

Proyecto Final

Ingeniería en Materiales

*“ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS CONDICIONES
AMBIENTALES SOBRE LOS MATERIALES
COMPUESTOS UTILIZADOS EN PALAS DE MOLINOS
EÓLICOS”*

Marcos Emmanuel FAGUAGA

Directora: Dra. Vera ALVÁREZ
Co-Director: Dr. Exequiel RODRÍGUEZ



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA



FACULTAD DE INGENIERÍA



28 de Diciembre 2009



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y 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/).

RESUMEN

El desarrollo de energías sustentables y que no afecten al medioambiente es uno de los mayores desafíos para la ingeniería actualmente. La energía eólica, que se produce mediante generadores impulsados por el viento, es una de ellas. Sin embargo, hay muchos aspectos sobre los materiales utilizados en la construcción de los mismos que no han sido estudiados en profundidad hasta el momento. Esto fue lo que motivo la realización del presente trabajo.

En este trabajo se reporta el efecto de la absorción del agua sobre las propiedades de los materiales compuestos utilizados para la fabricación de palas de molinos eólicos a partir de (resina poliéster insaturado con fibra de vidrio) y de un material compuesto de resina poliéster insaturado con fibra de vidrio con el agregado de 5% en peso de bentonita.

Para realizar este estudio, se procesaron placas de ambos materiales compuestos (resina poliéster y fibra de vidrio con y sin bentonita) utilizando la misma técnica con la que se fabrican las palas a escala industrial (*Infusión por vacío*) y se estudiaron los parámetros críticos de la técnica. Uno de los parámetros que resultó determinante para la obtención de partes sin defectos es el correcto sellado del molde

El procesamiento de la placa de material compuesto modificado con bentonita no resultó ser completamente adecuado, ya que se pudo determinar que dicha arcilla se encontraba aglomerada en el material final debido a una mala dispersión de la arcilla en la matriz. Esto pudo determinarse mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) y difracción de rayos X (DRX). Con esta última técnica también pudo demostrarse que la arcilla se encontraba dispuesta principalmente en una de las caras, evidenciando que la obtención de materiales compuestos reforzados con nanopartículas presenta problemas asociados con la etapa de procesamiento a escala industrial.

En el caso del material compuesto sin modificar, se puede decir que el procesamiento fue adecuado, ya que se obtuvieron materiales con el contenido de fibras deseado (63% en peso aproximadamente), con baja cantidad de defectos (según lo muestran las microscopías ópticas y electrónicas de barrido, SEM) y con propiedades mecánicas apropiadas para este tipo de sistemas.

Por su parte, las placas de matrices, tanto de resina poliéster sola como modificada con bentonita, se prepararon por colado y se utilizaron como referencia para ver el efecto de las fibras sobre las diferentes características y propiedades estudiadas.

A partir de las placas obtenidas, tanto de las matrices como de los materiales compuestos, se cortaron probetas que se utilizaron para estudiar las propiedades mecánicas y la absorción de agua en diferentes ambientes tanto de las matrices como de los materiales compuestos.

Antes de realizar los ensayos, se verificó que los materiales iniciales no tuvieran calor residual (ya que el curado incompleto es una de las causas de falla de las palas). Cabe aclararse que debió realizarse postcurado de las placas de material compuesto.

Las propiedades mecánicas iniciales fueron menores para los materiales modificados con bentonitas que para los sin modificar lo que puede atribuirse a la mala dispersión de la arcilla. Por otra parte, tanto el módulo como la resistencia en flexión se triplicaron por el agregado de las fibras de vidrio.

A partir de los ensayos de absorción de agua, se determinaron el coeficiente de difusión efectivo y la cantidad de agua absorbida para cada material. Se encontró que el agregado de arcilla condujo a un aumento en la cantidad de agua absorbida, lo que puede atribuirse a la hidrofiliidad de la misma. Se pudo ver que el material compuesto absorbe menor cantidad de agua que la matriz, lo que es acorde con el hecho de que las fibras actúan como inertes frente al agua. Para el caso del material compuesto, se estudió el efecto de la humedad relativa del ambiente y se pudo encontrar una correlación entre ésta y la cantidad de agua absorbida por el material.

Se estudiaron los efectos de la absorción del agua sobre las propiedades mecánicas del material compuesto. Para ello se realizaron ensayos de flexión en tres puntos, resistencia al corte interlaminar y propiedades dinámico-mecánicas. Se encontró que la resistencia a la flexión disminuye en forma exponencial con la cantidad de agua absorbida. También se encontró que la resistencia al corte interlaminar en el material compuesto disminuye linealmente con la cantidad de agua absorbida. El módulo en flexión también se vio afectado. Para analizar el efecto del agua sobre la interface se utilizaron microscopías (SEM y óptica) y se observó que las fibras empiezan a despegarse de la matriz por efecto de la absorción del agua, lo que justifica los resultados obtenidos.

INDICE

RESUMEN	i
INDICE	iii
OBJETIVOS	1
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Materiales Compuestos	5
1.2 Clasificación de Materiales Compuestos	6
1.3 Resina Poliéster Insaturado (PU)	8
1.4 Fibras de Vidrio	10
1.5 Nanocompuestos	12
1.5.1 Estructura de las arcillas utilizadas como refuerzo	14
1.6 Procesamiento de materiales compuestos	16
1.6.1 Infusión en Vacío “Vacuum Infusion”	19
1.7 Efecto de la humedad en Materiales Compuestos	22
2 MATERIALES	25
3 PROCESAMIENTO	29
3.1 Descripción de la técnica de procesamiento	29
3.2 Formulación de la resina	32
3.3 Inyección	33
3.4 Análisis de las placas obtenidas	36
4 PROPIEDADES	40
4.1 Absorción de agua	40
4.1.1 Descripción del ensayo	40
4.1.2 Resultados	41
4.2 Propiedades Mecánicas	49
4.2.1 Ensayo de Flexión en tres puntos (3PB)	49
4.2.1.1 Descripción del ensayo	49
4.2.1.2 Resultados	50
4.2.2 Short Beam Test	55
4.2.2.1 Descripción del ensayo	55
4.2.2.2 Resultados	56
4.2.3 Análisis Dinámico-Mecánico (DMA)	58
4.2.3.1 Descripción del ensayo	58
4.2.3.2 Resultados	59
5 CONCLUSIONES	62
6 TRABAJOS FUTUROS	64
7 REFERENCIAS	65
ANEXO I.....	67
ANEXO II.....	68

OBJETIVOS

Objetivos generales

El objetivo general de este proyecto es estudiar el efecto de las condiciones ambientales, especialmente el efecto de la humedad sobre las propiedades de materiales compuestos utilizados en las palas de molinos eólicos.

Objetivos Específicos

- ✓ Fabricar compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio por una técnica utilizada industrialmente para la fabricación de las palas (infusión por vacío).
- ✓ Determinar la absorción de humedad de los materiales utilizados.
- ✓ Evaluar el efecto de la humedad sobre las propiedades mecánicas de dichos materiales compuestos.
- ✓ Determinar el efecto del agregado de arcilla sobre la procesabilidad y las propiedades de absorción de la matriz.
- ✓ Evaluar la factibilidad del agregado de esta arcilla al material compuesto y su efecto sobre las propiedades estudiadas.

1 INTRODUCCIÓN

La energía eólica se utiliza en muchas regiones del mundo desde hace ya siglos. La Argentina posee un enorme potencial de términos de generación de energía eólica, ya que posee regiones como la Patagonia con factores de capacidad de los vientos cercanos al 45% [Soares y col, 2009], siendo la media europea (donde más desarrollado se encuentra el recurso) del orden del 21% [Boccard N, 2009]. El factor de capacidad se calcula como el valor porcentual de la energía que una turbina eólica entregará durante todo un año en relación a la cantidad de energía que podría entregar una turbina trabajando el 100% del tiempo. A nivel regional, la costa atlántica bonaerense posee altos factores de capacidad, con valores cercanos al 35%, destacándose las zonas de Necochea y Mar Chiquita [Stadler y col, 2009]

La generación de energía eólica está exigiendo un salto tecnológico tal que en las palas de las turbinas eólicas se deberá ir a un rango de tamaño aún no desarrollado. Surgen entonces mayores exigencias de rigidez y resistencia para modos de falla de tipo estática, de fatiga y de estabilidad del equilibrio. [Drewry y col, 2006]

Contrariamente a lo que se cree frecuentemente, no es la propia aerodinámica de las palas en donde está la dificultad, sino en su construcción y la resistencia de sus materiales.

En todos los aeromotores actuales, se está estudiando el método de fabricación de las palas que se deben hacer para aumentar la seguridad del funcionamiento, manteniendo los precios, sin que las máquinas se transformen en prototipos eternos que no puedan comercializarse.

Los materiales utilizados en las palas son esenciales tanto como el sistema de regulación. Actualmente estos son los dos elementos básicos que definen la calidad de un aeromotor. [National Renewable Energy Laboratory]

Los materiales utilizados para las palas de los generadores deben responder a frecuentes elevaciones de rotación y a otras exigencias, a veces contradictorias; los mismos deben ser:

- Ligeros.
- Perfectamente homogéneos para facilitar la producción en serie.
- Indeformables.
- Resistentes a la fatiga mecánica (en particular a las tensiones alternas debidas al funcionamiento de los rotores y las vibraciones).

- Resistentes a la erosión y a la corrosión.
- De uso y producción sencillos.
- De costo relativamente bajo para que el aeromotor se pueda construir y vender.

El uso de materiales compuestos (laminados de epoxi y fibras de carbono ó poliéster reforzado con fibra de vidrio) parece ser una de las primeras opciones válidas para la construcción de las palas de los aerogeneradores, ya que estos materiales pueden cumplir con la mayoría de los requisitos enunciados anteriormente.

Es importante destacar que los defectos de fabricación pueden causar problemas durante el funcionamiento. Por ejemplo, las hojas pueden desarrollar grietas en los bordes, cerca del centro o en los extremos. Las palas son consideradas como los componentes más vulnerables de una turbina de viento. Otro defecto típico de fabricación es la delaminación causada por una pobre adhesión entre las fibras y la matriz (Figura 1.1).



Figura 1.1 – Falla de palas eólicas por delaminación –

Según estudios realizados por NREL (National Renewable Energy Laboratory) el 50% de las fallas ocurren por defectos que son consecuencia de un mal procesamiento. Las principales causas de falla son: baja adhesión entre las fibras y la matriz, curado incompleto y/o huecos en el “*skin-core*”. Esto ocurre por el escaso

conocimiento que existe en los materiales compuestos y el procesamiento de los mismos. El 50% restante de las fallas se atribuyen a causas naturales como el daño por rayos e impacto de objetos entre otros (ver Figura 1.2). [Hartman Dave y col, 2006]

Esto hace que el estudio del procesamiento de los materiales utilizados para la fabricación de las palas de los molinos eólicos cobre vital importancia. Es también de gran importancia el estudio de la influencia del medio sobre la interfaz matriz – fibras (20 % de las fallas ocurre por falla de la misma), sobre todo la determinación de la influencia de la absorción de agua en las propiedades del material con el tiempo, ya que si se pudiese obtener un modelo de este comportamiento este resultado serviría para el diseño y la estimación vida útil del generador.

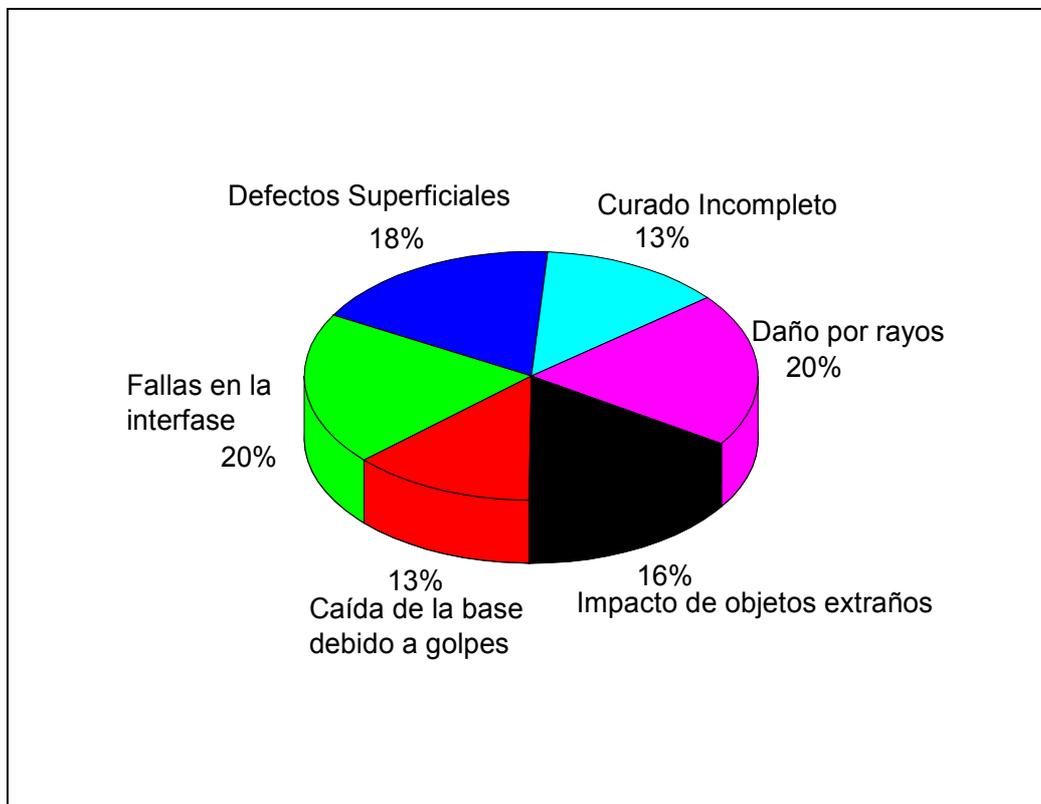


Figura 1.2 – Estadística de Fallas debido a eventos naturales o fallas de procesamiento de palas de molinos eólicos –

1.1 Materiales Compuestos

Los materiales compuestos poseen una morfología compleja, en la que dos o más sustancias distintas y estructuralmente complementarias se combinan para producir un material con ciertas propiedades estructurales o funcionales no presentes en ninguno de los componentes individuales. Ejemplos de estos son los polímeros termorígidos reforzados con fibra de vidrio y la madera (un compuesto de fibras de celulosa en una matriz de lignina entrecruzada). En ingeniería de materiales, los compuestos se definen más precisamente como mezclas físicas de materiales químicamente diferentes que son insolubles el uno en el otro y que por lo tanto coexisten como fases distintas: usualmente una fase continua (la matriz) y otra discontinua (el refuerzo) [Richardson, 1987]. Sus propiedades dependen de las propiedades de los constituyentes (individuales), de la fracción, del tamaño y forma geométrica de las fases, de las características de la interfase (**superficie de separación entre la matriz y las fibras**) y de la interacción entre ambas fases (adhesión interfacial).

La cantidad de refuerzo en un compuesto usualmente es dado en términos de su fracción volumétrica, que se define como el porcentaje del volumen total ocupado por el mismo.

Generalmente se quiere empaquetar tanto refuerzo como sea posible, pero dependiendo del empaquetamiento habrá límites geométricos para empaquetar la máxima cantidad de fibras o partículas posibles (el arreglo más compacto es el hexagonal con un empaquetamiento del 90% en volumen aproximadamente). Los compuestos reales tienen aproximadamente 50-60 % en volumen de refuerzo.

Las funciones de cada uno de los constituyentes de los compuestos son las siguientes:

Funciones de la matriz:

- Alinear las fibras en las direcciones de los esfuerzos y permitir la acción compuesta en tracción, compresión y corte.
- Separar las fibras de modo de prevenir que las fisuras pasen catastróficamente de una fibra a otra a través del compuesto.
- Proteger las fibras del daño mecánico y ambiental.
- Si la matriz es dúctil actúa frenando el crecimiento de las fisuras.

Funciones del refuerzo: Otorgar al material compuesto rigidez, resistencia y tenacidad.

1.2 Clasificación de Materiales Compuestos

Los materiales compuestos pueden clasificarse de dos formas diferentes, según el refuerzo utilizado o según el tipo de matriz.

Clasificación basada en el refuerzo:

- **Compuestos Fibrados (CRF):** Tienen fibras continuas ó discontinuas en una matriz (madera, huesos, plásticos reforzados con fibras).
- **Compuestos Laminados:** Tienen capas de varios sólidos (metales revestidos, vidrios laminados, compuestos fibrados laminados)
- **Compuestos particulados:** Tienen partículas en una matriz (ABS, piedras en la mezcla de concreto, partículas inorgánicas en materiales compuestos reforzados con fibras).

Los compuestos reforzados con partículas pueden a su vez clasificarse en compuestos de partículas grandes o compuestos reforzados por dispersión, según el tamaño de partícula y el mecanismo de refuerzo. [Richardson, 1987]

El término “partículas grandes” es usado para indicar que la interacción partícula-matriz no puede ser tratada a nivel atómico o molecular.

Para la mayoría de estos compuestos la fase particulada es más resistente que la matriz. Estas partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la fase matriz en la vecindad de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas. El grado de refuerzo o incremento del comportamiento mecánico depende de las fuerzas de cohesión presentes en la interfaz matriz-partícula.

En los compuestos reforzados por dispersión las partículas son de pequeño tamaño (10-100 nm), este tipo particular de material se denomina nanocompuesto. Cuando la matriz es polimérica se denominan nanocompuestos poliméricos. Las interacciones partícula-matriz que generan el refuerzo se producen a nivel atómico (Ver 1.5). La matriz recibe la mayor parte del esfuerzo aplicado y las partículas pequeñas y dispersas dificultan o bloquean la deformación de la matriz. Por lo tanto, se restringe la deformación plástica de manera de incrementar la resistencia a la fluencia, a la tracción y la dureza.

Los compuestos reforzados por fibras (CRF) pueden clasificarse según la longitud y alineación de las fibras en 3 categorías [Anderson y col, 1990]:

- 1. De fibras continuas y alineadas** (sus propiedades son anisotrópicas y por lo tanto dependen de la dirección en la cual sean medidas).
- 2. De fibras discontinuas y alineadas** (la eficiencia del refuerzo es inferior al caso de fibras continuas y alineadas).
- 3. De fibras discontinuas y orientadas al azar**

Clasificación basada en el tipo de matriz.

Según el material de la matriz los compuestos pueden clasificarse como [Deborah, 2002]:

1. Compuestos de matriz polimérica (PMC)
2. Compuestos de Matriz Metálica (MMC)
3. Compuestos de Matriz Cerámica (CMC)

En compuestos de matriz polimérica la fase matriz es polímero y la fase de refuerzo pueden ser fibras o partículas. La matriz polimérica puede ser tanto termoplástica como termorígida.

Los termoplásticos exhiben una resistencia mecánica moderada, son fáciles de procesar, reciclables, fluyen al aplicar temperatura y poseen una pobre resistencia al calor. Por otro lado, los polímeros termorígidos exhiben una mejor resistencia mecánica en comparación con los termoplásticos, son fáciles de procesar, rígidos, poseen mejor resistencia al calor, curan o entrecruzan mediante la aplicación de temperatura y no son reciclables.

La principal desventaja de los polímeros respecto de otros materiales, tales como los cerámicos y los metales es su baja resistencia mecánica y a la temperatura. Para poder extender su uso en el área estructural, estos materiales poliméricos son modificados con “fillers” (cargas) y refuerzos de manera de poder desarrollar una mayor resistencia mecánica. Debido a esto, en muchas aplicaciones ingenieriles se trabaja con polímeros reforzados frente a polímeros convencionales como tal es el caso de las palas que se utilizan en los generadores eólicos.

El presente proyecto final se enfocará en compuestos de matriz polimérica termorígida (resina poliéster insaturada) reforzada con fibras de vidrio discontinuas y al azar (mats de fibras de vidrio) y además con el agregado de un 5% en peso de partículas cerámicas (en nuestro caso se utilizará bentonita, una arcilla nacional).

1.3 Resina Poliéster Insaturado

Estas resinas son comúnmente utilizadas como matrices para la fabricación de materiales compuestos que se emplean en la industria automotriz, marina, química y eléctrica.

Las matrices de poliéster se obtienen a partir de una resina de poliéster insaturado, es decir que contiene un cierto número de dobles enlace carbono-carbono (C=C). Esta resina se obtiene a partir de la reacción del ácido maleico y el etilenglicol o el propilenglicol (Figura 1.3a). El líquido polimérico resultante es disuelto en estireno. El estireno (Figura 1.3b) se agrega con dos propósitos: por un lado actúa como diluyente, disminuyendo la viscosidad y facilitando la manipulación y el almacenamiento, y por otro lado actúa como agente entrecruzante puenteando los dobles enlaces del poliéster insaturado. También se agregan trazas de inhibidores para prevenir la polimerización prematura durante el almacenamiento.

La reacción de curado se inicia cuando se agrega pequeñas cantidades de catalizador a la resina; generalmente se utiliza un peróxido orgánico o algún compuesto azo alifático (ver Figura 1.3c). Con aplicación de calor, el catalizador se descompone en radicales libres, los cuales reaccionan con las moléculas de estireno y rompen sus dobles enlaces C=C. Los radicales de estireno unen las moléculas de poliéster en sus puntos de insaturación formando los puntos de entrecruzamiento. El material resultante es una resina poliéster sólida.

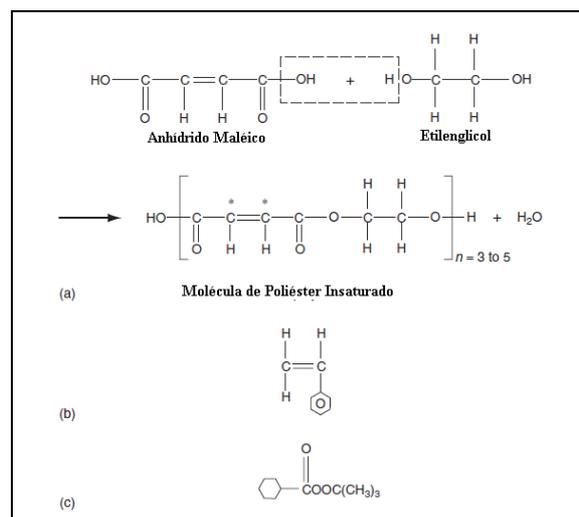


Figura 1.3 – a) Molécula de poliéster insaturado. b) Molécula de estireno (entrecruzante) c) Molécula de terbutil perbenzoato (tBPB) (Catalizador) –

El tiempo de curado de un sistema poliéster-catalizador depende de la temperatura, para cada sistema existe una temperatura ideal de curado para el cual todos los radicales libres formados son utilizados para entrecruzar el polímero. La velocidad de descomposición del catalizador puede aumentarse agregando pequeñas cantidades de acelerante.

Como en el caso de las resinas epoxis, las propiedades de las resinas poliéster dependen fuertemente de la densidad de los entrecruzamiento [P.K. Mallick, **THIRD EDITION**]. El módulo, la temperatura de transición vítrea y la estabilidad térmica de la resina curada aumentan con el aumento de la densidad de los puntos de entrecruzamiento, pero la deformación a rotura y la energía de impacto se reducen. El factor controlante sobre la densidad de los puntos de entrecruzamiento es el número de puntos de instauración en la resina poliéster sin curar. La manera más simple de controlar esto es variando la relación empleada entre los reactivos utilizados para formar la resina. La influencia de esta relación se puede observar en la Figura 1.4.

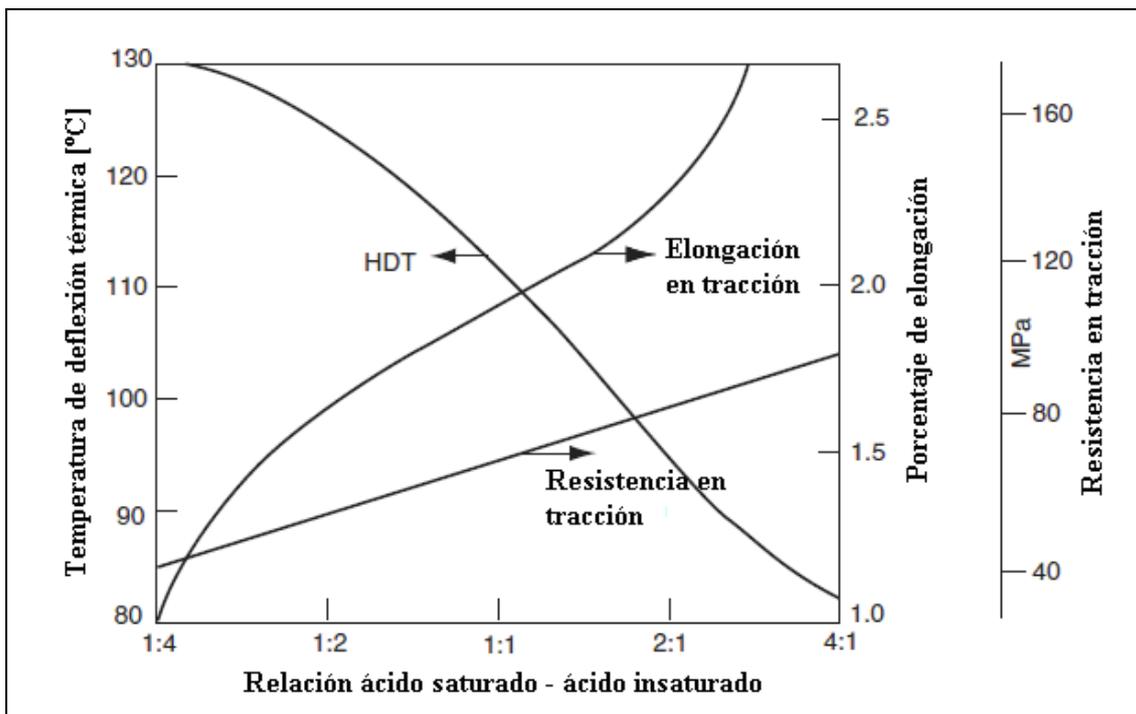


Figura 1.4 – Influencia de la relación utilizada en los reactivos para formar el PU sobre las propiedades finales –

Las resinas poliéster pueden ser formuladas para obtener materiales en un amplio rango de propiedades, desde duras y frágiles hasta blandas y flexibles. Las propiedades generales de las resinas poliéster se observan en la Tabla 1.1.

Densidad [g/cm ³]	1,10 - 1,43
Resistencia a la tracción [MPa]	34,50 - 103,50
Modulo de Young [GPa]	2,10 - 3,45
Elongación a rotura [%]	1 - 5
Temperatura de deflexión térmica [°C]	60 - 205
Contracción al curado [%]	5 - 12

Tabla 1.1 – Propiedades típicas de las resinas poliéster (23°C) –

1.4 Fibras de Vidrio

Las fibras de vidrio son los refuerzos más comúnmente utilizados en materiales compuestos de matriz polimérica (PMC). Las principales ventajas de las fibras de vidrio son su bajo costo, alta resistencia a la tracción, resistencia química, y excelentes propiedades aislantes. Las desventajas son su relativamente bajo módulo de tracción, su de alta densidad comparadas con el resto de las fibras comerciales utilizadas como refuerzo (fibras de carbono y Kevlar), la sensibilidad a la abrasión durante la manipulación (que con frecuencia disminuye su resistencia a la tracción), resistencia a la fatiga relativamente baja y alta dureza (que causa un desgaste excesivo en los moldes y herramientas de corte utilizadas).

Los dos tipos de fibras de vidrio mayormente empleadas para fabricar plásticos reforzados con fibras de vidrio (PRFV) en la industria son la E y la S. Otro tipo, conocido como la C, se utiliza en aplicaciones que requieren una mayor resistencia a la corrosión de los ácidos que el previsto para las E.

Las fibras de vidrio del tipo E son las de menor costo disponibles en el mercado, esta es la razón de su uso generalizado en la industria de PRFV. Las del tipo S, originalmente desarrolladas para los componentes de las aeronaves y las cubiertas de misiles, tienen mayor resistencia a la tracción entre todas las fibras de vidrio en uso. Sin embargo, la diferencia de composición y el costo de fabricación hacen que sean más caras que las E.

Las composiciones químicas típicas de las distintas clases de fibra de vidrio pueden observarse en la Tabla 1.2.

Tipo	Composición [% en peso]					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Na ₂ O
E	54,5	14,5	17	4,5	8,5	0,5
S	64	26	--	10	--	--

Tabla 1.2 – Composición típica de las fibras de vidrio –

La resistencia a la tracción media de las fibras de vidrio recién estiradas (luego de ser fabricadas) puede ser superior a 3,45 GPa. Sin embargo, los daños en la superficie (defectos) producidos por la abrasión, ya sea por el roce entre sí o por contacto con el equipo de procesamiento, tienden a reducir a la resistencia a la tracción en el rango de 1,72-2,07 GPa. [P.K. Mallick, THIRD EDITION].

El crecimiento de los defectos superficiales en las fibras disminuye notablemente su resistencia sobre todo bajo cargas cíclicas. Esta es una de las principales desventajas que limita el uso de las fibras de vidrio en aplicaciones en la que las mismas están sometidas a fatiga. Las tensiones de compresión superficiales obtenidas por intercambio de iones alcalinos o la eliminación de defectos en la superficie por ataque químico puede reducir el problema. Sin embargo, las fibras de vidrio comerciales no están disponibles con dichas modificaciones.

Las fibras de vidrio se presentan en el mercado en distintas formas como se observa en la Figura 1.5.

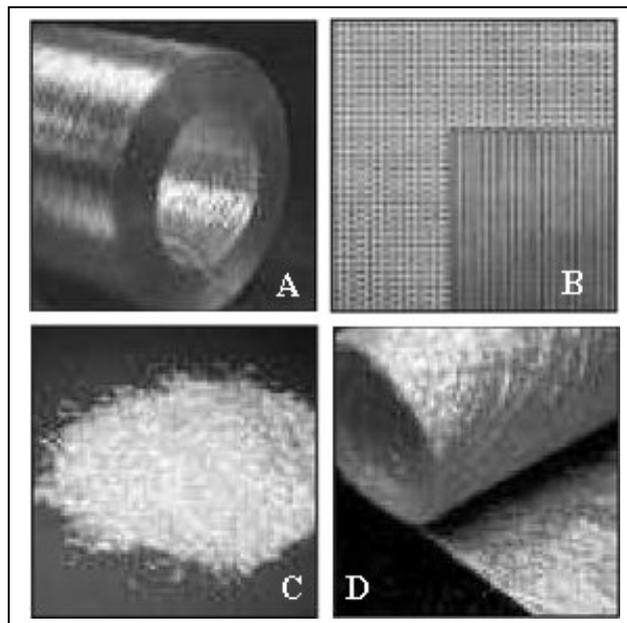


Figura 1.5 – a) Fibras continuas b) Mat tejido Bidireccional de fibras continuas c) Fibras cortas d) Mat de fibras cortas –

1.5 Nanocompuestos

Por definición, los nanocompuestos son materiales bifásicos, donde al menos uno de ellos se encuentra dentro del rango nanométrico ($1 \times 10^{-9} \text{m}$). Generalmente los elementos de refuerzo macroscópicos contienen imperfecciones. La perfección estructural se incrementa a medida que los elementos de refuerzo se hacen más pequeños. Las propiedades óptimas resultantes de los elementos de refuerzo pueden esperarse cuando sus dimensiones alcanzan niveles atómicos o moleculares.

[Kornmann X. y col 2005]

Los nanocompuestos poliméricos son en esencia, polímeros reforzados con partículas, las cuales pueden ser esféricas (tres dimensiones nanométricas), tubulares (dos dimensiones nanométricas) ó laminares (una dimensión nanométrica). Esta última, es la forma más adecuada para obtener un máximo rendimiento.

Los nanocompuestos poliméricos se obtienen con pequeñas cantidades de refuerzo (menos del 10% en peso), y sus propiedades exhiben marcadas diferencias en comparación con polímeros no reforzados, por lo cual son de gran interés académico e industrial.

A estos tamaños tan pequeños, las propiedades de los nanocompuestos no sólo dependen de las propiedades de los materiales que los conforman sino también en la forma en que estos materiales interactúan a nivel molecular. Las interfaces entre la matriz y el refuerzo son maximizadas. Así, las propiedades de los compuestos que dependen en gran parte de la interfaz matriz-refuerzo (resistencia al corte y flexión) son superiores comparadas con el polímero sin reforzar. Otras propiedades que se han mejorado al trabajar con nanocompuestos con respecto al polímero sin reforzar son la claridad óptica, estabilidad térmica, las propiedades barrera y el retardo a la llama

[Edgar A. Franco y col, 2009].

Una de las principales partículas utilizadas como refuerzos en los nanocompuestos poliméricos son las arcillas minerales, también conocidas como filosilicatos o silicatos naturales. Los filosilicatos pertenecen fundamentalmente a cuatro grupos principales: caolinita, esmectita, illitas y clorita.

La arcilla esmectita del tipo montmorillonita (descubierta por Damour y Salvétat en Montmorillon, Francia) es hoy en día la arcilla mineral más utilizada como fase reforzante en matrices poliméricas. La misma, se encuentra en numerosas partes del

planeta, ya que en la mayoría de los casos se ha formado a partir de la erosión de materiales de erupciones.

Es esencial entender que las partículas de arcilla no son por sí mismas nanométricas, sino que están formadas por el apilamiento de láminas, cuyo espesor mide aproximadamente 1 nm, mientras que sus dimensiones laterales pueden variar desde 30 nm hasta varias micras.

Uno de los mayores problemas en la conformación de nanocompuestos es la mezcla física entre el polímero y las partículas de arcilla ya que ni bien se mezclan, a priori no forman el nanocompuesto. Dependiendo de la naturaleza de los componentes, pueden obtenerse tres tipos distintos de nanocompuestos: aglomerados, intercalados y exfoliados, como se observa en la Figura 1.6.

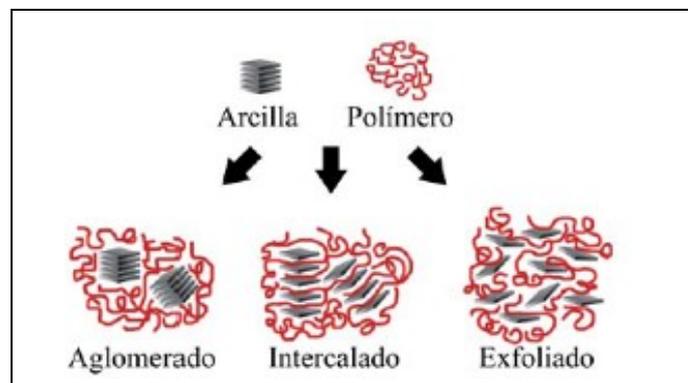


Figura 1.6 – Tipo de nanocompuestos poliméricos –

Los aglomerados o microcompuestos se forman cuando el polímero es incapaz de intercalarse entre las láminas de la arcilla, obteniéndose una fase separada. En los nanocompuestos intercalados, la difusión del polímero promueve el desarrollo de una morfología de multiláminas muy ordenadas. Mientras que en los nanocompuestos exfoliados o delaminados, las láminas de arcilla se encuentran totalmente dispersas y desordenadas dentro de la matriz polimérica. [Edgar A. Franco y col, 2009]

Uno de los factores clave en el desarrollo de nanocompuestos poliméricos es la afinidad entre los sistemas, por lo que resulta indispensable conocer la constitución molecular de las arcillas.

En principio, las arcillas no modificadas solamente pueden ser miscibles con polímeros hidrofílicos. Por lo tanto, es necesario el uso de agentes de acoplamiento para compatibilizar ambas fases. Estos agentes son fundamentalmente moléculas constituidas por una funcionalidad hidrofílica (afín a las arcillas) y por una funcionalidad

organofílica (afín al polímero), lo que facilita la dispersión de las láminas de la arcilla dentro de la matriz polimérica. Los agentes de acoplamiento más populares son las sales de alquilamonio, ya que pueden intercambiarse fácilmente con los cationes situados en las galerías.

En varias investigaciones, las láminas de la arcilla no se encuentran totalmente exfoliadas dentro de la matriz, lo cual se atribuye a diversos factores tales como: la ausencia de compatibilidad molecular, la excesiva cantidad de partículas de arcilla o bien, a la degradación del modificador durante el procesado. [Edgar A. Franco y col, 2009]

El aumento de las propiedades solo puede alcanzarse cuando se obtiene un nanocompuesto exfoliado.

1.5.1 Estructura de las arcillas utilizadas como refuerzos

Las arcillas minerales empleadas en la elaboración de nanocompuestos pertenecen a la familia estructural conocida como filosilicatos 2:1.

En su aspecto primario, las partículas de arcilla se componen de la asociación de varias láminas apiladas, las cuales forman agregados irregulares, tal como se presenta en la Figura 1.7.

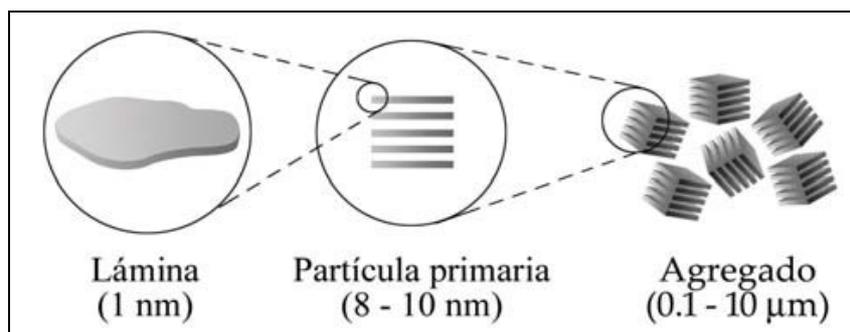


Figura 1.7 – Microestructura laminar de las arcillas –

A gran escala, cada lámina posee una elevada relación de aspecto (L/d), alrededor de 100 a 200 nm de longitud y 1 nm de espesor.

Las láminas de las arcillas presentan una estructura molecular basada en el apilamiento de capas. La primera capa está conformada por cristales regulares cuya unidad básica es el tetraedro de silicio y oxígeno (Figura 1.8a). Este tetraedro se encuentra eléctricamente descompensado, por lo que debe unirse a otros cationes para

neutralizar sus cargas. Para ello, cada oxígeno está en coordinación con dos silicios, formando capas tetraédricas que se distribuyen bajo la configuración de hexágonos (Figura 1.9).

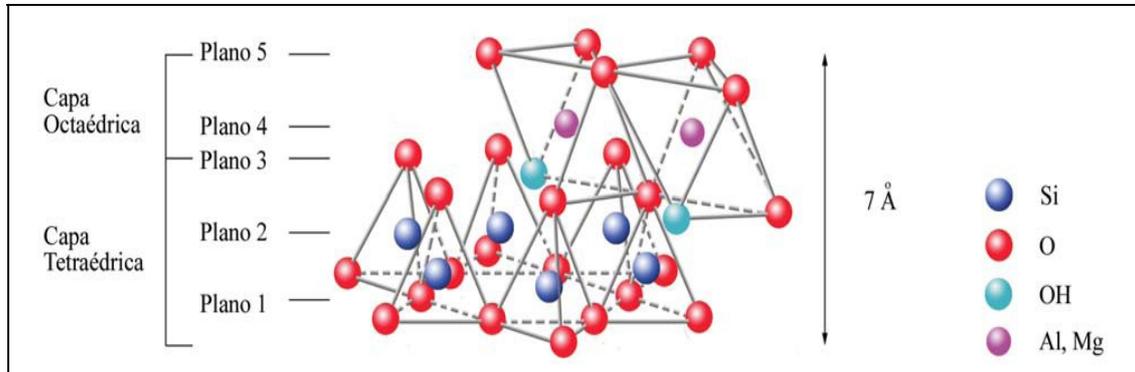


Figura 1.8 – Estructuras básicas de las arcillas: a) Capa tetraédrica b) Capa Octaédrica

La segunda capa está constituida por octaedros de magnesio o alúmina, cuyos vértices están conformados por oxígenos. Similar a los tetraedros, los octaedros se encuentran eléctricamente descompensados. Para neutralizarse, los vértices tienen que compartirse entre sí formando una capa octaédrica, tal como se aprecia en la Figura 1.8b.

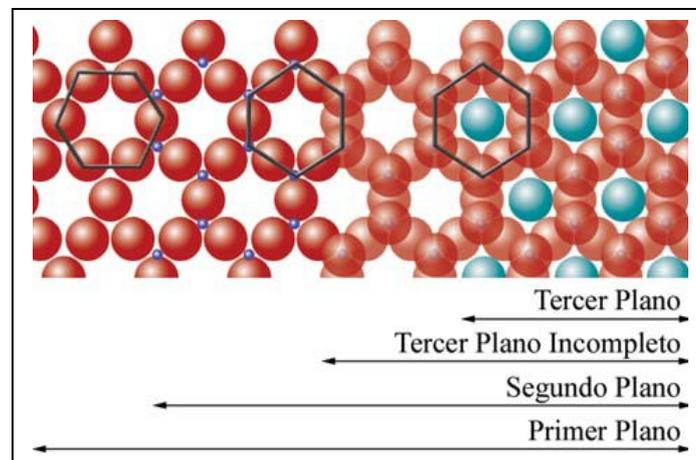


Figura 1.9 - Vista superior de los planos formados por la unión de capas tetraédricas y octaédricas –

La disposición de ambas capas puede comprenderse mejor si es representada a través de planos atómicos.

El primer plano corresponde al plano basal de la capa tetraédrica. En el segundo plano se colocan los átomos de silicio. En un tercer plano, los oxígenos sin compartir también llamados también oxígenos apicales (Figura 1.8).

El cuarto plano se encuentra constituido por la disposición de iones Mg^{2+} y/o Al^{3+} octaédricos, los cuales se sitúan en los pequeños espacios libres que dejan cada dos oxígenos apicales y un OH^- .

El quinto plano, corresponderá al plano superior de los octaedros. Si la estructura terminara en este plano, las arcillas estarían conformadas por dos capas, una tetraédrica (T) y otra octaédrica (O), conocidas como estructuras 1:1. Ahora bien, si se añade una capa tetraédrica formando una estructura tipo sándwich se formaría una estructura T:O:T denominada estructura 2:1.

A la unidad formada por la unión de capas tetraédricas y octaédricas se le denomina lámina. La lámina 1:1 tiene un espesor de 7 Å, mientras que la lámina 2:1 posee un espesor de 9 Å aproximadamente.

Así, las láminas de las arcilla se originan por el apilamiento de planos alternos de iones (O y OH) y cationes (Si^{4+} , Mg^{2+} y Al^{3+}).

La capacidad de absorber una cantidad determinada de cationes y retenerlos en un estado intercambiable es conocida como la capacidad de intercambio catiónico (CEC). La importancia de conocer el CEC, es que las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones isomorfas, donde los cationes como el Si^{4+} son sustituidos por otros de menor carga (Al^{3+}), por lo que se genera un exceso de carga negativa entonces el balance de carga se mantiene por la presencia de cationes individuales intercambiables en el espacio interlamina (Figura 1.8a). **[Edgar A. Franco y col, 2009]**

1.6 Procesamiento de materiales compuestos

El aspecto fundamental que debe considerarse cuando se requiere producir un componente con una geometría y propiedades adecuadas, es el desempeño que éste tendrá durante su vida útil. Para poder hacer la mejor selección y diseño, debemos tener en cuenta la compleja relación entre la estructura interna del material, su procesamiento y sus propiedades finales. Cuando alguno de los tres aspectos de esta relación cambia los otros dos se ven necesariamente afectados. Por lo que resulta ventajoso poder determinar la relación que existe entre ellos a fin de obtener el producto requerido (Figura 1.10).

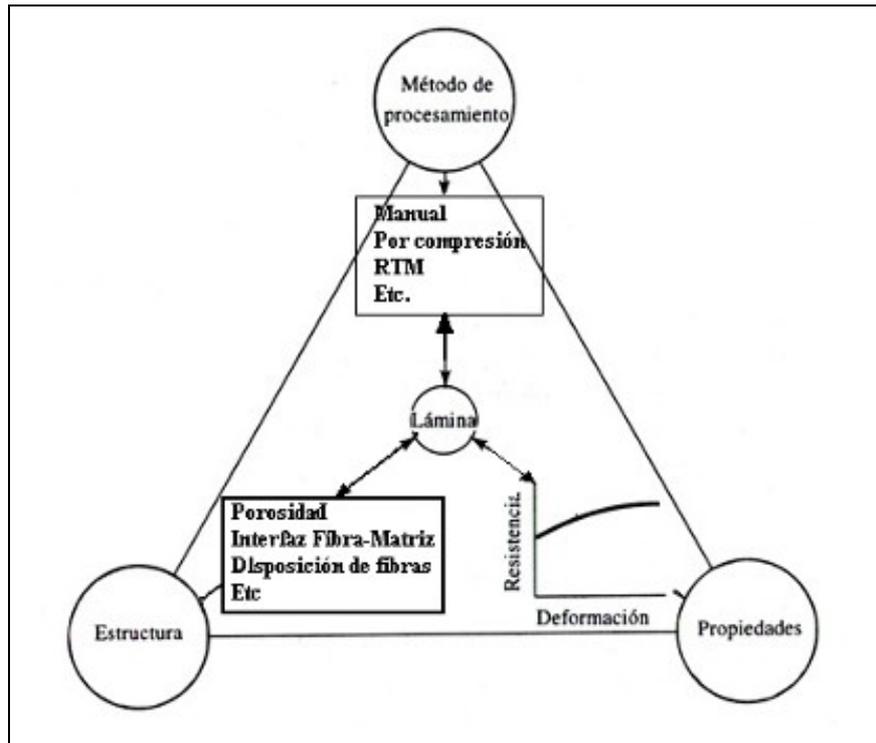


Figura 1.10 – Interrelación procesamiento, estructura y propiedades

Para poder obtener una pieza con buenas propiedades finales (libre de defectos, acabado superficial adecuado, propiedades mecánicas adecuadas, etc.) la elección de la técnica de procesamiento es tan importante como la selección de los materiales.

En términos de evolución histórica, fueron las técnicas de molde abierto como el moldeo manual “hand lay up” las que alcanzaron originalmente el mayor desarrollo, debido a su simplicidad y bajos costos de producción. Como principales desventajas de estas técnicas se pueden mencionar el alto contenido de poros en las piezas finales, la imposibilidad de lograr fracciones de fibra elevadas y problemas relacionados con la emisión de volátiles. [Rodríguez E, 2005]

A medida que fueron pasando los años y las investigaciones sobre materiales compuestos avanzaron; el uso de los mismos fue aumentando para diversas aplicaciones, desde fabricación de tubos para el transporte de petróleo hasta veleros. Fue por esto que se comenzaron a desarrollar e investigar nuevas técnicas de procesamiento.

En la actualidad la selección de la técnica de procesamiento para la fabricación de materiales compuestos estas dependen de:

- La geometría final a obtener
- Acabado superficial
- Tipo de refuerzo (fibras cortas, fibras largas, mats)

- Características de la resina utilizada
- Repetibilidad
- Costo para producir en serie.

Entre las técnicas más comúnmente utilizadas en la actualidad encontramos: el Procesamiento manual o “Hand Lay-up”, moldeo por compresión, “vacumm bag”, enrollamiento por filamentos o “fillament widening”, RTM y pultrusión entre otras técnicas (Ver Figura 1.11)

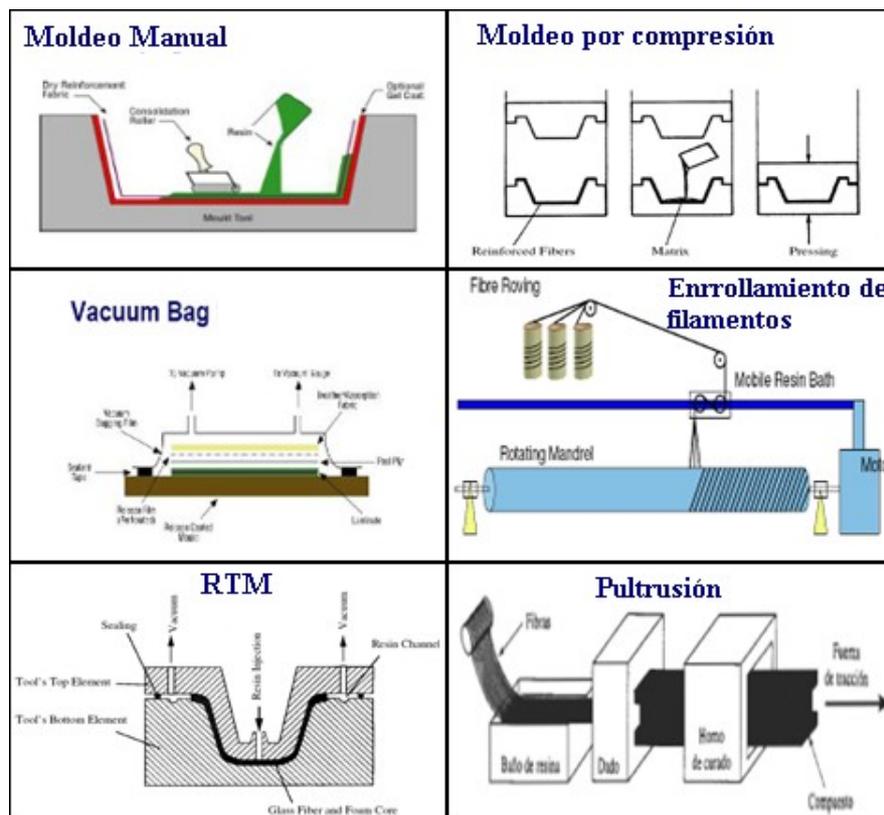


Figura 1.11 – Esquemas de algunas de las principales técnicas de procesamiento de materiales compuestos de matriz polimérica –

Para seleccionar la técnica de procesamiento adecuada se deben tener en cuenta las variables críticas del mismo. Estas están relacionadas con la resina utilizada (cinética de curado, reología, propiedades físicas y temperatura de vitrificación), el control del material (temperatura en el centro de la pieza y grado de curado), control del proceso (temperatura del molde, velocidad de la línea de producción, caída de presión y tiempo de residencia) y la geometría del producto final. Otro factor importante a la hora de elegir la técnica de procesamiento es la cantidad de piezas a producir.

1.6.1 Infusión en Vacío “Vacuum Infusion”

Este es el método de procesamiento utilizado para la producción de palas de molinos eólicos (Figura 1.12) y el utilizado en el presente proyecto final para la obtención de las placas de resina poliéster insaturado reforzado con mats de fibras cortas de vidrio.



Figura 1.12 – Procesamiento de una pala de molino eólico por infusión en vacío –

El proceso de moldeo por impregnación de resina o “resin transfer moulding” (RTM) consiste básicamente de cuatro pasos. En el primero se genera una preforma del refuerzo con la forma de la pieza a construir. El segundo paso (etapa de llenado) consiste en la impregnación de la preforma ubicada en la cavidad del molde. El tercer paso es el proceso de curado de la resina, que puede comenzar durante la primera etapa o después de ésta. El último paso es el desmolde de la pieza luego de que el proceso de curado de la resina terminó y la pieza tiene su forma final.

En el proceso de RTM la resina se introduce en el molde mediante la aplicación de un gradiente de presión (ΔP). Dicho gradiente puede crearse por la aplicación de presión positiva (RTM a secas), vacío (Infusión en vacío “Vacuum RTM”), o ambos simultáneamente (VARTM). En nuestro caso la técnica utilizada es infusión en vacío.

Las variables críticas del proceso de infusión en vacío son:

- Características de la resina: formulación, estructura química, temperatura, la viscosidad que debe ser menor a 500 cp (muy importante si se carga la resina con arcillas).
- Características de las fibras: tipo de fibras, arreglo, secuencia de apilamiento, contenido volumétrico.

- Condiciones de procesamiento: eficiencia en el sistema de creación de vacío y velocidad de producción requerida.
- Características del molde: geometría, ubicación y cantidad de puntos de inyección y venteo, sistema de calefacción.

La etapa de llenado o impregnación es la clave del éxito del proceso; como la impregnación de la resina se produce por una diferencia de presión entre los puntos de inyección y de venteo dentro del molde, la ubicación de los puntos de inyección y venteo es determinante para obtener una pieza sin defectos. Una ubicación incorrecta de dichos puntos genera regiones sin resina (puntos secos) y, en consecuencia, piezas defectuosas con bajas propiedades mecánicas.

Con la complejidad de la pieza a obtener crece la dificultad para la colocación de los puntos de inyección y venteos, ya que es muy distinto producir una placa rectangular que un aspa de molino eólico. Por lo tanto, la capacidad de predecir la posición del frente de flujo durante el llenado del molde en el proceso de RTM permite mejorar el proceso de diseño y colocación de los puntos de inyección y venteo, reduciendo el número de pruebas asociadas a la puesta a punto de una nueva pieza.

El modelado numérico es una herramienta muy útil a la hora de la construcción de moldes para poder fabricar palas de molinos eólicos, hay muchos trabajos en los que se modela el proceso de RTM.

Para la simulación numérica muchos autores aplican la Ley Darcy para un flujo a través de un medio poroso y consideran flujo incompresible. Dicha ley posee dos parámetros fundamentales que dependen de los materiales utilizados: la viscosidad de la resina (μ) y la permeabilidad de las fibras (K). Esta última variable describe la facilidad con la que un fluido fluye a través de un material poroso y depende principalmente de la porosidad (fracción volumétrica de huecos) y la arquitectura de la preforma. **[Santiago Diego y col, 2007]**

Si bien la Ley de Darcy, se utilizó en sus comienzos para describir el proceso de extracción de petróleo en depósitos subterráneos; el análisis puede extenderse al comportamiento de cualquier fluido que atraviesa un lecho relleno.

Esta ley establece una proporcionalidad entre el caudal Q (m^3/s) y la caída de presión por unidad longitud del medio poroso, $\Delta P/\Delta L$ (Pa/m). Como constantes de proporcionalidad aparecen la viscosidad μ (Pa.s) y la permeabilidad K (m^2). Donde A es el área de sección transversal (m^2). Despejando K obtenemos la siguiente expresión:

$$K = \frac{Q}{A} \frac{\mu}{\Delta P} = \frac{\langle v \rangle \mu}{(\Delta P / \Delta L)}$$

(1.1)

La Ley de Darcy supone un medio poroso homogéneo aunque no necesariamente isotrópico. Muchos de los refuerzos utilizados en RTM presentan inhomogeneidades y son mayoritariamente anisótropos. El carácter anisótropo fue abordado planteando una permeabilidad con respecto a cada eje, formando así un tensor permeabilidad. En general, los refuerzos al azar (mats) pueden ser considerados isotrópicos mientras que los uni o bi-direccionales se consideran anisótropos y debe considerarse la orientación del refuerzo respecto a la dirección de inyección, así como la forma de apilamiento de las distintas capas.

Un inconveniente de utilizar la Ley de Darcy para modelar un proceso de inyección es que esta supone flujo estacionario a través de un lecho relleno pero la inyección en sí misma no es un proceso estacionario. Para contrarrestar esto se suele plantear que porción del refuerzo que se encuentra detrás del frente de flujo está completamente saturada de resina dando lugar a un estado cuasi-estacionario.

Otro parámetro fundamental es la determinación de la permeabilidad del medio. Un aspecto importante en la determinación de la misma es la diferenciación entre permeabilidad saturada e insaturada. La primera tiene en cuenta la resistencia al flujo del fluido cuando atraviesa el refuerzo ya impregnado por éste. La segunda, se aplica al proceso mismo de impregnación, es decir, el flujo del líquido a través de un refuerzo seco. La permeabilidad insaturada es en realidad un parámetro más representativo del proceso de inyección aunque, algunos autores han puesto en duda la validez de la hipótesis de estado cuasi-estacionario, que es la suposición básica de las distintas técnicas de medición experimentales de este tipo de permeabilidad. **Pillai y Advani (1998)** encontraron que para los refuerzos de fibra de vidrio al azar, la variación de la presión de inyección con el tiempo (a caudal constante) era una línea recta que podía ser predicha con la ecuación de Darcy, pero para mats tejidos, la evolución de la presión era una curva que caía en el tiempo desviándose de la línea recta.

1.7 Efecto de la humedad en Materiales Compuestos

En los materiales poliméricos reforzados con fibras la humedad difunde a través de la matriz, produciendo cambios en las propiedades químicas, mecánicas y termofísicas. El primer efecto de la absorción tiene lugar en la resina (a través de hidrólisis, plastificación, saponificación y otros mecanismos) causando cambios reversibles e irreversibles en la estructura del polímero. En algunos casos, la humedad penetra a través de la interface fibra-matriz causando efectos de deterioro en el enlace fibra-matriz, lo que resulta en una pérdida en la integridad y en una fuerte caída de las propiedades mecánicas. Muchas matrices absorben humedad reversiblemente siguiendo las leyes de difusión de Fick. Las impurezas pueden producir procesos de absorción no-Fickeanos, que dejan efectos irreversibles. **[De La Osa O. y col, 2006]**

La humedad también puede causar degradación en las fibras de vidrio. La degradación se inicia por la humedad que extrae iones de las fibras, alterando así la estructura de las mismas. Estos iones combinados con agua forman bases, las cuales atacan químicamente formando pits sobre la superficie de las fibras, que resultan en defectos que disminuyen significativamente la resistencia y pueden causar la falla o fractura prematura de las fibras.

A través de una apropiada selección de la resina, las condiciones de procesamiento y la utilización de recubrimientos es posible proteger las fibras de la degradación. En general, la degradación es significativamente retardada si el compuesto resultante es curado completamente antes de la puesta en servicio. La eficacia en la utilización de recubrimientos ha sido demostrada por la industria naval, ya que un buen recubrimiento previene la formación de fisuras interlaminares (“blisters”), degradación de la matriz y ataque a las fibras. Sin embargo, el daño en el recubrimiento puede resultar en un rápido ataque sobre el sustrato. **[Hunston D. y col, 2006]**

Generalmente un material absorbe humedad cuando es sumergido en agua o puesto en una atmósfera húmeda hasta llegar a un punto de saturación y/o equilibrio.

Para comprender este fenómeno de absorción de humedad en los materiales se ha utilizado la 2ª Ley de Fick, estableciendo las siguientes hipótesis:

- a) El material es homogéneo.
- b) No existe interacción química entre el material y el agua.
- c) La absorción sólo ocurre por difusión.

d) No hay extracción de solubles dentro del rango de pesos o tiempos medidos.

e) Las dimensiones de las probetas no varían considerablemente.

Como el material utilizado en la construcción de las palas de las turbinas eólicas es un material compuesto algunas de estas hipótesis no se cumplen, sino que generalmente estos verifican las siguientes condiciones:

a) El material no es homogéneo.

b) La difusión puede no ser el único mecanismo de transporte de agua, ya que si la interfaz matriz-fibra no es buena ocurrirá absorción por capilaridad.

c) Dependiendo del carácter hidrofílico de la matriz puede haber bastante o casi nula interacción química entre el polímero que forma la matriz y los grupos oxidrilos (OH⁻) del agua.

d) Puede existir extracción de solubles.

e) Las dimensiones pueden variar si se produce hinchamiento de la probeta debido a la absorción.

Entonces para poder utilizar la segunda Ley de Fick y calcular un coeficiente de difusión debemos aplicar el siguiente razonamiento:

I. Consideramos que sólo existe absorción de humedad por efectos de la difusión del agua en la matriz, ya que consideramos que la interface matriz-fibra es tan buena que la absorción debida a capilaridad a través de la misma es despreciable.

II. No hay extracción de solubles hasta alcanzar el punto de equilibrio o máxima absorción.

III. Si bien existe hinchamiento, este es despreciable en esta etapa de absorción

Luego; la ecuación diferencial de difusión en una dimensión que puede escribirse como:

$$\boxed{\frac{dc}{dt} = D_{eff} \cdot \frac{d^2c}{dx^2}} \quad (1.2)$$

donde:

c es la concentración de agua; D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo normal a la superficie (en la dirección x perpendicular a la superficie) y t es el tiempo de difusión.

D_{eff} puede obtenerse experimentalmente de la pendiente inicial de la curva de M % en función de $t^{1/2}$

M_{∞} es la máxima absorción porcentual de agua para el cual se mantiene la relación lineal entre $M_i(\%)$ y $t^{1/2}$, y h es el espesor de la probeta. Si no se puede desprestigiar el flujo de humedad en las caras laterales, se deben introducir correcciones de borde para obtener el coeficiente de difusión efectivo a partir de las curvas de absorción.

La ecuación anterior es válida sólo para cortos tiempos de difusión.

Evidencias experimentales indican que el máximo contenido de humedad depende del contenido de humedad del ambiente. Para un material inmerso en un líquido M_{∞} es un valor constante:

$$M_{\infty} = \text{constante (liquido)} \quad (1.3)$$

Para un material expuesto a aire húmedo, M_{∞} depende de la humedad relativa porcentual, HR %. **[Rodríguez E, 2005]**

2 MATERIALES

La resina utilizada fue una resina poliéster insaturada, de mediana reactividad, de baja viscosidad, con alto contenido de sólidos, no acelerada, de baja contracción y baja emisión de monómero de Estireno al ambiente (ver la ficha técnica del proveedor en el Anexo I).

El refuerzo utilizado fue un mat de fibras cortas tejidas (ver Figura 2.1). Las fibras eran fibras de vidrio tipo E vinculadas con un polvo soluble en estireno lo que hace que su uso sea adecuado con resinas poliéster insaturado.



Figura 2.1 – Mat de fibras utilizadas –

Las fibras de vidrio utilizadas estaban químicamente pretratadas para aumentar la afinidad con la resina poliéster y así asegurar una mejor interfaz fibra-resina. Para mayor detalle ver la ficha técnica en el Anexo II.

La densidad superficial de los mats indicada por el proveedor era de 450 g/m^2 . Para corroborar ese dato se midió la densidad de 6 muestras de fibras tomadas de distintas partes dando como resultado una densidad de $484 \pm 34 \text{ g/m}^2$.

Con la resina, se obtuvieron placas de matriz. Las mismas fueron obtenidas a partir de la misma formulación utilizada para los materiales compuestos (1,2 % de catalizador, 0,4% de Co y 0,1% di metil anilina), las dimensiones de las mismas fueron de 15 x 15 cm. Las características de las placas obtenidas son:

- **Matriz A:**
 - Resina Poliéster.
- **Matriz B:**
 - Resina Poliéster.
 - 5% en peso de Bentonita.

El ciclo térmico de curado para las matrices fue de 1,5 h a 70°C y un ciclo de postcurado de 1,5 h a 120°C.

Las placas de material compuesto fueron preparadas a través la técnica de procesamiento *infusión por vacío*, las dimensiones de las placas obtenidas fue de 30 x 30 cm. Las placas obtenidas fueron de dos materiales compuestos diferentes:

- **Compuesto A:**
 - ❖ Resina Poliéster.
 - ❖ 6 Mats de fibra de vidrio.
- **Compuesto B:**
 - ❖ Resina Poliéster.
 - ❖ 6 Mats de fibra de vidrio.
 - ❖ 5% en peso de Bentonita.

Las placas obtenidas se dejaron 24 horas en el molde para que se alcance un grado de curado tal que permita desmoldar. Cabe aclarar que durante la inyección y por dos horas aproximadamente posterior a la misma un caloventor fue colocado sobre el molde como fuente de calor para acelerar el curado de la resina. Se realizó un postcurado de 1,5 h a 120°C.

Para determinar si la matriz poseía calor residual se realizaron ensayos de DSC. La Figura 2.2 muestra los resultados iniciales de la resina.

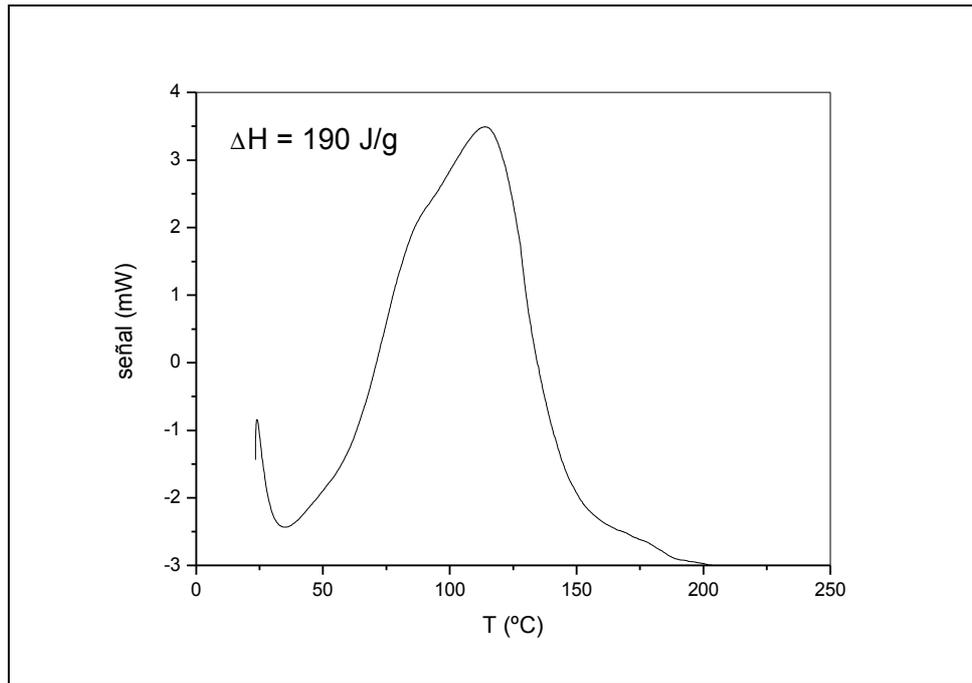


Figura 2.2 – DSC de la resina original –

En la Figura 2.3 se observan las curvas obtenidas para la matriz, se puede ver que la matriz no posee calor residual.

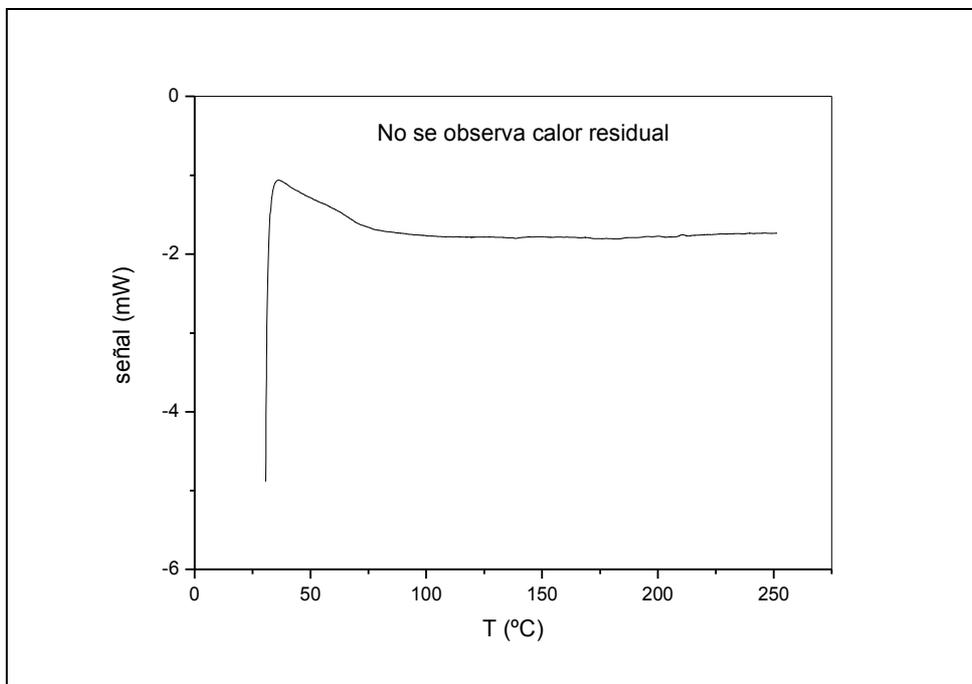


Figura 2.3 – DSC de la matriz –

Debido a que la temperatura de transición vítrea (T_g) no pudo visualizarse correctamente en el ensayo de DSC se determinó por DMA (ver Tabla 2.1).

Material	Tg [°C]
Matriz	109,90
Matriz con Bentonita	107,00
Compuesto	110,06
Compuesto con Bentonita	112,46

Tabla 2.1 – Tg de los diferentes materiales utilizados –

No existe una tendencia en las temperaturas de transición vítrea ya que la diferencia en los valores reportados se encuentra dentro del error experimental del método.º

3 PROCESAMIENTO

Las palas de los molinos eólicos inicialmente fueron obtenidas por procesamiento manual (hand layup o wet layup). A medida que aumentaron los requerimientos de los generadores las dimensiones de las aspas tuvieron que incrementarse y el procesamiento manual dejó de ser una técnica útil y barata para procesarlas, ya que se hacía muy difícil lograr una buena penetración de las fibras con la resina y se tardaba mucho tiempo. Fue necesario entonces implementar otra técnica de procesamiento. La infusión por bolsa de vacío que es la que se utiliza en la actualidad [Hartman Dave y col 2006].

En comparación con otras técnicas de procesamiento, esta no es muy compleja. El equipamiento necesario es simple y no requiere moldes caros ni máquinas costosas, pero utiliza gran cantidad de consumibles. Los parámetros críticos de esta técnica son:

- Características de la resina (viscosidad, cinética, etc.).
- Características de las fibras (permeabilidad principalmente, compresibilidad).
- Condiciones de moldeo (Principalmente el sistema de vacío).
- Características del molde (Temperatura, puntos de inyección, venteos, etc.).

En este proyecto se utilizó como material compuesto resina poliéster insaturado reforzada con mats de fibras de vidrio. Al igual que las aspas de los molinos, las placas de las que se extrajeron las probetas para el análisis del material compuesto fueron procesadas por la técnica infusión por bolsa de vacío. Además una placa de material compuesto modificado con bentonita fue obtenida por “vacuum bagging” (moldeo manual más compactación con bolsa de vacío).

3.1 Descripción de la técnica de procesamiento.

Esta técnica consiste en colocar las fibras de vidrio en el molde, previo agregado de desmoldante (Figura 3.1).

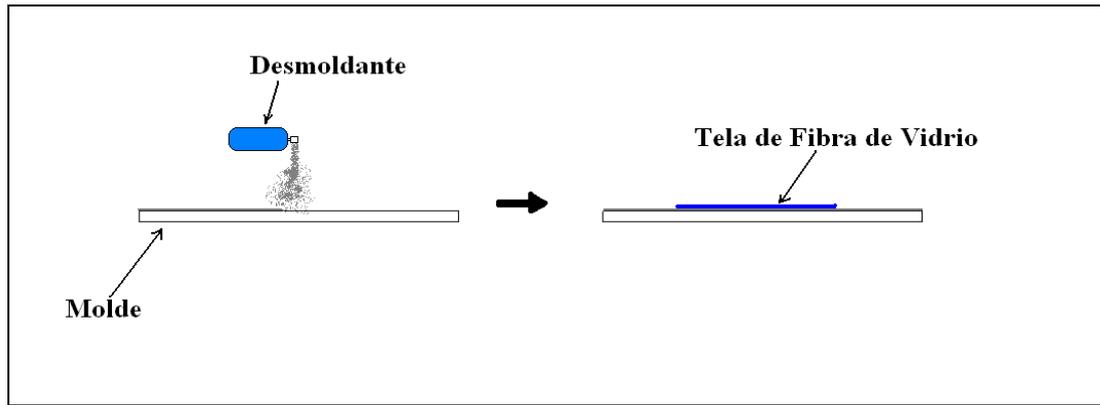


Figura 3.1 – Agregado del desmoldante y la preforma –

Cuando las fibras están en posición se fija en el molde una manguera espiralada. Esta manguera tiene la función de distribuir el vacío uniformemente en el molde (Figura 3.2).

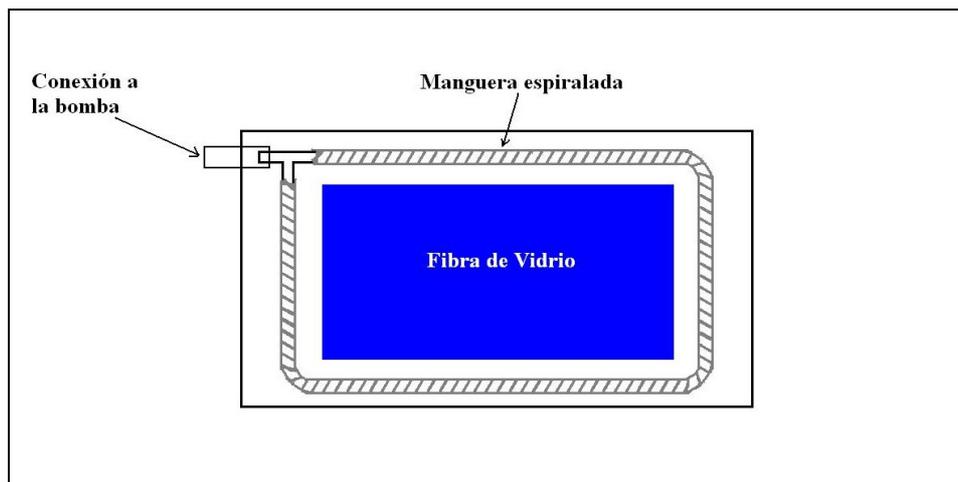


Figura 3.2 – Colocación de la manguera espiralada –

Luego se coloca una tela denominada “*peel ply*”, que tiene la utilidad de darle al compuesto obtenido la terminación superficial de una de las caras y también permite separar el resto de los consumibles (bolsa de vacío, flow media y mangueras). Posteriormente se procede a la colocación del flow media quien tiene la función de generar un frente de flujo uniforme de la resina que se va a inyectar, ya que es un medio de alta permeabilidad y el fluido avanza más fácilmente por este y luego solo debe recorrer una distancia igual al espesor para impregnar el laminado. Luego sobre el flow media se coloca la manguera de alimentación junto a la manguera en forma de omega que facilita la distribución de la resina en un frente plano (Figura 3.3).

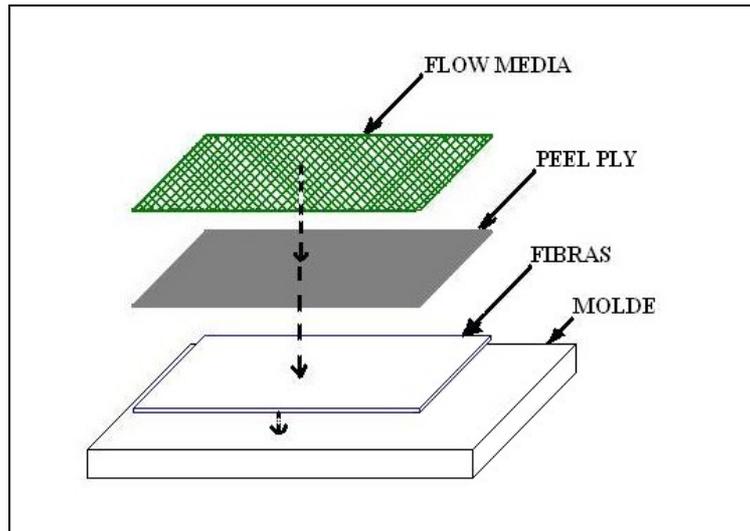


Figura 3.3 – Despiece del molde –

Por último, se coloca la bolsa que va a mantener el vacío. Es muy importante que la bolsa quede sellada completamente, ya que de no ser así se producirá el ingreso de burbujas de aire al compuesto una vez cerrado el ingreso de resina y esta será extraída al sistema de vacío.

Posterior al armado del sistema y verificado que el vacío se mantenga se procede a la preparación de la resina, para realizar la inyección de la misma. En la Figura 3.4 se puede ver un esquema del sistema armado y en la Figura 3.5 una foto.

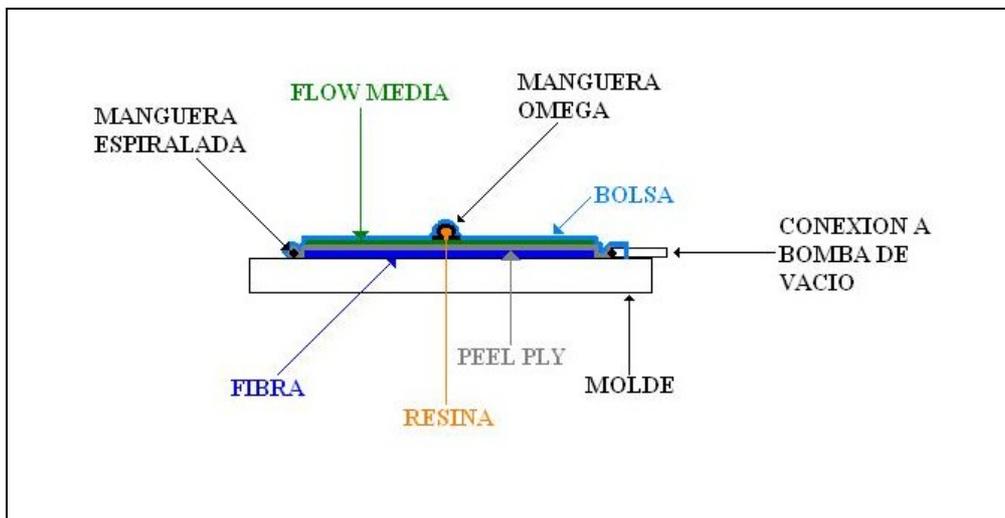


Figura 3.4 – Esquema del sistema armado –

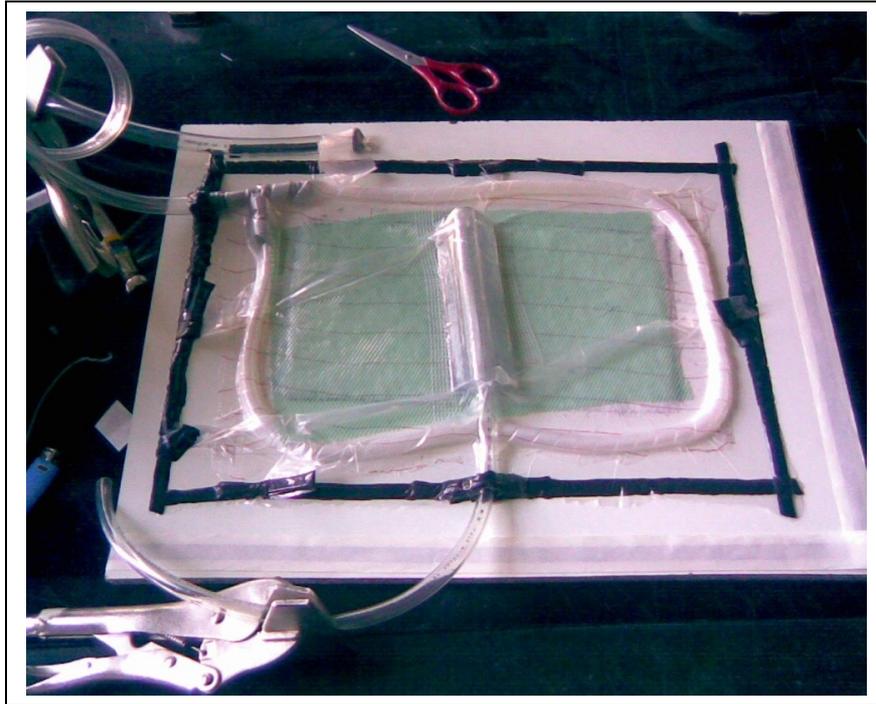


Figura 3.5 – Foto sistema armado –

Se realizó una puesta a punto del método de procesamiento con el fin de optimizar las inyecciones que se iban a realizar y obtener así placas de material compuesto sin defectos (burbujas, partes del molde sin llenar, etc.) y también evitar el desperdicio de materiales.

3.2 Formulación de la resina

Se probaron nueve formulaciones de la resina distintas (ver Tabla 3.1) a fin de obtener una formulación que permita que la resina tenga una viscosidad adecuada al momento de inyectar, es decir, que sea capaz de fluir para llenar el molde, mojar correctamente las fibras sin reaccionar y que cure lo suficientemente rápido luego de que el molde se haya llenado. Esto es importante porque cuanto más rápido cure la resina más corto será el ciclo de producción y menores los costos de procesamiento.

De las nueve formulaciones en primer lugar se eligió la formulación número 9 dado que se creía la más adecuada ya que curaba en aproximadamente 1 hora y no se sabía inicialmente cuánto tardaría en llenar el molde. Luego de la primer inyección, la cual resultó fallida porque la resina nunca geló y falló el sistema de vacío, se decidió utilizar la formulación número 8.

Formulación	Catalizador (% p/p)	Acelerador (% p/p)	DMA (% p/p)	Observaciones
1	1	0,20	----	No reaccionó en tiempo razonable
2	1	0,40	----	No reaccionó en tiempo razonable
3	1	0,40	----	Se utilizó un catalizador de otra marca para verificar si era el catalizador el que fallaba. No reaccionó en tiempo razonable
4	1,45	0,50	0,20	Geló aproximadamente en 25 minutos
5	1	0,10	0,10	Geló aproximadamente en 2 horas
6	1	0,20	0,20	Geló aproximadamente en 2 horas
7	1	0,40	0,10	Geló aproximadamente en 30 minutos
8	1,20	0,40	0,10	Geló aproximadamente en 25 minutos
9	1	0,10	0,10	Se agrega una fuente de calor. Geló aproximadamente en 1 hora

Tabla 3.1 – Distintas formulaciones –

También se verificó y comparo la viscosidad de la resina sola y la resina con 5% en peso de bentonita (ver Tabla 3.2), ya que si ésta última tenía una viscosidad muy superior a la admisible para un proceso de infusión (500 cp) habría que haber agregado estireno o disminuir el contenido de bentonita para que disminuya la misma. Dado que esto último no se verificó se utilizó la formulación número 8 para ambos compuestos.

Resina	Viscosidad [cp] ¹
Resina PE	408
Resina PE + 5% de bentonita	440

Tabla 3.2 – Viscosidad de la resina –

3.3 Inyección

Con el fin de encontrar y optimizar los parámetros críticos del método de procesamiento se utilizó el siguiente esquema de trabajo: primero se fijan los parámetros de procesamiento (formulación de resina, tamaño de los mats de fibra, utilización de fuentes de calor, etc.), luego se procede a inyectar. Si la inyección falla se efectúa un análisis de los errores y se establecen las posibles causas. Luego se proponen las mejoras y se procede a una nueva inyección. Siguiendo este procedimiento se efectuaron tres inyecciones hasta obtener una placa óptima (ver Tabla 3.3)

	1° Inyección	2° Inyección	3° Inyección
--	--------------	--------------	--------------

¹ La viscosidad fue medida a 50 rpm y 25°C

Tamaño de la placa	50 x 50 cm.	30 x 30 cm.	30 x 30 cm.
Formulación ²	Nº 9	Nº 8	Nº 8
Resultado	falló	falló	positivo

Tabla 3.3 – Características de las inyecciones realizadas –

La primera inyección fue fallida, ya que la placa que se obtuvo tenía mucha cantidad de burbujas. Dentro de las causas de falla se destacan:

- × Poca resina preparada.
- × Falla en el sistema de vacío.
- × La resina tardó mucho tiempo en curar.

Dentro de las mejoras se propuso verificar que el vacío se mantuviera por más tiempo, ya que este es uno de los parámetros críticos de la técnica (una pinchadura de la bolsa genera un ingreso de burbujas que hace que la inyección falle), utilizar mayor cantidad de resina ya que la cantidad utilizada fue insuficiente, utilizar mangueras de menor tamaño para evitar desperdiciar resina, reducir el tamaño de la placa para tener menor probabilidad de tener pinchaduras e ingreso de aire y por último utilizar una formulación que cure más rápido, ya que el molde llenaba rápido (aproximadamente 10 minutos).

La segunda inyección se realizó con las mejoras propuestas. Si bien la inyección falló se encontraron puntos favorables en la misma, uno de estos puntos es que la formulación elegida reaccionaba y curaba en un tiempo óptimo, el tamaño elegido era el adecuado al igual que la masa de resina utilizada. Entre las causas de falla se encontró que nuevamente falló el sistema de vacío, más específicamente se produjeron fallas en las uniones bolsa-manguera y en las uniones bolsa-bolsa o pliegues (ver Figura 3.6), estas uniones son críticas y necesarias para el proceso ya que la bolsa que se utiliza no debe quedar tirante por que si esto último ocurriese se correría el riesgo que la bolsa se rompa al aplicar el vacío.

² Ver Tabla 3.1

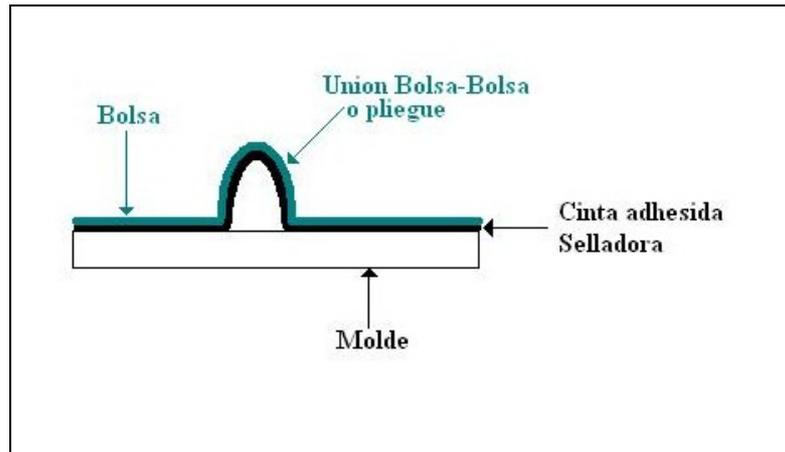


Figura 3.6 – Unión bolsa-bolsa –

Para la siguiente inyección se propuso la utilización de dos bolsas, generando también vacío entre las dos bolsas de modo de asegurarse que si hay alguna fuga en la primer bolsa la segunda la selle (ver Figura 3.7).

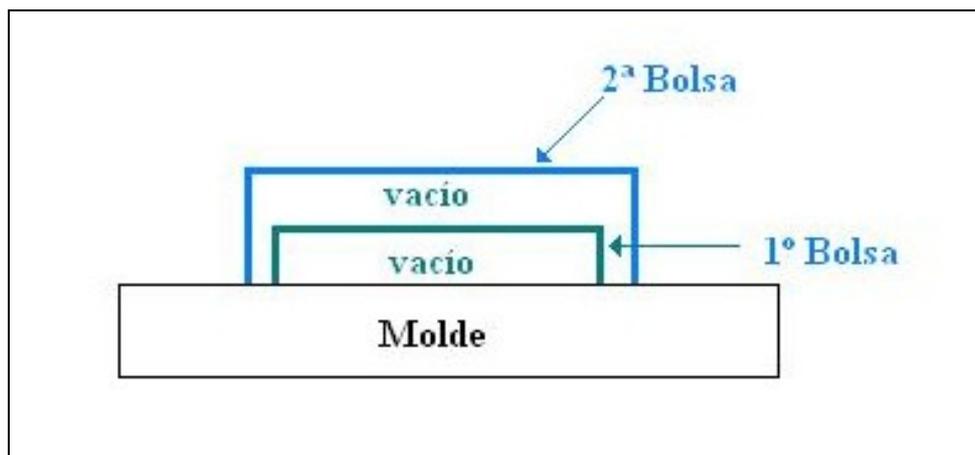


Figura 3.7 – Doble bolsa de vacío –

Con esta última modificación se efectuó la tercer inyección. El agregado de una segunda bolsa permitió que el vacío se mantenga durante el curado de la placa.

Para el procesamiento de las placas de material compuesto con bentonita se repitieron los mismos parámetros de procesamiento que se utilizaron en la inyección anterior:

- Formulación N° 8.
- Doble bolsa de vacío.
- Agregados de sistema de calefacción.

Para una buena dispersión de la bentonita en la resina (para evitar aglomeraciones) se sónico la misma durante media hora controlando que no aumente la temperatura de la resina para no afectar la viscosidad de la misma y la cinética de reacción de modo de que no se produzca “short shot” (curado prematuro de la resina antes de llenar el molde), luego se preparó con la formulación establecida y se procedió a inyectar.

3.4 Análisis de las placas obtenidas

A las placas de material compuesto resultantes se les efectuaron ensayos para determinar el contenido de fibras y contenido final de bentonita a las que fueron modificadas.

Se midieron los espesores de las placas con micrómetro en distintos puntos de la misma de modo de obtener una medición significativa. En la Tabla 3.4 se observan los resultados obtenidos.

Placa	Matriz	Matriz con Bentonita	Compuesto	Compuesto con Bentonita
Espesor [mm]	2,83 ± 0,07	2,83 ± 0,16	2,47 ± 0,09	3,71 ± 0,31

Tabla 3.4 – Espesores de las placas obtenidas –

Para determinar el porcentaje de fibras y el contenido de bentonita se calcinaron en una mufla (2 horas a 250°C y 4 horas a 565°C). En la Tabla 3.5 se observan los resultados obtenidos.

	Compuesto		Compuesto + Bentonita		
	Fibras en el borde	Fibras en el centro	Fibras en el borde	Fibras en el centro	Bentonita
% p/p	62,90	62,80	64,40	64,90	4,30

Tabla 3.5 – Porcentaje en peso de fibra y bentonita –

Analizando los valores podemos ver que el porcentaje de fibras en toda la placa, es prácticamente constante en ambos materiales.

En la placa de material compuesto modificado con bentonita, era necesario determinar si la bentonita se hallaba dispersa en toda la placa. El procedimiento utilizado para determinar la dispersión de bentonita en la placa procesada fue el siguiente: Se corta una probeta de la placa y se la divide en dos mitades, como se indica

en la Figura 3.8, y luego se analizan por DRX. La cara 1 es la cara por la que la resina es inyectada y la cara 2 es la cara contra el molde.

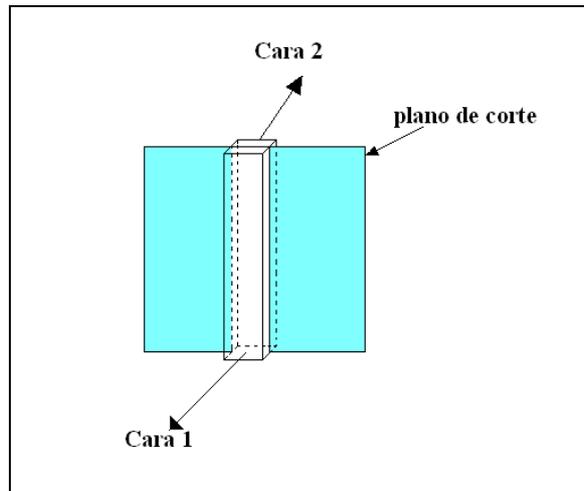


Figura 3.8 – Corte efectuado para caracterizar las caras de la placa –

En el la Figura 3.9 se puede observar los resultados obtenidos. La bentonita tiene un pico de absorción en $2\theta = 6.931$, si observamos vemos que en la curva obtenida para la cara 1 se puede observar un pico de absorción en $2\theta = 6.9$ que es atribuible a la presencia de bentonita en la matriz. En cambio en la curva obtenida para la cara 2 no se observa pico de absorción alguno.

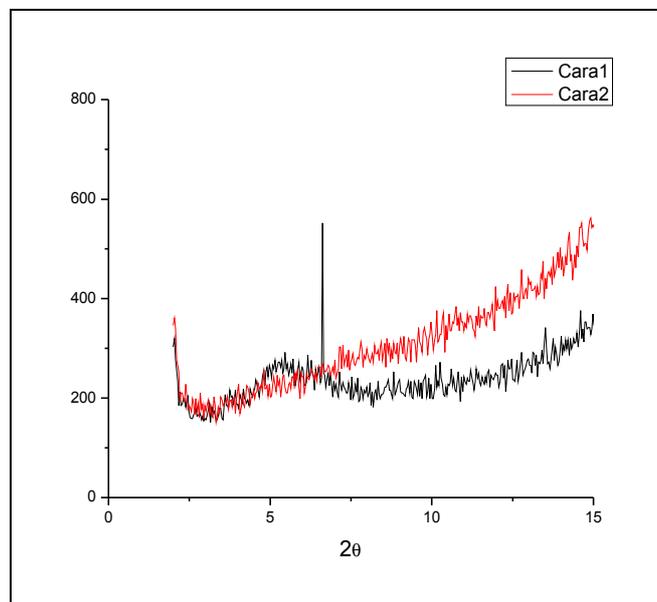


Figura 3.9 – DRX material compuesto modificado con bentonita –

Según estos resultados la resina no se halla dispersa en toda la placa, si no que solo se encuentra del lado donde se hallaba el pico de inyección. Esto puede deberse a

que el *peel ply* o las fibras hallan actuado como medio filtrante concentrando la bentonita solo en la cara por la cual se inyecta.

Para analizar las interfaces del material compuesto y el material compuesto modificado con bentonita a parte de ensayos mecánicos también se realizaron observaciones microscópicas, para esto se pulieron los perfiles de las probetas y se observaron por microscopio óptico de transmisión (el que se utiliza para metalografías) y microscopio electrónico de barrido (SEM).

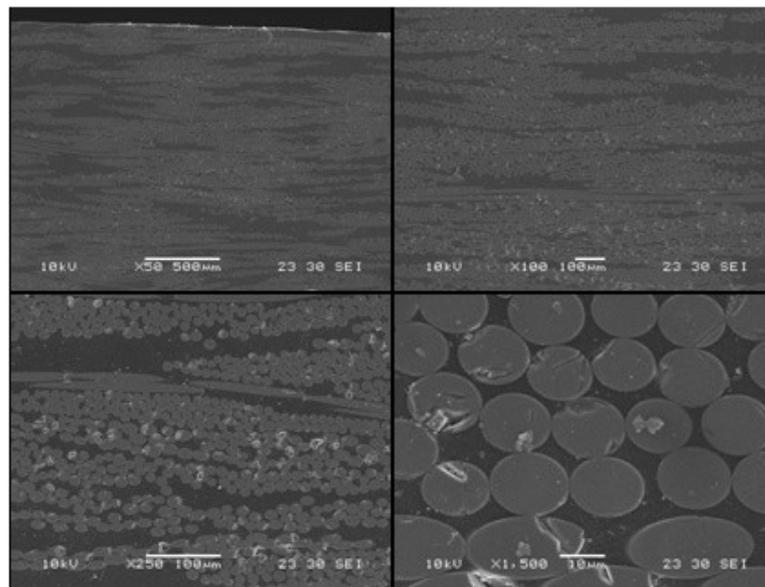


Figura 3.10 – Micrografías obtenidas por SEM del material compuesto –

En la Figura 3.10 podemos observar que las fibras se encuentran totalmente embebidas en la matriz, también puede observarse las distintas capas de fibra. Puede diagnosticarse que fue un procesamiento adecuado ya que no se observan muchos poros en las fotografías. En la Figura 3.11 podemos observar como se encuentran empaquetadas las fibras en el material compuesto. Sólo en pocas fotos de muchas tomadas en distintas zonas del material compuesto pudieron observarse poros.

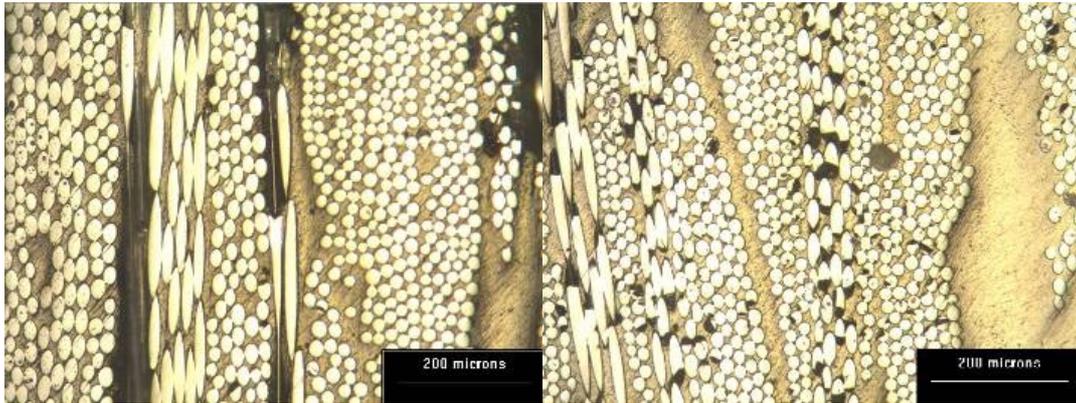


Figura 3.11 – Micrografías obtenidas por microscopía óptica del material compuesto –

4 PROPIEDADES

4.1 Absorción de agua

4.1.1 Descripción del ensayo

Se realizaron ensayos de absorción de agua siguiendo la norma ASTM D 570 en distintos ambientes. El objetivo de estos ensayos fue determinar el comportamiento y los parámetros de absorción del material compuesto (coeficiente de difusión y cantidad de agua absorbida) y compararlos con los de la matriz y el material compuesto modificado.

El ensayo consistió en colocar las probetas en agua y en ambientes con 60, 75 y 90 % de humedad relativa, los mismos se obtuvieron utilizando diferentes proporciones de agua/glicerina. La glicerina disminuye la presión de vapor del agua haciendo que esta se evapore más fácilmente, esto obedece a la Ley de Raoult que establece que para soluciones ideales “la presión de Vapor de un componente de una mezcla es proporcional a la concentración de dicho componente y a la presión de vapor del componente puro”. Entonces controlando las proporciones de la mezcla es posible saturar el ambiente con distintas humedades relativas.

- × 60 % HR = 72 % p/p glicerina.
- × 75 % HR = 53 % p/p glicerina.
- × 90 % HR = 37 % p/p glicerina.

Las probetas permanecieron 24 horas en una estufa con vacío a 60° C antes de ser colocadas en los diferentes ambientes, de modo de asegurarse que el material estuviese seco, para esto se verificó que el peso se mantuviese constante (se pesó a las 18 horas de ser colocado en la estufa y a las 24 horas verificándose el mismo peso). Luego fueron pesadas en una balanza analítica; a ciertos tiempos fueron extraídas, secadas superficialmente con papel absorbente, pesadas y luego colocadas nuevamente en sus respectivos ambientes.

En el mismo se utilizaron probetas de los distintos materiales (matriz poliéster insaturado, matriz poliéster insaturado con el agregado de bentonita, material compuesto y material compuesto con bentonita). La dimensión de las probetas era de 12,5 mm ancho, 75 mm de largo y 2,83 mm de espesor para las matrices, 2,47 mm de espesor

para el material compuesto y 3,71 mm de espesor para el material compuesto con bentonita.

Con los datos de tiempo y masa se realizaron gráficos de variación porcentual de peso (M%) en función del tiempo y se calcularon los parámetros característicos (Ver ecuaciones 4.1 y 4.2):

$$M_t (\%) = \left(\frac{W(t) - W(t=0)}{W(t=0)} \right) 100 \quad (4.1)$$

donde:

$W(t)$ es el peso de la probeta a un tiempo t y $W(t=0)$ es el peso inicial de la probeta.

El coeficiente de difusión D_{eff} puede calcularse como:

$$D_{eff} = \pi \left(\frac{h}{4 \cdot M_{max}} \right)^2 \left(\frac{dM}{d\sqrt{t}} \right)^2 \quad (4.2)$$

donde:

h es el espesor de la probeta y M_{max} es la máxima absorción para la cual se mantiene lineal $M\%$ vs $t^{1/2}$.

4.1.2 Resultados

Los resultados obtenidos para la matriz de poliéster insaturado muestran un comportamiento claramente fickiano (ver Figura 4.1).

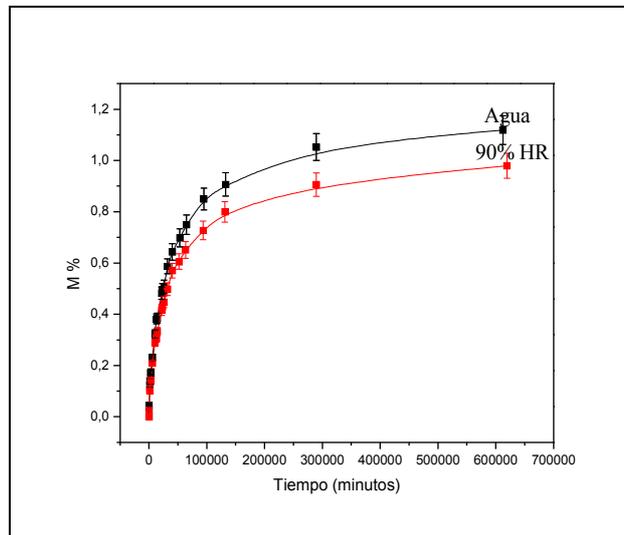


Figura 4.1 – Cantidad de agua absorbida en función del tiempo para la matriz poliéster insaturado en diferentes ambientes –

Puede verse un comportamiento lineal a tiempos cortos seguida de una pequeña porción no lineal y un achatamiento de la curva que tiende a alcanzar una absorción porcentual constante a tiempos largos (ver Figura 4.1).

De esta curva puede concluirse que no se ha alcanzado un valor de absorción completamente constante transcurridos 14 meses para la matriz; por lo que podría suponerse que el material seguiría absorbiendo mayor cantidad de agua si lo dejamos expuesto durante un período mayor de tiempo. En esta curva se observa también que la matriz en agua absorbe aproximadamente 22,5% más que en un ambiente con 90 % de humedad relativa, lo cual resulta lógico debido a que en agua tenemos mayor fuerza impulsora para la difusión del agua en el material.

En la Figura 4.2 se graficó M % vs. la raíz cuadrada del tiempo para obtener el coeficiente de difusión efectivo según la Ecuación 4.2 y la cantidad de agua absorbida luego de 14 meses de exposición. En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos.

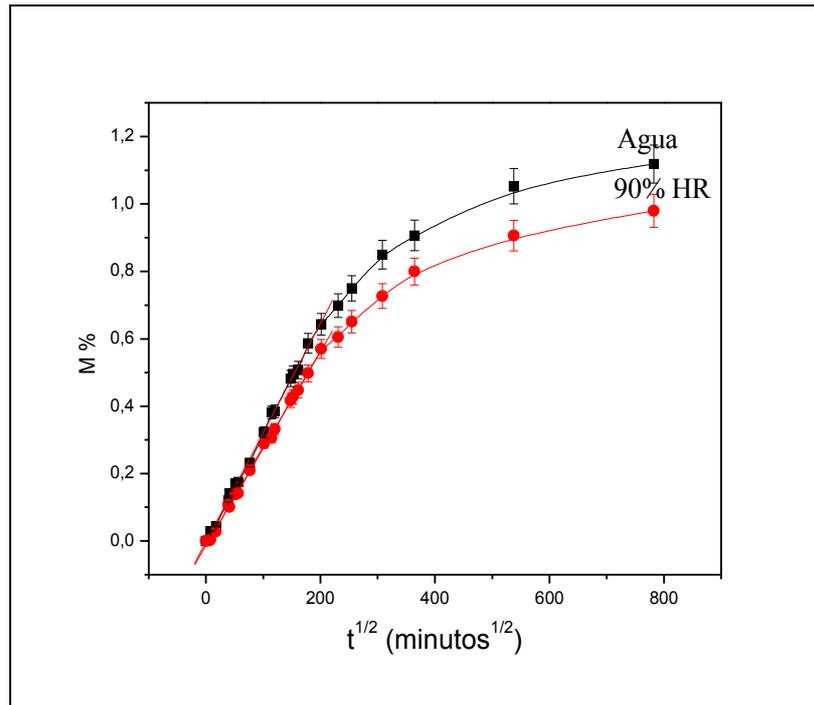


Figura 4.2 – Porcentaje de agua absorbida en función de raíz de tiempo para la matriz de resina poliéster insaturado –

Si bien ambos valores fueron mayores en agua que en 90% HR; las diferencias observadas no son significativas.

	Matriz		Matriz con Bentonita	
	M_{14} [%]	D_{eff} [$10^{-5}mm^2/min$]	M_{14} [%]	D_{eff} [$10^{-5}mm^2/min$]
Agua	1,12	$4,13 \pm 0,08$	1,3	$3,25 \pm 0,37$
90 % HR	0,98	$3,57 \pm 0,37$	1,03	$3,22 \pm 0,64$
	Material Compuesto		Material Compuesto con Bentonita	
	M_{14} [%]	D_{eff} [$10^{-5}mm^2/min$]	M_{14} [%]	D_{eff} [$10^{-5}mm^2/min$]
Agua	0,75	$10,60 \pm 3,23$	1,44	$37,69 \pm 5,65$
90 % HR	0,51	$2,02 \pm 0,64$	0,63	$4,04 \pm 0,15$
75 % HR	0,36	$1,86 \pm 0,75$	-	-
60 % HR	0,34	$2,02 \pm 0,82$	-	-

Tabla 4.1* – Cantidad de agua absorbida y coeficiente de difusión obtenidos para todos los materiales estudiados (M_{14}) –

* El subíndice 14 corresponde a 14 meses de absorción. El espesor se midió en función del tiempo y no se observaron cambios apreciables para ninguno de los materiales estudiados.

Las curvas para la matriz con un 5% en peso de Bentonita junto con las de matriz sola se muestran en la Figura 4.3.

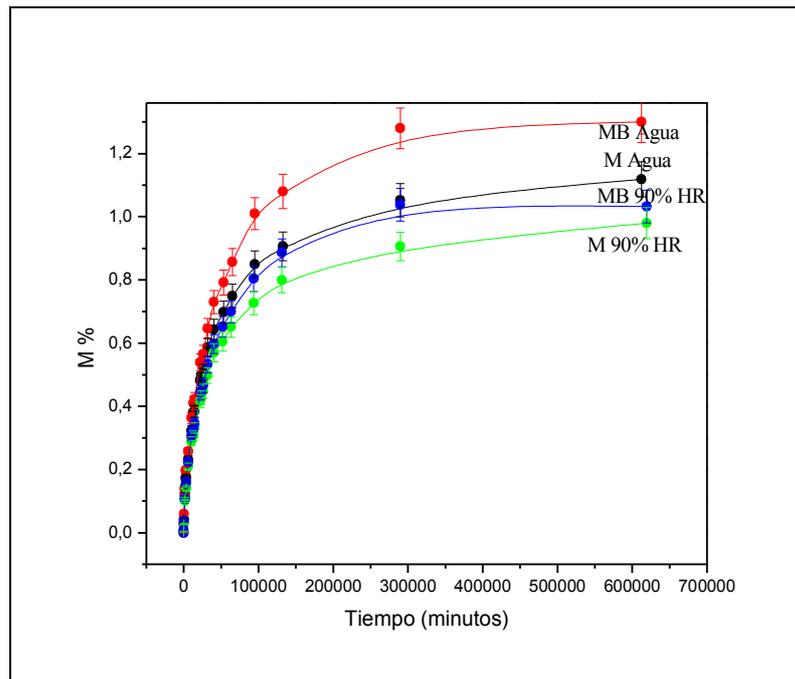


Figura 4.3 – Cantidad de agua absorbida en función del tiempo para las matrices de resina poliéster y resina poliéster modificada en diferentes ambientes. M= matriz; MB= matriz con bentonita–

Comparando ambos materiales se puede ver que con el agregado de bentonita el material se vuelve más higroscópico. Este efecto es más marcado en agua que en humedad y puede deberse a la alta hidrofiliidad de la bentonita (que, según estudios previos de este grupo absorbe un 20% de agua en un ambiente de 90% HR).

Si bien el material se vuelve más higroscópico, también se observa el comportamiento Fickiano con una región de absorción lineal a tiempos cortos y asintótico a tiempos largos. Se obtuvieron D_{eff} y M_{14} de la misma forma que la descripta para la matriz. Los resultados también se informan en la Tabla 4.1.

El material compuesto se comporta lineal a tiempos cortos y luego a tiempos largos la absorción es cada vez menor (ver Figura 4.4).

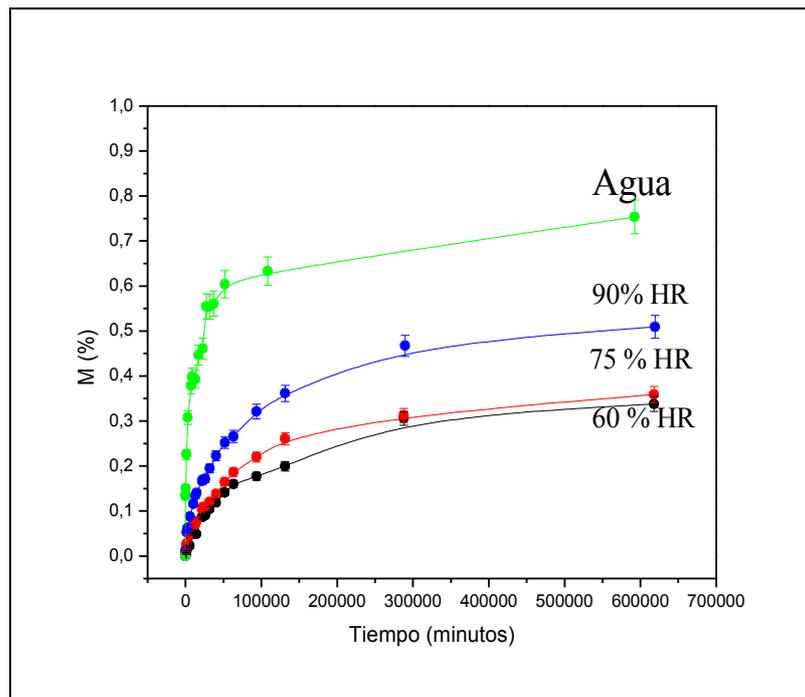


Figura 4.4 – Cantidad de agua absorbida en función del tiempo para el material compuesto en diferentes ambientes –

También puede observarse que a medida que aumenta la concentración de humedad relativa del ambiente aumenta la absorción del material. Comparando el comportamiento del material compuesto con el de la matriz podemos observar pequeñas desviaciones del primero sumergido, especialmente al finalizar la región lineal; esto puede atribuirse a que la absorción también ocurra por efectos de capilaridad a través de las fibras. Por otra parte las formas de las curvas de los materiales compuestos expuestos a ambientes húmedos son similares a las de la matriz. Otra diferencia notable es el cambio en la cantidad de agua absorbida entre el material compuesto en agua y 90% HR que es mayor que en el caso de las matrices.

El material compuesto absorbe menor cantidad de agua que la matriz; esto se debe a que las fibras actúan como elementos inertes en el proceso de absorción. Los coeficientes de difusión y M_{14} se informan en la Tabla 4.1. Se puede ver que la cantidad de agua absorbida aumenta con la humedad relativa del medio.

Se graficó M_{14} en función de $HR\%$ del medio (Figura 4.5) para verificar si existía algún tipo de correlación entre ambos parámetros. Se encontró que se cumple una relación exponencial entre ambos.

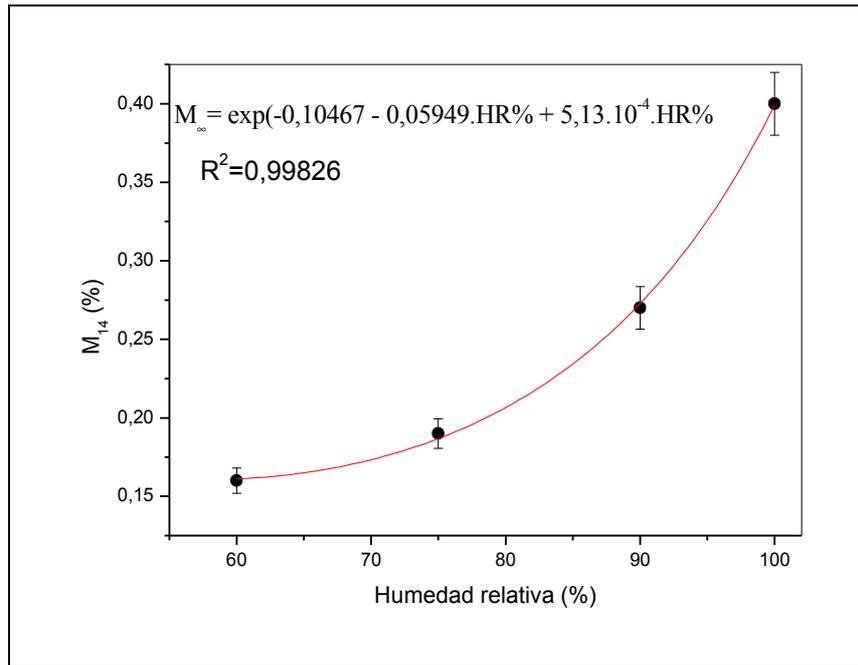


Figura 4.5 – M_{14} en función de la humedad relativa del ambiente –

Por otra parte, el coeficiente de difusión efectivo es notablemente mayor en agua mientras que permanece aproximadamente constante para las diferentes humedades relativas.

Los resultados para el material compuesto modificado con bentonita en comparación con el material compuesto se muestran en las Figura 4.6.

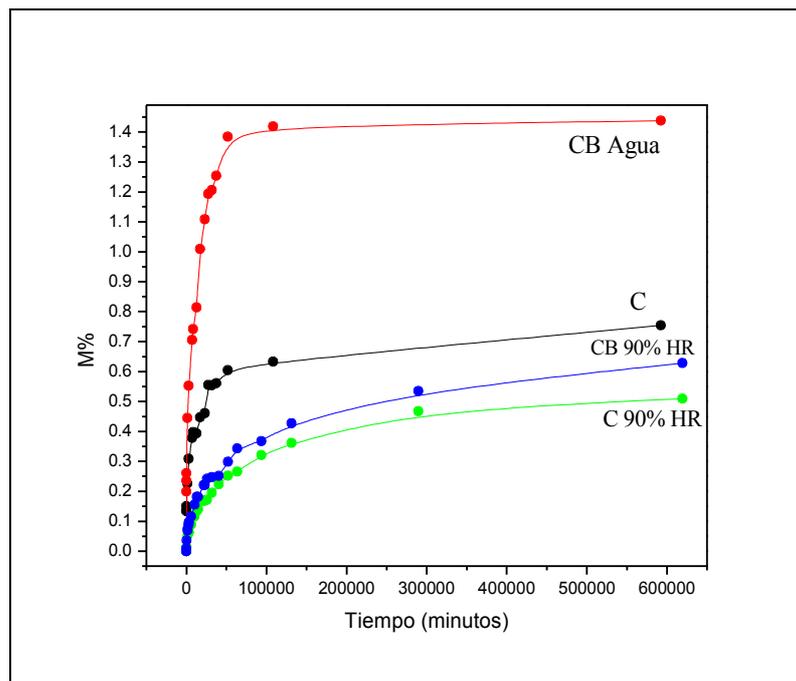


Figura 4.6 – Cantidad de agua absorbida en función del tiempo para el material compuesto y el material compuesto con bentonita. C = compuesto; B = bentonita

En las curvas de la Figura 4.6 puede observarse que el material modificado absorbe más agua que el material sin modificar. La bentonita no parece tener ningún efecto positivo sobre la absorción de estos materiales; en el caso de las probetas sumergidas el agregado de bentonita empeora notablemente las características de absorción.

En las Figura 4.7 y 4.8 podemos observar las curvas de absorción solapadas de todos los materiales utilizados (sumergidas en agua y en 90% HR respectivamente). Podemos observar que los materiales compuestos absorben menor cantidad de agua que las matrices cuando están sumergidos en agua, excepto el material compuesto con bentonita que absorbe más cantidad de agua que todos. En el caso de 90% HR (Figura 4.8); el comportamiento es más coherente ya que el agregado de bentonita hace que ambos materiales (compuestos y matrices) absorban más en la misma proporción.

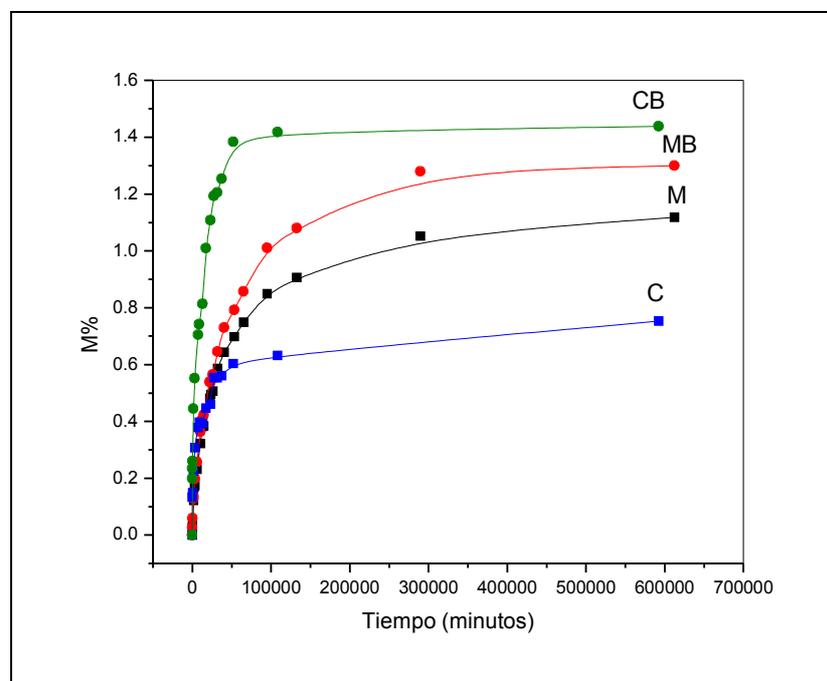


Figura 4.7 – Cantidad de agua absorbida en función del tiempo para los distintos materiales en agua –

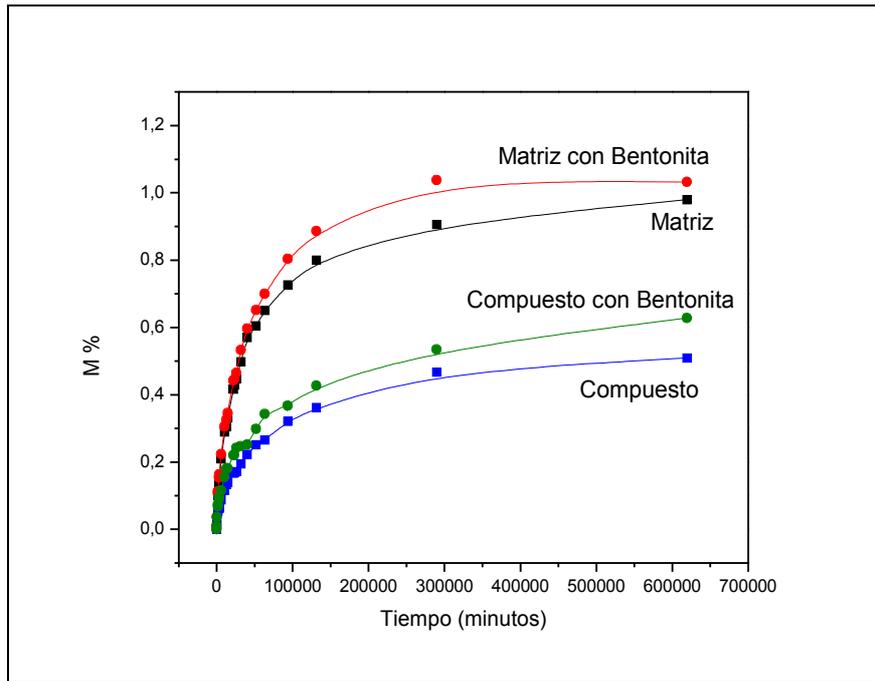


Figura 4.8 – Cantidad de agua absorbida en función del tiempo para los distintos materiales en 90% HR –

Para acelerar los ensayos; se colocaron muestras en agua a 80°C verificando (por microscopía electrónica) que no existiera degradación del material a dicha temperatura para los tiempos de exposición analizados; los resultados de absorción para el material compuesto se muestran en la Figura 4.9.

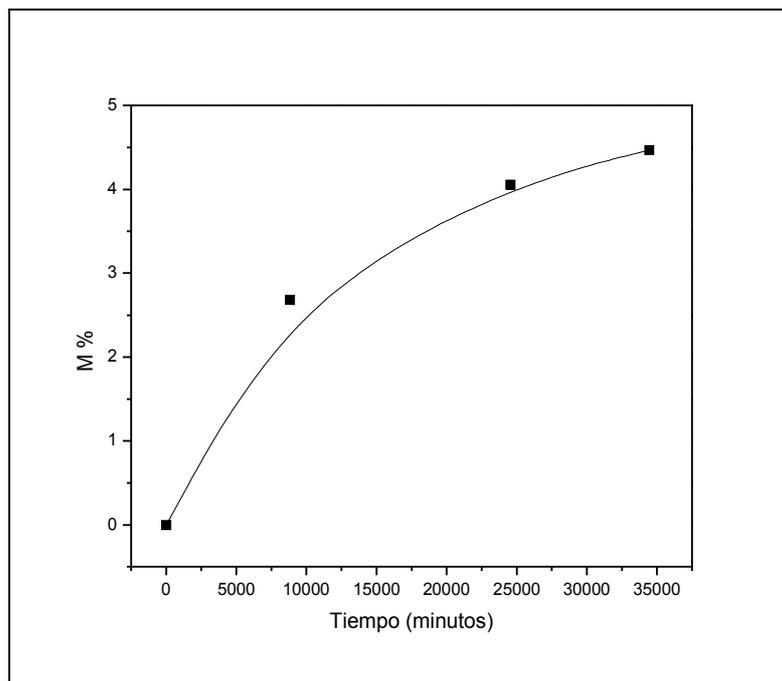


Figura 4.9 – Absorción de agua a 80° en el material compuesto –

Al aumentar la temperatura de ensayo aumenta el coeficiente de difusión y la cantidad de agua absorbida a un tiempo dado, **Alvárez y col (2007a)** en distintos trabajos demostraron que el coeficiente de difusión de humedad en resinas y materiales compuestos posee un comportamiento tipo Arrhenius con la temperatura. Por otra parte, el material posee un mayor M_{14} a 80° C.

Al absorber más cantidad de agua para el mismo tiempo de ensayo nos permite simular situaciones de mayor tiempo de exposición a temperatura ambiente; siempre teniendo en cuenta que los mecanismos de absorción sean los mismos y que no ocurra degradación del material debida a la temperatura.

4.2 Propiedades Mecánicas

4.2.1 Ensayo de Flexión en tres puntos (3PB)

4.2.1.1 Descripción del ensayo

El ensayo de flexión en tres puntos se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 790-03. El objetivo de este ensayo fue obtener información sobre las propiedades a la flexión del material (módulo y resistencia) y verificar si existían cambios en las mismas en función de la cantidad de agua absorbida. Para esto se realizaron ensayos previos y posteriores a colocar las probetas en los distintos ambientes (inmersión en agua y 90 % de humedad relativa).

En un estado tensional de flexión, un lado de la probeta esta sometido a esfuerzos de tracción (lado de los apoyos) mientras que el otro esta sometido a esfuerzos de compresión (lado de carga), hay una fibra que no está sometida a ningún esfuerzo, la misma se denomina fibra neutra. Si el material posee igual módulo de tracción y compresión, la fibra neutra es la fibra central. A medida que nos alejamos de la fibra neutra la tensión aumenta, las fibras exteriores son las que están sometidas a mayores esfuerzos.

En este ensayo una probeta de sección rectangular es sometida a flexión en tres puntos (ver Figura 4.11). Las probetas utilizadas para nuestro caso tenían las dimensiones de las utilizadas para los ensayos de absorción. El L/d (distancia entre apoyos/espesor) utilizado fue $L/d=16$.

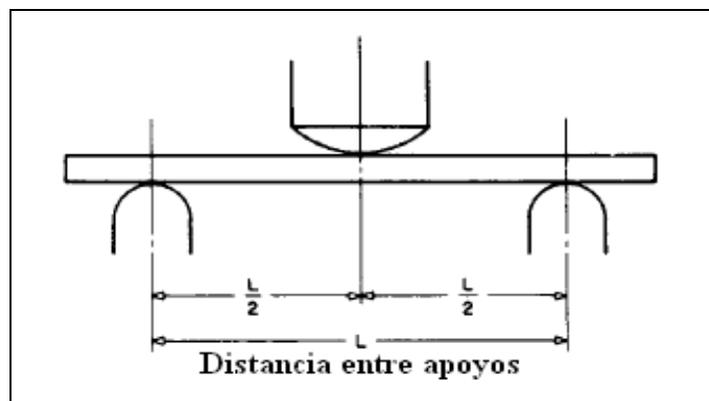


Figura 4.11 - Esquema del ensayo de flexión en 3 puntos -

En este ensayo se registra una curva carga en función de desplazamiento.

A partir de las curvas obtenidas en este ensayo se pueden calcular tanto la resistencia como el módulo en flexión. La resistencia a la flexión se calcula como:

$$\sigma_{uf} = \frac{3.L.P_{max}}{2.b.d^2} \quad (4.3)$$

donde:

P_{max} es la carga máxima; b es el ancho de la probeta; d es el espesor y L es la distancia entre los apoyos.

El módulo a la flexión se calcula utilizando la pendiente de la curva carga en función de desplazamiento (m):

$$E = \frac{m.L^3}{4.b.d^3} \quad (4.4)$$

El ensayo se realizó en una máquina universal de ensayos Instron 4467 a temperatura ambiente. La velocidad de ensayo se calculó de acuerdo con la norma ASTM D 790-03.

4.2.1.2 Resultados

Módulo de Young

En la Figura 4.12 se pueden observar la linealidad de las curvas carga – desplazamiento (P vs d) en flexión de los distintos materiales a tiempo 0. Los valores de módulo inicial se informan en la Tabla 4.2.

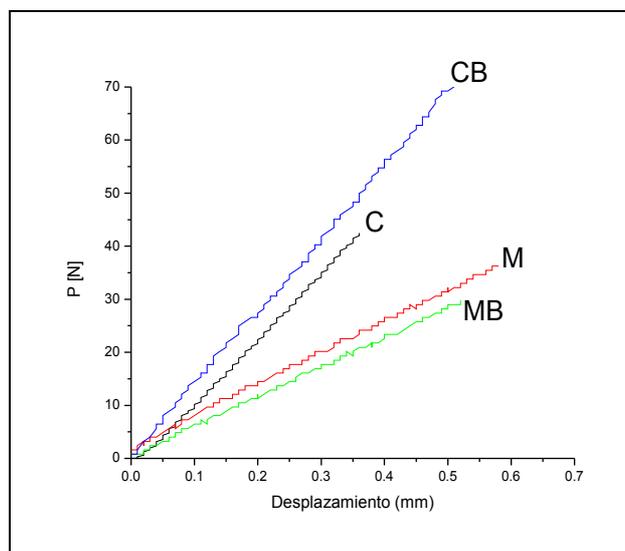


Figura 4.12 – Curvas carga vs. desplazamiento para todos los materiales antes de su exposición ($t = 0$) –

Material	E [GPa]
Matriz	4,05±0,55
Matriz + Bentonita	4,11±0,55
Compuesto	12,9±1,55
Compuesto + Bentonita	10,05±1,37

Tabla 4.2 – Módulo en flexión Inicial –

Los resultados de la Tabla 4.2 muestran que el módulo de la matriz no se modifica por el agregado de un 5% en peso de bentonita. Esto puede deberse a que el grado de dispersión de la arcilla dentro de la matriz de PI no fue bueno (ver Figura 4.13). Para determinar la dispersión de la bentonita en la matriz de poliéster insaturado se analizó una muestra por microscopía TEM (Figura 4.13).

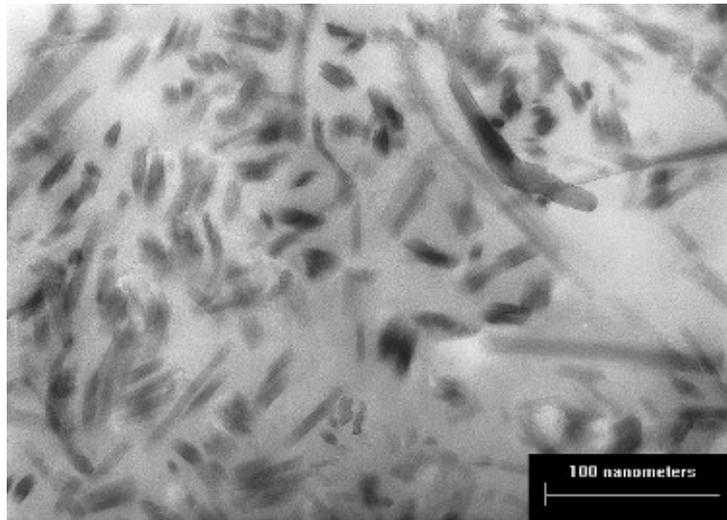


Figura 4.13 – Dispersión de la Bentonita en la resina poliéster (imagen obtenida por TEM) –

En la Figura 4.13 podemos observar como la bentonita se encuentra en forma de aglomeraciones y no completamente dispersa en la matriz.

Por otra parte, el módulo se triplica por el agregado de fibra de vidrio; este resultado era el esperado debido a la alta rigidez de las fibras de vidrio en comparación con la matriz.

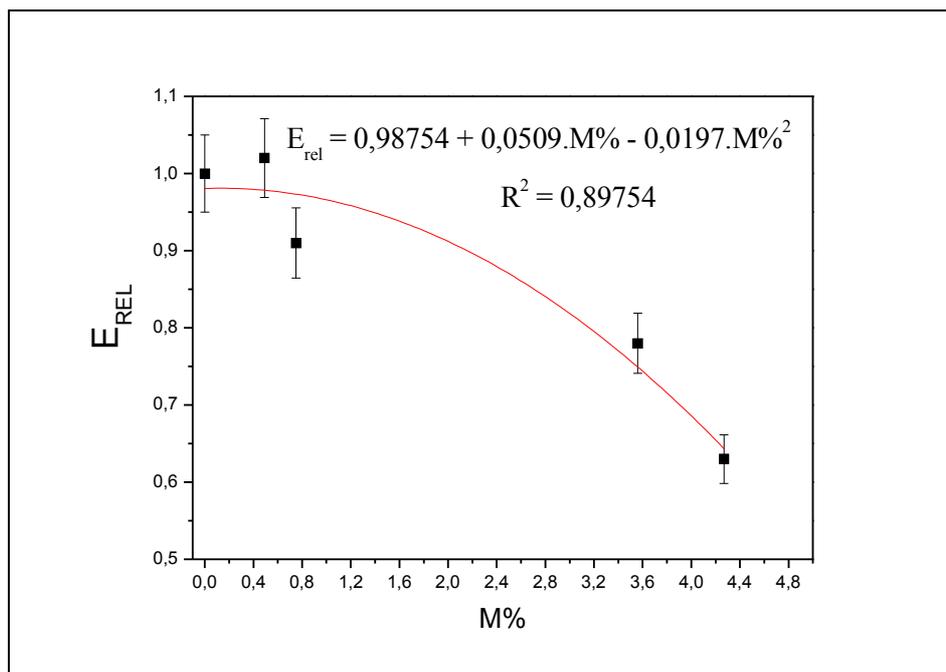
Los resultados de las probetas sumergidas en agua para determinar la evolución del módulo en flexión con la cantidad de agua absorbida se informan en la Tabla 4.3.

Matriz		Matriz + Bentonita		Compuesto		Compuesto + Bentonita	
M%	Erel	M%	Erel	M%	Erel	M%	Erel
0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
0,12	0,99	0,13	0,97	0,13	1,06	0,16	1,10
0,28	0,94	0,27	0,95	0,26	1,10	0,30	1,11
0,39	0,95	0,46	1,05	0,35	1,08	0,40	1,11
0,57	0,95	0,73	1,03	0,49	1,02	0,63	1,08
1,11	1,06	1,30	0,89	0,75	0,91	0,91	1,11
----	----	----	----	3,56	0,78	----	----
----	----	----	----	4,27	0,63	----	----

Tabla 4.3* – Evolución del módulo en flexión con la absorción –

$$*E_{rel} = E(M\% \neq 0) / E(M\% = 0)$$

De estos resultados se puede concluir que el módulo no es afectado por la absorción a los tiempos en los que estuvieron sumergidas las probetas (1 año y 2 meses para los máximos resultados de absorción), aunque existe una variación porcentual (aproximadamente $\pm 10\%$) que incluso en algunos casos sugiere que el módulo aumenta, esto puede atribuirse a errores experimentales de medición (colocación de la probeta en la INSTRON, ajuste lineal de los puntos experimentales, errores de medición del espesor, etc.). Sin embargo, en el caso del material compuesto puede verse una disminución del módulo para mayores valores de cantidad de agua absorbida pudiéndose establecer una correlación entre ambos parámetros (ver Figura 4.14).



4.14 – Módulo en flexión relativo en función de la absorción para el material compuesto –

Resistencia

La Figura 4.15 muestra el diagrama carga – desplazamiento obtenido para una probeta de material compuesto y para una de matriz.

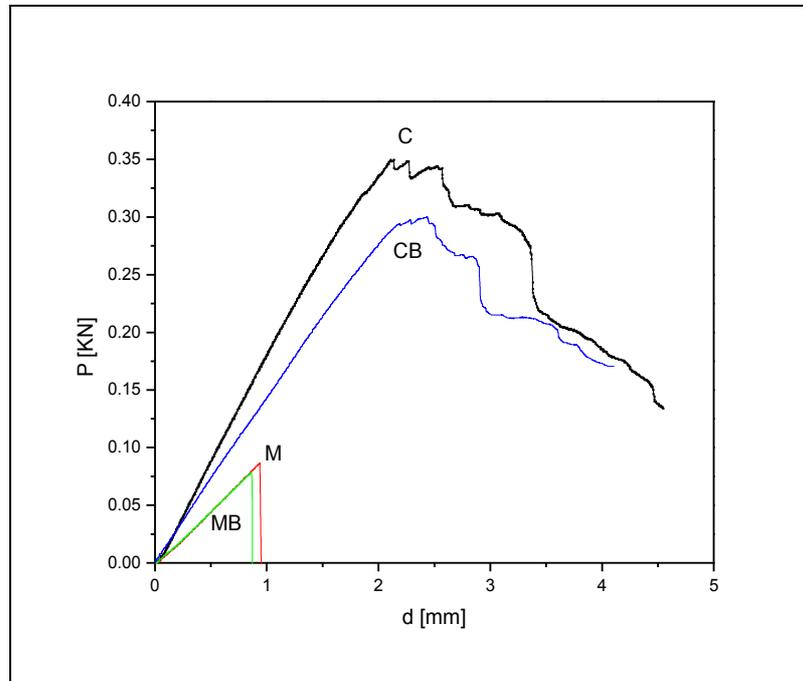


Figura 4.15 – Carga en función de desplazamiento (3PB) para los distintos materiales –

En el gráfico se puede ver claramente el típico comportamiento a la rotura de un material compuesto. El material va tomando carga hasta que se produce la falla, luego se observa como van rompiendo las capas de fibra ya que si bien cae la carga esta no cae a cero abruptamente como en el caso de la matriz. El refuerzo no sólo aumenta la resistencia si no que hace que el material sea más tenaz. La resistencia en el material compuesto con bentonita disminuye, esto puede atribuirse a la mala distribución de la arcilla en la matriz. En la Tabla 4.4 se informa la resistencia inicial del material compuesto y el material compuesto con bentonita.

Material	σ^0 [MPa]
Compuesto	$379,68 \pm 1,09$
Compuesto con Bentonita	$316,99 \pm 1,09$

Tabla 4.4 – Resistencia inicial del material compuesto y el material compuesto con bentonita –

En la Figura 4.16 se grafica la resistencia del material compuesto en función de la cantidad de agua absorbida. Se puede observar como la misma cae a medida que el material absorbe agua. El efecto del agua sobre el material compuesto hace que se degrade la interfaz fibra – matriz produciendo la caída de la resistencia del material.

Se ajustaron los datos experimentales y se encontró una relación exponencial decreciente de la resistencia del material compuesto con la absorción de agua.

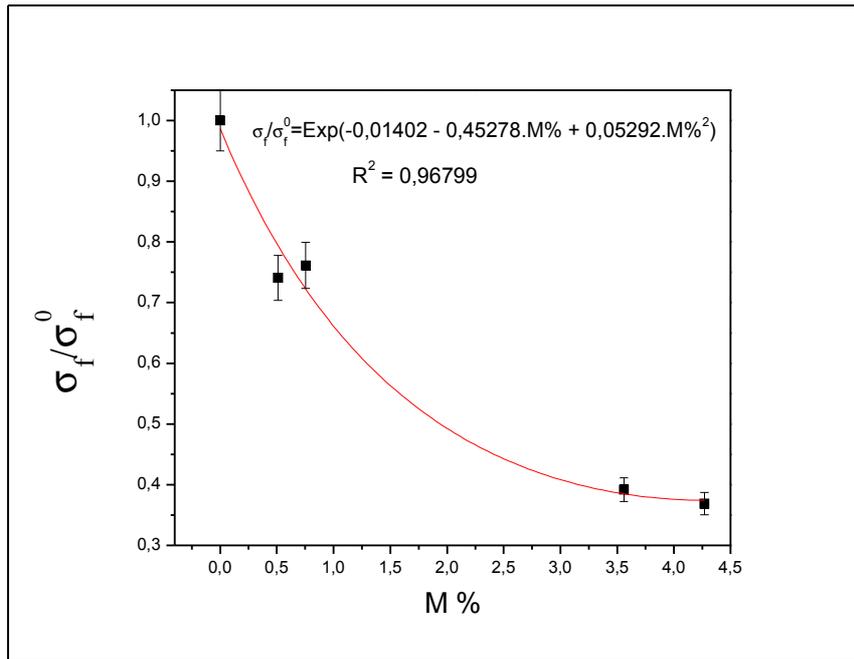


Figura 4.16 – Resistencia relativa en función de M% para el material compuesto –

Se efectuó el mismo análisis para el material compuesto con bentonita y se encontró también una relación exponencial decreciente de la resistencia en función del agua absorbida (Figura 4.17).

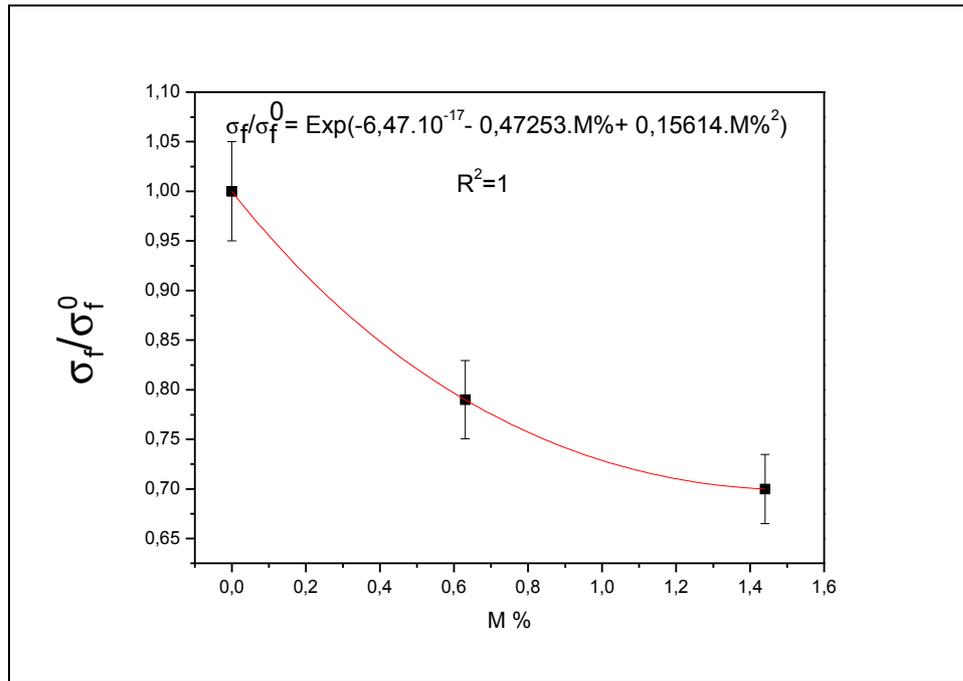


Figura 4.17 – Resistencia relativa en función de M% para el material compuesto con bentonita –

4.2.2 Short Beam Test

4.2.2.1 Descripción del ensayo

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM D 2344 00. Este ensayo sirve para medir la resistencia al corte interlaminar.

La resistencia al corte interlaminar se refiere a la resistencia al corte paralela al plano de laminación. Para poder medir este valor se efectúa un ensayo de flexión en tres puntos pero con un bajo valor de L/d. Para explicar el ensayo consideremos las siguientes ecuaciones:

Máxima tensión normal en flexión:

$$\sigma_{xx} = \left(\frac{3.P}{2.b.h^2} \right) \left(\frac{L}{d} \right) \quad (4.5)$$

Máxima tensión de corte:

$$\tau_{xz} = \frac{3.P}{4.b.h}$$

(4.6)

De la ecuación (4.5) puede verse que a medida que disminuye L/d disminuye su valor la máxima tensión normal (σ_{xx}), mientras que la máxima tensión de corte (τ_{xz}) no se ve afectada. Así para valores lo suficientemente pequeños de L/d la máxima tensión de corte alcanza la resistencia al corte interlaminar del material compuesto. Entonces el material compuesto fallará por corte interlaminar.

El ensayo se realizó en una máquina universal de ensayos Instron 4467 a temperatura ambiente y a una velocidad de 1.3 mm/min.

4.2.2.2 Resultados

En la Figura 4.18 se muestran las curvas de carga en función del desplazamiento obtenidas para el material compuesto a diferentes cantidades de agua absorbida.

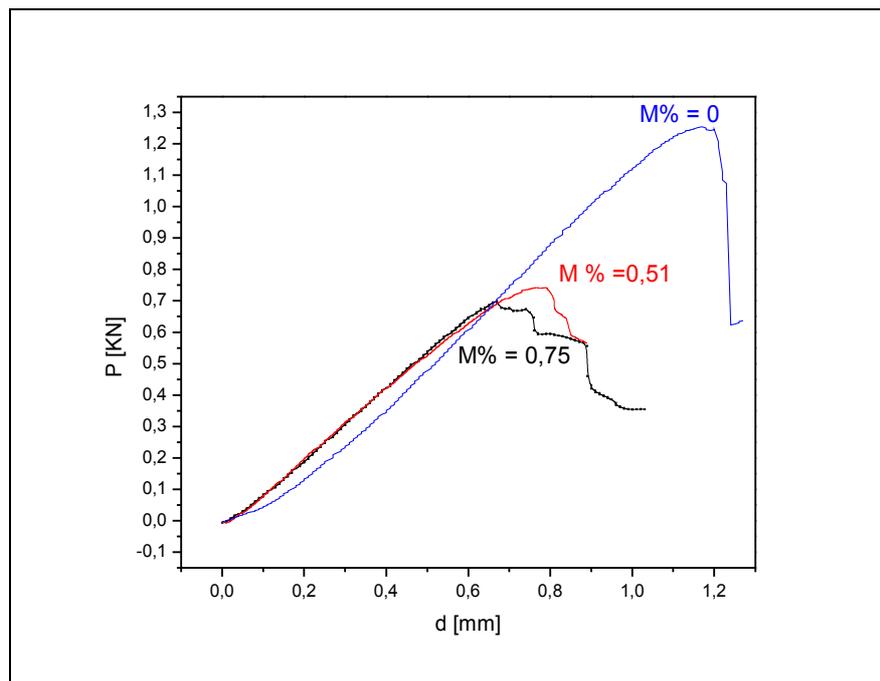


Figura 4.18 – Curvas de *Short Beam Test* (carga vs. desplazamiento) para el material compuesto a distintas cantidades de agua absorbida –

La resistencia interlaminar del material compuesto se determinó para el material compuesto inicial (con 0% de absorción) y luego de absorber agua (a las probetas que estuvieron 1 año y 2 meses en agua y 90 % de humedad relativa). Los resultados se informan en la Figura 4.19. De esta se puede concluir que independientemente de la humedad relativa del medio en el que se encuentren las probetas, la caída de τ sigue una relación lineal con la absorción de agua. Con estos resultados puede corroborarse que la interfaz fibra – matriz se deteriora a medida que aumenta la absorción del agua. La resistencia al corte inicial del material es de $21,76 \pm 3,11$ MPa.

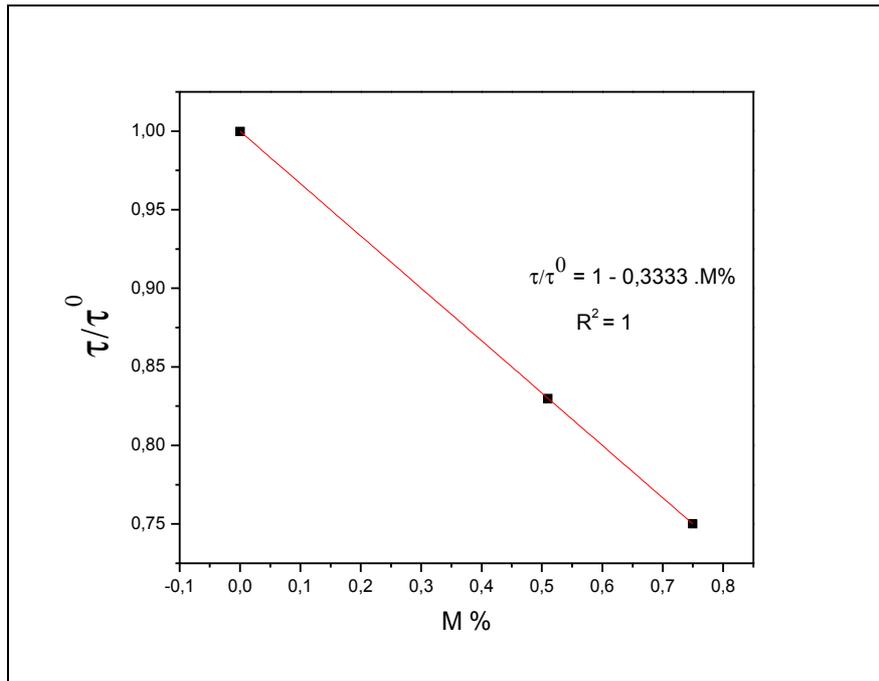


Figura 4.19 – Resistencia al corte laminar del material compuesto al transcurrir 1 año y 2 meses –

En la Figura 4.20, puede verse claramente las interfaces fibra – matriz. En la Figura 4.20A se puede visualizar la interfaz del material a tiempo cero (sin haber absorbido agua) pueden verse las fibras completamente adheridas a la matriz. En la Figura 4.20B se ve como la interfaz se deterioró y ya no se observa una completa adhesión a las fibras sino que se ve como se va despegando luego de que el material absorbió agua.

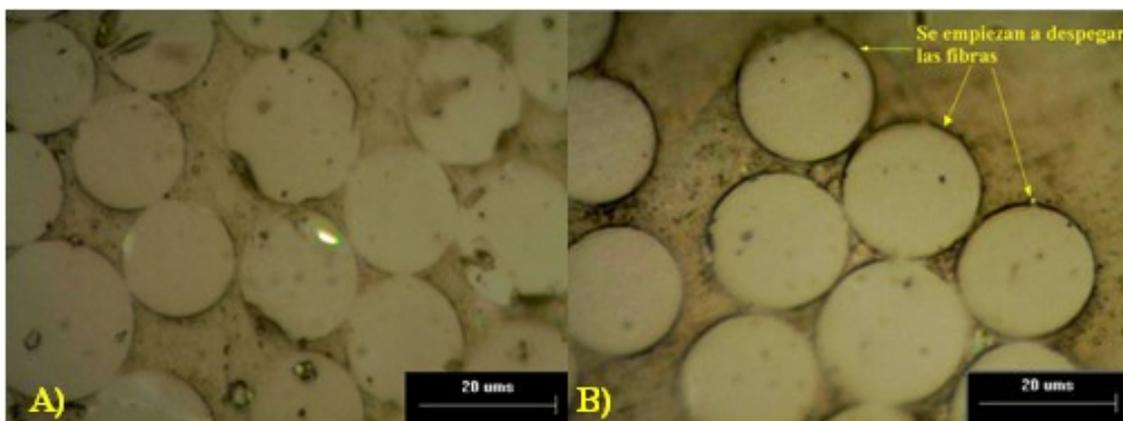


Figura 4.20– A) Material compuesto sin haber absorbido agua B) Material compuesto con M% = 0.75 –

4.2.3 Análisis Dinámico-Mecánico (DMA)

4.2.3.1 Descripción del ensayo

La técnica dinamomecánica o DMA permite estudiar la estructura y las propiedades mecánicas de los sólidos y líquidos viscoelásticos a través de su módulo dinámico y de amortiguamiento. También se puede utilizar para dar información sobre la temperatura de transición vítrea, T_g , la cristalinidad y el entrecruzamiento de polímeros.

En ensayos dinamomecánicos se aplica a la muestra una tensión oscilatoria casi siempre sinusoidal. Si un cuerpo viscoelástico es sometido a una tensión que varíe sinusoidalmente, la deformación que se produce también oscilará de forma sinusoidal. La deformación estará desplazada un ángulo $\delta < 90^\circ$.

De manera que a la hora de realizar un experimento dinamomecánico, si el polímero es sometido a una excitación periódica, de amplitud σ^0 y frecuencia angular ω , que produce una deformación periódica ε , de amplitud ε^0 , existiendo entre ellos un desfase δ , utilizando notación compleja, puede escribirse:

$$\varepsilon^* = \varepsilon^0 e^{(i.\omega.t)} \quad (4.7)$$

$$\sigma^* = \sigma^0 e^{(i.\omega.t)} \quad (4.8)$$

Si aplicamos la teoría lineal de la viscoelasticidad, encontramos que la relación tensión/deformación es una magnitud compleja que posee dos componentes, una en fase y la otra desfasada en 90:

$$\frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = E^* = E' + i.E'' \quad (4.9)$$

donde E^* es el módulo dinámico en notación compleja, E' es la componente de la razón entre la tensión y la deformación aplicada en fase, E'' es la componente desfasada 90°

de dicha razón. Ambas llevan asociadas significados físicos específicos ya que E' se relaciona con la energía mecánica almacenada por ciclo en la muestra, cuando es sometida a una deformación y por eso se le llama módulo de almacenamiento; es la respuesta elástica y corresponde a la energía totalmente recuperable. La otra componente, E'' , es la respuesta viscosa y recibe el nombre de módulo de pérdida y está relacionada con la energía disipada por ciclo en forma de calor cuando se deforma la muestra.

El amortiguamiento es el parámetro que evalúa la razón del módulo disipación al módulo de almacenamiento por ciclo en el material, y se define como la tangente del ángulo de desfase o factor de pérdidas, $\tan \delta$:

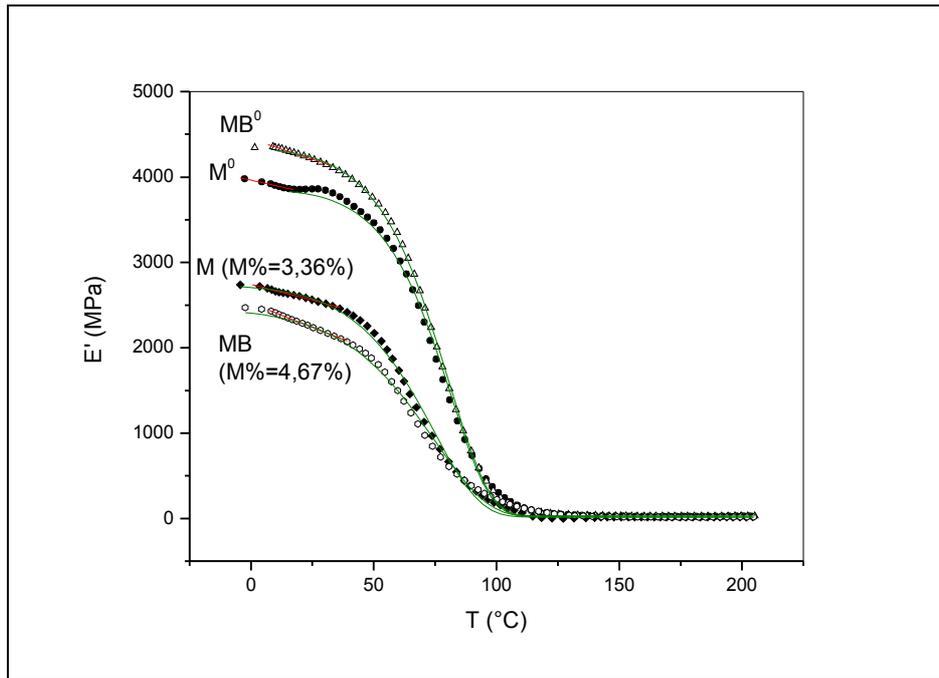
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (4.10)$$

El pico de amortiguamiento se asocia con la pérdida parcial de la estructura polimérica.

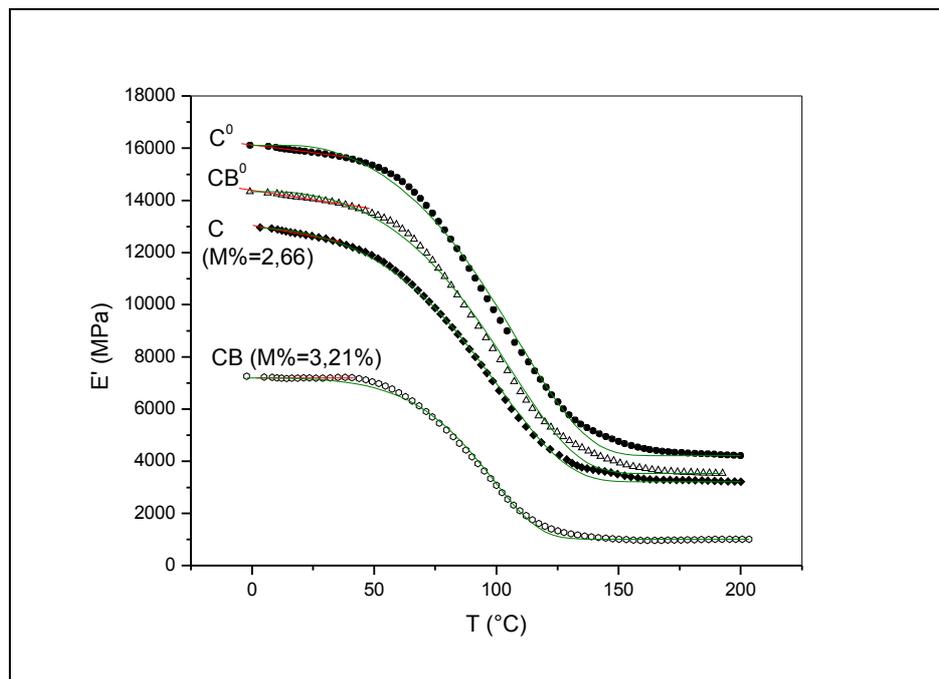
Los ensayos dinámico-mecánicos se realizaron en un **DMA STDA 861** a una frecuencia de 1 Hz, desde temperatura ambiente hasta 250°C a una velocidad de 10°C/min en atmósfera de nitrógeno. Las dimensiones de las probetas fueron las mismas que las utilizadas para 3PB.

4.2.3.2 Resultados

La Figura 4.21 y 4.22 muestra las curvas de DMA de los materiales antes y luego de su exposición en agua. **La forma de las curvas es típica con un plateau vítreo, una notable caída asociada a la Tg del material y finalmente un plateau gomoso. Tanto el módulo de la matriz como el del material compuesto son menores en toda la curva debido al agregado de bentonita, lo que es coherente con el resto de las propiedades analizadas anteriormente. Por otro lado, el agua afecta notablemente a todos los materiales pero muy marcadamente al compuesto con bentonita.**



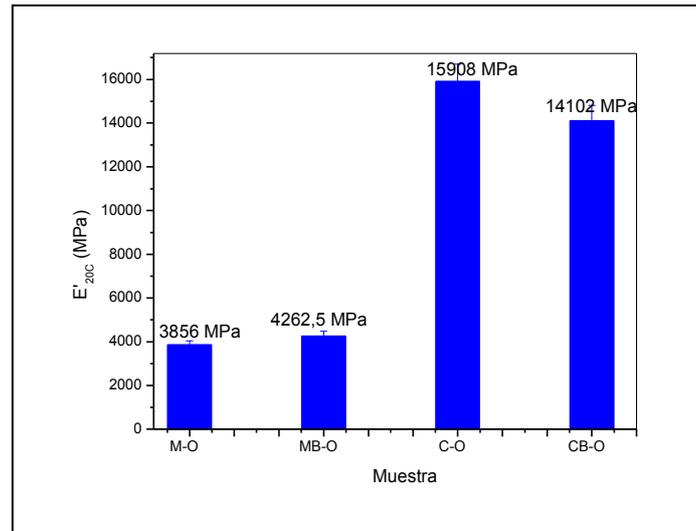
4.21 – Curvas de módulo de almacenamiento en función de la temperatura para las matrices antes y después de su inmersión en agua –



4.22 – Curvas de módulo de almacenamiento en función de la temperatura para los materiales compuestos antes y después de su inmersión en agua –

Es interesante destacar que, mientras los ensayos de 3PB sólo nos dan información del módulo a la temperatura utilizada; los de DMA nos brindan información en un amplio rango de temperaturas. Esto es de suma utilidad ya que los generadores podrían colocarse en lugares con diferentes temperaturas.

Los valores iniciales de E' a 20°C se informan en la Figura 4.23. Los valores se tomaron a 20°C por que es la temperatura de uso más común.



4.23 – Valores iniciales de E' a 20°C –

En la Figura 4.24 se puede observar el efecto del agua sobre E' a 20°C . El efecto del agua es mucho más notorio en los materiales que fueron modificados con bentonita, esto podría deberse a la mala dispersión de esta dentro de la resina. El valor de E'_{rel} se calculó con respecto a los materiales sin haber absorbido agua.

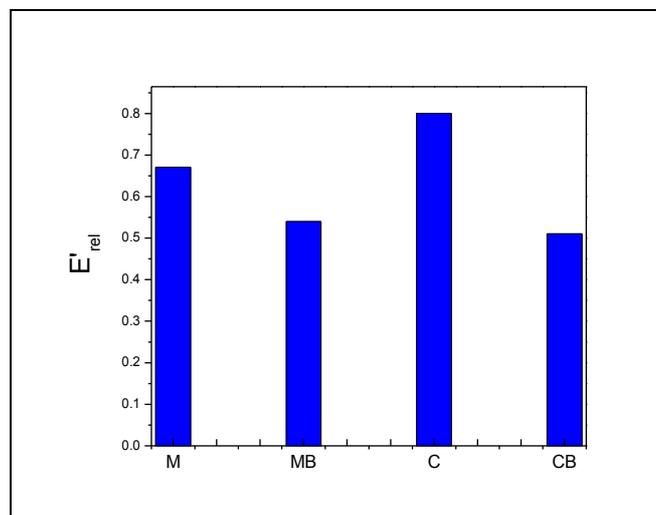


Figura 4.24 – Variación de E' para los distintos materiales –

5 CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible procesar correctamente materiales compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio por la técnica que se utiliza a escala industrial para la fabricación de las palas de los molinos eólicos. Esto quedó demostrado tanto por el contenido de fibras del material final; la distribución de las fibras en la matriz, el bajo contenido de huecos y las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos. Un punto fundamental fue la puesta en punto de la técnica, identificando los parámetros críticos de la misma. Se determinó que uno de los parámetros críticos cuando se trabaja con “infusión en vacío” es el correcto sellado del molde con la bolsa para generar el vacío y así obtener una pieza sana. Cabe aclararse que éste fue uno de los grandes problemas al fabricar las placas; luego de dos intentos fallidos, se implementó como solución la utilización de una segunda bolsa al sistema, que resultó en un mejor sellado del molde. Esta aseguró que si la primera bolsa fallaba o no se generaba un vacío correcto, el sistema quede sellado y la inyección fuera óptima.

Si bien el agregado de bentonita no afectó sensiblemente a la viscosidad y fue posible emplear la misma técnica para fabricar los materiales compuestos modificados con 5% en peso de bentonita; los materiales obtenidos no fueron óptimos ya que las placas de este material mostraron arcilla solamente en una cara. Por otra parte, las micrografías TEM mostraron una parcial aglomeración de la arcilla: Todo esto condujo a materiales con menores propiedades.

A partir de los estudios de absorción de agua conjuntamente con los de propiedades mecánicas a diferentes tiempos de exposición, se pudo determinar que el agua absorbida produce un efecto negativo sobre los materiales compuestos utilizados para la construcción de las palas de los molinos eólicos, produciendo una clara disminución de sus propiedades iniciales. Se encontró una relación exponencial decreciente entre la resistencia en flexión del material compuesto y la cantidad de agua absorbida. El módulo en flexión también se vio afectado por la absorción de agua pero en menor medida.

El agua penetra en el material compuesto deteriorando la interface matriz – fibra (se pudo observar mediante microscopía que las fibras se empezaban a despegar de la matriz) lo que afecta la resistencia en flexión y al corte interlaminar del mismo. Otro resultado importante que corrobora que la interface se deteriora, es la disminución de la resistencia al corte interlaminar; para la cual se encontró una relación lineal decreciente con la cantidad de agua absorbida.

La utilización de distintos ambientes húmedos y distintas temperaturas (temperatura ambiente y 80° C) nos permite extrapolar los datos obtenidos en los tiempos de ensayo (14 meses) a tiempos más largos; lo que resulta fundamental para el diseño de las palas ya que nos permite anticipar la cantidad de agua que absorberá el material en su vida útil y el efecto que la misma tendrá sobre el comportamiento mecánico del mismo.

Todos los resultados pueden utilizarse conjuntamente con propósitos de diseño en la fabricación de palas de generadores eólicos; para predecir las propiedades a la flexión de la pala durante vida útil de los mismos.

6 TRABAJOS FUTUROS

Debido a que aún quedan probetas en los diferentes medios, se seguirá analizando (la absorción y las propiedades mecánicas) para confirmar si se cumplen las correlaciones encontradas, además esto daría la posibilidad de tener datos con casi dos años de exposición. Por otro lado, también se planea verificar si cuando una probeta de las colocadas en 90% de HR, por ejemplo, alcance un valor de absorción igual a uno alcanzado en agua se cumpla que la pérdida del módulo, resistencia y τ sea igual (es decir que las variaciones en las propiedades sólo dependen de la cantidad de agua absorbida).

A partir de este proyecto final surge uno nuevo (en desarrollo) en el cual se diseñará, fabricará y simulará la operación de un generador eólico a escala de laboratorio.

Por otra parte, se puede continuar con la investigación de la influencia de la humedad en materiales compuestos empleados para fabricar palas de molinos eólicos sobre todo en propiedades tales como resistencia a la fatiga e impacto. El estudio de la evolución de estas propiedades con el tiempo es fundamental para poder tener una información más completa para el diseño, ya que este trabajo sólo abarca propiedades mecánicas estáticas. También se podrían utilizar placas de menor espesor para acelerar los ensayos (y así no aumentar la temperatura).

En otra línea, se podría profundizar en la mejora de la dispersión de arcillas en la matriz utilizando una arcilla más compatible con la matriz, y ver si la misma mejora las propiedades del material en función de la absorción de agua.

Otra posibilidad es investigar materiales compuestos de otras matrices termorrígidas analizando la retención de las propiedades mecánicas con la absorción de agua y seleccionando la más adecuada para la fabricación de palas de molinos eólicos, teniendo en cuenta también los parámetros de procesamiento.

Finalmente sería posible realizar un proyecto que permita trabajar conjuntamente con el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la U.N.M.D.P para lograr obtener un generador eólico a escala con el fin de desarrollar un generador eólico en dimensiones reales.

7 REFERENCIAS

- Anderson**, J.C., Leaver K.D., Rawlings R.D. and Alexander J.M. (1990), “*Material Science and Engineering*”, Chapman and Hall India, Madras, India. 1969.
- Alvarez V**, de la Osa O, Vázquez A (2007a) “*Cycle Water Absorption Behaviour of Glass / Vinylester and Glass / Epoxy Composites*”., Journal of Composite Materials 41 (5): 1275 – 1289.
- Alvarez V.A**, Gibson G, Vázquez A (2007b), “*Modeling of dynamical-mechanical properties of vinylester and unsaturated polyester with glass fibre reinforced composites*”, Polymer Degradation and Stability Chapter, Nova Publisher, New York,, Accepted 2007 January 1rst
- ASTM D 570-93**, “*Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*”
- ASTM D 790-03**, “*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*”
- ASTM D 2344-00**, “*Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*”
- Boccard N.** (2009) “*Capacity factor of wind power realized values vs. estimates*”. Energy policy, 37: 2679–2688
- De la Osa O**, Alvarez V, Vázquez A (2006) “*The effect of hygro-thermal history on water and mechanical properties of glass/ vinylester composites*”. Journal of Composite Materials 40: 2009 – 2023
- Deborah**, D.L.C., (2002), Composite Materials: Science and Applications Functional Materials for Modern Technologies, Springer, London
- Drewry M A**, Georgiou G A (2006), “*Wind Turbine NDT*”, 45th Annual British Conference on NDT, Stratford-upon-Avon, UK,
- Edgar A.** Franco Urquiza, María Lluïsa MasPOCH Rulduà (2009), “*Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos*”, Ingenierías, Julio-Septiembre 2009, Vol. XII, No. 44
- Hartman Dave**, Owens Corning (2006), “*Analysis of Wind Turbine Blade Failure Modes*”, Composites & Polycon2006
- Hunston D.** (2006), Juska T., Karbhari V.M., Morgan R, Williams C., “*Effects of Moisture / Aqueous Solutions*”, Gap Analysis for Durability of Fiber Reinforced Polymer Composites in Civil Infraestructure, Chapter 3

Kornmann X., Rees M, Thomann Y., Necola A., Barbezat M. y Thomann R. (2005), *“Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites”*, Composites Science and Technology

Mallick P.K., “Fiber Reinforced Composites” THIRD EDITION

Richardson, T., (1987), *“Composites A Design Guide”*, Industrial Press Inc, New York

Rodríguez E., *“Materiales compuestos con fibras naturales y matrices termorrígidas obtenidas por RTM”*, Tesis de doctorado Facultad de Ingeniería, UNMDP (2005).

Santiago Diego, Lombera Guillermo y Urquiza Santiago (2007), “Modelado Numérico del Proceso *Resin Transfer Moulding* (RTM)”, Mecánica Computacional vol XXVI.

Soares MG, Kind S y Fernández OH (2009). Informe técnico de la Cámara Argentina de Energías renovables: Estado de la industria eólica en la Argentina 2009.

Stadler C y **Ahrndt W.** (2007) Inserción de la generación eólica en el área atlántica de la provincia de Buenos Aires. *VI World Wind Energy conference and Exhibition 2007*. Mar del Plata, Argentina

<http://www.nrel.gov/wind/> (National Renewable Energy Laboratory)

ANEXO I – FICHA TÉCNICA DE LA RESINA –

Carmas Composites	Dolplast	INFORME TECNICO		
		Infusión		
Material Resina poliéster modificada insaturada, de mediana reactividad, de baja viscosidad, con alto contenido de sólidos, no acelerada, de baja contracción y baja emisión de Monomero de Estireno al ambiente.				
Uso principal Laminado mediante sistema de infusión.				
Propiedades				
	Norma	Unidades	Valores	
Aspecto:			Líquido color ámbar rojizo	
Viscosidad :	TM-002-2	cPs	300 – 400	
Valor Acido:	TM-004-1	mgKOH/gr	10 – 25	
Densidad:	TM-001-1	gr/cm ³	1,80 - 2,20	
Tiempo de Gel:	TM-003-1	minutos	9 – 15 (*)	
Temperatura pico exotérmico:	TM-003-1	°C	160 – 195 (*)	
Tiempo al exotérmico:	TM-003-1	minutos	18 – 35	
Estabilidad en estufa a 80 °C:	TM-042-1		Mayor que 48 hrs.	
Estab. a 20 °C a la oscuridad :			Mayor que 6 meses.	
Concentración de Estireno:	TM-005-1	%	32 – 42	
Contracción lineal	TM-007-1	%	1,4 – 2,2	
(*) Acelerador de Cobalto al 2,5 % :	0,4 %.			
(*) Catalizador:	1,0 %.			
(*) Temperatura:	25 °C.			
Propiedades mecánicas de la resina sin refuerzos:				
	Normas	Unidades	Valores	
Tracción	Resistencia:	ASTM D 638	Kg/cm ²	430 ± 50
	Modulo:	ASTM D 638	Kg/cm ²	36700 ± 3500
	Elongacion:	ASTM D 638	%	1,3 ± 0,1
Flexión	Resistencia:	ASTM D 790	Kg/cm ²	800 ± 100
	Modulo:	ASTM D 790	Kg/cm ²	35000 ± 3500
	Elongacion:	ASTM D 790	%	2,7 ± 0,3
Temp. deflexion bajo carga:	ASTM D 648	°C	70 ± 5	
Medidas de precaución Las resinas poliéster son productos químicos por lo tanto es conveniente tomar las siguientes precauciones: No mezclar ni aplicar en ambientes cerrados. Usar guantes protectores. En caso de salpicaduras en los ojos lavar con abundante agua corriente por lo menos durante 15 min. y consultar a un médico. No ingerir alimentos ni bebidas en el área de aplicación. No fumar en dichas áreas. Utilizar sólo agua y jabón para el lavado de las manos y NO solventes. Los utensilios se limpian con MEK o acetona.- Para mayores detalles, consultar las hojas de seguridad correspondientes.				
Carmas Composites s.r.l. garantiza la buena calidad de sus productos y no se responsabiliza por los daños ocasionados por el mal uso de los mismos, reservándose el derecho de modificar o alterar ésta información sin previo aviso.-				
Asistencia Técnica: info@carmas.com.ar			11/07	
www.carmas.com.ar				

“Estudio del efecto de las condiciones ambientales sobre los materiales compuestos utilizados en palas de molinos eólicos”

ANEXO II - FICHAS TÉCNICA DE LAS FIBRAS DE VIDRIO –

Chopped Strand Mat

M123

Technical Data Sheet

M123 chopped strand mat is made with chopped strands of E-glass bound with a powder binder soluble in styrene; this makes it suitable for use with polyester, vinyl ester and epoxy resins.

This mat has a good resistance to watering and chemical agents in anti-corrosion applications.

Identification

Example : M123 450-1040 1E
M123 : Saint-Gobain Vetrotex code
450 : nominal mass per unit area (g/m²)
1040 : roll width (mm)
1E : one trimmed edge
2E : two trimmed edges
0E : no trimmed edges, greatest widths only

Technical characteristics (nominal values)

Mass (g/m ²)	Loss on Ignition (%)	Moisture (%)
225	4.5	
300	4.0	
450	3.5	≤0.20
600	3.5	

Refers to the Standard Product Specification for more precise information on the characteristics of the product.

Properties

- good conformability
- very easy impregnation
- excellent clarity of the UP laminates
- very high tensile strength, suitable for filament winding or continuous laminating
- good resistance to watering and chemical agents in anti-corrosion applications



Chopped Strand Mat



Rooflight sheet

Standard Products Available

Mass (g/m ²)	Roll characteristics (nominal)			
	Width (mm)	Diameter (cm)	Length (m)	Weight (kg)
225			128	
300			96	
450	1040	27	64	30
600			48	

Mat width of 3000mm is available under request.

Individual and bulk packaging

- Individual packaging : each roll is wound on a cardboard tube (internal diameter 76mm)
- Bulk packaging

Width (mm)	Packaging type	Number of rolls	Pallet dimensions L x W x H (mm)	Net Weight (kg)
1040	4 x 4	18	1140 x 1140 x 54	480.0

Storage

M123 mat should be stored in dry condition and in its original packaging. The best conditions are at temperatures between 15°C and 35°C and at a relative humidity between 45% and 85%. If the product is stored at lower temperature (below 15°C), it is advisable to condition the mat in the workshop for at least 24 hours before use, to prevent condensation.

Mass (g/m ²)	Roll characteristics (nominal)			
	Width (mm)	Diameter (cm)	Length (m)	Weight (kg)
225			128	
300			96	
450	1040	27	64	30
600			48	

Mat width of 3000mm is available under request.

Individual and bulk packaging

- Individual packaging :each roll is wound on a cardboard tube (internal diameter 76mm)
- Bulk packaging

Width (mm)	Packaging type	Number of rolls	Pallet dimensions L x W x H (mm)	Net Weight (kg)
1040	4 x 4	16	1140 x 1140 x 54	480.0

Storage

M123 mat should be stored in dry condition and in its original packaging. The best conditions are at temperatures between 15°C and 35°C and at a relative humidity between 35% and 85%. If the product is stored at lower temperature (below 15°C), it is advisable to condition the mat in the workshop for at least 24 hours before use, to prevent condensation.