón es necesario hacer una prueba previa antes de laminar una pieza.

Otro factor importante es la elección de la resina a utilizar. La utilización de una resina de poliéster para este proceso debe tener un tiempo de gel, dentro de la pieza, de aproximadamente 40 a 50 minutos y tener una viscosidad menor que 200 cps. Al contrario, si la resina tuviera un tiempo de gel muy prolongado, podría ser perjudicial para el proceso. Se necesita que la resina entre al laminado lo más rápido posible para que comience inmediatamente la polimerización, ya que de no ser así, la resina empezaría a salir por las líneas de vacío y en consecuencia tendríamos áreas no impregnadas.

III.1 Fundamentos teóricos

Para obtener el éxito en el laminado de una pieza por infusión es importante conocer de qué manera se relacionan las variables durante la impregnación.

La ecuación siguiente calcula el tiempo de saturación de una placa frente a un flujo de resina:

$$t = q * h * l^2 / (2 * k * DP)$$

t = tiempo de saturación del panel, medido en segundos.

h = viscosidad de la resina (cps)

l = longitud del laminado (m)

k = permeabilidad del refuerzo (m²)

q = porosidad del refuerzo (%)

DP = gradiente de presión.

Podemos ver que la viscosidad es proporcional al tiempo de saturación, mientras mas viscosa la resina, mayor será el tiempo de saturación de la placa. Mientras menor sea la porosidad del laminado (los espacios a ser llenados por la resina), menor será el tiempo de saturación. Y a mayor permeabilidad del laminado, generada por los cortes en el material sándwich, menor será el tiempo de infusión.

Por lo tanto, para optimizar el proceso de infusión, se debe utilizar una resina de baja viscosidad, un laminado de baja porosidad y alta permeabilidad y además un diferencial de presión lo más alto posible.

III.2 Ventajas del proceso de infusión

Existen grandes ventajas en el proceso de infusión si lo comparamos con el proceso de laminación manual.

El proceso de laminación manual es altamente contaminante y genera en el lugar de trabajo mucha suciedad.

Los laminados fabricados manualmente sólo consiguen un contenido de fibras de 20 a 30%. Como la resistencia de un laminado es proporcional a la cantidad de fibra y de resina dentro del compuesto, los laminados por el proceso de infusión, con 60% de fibras, son mucho más resistentes que los laminados convencionales fabricados manualmente.

El contenido de resina influye directamente en el peso del laminado, por tanto las embarcaciones construidas por el proceso de infusión son más livianas con lo que generan muchos beneficios. Necesitarán de un motor menos potente para llegar a una determinada velocidad y por tanto necesitarán menos combustible. Además para una misma autonomía necesitarán de menos capacidad de tanques que serán entonces más livianos. Con menor potencia y tanques menores, el costo de construcción es menor.

Otra de las ventajas en el proceso de infusión es la reducción de pérdidas. Como no se manipula directamente la resina durante el proceso, la cantidad de ésta puede ser calculada de forma muy precisa, al contrario de lo que sucede con el proceso de laminación manual. En éste, muchas de las fibras impregnadas caen al suelo quedando inutilizadas, mientras que por infusión las fibras son cortadas y ajustadas con precisión y por tanto, pérdida de fibra y resina prácticamente no existe.

Otra ventaja es que existe la posibilidad de producción seriada de embarcaciones con una variación en peso menor de 0,5% con lo que se sabe que van tener todos el mismo costo.

III.3 Infusión con una línea principal

El primer paso en el proceso de infusión es familiarizarse con éste de la forma más sencilla posible. Para este primer acercamiento es recomendable comenzar con la laminación de una pieza plana como un mamparo. Este mamparo debe tener pequeñas dimensiones. Se requiere de una mesa completamente lisa y que tenga buena resistencia al paso de aire, recordemos que se utilizará un diferencial de presión de 0,9 atm. Se debe garantizar que no exista fuga de aire.

Sobre la mesa se aplican unas capas de cera desmoldante. Un punto importante es utilizar una cera que soporte una temperatura superior a 120 °C, ya que , si bien es cierto que la temperatura promedio oscila entre los 70 °C, en cantos en donde existe una mayor concentración de resina, la temperatura puede llegar a más de 120 °C.

Luego se colocan los tejidos y el material del núcleo si los hubiere. Como se trata de una placa plana, no se necesita de un adhesivo para fijar los materiales al molde, sin embargo, debe procurarse mantener las fibras lo más cerca posible al núcleo ya que en el proceso de infusión, la resina tiende a escoger el camino mas permeable, por tanto, si hay un espacio grande entre las uniones de las placas, entonces la resina pasará primero por ese lugar y puede generar burbujas de aire dentro del laminado.

Antes de iniciar el proceso, se debe calcular la cantidad de resina que será utilizada. Conociendo el contenido de fibras en el laminado es fácil calcular la cantidad de resina que debe ser preparada y se debe agregar un 5% debido a la pérdida por el llenado de las mangueras. Además, sabiendo la velocidad de flujo de la resina, se puede predecir el tiempo necesario para la completa impregnación de la pieza.

Dependiendo del tamaño de la pieza, se puede usar una línea central o varias líneas que serán abiertas de forma progresiva, no todas al mismo tiempo, sino una vez que se haya logrado la total impregnación con una línea, se procede a abrir la siguiente.

En el montaje de las líneas de vacío, éstos deben ser paralelos a los ductos de evacuación para obligar a la resina a que tome una dirección lateral y asegurar la completa impregnación de la pieza.

La presión al inicio de la infusión debe ser estable con un valor mínimo de 0,9 atm. Al momento en que se abren las válvulas para el ingreso de la resina, se produce una reducción de presión. Por esta razón se debe utilizar una línea de vacío con un cilindro extra de almacenamiento de vacío para compensar la caída de presión inicial. En piezas grandes, se utiliza un tanque de 200 litros por cada 100 m² de área de infusión. Para pequeñas piezas, la trampa de vacío cumple además con este propósito.

Para calcular la cantidad de catalizador necesario, se debe hacer una prueba de permeabilidad con una porción de laminado para saber la velocidad de flujo de la resina. En un principio, es complicado calcular el tiempo correcto de infusión, sin embargo, con la práctica se desarrolla la habilidad para calcular correctamente este punto.

III.4 Utilización de software

Una de las herramientas más importantes en el proceso de infusión es la utilización de un software que permita determinar el flujo de resina dentro del laminado. Introduciendo variables conocidas al programa como permeabilidad, tipo de refuerzos y material sándwich, etc., podremos conocer la cantidad de líneas de vacío y líneas de resina que debemos colocar, así como también la posición y espacio entre las líneas. No obstante, con la experiencia se obtiene cierta habilidad que nos permita saber dónde colocar las líneas para obtener un laminado completamente impregnado, claro que para un proyecto de gran envergadura no es conveniente correr riesgos ya que el costo sería demasiado alto, el casco puede poseer laminados diferentes entre los costados y el fondo, asimismo como áreas reforzadas en partes específicas.

Uno de los datos que se debe encontrar para ingresarlo al software es la permeabilidad, para esto se debe aplicar la infusión a una placa de 400 mm de ancho por 1200 mm de largo dispuestas de forma que la resina suba a través de la placa. La cantidad, gramaje y dirección de las fibras deben ser las mismas que se utilizarán en la pieza real.

Una vez que comience la infusión de las piezas, se debe llevar un registro del flujo de la resina a través del laminado en cada minuto, de modo que se tenga conocimiento del tiempo necesario para recorrer cualquier distancia con aquella configuración de laminado.

Hay que tomar en cuenta que la variación del tipo de laminado dentro de la pieza a la cual se va a aplicar la infusión puede causar una modificación en la dirección del frente de resina y hacer que ésta llegue a una línea de vacío antes que se impregne completamente la pieza.

III.5 Tipos de fibra, resina y núcleo

La utilización de un material sándwich es muy útil en el proceso de infusión ya que se utiliza como un medio en donde el flujo de resina es más rápido. Los materiales sándwich pueden hacer avanzar la resina más de dos metros en pocos minutos, mientras que en un laminado monolítico la resina avanza unos pocos centímetros por lo que habrá que colocar en estos casos varias líneas de resina.

Es importante utilizar siempre tejidos del tipo multiaxial ya que los de tipo tejido impiden el flujo debido a su trama cruzada.

La mayoría de las fibras tienden a reducir su espesor cuando son sometidas a vacío y muchas de ellas pierden alrededor de un 30% de su espesor original, cosa que se debe tomar en cuenta al momento de proyectar un diseño o cuando se cambia del método de laminación manual a infusión.

Para la elección del material sándwich, se debe escoger aquél que tenga el 100% de las células cerradas, resistente a los solventes utilizados en las resinas, como es el caso del estireno

ya que el tiempo de exposición dentro de la bolsa de vacío es considerable. Además debe ser resistente a una temperatura mayor a 80°C.

Existen distintos tipos de cortes para los materiales sándwich, estos tienen una función específica dentro del proceso:

- Corte tipo DC: consiste en cortes ortogonales en cada lado del núcleo, con profundidad mayor que la mitad del espesor de la espuma de PVC, de esta forma se crean unas perforaciones en las intersecciones, mejorando el flujo en ambos lados del laminado. Los cortes se realizan en intervalos de 28 mm a 38 mm. El espesor del corte varía entre 0,6 a 0,8 mm, dependiendo de la cantidad de flujo de resina que se requiera.
- Corte tipo DCI: la espuma tiene cortes ortogonales a cada lado y espaciados cada 20 mm. Se utiliza para laminados sándwich planos y de gran espesor.

Además del tipo de refuerzo y material sándwich, se debe utilizar una resina de baja viscosidad. Se requiere poco tiempo para impregnar piezas pequeñas, pero si se desea laminar una pieza muy grande utilizando resina de poliéster, lo más conveniente es laminarla por infusión. La razón se debe a que esta resina no permite un tiempo de trabajo mayor a 45 minutos para mantener las propiedades mecánicas, aunque se aplique un retardante de tiempo de gel.

Por el proceso de infusión se puede ajustar el tiempo que toma impregnar una pieza, variando la cantidad y espaciamiento entre las líneas de alimentación de resina. Como regla general, cualquier tipo de infusión debe terminar entre 45 a 60 minutos.

Las resinas con un tiempo de trabajo muy grande tienden a llegar a las líneas de vacío antes de que su viscosidad aumente lo que conllevaría a una recirculación dentro del laminado. Las resinas para infusión deben tener una viscosidad inferior a 250 cps y bajo contenido de estireno, menos de un 35%. Si se utiliza una resina no apropiada para este proceso, y se reduce su viscosidad por aumento de monómero de estireno se corre el riesgo del aumento de posibilidad de **impresión** de las fibras o del material sándwich por la parte externa del casco debido a la contracción de la resina durante el proceso de cura en donde hay una cantidad considerable de liberación de calor. Por lo tanto, debe utilizarse una resina formulada para este proceso, que sea estable a temperaturas elevadas.

III.6 Infusión en secuencia

Se comentó que el primer paso era laminar una placa plana de forma rectangular con sólo una línea de resina. El segundo paso es laminar una placa plana de forma irregular, como un mamparo. En este caso es difícil lograr un buen resultado utilizando una línea de entrada de resina en el centro de la pieza.

Se debe recalcar que en el proceso de infusión, la pieza a laminar debe estar completamente impregnada antes de que la resina llegue a las líneas de vacío.

Una forma de controlar el movimiento de la resina a través de la pieza es colocar varias líneas de resina colocadas a espacios constantes unas de otras y abiertas de forma secuencial. Primero se abre la línea central y la resina viaja hacia la línea siguiente. Una vez que la resina atraviesa esa línea, es posible abrirla. La saturación de la pieza es hecha de forma transversal hacia los bordes del mamparo.

Un punto importante que debe considerarse en la instalación de las líneas de resina, no deben tocar los bordes del mamparo ya que la resina pasaría directamente hacia las líneas de vacío interrumpiendo la infusión.

III.7 Montaje

Las mangueras a utilizar deben ser resistentes a la presión de vacío, asimismo, el spiral wrap que va colocado dentro de la bolsa de vacío debe soportar una presión de 1 atm sin que se deforme. Al momento de hacer las pruebas de flujo, deben ocuparse las mismas mangueras que se utilizarán para laminar la pieza así como también el diámetro de éstas. Se debe poner atención en no estrangular las líneas ya que esto provocaría la pérdida total de la pieza a infundir.

Las mangueras de alimentación y de vacío que se colocan en la parte externa deben ser flexibles para no transmitir esfuerzos en las conexiones y en la bolsa de vacío y además deben resistir una temperatura de 200°C y deben ser resistentes a solventes, como el monómero de estireno.

La bolsa de vacío debe tener un tamaño apropiado para no presentar tensiones en los cantos del molde. Debe tener un espesor mínimo de 75 micrones a 125 micrones. Elongación mayor que 400% y resistencia a la tracción de 8000 psi. Por último, la bolsa de vacío debe ser resistente a pequeñas perforaciones ya que cualquier partícula que caiga dentro del mole o sobre el laminado puede ocasionar una pequeña perforación, debido a la presión de 1 atm., que es muy difícil de detectar. Se recomienda encarecidamente utilizar un dispositivo de ultrasonido para la detección de fugas.

El sellado de la bolsa de vacío en las pestañas del molde debe ser hecho con un Tacky Tape continuo y ésta debe ser resistente a los solventes de tipo estireno y resistir temperaturas de por lo menos 120°C.

III.8 Skin Coat

Una de las características más significativas de la utilización del método de infusión es producir piezas livianas. Sin embargo se presenta el problema de la impresión de fibras en la cara visible de la pieza. Para evitar este fenómeno es necesario colocar varias capas de Mat después del Gelcoat, aproximadamente 600 a 1500 g/m² de Skin Coat lo que aumentaría considerablemente el peso final. Una solución a esto sería eliminar la capa de Gelcoat y las capas de Skin Coat y reemplazarlo por un material de sacrificio como un velo, una vez retirada la pieza del molde se procede a lijar y finalmente se pinta con poliuretano.

IV Experimentación

Dentro de la etapa investigativa del método de infusión se desarrolló una serie de pruebas con objeto de familiarizarse empíricamente con el proceso e identificar las dificultades que se presentan en un medio en que las condiciones de desarrollo no son las óptimas debido a muchos obstáculos, principalmente a la inaccesibilidad de los materiales específicos que aseguren un verdadero éxito.

Actualmente Chile no está muy familiarizado con los recientes procesos de fabricación de materiales compuestos por lo cual la obtención de productos se torna difícil. Es por esta razón que se optó por la utilización de materiales alternativos que permitieron la obtención de importante información.

A continuación se describirá los aspectos más importantes de cada prueba, así como los resultados obtenidos.

Para todas las pruebas realizadas se utilizó resina de poliéster ortoftálica Poylite 33915-15 de viscosidad media, formulada para ser utilizada mediante un proceso de laminación manual.

La primera tarea a realizar fue probar la bomba ya que no había información de sus características técnicas por lo cual era necesario saber si alcanzaba a producir un diferencial de presión mínimo requerido. Se sabía de antemano que la bomba no puede tener un funcionamiento continuo de más de 30 minutos.

Se conectó un vacuómetro y se procedió a encender la bomba con lo que el medidor midió aproximadamente 28''Hg. Aparentemente la bomba logra producir el vacío que se requiere, sin embargo es posible que el vacuómetro no sea preciso en los datos que proporciona. Además por ser la superficie a laminar de reducidas dimensiones y realizar el proceso sobre una superficie plana y horizontal, no se requerirá de gran potencia de la bomba.

Prueba N° 1

Para esta prueba se utilizó una capa de Mat 450. Se montó el sistema utilizando tubos de PVC perforados para la distribución y recolección de resina. Se fabricó una trampa con objeto de captar el exceso de resina e impedir que ésta llegue a la bomba de vacío. Se utilizó manguera de nivel para conectar el recipiente de resina con la bolsa y ésta con la trampa. Para el sellado del sistema se utilizó cinta de embalar y sellador de caucho para las uniones en los extremos de las mangueras. Se preparó la resina preacelerada, se encendió la bomba y la resina comenzó a ingresar a la bolsa.



Fig. 4. 1

La manguera que conecta la bolsa de vacío con la trampa colapsó dificultando el flujo de resina. No obstante, ésta comenzó a saturar dificultosamente las capas de fibra.



Fig. 4. 2

A medida que transcurre el tiempo la resina comienza a disminuir su velocidad dentro de la bolsa, al llegar a los 10 minutos prácticamente no hay movimiento. Se observa que en el área por donde ingresa la resina a la bolsa de vacío hay ausencia de compactación y el flujo no es uniforme sino que pasa directamente al extremo de la manguera por lo que queda un área sin impregnar.

El montaje no fue correcto por lo que habrá que adecuar la posición de las mangueras para que la impregnación sea más uniforme a través de las capas de fibra de vidrio.

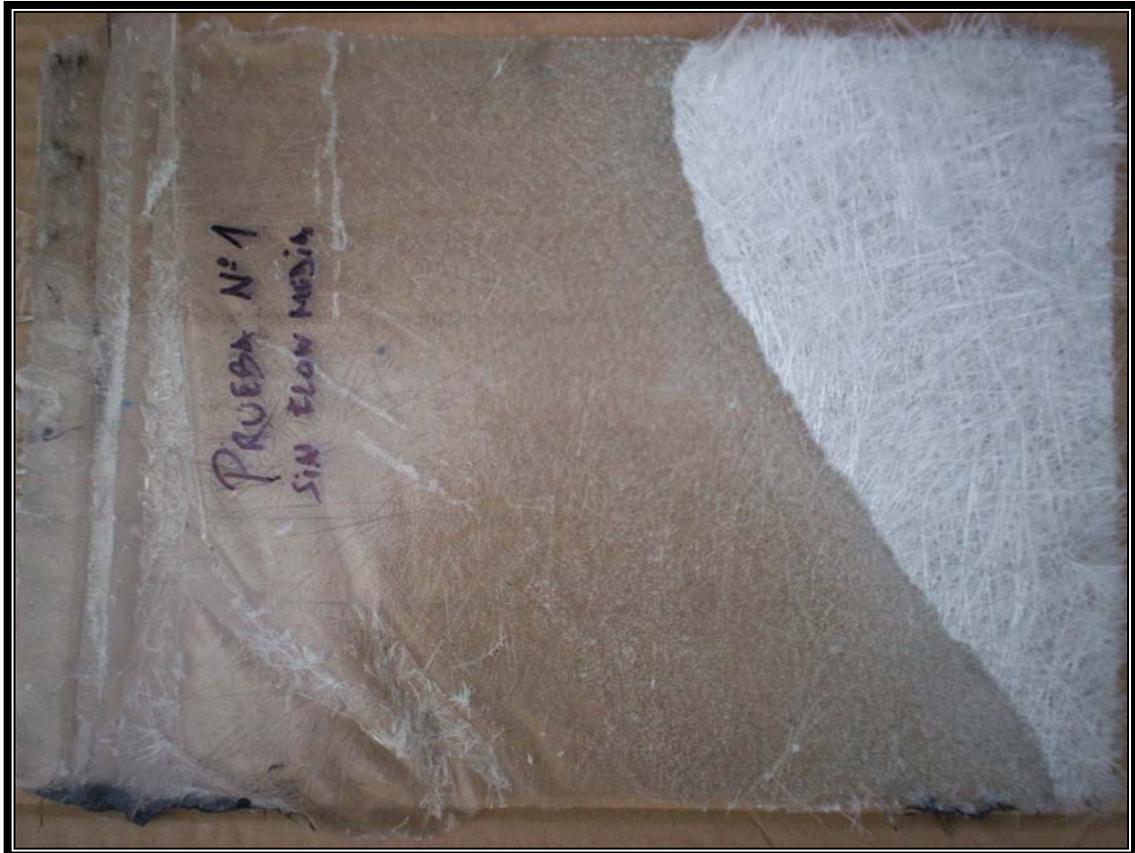


Fig. 4. 3

Prueba N° 2

En esta segunda prueba se hizo algunas modificaciones ocupándose 2 capas de Mat 450 y la misma composición de resina y catalizador. Se reemplazó la manguera de nivel por una manguera de presión en la unión entre la bolsa de vacío y la trampa.

El Mat es una tela que debido a su construcción no conduce bien la resina en un proceso de infusión, generalmente se utiliza un Mat de filamentos continuos (CFM) y tejidos no entrelazados como los unidireccionales o multiaxiales. Para mejorar el flujo es necesario utilizar un material que permita a la resina moverse a través de las capas de fibra. En el mercado se ofrece un producto llamado FLOW MEDIA que está diseñado con tal fin, sin embargo con el inconveniente de no tener acceso a este producto, debido a que no se encuentra en el mercado nacional se experimentó con materiales alternativos para conocer su comportamiento como

medio de flujo. En ferreterías se comercializa un producto conocido como malla mosquitera que tiene una apariencia similar a las que pueden verse en imágenes de Internet. El FLOW MEDIA es simplemente un material que aumenta la permeabilidad del sistema dentro de la bolsa de vacío, por lo tanto cualquier capa que origine vías de acceso para que la resina pueda moverse libremente dentro de la bolsa de vacío, es un candidato a ser utilizado como FLOW MEDIA, no obstante, éste además debe ser resistente a altas temperaturas y al efecto de los productos químicos a los que es sometido. Se modificó la posición de las mangueras con objeto de conseguir mayor uniformidad en el flujo.



Fig. 4. 4

Una vez terminada la instalación del sistema, se dio comienzo al ingreso de resina.

Durante el proceso, ya en curso, se produjo una fuga con lo que el vacuómetro acusó una disminución en el diferencial de presión marcando 22" Hg. La fuga se produjo en el extremo de la pieza, cercana a la línea de vacío por lo que no produjo burbujas de aire en el laminado. La posición de las mangueras produjo una mayor uniformidad en el flujo y la impregnación total de la pieza. La malla mosquitera mejoró el flujo de resina pero no fue significativa. El tiempo de saturación fue de 8 minutos con 40 segundos. Nuevamente se presentan problemas de compactación de la pieza en la zona de distribución de resina que abarca hasta casi la mitad del laminado. No se sabe con certeza cual es la causa de esto, es posible que se deba a la poca potencia de la bomba o lo mas probable a la elevada viscosidad de la resina.



Fig. 4.5

La malla mosquitera, si bien presentó una mejora en el flujo de resina es poco probable que pueda ser utilizada en la laminación de piezas con formas más complejas ya que es muy rígida de tal forma que sería difícil adaptarla a otras superficies.

La pieza laminada no presenta burbujas de aire, su espesor es aproximadamente uniforme en la zona donde se obtuvo una buena compactación con una media de 1 milímetros.

Prueba N° 3

En la siguiente prueba se utilizó una capa doble de malla Rachel 80% sombra como material alternativo al FLOW MEDIA. Como resultado, el tiempo total de impregnación se redujo a 6 minutos.

Nuevamente la falta de compactación se hace presente en la zona inicial del laminado. La bolsa de vacío se rompió en el extremo del tubo de distribución generando de esta forma absorción de aire hacia dentro del sistema y formando burbujas de aire en todo el laminado.

El vacuómetro indicó un diferencial de presión de 26" Hg.



Fig. 4. 6

Prueba N° 4

Con objeto de comparar resultados se laminó siguiente pieza por el método manual utilizando 2 capas de Mat 450. Se utilizó exclusivamente brocha sin recurrir al rodillo metálico.

La pieza presentó una gran cantidad de burbujas de aire y un espesor promedio de 2 mm



Fig. 4. 7

Prueba N° 5

Hasta ahora nos hemos encontrado principalmente con dos problemas que han sido recurrentes en las pruebas laminadas mediante infusión. El primero es la baja velocidad de impregnación de la pieza teniendo en cuenta sus reducidas dimensiones de 30 cm X 15 cm. La segunda y quizá la más importante, es la falta de compactación de las capas de fibra de vidrio ya que sin duda alguna es ésta la característica más importante del proceso de infusión, lograr un contenido de fibra de 60 a 70%.

El objetivo principal de la siguiente prueba es observar el comportamiento del flujo de una resina de baja viscosidad y cómo responde ésta al proceso de infusión. Desgraciadamente no se cuenta con una resina con esas características por lo que se añadirá un 40% de monómero de estireno para disminuir la viscosidad. Debe tomarse en cuenta que, según los fabricantes, el contenido máximo de monómero de estireno que puede ser adicionado a esta resina en particular es de un 5% ya que una cantidad mayor afecta las propiedades mecánicas de la pieza.

Otro inconveniente es no contar con un instrumento que mida la viscosidad de la resina. Debe recordarse que se requiere una viscosidad entre 150 y 250 cps para este proceso y si bien, un exceso de viscosidad afecta en los resultados, también una falta de ésta sería perjudicial.

Se utilizó una capa de malla Rachel 80% sombra como FLOW MEDIA. Una vez montado el sistema se procedió a encender la bomba para producir el vacío dentro de la bolsa y comenzar con la detección de fugas. Luego se preparó la resina con monómero de estireno y catalizador y finalmente se dio inicio a la infusión de resina.

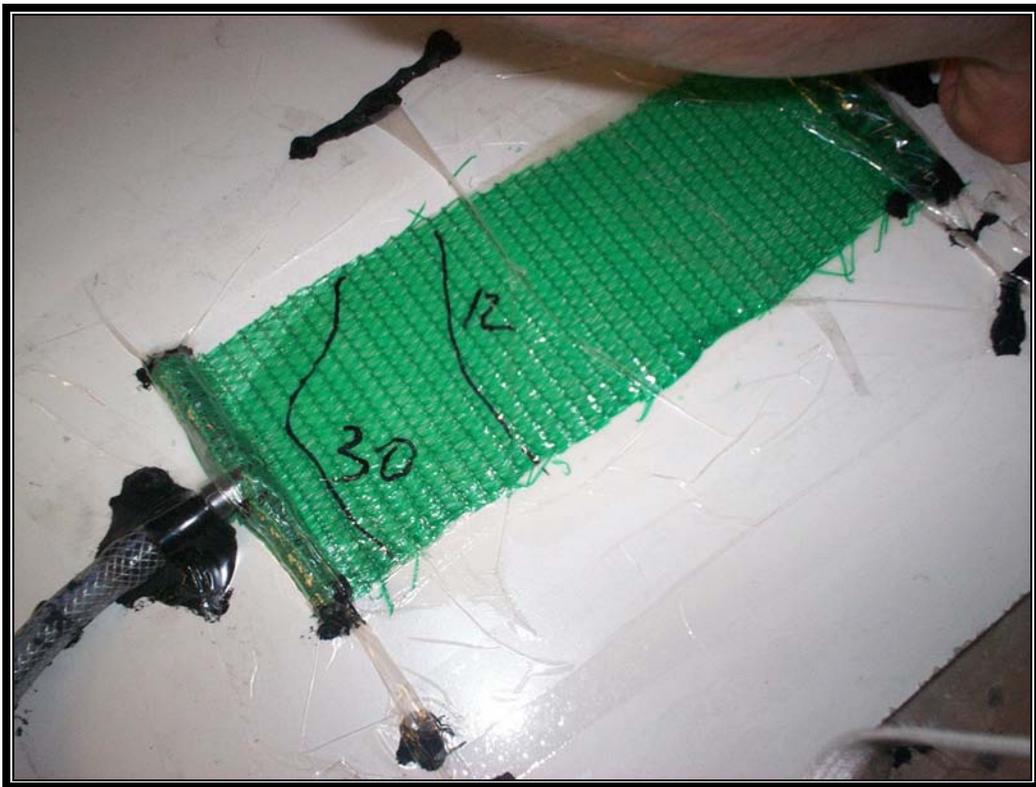


Fig. 4. 8

El tiempo de saturación fue de 45 segundos y se observó una compactación uniforme en toda la pieza. El vacuómetro marcó un diferencial de presión constante de 28''Hg.

Una vez saturada la pieza se cortó el suministro de resina y se mantuvo la bomba funcionando hasta alcanzar el tiempo de gel, aproximadamente 15 minutos. Durante este tiempo el exceso de resina comenzó a salir por las líneas de vacío.

Las dos dificultades que se presentaron anteriormente fueron superadas, sin embargo la pieza presentó otros problemas. Vemos que el laminado está seco en toda la superficie conteniendo una mínima cantidad de resina suficiente para mantener unidos los trozos de fibra de vidrio.



Fig. 4.9

Las causas de esta sequedad puede deberse a dos razones. La primera es la excesiva cantidad de monómero de estireno contenido en la resina que de alguna forma puede impedir la impregnación de la resina en la fibra. La segunda posible causa puede ser el prolongado tiempo de gel una vez que la pieza fue completamente saturada que permitió que la bomba absorbiera una excesiva cantidad de resina. En teoría, una vez impregnada la pieza, no debe pasar mucho tiempo antes de su estado de gel. Como regla general el tiempo de impregnación debe ser de aproximadamente 45 minutos, sin embargo debido a las dimensiones de las piezas que se están laminando, esto sería imposible ya que tendríamos que disminuir drásticamente la viscosidad de la resina, o bien reducir de algún modo el diferencial de presión afectando la compactación de la pieza en ambos casos.

Prueba N° 6

Con objeto de tener mayor control con el tiempo de gel y tener más exactitud en la formulación de la resina, se adquirió una balanza digital con tal propósito.

El tiempo de gel puede ser modificado con el contenido de acelerante y catalizador. Dentro de las recomendaciones de los proveedores de la resina de poliéster utilizada se encuentran los rangos de porcentaje permitidos de manera que no afecten las propiedades mecánicas del laminado.

El tiempo de gel con un contenido de 0,2 % de acelerante y 1,5 % de catalizador es de 10 a 12 minutos aproximadamente a una temperatura de 25 °C

	Mínimo	Máximo
% Naftenato u Octoato de Cobalto	0.1	1.0
% Peróxido de Metil Etil Cetona	0.7	2.5

El objetivo de la siguiente prueba es averiguar el tiempo de gel que se obtiene al aplicar el mayor porcentaje permitido de acelerante y catalizador para evitar el exceso de absorción de resina una vez impregnada la pieza.

Se preparó 140 gramos de resina con 1% de acelerante 2,5% de catalizador sin monómero. Se laminó sobre dos capas de Mat 450 con el método manual y aplicando rodillo metálico. El tiempo de gel fue de 5 minutos llegando a los 6 minutos a un estado completamente sólido.

Prueba N° 7

En la siguiente prueba se redujo la cantidad de monómero de estireno a un 20% y se aplicó los porcentajes máximos de acelerante y catalizador permitidos, con objeto de reducir el intervalo entre el tiempo de saturación de la pieza y el tiempo de gel de la resina. Conciente del exceso de monómero de estireno y de su incidencia en las propiedades mecánicas del laminado, su uso es casi una obligación en las siguientes pruebas ya que es imposible obtener un porcentaje de fibra aceptable dentro del laminado sin una buena compactación durante el proceso de infusión. No obstante, también se busca obtener una pieza libre de burbujas de aire, con un alto contenido de fibra, menor espesor y con un aspecto visual mejor del que puede lograrse mediante un proceso de laminación manual.

Se laminó sobre 2 capas de Mat 450 y se utilizó una capa de malla Rachel 80% sombra como FLOW MEDIA.

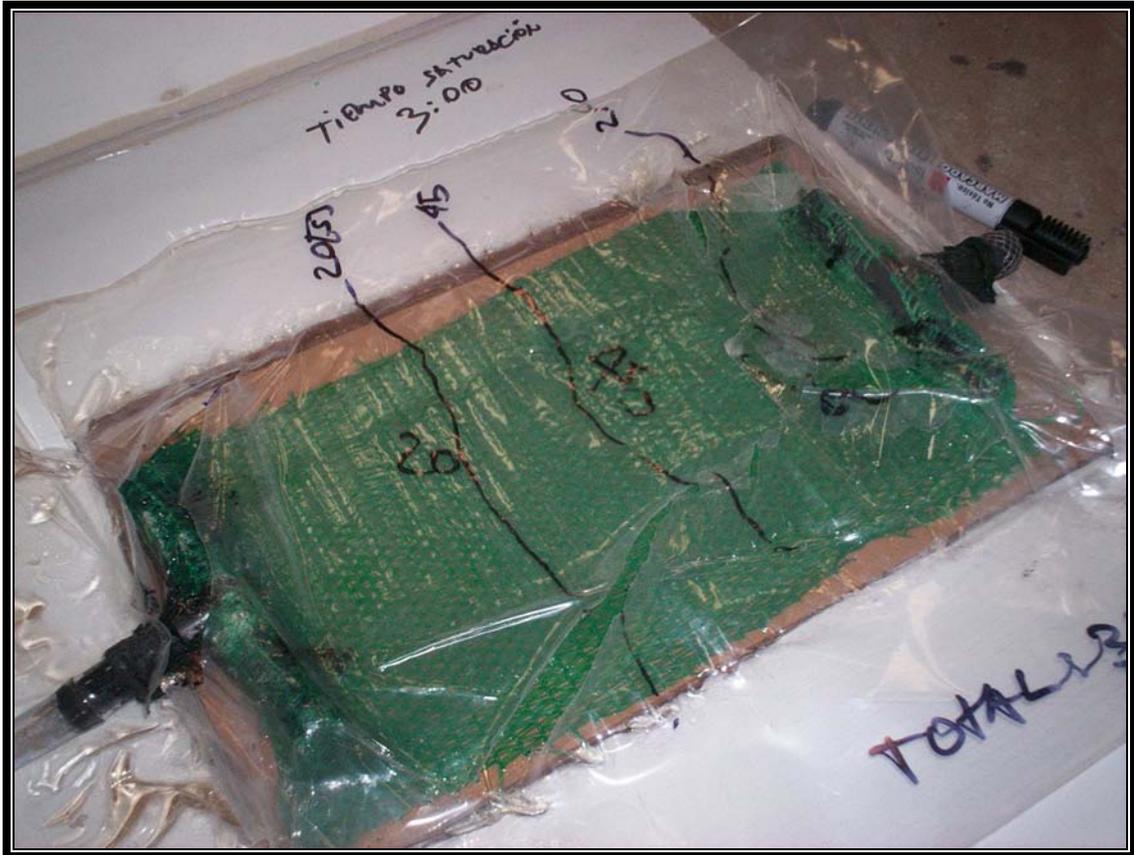


Fig. 4. 10

El tiempo de saturación fue de 3 minutos con un vacío constante de 28" Hg. Nuevamente se observó una falta de compactación en la zona de distribución de resina. La pieza final no presenta burbujas de aire.

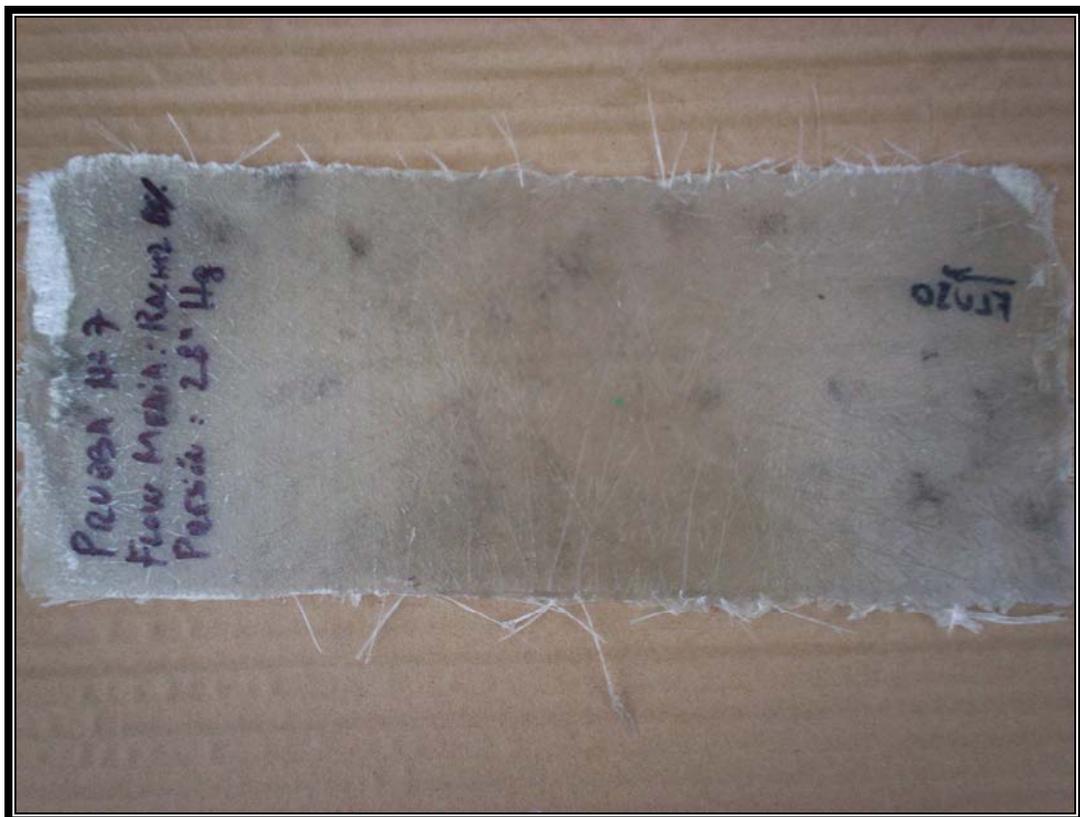


Fig. 4. 11

Sin duda alguna la viscosidad es la responsable del problema de compactación. Con respecto a su espesor, es uniforme de 1.2 milímetros, excepto en la zona de distribución en donde se acumuló una gran cantidad de resina.

Prueba N° 8

En esta prueba se utilizó una resina con 20 % de monómero de estireno, 1% de acelerante y 2.5% de catalizador.

Se utilizó 2 capas de Woven Roving 600, una capa de malla Rachel 80% sombra y tela como Peel Ply. Se obtuvo un diferencial de presión constante de 28" Hg.

El tiempo de saturación fue de 4 minutos y el tiempo de gel, de 9 minutos.



Fig. 4. 12

Posterior a la infusión se sometió a la pieza a un pos curado durante 30 minutos a 140° C. Una vez mas el compactado de las capas de fibra fue pobre, sin embargo, esta área es menor ya que anteriormente abarcaba hasta la mitad de la pieza, ahora la zona central presenta buena compactación. La diferencia entre esta prueba y la anterior es solamente el tipo de fibra utilizada. El Roving presenta una estructura que facilita el flujo de resina mejor que el Mat, pero ésta sigue siendo un tipo de fibra no adecuada para este proceso.

Finalizada la pos cura fue imposible retirar completamente el Peel Ply de la pieza laminada.



Fig. 4. 13

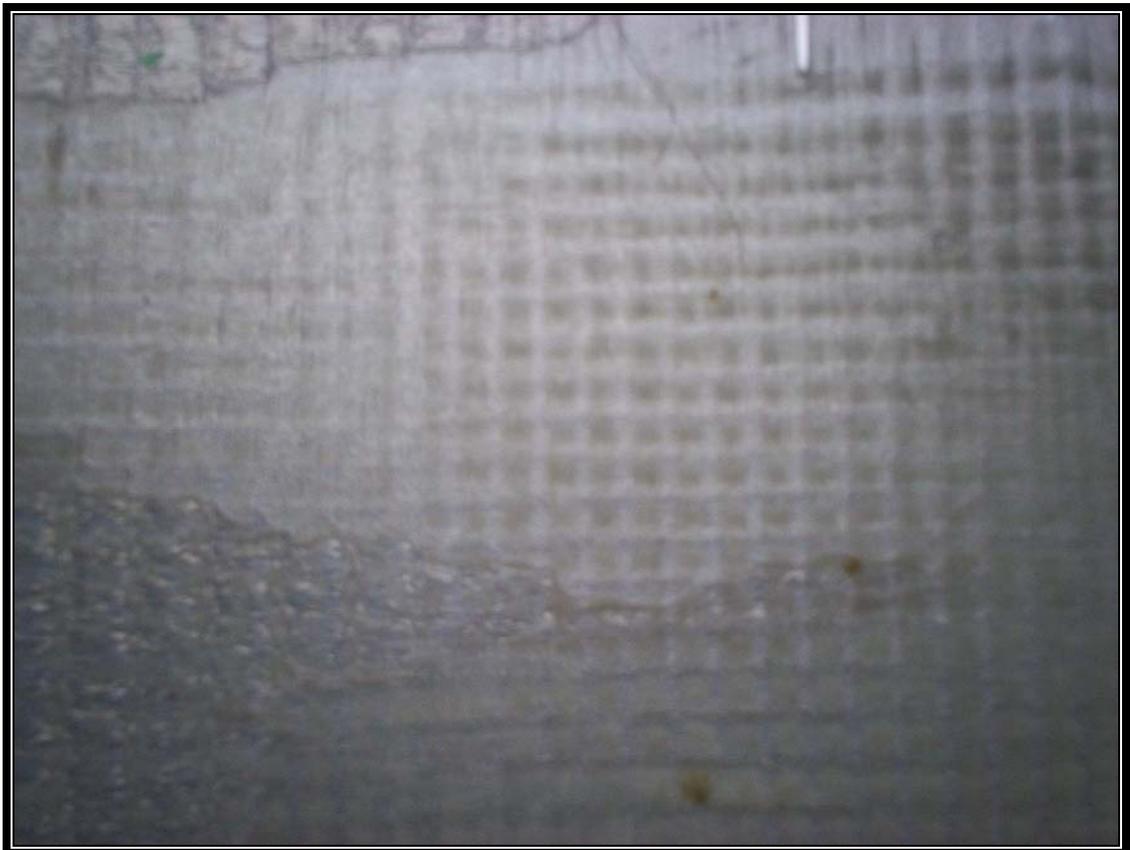


Fig. 4. 14

Puede apreciarse en una parte de la pieza un buen resultado, ausencia de burbujas y un espesor uniforme de 1 milímetro.

Prueba N° 9

Se preparó la resina con un 30% de monómero, 1% de acelerante y 2,5% de catalizador. Se laminó dos capas de Woven Roving 600.



Fig. 4. 15

Como puede verse en la imagen, el flujo no fue uniforme, la parte superior fue rápidamente impregnada debido a que el material sobre el cual se efectuó el laminado presentaba en el borde un desnivel. Al cortar demasiado ancho la malla Rachel alcanzando ese borde se produjo un espacio en donde la resina tomó ese camino saturando primero ese borde.

El resultado de esta prueba nos muestra cómo la resina se comporta al proporcionarle un medio expedito en donde pueda moverse y además valida la relación directa entre el tiempo de impregnación con la permeabilidad del sistema.

A pesar del incorrecto montaje, la impregnación fue completa obteniéndose un tiempo de saturación de 2 minutos y 40 segundos, hubo una buena compactación de fibras, nuevamente la pieza presenta sequedad en la superficie y zonas con ausencia total de resina.

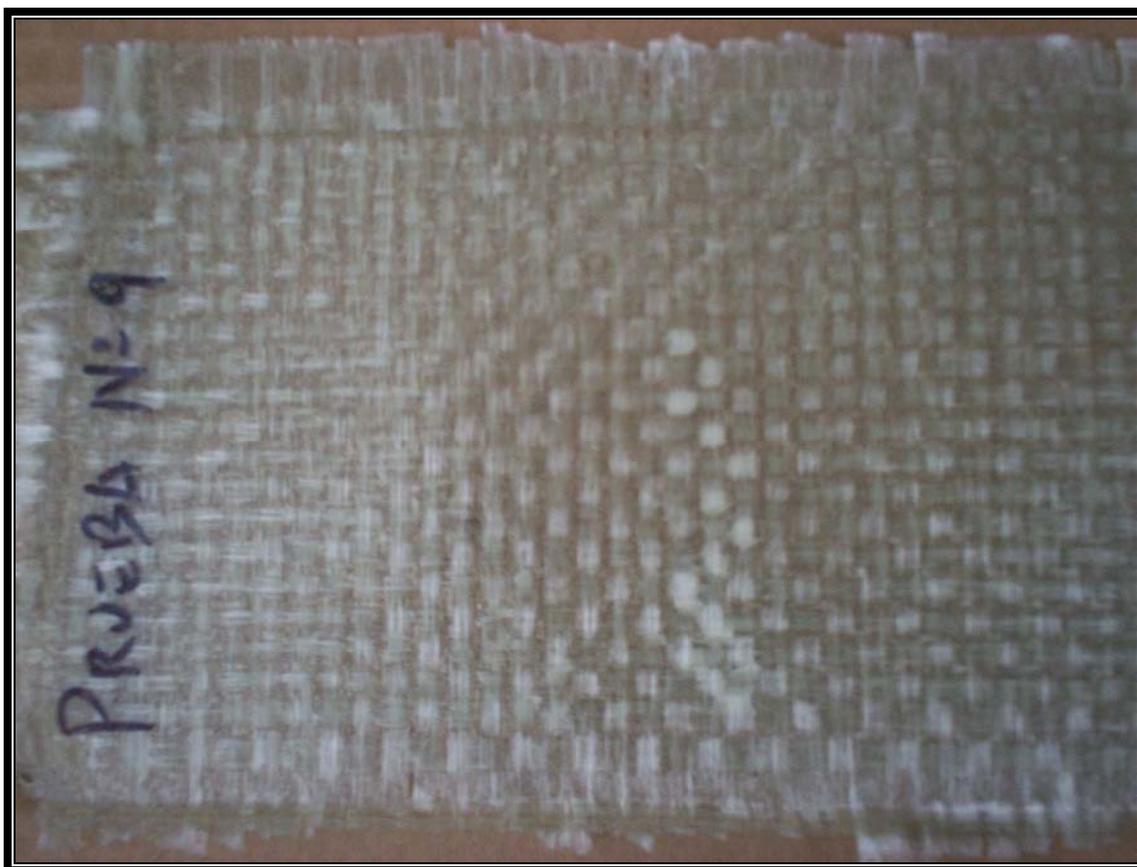


Fig. 4. 16

El laminado tiene un espesor uniforme de 1 milímetro.

Prueba N° 10

Con objeto de hacer una comparación con los demás métodos de laminación, en esta prueba se procedió a laminar al vacío.

Este método comienza de la misma forma que el método manual, se colocan las telas en posición y se impregnan utilizando brocha y rodillo metálico. Luego se coloca sobre el laminado un Peel Ply, una capa de malla Rachel y sobre éste, una capa de Geotextil. Finalmente se sella todo el sistema mediante bolsa de vacío y se aplica un diferencial de presión para compactar las fibras y extraer el exceso de resina que es absorbido por el Geotextil y a través de la manguera de vacío. Se utilizó dos capas de Roving 600 con una resina ya acelerada y con una cantidad de monómero de estireno desconocida debido a que es la que había disponible en ese momento. Se preparó 120 gramos de resina con 1,5 % de catalizador equivalente a 1.8 gramos con objeto de tener tiempo suficiente de montar el sistema antes de que la resina comenzara a gelar.

Debido a que la balanza tiene una precisión de 1 gramo, añadir 1,8 gramos significaba un margen de error muy alto. Como consecuencia la resina endureció antes de poder aplicar vacío al sistema.



Fig. 4. 17

Para las próximas pruebas se preparará mayor cantidad de resina procurando hacer la mezcla en base de un valor entero del peso en gramos del catalizador para tener mayor precisión en la mezcla.

Prueba N° 11

Se repitió el proceso de laminación al vacío utilizando resina ya preparada con acelerante y monómero de estireno. Se utilizó 1.5% de catalizador.



Fig. 4. 18

Durante el proceso, el Geotextil absorbe buena parte del excedente de resina pero no se ve que salga ésta por la manguera de vacío.

Finalmente se obtiene una pieza con gran cantidad de burbujas. Es posible que no se halla detectado alguna fuga lo que produjo entrada de aire al sistema, o quizá el montaje de la línea de vacío debió hacerse colocando mangueras alrededor de toda la pieza para que la eliminación de burbujas fuera mas efectivo.

El laminado tiene un espesor uniforme de 1 milímetro.

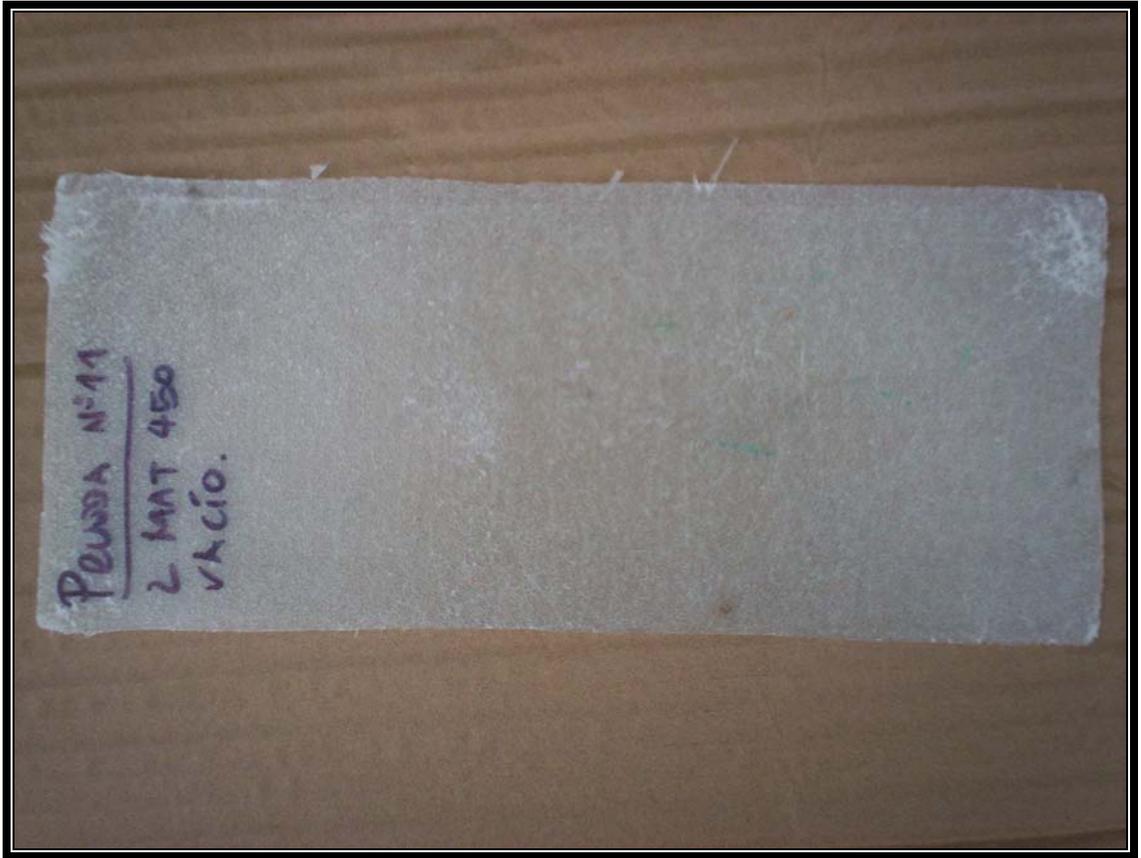


Fig. 4. 19

Prueba N° 12

Consistió en laminar dos capas de Mat 450 mediante el método manual con aplicación de rodillo metálico.

Se utilizó resina preacelerada y con una cantidad desconocida de monómero de estireno.



Fig. 4. 20

Esta pieza presenta cierta cantidad de burbujas de aire pero comparándola con la pieza laminada utilizando solamente brocha, estas cantidad es bastante menor.

El espesor de la pieza es variable alcanzando ésta un máximo de 1.9 milímetros.

Prueba N° 13

En la prueba N° 5 no se tenía certeza de la causa de la sequedad de la pieza laminada. En la siguiente prueba se laminó manualmente dos capas de Mat 450 utilizando resina con un contenido de 40% de monómero de estireno. El objetivo es conocer cual es la causa de la sequedad, si es debido al exceso de monómero o por la absorción excesiva de resina.

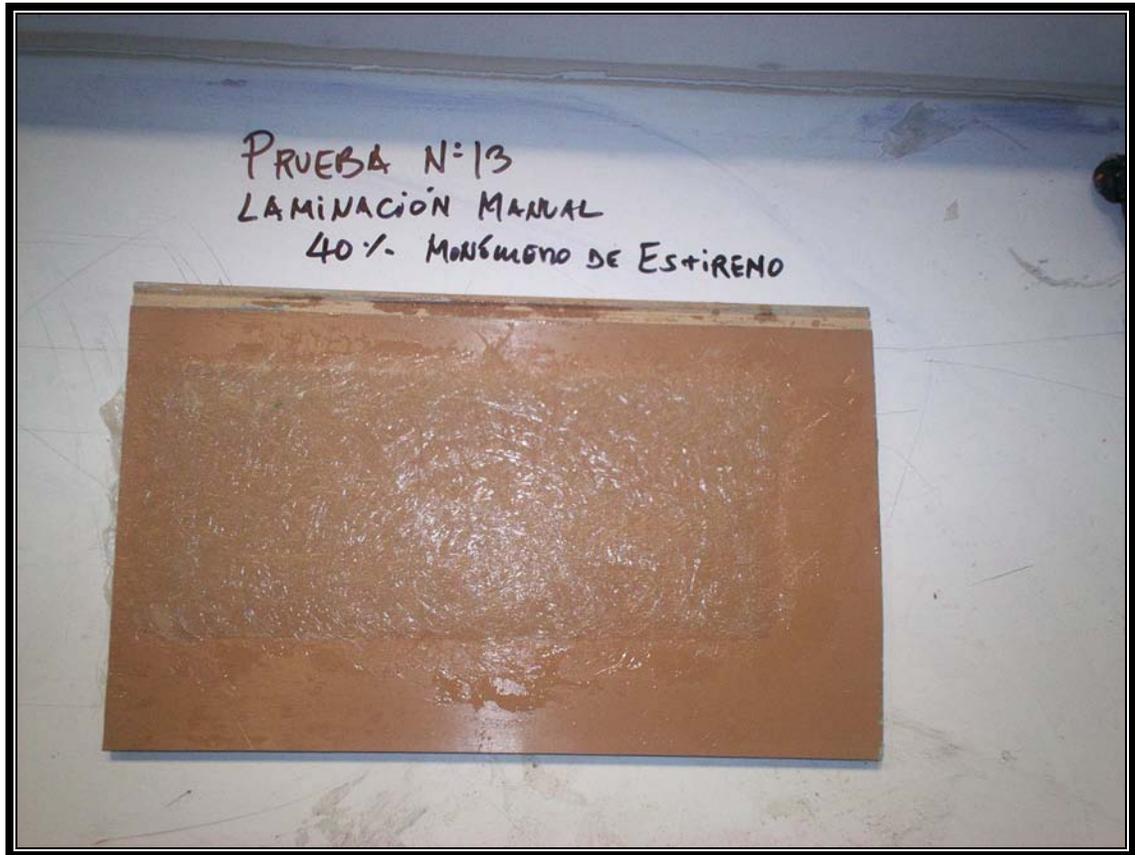


Fig. 4. 21

Una vez curada la pieza no se observa sequedad, por lo cual podríamos deducir que el problema se debe a la excesiva absorción de resina. El contenido de monómero utilizado en la prueba N° 5 reduce drásticamente la viscosidad y posiblemente llega a un punto en el cual sea menor que el límite recomendado para el proceso.

El espesor de la pieza varía entre 1.3 y 1.9 milímetros.



Fig. 4. 22

Prueba N° 14

En esta prueba se laminó dos capas de roving 600, manualmente y aplicando rodillo metálico. Se utilizó la misma resina preparada en la prueba anterior.

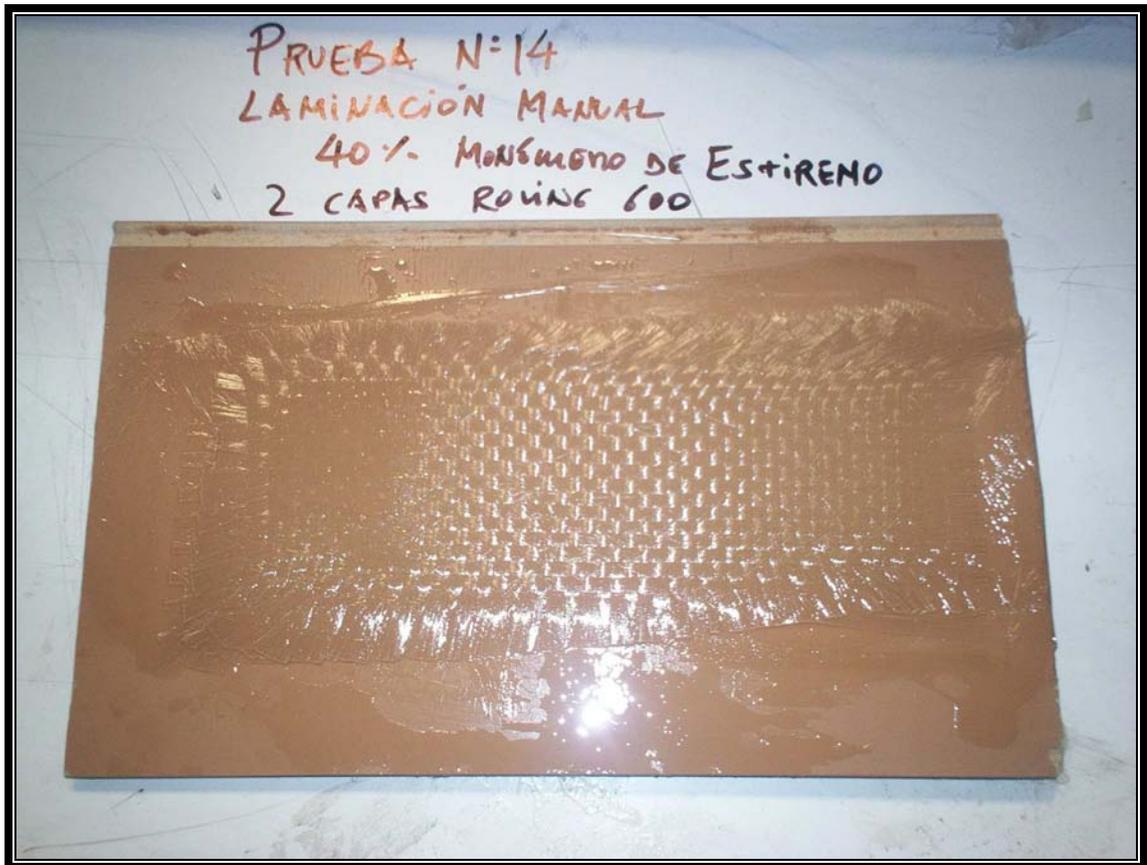


Fig. 4. 23

Esta pieza tampoco presenta sequedad y el contenido de burbujas de aire es bastante menor. Al parecer el Roving tiene menos tendencia a la formación de burbujas de aire.



Fig. 4. 24

Prueba N° 15

En la siguiente prueba se tratará de disminuir la viscosidad de la resina calentándola a baño maría, de esta forma la resina no pierde sus propiedades mecánicas debido a la adición de estireno.

El esquema de laminado fue el siguiente: Mat 450, roving 600, Mat 450, Roving 600.

Una vez preparada la resina en un recipiente de plástico, se colocó el conjunto en otro recipiente que contenía agua caliente y una vez que la resina estuviera notoriamente licuada se le añadió 1.5% de catalizador.

La resina geló rápidamente de modo que sólo una porción del laminado alcanzó a impregnarse.

El tiempo de gel es muy sensible a la temperatura del ambiente, modificar ésta sin tener un control total es prácticamente una pérdida de tiempo. Además la temperatura del agua no fue constante ya que a medida que transcurría el tiempo, la temperatura decrecía.

Por lo tanto, es importante mantener constante la temperatura y realizar así una prueba de tiempo de gel.



Fig. 4. 25

Prueba N° 16

Una de las grandes ventajas de utilizar el método de infusión en una construcción tipo Sandwich es que al núcleo de espuma puede aplicársele cortes de modo que facilite el flujo de resina en el laminado y de esta manera prescindir de un FLOW MEDIA. Además la impregnación es mucho más rápida con lo que, para el caso de grandes piezas a laminar, la cantidad de líneas de distribución es menor y en general el montaje es más sencillo.

En las siguientes pruebas se utilizará un núcleo de espuma para observar el comportamiento del proceso de infusión en una laminación tipo Sandwich. Este núcleo es una espuma de PVC **AIREX R63.80** de celdas cerradas de 9 milímetros de espesor con una densidad de 90 Kg/m³.

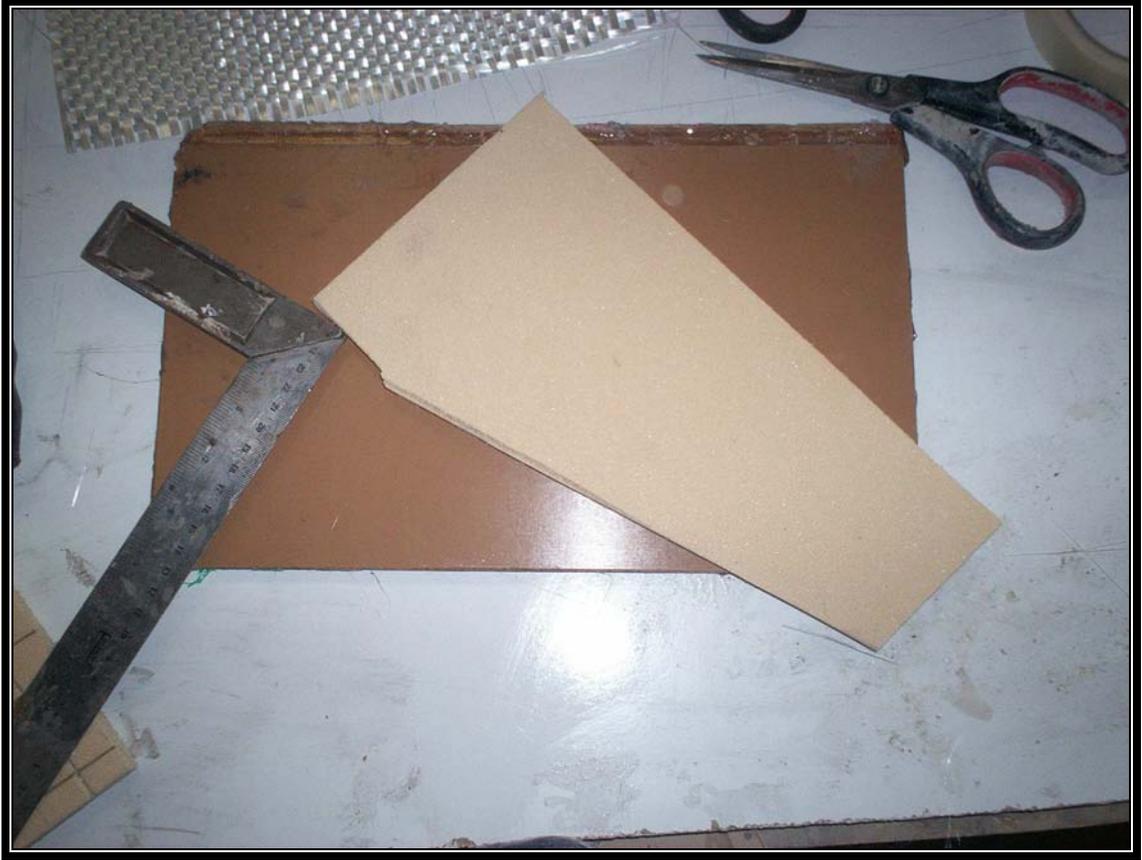


Fig. 4. 26

Esta espuma no tenía los cortes necesarios para utilizarla en un proceso de infusión por lo cual se procedió a fabricarlos mediante un formón y un taladro de manera tal que faciliten el flujo de resina. El patrón de los cortes y perforaciones fueron copiados de una muestra proporcionada por los fabricantes en donde los surcos tenían una separación de 20 milímetros y las perforaciones cada 50 milímetros.



Fig. 4. 27

El esquema de laminado utilizado fue el siguiente:

Mat 450-Roving 600-Mat 450-Roving 600-espuma PVC-Roving 600-Mat 450-Roving 600-Mat450

Se preparó la resina con un 25% de monómero, 1% de acelerante y 2.5% de catalizador.



Fig. 4.28

El tiempo de saturación fue de 40 segundos. Tomando en cuenta la gran cantidad de telas en comparación con las pruebas anteriores, la supresión de FLOW MEDIA y el porcentaje de monómero de estireno menor que el utilizado en la prueba N° 5 podemos observar que los cortes realizados en la espuma ayudan enormemente al flujo de resina.



Fig. 4.29

La pieza final no presenta burbujas y tienen un espesor uniforme de 12 milímetros.

La pieza presenta sequedad en su superficie.

Prueba N° 17

Para mejorar el flujo sin tener que recurrir a una cantidad excesiva de resina, Se optó en esta prueba reducir las capas de fibra y aplicar un 5% de monómero de estireno. Se preparó con 1% de acelerante y 2.5% d catalizador.

El esquema de laminado fue el siguiente:

Mat 450-Roving 600-Mat 450-espuma de PVC-Mat 450-Roving 600-Mat 450

Se hizo una prueba para calcular exactamente el tiempo de gel de modo de aproximar este tiempo y el de saturación. La razón es evitar un tiempo prolongado de funcionamiento de la bomba y evitar el exceso de absorción de resina.



Fig. 4. 30

Se preparó 120 gramos de resina pre acelerada con 3 gramos de catalizador equivalente al 2.5% y se obtuvo un tiempo de gel de 8 minutos y 10 segundos.

Posterior a esto se preparó la resina a utilizar para impregnar la pieza pero se dejó que transcurrieran 4 minutos antes de comenzar con la infusión de la resina. Una vez que comenzó la infusión, la resina geló antes de lo esperado de manera que no se impregnó la

pieza completamente. La resina tuvo gran dificultad en moverse y nuevamente la falta de compactación se hizo presente.

El laminado de una pequeña pieza mediante infusión dificulta el control del tiempo de gel. A diferencia del método de laminación manual, el gel time guarda estrecha relación con el tiempo de saturación y de cierta forma está condicionada por ésta.

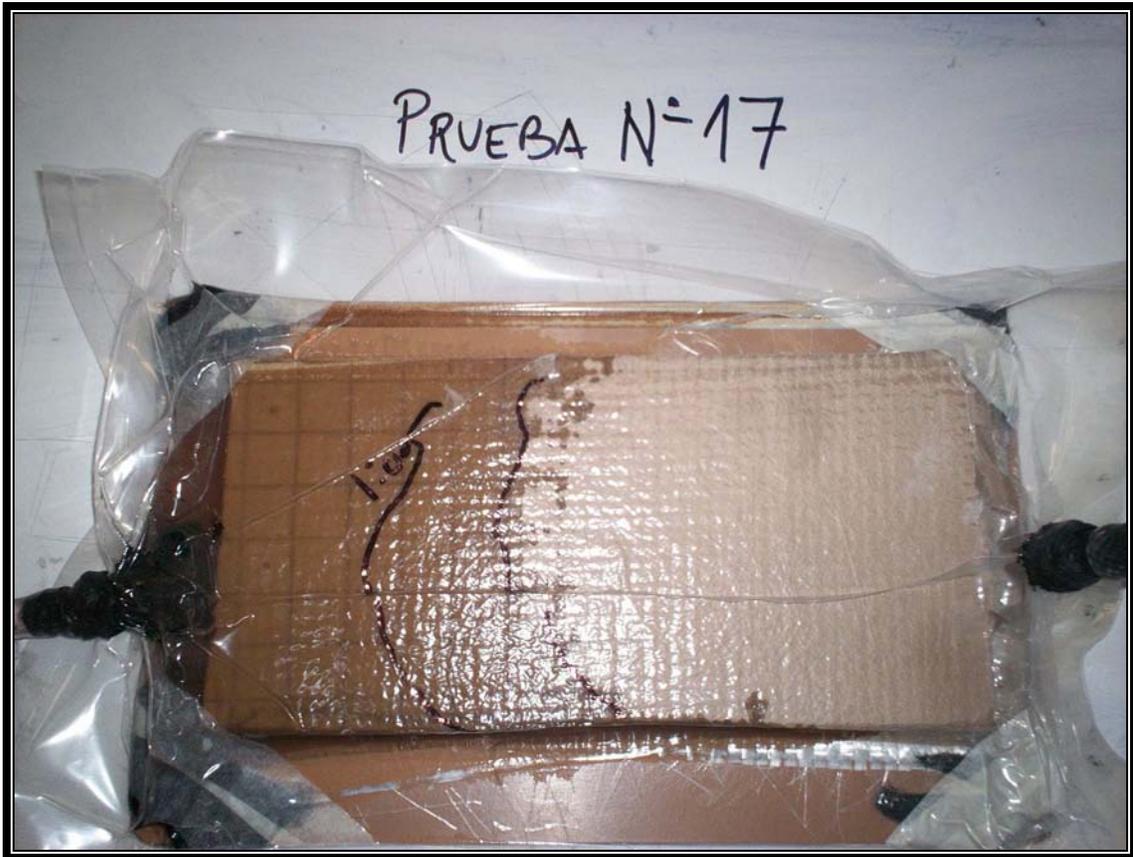


Fig. 4. 31

La zona saturada no presenta burbujas aunque en algunas zonas presentan sequedad.



Fig. 4. 32

Prueba N° 18

Para hacer comparaciones en los resultados finales, se laminó la siguiente pieza manualmente utilizando el mismo esquema de laminado y la misma formulación de resina.



Fig. 4. 33

La pieza tiene un espesor variable, entre 13 y 14 milímetros.

V Análisis de resultados

En la siguiente página se expone una tabla con los resultados y características más importantes de cada prueba como una forma de visualizar claramente las diferencias que existen cuando se modifican las variables en un proceso de laminación y cuando se utilizan distintos métodos.

Desgraciadamente no se obtuvo plena información con el contenido de monómero de estireno en algunas pruebas pero lógicamente se deduce que su contenido mejora el flujo de resina, la compactación de las fibras es mayor lo que finalmente se traduce en un mayor contenido de fibra dentro del laminado.

Con respecto a los espesores, en todas las pruebas laminadas por infusión observamos su uniformidad, al igual que por el proceso de vacío. El hecho de utilizar la presión atmosférica, de naturaleza uniforme, permite obtener un espesor casi invariable. En la prueba N° 14 se obtuvo una pieza uniforme de 1 milímetro de espesor laminada manualmente, sin embargo, hay que tomar en cuenta que presentaba un alto contenido de monómero de estireno y además obtener un resultado semejante en una pieza de grandes dimensiones y formas más complejas es una tarea prácticamente imposible. El proceso de infusión tiene la ventaja de presentar resultados similares indistintamente del tipo de pieza a laminar.

Otro hecho notorio e independiente del proceso de laminación es la tendencia del Mat de contener burbujas de aire, hecho que no es tan recurrente con el Roving, aunque se debe tener en cuenta los errores producidos en las pruebas laminadas por infusión que debido a las fugas en el sistema propició la indeseable presencia de estas burbujas.

Finalmente, al observar los resultados de los porcentajes en peso de resina y fibra vemos que la mayoría de las piezas laminadas por infusión tienen un mayor porcentaje de fibra, exceptuando las pruebas N° 1, N° 7 y N° 17, no obstante las razones claramente se deben a errores cometidos en el montaje y la no utilización de una resina para infusión.

Tabla de Comparación

	Fibras de Vidrio	Método de laminación	% Monómero	Espesor (mm)	% Resina	% Fibra
Prueba N°1	1 Mat 450	Infusión	Desconocido	0.5 - 0.9 (variable)	55.7	44.3
Prueba N°2	2 Mat 450	Infusión	Desconocido	1 (uniforme)	46.8	53.2
Prueba N°3	2 Mat 450	Infusión	Desconocido	1 (uniforme)	45.5	54.5
Prueba N°4	2 Mat 450	Manual (sin rodillo)	Desconocido	2 (variable)	64.7	35.3
Prueba N°5	2 Mat 450	Infusión	40	0.9 (uniforme)	12.5	87.5
Prueba N°6	2 Mat 450	Manual (con rodillo)	0			
Prueba N°7	2 Mat 450	Infusión	20	1.2 (uniforme)	52.4	47.6
Prueba N°8	2 Roving 600	Infusión	20	1 (uniforme)	28	72
Prueba N°9	2 Roving 600	Infusión	30	1 (uniforme)	23.1	76.9
Prueba N°10	2 Roving 600	Vacío	Desconocido	1 (uniforme)	39.8	60.2
Prueba N°11	2 Mat 450	Vacío	Desconocido	1 (uniforme)	39.6	60.4
Prueba N°12	2 Mat 450	Manual (con rodillo)	Desconocido	1.5 - 1.9 (variable)	61	39
Prueba N°13	2 Mat 450	Manual (con rodillo)	40	1.3 - 1.9 (variable)	59.6	40.4
Prueba N°14	2 Mat 450	Manual (con rodillo)	40	1 (uniforme)	33.2	66.8
Prueba N°15	2 Mat 450, 2 Roving 600	Infusión	0			
Prueba N°16	4 mat 450, 4 Roving 600, espuma PVC	Infusión	25	12 (uniforme)	39.7	60.3
Prueba N°17	4 mat 450, 2 Roving 600, espuma PVC	Infusión	5	12 (uniforme)	51.6	48.4
Prueba N°18	4 mat 450, 2 Roving 600, espuma PVC	Manual (con rodillo)	5	13 - 14 (variable)	61.7	38.3

VI Conclusiones

No cabe duda que el proceso de infusión tiene muchas ventajas. Se obtienen piezas con mejores propiedades mecánicas, al tener mejor compactación mejora su adherencia interlaminar de modo que se prescinde de la utilización de un Mat entre otros tejidos estructuralmente superiores. Se tiene el tiempo necesario para hacer el montaje del sistema sin estar condicionado por el tiempo de gel de la resina a utilizar, se trabaja en un ambiente mucho mas limpio y con prácticamente nula exposición al estireno u otras sustancias químicas, menos pérdida de materiales, etc. Sin embargo, para este proceso es necesaria una buena planificación ya que una incorrecta instalación puede derivar en una pieza completamente inservible. Claramente los problemas que aparecieron en la fase de experimentación se multiplican cuando se pretende laminar piezas de mayores dimensiones con formas más complicadas que una simple placa plana y con distintos esquemas de laminado dentro de un mismo molde.

Contar con materiales especializados, sobre todo con una resina formulada para un proceso de infusión es casi una obligación si se quiere tener éxito en tal empresa.

Para terminar, es importante advertir que la continua experimentación es parte inherente en este proceso, la complejidad de pronosticar el flujo de resina en un medio en que los factores son innumerables obliga a probar constantemente con diferentes combinaciones de fibras, tipos de material sándwich, configuraciones en el montaje, diámetros de las mangueras, porcentajes de acelerante y catalizador, etc.

VII Bibliografía

GERR, DAVE, 2000, The Elements of Boats Strength for Builders, Designers and Owners, USA, McGraw Hill.

NASSEH, JORGE, 2007, Barcos - Métodos Avançados de Construção em Composites, Rio de Janeiro.

LARSSON, L., ELIASSON, R. E., Second edition 2000, Principles of Yacht Design, Camdem, Maine UK, International Marine.

BESEDNJAK, ALEJANDRO, 2005, Materiales Compuestos – Procesos de Fabricación de Embarcaciones, Barcelona, Ediciones UPC.

FAO, 1994, Construcción de Embarcaciones Pesqueras: 2 – Construcción de Embarcaciones Pesqueras en Fibra de Vidrio, Roma.

RUÍZ WELZEL, EUGENIO ANDRÉS, 2001, Sistemas Modernos de Laminación en Materiales Compuestos, Tesis de grado, Valdivia, Universidad Austral de Chile.

AIRTECH ADVANCED MATERIALS GROUP, www.airtechonline.

MARINE COMPOSITES, www.marinecomposites.com